Geološka karakterizacija 3D seizmičkog zapisa u gornjomiocenskim naslagama sjevernog dijela Bjelovarske subdepresije

Ružić, Tihana

Doctoral thesis / Disertacija

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:081396

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-26**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Tihana Ružić

GEOLOŠKA KARAKTERIZACIJA 3D SEIZMIČKOG ZAPISA U GORNJOMIOCENSKIM NASLAGAMA SJEVERNOG DIJELA BJELOVARSKE SUBDEPRESIJE

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2021

Sveučilište u Zagrebu

Faculty of Science
Department of Geology

Tihana Ružić

GEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE 3D SEISMIC RECORD IN THE UPPER MIOCENE DEPOSITS OF THE NORTHERN PART OF BJELOVAR SUBDEPRESSION

DOCTORAL DISSERTATION

Zagreb, 2021

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Tihana Ružić

GEOLOŠKA KARAKTERIZACIJA 3D SEIZMIČKOG ZAPISA U GORNJOMIOCENSKIM NASLAGAMA SJEVERNOG DIJELA BJELOVARSKE SUBDEPRESIJE

DOKTORSKI RAD

Mentori:
dr. sc. Marijan Kovačić, red. prof.,
dr. sc. Marko Cvetković, izv. prof.

Zagreb, 2021

Sveučilište u Zagrebu

Faculty of Science
Department of Geology

Tihana Ružić

GEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE 3D SEISMIC RECORD IN THE UPPER MIOCENE DEPOSITS OF THE NORTHERN PART OF BJELOVAR SUBDEPRESSION

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisors:
PhD Marijan Kovačić, Full Professor
PhD Marko Cvetković, Associate Professor

Zagreb, 2021

Ova doktorska disertacija izrađena je u Istraživanju i razvoju portfelja, INA- Industrija nafte d.d. pod vodstvom izv. prof. dr. sc. Marijana Kovačića i doc. dr. sc. Marka Cvetkovića, u sklopu Doktorskog studija geologije na Geološkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Zahvale

Zahvaljujem svojim mentorima, prof. dr. sc. Marijanu Kovačiću i izv.prof.dr.sc. Marku Cvetkoviću na strpljivosti, nesebično pruženom znanju, vodstvu i pomoći u radu.

Zahvaljujem i članovima povjerenstva prof. dr. sc. Davoru Paveliću, doc.dr.sc Katarini Gobo i dr. sc. Alanu Vranjkoviću na korisnim informacijama i vrijednim komentarima.

Zahvaljujem bivšim i sadašnjim rukovoditeljima iz moje matične kuće na pruženoj mogućnosti upisa doktorskog studija.

Zahvaljujem na stručnoj pomoći kolegama Branki Krpan, Tomi Molnaru, Ani Majstorović-Bušić, Nadi Krklec i svim ostalim kolegama iz mog radnog kolektiva. Također hvala svima na podršci tijekom mog poslijediplomskog studija.

Zahvaljujem svima koji su na bilo koji način pripomogli u izradi ovog rada

Hvala mojoj cijeloj obitelji na pomoći i razumijevanju.

Mojoj djeci Jakovu Ivanu i Emi Pauli posvećujem ovaj rad.

SADRŽAJ

1. UVOD ..... - 1 -
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA ..... - 4 -
3. ZEMLJOPISNI SMJEŠTAJ ISTRAŽIVANOG PODRUČJA ..... - 6 -
4. REGIONALNI GEOLOŠKI ODNOSI ..... - 8 -
   4.1 PALEOGEOGRAFSKI POLOŽAJ SREDIŠNJEG PARATETHYS-A ..... - 9 -
   4.2 PROMJENE U STRATIGRAFSKOJ NOMENKLATURI PANONSKOG BAZENSKOG SUSTAVA ..... - 12 -
   4.3 HRVATSKI DIO PANONSKOG BAZENSKOG SUSTAVA ..... - 14 -
5. PREGLED GEOLOŠKE GRAĐE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA ..... - 17 -
   5.1. RAZVOJ BJELOVARSKE SUBDEPRESIJE ..... - 17 -
   5.2. LITOSTRATIGRAFSKE JEDINICE ..... - 18 -
      5.2.1 NEFORMALNA JEDINICA "TEMELJNO GORJE" ..... - 20 -
      5.2.2 FORMACIJA MOSLAVAČKA GORA ..... - 21 -
      5.2.3 FORMACIJA IVANIĆ GRAD ..... - 21 -
      5.2.4 FORMACIJA KLOŠTAR-IVANIĆ ..... - 22 -
      5.2.5 FORMACIJA BILOGORA ..... - 22 -
      5.2.6 FORMACIJA LONJA ..... - 23 -
   5.3 OSVRT NA RAZLIČITU LITOSTRATIGRAFSKU PODJELU NASLAGA MLAĐEG MIOCENA I PLIOCENA ..... - 24 -
6. METODE I MATERIJALI ISTRAŽIVANJA ..... - 27 -
   6.1. OPĆENITO O SEIZMIČKIM METODAMA ..... - 27 -
   6.2. SNIMANJE ILI AKVIZICIJA SEIZMIČKIH PODATAKA ..... - 28 -
   6.3. OBRADA SEIZMIČKIH PODATAKA ..... - 31 -
      8.7.1 CMP *GATHERI* ..... - 34 -
      8.7.2 PONOVNA OBRADA SEIZMIČKIH PODATAKA ..... - 36 -
   6.4. ANALIZE SEIZMIČKIH ATRIBUTA ..... - 39 -
      6.4.1 TEORIJSKA OSNOVA ANALIZE SEIZMIČKIH ATRIBUTA ..... - 40 -
      6.4.2 ANALIZA KOMPLEKSNOG SEIZMIČKOG TRAGA ..... - 42 -

6.5. AVO ANALIZA ..... - 49 -
6.6.1 UVOD U AVO ANALIZU ..... - 49 -
6.6.2 TEORIJSKE OSNOVE AVO ANALIZE ..... - 51 -
6.6.3 AVO ATRIBUTI ..... - 63 -
6.6.4 ANGLE STACKOVI ..... - 64 -
6.6. UMJETNE NEURONSKE MREŽE ..... - 66 -
6.6.1 KOHONENOVE MREŽE ..... - 69 -
6.7. SEIZMIČKA INVERZIJA POMOĆU NEURONSKIH MREŽA ..... - 70 -
6.7.1 ANALIZE KAROTAŽNIH KRIVULJA POTREBNIH ZA NEURONSKE MREŽE .. - 71 -
6.7.1.1 PRIMJENA I KARAKTERISTIKE KAROTAŽNIH KRIVULJA SPONTANOG POTENCIJALA 73
6.7.1.2 PRIMJENA I KARAKTERISTIKE KAROTAŽNIH KRIVULJA OTPORNOSTI 74
6.7.1.3 PRIMJENA I KARAKTERISTIKE KAROTAŽNIH KRIVULJA GUSTOĆE 75
6.7.1.4 PRIMJENA I KARAKTERISTIKE KAROTAŽNIH KRIVULJA BRZINE 76
6.7.1.5 KRATAK OPIS MJERENJA POJAVA NOVIH PLINOVA U BUŠOTINI 77
6.8. SEIZMIČKE INVERZIJE 78
7. PREGLED REZULTATA ARHIVSKIH ANALITIČKIH METODA 82
7.1 PREGLED DOSADAŠNJIH GEOKEMIJSKIH ANALIZA 82
7.1.1 PREGLED GEOKEMIJSKIH ANALIZA ZA BUŠOTINU B-1 82
7.1.2 PREGLED GEOKEMIJSKIH ANALIZA ZA BUŠOTINU B-2 84
7.1.3 PREGLED GEOKEMIJSKIH ANALIZA ZA BUŠOTINU B-3 85
7.2 PREGLED DOSADAŠNJIH LABORATORIJSKIH PETROGRAFSKIH, SEDIMENTOLOŠKIH I BIOSTRATIGRAFSKIH ANALIZA 86
7.2.1 PREGLED ANALIZA ZA BUŠOTINU B-1 86
7.2.2 PREGLED ANALIZA ZA BUŠOTINU 2 87
7.2.3 PREGLED ANALIZA ZA BUŠOTINU B-3 88
8. REZULTATI 89
8.1 SEIZMIČKA INTERPRETACIJA 89
8.1.1 IZRADA SINTETSKOG SEIZMOGRAMA 89
8.1.2 INTERPRETACIJA HORIZONATA 91
8.1.3 STRUKTURNE KARTE 92

8.2 ANALIZE SEIZMIČKIH ATRIBUTA 95
8.2.1 ATRIBUT TRENUTNE AMPLITUDE 95
8.2.2 ATRIBUT TRENUTNE FREKVENCIJE 97
8.2.3 ATRIBUT RMS AMPLITUDE 100
8.2.4 ATRIBUT KOHERENCIJE ILI SLIČNOSTI 101
8.2.5 SPEKTRALNA DEKOMPOZICIJA 103
8.2.6 USPOREDBA ATRIBUTA KOHERENCIJE I SPEKTRALNE DEKOMPOZICIJE 105
8.2.7 KOMBINIRANI SEIZMIČKI ATRIBUT *SWEETNESS* 110
8.3 AVO ATRIBUTI 112
8.3.1 PRIMARNI AVO ATRIBUTI 112
8.3.2 SEKUNDARNI AVO ATRIBUTI 114
8.3.3 KOMBINIRANI AVO ATRIBUTI 120
8.4 AVO ANALIZA 127
8.7.1 AVO ANALIZA ZA BUŠOTINU B-1 127
8.7.2 AVO ANALIZA ZA BUŠOTINU B-2 128
8.7.3 AVO ANALIZA ZA BUŠOTINU B-3 129
8.7.4 OCJENJIVANJE RAZLIČITIH ULAZNIH PODATAKA ZA AVO ANALIZU 130
8.5 NEURONSKE MREŽE 138
8.5.1 SAMOORGANIZIRAJUĆE UMJETNE NEURONSKE MREŽE (SOANN) 138
8.5.2 ANALIZE KAROTAŽNIH KRIVULJA POTREBNIH ZA SEIZMIČKU INVERZIJU POMOĆU NEURONSKIH MREŽA 139
8.5.2.1 PREDVIĐANJE VRIJEDNOSTI SPONTANOG POTENCIJALA 142
8.5.2.2 PREDVIĐANJE VRIJEDNOSTI OTPORNOSTI 144
8.5.2.3 PREDVIĐANJE VRIJEDNOSTI GUSTOĆE 146
8.5.2.4 PREDVIĐANJE VRIJEDNOSTI BRZINA 149
8.6 SEIZMIČKE INVERZIJE (INVERZIJA U BOJI) 151
8.7 GEOLOŠKA INTERPRETACIJA 156
8.7.1 TEORIJSKI OPIS TALOŽNIH MEHANIZAMA U PROMATRANOM PROSTORU . 156
8.7.2 PREGLED PRETHODNE INTERPRETACIJE 157
8.7.1 INTERPRETACIJA ATRIBUTA SPEKTRALNE DEKOMPOZICIJE 160
9. RASPRAVA 168
9.1 INTERPRETACIJA SEIZMIČKIH ATRIBUTA 168

9.1.1 INTERPRETACIJA OSNOVNIH ATRIBUTA 168
9.1.2 INTERPRETACIJA KOMBINIRANIH ATRIBUTA 169
6.7.1.6 INTERPRETACIJA ATRIBUTA SWEETNESS 169
6.7.1.7 INTERPRETACIJA ATRIBUTA SPEKTRALNE DEKOMPOZICIJE 169
6.7.1.8 KOMBINIRANA INTERPRETACIJA ATRIBUTA KOHERENCIJE I SPEKTRALNE DEKOMPOZICIJE 170
9.2 USPOREDBA DIJELA REZULTATA S DOSADAŠNJIM ISTRAŽIVANJIMA 170
9.3 AVO ANALIZA 175
9.2.1 ANALIZA AVO ATRIBUTA 176
9.4 ANALIZA ATRIBUTA DOBIVENIH SEIZMIČKOM INVERZIJOM POMOĆU NEURONSKIH MREŽA 179
9.5 ANALIZA AKUSTIČNIH IMPEDANCIJA 180
9.6 ANALIZA AKUSTIČNIH IMPEDANCIJA DOBIVENIH INVERZIJOM U BOJI 183
9.7 ZBIRNI ZAKLJUČCI SVIH ATRIBUTNIH ANALIZA 184
9.8 PREGLED I ZAKLJUČCI NA TEMELJU LABORATORIJSKIH ANALIZA 190
10. ZAKLJUČAK 193
11. PROŠIRENI SAŽETAK 195
12. EXTENDED ABSTRACT 198
13. POPIS KORIŠTENE LITERATURE 201
14. ŽIVOTOPIS I POPIS OBJAVLJENIH RADOVA 219

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Geološki odsjek

Doktorska disertacija

GEOLOŠKA KARAKTERIZACIJA 3D SEIZMIČKOG ZAPISA U GORNJOMIOCENSKIM NASLAGAMA SJEVERNOG DIJELA BJELOVARSKE SUBDEPRESIJE

TIHANA RUŽIĆ

Sažetak: Područje istraživanja nalazi se u sjevernom dijelu Bjelovarske subdepresije. Na ovom su području izbušene tri bušotine: B-1, B-2 i B-3. Bušotinom B-1 nađena su dva plinska ležišta unutar pješčenjaka Pepelana, člana formacije Kloštar Ivanić. U bušotinama B-2 i B-3 nisu dokazane značajnije pojave ugljikovodika, već količine plinova u vrlo malim postocima. Na temelju analize jednostavnih i kombiniranih seizmičkih atributa, te primarnih i sekundarnih AVO (*Amplitude versus offset*) atributa krovine dvaju ležišta i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata zaključeno je da se bušotina B-1 nalazi u području povećanih amplituda na gotovo svim atributima. Izrazito razgraničenje između pozitivne i negativnih bušotina pokazuju sekundarni AVO atributi *Sign(Intercept)*gradient* i *Intercept*Gradient,* te njihova primjena ukazuje na pozitivne indikacije u budućim istraživanjima ležišta plina. Rezultati analiza vrijednosti odabranih svojstava (spontani potencijal, gustoća, otpornost, brzina) pomoću neuronskih mreža pokazuju slične rezultate na području pozitivne bušotine B-1.
Usporedno tumačenje geometrijskog atributa koherencije i kombiniranog seizmičkog atributa spektralne dekompozicije zajedno sa atributom dobivenog AVO RGB *Blending* metodom jasnije opisuje razlomljene zone, obrise kanala, kanale i turbiditne lepeze na jugu i jugoistoku analiziranog područja, te bi ta vrsta primjene bila od koristi za točniju interpretaciju u budućim istraživanjima.

Rad je izrađen u INA-Industrija nafte d.d, Avenija Većeslava Holjevca 10, Zagreb

Ključne riječi: Bjelovarska subdepresija, seizmički atributi, AVO analiza, seizmičke inverzije, istraživanje ugljikovodika

Jezik izvornika: hrvatski

Mentori: dr. sc. Marijan Kovačić, red. prof., PMF, Sveučilište u Zagrebu
dr. sc. Marko Cvetković, izv. prof., RGNF, Sveučilište u Zagrebu

BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb
Faculty of Science
Department of Geology

Doctoral thesis

GEOLOGICAL CHARACTERIZATION OF THE 3D SEISMIC RECORD IN THE UPPER MIOCENE DEPOSITS OF THE NORTHERN PART OF BJELOVAR SUBDEPRESSION

TIHANA RUŽIĆ

Abstract: The research area is in the northern part of the Bjelovar subdepression. Three wells were drilled in this area: B-1, B-2, and B-3. Two gas accumulations were discovered in well B-1, within the Pepelan sandstone, which is a member of the Kloštar Ivanić formation. No significant occurrences of hydrocarbons were proven in wells B-2 and B-3, except for gas in very small percentages. Based on the analysis of simple and combined seismic attributes, and primary and secondary AVO (Amplitude versus offset) attributes of two resevoirs and associated lithostratigraphic equivalents, it was concluded that well B-1 is in the range of increased amplitudes on almost all attributes. A distinction between positive and negative wells is shown by the secondary AVO attributes Sign (Intercept) * gradient and Intercept * Gradient, and their application may be useful for future gas reservoir exploration. The results of the analysis of the values of selected properties (spontaneous potential, density, resistivity, velocity) using neural networks show similar results in the positive B-1 well.
Comparative interpretation of the geometric attribute of coherence and the combined seismic attribute of spectral decomposition together with the attribute obtained by the AVO RGB Blending method more clearly describes the faults, channel contours, channels and turbidite fans in the south and southeast of the analyzed area. and this type of application would be useful for as accurate an interpretation as possible in future research.

Thesis completed in INA Plc, Avenija Većeslava Holjevca 10, Zagreb

Keywords: Bjelovar subdepression, seismic attributes, AVO analysis, seismic inversions, hydrocarbon exploration

Original in Croatian

Supervisors: PhD Marijan Kovačić, Full Professor
PhD Marko Cvetković, Associate Professor

POPIS SLIKA

Slika 3.1. Položajna karta analiziranog područja sa položajima analiziranih bušotina B-1, B-2 i B-3. ....- 6 -
Slika 3.2. Geografski položaj Bjelovarske subdepresije....- 7 -
Slika 4.1. Rasprostiranje Panonskog bazenskog sustava uključujući glavne tektonske i zemljopisne jedinice Alpa, Karpata, Dinarida (modificirano prema Cvetković et al., 2019)....- 8 -
Slika 4.1.1. Podjela Paratethysa (modificirano prema Kováč et al., 2017).... - 10 -
Slika 4.2.1. Karta s glavnim tektonskim karakteristikama hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava. (preuzeto iz Pavelić & Kovačić, 2018).... - 14 -
Slika 5.2.1.: Shematski stratigrafski stup zapadnog dijela Dravske depresije (modificirano prema Pavelić & Kovačić, 2018- dodana nova kronostratigrafija, Šimon, 1980 – litostratigrafska podjela).... - 20 -
Slika 5.3.1.: Litostratigrafska podjela gornjeg miocena i pliocena u Murskoj depresiji i istočnom i zapadnom dijelu Dravske depresije (preuzeto i modificirano iz Sebe et al., 2020).... - 25 -
Slika 5.3.2.: Korelacija gornjomiocenskih i pliocenskih litostratigrafskih jedinica u Hrvatskoj i Mađarskoj Sebe et al. (2020). Slika je djelomično prevedena.... - 26 -
Slika 6.1.1.: Put seizmičkog vala.... - 27 -
Slika 6.2.1: Inline i Crossline smjerovi snimanja seizmičkih podataka.... - 29 -
Slika 6.2.2. 3D volumen Grubišno Polje i analizirano područje .... - 30 -
Slika 6.2.3.: Shema prekrivanja.... - 30 -
Slika 6.3.1. Proces migracije.... - 33 -
Slika 6.3.1.1. Vrste gathera (https://subsurfwiki.org/wiki/Gather).... - 35 -
Slika 6.3.1.2. Dijagram tijeka procesa stekiranja ili zbrajanja snimljenih seizmičkih tragova (Oilfield Glossary, Schlumberger, https://glossary.oilfield.slb.com/en/terms/s/stack modificirano).... - 36 -
Slika 6.3.2.1. Mreža seizmičkog volumena.... - 37 -
Slika 6.3.2.2. Usporedba vremenske migracije (lijevo) i dubinske migracije konvertirane u vremensku domenu (desno)(preuzeto iz završnog izvještaja o reobradi 3D seizmičkih podataka na polju Grubišno Polje, 2018) . - 38 -
Slika 6.3.2.3. Usporedba različitih obrada seizmičkih podataka (Post-stack vremenska, Pre-stack vremenska i Pre-stack dubinska migracija).... - 39 -
Slika 6.4.1.1.: Podjela seizmičkih atributa na temelju vrste ulaznih podataka .... - 41 -
Slika 6.4.2.1.: Prikaz kompleksnog seizmičkog traga (Taner et al., 1979).... - 44 -
Slika 6.5.1.1. Koeficijent refleksije na granici slojeva (Sheriff, 1978). .... - 51 -
Slika 6.5.2.1.: Lom valova nastalih upadnim p-valom (v1<v2) (Russel et al., 2011).... - 52 -
Slika 6.5.2.2: Konstrukcija križnog dijagrama intercept/gradient .... - 54 -
Slika 6.5.2.3. Klasifikacija AVO odziva plinom zasićenih pijesaka - AVO klase po Rutherford i Williams, (1989).... - 56 -
Slika 6.5.2.4.: Graf offset/vrijeme.... - 58 -
Slika 6.5.2.5.: Usporedba seizmičkih parcijalnih stackova (modificirano prema Wei et al., 2006).... - 58 -
Slika 6.5.2.6.: Ulazni CMP gather, Prekondicijski i Angle gather(Konstruirani u programskom paketu Paradigma na podacima seizmičkog volumena Grubišno Polje)).... - 59 -
Slika 6.5.2.7.: Moguće kombinacije p i s – vala, te AVO odzivi za modele pijesaka zasićenih vodom i plinom (modificirano prema https://wiki.aapg.org/Amplitude_versus_offset_(AVO)_analysis#AVO_feasibility_studies).... - 61 -

Slika 6.6.4.1. AVO RGB Blending tehnika (prema Rutherford and Williams 1989)(modificirano prema https://www.petrole.gov.mr/IMG/pdf/2014_dana_avo_rgb_blending_v7_for_mauritanidespdf.pdf)..... - 65 -
Slika 6.6.1: Struktura neuronske mreže ..... - 66 -
Slika 6.6.1.1. Podaci o nenadziranim klasterima učenja isključivo prema značajkama njihove sličnosti (Sarkar, 2018)..... - 69 -
Slika 6.7.1.: Pojednostavljeni prikaz predikcije odabranih svojstava pomoću neuronskih mreža..... - 70 -
Slika 6.7.2.: Korelacija triju analiziranih bušotina s prikazanim karotažnim krivuljama i krovinama dvaju ležišta 72
Slika 6.7.1.1.1. Izgled krivulje spontanoga potencijala s pripadajućim osnovnim linijama te probušenim litološkim sastavom. Niže vrijednosti ukazuju na propusne stijene (preuzeto iz Balić, 1993)..... 73
Slika 6.7.1.2.1. Izgled karotažne krivulje otpornosti (preuzeto i modificirano iz https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-log-interpretation, 26.11.2021.)..... 74
Slika 6.7.1.3.1.: Usporedni prikaz karotažne krivulje gustoće i neutronske poroznosti, te litološkog sastava (modificirano iz http://rgn.hr/~joresko/nids_joresko/Prvi_dio/Uvod.pdf , 2012) 75
Slika 6.7.1.4.1.: Osnovna sonda za zvučnu karotažu (Prostiranje valova u bušotini i formaciji), modificirano (Schlumberger, 2007) 76
Slika 6.8.1.: Proces obrade podataka potrebnih za AVO analize i seizmičke inverzije..... 78
Slika 6.8.2.: Proces seizmičke inverzije 79
Slika 6.8.1.1: Utjecaj ograničenog pojasa seizmičkih podataka na inverziju 80
Slika 7.1.1.1. Usporedba ugljikovodične raspodjele nafti-kondenzata bušotine B -1 i bušotina Grubišno Polje(preuzeto i modificirano iz Barić, 1997) 83
Slika 8.1.1.1.: Sintetski seizmogram za bušotinu B-1 90
Slika 8.1.1.2.: Sintetski seizmogram za bušotinu B-2 90
Slika 8.1.1.3.: Sintetski seizmogram za bušotinu B-3 91
Slika 8.1.2.1.: Seizmički profil 1 - 1' kroz bušotinu B-1 s interpretiranim horizontima krovine Ležišta 1 i Ležišta 2 i pripadajućim litostratigrafskim ekvivalentima..... 92
Slika 8.1.3.1.: Strukturna karta po krovini Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata (Interna dokumentacija INA d.d)..... 93
Slika 8.1.3.2. Strukturna karta po krovini Ležišta 2 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata (Interna dokumentacija INA d.d)..... 94
Slika 8.2.1.1.: Atribut trenutne amplitude – profil kroz bušotinu B-1(žuta i ružičasta boja prikazuju područja visokih amplituda koja mogu ukazivati na zasićenje ugljikovodicima, ali i na litološke promjene)..... 95
Slika 8.2.1.2.: Atribut trenutne amplitude – profil kroz bušotinu B-2 (žuta i ružičasta boja prikazuju područja visokih amplituda koja mogu ukazivati na zasićenje ugljikovodicima, ali i na litološke promjene)..... 96
Slika 8.2.1.3. Atribut trenutne amplitude – profil kroz bušotinu B-3(žuta i ružičasta boja prikazuju područja visokih amplituda koja mogu ukazivati na zasićenje ugljikovodicima, ali i na litološke promjene)..... 96
Na seizmičkim podacima atributa trenutne amplitude unesene su dubine pojava novih plinova na sve tri bušotine te su konvertirane u vrijeme. Tablica 8.2.1.1. prikazuje vrijednosti amplituda na vremenima pojavljivanja novih plinova (NP) gdje oznake 1 i 2 označavaju krovine Ležišta 1 i Ležišta 2 i njihovih litostratigrafskih ekvivalenata. Na pozitivnoj bušotini B-1 na nivou oba ležišta vidljive su izrazito visoke amplitude, većih vrijednosti u odnosu na druge dvije bušotine. Bez obzira na pojave novih plinova u manjim postocima, viši postoci novih plinova ipak ukazuju na više amplitude. 97
Slika 8.2.2.1: Atribut trenutne frekvencije – profil kroz bušotinu B-1(plava boja prikazuje područja niskih frekvencija koja mogu ukazivati na razlomljene zone ili niskofrekvencijsku sjenu) 98

Slika 8.2.2.2: Atribut trenutne frekvencije – profil kroz bušotinu B-2(plava boja prikazuje područja niskih frekvencija koja mogu ukazivati na razlomljene zone ili ili niskofrekvencijsku sjenu)..... 99
Slika 8.2.2.3: Atribut trenutne frekvencije – profil kroz bušotinu B-3(plava boja prikazuje područja niskih frekvencija koja mogu ukazivati na razlomljene zone ili ili niskofrekvencijsku sjenu)..... 99
Slika 8.2.3.1.: RMS amplituda po krovini Ležišta 1 odnosno njegovih litostratigrafskih ekvivalenata (povišene vrijednosti u svijetlo plavoj i zelenoj boji ukazuju na područja boljih rezervoarskih svojstava)..... 100
Slika 8.2.3.2.: RMS amplituda po krovini Ležišta 2 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata (povišene vrijednosti u zelenoj, žutoj i narančastoj boji ukazuju na područja boljih rezervoarskih svojstava)..... 101
Slika 8.2.4.1.: Atribut koherencije po horizontu krovine Ležišta 1 i njihovih ekvivalenata (Visoka razina sličnosti u bijeloj i sivoj boji prikazuje značajke kao što su kanali, a niska razina u tamnim nijansama sive i crnoj boji razlomljene zone i rasjede)..... 102
Slika 8.2.4.2.: Atribut koherencije po horizontu krovine Ležišta 2 i njihovih ekvivalenata (Visoka razina sličnosti u bijeloj i sivoj boji prikazuje značajke kao što su kanali, a niska razina u tamnim nijansama sive i crnoj boji razlomljene zone i rasjede)..... 103
Slika 8.3.5.1.: Spektralna dekompozicija po horizontu krovine Ležišta 1 (preklapanja boja prikazana su kao najniži frekvencijski raspon u seizmičkom skupu podataka u crvenoj boji-15 Hz, dominantna frekvencija u zelenoj boji-25 Hz i najviše frekvencije u plavoj boji- 35 Hz, a predstavljaju bolju predodžbu kontinuiteta kanalnih tijela i moguću kvalitetu rezervoara)..... 104
Slika 8.3.5.2.: Spektralna dekompozicija po horizontu krovine Ležišta 2(preklapanja boja prikazana su kao najniži frekvencijski raspon u seizmičkom skupu podataka u crvenoj boji-15 Hz, dominantna frekvencija u zelenoj boji-25 Hz i najviše frekvencije u plavoj boji- 35 Hz, a predstavljaju bolju predodžbu kontinuiteta kanalnih tijela i moguću kvalitetu rezervoara)..... 105
Slika 8.2.6.1.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu 40 ms iznad Ležišta 1..... 107
Slika 8.2.6.2.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu Ležišta 1 107
Slika 8.2.6.3.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu 40 ms ispod Ležišta 1..... 108
Slika 8.2.6.4.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu 60 ms ispod Ležišta 1..... 108
Slika 8.2.6.5.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu 20 ms iznad Ležišta 2..... 109
Slika 8.2.6.6.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu Ležišta 2 109
Slika 8.2.6.7.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu 30 ms ispod Ležišta 2..... 110
Slika 8.2.6.8.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu 50 ms ispod Ležišta 2..... 110
Slika 8.2.7.1.: Ekstrahirana RMS amplituda na seizmičkom volumenu atributa Sweetness po krovini Ležišta 1(Povišene vrijednosti amplituda u žutoj i crvenoj boji prikazuju područja boljih rezervoarskih svojstava)..... 111
Slika 8.2.7.2.: Ekstrahirana RMS amplituda na seizmičkom volumenu atributa Sweetness po krovini Ležišta 2(Povišene vrijednosti amplituda u žutoj i crvenoj boji prikazuju područja boljih rezervoarskih svojstava)..... 112
Slika 8.3.1.1.: RMS amplituda na volumenu gradijenta po krovini Ležišta 1(područja povišenih vrijednosti amplituda u žutoj, narančastoj i crvenoj boji mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima)..... 113

Slika 8.3.1.2.: RMS amplituda na volumenu gradijenta po krovini Ležišta 2(područja povišenih vrijednosti amplituda u žutoj, narančastoj i crvenoj boji mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima).....114
Slika 8.3.2.1.: RMS amplituda na volumenu Sign (intercept) * gradient po krovini Ležišta 1 (područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od zelene do crvene boje na prikazanoj skali mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima) 115
Slika 8.3.2.2.: RMS amplituda na volumenu Sign (Intercept) * Gradient po krovini Ležišta 2(područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od zelene do crvene boje na prikazanoj skali mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima) 116
Slika 8.3.2.3.: RMS amplituda na volumenu Intercept * Gradient po krovini Ležišta 1(područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od crvene do plave boje na prikazanoj skali mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima) 117
Slika 8.3.2.4.: RMS amplituda na volumenu Intercept * Gradient po krovini Ležišta 2(područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od crvene do plave boje na prikazanoj skali mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima) 118
Slika 8.3.2.5.: RMS amplituda na volumenu atributa AVO snaga po krovini Ležišta 1(područja povišenih vrijednosti amplituda u u zelenoj boji na prikazanoj skali mogu ukazivati na bolja rezervoarska svojstva i žutoj i crvenoj na eventualno zasićenje ugljikovodicima).....119
Slika 8.3.2.6.: RMS amplituda na volumenu atributa AVO snaga po krovini ekvivalent Ležišta 2 (područja povišenih vrijednosti amplituda u u zelenoj boji na prikazanoj skali mogu ukazivati na bolja rezervoarska svojstva i žutoj i crvenoj na eventualno zasićenje ugljikovodicima).....120
Slika 8.3.3.1. Ekstrahirana RMS amplituda na kombiniranom AVO atributu (Far -Near) * Far po krovini Ležišta 1(područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od crvene do žute boje na prikazanoj skali ističu AVO anomalije klasa II & III i mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima).....121
Slika 8.3.3.2. Ekstrahirana RMS amplituda na kombiniranom AVO atributu (Far -Near) * Far po krovini Ležišta 2(područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od crvene do žute boje na prikazanoj skali ističu AVO anomalije klasa II & III i mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima).....122
Slika 8.3.3.3. Kombinirani atribut dobiven AVO RGB blending metodom duž horizonta krovine Ležišta 1(preklapanje seizmičkih skupova podataka bližih offseta u crvenoj, srednjih u zelenoj i dalekih u plavoj boji jasnije ističe kontinuitet kanalnih tijela i razlomljene zone) 123
Slika 8.3.3.4. Kombinirani atribut dobiven AVO RGB blending metodom duž horizonta krovine Ležišta 2(preklapanje seizmičkih skupova podataka bližih offseta u crvenoj, srednjih u zelenoj i dalekih u plavoj boji jasnije ističe kontinuitet kanalnih tijela i razlomljene zone) 124
Slika 8.3.3.5. Ekstrahirana RMS amplituda duž horizonta krovine Ležišta 1 na volumenu dalekih offseta (područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od zelene do crvene boje na prikazanoj skali mogu ukazivati na eventualno isplativo zasićenje ugljikovodicima) 125
Slika 8.3.3.6. Ekstrahirana RMS amplituda duž horizonta krovine Ležišta 2 na volumenu dalekih offseta (područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od zelene do crvene boje na prikazanoj skali mogu ukazivati na eventualno isplativo zasićenje ugljikovodicima) 126
Slika 8.4.1.1.: AVO analiza na bušotini B-1(na gatheru lijevo vidljivo je povećanje amplitude s offsetom duž krovina Ležišta 1 i 2, a na preklopljenom volumenu Sign(intercept)*gradient u sredini povećane vrijednosti amplituda koje su na križnom dijagramu Intercept/Gradient desno dolje zaokružene kao AVO klasa II i III što ukazuje na zasićenje ugljikovodicima).....127
Slika 8.4.2.2.: AVO analiza na bušotini B-2(na gatheru lijevo vidljivo je povećanje amplitude s offsetom duž krovine Ležišta 2, a na preklopljenom volumenu Sign(intercept)*gradient u sredini povećane vrijednosti

amplituda koje su na križnom dijagramu Intercept/Gradient desno dolje zaokružene kao AVO klasa II i III što ukazuje na zasićenje ugljikovodicima u ovom slučaju u malim postocima) 128
Slika 8.4.3.1.: AVO analiza na bušotini B-3(na gatheru lijevo vidljivo je povećanje amplitude s offsetom duž krovine Ležišta 2, a na preklopljenom volumenu Sign(intercept)*gradient u sredini povećane vrijednosti amplituda koje su na križnom dijagramu Intercept/Gradient desno dolje zaokružene kao AVO klasa II i III što ukazuje na zasićenje ugljikovodicima u ovom slučaju u malim postocima) 129
Slika 8.4.4.1. Angle gather na bušotini B-1 te pripadajući dijagrami ponašanja amplitude u odnosu na kut od 30° za krovinu Ležišta 1 i Ležišta 2 130
Slika 8.4.4.2. Angle gather na bušotini B-2 te pripadajući dijagrami ponašanja amplitude u odnosu na kut od 30° za ekvivalente krovina Ležišta 1 i Ležišta 2 131
Slika 8.4.4.3.. Angle gather na bušotini B-3 te pripadajući dijagrami ponašanja amplitude u odnosu na kut od 30° za ekvivalente krovina Ležišta 1 i Ležišta 2 131
Slika 8.4.4.4.. Angle gather na bušotini B-1 te pripadajući dijagrami ponašanja amplitude u odnosu na kut od 45° za za krovine Ležišta 1 i Ležišta 2 132
Slika 8.4.4.5. Angle gather na bušotini B-2 te pripadajući dijagrami ponašanja amplitude u odnosu na kut od 45° za ekvivalente krovina Ležišta 1 i Ležišta 2 133
Slika 8.4.4.6. Angle gather na bušotini B-3 te pripadajući dijagrami ponašanja amplitude u odnosu na kut od 45 za za ekvivalente krovina Ležišta 1 i Ležišta 2 133
Slika 8.4.4.7. AVO križni dijagram Intercept/Gradient sa zaokruženom anomalijom u sve četiri klase (lijevo) i AVO križni dijagram s položajima anomalije pojedinih bušotina izdvojene kao točkasti podatak (desno) na bušotini B-1 u slučaju kada su se koristili kutovi do 30 stupnjeva 134
Slika 8.4.4.8. AVO križni dijagram Intercept/Gradient sa zaokruženom anomalijom u sve četiri klase (lijevo) i AVO križni dijagram s položajima anomalije pojedinih bušotina izdvojene kao točkasti podatak (desno) na bušotini B-1 u slučaju kada su se koristili kutovi do 45 stupnjeva 135
Slika 8.4.4.9. AVO križni dijagram Intercept/Gradient sa zaokruženom anomalijom u sve četiri klase (lijevo) i AVO križni dijagram s položajima anomalije pojedinih bušotina izdvojene kao točkasti podatak (desno) na bušotini B-2 u slučaju kada su se koristili kutovi do 30 stupnjeva 135
Slika 8.4.4.10. AVO križni dijagram Intercept/Gradient sa zaokruženom anomalijom u sve četiri klase (lijevo) i AVO križni dijagram s položajima anomalije pojedinih bušotina izdvojene kao točkasti podatak (desno) na bušotini B-2 u slučaju kada su se koristili kutovi do 45 stupnjeva 136
Slika 8.4.4.11. AVO križni dijagram Intercept/Gradient sa zaokruženom anomalijom u sve četiri klase (lijevo) i AVO križni dijagram s položajima anomalije pojedinih bušotina izdvojene kao točkasti podatak (desno) na bušotini B-3 u slučaju kada su se koristili kutovi do 30 stupnjeva 136
Slika 8.4.4.12. AVO križni dijagram Intercept/Gradient sa zaokruženom anomalijom u sve četiri klase (lijevo) i AVO križni dijagram s položajima anomalije pojedinih bušotina izdvojene kao točkasti podatak (desno) na bušotini B-3 u slučaju kada su se koristili kutovi do 45 stupnjeva 137
Slika 8.5.1.1.: SOANN mape 2x2 topološke distribucije (lijevo) i 3x3 topološke distribucije (desno) duž horizonta krovine Ležišta 1 (preuzeto i modificirano iz Ružić & Cvetković, 2021) 138
Slika 8.5.2.1.: Analiza EK dijagrama za bušotinu B -1 139
(Preuzeto iz Tehničke dokumentacije INA d.d.) 139
Slika 8.5.2.2.: Analiza EK dijagrama za bušotinu B -2 140
(Preuzeto iz Tehničke dokumentacije INA d.d.) 140
Slika 8.5.2.3.: Analiza EK dijagrama za bušotinu B -3 141
(Preuzeto iz Tehničke dokumentacije INA d.d.) 141

Slika 8.5.2.1.1.: Predviđanje vrijednosti spontanog potencijala pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u žutoj boji prikazuju propusne stijene, a više vrijednosti u smeđoj boji nepropusne stijene)....143
Slika 8.5.2.1.2.: Predviđanje karotažnih krivulja spontanog potencijala pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u žutoj boji prikazuju propusne stijene, a više vrijednosti u smeđoj boji nepropusne stijene)....144
Slika 8.5.2.2.1.: Predviđanje vrijednosti otpornosti(B-1, B-2, B-3) pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u ljubičastoj boji prikazuju niže otpornosti, a više vrijednosti u narančastoj boji više otpornosti. Pješčenjaci i ugljikovodici odlikuju se visokim otpornostima) 145
Slika 8.5.2.2.1: Predviđanje karotažnih krivulja otpora (B-1, B-2, B-3) pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u ljubičastoj boji prikazuju niže otpornosti, a više vrijednosti u narančastoj boji više otpornosti. Pješčenjaci i ugljikovodici odlikuju se visokim otpornostima) 146
Slika 8.5.2.3.1. Predviđanje vrijednosti gustoće (B-1, B-2, B-3) pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u ljubičastoj boji prikazuju niže gustoće, a više vrijednosti u narančastoj boji veće gustoće. Pješčenjaci, voda i ugljikovodici smanjuju gustoću)....147
Slika 8.5.2.3.2.: Predviđanje vrijednosti gustoće (B-1, B-2, B-3) pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u ljubičastoj boji prikazuju niže gustoće, a više vrijednosti u narančastoj boji veće gustoće. Pješčenjaci, voda i ugljikovodici smanjuju gustoću)....148
Slika 8.5.2.4.1: Predviđanje vrijednosti brzina- Sonic (B-1, B-2, B-3) pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u ljubičastoj boji prikazuju više brzine, a više vrijednosti u narančastoj boji niže brzine jer se radi o vrijednostima 1/v. Ugljikovodici smanjuju brzinu) 149
Slika 8.5.2.4.2.: Predviđanje vrijednosti brzina- Sonic (B-1, B-2, B-3) pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u ljubičastoj boji prikazuju više brzine, a više vrijednosti u narančastoj boji niže brzine jer se radi o vrijednostima 1/v. Ugljikovodici smanjuju brzinu) 150
Slika 8.6.1.: Inverzija u boji na seizmičkom profilu kroz bušotinu B-1(vrijednosti na skali u ljubičastoj boji prikazuju područja visokih, a u zelenoj niskih akustičnih impedancija. Ugljikovodici smanjuju akustične impedancije, a plića područja se također odlikuju nižim akustičnim impedancijama). 152
Slika 8.6.2.: Inverzija u boji na seizmičkom profilu kroz bušotinu B-2(vrijednosti na skali u ljubičastoj boji prikazuju područja visokih, a u zelenoj niskih akustičnih impedancija. Ugljikovodici smanjuju akustične impedancije, a plića područja se također odlikuju nižim akustičnim impedancijama). 153
Slika 8.6.3.: Inverzija u boji na seizmičkom profilu kroz bušotinu B-3(vrijednosti na skali u ljubičastoj boji prikazuju područja visokih, a u zelenoj niskih akustičnih impedancija. Ugljikovodici smanjuju akustične impedancije, a plića područja se također odlikuju nižim akustičnim impedancijama). 153
Slika 8.6.4: Inverzija u boji po horizontu krovine Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata (vrijednosti na skali u ljubičastoj boji prikazuju područja visokih, a u zelenoj niskih akustičnih impedancija. Ugljikovodici smanjuju akustične impedancije.)....154
Slika 8.6.5: Inverzija u boji po horizontu krovine Ležišta 2 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata (vrijednosti na skali u ljubičastoj boji prikazuju područja visokih, a u zelenoj niskih akustičnih impedancija. Ugljikovodici smanjuju akustične impedancije.)....155
Slika 8.7.1.1.: Turbiditna ili podvodna lepeza (modificirano prema Reading & Richards, 1994) 156

Slika 8.7.1.: B-3, J-1 (992-1001 m) prikaz II metra jezgrovanog intervala – Pepelana pješčenjaci 158
Slika 8.7.2.: Seizmički atribut Variance i paleookolišna interpretacija istraživanog područja (preuzeto iz tehničke dokumentacije INA d.d., Studija seizmičkih atributa, 2020) 158
Slika 8.7.3.: Interpretacija na kombiniranom seizmičkom atributu spektralne dekompozicije duž horizonta Ležišta 2 159
Slika 9.2.2. Vidljive klinoforme iznad formacije Kloštar Ivanić unutar Bilogora formacija (Δ dijeli ove dvije formacije) 174
Slika 9.9. Akustične impedancije i izgled seizmičkog refleksa na krovinama oba ležišta u bušotini B-1 181
Slika 9.10. Akustične impedancije i izgled seizmičkog refleksa na krovinama oba ležišta u bušotini B-2 181
Slika 9.11. Akustične impedancije i izgled seizmičkog refleksa na krovinama oba ležišta u bušotini B-3 182
Slika 9.6.1. Smjer paleo-turbiditnih struja na prostoru Bjelovarske sudepresije u vrijeme taloženja Kloštar Ivanić formacije (modificirano prema Vrbanac et al., 2010; Malvić & Velić, 2011; Malvić, 2012; Andrić, 2021) 191

POPIS TABLICA

Tablica 6.2.1.: Parametri snimanja ..... - 31 -
Tablica 6.3.2.1.: Terenske koordinate i sistem numeracije geofonskih linija i linija točaka paljenja (Bessel 1841 sferoid i Gauss-Krüger projekcija zona 6) ..... - 37 -
Tablica 6.5.2.1.Odnos AVO značajki i relativnih akustičnih impedancija ..... - 57 -
Tablica 7.1.2.1. Relativne koncentracije novih plinova unutar bušotine B-2 85
Tablica 7.1.3.1. Relativne koncentracije novih plinova unutar bušotine B-3 86
Tablica 8.2.1.1. Usporedne vrijednosti očitanih amplituda i pojava novih plinova (NP) (oznake 1 i 2 označavaju krovine Ležišta 1 i Ležišta 2 i njihovih litostratigrafskih ekvivalenata) 97
Tablica 9.7.1. Prikaz povišenih i niskih vrijednosti amplituda na analiziranim seizmičkim i AVO atributima duž krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata 185
Tablica 9.7.2. Prikaz povišenih i niskih vrijednosti amplituda na analiziranim seizmičkim i AVO atributima duž krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata 186
Tablica 9.7.3. Prikaz rezultata seizmičkih inverzija duž krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata 187
Tablica 9.7.4. Prikaz rezultata seizmičkih inverzija duž krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata 188
Tablica 9.7.5. Prikaz rezultata atributa koherencije, spektralne dekompozicije i atributa dobivenog AVO RGB Blending metodom duž krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata 189
Tablica 9.7.6. Prikaz rezultata atributa koherencije, spektralne dekompozicije i atributa dobivenog AVO RGB Blending metodom duž krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata 189
Tablica 10.1. Rezultati svih atributnih analiza i inverzija 194

KRATICE OZNAKA KAROTAŽNIH KRIVULJA

AC (DT) – _t [μs/ft; μs/m] – akustična (zvučna) karotaža, vrijeme prolaska zvuka kroz stijenu u jedinici vremena

CN (NPHI) – _N [%] – poroznost stijene mjerena neutronskom karotažom

DEN (RHOB), _b [g/cm3] – volumna gustoća stijene

GR [API] – prirodna radioaktivnost

RD, Rt [m] – električna otpornost netaknute stijene mjerena sondama R64, RD, RILD, RMLL, LLD

RS [m] - električna otpornost isprane zone mjerena sondama R16, LLS, MSFL,

SP [mV] - spontani potencijal

SW - zasićenje vodom

POPIS JEDNADŽBI

Jednadžba 6.1: Realni seizmički trag u polarnim koordinatama

Jednadžba 6.2 : Hilbertova transformacija za kompleksni oblik seizmičkog traga

Jednadžba 6.3: Izraz za definiciju amplitude

Jednadžba 6.4: Opis faze koja se mijenja u vremenu

Jednadžba 6.5:Izraz za računanje atributa trenutne amplitude

Jednadžba 6.6: Izraz za računanje atributa trenutne faze

Jednadžba 6.7: Izraz za računanje atributa trenutne frekvencije

Jednadžba 6.8: Izraz za računanje atributa Sweetness

Jednadžba 6.9: Izraz za koeficijent refleksije na granici slojeva

Jednadžba 6.10: Matrični oblik Zoeppritz-ovih jednadžbi

Jednadžba 6.11: Aki & Richards jednadžba

Jednadžba 6.12: Tri faze Shuey-eve jednadžbe

Jednadžba 6.13: Izraz za definiciju intercepta

Jednadžba 6.14: Izraz za definiciju gradienta

Jednadžba 6.15: Izraz za daleke offsete

Jednadžba 6.16: Shuey-eva aproksimacija za bliske offsete

Jednadžba 6.17: Srednja kvadratna pogreška

Jednadžba 6.18: Određivanje poroznosti stijena

1. UVOD

Danas postoje različite metode za dobivanje informacija o strukturnim, stratigrafskim i tektonskim odnosima, kao i o karakteristikama ležišta, od kojih je 3D seizmika svakako jedna od najvažnijih. Pomoću interpretacije 3D seizmičkih podataka otvaraju se mogućnosti koje unaprjeđuju i povećavaju vjerojatnost kvalitetne procjene kvalitete i karakteristika rezervoara, naročito uz primjenu suvremenih analiza, kao što je između ostalih i AVO (*Amplitude versus offset*) analiza koja je korištena u ovom radu. Također veliki napredak pri opisu i karakterizaciji ležišta omogućuje analiza seizmičkih atributa. Ulaskom u ležište zasićeno ugljikovodicima dolazi do promjene u karakteru seizmičkog signala, odnosno prvenstveno do promjena amplitude, frekvencije i faze. Amplitudne anomalije su danas u najširoj primjeni, i na temelju povećanih amplituda moguće je izdvojiti vrlo perspektivna ležišta. No one same nisu dovoljne da bi pokazale bolja rezervoarska svojstva, te je problematici analize atributa potrebno pristupiti na složeniji način. Za potrebe ovog rada kreirani su i kombinirani atributi koji na jedan od najboljih mogućih načina mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima.

Istraživano područje nalazi se na rubnom dijelu Bjelovarske subdepresije, na području Bjelovarsko-bilogorske županije i obuhvaća prostor prekriven 3D seizmikom Grubišno Polje. U ovome radu detaljno je analiziran dio 3D seizmičkkog volumena „Grubišno Polje“ koji je snimljen 1998. godine. Atributne i AVO analize rađene na širem području lokaliteta Bačkovica, a ne na čitavom seizmičkom volumenu (**Slika 3.1.**).

Analize su rađene na ponovno obrađenom seizmičkom volumenu kako bi se suvremenijim metodama obrade dobili kvalitetniji podaci za reinterpretaciju. Nakon ponovne obrade rađene u Odjelu za obradu seizmičkih podataka, INA d.d. gdje je korišten moderniji algoritam *Kirchhoffove Pre-Stack* vremenske migracije, za razliku od originalne obrade gdje je postupak migracije napravljen nakon *stack*-a, napravljena je kompletna reinterpretacija te je dobivena geološki dosljednija slika podzemlja. Novim postupkom migracije dobiveni su podatci koji su bili nužni za izradu AVO analiza. Ujedno je u Odjelu za obradu seizmičkih podataka, INA d.d. napravljen još jedan seizmički volumen gdje je korištena *Kirchhoffova Pre-Stack* dubinska migracija koji je još više unaprijedio geološku sliku podzemlja. Ponovnom obradom dobivena je mogućnost naprednije analize seizmičkih atributa (definiranje vidljivih „*bright spot*“ efekata), kvalitetnije strukturne interpretacije (unaprijeđeni odnos signal/smetnja, poboljšani kontinuitet signala, bolje definiranje rasjednih ploha), te provedba seizmo-stratigrafskih analiza.

Cilj ovog rada bio je na temelju ponovno obrađenih i ponovno interpretiranih seizmičkih podataka pridobiti nove spoznaje o rezervoarskim stijenama na istraživanom području, vrsti taložnih tijela i taložnom okolišu. Osim toga, cilj je bio povećati interpretacijski potencijal geofizičkih metoda istraživanja, kao i povećati eksploatacijski potencijal istraživanog prostora. Spoznaje su primijenjene za procjenu ležišta i ležišnih svojstva pojedinih zona u istraživanom području. To je u konačnici omogućilo definiranje mogućih perspektivnih područja zasićenja ugljikovodicima.

Analizom jednostavnih i kombiniranih seizmičkih atributa moguće je odrediti eventualno zasićenje interpretiranog ležišta. Pojedini atributi se koriste i za tumačenje geoloških značajki kao što su rasjedi, kanali, te za identifikaciju rasjeda i važni su za prepoznavanje mogućih ležišta ugljikovodika.

Dodatnim analizama, kao što je AVO analiza, moguće je pretpostaviti zasićenja plinom i pretpostaviti gdje se nalazi područje mogućeg plinskog potencijala u odnosu na položaj eksploatacijskog polja.

Za analize su korištene i umjetne neuronske mreže, Kohonenove mreže kao jedna od osnovnih vrsta samoorganizirajućih neuronskih mreža. Neuronske mreže su alati uobičajeni u analizi različitih podataka i u posljednje vrijeme primjenjuju se u širokom rasponu u različitim područjima istraživanja gdje se pojavljuju pitanja vezana za klasifikaciju i predviđanja. Njihova je glavna primjena traženje zavisnosti između podataka koji nisu u isključivo linearnoj vezi, a opet se mogu ujediniti u jedan složeni ulazni skup.

Ujedno je za procjenu ležišnih svojstava u istraživanom području napravljena seizmička inverzija pomoću neuronskih mreža gdje su korišteni seizmički volumen, horizonti Ležišta 1 i 2 i karotažne krivulje koje su posebno pogodne za analizu zbog velikog broja dostupnih podataka i visoke rezolucije. Upotrijebljene su karotažne krivulje koje mogu ukazivati na litološki sastav stijene, kao što su spontani potencijal, otpornost, gustoća i brzina prolaza zvučnih valova. Podaci su prikupljeni iz tri dostupne bušotine, no moramo imati na umu da nisu prostorno dovoljno udaljene, pa ne možemo na široj slici isključiti mogući utjecaj lokalnih litoloških posebnosti.

Snimljenim 3D seizmičkim volumenom prekriveno je eksploatacijsko polje (EP) Bačkovica te su sve analize rađene na širem području tog lokaliteta. EP Bačkovica otkriveno je istražnom bušotinom B-1 1997. godine, pri čemu su utvrđena dva plinska ležišta. Temeljem otkrića na strukturi Bačkovica 2000. godine izbušene su još dvije bušotine, B-2 i B-3. One su se pokazale nekomercijalnima.

Napravljena je revizija dosadašnjih organsko-geokemijskih i paleontoloških analiza koje su izrađena je u laboratoriju Službe za istraživanje stijena i fluida u INA d.d., te nije bilo potrebe za novim analizama obzirom da dosadašnje sadrže sve potrebne informacije.

Potrebno je napomenuti (detaljnije objašnjeno u poglavlju 4.2) uzevši u obzir stariju podjelu miocena u Panonskom bazenskom sustavu koja je podrazumijevala podjelu na donji i gornji panon te donji i gornji pont i koja je nedavno promijenjena, da se u novoj stratigrafskoj podjeli naslage gornjeg miocena smatraju naslagama nastalim u jezeru Panon, te su jednoznačno označeni kao panon *sensu lato* (s.l.) (**Hilgen et al., 2012; Mandic et al., 2015**, **Pavelić & Kovačić, 2018**).

Starija podjela se godinama koristi u naftnoj geologiji i u ovom radu će se ponekad spominjati pontski kat radi lakšeg snalaženja, obzirom na sve dostupne podatke koji su se koristili u pregledu dosadašnje interpretacije koji je tada tako i bio određen.

Neophodno je objasniti da analizirani i ispitivani interval u ovom radu pripada naslagama donjeg ponta iz starije kronostratigrafske podjele gornjeg miocena odnosno formaciji Kloštar-Ivanić ili tzv. *Abichi* naslagama prema karakterističnoj školjci *Paradacna abichi*.

U ovom radu detaljno se analiziraju i interpretiraju pješčenjaci Pepelana kao moguća ležišta ugljikovodika (prvenstveno plina) koji su ujedno i jedan član Formacije Kloštar Ivanić.

Kako bi se izbjegla zabuna pogrešnog kronostratigrafskog okvira i otklonili nesporazumi o kojim naslagama se govori, u opisima i interpretaciji rezultata istraživanja govorit će se o pješčenjacima Pepelana.

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Na prostoru Bjelovarske subdepresije nema mnogo objavljenih radova. Većina ranijih geoloških istraživanja odnosila su se na Savsku i Dravsku depresiju, te područja koja čine njihovu granicu, osobito širi prostor Moslavačke gore. Razlog tome je što se smatralo da područje Bjelovarske subdepresije ima slabu perspektivnost zbog rubnog položaja i manje debljine neogenskih naslaga (do 3000 m). No, neka geološka istraživanja su ipak napravljena.

Vukotinović (1852) je napravio prvu geološku skicu Moslavačke gore s izdvojenim granitima i gnajsevima, okruženih tercijarnim naslagama.

Hauer (1867-1871) je nakon iscrpnog prikupljanja podataka objavio prvu preglednu geološku kartu Bilogore. Na toj karti izdvojeni su kongerijski slojevi, kvartarni šljunci i prapor.

Koch (1889) objavljuje preglednu geološku kartu Moslavačke gore.

Tućan (1904) piše o pegmatitima Moslavačke gore.

Pletikapić et al.(1964) navodi kako su prvi pokušaji pronalaženja ležišta nafte i plina u Dravskoj depresiji na području Kalnika izvođeni od 1855. do 1907. godine. No završeni su bez uspjeha i o njima je sačuvano vrlo malo podataka.

Može se reći da prvi istraživački radovi na lokalitetu Bačkovica započinju 1940. godine geološkim kartiranjem te gravimetrijskim, magnetometrijskim i seizmičkim mjerenjima.

Obzirom da do tada nisu otkrivene veće količine ugljikovodika, od 1956. godine mijenja se pristup istraživanju, te je odlučeno da se umjesto orijentiranja na pojedinačne lokalitete započne izradom većeg broja regionalnih dubokih istraživačkih bušotina. Intenzivnijim bušenjem, nakon 1956. godine ostvaren je izuzetan uspjeh i otkriveno je više polja ugljikovodika unutar Dravske depresije. To su: Cabuna, Ferdinandovac, Jagnjedovac i Šandrovac (**Malvić, 2003**).

Šezdesetih godina prošlog stoljeća obilje novih podataka omogućilo je podjelu Dravske depresije na nekoliko naftno geoloških zona. Na temelju strukturnih, litofacijesnih i hidrogeoloških karata, uz već poznata plinska i naftna polja, ukupno je izdvojeno deset naftnoplinonosnih zona, koje su obilježene približno jednakim debljinama sedimenata i dubinom rezervoarskih stijena, te vrstom zamki. To su: zapadno bilogorska (34 % potencijalnih zaliha), papučko-krndijska (27 %), moslavačka (22,5 %), istočno bilogorska (6,5 %), podkalnička (4 %), vilanjsko-mečečka (3 %), južnogergeteška (1,5 %), podbilogorska (1 %), središnja potoninska (0,25 %) i legradski prag (0,25 %) (**Pletikapić et al., 1964**).

U cijeloj Dravskoj depresiji, prema istom autoru, potencijalne zalihe ugljikovodika raspodijeljene su na 56 % zaliha u ležištima sa stratigrafskim zamkama, 39 % zaliha u ležištima sa strukturnim zamkama i 5 % u ležištima s kombiniranim zamkama. Isto tako, autor

pretpostavlja da se 90 % potencijalnih zaliha nalazi na dubini manjoj od 1750 metara. Pretpostavljenih 56 % zaliha u ležištima zamki stratigrafskog tipa, zanimljivo je i danas, kada se pozornost sve više posvećuje slabo istraženim ležištima (**Malvić, 1998**).

Najdenovski & Hajnšek (1980, 1982) napravili su prvu detaljnu obradu samog područja Bjelovarske subdepresije. Opisali su strukture i sedimentacijski razvoj, te na temelju bušotinskih podataka, seizmičkih profila i strukturnih karata reinterpretirali strukturne odnose u Bjelovarskoj subdepresiji i graničnom području između Savske i Dravske depresije. Po prvi puta su povezali ove dvije depresije na njihovom graničnom dijelu koji se pruža od Kalnika, preko Medvednice, Moslavačke gore i Psunja.

Seizmička mjerenja rađena su uglavnom kontinuirano od 1977. do 1995. godine, te je snimljeno 94,8 km seizmičkih 2D profila. 3D seizmika snimljena je u okviru projekta "3D Grubišno Polje" 1998. godine.

Također, devedesetih godina prošlog stoljeća započelo se ponovna gravimetrijska i magnetometrijska istraživanja Bjelovarske subdepresije kako bi se potvrdila područja eventualne naftoplinosnosti.

Lovrić (1992) ističe da se može izdvojiti veći broj anomalija na temelju gravimetrijskih podataka i karata Bougerovih i rezidualnih anomalija. No uglavnom detaljnim ispitivanjem, te bušenjem još nekih dodatnih bušotina koje to potvrđuju, dobiveni su rezultati koji upućuju na izgled i raspored struktura u podzemlju.

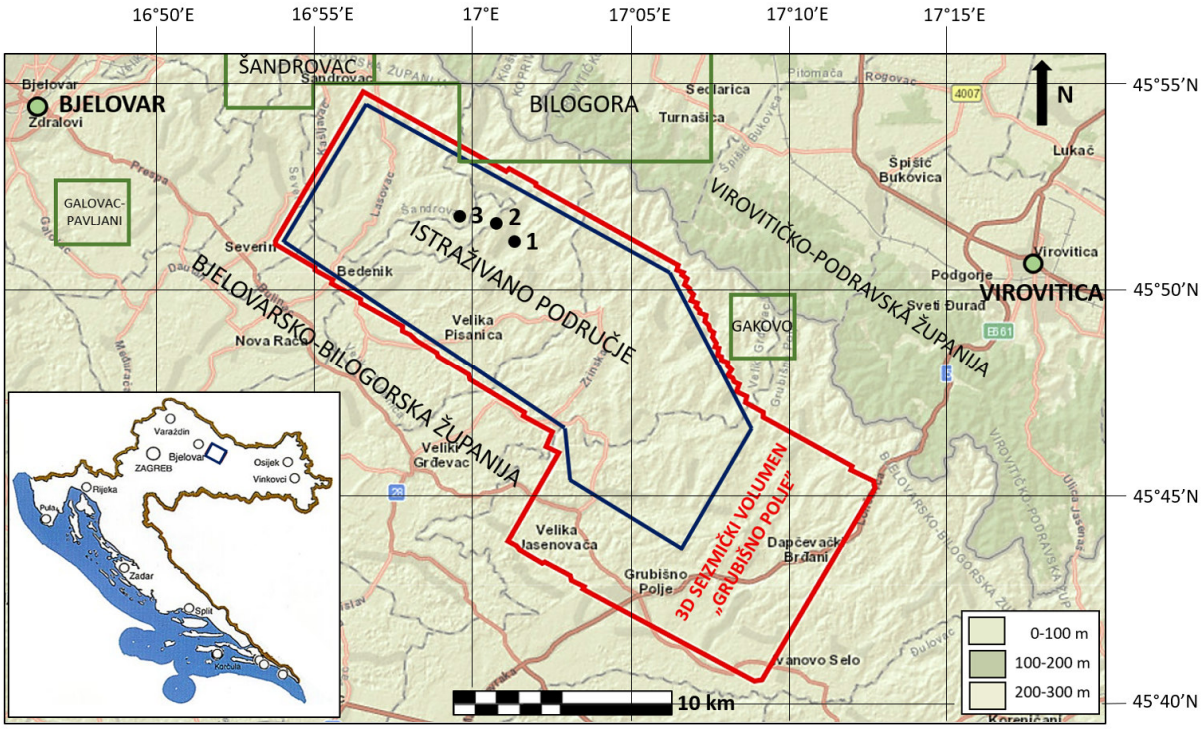
Naftno polje Galovac-Pavljani na području Bjelovarske subdepresije otkriveno je 1993. godine. To je potaknulo nastavak istraživanja kod Grubišnog polja. Izbušene su dvije bušotine kojima je potvrđeno plinsko polje, te je započela eksploatacija (**Malvić, 1998**).

Plinsko polje Bačkovica otkriveno je istraživačkom bušotinom B-1, 1997. godine.

Ivana Mesić-Kiš (2017) napravila je reinterpretaciju geološke povijesti Bjelovarske subdepresije univerzalnim krigiranjem.

3. ZEMLJOPISNI SMJEŠTAJ ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Istraživano područje nalazi se na sjevernom rubnom dijelu Bjelovarske subdepresije, jugoistočno od Bjelovara, na području Bjelovarsko-bilogorske županije. Eksploatacijsko polje Bačkovica nalazi se unutar 3D seizmičkog volumena „Grubišno polje“, južno od naftno-plinskih polja Bilogora i Šandrovac, istočno od naftnog polja Galovac-Pavljani i sjeverozapadno od plinskog polja Gakova. Nadmorska visina varira između 140 i 220 m. Na polju su napravljene tri bušotine i utvrđena dva plinska ležišta (**Slika 3.1.**).

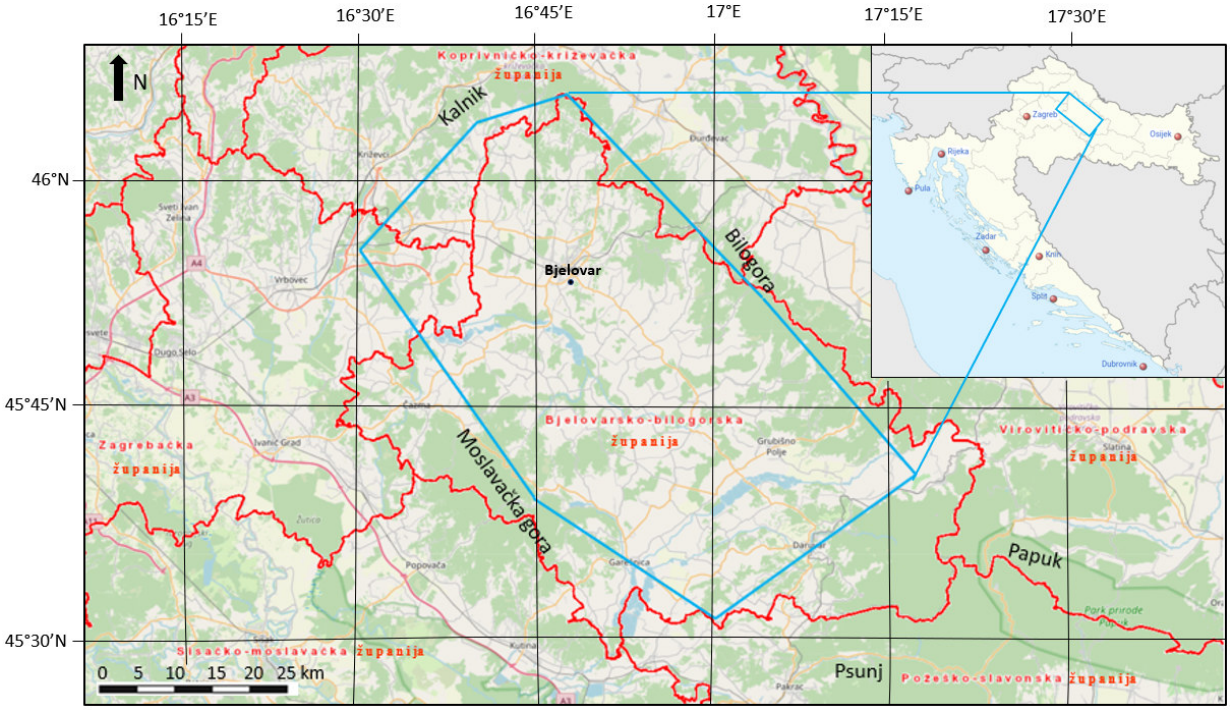


Slika 3.1. Položajna karta analiziranog područja sa položajima analiziranih bušotina B-1, B-2 i B-3.

Čitava Bjelovarska subdepresija površine je oko 2900 km^2 i prekriva područje triju županija, odnosno cijelu površinu Bjelovarsko-bilogorske županije te manjim dijelom južni dio Koprivničko-križevačke županije i djelomično istok Zagrebačke županije (**Slika 3.2.**). Proteže se između Papuka (953 m) i Psunja (984 m) na jugoistoku, Moslavačke gore (489 m) na jugu, sve do Kalnika (643 m) na sjeverozapadu i cijelim pružanjem Bilogore (288 m) na sjeveroistoku. Nadmorska visina površine terena cjelokupnog područja kreće se od 100 do 288 m (vrh Bilogore), a teren je prekriven obradivim površinama i šumskim predjelima.

Bjelovarska subdepresija je dio jedne veće cjeline unutar hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava (HPBS). Ona predstavlja jugozapadni ogranak Dravske depresije i graniči

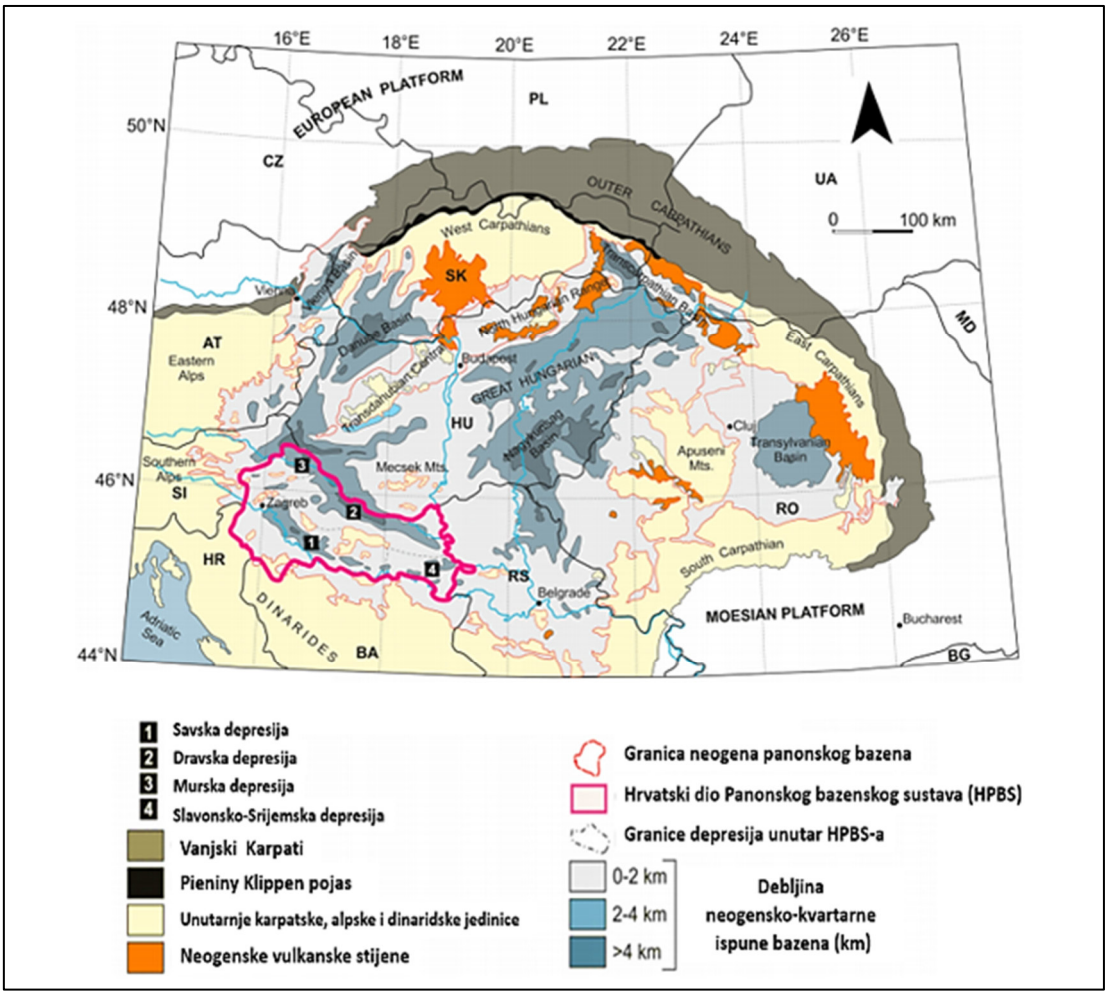
sa Savskom depresijom. Čini jednu zasebnu geotektonsku jedinicu, danas odvojenu od ostatka Dravske depresije, što je posljedica najvećim dijelom izdizanja Bilogore tijekom pliocena i kvartara (**Malvić, 2003**). Bilogora čini jasan strukturni prag između Bjelovarske subdepresije i Dravske depresije, kao i Moslavačka gora s produžecima kao granica s Savskom depresijom.



Slika 3.2. Geografski položaj Bjelovarske subdepresije

4. REGIONALNI GEOLOŠKI ODNOSI

Panonski bazenski sustav (PBS) zauzima prostor između planinskih lanaca Karpata, Alpa i Dinarida, te prekriva južni rub Europske ploče, a hrvatski dio Panonskog bazenskog sustava nalazi se na njegovom jugozapadu (**Slika 4.1**). Sastoji se od niza manjih, ali dubokih depresija, odvojenih razmjerno plitkim stijenama predneogenske podloge (**Schmid et al., 2008; Ustaszewski et al., 2014**). Stvaranje zalučnog *(back-arc*) Panonskog bazenskog sustava početkom miocena proizašlo je kao rezultat podvlačenja Europske ploče pod Jadransku mikroploču (**Royden, 1988**, **Matenco & Radivojević, 2013**). Paleogeografski, prostiranje PBS-a podudara se s područjem Središnjeg Paratethys-a, te mu se jugozapadna granica nalazi u sjeverozapadnoj Hrvatskoj i sjevernoj Bosni (**Rögl & Steininger, 1983; Popov et al., 2004; Harzhauser & Piller, 2007; Piller et al., 2007; Kováč et al., 2017**).



Slika 4.1. Rasprostiranje Panonskog bazenskog sustava uključujući glavne tektonske i zemljopisne jedinice Alpa, Karpata, Dinarida (modificirano prema Cvetković et al., 2019)

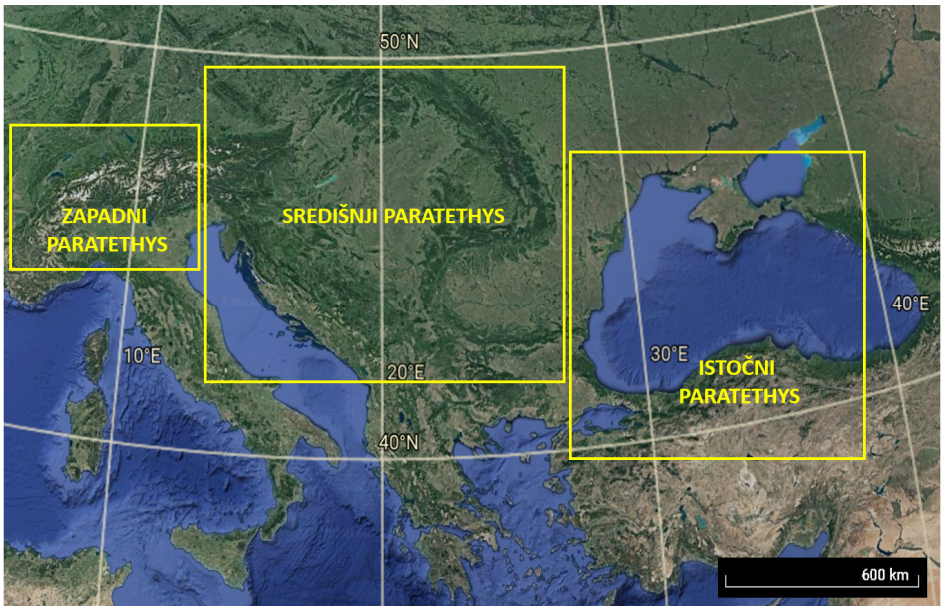
Razvoj Panonskog bazenskog sustava se odvijao u dvije faze. Prvu ili sin-riftnu fazu, karakterizira tektonsko stanjivanje kore i izostatička subsidencija, a ona obuhvaća razdoblje donjeg miocena i stariji dio srednjeg miocena, dok je druga faza (post-riftna), započela u gornjem badenu, a traje i danas, te je obilježena prestankom riftovanja i tonjenjem uzrokovanim hlađenjem litosfere **(Royden, 1988;Pavelić, 2001**). Tonjenje u post-riftnoj fazi prekidano je dvama kompresijskim događajima, prvim na granici sarmat/panon, a drugi je započeo u pliocenu i traje i danas. Ti su kompresijski događaji rezultirali u inverziji bazena i izdizanju strukturnih blokova **(Jamičić, 1995; Horváth, 1995; Márton et al., 1999, 2002; Pavelić, 2001; Tomljenović & Csontos, 2001; Ustaszewski et al., 2014; van Gelder et al., 2015)**.

4.1 PALEOGEOGRAFSKI POLOŽAJ SREDIŠNJEG PARATETHYS-A

Paratethys je kao epikontinetalno more nastalo razdvajanjem od zapadnog Tethys-a. Tethys se kao paleogeografska cjelina počinje razvijati u dva različita područja – Mediteran i Paratethys. Nastanak Paratethys mora povezan je s kretanjem Indije i Australije prema sjeveru, kolizijom Indijske ploče s Azijom, pomicanjem Afrike prema sjeveru i njezinom rotacijom u smjeru suprotnom od smjera kretanja kazaljki sata te izdizanjem alpskog otočnog lanca, što je imalo za posljedicuzatvaranj nekadašnjeg Tethys oceana na granici eocena i oligocena **(Rögl & Steininger, 1983, Rögl, 1998, 1999; Steininger & Wessely, 2000; Popov et al., 2004; Harzhauser & Piller, 2007; Piller et al., 2007; Kováč et al., 2017)**.

Paratethys se dijeli na tri paleogeografske i geotektonske jedinice (Rögl & Steininger, 1983; **Rögl, 1998; Steininger & Wessely, 2000; Popov et al., 2004; Piller et al., 2007; Kováč et al., 2017**) (**Slika 4.1.1.**):

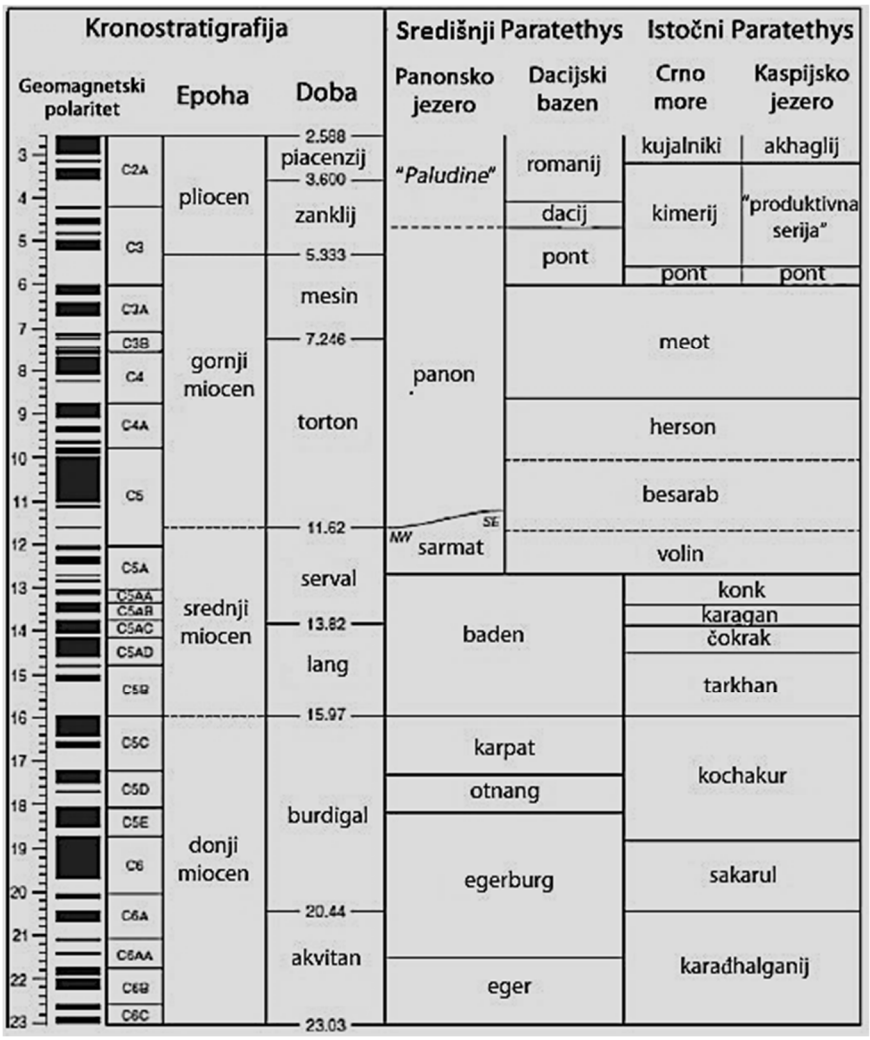
Zapadni Paratethys (obuhvaća alpske bazene Švicarske, Francuske, Južne Njemačke i Gornje Austrije), Središnji Paratethys (uključuje istočnoalpsko−karpatske predgorske bazene od Donje Austrije do dijela istočnog predobalja Karpata i unutar alpske bazene: Bečki, Štajerski, Panonski bazenski sustav i dr.) i Istočni Paratethys (obuhvaća Euksinski (Crno more) i Kaspijski bazen te Aralsko more)



Slika 4.1.1. Podjela Paratethysa (modificirano prema Kováč et al., 2017)

Zatvaranja i otvaranja morskih i kopnenih prolaza izgradila su kompleksne biogeografske odnose između Paratethys mora, Sredozemnog mora i zapadnog dijela Indijskog oceana. U Sredozemlju je tako nazočan neprekidan miocenski morski razvoj, koji se može usporediti sa svjetskom geološkom vremenskom ljestvicom, dok se s druge strane u Paratethysu zbog sporadične izolacije razvijala endemska fauna s limitiranom komunikacijom s okolnim morima (Báldi, 1980; Rögl & Steininger, 1983; **Rögl, 1998; Piller et al., 2007**). Drugačiji paleogeografski, kao i biogeografski razvoj uzrokovao je različite kronostratigrafske podjele za Zapadni, Središnji i Istočni Paratethys (npr. Rögl & Steininger, 1983; **Rögl, 1998; Harzhauser & Piller, 2007; Kováč et al., 2017; Piller et al., 2007**).

Unutar njih izdvojeni su lokalni katovi. Zbog neprekinutog morskog razvoja stratigrafska podjela Mediterana (ex. Tethysa) je jedinstvena na standardnoj stratigrafskoj ljestvici, dok su razvoj i podjela Paratethysa kompleksniji **(Rögl & Steininger, 1983, Rögl, 1996, 1998; Harzhauser, 2004; Leever et al., 2010; Hilgen et al., 2012; Neubauer et al. 2015, Kovač et al. 2018** i dr.**(Slika 4.1.2.).**



Slika 4.1.2.: Stratigrafska korelacija miocena i pliocena (prilagođeno prema Neubauer et al., 2015)

Jugozapadni dio Panonskog bazenskog sustava postaje dio šireg marinskog prostora Središnjeg Paratethysa početkom karpata početkom srednjeg badena, iako su neki ga morski krakovi moguće dosezali i u donjem badenu (**Ćorić et al., 2009; Mandic et al., 2019; Brlek et al., 2020; Marković et al., 2021)**. Marinski režim, uz redukciju saliniteta nastavio se do kraja srednjeg miocena kadabazen konačno izoliran prije 11,6 milijuna godina (**Rögl, 1996a, b; Piller & Harzhauser, 2005, Pavelić, 2001; Malvić, 2012; Pavelić & Kovačić, 2018**).

Posljedica izolacije je formiranje velikog bočatog Panonskog jezera i razvoja endemske faune mekušaca (**Magyar, 1995; Magyar et al., 1999; Müller et al., 1999; Piller & Harzhauser, 2005; Harzhauser & Mandić, 2008; Neubauer et al., 2015**). Krajem miocena, počela je kompresijska faza razvoja Panonskog bazena nastavljajući se u pliocenu i pleistocenu, za vrijeme koje su izdignuta područja na njegovom jugozapadnom dijelu (**Jamičić, 1995; Horváth & Cloetingh, 1996; Prelogović et al., 1998; Tomljenović & Csontos, 2001; Pavelić,**

2001; Marton et al., 2002). Donos velike količine klastičnog detritusa s obližnjih planinskih lanaca, zajedno s izoliranošću bazena, doveo je prema kraju miocena do postupnog smanjenja površine bočatog jezera (**Magyar et al., 1999**). Veliki dio Panonskog jezera početkom pliocena već je bio ispunjen materijalom kojeg su s područja Alpa i Karpata dopremali progradirajući klastični riječno-deltni sustavi (**Magyar et al., 1999; Kovačić et al., 2004; Kovačić & Grizelj, 2006; Balázs et al., 2018; Sebe et al., 2020; Magyar, 2021**). Konačna faza jezerske sedimentacije u južnom dijelu PBS-a u kojem su taloženi klastični sedimenti tijekom kata cernikij u rasponu od 4,5 do 2 milijuna godina poznatiji kao *Viviparus* slojevi je Slavonsko jezero (**Mandic et al. 2015**).

4.2 PROMJENE U STRATIGRAFSKOJ NOMENKLATURI PANONSKOG BAZENSKOG SUSTAVA

Potrebno je naglasiti kako se danas koriste dva pristupa raščlanjivanja gornjega miocena u Sjevernoj Hrvatskoj. Prema novijim istraživanjima u stratigrafiji miocena Panonskog bazenskog sustava, nekadašnji kat pont je zamijenjen neformalnim gornjim panonom (**Hilgen et al., 2012, Mandić et al, 2015; Pavelić & Kovačić, 2018**).

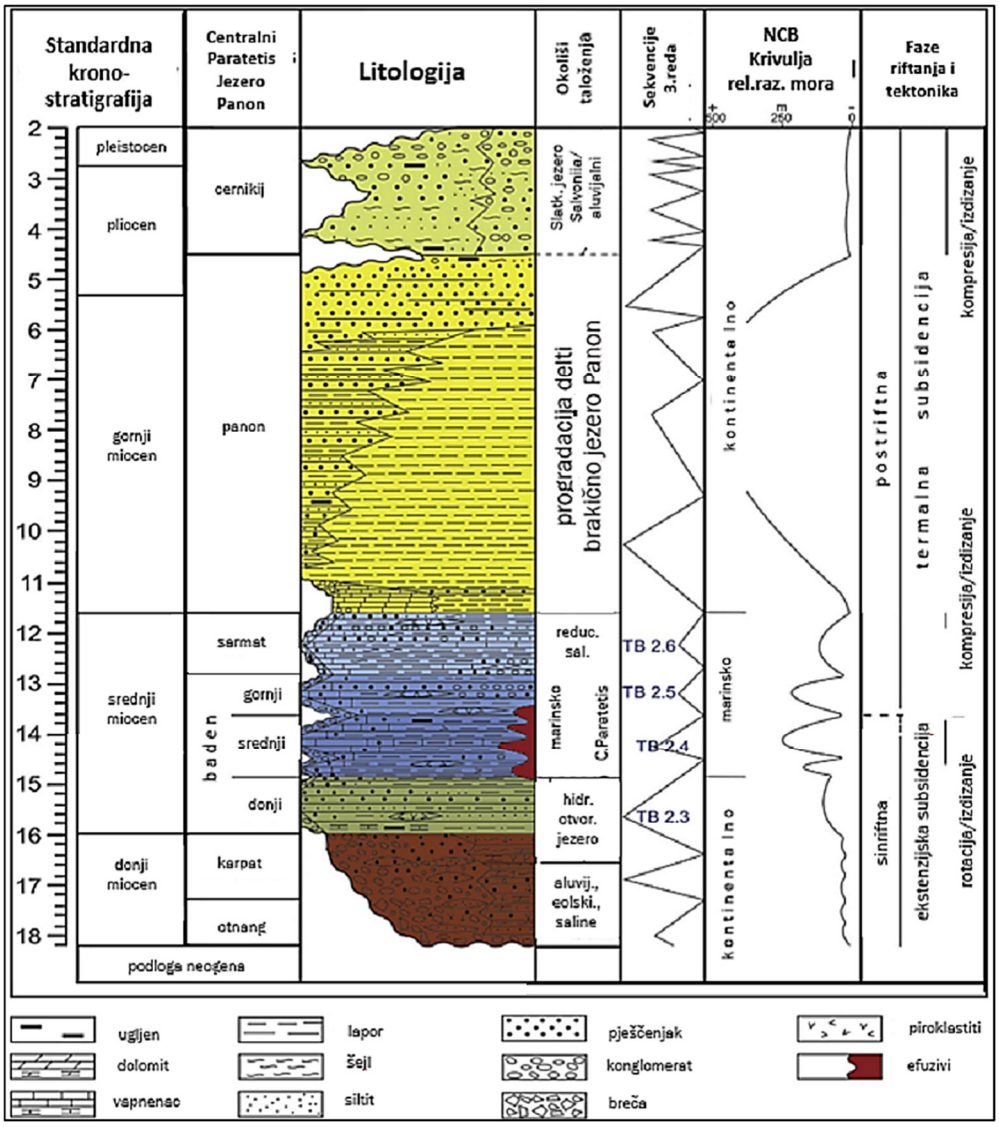
Uobičajena i do sada korištena stratigrafija gornjeg miocena na prostoru hrvatskog dijela Središnjeg Paratethysa, koja je podrazumijevala podjelu na donji i gornji panon te donji i gornji pont nedavno je promijenjena.

Stratigrafski, gornji miocen je do sad bio podijeljen na panon (donji panon – *Radix croatica*, gornji panon - *Congeria banatica*) i pont (donji pont - *Paradacna abichi*, gornji pont - *Congeria rhomboidea*) dok je granica bila markirana prvom pojavom školjke *Paradacna abichi* (**Jenko,1944**).

Greška ovakve podjele proizlazi iz činjenice da je *Paradacna abichi* u Mađarskoj datirana na otprilike 8 mil. god., a razdoblje ponta je u Crnomorskom bazenu datirano na 6,04-5,60 mil. god. što znači da su *Abichi* naslage puno starije od donjeg ponta (**Mandic et al. 2015**). Kako bi se ispravila do sada rađena pogreška, pont je kao geološko razdoblje uklonjen iz regionalne stratigrafske nomenklature Panonskog bazenskog sustava te je gornji miocen raščlanjen na stariji i mlađi panon (**Hilgen et al., 2012, Mandic et al. 2015, Pavelić & Kovačić, 2018**) (**Slika 4.1.3.)**.

Naslage gornjeg miocena prema novoj stratigrafskoj podjeli su jednoznačno označeni kao panon *sensu lato* (s.l.) (**Pavelić & Kovačić, 2018**).

Time su također i *Abichi* i *Rhomboidea* naslage koje su pripadale razdoblju mlađeg i kasnijeg ponta približno smještene u razdoblje neformalnog gornjeg panona, a *Croatica* i *Banatica* naslage u neformalni donji panon.



Slika 4.1.3. Generalizirani stratigrafski stup Sjevernohrvatskog bazena (modificirano prema Pavelić & Kovačić, 2018)

Međutim, kod nekih autora **(npr. Malvić et al., 2019)** pontski kat se još uvijek upotrebljava kod opisivanja geološke povijesti. Već se godinama uspješno koristi u naftnoj geologiji hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava, a i granice litostratigrafskih jedinica utvrđene su prepoznavanjem elektrokarotažnih markera. Ovi markerni slojevi predstavljaju lapore debele nekoliko metara, velikog lateralnoga rasprostiranja, a koji se mogu pratiti na krivulji otpornosti kao karakteristični ocrt i dokazani su na kilometarskim udaljenostima. Također, stijene

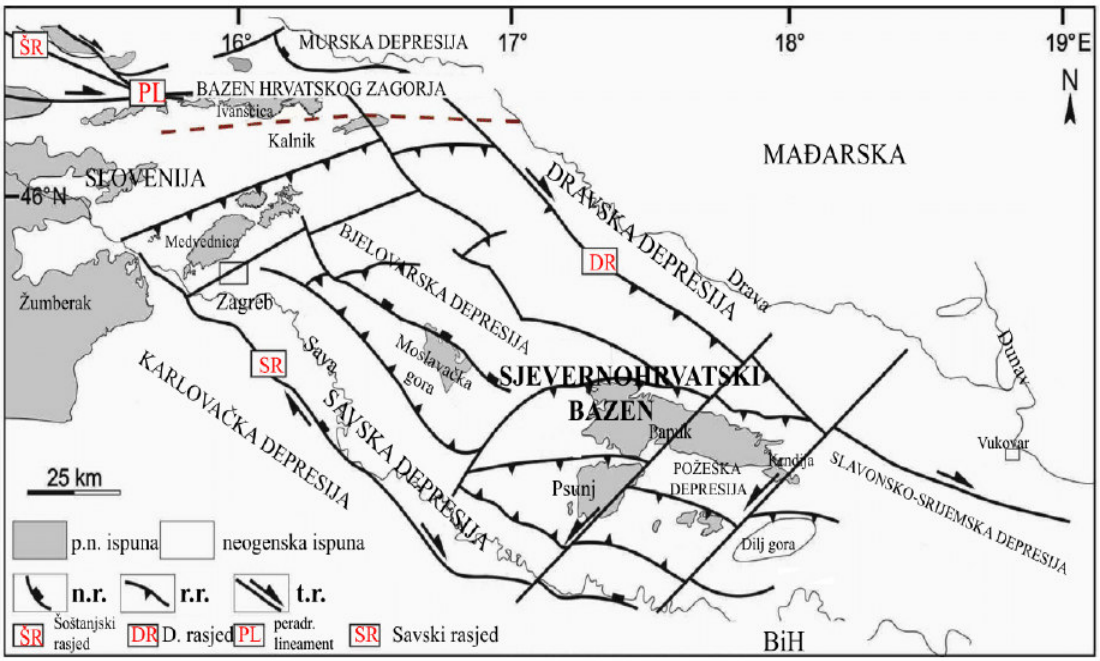
formacije Kloštar-Ivanić (*Abichi* naslage) mogu se vrlo lako razlikovati od stijena formacije Ivanić-Grad (*Banatica* naslage), po povećanom udjelu pješčenjaka (turbiditskoga podrijetla), boji, te čvrstoći lapora.

4.3 HRVATSKI DIO PANONSKOG BAZENSKOG SUSTAVA

Tokom ranog miocena na prostoru sjeverne Hrvatske razvijala su se dva bazena s drugačijim taložnim okolišima: bazen Hrvatskog Zagorja (HZB) i Sjevernohrvatski bazen (SHB).

HZB nalazi se na krajnjem sjeverozapadu Hrvatske i zauzima manje područje sjeverozapadno od linije Kalnik Ivanščica pa dalje prema granici s Republikom Slovenijom, dok SHB zauzima najveći dio sjeverne Hrvatske i to oko 32000 km^2 (**Slika 4.2.1., Pavelić & Kovačić, 2018**).

SHB je izdužen bazen generalnog smjera pružanja ZSZ-IJI s različitim debljinama neogenskih sedimenata kojih u rubnim dijelovima ima od 500 do 1500 m, ali u nekim dijelovima čak i do 7000 m u Dravskoj, 3000 m u Bjelovarskoj, 2700 m u Požeškoj, 3500 m u Slavonsko-srijemskoj, 5500 m u Savskoj i 3000 m u Karlovačkoj depresiji (**Najdenovski, 1988, Lučić et al., 2001, Saftić et al., 2003; Vrsaljko, 2003; Malvić, 2011; Malvić & Cvetković, 2013**).



Slika 4.2.1. Karta s glavnim tektonskim karakteristikama hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava (preuzeto iz Pavelić & Kovačić, 2018)

Procesi taloženja za vrijeme ranog miocena u ovim se bazenima razlikuju, prvenstveno u donjem i početkom srednjeg miocena. Kroz donji miocen su u SHB talože slatkovodni jezerski i aluvijalni sedimenti, dok se u HZB odlažu marinske i manjim dijelom bočate naslage (**Pavelić & Kovačić, 2018; Avanić et al., 2021**). Ova su se dva bazena ujedinila u zajednički taložni prostor u marinskom transgresijom badenu (Pavelić, 2001). Postoje različita mišljenja o prvoj marinskoj transgresiji u SHB. Rana istraživanja (npr. **Šikić, 1968**) navode da je marinska transgresija započela na granici otnanga i karpata. No u nekim novijim radovima se smatra da marinska transgresija započinje u karpatu (**Hernitz-Kučenjak et al., 2018**).

U radu **Ćorić et al. (2009)** zaključeno je na temelju biostratigrafskih istraživanja asocijacije nanoplanktona i foraminifera da su sedimenti koji su ranije određeni kao marinski karpatske starosti, a ujedno i jezerski otnanške starosti, zapravo sedimenti donjeg badena odnosno da je marinska transgresija započela milijun godina iznad donje granice srednjega miocena. **Pavelić et al. (2010)** su zaključili da su jezerski sedimenti pripadali karpatu i najnižem badenu, a prve marinske naslage zoni vapnenačkog nanoplanktona NN5 (srednji baden) proučavajući površinske lokalitete i jezgrovani materijal odabranih istražnih bušotina u Savskoj depresiji.

Unutar marinskih sedimenata na lokalitetu Medvednice datiranjem tufova ($^{40}Ar/^{39}Ar$) dobivena je starost od 14,8 mil. god. (**Marković, 2017; Marković et al., 2021**), dok je radiometrijskim datiranjem tufova unutar marinskih naslaga na Požeškoj gori određen donji baden (Brlek et al., 2020).

Na lokalitetu Laz Bistrički **Marković et al. (2021)** su datiranjem tufa unutar jezerskih naslaga $^{40}Ar/^{39}Ar$ metodom utvrdili starost od 15,42 mil. god. Taj podatak nam govori da starost jezerskih naslaga odgovara donjem badenu. Navedeni podatci ukazuju na mogućnost istovremenog razvoja i jezerskog i marinskog okoliša na istraživanom prostoru (Brlek et al., 2020; Marković et al., 2021). Snažnija marinska transgresija je zahvatila SHB u srednjem badenu te u gornjem badenu. U sarmata vlada i dalje marinski režim, no salinitet je reduciran.

Pred kraj sarmata, tj. krajem srednjeg miocena nastupa izolacija bazena (npr**. Rögl, 1998**) i oformljivanje jezera Panon (npr. **Pavelić & Kovačić, 2018**).

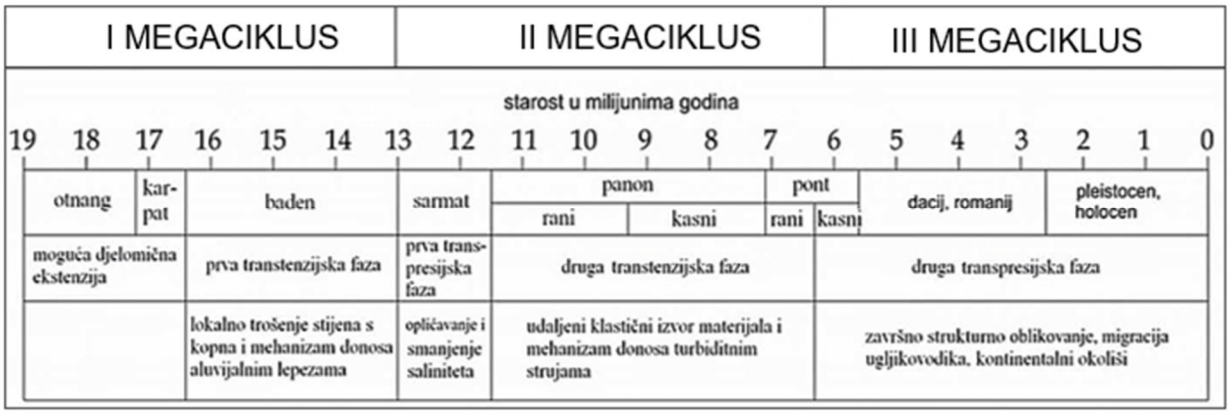
Konačnu neogensku fazu predstavlja klastična sedimentacija u Slavonskom jezeru tijekom kata cernikij (*Viviparus* slojevi) (**Mandić et al., 2015**).

Tijekom panona pijesci u prodeli taložili su se turbiditnim strujama, a većina pješčanog materijala se taložila vučnim mehanizmima u prudovima ušća, dok su se lapori taložili iz suspenzije. Glavni izvor sedimenata bile su istočne Alpe (npr. **Basch et al., 1995; Kovačić et al., 2004; Kovačić & Grizelj, 2006; Vrbanac et al., 2010; Malvić, 2012; Sebe et al., 2020**).

Neogensko-kvartarni slijed sedimenata Panonskog bazenskog sustava može se podijeliti u tri taložna megaciklusa (**Velić et al. 2002; Saftić et al., 2003**; **Velić, 2007; Malvić i Velić, 2011**). Prvi megaciklus traje od ranog do srednjeg miocena i vezan je uz transtenzijsku, sin-riftnu tektoniku i ranu post-riftnu fazu razvoja Panonskog bazena **(Malvić & Velić, 2011)**, a traje do taloženja krovine sarmata (**Saftić et al., 2003)**. Karakteriziran je heterogenim litološkim sastavom. Utjecaj tektonike na sedimentaciju u sin-riftnoj fazi je velik, a posljedica je raznolikost u uvjetima taloženja i brojnost litofacijesa. Ovaj megaciklus je s naftno-geološkog aspekta značajan zbog taloženja velikih količina matičnih stijena badenske starosti.

Drugi taložni megaciklus litološki je karakteriziran pretežno izmjenama pješčenjaka i lapora i svih prelaznih litologija. Traje od srednjeg do kasnog miocena i vezan je uz transtenzijsko post-riftno termalno spuštanje bazena. Unutar naslaga drugog megaciklusa nalaze se najvažnije kolektorske stijene jugozapadnog dijela Panonskog bazenskog sustava.

Treći megaciklus je pliocensko kvartarne starosti, a sastoji se od pijeska, gline i šljunka i mjestimično lignita i treseta (**Velić et al. 2002; Saftić et al., 2003**; **Velić, 2007; Malvić i Velić, 2011**).(**slika 4.2**.2).



Slika 4.2.2.: Vrijeme trajanja pojedinih kronostratigrafskih jedinica, te dominantni mehanizmi transporta i taloženja materijala u hrvatskom dijelu Panonskog bazenskog sustava (Malvić & Velić, 2011)

5. PREGLED GEOLOŠKE GRAĐE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

5.1. RAZVOJ BJELOVARSKE SUBDEPRESIJE

Bjelovarska subdepresija nalazi se u središnjem dijelu Sjevernohrvatskog bazena. Otvaranje prostora Bjelovarske subdepresije posljedica je aktivnosti glavnih depresijskih transkurentnih rasjednih sustava, zajedno s ostalim rasjednim sustavima koji su poprečni ili dijagonalni na pravac pružanja središnjega Dravskog rasjeda (**Mesić-Kiš, 2017**).

Debljine neogensko-kvartarnih naslaga u Bjelovarskoj subdepresiji uglavnom ne prelaze 3000 m, u odnosu na glavnu zonu Dravske depresije gdje su debljine i do 7000 metara. Bjelovarska subdepresija nije bila na putu glavnog prijenosa materijala, naročito u postekstenzijskom razdoblju te je donos sedimenata bio značajno manji. Starije naslage sastoje se od breča, konglomerata i krupnozrnatih pješčenjaka. Vapnenci i lapori uglavnom karakteriziraju prijelazno razdoblje između prve transtenzije i prve transpresije. Ujedno je i taložna sredina prešla iz morske u jezersku, te zatim za vrijeme druge transtenzije i kopneno-riječnu (**Malvić, 2003**).

Prema najnovijim istraživanjima, na području Bjelovarske subdepresije najstarije marinske naslage su karpatske starosti.(**Hernitz-Kučenjak et al., 2018**).

U badenu je došlo do rasta morske razine, te su se taložili sedimenti na skoro cijelom području subdepresije uz vrlo snažnu tektoniku i vulkanizam. Uz plitkovodne i rjeđe malo dublje (šelfne) marinske naslage, lokalno su se taložili sedimenti u aluvijalnim lepeznim deltama uz lokalne izvore materijala. U srednjem i mlađem badenu talože se sitnozrnatiji klastiti i karbonatne naslage (**Mesić Kiš, 2017**).

Za vrijeme gornjeg miocena istaložene su jednolične serije klastičnih sedimenata (pješčenjaka i lapora). Tada je došlo do promjene taložnog prostora iz marinskog u brakični okoliš, te izvor materijala više nije bio lokalnog podrijetla.

U pliocenu prevladava sedimentacija u slatkovodnim jezerima, rijekama i močvarama koja je obilježena lokalnim izvorima materijala. U području Bjelovarske subdepresije aktiviraju se novi i reaktiviraju stari rasjedni sustavi što za posljedicu ima izdizanje Bilogore, Moslavačke gore, dijelom i Papuka te Psunja (**Prelogović, 1975**). Isti uvjeti se nastavljaju kroz kvartar.

5.2. LITOSTRATIGRAFSKE JEDINICE

Jedinice litostratigrafskog sustava po standardnoj podjeli čine supergrupa, grupa, formacija, član i sloj.

Formacija prikazuje temeljnu jedinicu u litostratigrafskom sustavu koja se koristi za kartiranje, opisivanje i interpretaciju geoloških odnosa na području istraživanja (npr. skup stijena ili naslaga homogenog litološkog sastava, monotona izmjena dvaju litoloških komponenata, npr. pješčenjaka i lapora ili jedinica koja objedinjuje kompleks stijena koje su u svom litološkom sastavu razlikuju od okolnih stijena) (**Murphy & Salvador, 1998**).

Član je jedinica nižeg ranga koja se može izdvojiti na temelju osobitih litoloških svojstava koje ju razlikuju od ostatka formacije. Debljina i mogućnost bočne korelacije ove jedinice nije jednoznačno utvrđena, a može se bočno rasprostirati u dvije formacije (**Cvetković, 2013**).

Jedinica najnižeg ranga u litostratigrafskom sustavu je sloj. On predstavlja doslovno jedan sloj koji se može jasno izdvojiti od ostatka stijenskog materijala ili naslaga. Za jedinicu ranga slojeva u litostratografskom sustavu obično se izdvajaju ekonomski važne jedinice ovog ranga. To mogu biti slojevi s orudnjenjem, slojevi ugljena ili pojedini slojevi stijena kolektorskih svojstava zapunjeni ugljikovodicima (**Šimon, 1963**).

Osim litostratigrafske podjele naslaga postoji i biostratigrafska podjela kod koje se slijed naslaga može raščlaniti na biozone. Biozone predstavljaju tijela naslaga ograničena prema njihovom fosilnom sadržaju (**Murphy & Salvador, 1998**). Jedinice u ovom sustavu mogu biti ograničene na pojavu jedne vrste u naslagama, asocijaciji više vrsta, bogatoj pojavi pojedine vrste koja je inače umjereno zastupljena ili prema bilo kojem drugom uvjetu koji je povezan sa sadržajem i količinom fosilnog materijala (**Cvetković, 2013**).

Markerni slojevi ili horizonti primjenjuju se za kartiranje jedinica litostratigrafskog sustava. Uobičajeno ih predstavljaju relativno tanki slojevi koji imaju veliku rasprostranjenost. Na području hrvatskog dijela Panonskog bazena utvrđen je čitav niz EK markera koji odvajaju formacije u pojedinim depresijama i članove unutar formacija. Oni su zapravo prepoznatljivi motivi na krivuljama specifične otpornosti u sklopu elektrokarotažnih dijagrama, odnosno prema ponavljanju nizova otklona sličnih vrijednosti otpornosti. (**Vrbanac, 2002**).. Na području hrvatskog dijela Panonskog bazena utvrđen je čitav niz EK - markera koji odjeljuju formacije u pojedinim depresijama i članove unutar formacija (**Šimon, 1968**). U hrvatskom dijelu Panonskog bazenskog sustava najstariji uvjetni reperni horizont predstavlja diskordancija između neogensko-kvartarnih sedimenata i starijih stijena u njihovoj podlozi. Ako su u podlozi tercijarnog sustava paleozojske magmatske i metamorfne stijene taj uvjetni reperni horizont

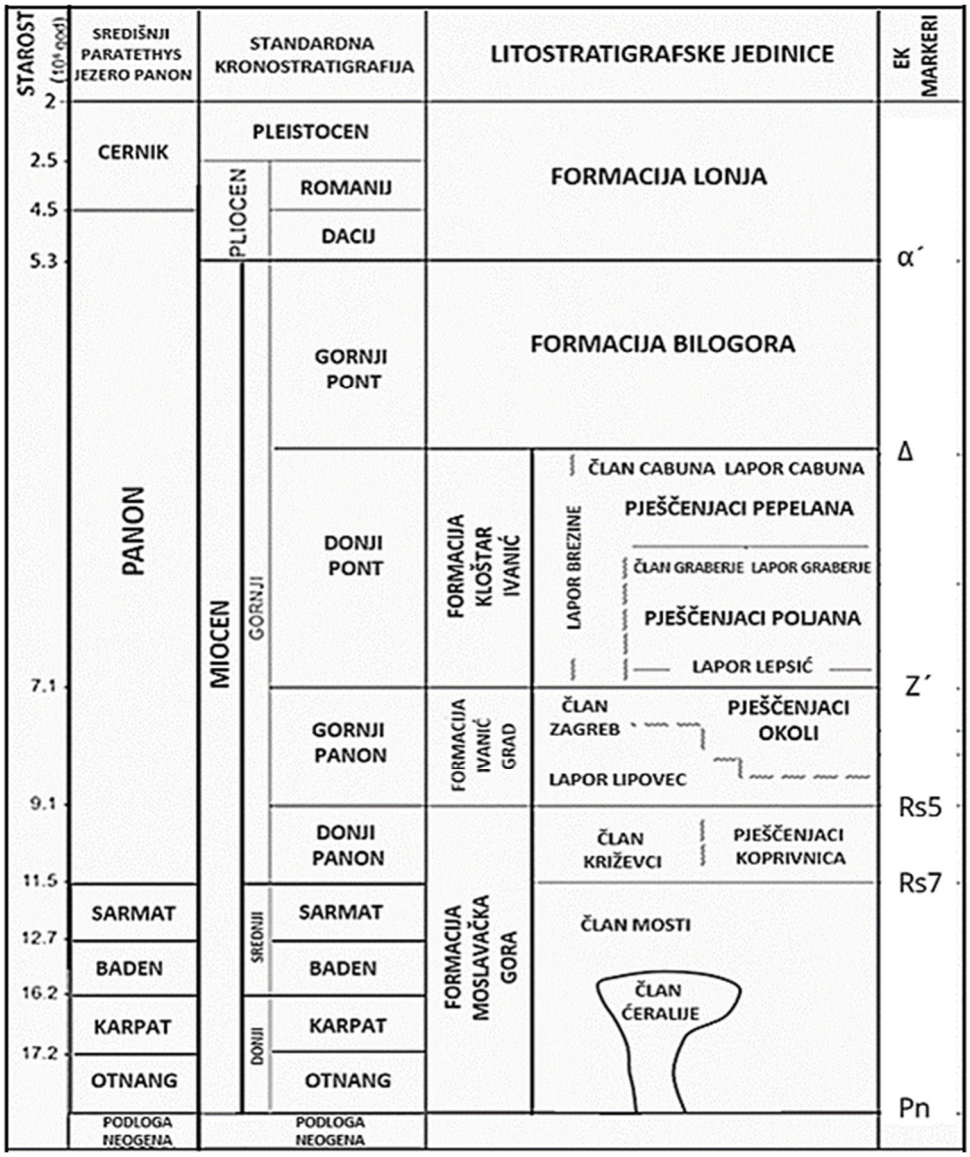
označava se Tg (Temeljno gorje). Ako su u podlozi paleozojski i mezozojski sedimenti taj horizont označava se Pt (Podloga tercijara). Koristi se naziv uvjetni reperni horizont jer se ne radi o pravom sloju nego o kontaktu dviju litološki i po starosti bitno različitih stijenskih masa, s vrlo različitim elektrofizikalnim svojstvima (**Malvić & Velić, 2011**).

Ostali važniji reperni slojevi izdvojeni u Hrvatskoj odjeljuju pojedine formacije unutar depresija, a ponekad i članove (**Slika 5.1.1**). Tako su u Dravskoj depresiji po standardnoj kronostratigrafskoj podjeli koja ne uključuje noviju podjelu za Središnji Paratethys (te je usporedno navedena i biostratigrafska podjela), izdvojeni sljedeći reperni slojevi najvećeg ranga (**Malvić & Velić, 2011**):

- Rs7: dijeli članove Mosti i Križevci unutar formacije Moslavačka gora, tj. dijeli naslage sarmata i panona
- Rs5: dijeli formacije Moslavačka gora i Ivanić-Grad; dijeli gornji i donji panon. Interval Rs5-Rs7 obuhvaća Naslage Croatica ("bijeli lapori").
- Z' : dijeli formacije Ivanić-Grad i Kloštar Ivanić; dijeli gornji panon i donji pont. Interval Rs5-Z'obuhvaća Naslage Banatica.
- Δ : približno dijeli formacije Kloštar-Ivanić i Bilogora; dijeli donji i gornji pont. Z'-Δ obuhvaća Naslage *Abichi*.
- α' : dijeli formacije Bilogora i Lonja; dijeli g. pont od pliocena i kvartara. Interval Δ -α' obuhvaća Naslage Rhomboidea.

Stratigrafska pripadnost naslaga istraživanog prostora određena je na osnovi preliminarnih laboratorijskih analiza i interpretacije EK dijagrama u bušotini B-1. Izdvojene su kronostratigrafske i litostratigrafske jedinice s pripadajućim formacijama koje su navedene u opisu (**Cirković, 1997**, Fond struč. dok., INA d.d.).

Na osnovi dosadašnjih spoznaja i interpretacije geološke građe izrađen je opći geološki stup zapadnog dijela Dravske depresije (**Slika 5.1.1**). Kao komparativan prikaz dodana je osim standardnih kronostratigrafskih jedinica, nova podjela miocena za Središnji Paratethys, te su ujedno uvršteni EK markeri koji odjeljuju litostratigrafske jedinice prema starijoj podjeli kada je bilo uvršteno i razdoblje ponta. Shematski stratigrafski stup je prilagođen na temelju dosadašnjih radova (npr. **Pavelić & Kovačić**, **2018**) gdje su regionalni katovi središnjeg Paratethysa prilagođeni iz **Piller et al**. (**2007**), **Mandic et al. (2015)** i **Neubauer et al. (2015)**. Litostratigrafska podjela je modificirana prema **Šimon (1980).**



Slika 5.2.1.: Shematski stratigrafski stup zapadnog dijela Dravske depresije (modificirano prema Pavelić & Kovačić, 2018- dodana nova kronostratigrafija, Šimon, 1980 – litostratigrafska podjela)

5.2.1 NEFORMALNA JEDINICA "TEMELJNO GORJE"

Temeljno gorje u užem smislu (Tg) čine magmatske i metamorfne stijene, uglavnom paleozojske i djelomice mezozojske starosti, dok se formacije mezozojskih sedimentnih stijena u bušotinama skupno označavaju kao Podloga tercijara (Pt, P.T. ili PTc). Stijene Temeljnog gorja su predstavljene pretežno granitima i gabrima te gnajsevima, amfibolitima i zelenim škriljavcima koji su nerijetko kataklazirani i hidrotermalno izmijenjeni i pripadaju geotektonskoj jedinici Tisa. Starost ovih stijena je u većini slučajeva pretpostavljena zbog

višestrukih orogeneza koje su uništile izvornu paragenezu **(Malvić, 2003).** Obzirom da su te stijene bile podvrgnute trošenju na površini kroz duže geološko razdoblje i/ili kataklazirane mogla je nastati značajna sekundarna poroznost. To je znatno pogodovalo formiranju ležišta, te su primjer za ovakav razvoj nakupljanja ugljikovodika naftna polja Galovac-Pavljani i Letičani, te plinsko polje Grubišno Polje.

Kontakt s miocenskim stijenama predstavljen je tektonsko-erozijskom diskordancijom. Sedimentne stijene mezozojske starosti označene kao Podloga tercijara (Pt) odgovaraju podlozi neogena, a litološki su predstavljene vapnencima, dolomitima i klastitima, koji mogu biti kataklazirani i trošeni do stupnja breča i konglomerata **(Malvić, 2003)**.

5.2.2 FORMACIJA MOSLAVAČKA GORA

U hrvatskom dijelu zapadnog dijela Dravske depresije, uključujući i Bjelovarsku subdepresiju, naslage miocena završno s donjim panonom pripadaju formaciji Moslavačka gora (**Slika 5.2.1**). Ona se može detaljnije podijeliti na dva člana: stariji - Član Mosti (mjestimice donji miocen, baden i sarmat) i mlađi - Član Križevci (približno donjopanonske starosti po starijoj klasifikaciji). Elektrokarotažne (EK) granice Tg ili Pt predstavljaju granicu između Formacije Moslavačka gora i starijih stijena podloge. EK-marker Rs5 odjeljuje naznačenu formaciju od mlađe, Formacije Ivanić-Grad u krovini (**Malvić & Cvetković, 2013**).

Mjestimično su dokazane efuzivne stijene badenske do donjopanonske starosti poznate kao član Ćeralije (**Pamić, 1997**).

Član Križevci, predstavljen je laporima i glinovitim vapnencima s karakterističnom faunom gastropoda *Radix croatica* po kojem su ovi sedimenti dobili naziv *Croatica* naslage.

5.2.3 FORMACIJA IVANIĆ GRAD

Granica formacije u podini je određena EK-markerom Rs5, a u krovini prema formaciji Kloštar-Ivanić s EK-markerom Z'. U starijim bušotinama ti sedimenti često su označeni kao Banatica-naslage prema karakterističnom fosilnom školjkašu *Congeria banatica*. Vrijeme taloženja približno odgovara gornjem panonu prema staroj kronostratigrafskoj podjeli. Formaciju čine stariji član Lapor Lipovec, te mlađi član Zagreb i/ili njegovi bočni ekvivalenti - Pješčenjaci Okoli (**Slika 5.2.1**). Lapor Lipovec može biti sive do smeđe boje i različite

tvrdoće. Član Zagreb predstavljen je stijenama različitog litološkog sastava, ali najčešći su lapori ili pjeskoviti lapori koji ponekad mogu doći u izmjeni s pješčenjakom ili laporovitim pješčenjakom. Pješčenjaci Okoli su predstavljeni kao sitnozrnati i dobro litificirani (**Malvić, 2003**).

U bušotini B-1 u na temelju analiza u podinskom dijelu formacije laporoviti sedimenti izdvojeni kao Lapor Lipovec, te prema krovini formacije sitnozrnati pješčenjaci kao Pješčenjaci. Okoli.

5.2.4 FORMACIJA KLOŠTAR-IVANIĆ

Granice formacije su određene EK-markerom Z' u podini i elektrokarotažnim markerom Δ u krovini koji čini granicu s Formacijom Bilogora (**Slika 5.2.1**). Naslage ove formacije sastoje se od izmjene različitih tipova pješčenjaka i lapora. Po starosti, od starijih prema mlađima poredane su od Lapora Lepsić, Pješčenjaka Poljana, Lapora Graberje do Pješčenjaka Pepelana i Lapora Cabuna. Starost formacije približno odgovara donjem pontu prema staroj kronostratigrafskoj podjeli. Sedimenti se još nerijetko imenuju *Abichi* naslagama također po specifičnoj fosilnoj vrsti školjkaša *Paradacna abichi.*

Laporoviti članovi uglavnom su litološki homogeni, a iznimka je povećanje pješčane komponente na vrhu lapora Lepsić. U najmlađem članu, Laporu Cabuna, prevladava glinovita komponenta. Pješčenjački članovi nisu homogeni i često sadrže proslojke, ponegdje i značajnih debljina, lapora. To je posebno vidljivo u Pješčenjacima Poljana. Pješčenjak gotovo potpuno isklinjava prema jugu i jugoistoku subdepresije.

U bušotini B-1 izdvojeni su debeli paketi pješčenjaka. Donji paket pješčenjaka izdvojen je kao Pješčenjaci Poljana, a gornji kao Pješčenjaci Pepelana. U podini, između pješčanih paketa i u krovini formacije talože se laporoviti sedimenti. Unutar pješčenjaka Pepelana otkrivena su dva plinska ležište na bušotini B-1.

5.2.5 FORMACIJA BILOGORA

Od sedimenata Formacije Kloštar-Ivanić u podini, Formacija Bilogora približno je odvojena elektrokarotažnim markerom Δ, a od Formacije Lonja u krovini markerom D' (**Slika 5.2.1**). Starost naslaga ove formacije odgovara približno gornjem pontu (prema staroj stratigrafskoj

podjeli), a te naslage često se nazivaju i *Rhomboidea*-naslagama prema fosilnom školjkašu *Congeria rhomboidea*.

Debljina sedimenata je veća negoli u Formaciji Kloštar-Ivanić, naročito u prostoru Bilogore. U starijim sedimentima formacije zastupljeni su glinoviti lapori te u manjoj mjeri slabovezani pješčenjaci, dok su mlađi sedimenti predstavljeni kalcitom bogatom glinom i glinom te pješčenjacima i pijeskom. (**Malvić, 2003**).

U bušotini B-1 u podinskom dijelu formacije zastupljeni su sivi sitnozrnati, slabovezani kvarc-tinjčasti pješčenjaci i sivi mekani lapori. Prema krovini formacije dolazi do porasta udjela glinovitih sedimenata, lapori prelaze u glinovite lapore i gline s proslojcima pijeska. Mjestimice se nalaze proslojaci lignita. Godine 1997. pješčenjaci u plinskom zasićenju izdvojeni su po EK dijagramima kao ekvivalent Pješčenjaka Bregi, da bi dvije godine kasnije bilo utvrđeno da ležište ipak pripada Pješčenjacima Pepelana.

5.2.6 FORMACIJA LONJA

Naslage koje pripadaju Formaciji Lonja odvojene su u podini od Formacije Bilogora s EK-markerom α' (**Slika 5.2.1**).

U pliocenu je najveći dio PBS predstavljao aluvijalnu ravnicu s brojnim manjim slatkovodnim jezerima (**Vrbanac, 1996; Rőgl 1996a**). Samo se uz njegov južni rub rasprostiralo veliko slatkovodno Slavonsko jezero (**Mandic et al., 2015**) Ta su jezera postupno zapunjavana, te se u pleistocenu taloženje odvija gotovo isključivo u fluvijalnim sredinama. Među naslagama dominiraju pijesci i gline, a u dubljim jezerima siltovi i kalcitični siltiti. Također je zabilježeno da se u nekim dijelovima subdepresije talože kalcitom bogate gline, a u drugim pjeskoviti lapori. Gline su mjestimično pjeskovite, ili sadrže proslojke pijeska. Samo je u središnjem dijelu subdepresije utvrđena izmjena šljunka, pijeska i gline s proslojcima lignita centimetarskih do metarskih dimenzija.

U bušotini B-1 formaciju izgrađuju jezerske naslage zastupljene sivim sitnozrnatim kvarc-tinjčastim pijescima s proslojcima sivih mekanih glina i lignitom. Bliže površini ove se naslage sastoje od krupnozrnatih klastita koji ukazuju na priobalje sedimentacijskog bazena i njegovo zatrpavanje.

5.3 OSVRT NA RAZLIČITU LITOSTRATIGRAFSKU PODJELU NASLAGA MLAĐEG MIOCENA I PLIOCENA

Potrebno je napomenuti da su u sklopu izrade nove geološke karte Republike Hrvatske opisane nove litostratigrafske jedinice gdje je prikazano njihovo površinsko rasprostiranje na području Požeške gore (**Halamić et al., 2019**).

Rasprostiranje mlađeg dijela tih jedinica u podzemlju opisano je u radu **Sebe et al. (2020)** gdje je predložena drugačija litostratigrafska podjela naslaga mlađeg miocena i pliocena za područje Dravske depresije unutar projekta u sklopu kojeg je napravljena korelacija miocenskih i pliocenskih sedimenata Hrvatske i Mađarske. Vremenske granice taloženja prikazanih jedinica napravljene su na temelju biostratigrafije dinoflagelata i seizmičke stratigrafije kao jedinih alata koji mogu kronostratigrafski korelirati naslage u Dravskoj depresiji.

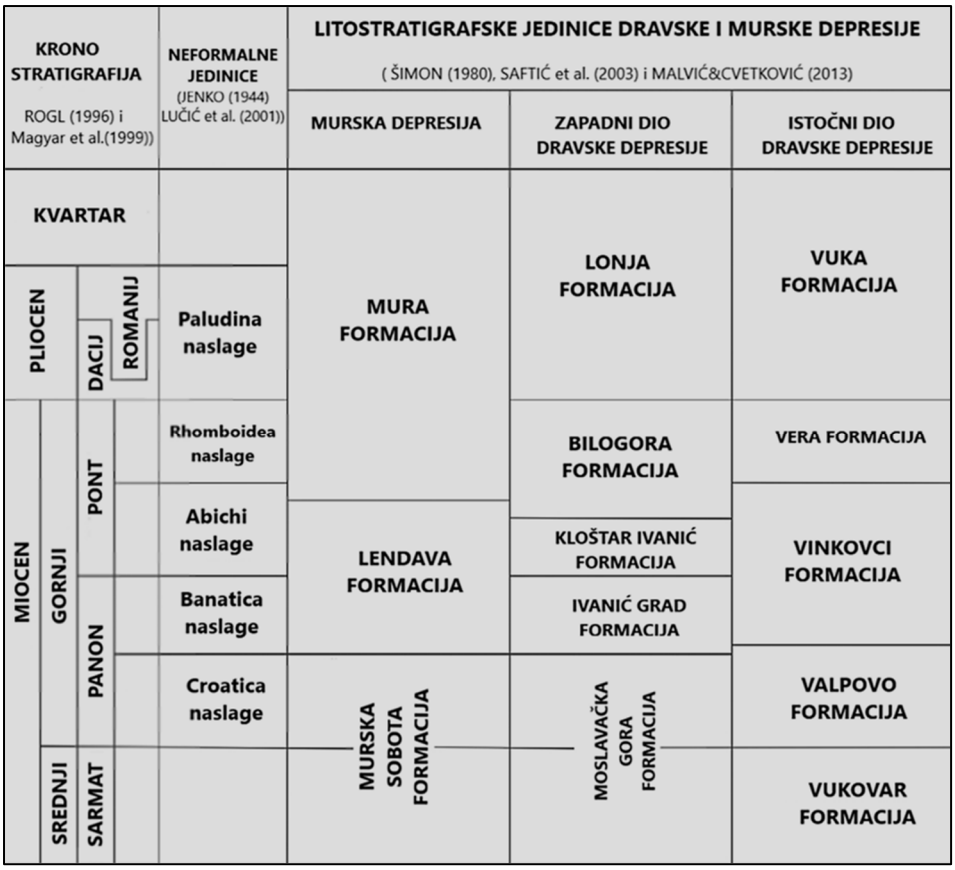
U Hrvatskoj su se do danas koristile tri glavne litostratigrafske sheme za gornjomiocenske naslage sjevernog i istočnog dijela zemlje.

Ranija je dijelila naslage na *Croatica, Banatica, Abichi i Rhomboidea* slojeve, dok su pliocenske naslage bile opisane kao Paludinski slojevi (**Pikija, 2009; Basch, 2009**).

Ova podjela koju je izvorno uveo **Jenko (1944)** prvenstveno se temeljila na superpoziciji vodećih vrsta mekušaca gdje su tradicionalno *Croatica i Banatica* naslage bile pripisivane donjem i gornjem panonu, dok su *Abichi i Rhomboidea* pripadale donjem i gornjem pontu. Ova podjela nije uzela u obzir da je prostorna i vremenska raspodjela mekušaca vrlo velika ovisno o promjenama paleoekoloških karakteristika taloženog okoliša (**Magyar & Geary, 2012**). Isto tako se i pokazalo da se razdoblje ponta izvorno definiranog u Crnomorskom bazenu pogrešno povezivalo s Panonskim bazenskim sustavom (npr**. Mandic et al., 2015).** Stara podjela i danas je još uvijek na snazi, posebno u istraživanju nafte i plina (**Sebe et al**., **2020**).

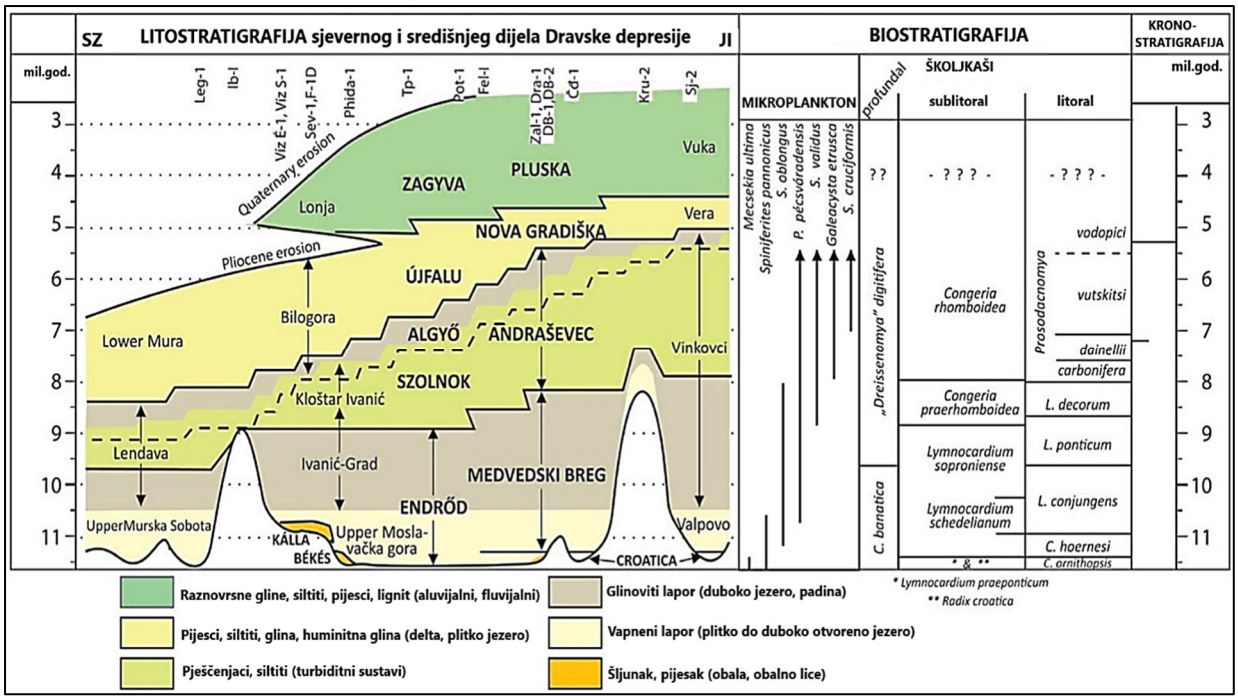
Druge dvije podjele su više temeljene na litologiji. Starija podjela, kojoj je autor **Šimon (1966, 1980)** i koju je kasnije nadopunila **Velić (2007)**, temeljena je na podacima iz bušotina, kao i na seizmičkim podacima. U ovoj podjeli litostratigrafske jedinice još uvijek imaju kronostratigrafsko značenje zanemarujući dijakroni karakter jedinica, te su prikazani drugačiji nazivi za istodobne jedinice u različitim dijelovima bazena. Ta se podjela uobičajeno koristila u Dravskoj depresiji s odvojenim litostratigrafskim podjelama za zapadni i istočni dio (**Šimon, 1966, 1980**) (**Slika 5.3.1.**).

Koncept ovih podjela ne prikazuje razliku između biostratigrafije, litostratigrafije i geokronologije pa se preporuča da se više ne koristi (**Sebe et al., 2020**).



Slika 5.3.1.: Litostratigrafska podjela gornjeg miocena i pliocena u Murskoj depresiji i istočnom i zapadnom dijelu Dravske depresije (preuzeto i modificirano iz Sebe et al., 2020)

Litostratigrafske jedinice u radu **Sebe et al. (2020)** istraživanjima površinskih sedimenata i onih u podzemlju objašnjavaju da njihov fosilni sadržaj pokazuje da su granice formacija dijakrone po cijelom području Dravske depresije i okolici i ne podudaraju se s granicama biozona ni dinoflagelata niti mekušaca. Slijedom toga u radu je prikazana korelirana litostratigrafska shema za gornjomiocenske i pliocenske jezerske i fluvijalne sukcesije koja se temelji na litološkim, sedimentološkim i odgovarajućim seizmičkim karakteristikama naslaga. Predložena je litostratigrafska shema korelirana između Hrvatske i Mađarske s kratkim opisom jedinica (**Slika 5.3.2**.). Preferirani nazivi formacija su napisani velikim slovima, a napušteni ili lokalni nazivi su u običnom formatu. Vremenska ograničenja formacija potječu iz biostratigrafije (**Sebe et al., 2020**).



Slika 5.3.2.: Korelacija gornjomiocenskih i pliocenskih litostratigrafskih jedinica u Hrvatskoj i Mađarskoj Sebe et al. (2020). Slika je djelomično prevedena.

U ovom radu analizira se Formacija Kloštar-Ivanić, te je na slici 5.3.2. moguće pratiti korelaciju s ostalim formacijama u Hrvatskoj i Mađarskoj. Dubokovodni pješčenjaci i šejlovi klasificirani kao formacija Andraševec u Hrvatskoj (**Kovačić, 2004; Kovačić et al., 2004**) pripadaju Formacijama Szolnok i Algyő u Mađarskoj, a predstavljaju sustave turbidita na padinama i prema središtu bazena (**Berczi, 1988; Juhazs, 1994; Sztano et al., 2013**). Ove dubokovodne formacije naliježu na formacije Endrőd/Medvedski breg, te se preklapaju s formacijama Újfalu/Nova Gradiška. Oni su približni ekvivalenti srednjeg i gornjeg dijela Formacija Ivanić-Grad i Kloštar-Ivanić u zapadnom dijelu Dravske depresije (**Sebe et al., 2020**).

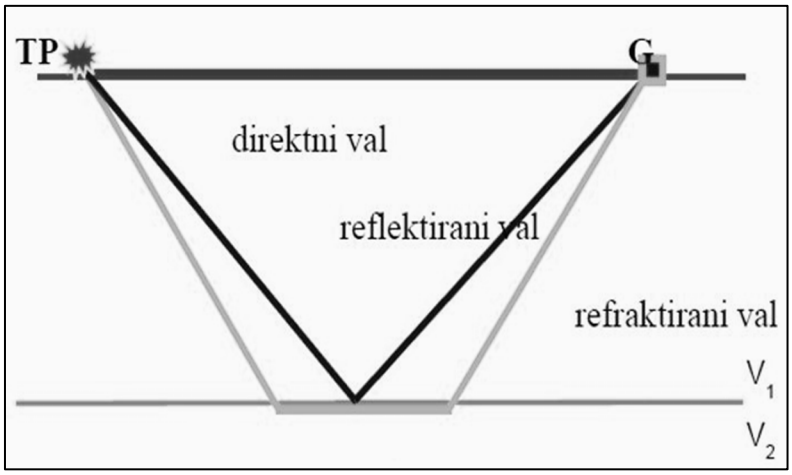
6. METODE I MATERIJALI ISTRAŽIVANJA

Za potrebe izdvajanja direktnih indikatora zasićenja ugljikovodicima (*Direct Hydrocarbon Indicators* – DHI), AVO analizu i analizu seizmičkih atributa na temelju kojih se bazira cjelokupno istraživanje ovog rada potrebni su kvalitetno obrađeni seizmički podaci. Jedino kvalitetnom obradom možemo biti sigurni da će seizmički odraz dati pravu sliku podzemlja.

6.1. OPĆENITO O SEIZMIČKIM METODAMA

Seizmičke metode (metode primijenjene geofizike) svode se na emitiranje umjetno izazvanih oscilacija u podzemlje i analizu promjena izvornog vala pod utjecajem razlika u elastičnim svojstvima pojedinih slojeva na njegovom putu (**Slika 6.1.1**). Promjene valnih svojstava su posljedica promjene litoloških svojstava, te također te promjene omogućuju i izravno pronalaženje ugljikovodika. Seizmičke metode omogućuju uočavanje lateralnih i dubinskih promjena fizikalnih parametara u podzemlju, određivanje detaljne geološko-strukturne građe te zaključivanje o stratigrafskim svojstvima područja istraživanja (**Prskalo, 2005**).

Razlika u vremenu koje je proteklo od iniciranja do registracije seizmičkog vala omogućuje određivanje dubina do pojedinih slojnih granica. U seizmičkim istraživanjima razlikujemo metodu refraktiranih i metodu reflektiranih valova.



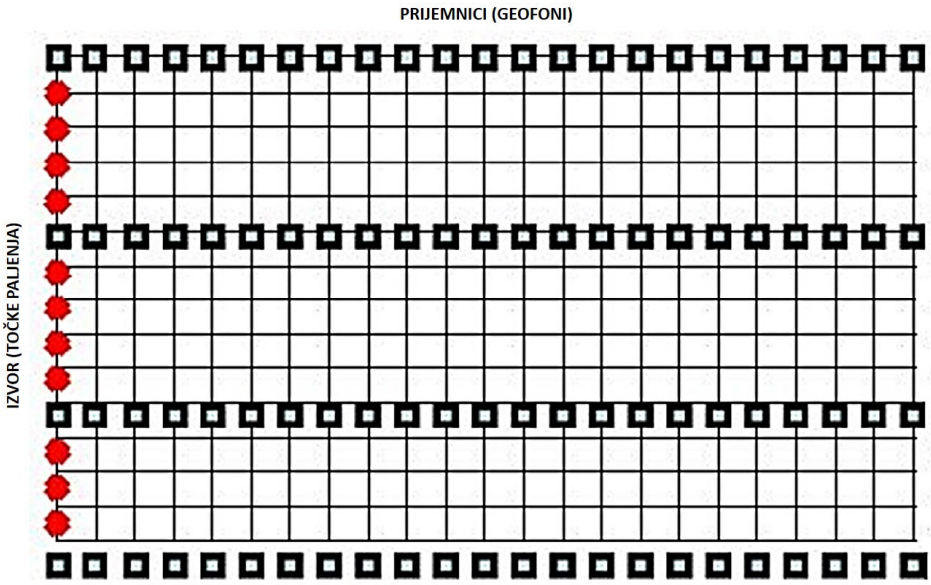
Slika 6.1.1.: Put seizmičkog vala

Metoda refraktiranih valova primjenjuje se u određivanju brzine širenja seizmičkih valova i dubine do podine rastrošne zone (odnosno određivanje sloja male brzine u istraživanju ležišta ugljikovodika), te premda danas rjeđe za određivanje dubina do temeljnog gorja, tj. podine potencijalno zanimljivih bazena za istraživanje. Obzirom da brzina širenja seizmičkih valova ovisi o elastičnosti i gustoći stijena kroz koje se valovi šire, na temelju podataka dobivenih snimanjem ovom metodom moguće je određivanje litoloških i fizikalnih svojstava stijena osobito kod istraživanja plićih dijelova podzemlja (rastrošna zona, klizišta, kamenolomi itd.).
Metoda reflektiranih valova temelji se na analizi seizmičkih valnih oblika nakon njihovog reflektiranja od podzemnih granica zbog određivanja strukturne i litološko-geološke građe podzemlja. Tom metodom zapravo dobivamo kompleksnu sliku podzemlja koju možemo interpretirati (**Šumanovac, 2012, Kondela et al., 2018**).

6.2. SNIMANJE ILI AKVIZICIJA SEIZMIČKIH PODATAKA

Glavni cilj terenskih mjerenja je snimanje brzine gibanja čestica tla što očitavaju prijemnici ili geofoni. Pomaci čestica izazvani nailaskom seizmičkog vala pomiču uzvojnicu u geofonu u odnosu na magnetsku jezgru i induciraju električni napon.
U isto vrijeme koristi se veći broj prijemnika koji na zajedničkom izlazu daju seizmički trag. Svi ti tragovi snimaju se u obliku niza brojeva na magnetsku vrpcu da bi se kasnije prikazali u analognom obliku i obradili kako bi poboljšali terenske podatke, te na kraju kako bi se moglo pravilno interpretirati strukturno-tektonsku i litološku građu podzemlja.
Postoji više načina na koji možemo izazvati oscilacije tla odnosno više vrsta seizmičkih izvora. Izvori mogu biti eksplozivni (kao što su npr. dinamit) i neeksplozivni kao recimo vibratori na kopnu. Eksplozivni izvori su na kopnu vrlo efikasni, no vrlo su skupi jer zahtijevaju bušenje rupa za postavljanje eksploziva, a dodatni problem je i skladištenje i transport eksploziva. Zato su najčešći kopneni izvori vibratori koji proizvode *sweep* signal koji varira u frekvenciji od 2 do 250 Hz. Koriste se u grupama i njihova velika prednost je što se mogu koristiti u naseljenim prostorima jer ne uništavaju okoliš (**Prskalo, 2005**).
Seizmičke metode u istraživanju ugljikovodika i geoloških struktura u podzemlju možemo podijeliti na 2D i 3D seizmička snimanja. Kod 2D snimanja, snimljeni podaci su rezultat refleksije samo unutar jedne ravnine duž linije profila. Snima se veći broj tragova (24, 48, 96 ili više) s jednim izvorom, a najčešće se koriste linijski simetrični i bočni raspored izvora i prijemnika. Kod simetričnog rasporeda izvor se nalazi u sredini rasporeda koji je sastavljen od više geofonskih figura, a kod bočnog izvor se nalazi na jednoj njegovoj strani. 3D metodom

dobivamo cjelokupnu sliku podzemlja jer se procesi odvijaju u tri dimenzije. Rezultat 3D seizmičke metode prikazan je volumenom podataka ili kockom čime dobivamo preciznu sliku podzemlja. Kod 3D snimanja na terenu postavljaju se paralelne geofonske linije s točno određenim razmakom, a seizmički izvori odnosno točke paljenja postavljaju se okomito na smjer pružanja geofonskih linija. Linije prijemnika nazivaju se *Inline* (IL) smjer, a na njih okomite linije u trodimenzionalnom snimanju nazivaju se *Crossline* (XL) smjer (**Slika 6.2.1**.). Ne postoji adekvatan prijevod, te se koristi ovo nazivlje. Na taj način dobivamo 3D seizmički volumen ili kocku koju u obradi podataka možemo dijeliti na *inline*, *crossline* i vremenske presjeke (engl. *Time-slice*), te ih tako prikazivati dvodimenzionalno. Također, danas u industriji snimanja 3D seizmičkih podataka uobičajena je praksa da se snima po tzv. *swath*-ovima, gdje su u jednom *swath*-u linije prijemnika fiksirane i svi snimci koji se odnose na jedan *swath* snimaju se s istim setom linija geofona.

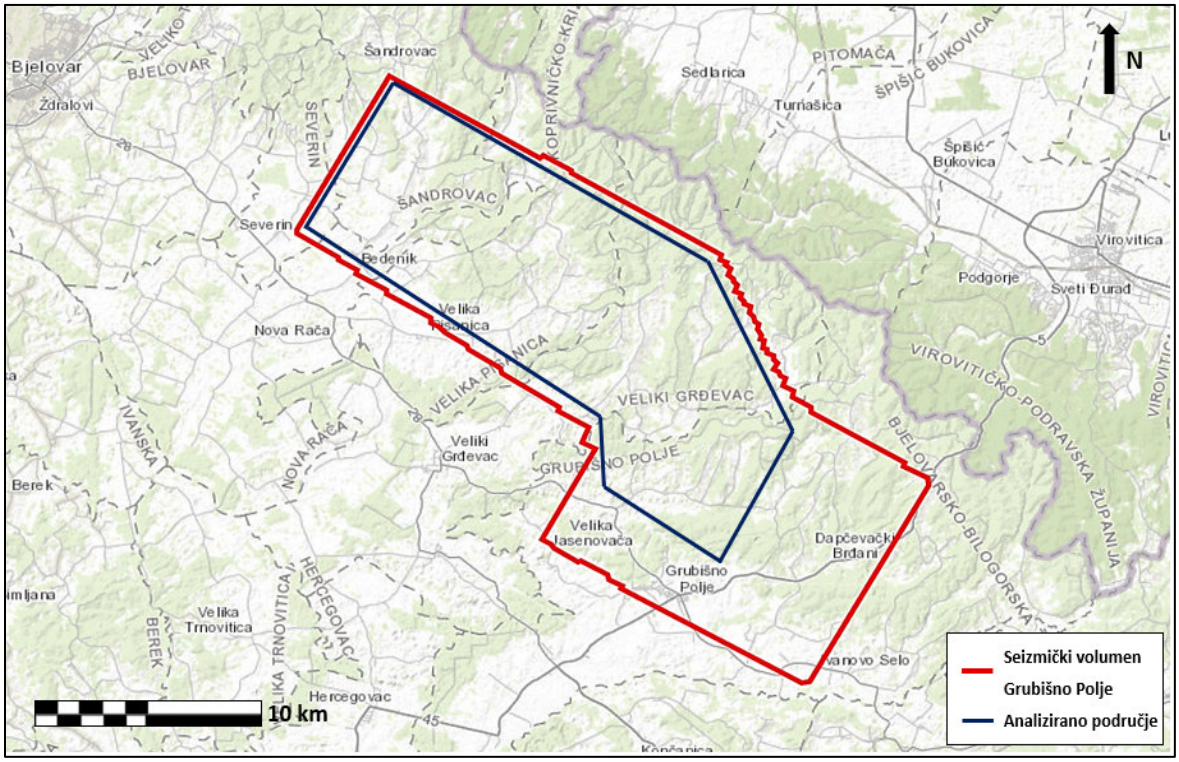


Slika 6.2.1: Inline i Crossline smjerovi snimanja seizmičkih podataka

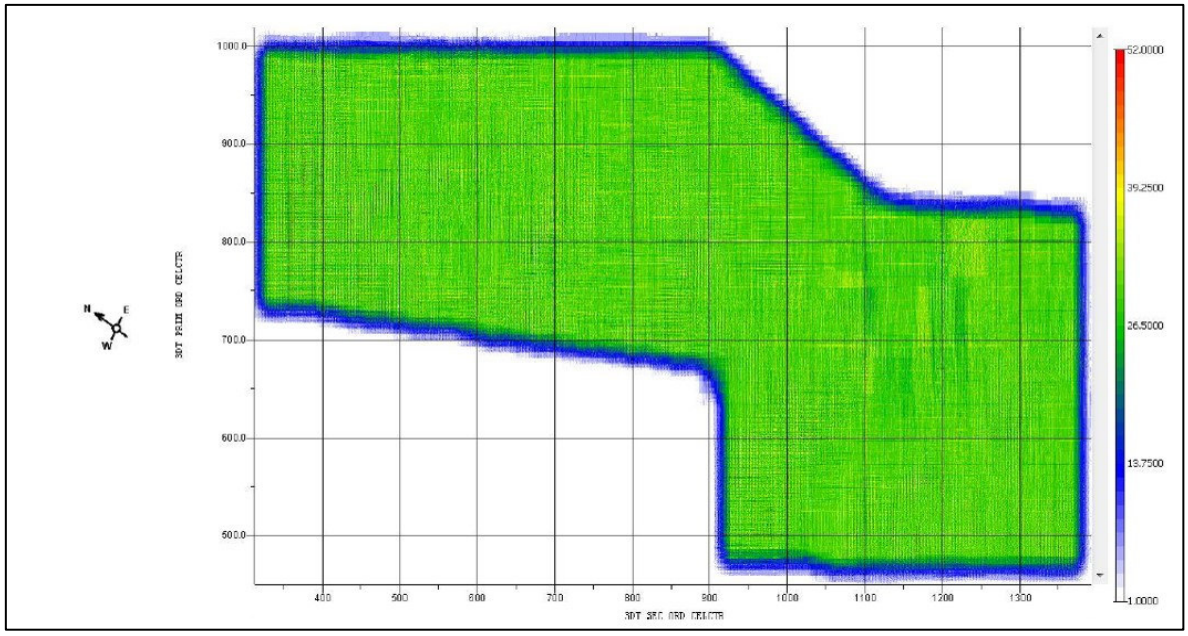
3D seizmika snimljena je u okviru projekta "3D Grubišno Polje" (**Slika 6.2.2.**) 1998. godine i snimila ju je tvrtka Schlumberger. 3D volumen seizmičkih podataka Grubišno Polje obuhvaća prostor površine 246 km2.

Postignuti parametri snimanja bili su: 45 „*swath*-ova“ s po 12 usporednih linija geofona u svakome „*swath*-u“. Veličina ćelije iznosila je 25x25 metara, dok je prekrivanje bilo 30-struko. Razmak između linija paljenja iznosio je 200 metara, a udaljenost između točaka paljenja u pojedinačnoj liniji bila je 50 metara (**Tablica 6.2.1., Slika 6.2.3.**). Kao izvor valova

upotrebljavani su vibratori i eksploziv. Obrada seizmičkih podataka tekla je usporedno sa snimanjem. Prilikom obrade za završni volumen koristila se vremenska migracija poslije zbrajanja (*Post-stack*).



Slika 6.2.2. 3D volumen Grubišno Polje i analizirano područje



Slika 6.2.3.: Shema prekrivanja

Tablica 6.2.1.: Parametri snimanja

	Grubišno Polje
Broj snimaka	16920
Nominalno prekrivanje	30
Razmak prijemnika (m)	50
Razmak točaka izvora(m)	50
Razmak linija prijemnika (m)	200
Razmak linija izvora (m)	300
Broj aktivnih linija prijemnika	12
Broj aktivnih prijemnika po liniji	60
Ukupan broj aktivnih prijemnika	720
Orijentacija linija prijemnika	JZ-SI
Orijentacija linija izvora	SZ-JI
Dužina snimke (ms)	4000
Uzorkovanje (ms)	2
Vrsta izvora	Vib.&Dyn.
Frekvencija sweepa (Hz)	8/20-72
Dužina sweepa (s)	16
Vrsta sweepa	Linearni
Broj sweepa	2-3
Broj bušotina po ekspl. Izvoru	1-3
Količina ekspl. (kg)	0,313
Dubina bušotine (m)	2
Instrument	Olympus FRS ENPmaster
Površina (km2)	253,8
Veličina ćelije CMP-a (m)	25x25
Godina akvizicije	1998
Izvođač	Schlumberger

6.3. OBRADA SEIZMIČKIH PODATAKA

Snimljeni podaci se obrađuju u centrima za obradu seizmičkih podataka raznim postupcima kako bi se konačni rezultat prikazao u obliku dvodimenzionalnih (2D) seizmičkih profila ili trodimenzionalnih (3D) prostornih blokova seizmičkih podataka koji se nadalje interpretiraju radi dobivanja geološko-strukturnog modela istraživanog dijela podzemlja i planiranja novih proizvodnih bušotina na već otkrivenim perspektivnim poljima/ležištima **(Prskalo, 2005**).

Glavni cilj obrade seizmičkih podataka je poboljšanje kvalitete terenskih podataka kako bi ih doveli u oblik koji je pogodan za daljnju geološku interpretaciju. Dakle, svrha obrade je popravljanje spektra korisnog signala odnosno poboljšanje odnosa signal/smetnja, te poboljšanje horizontalne i vertikalne rezolucije. Zatim je potrebno korigirati vremena reflektiranih nailazaka i dovesti podzemne točke reflektiranja u njihov stvarni položaj na obrađenoj seizmičkoj sekciji što se naziva procesom migracije, kojim se povećava horizontalna rezolucija.

Pojednostavljeno, tijek obrade može se podijeliti u nekoliko faza:

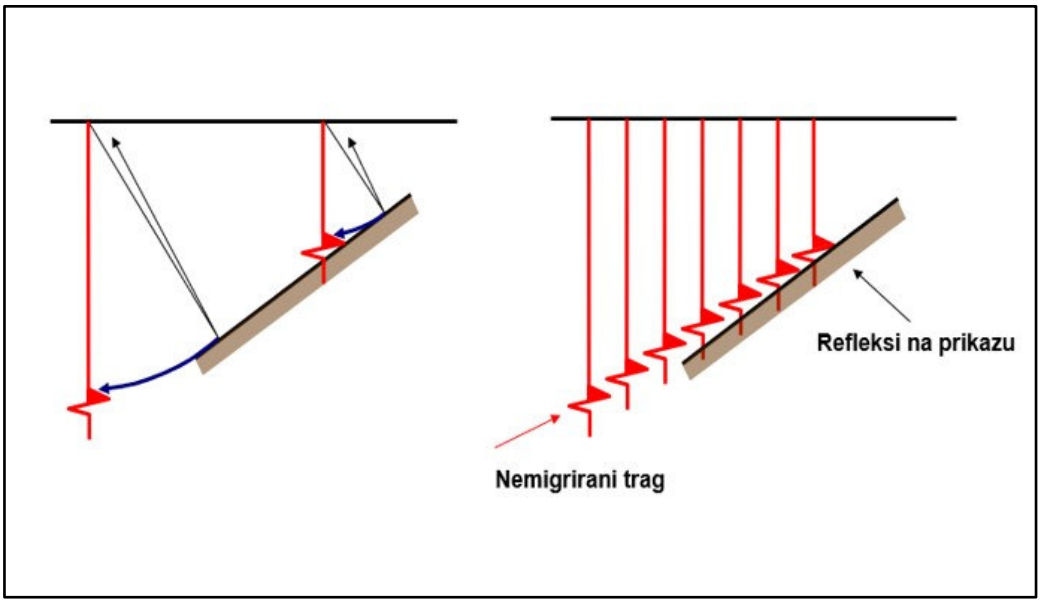
- Ulazni podaci (terenski podaci na trakama ili disku)
- Amplitudna korekcija (korekcija radi apsorpcije energije, širenja kroz podzemlje)
- Definiranje geometrije
- Statičke korekcije (korekcije radi konfiguracije terena i rastrošne zone)
- Obrada korisnog signala i uklanjanje slučajnih i organiziranih smetnji (uklanjanje frekvencija koje ne pripadaju signalu)
- Dekonvolucija (inverzno filtriranje, skraćenje seizmičkog valića)
- Sortiranje po zajedničkoj dubinskoj točki (organizacija tragova prema „*common depth point*“ – CDP, *common midpoint* - CMP)
- Analiza brzina, dinamičke korekcije (*Normal moveout*- NMO korekcije)
- Stekiranje (zbrajanje nekoliko tragova u jedan radi pojačanja realnog refleksa)
- Uklanjanje smetnji
- Migracija (vraćanje točke u podzemlju na pravu poziciju)
- *Zero-phasing* (pretvaranje minimum faze u nultu fazu), dodavanje viših frekvencija koje su se s dubinom izgubile)
- izlazni podaci

U obradi podataka potrebno je poboljšati odnos signal/smetnja odnosno poželjno je imati što više signala, a što manje smetnji. Pod smetnjom podrazumijevamo nailaske koji ne nose informaciju o građi podzemlja, nego maskiraju korisne nailaske.
Odgovarajućim filtriranjem u obradi smetnje se svode na najmanju moguću mjeru tj. ne mogu se nikada otkloniti do kraja zbog toga što postoje i smetnje sa istim frekvencijama kao i signal, pa bi njihovim uklanjanjem uklonili i korisni signal. Poboljšanje odnosa signal/smetnja provodi se postupkom stekiranja ili zbrajanja terenskih zapisa. Zbrajanjem tragova koji su u istoj fazi u jedan refleks poboljšava se odnosno pojačava signal, a oni koji nisu u fazi se smanjuju odnosno kod pojave smetnje ona se poništava ili barem slabi. Zatim se u obradi podataka radi poboljšanje vertikalne i horizontalne rezolucije.
Horizontalna rezolucija se povećava migracijom. Vrijeme nailaska vala od površine do reflektora je koso vrijeme koje se prikazuje vertikalno na točki paljenja, pa je zato kod kosih reflektora točka refleksije na profilu prikazana dublje u vremenu i na drugom mjestu nego što

zaista je. Zapravo migracijom se točka vraća na pravo mjesto odnosno radi se vremenska korekcija za vertikalu.

Obrađeni tragovi prikazani su na profilima na mjestima projekcije zajedničke središnje dubinske točke (CDP-*Common depth point*) na površinu što odgovara stvarnom mjestu točaka reflektiranja u podzemlju jedino u slučaju horizontalnih reflektora. Obzirom da ćemo u podzemlju u većem broju slučajeva naići na kose reflektore, te će se položaj reflektiranih nailazaka na seizmičkim prikazima razlikovati od njihovog stvarnog položaja u podzemlju (**Sheriff, 1992**).

Dakle, izobličenja reflektiranih nailazaka uglavnom su vezana za kose reflektirajuće granice kao što su antiklinalna i sinklinalna strukturna povijanja i prekide slojnih granica uz rasjede i isklinjenja. Zato je važno primijeniti proces migracije.



Slika 6.3.1. Proces migracije

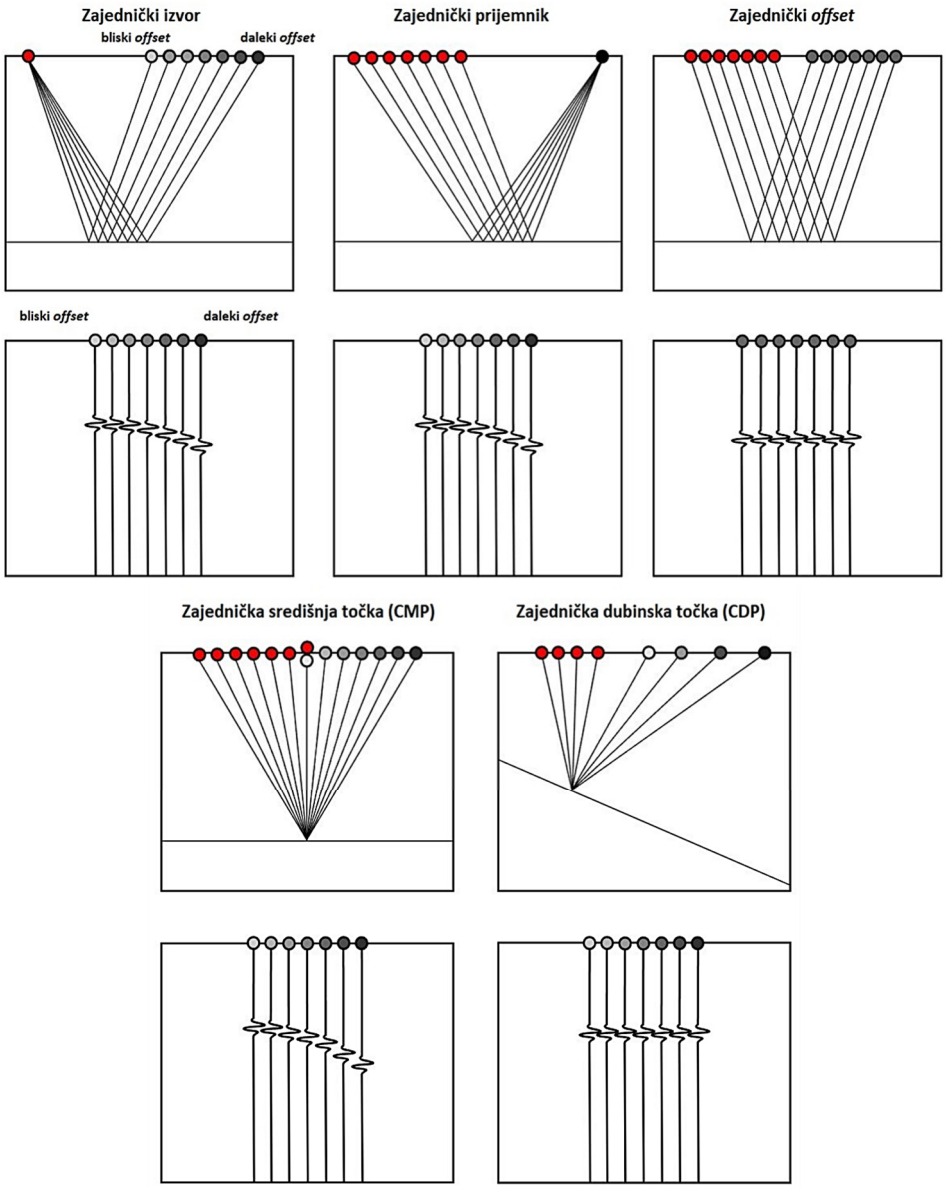
Stvarni nagib reflektora je blaži nego što to izgleda na nemigriranom prikazu (**Slika 6.3.1**.). Ne zna se točno otkud refleksija dolazi, ali moguće je izračunati sva moguća mjesta refleksije seizmičkog nailaska.

Razlikujemo 4 vrste migracije: vremensku migraciju prije i poslije zbrajanja (pre-stack i post-stack) i dubinsku migraciju prije i poslije zbrajanja tragova (*pre-stack i post-stack*). Post stack migracija općenito daje zadovoljavajuće rezultate, no ne i u područjima kompleksne geološke građe gdje imamo nagle lateralne i vertikalne promjene u brzini odnosno u samoj geologiji zbog promjena u brzini seizmičkog vala kroz različite vrste stijena.

Osnovna razlika između vremenske i dubinske migracije odnosi se na model brzina.
Primjena migracije u vremenskoj domeni zadovoljava u područjima gdje nema većih promjena u brzinama širenja seizmičkih valova. A u područjima s kompliciranim strukturnim odnosima i velikim lateralnim promjenama brzine ponekad je nužno primijeniti dubinsku migraciju.

8.7.1 CMP *GATHERI*

Gather je engleski naziv za skup seizmičkih tragova koji dijele neke uobičajene geometrijske atribute, te se nije uvriježila hrvatska inačica imena, nego se u široj primjeni u obradi seizmičkih podataka i istraživanju ugljikovodika koristi upravo taj termin.
Prilikom snimanja seizmičkih podataka svaki prijemnik zabilježiti će po jedan seizmički trag nakon emitiranja seizmičke energije s izvora (vibrator ili eksploziv). Svi se tragovi koji u podzemlju pokrivaju zajedničku dubinsku točku (CDP) koja se, ako se projicira okomito na površinu naziva zajednička središnja točka (CMP -*common midpoint*), zbrajaju. Tako će svi tragovi jednake zajedničke središnje točke predstavljati jedan trag, druge, drugi trag itd. i činiti jedan *CMP gather*. Na taj način, zbrajanjem svih nailazaka nakon primjene odgovarajućih statičkih i dinamičkih ili NMO korekcija, povećava se amplituda korisnih refleksa uz istovremeno prigušenje smetnji, što u konačnici rezultira značajnim poboljšanjem omjera signal/smetnja. Potrebno je napomenuti da je prije početka primjene CMP metode radi određivanja točnih dubina do podzemnih objekata, snimljene podatke o vremenima proteklim od emitiranja do registracije seizmičkog vala potrebno preračunati na neku referentnu ravninu ili datum što se postiže primjenom statičkih i dinamičkih korekcija. Primjena statičkih korekcija na kopnu otklanja utjecaje razlika u visinama među pojedinim točkama emitiranja i registracije vala i debljine rastrošne zone odnosno tzv. „sloja male brzine“. S druge strane, geometrijski raspored izvora i prijemnika na površini izravno utječe na pojavu različitih vremena nailazaka reflektiranih od iste granice unutar podzemlja. Tako na prijemnik u neposrednoj blizini izvora reflektirani nailasci dolaze najranije, a udaljavanjem prijemnika od izvora vremena nailazaka seizmičkih valova se povećavaju jer se povećava i duljina njihovih putova. Razlike u vremenima uzrokovanih rasporedom elemenata za snimanje otklanjaju dinamičke korekcije (**Prskalo, 2005**).



Slika 6.3.1.1. Vrste gathera (https://subsurfwiki.org/wiki/Gather)

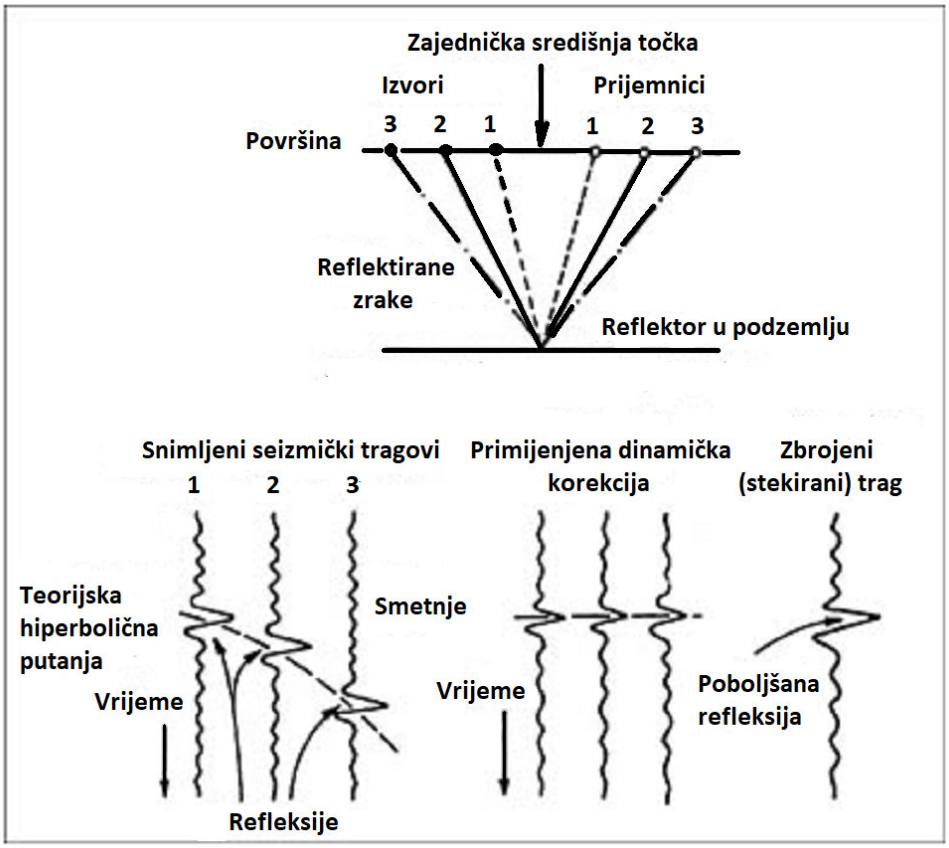
Izraz *gather* obično se odnosi na izraz *CMP gather* (kada se koristi zajednička središnja točka prilikom zbrajanja tragova) dok postoji. Osim toga, koristi se još i izraz *Shot gather* (*Common shot gather*) za koji također ne postoji hrvatski naziv, a označava tragove koji potječu od jednog snimka seizmičke energije koju projicira izvor seizmičkih valova, a registrira ga veći broj prijemnika (**Slika 6.3.1.1**.).

Tragovi iz različitih zapisa pojedinih snimaka sa zajedničkom središnjom ili dubinskom točkom zbrojeni su tako da tvore jedinstveni trag tijekom seizmičke obrade i taj proces se naziva stekiranje (engl. *stacking*), a krajnji izlaz je stack odnosno zbrojeni tragovi na seizmičkom

profilu ili seizmičkom volumenu, ovisno da li su podaci dvodimenzionalni ili trodimenzionalni (**Slika 6.3.1.2**.).

Broj tragova koji su zbrojeni tijekom takvog procesa slaganja ili stekiranja naziva se nominalno prekrivanje (engl. *fold*).

(Oilfield Glossary, Schlumberger, https://glossary.oilfield.slb.com/en/terms/s/stack).



Slika 6.3.1.2. Dijagram tijeka procesa stekiranja ili zbrajanja snimljenih seizmičkih tragova (Oilfield Glossary, Schlumberger, https://glossary.oilfield.slb.com/en/terms/s/stack modificirano)

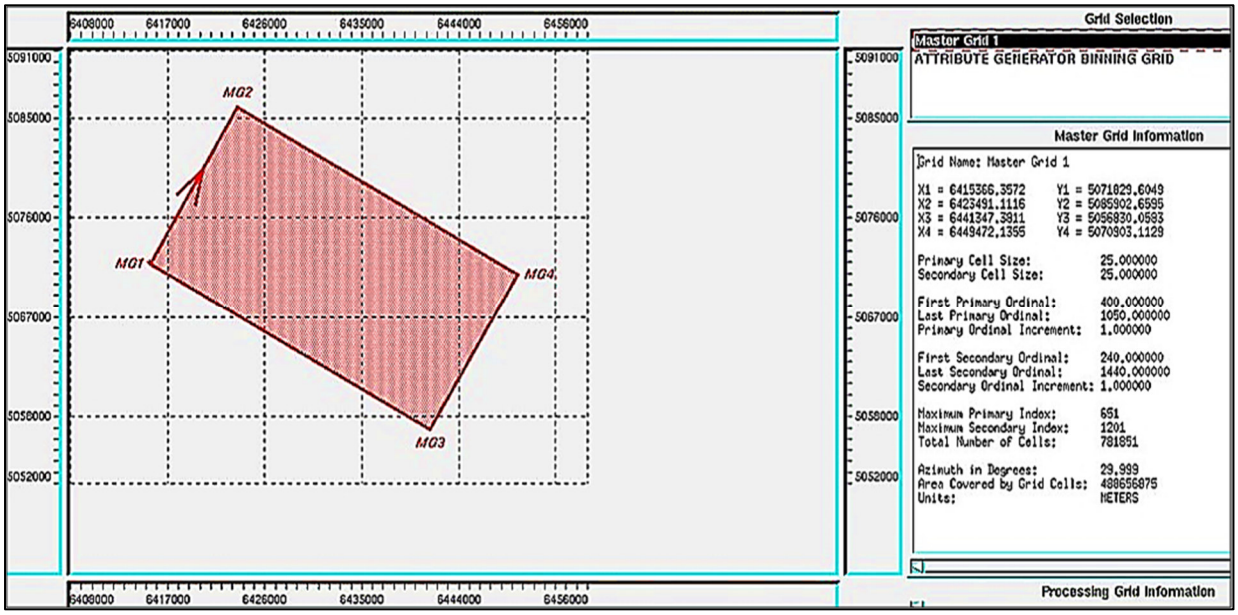
8.7.2 PONOVNA OBRADA SEIZMIČKIH PODATAKA

Ponovna obrada postojećeg 3D volumena najnovijim programskim rješenjima je napravljena 2018. godine u svrhu dobivanja naprednih analiza seizmičkih atributa (inverzija, AVO, spektralna dekompozicija), te da bi se poboljšala kvaliteta podataka za definiranje stratigrafskih zamki, izdvajanje sedimentnih tijela te analizu direktnih indikatora zasićenja ugljikovodicima. Ponovna obrada je napravljena u INA-inom centru za obradu geofizičkih podataka koristeći *WesternGeco Omega2 Seismic Processing* softver. Procesna 3D mreža

(*grid*) (**Tablica 6.3.2.1., Slika 6.3.2.1.**) definirana je uzimajući u obzir terenske koordinate i sistem numeracije geofonskih linija i linija točaka paljenja. Sve koordinate su u Bessel 1841 sferoidu i Gauss-Krüger projekciji zona 6.

Tablica 6.3.2.1.: Terenske koordinate i sistem numeracije geofonskih linija i linija točaka paljenja (Bessel 1841 sferoid i Gauss-Krüger projekcija zona 6)

Parametri:				
	XCOORD	YCOORD	INLINE	XLINE
MG1:	6410916.2324	5092918.2784	100	500
MG2:	6419898.1175	5122849.6706	100	1750
MG3:	6464792.7384	5076750.8852	2350	500
MG4:	6473774.6235	5106682.2774	2350	1750
Veličina ćelije: 25 x 25 m				
Azimut (smjerni kut): 16.704°				

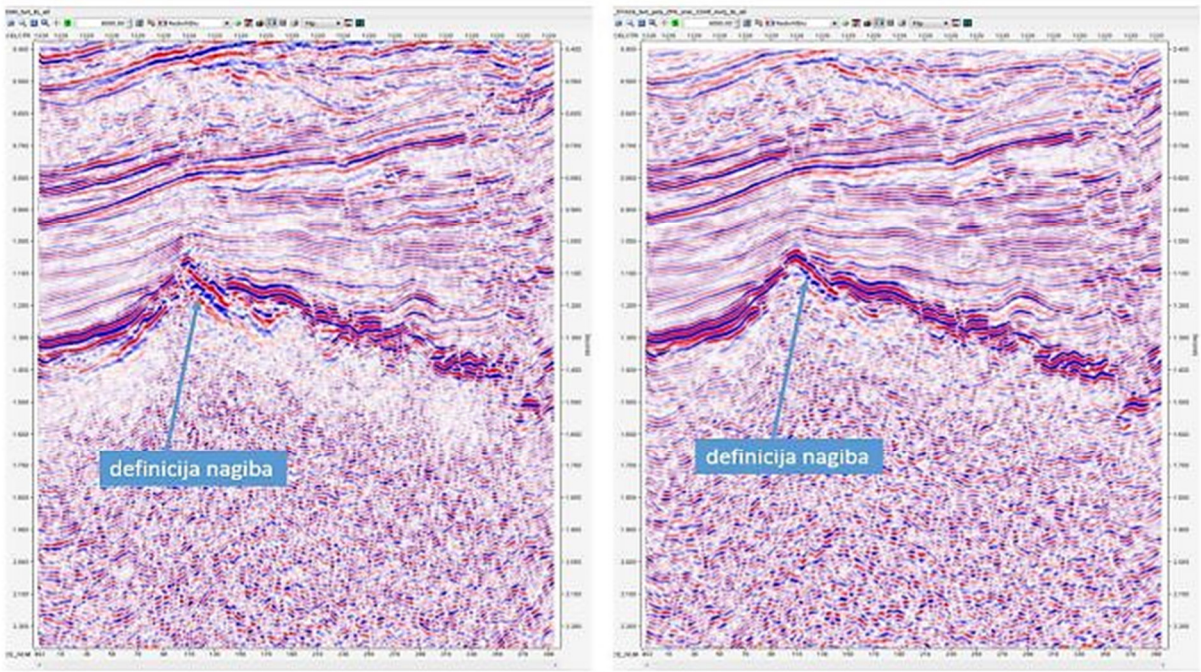


Slika 6.3.2.1. Mreža seizmičkog volumena

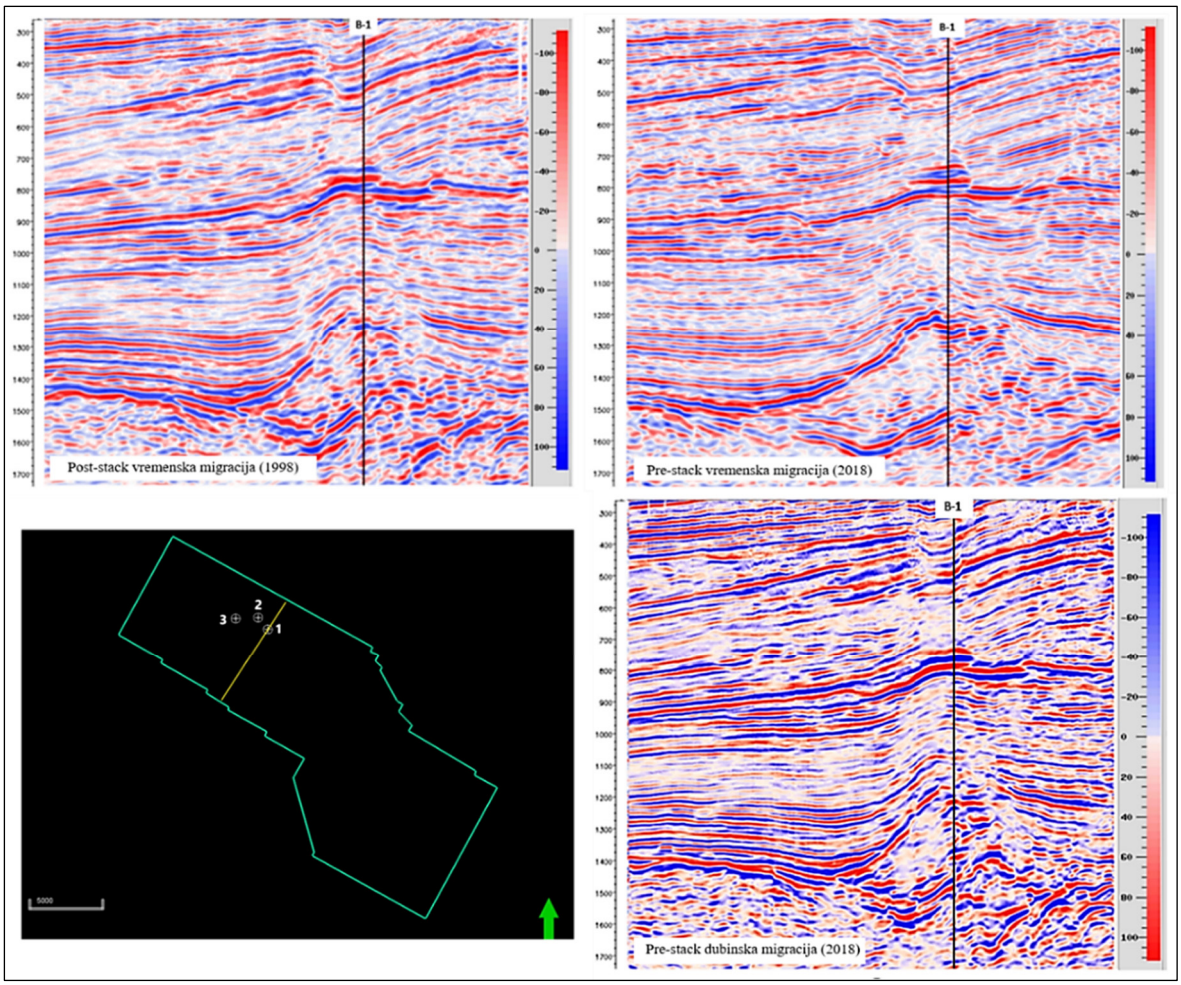
Novi vremenski 3D volumen ima nekoliko prednosti u odnosu na prijašnju obradu te je dobivena vjerodostojnija slika podzemlja. Primjenom novih, visoko sofisticiranih procesa, postignuta je poboljšana koherencija te kontinuitet signala. Uz ostale procese obrade primijenjena je prostorno relativna amplitudna kompenzacija (SRAC- *Spatially Relative Amplitude Compensation*) kao filter koji kompenzira nagle vrijednosti prostornih promjena amplituda. Jer geometrija snimanja ili primjerice različite apsorpcije nadsloja u zoni plitkih

plinova često uzrokuju kratkovalne amplitudne anomalije. Tako nastali amplitudni artefakti na snimljenim podacima maskiraju suptilne stratigrafske i AVO (*Amplitude Versus Offset*) značajke te u velikoj mjeri mogu ograničiti strukturnu interpretaciju. Zatim koherentni filter u domeni frekvencije koji anuliranjem uzoraka nižih amplituda od definiranog praga djeluje na ukupno poboljšanje koherencije. Nadalje, za rješavanje problematike debele rastrošne zone korišten je novi programski paket za izračun refrakcijskih statičkih korekcija *TOMO* plus pomoću kojeg je dobiveno globalno statičko rješenje.

Novodobivena slika je preciznija i bolje definira komplicirane geološko – strukturno - tektonske odnose. Naročito se to odnosi na rasjede, sada znatno oštrijih kontura i lakših za interpretaciju. Proces dubinske migracije dodatno je poboljšao sliku te je znatno umanjen *pull down* efekt. Rasjedi su jasniji dok su nagibi mnogo realniji u odnosu na vremensku obradu (Završni izvještaj o reobradi 3D seizmičkih podataka na polju Grubišno Polje, 2018). (**Slika 6.3.2.2., 6.3.2.3.).**



Slika 6.3.2.2. Usporedba vremenske migracije (lijevo) i dubinske migracije konvertirane u vremensku domenu (desno)(preuzeto iz završnog izvještaja o reobradi 3D seizmičkih podataka na polju Grubišno Polje, 2018)



Slika 6.3.2.3. Usporedba različitih obrada seizmičkih podataka (Post-stack vremenska, Pre-stack vremenska i Pre-stack dubinska migracija)

6.4. ANALIZE SEIZMIČKIH ATRIBUTA

Zasićenost ležišta ugljikovodicima je jedna od značajki podzemlja koja izravno utječe na karakteristike seizmičkih valova. Ulaskom u ležište zasićeno naftom ili plinom dolazi do promjene u karakteru seizmičkog signala i to amplitude, frekvencije i faze. Analizom seizmičkih atributa moguće je odrediti eventualno zasićenje interpretiranog ležišta (**Taner, 2001; Brown, 2001; Chopra & Marfurt, 2005**). No činjenica je da je atributni izraz moguće tumačiti na više načina. Osim zasićenja, na promjenu u povećanju vrijednosti amplituda utječu izmjene tankih slojeva pijesaka i lapora, različite litološke promjene, a mogu utjecati i pojedini postupci prilikom obrade seizmičkih podataka (**Taner et al., 1994**). U brojnim slučajevima se dokazalo da frekvencija određenog intervala može biti pokazatelj zasićenosti ugljikovodicima, ali do promjene frekvencije može doći i zbog drugih karakteristika ležišta. Niske vrijednosti

frekvencija mogu biti indikatori zasićenosti plinom, no mogu biti i karakteristika raspucanosti kolektorskih stijena u ležištu. Faza seizmičkog vala ulaskom u plinsko ležište mijenja karakter i u slučaju tanjih ležišta zasićenih plinom može biti pokazatelj zasićenja.

No, seizmički atributi nisu međusobno nezavisni. Kako bi se postigla pouzdanija procjena podzemlja treba analizirati više atributa istovremeno (**Brown, 2001**). Izrađeni su i analizirani različiti seizmički atributi (osnovni atributi, atributi horizonata, geometrijski atributi i kombinirani ili hibridni atributi). Jednostavni atributi koji kada se logički, statistički ili matematički kombiniraju tvore hibridne atribute.

Svrha izrade i interpretacije seizmičkih atributa je dobiti što više informacija o sadržaju, kvaliteti i diskontinuitetima unutar ležišta (**Schlumberger, 2007**). Izrada i analiza seizmičkih atributa napravljena je nakon seizmičke interpretacije horizonata, paralelno sa završnom interpretacijom istražnog područja.

6.4.1 TEORIJSKA OSNOVA ANALIZE SEIZMIČKIH ATRIBUTA

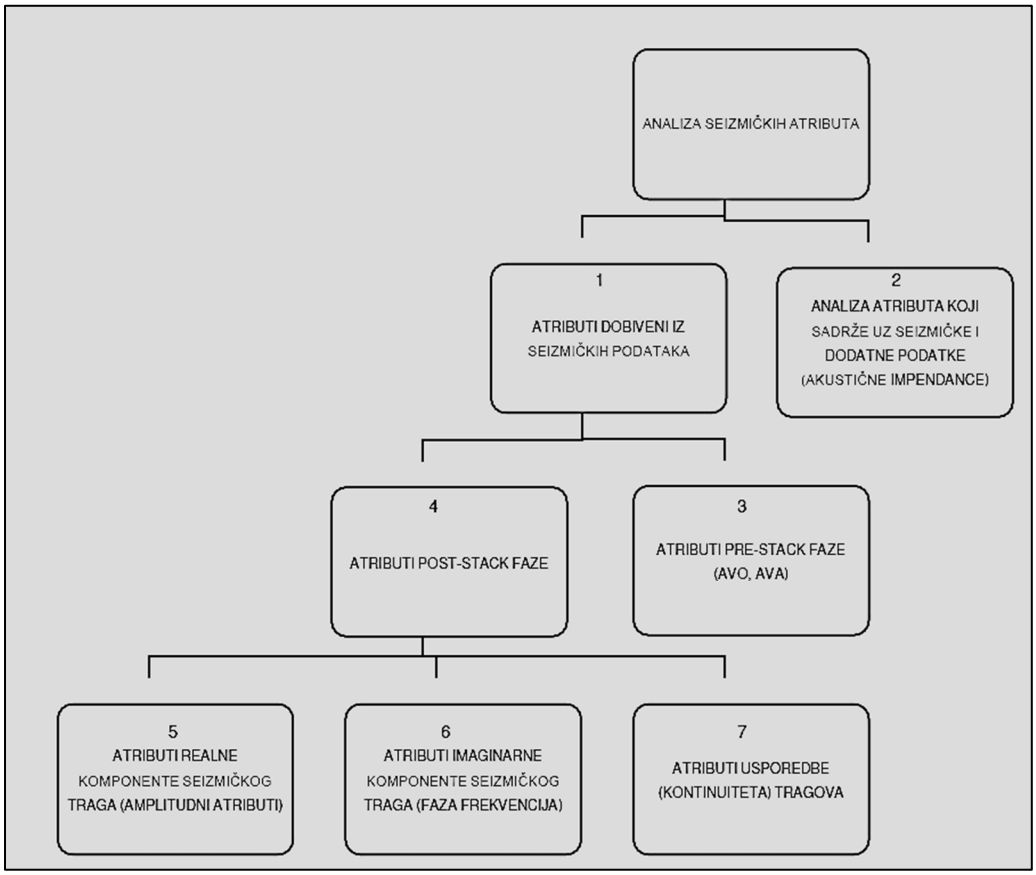
U drugoj polovici prošlog stoljeća **Taner et al. (1979)** spoznali su način odjeljivanja vrlo specifičnih informacija na temelju različitog prikaza seizmičkih podataka. Seizmički podaci impliciraju informacije koje nisu odmah vidljive u klasičnoj obradi i na uobičajenim seizmičkim prikazima. Prvi diferencirani seizmički atributi, određeni kao osnovni, bili su trenutna amplituda i trenutna faza. Svi ostali atributi izvode se iz njih, no zbog informacija koje pružaju, prividni polaritet i trenutnu frekvenciju moguće je također klasificirati kao temeljne atribute. Kao osnova za izračun seizmičkih atributa koristi se teorija digitalnog signala (**Schlumberger, 2007**).

Seizmički atributi su jedan od osnovnih alata u istraživanjima i razradi ležišta ugljikovodika. Mogu pomoći u detaljnijoj karakterizaciji ležišta i kvantificiranju rezervoarskih svojstava. Primjena seizmičkih atributa u istraživanju je mnogostruka, od definiranja regionalnih odnosa, do strukturno-tektonske interpretacije i odnosa između taložnih jedinica. U razradi ležišta koriste se za definiranje ležišnih karakteristika kao što su zasićenje, promjena u kvaliteti ležišta, te dijagnosticiranja bočnih granica ležišta (**Šumanovac, 2012**).

Atributi dobiveni isključivo iz seizmičkog zapisa dijele se na atribute prije zbrajanja (engl. *pre-stack*) i atribute poslije zbrajanja (engl. *post-stack*) (**Taner et al., 1994**). Podaci prije procesa zbrajanja sadrže informacije o smjeru (engl. *azimuth*) i pomaku (engl. *offset*) snimljenog signala. Njihovim računanjem dobivamo niz podataka o sadržaju i orijentaciji diskontinuiteta,

te o vrsti fluida u ležištu. *Pre - stack* atributi su atributi dobiveni AVO analizom, atributi u kojima se prije zbrajanja tragova računaju varijacije u amplitudi seizmičkog odraza u odnosu na pomak ili udaljenost od izvora do prijemnika.

Post-stack atributi računaju se u obradi seizmičkih podataka nakon procesa zbrajanja tragova uz eliminaciju podataka o pomaku i smjeru. Sadrže puno podataka o prostoru i pogodni su, kako za temeljno pregledno istraživanje, tako i za analizu podzemlja (**Šumanovac, 2012**). (**Slika 6.4.1.1**.).



Slika 6.4.1.1.: Podjela seizmičkih atributa na temelju vrste ulaznih podataka

Također postoji još puno podjela seizmičkih atributa, a jedna od vrlo čestih koju zastupa Taner i dr. (1994) je podjela na:

- Fizičke atribute ili refleksijske karakteristike i
- Geometrijske atribute ili oblik (konfiguracija) refleksa.

Prvoj grupi pripadaju atributi koji se dobivaju iz kompleksnog seizmičkog traga i daju podatke o litološkom sastavu i rezervoarskim karakteristikama. To su trenutna faza, trenutna amplituda, prividni polaritet, dominantna frekvencija, normalizirana amplituda itd. Drugoj grupi pripadaju

atributi koji se računaju na podacima prije zbrajanja kao što su npr. AVO (engl. *amplitude versus offset*) atributi ili NMO (engl. *normal moveout*) brzine.
U programskom paketu Petrel TM nalazi se različita podjela koja je korištena prilikom nekih od seizmičkih atributa prikazanih u ovom radu (**Schlumberger, 2007**), a to je podjela na:

- Atribute kompleksnog seizmičkog traga
- Strukturne atribute
- Stratigrafske atribute
- Atribute seizmičkih horizonata

Prvoj grupi ubrajaju se uglavnom temeljni seizmički atributi i oni se najčešće koriste u interpretaciji. Strukturni i stratigrafski atributi daju odlične strukturne prikaze kanalskih ispuna, grebenskih struktura i diskontinuiteta. Atributi seizmičkih površina imaju još nekoliko podskupina kao što su amplitudni i statistički atributi, te atributi oblika signala.

6.4.2 ANALIZA KOMPLEKSNOG SEIZMIČKOG TRAGA

Promatrajući seizmički val kao jednostavno valno gibanje, **Taner et al. (1976)** zaključili su da snimljeni seizmički signal prikazuje kinetički dio ukupne energije gibanja čestice prilikom širenja seizmičkog vala. Razvili su metodu koja je omogućavala izračunavanje potencijalne energije iz kinetičke energije uz korištenje Hilbertove transformacije. Njenom upotrebom u frekvencijskoj i vremenskoj domeni omogućilo se izračunavanje svih kompleksnih seizmičkih atributa.
Širenje seizmičkih valova kroz podzemlje opisano je valnom jednadžbom čija su rješenja sinusoidalne funkcije. Svaka funkcija može se prikazati pomoću linearne kombinacije kompleksnih funkcija. Upotrebom Hilbertove transformacije omogućava se prikaz seizmičkog signala u kompleksnom obliku. Osnovna svrha definiranja kompleksnog seizmičkog signala je određivanje trenutne amplitude i trenutne faze, iz kojih proizlaze ostali seizmički atributi.
U analizi kompleksnog seizmičkog traga promatra se njegov oblik u polarnim koordinatama, a ne u Kartezijevom koordinatnom sustavu jer nam u tom slučaju amplituda i faza daju drugačiju perspektivu (**Taner et al. 1976**).

Realni seizmički trag u polarnim koordinatama ima oblik:

$$x(t) = A(t) \cos\Theta (t) \quad \textbf{(6.1)}$$

gdje je:

x(t) realni dio,
A(t) amplituda
Θ (t) faza koje se mijenjaju u vremenu t.
Imaginarni dio kompleksnog seizmičkog traga je Hilbertova transformacija realne funkcije x(t). Budući da je Hilbertova transformacija funkcije cos(t) funkcija – sin(t), kompleksni oblik seizmičkog traga s(t) je:

$$s(t) = x(t) - iH[x(t)] = A(t)ei\Theta(t) \quad \textbf{(6.2)}$$

gdje je:
s(t) - kompleksni seizmički signal,
x(t) - realni dio
H - Hilbertova transformacija
A(t) amplituda
θ(t) faza
Pri čemu je:

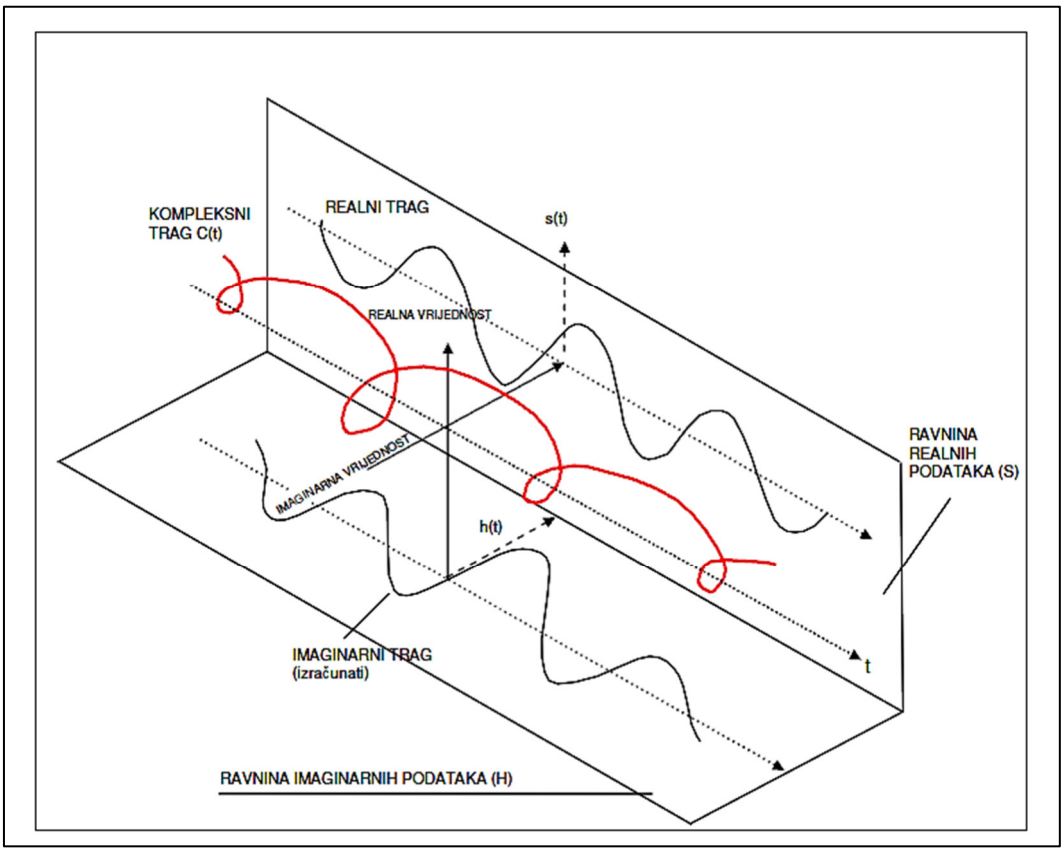
$$A(t) = [x2(t) + H[x(t)]2] 1/2= s(t) \quad \textbf{(6.3)}$$

$$\Theta (t) = \text{arctg } H[x(t)] / x(t) \quad \textbf{(6.4)}$$

Kompleksni seizmički trag može se zamisliti kao trag koji u kompleksnom prostoru opisuje vektor koji rotira i mijenja svoju valnu duljinu u vremenu. Rezultat te rotacije je nepravilna zavojnica. Njena projekcija na stvarnu ravninu je realni (stvarni) seizmički trag, a projekcija na imaginarnu ravninu je njen pomak u fazi za 90°. Obje komponente imaju jednak odnos signal-šum (**Orešković, 2006, Šumanovac, 2012,**). Duljina rotirajućeg vektora je trenutna amplituda A(t) (engl. *Instantaneous Amplitude*), a kut koji vektor zatvara s realnom osi je trenutna faza θ (t) (engl. *Instantaneous Phase*). Trenutna amplituda je jednaka zbroju realnog i imaginarnog traga (**Taner & Sheriff, 1977**). Amplituda realnog seizmičkog traga ovisi o gibanju čestica uzrokovanog dolaskom seizmičkog vala i kao takva je funkcija kinetičke seizmičke energije. Dok je amplituda na imaginarnom seizmičkom tragu funkcija koja opisuje potencijalnu

seizmičku energiju. Kompleksni seizmički trag je njihov zbroj i predstavlja ukupnu seizmičku energiju (**Slika 6.4.2.1.**).

Seizmički valovi se reflektiraju i refraktiraju na granici sloja te se mogu razlikovati po vremenu nailaska, amplitudi, fazi, frekvenciji i polaritetu. Svaka promjena akustične impedancije mijenjati će navedene parametre. Detaljna analiza ovih promjena omogućava određivanje strukture, litološkog sastava ili zasićenja fluidom u ležištu (**Taner & Sheriff, 1977**).



Slika 6.4.2.1.: Prikaz kompleksnog seizmičkog traga (Taner et al., 1979)

6.4.2.1 ATRIBUTI KOMPLEKSNOG SEIZMIČKOG TRAGA

Ovoj grupi pripadaju atributi dobiveni iz kompleksnog seizmičkog traga koji se najčešće koriste u interpretaciji, a povezuje ih se s litološkim i rezervoarskim značajkama. U tu grupu ubrajaju se atributi:

- trenutna amplituda, $A(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)}$ **(6.5)**
- trenutna faza, $\Phi(t) = \tan^{-1}(y(t)/x(t))$ **(6.6)**
- trenutna frekvencija, $\omega(t) = d/d(t)\ [\Phi(t)]$ **(6.7)**

Gdje su:

A(t)=amplituda

Φ(t)=faza

ω (t)= frekvencija koja može biti izračunata iz kompleksnog seizmičkog traga.

Trenutna amplituda (engl. *Envelope*), također poznata i kao snaga refleksije (engl. *Reflection Strength*), definirana je kao ukupna energija seizmičkog traga. To je apsolutna vrijednost kompleksnog seizmičkog traga, koji se sastoji od realnog i imaginarnog dijela. Atribut trenutne amplitude neovisan je o fazi, te je uvijek pozitivnih vrijednosti (**Taner, 2001, Schlumberger, 2007**).

Maksimalna snaga refleksije može se razlikovati od najveće amplitude brijega ili dola stvarnog seizmičkog traga. Kod interpretacije atributa trenutne amplitude promatraju se visoke vrijednosti amplituda jer su najčešće vezane za diskordancije, odnosno za nagle litološke promjene i granice koje su uzrokovane promjenama okoliša taloženja ili razine mora (**Šumanovac, 2012**).

Trenutna amplituda koristi se i pri identificiranju anomalija amplitude (engl. *Bright Spot*, engl. *Dim Spot*) koje su uzrokovane akumulacijama plina, odnosno daje informaciju o kontrastima akustične impedancije (**Schlumberger, 2007**). Kod "mekih" materijala ili stijena (šejl) s niskom akustičnom impedancijom uslijed manje gustoće i veće poroznosti nailaskom seizmičkog vala dolazi do većeg pokretanja čestica, kao i povećanje tlaka. Isti seizmički val dolaskom u "tvrde" stijene (kompaktni karbonati), koji se odlikuju većom akustičkom impedancijom, zbog nižih poroznosti i veće gustoće dolazi do slabijeg pokretanja čestica i manjeg povećanja tlaka. Radi toga su amplitudne promjene dobar indikator promjena elastičnih značajka u stijenama. To osobito vrijedi za procjenu poroznosti gdje se metoda temeljena na promjenama amplitude dokazala kao posebno vrijedan alat u određivanju ležišnih karakteristika (**Malvić & Prskalo, 2008**). Promjene u trenutnoj amplitudi mogu se primijeniti za određivanje značajka ležišta kao što su poroznost, zasićenje plinom, litološki kontinuiteti, te za otkrivanje pritisnutih zona i kontakta različitih fluida. Također, lakše se otkrivaju položaji rasjeda, stratigrafske zamke i sl. (**Prskalo, 2005**).

Jedna vrsta atributa amplitude je RMS amplituda (engl. *Root-Mean-Square*) koja se izračunava za svaki trag, unutar odabranog vremenskog intervala. Budući da se vrijednosti amplitude kvadriraju prije uprosječavanja, RMS amplituda je osjetljiva na ekstremne vrijednosti amplituda. Trenutna faza (engl. *Instantaneous phase*) je seizmički atribut koji daje jednaku težinu i jakim i slabim refleksima. Trenutna faza može poprimiti vrijednosti u granicama

između -180° i +180° i nezavisna je o trenutnoj amplitudi (**Schlumberger, 2007**). Ovaj atribut predstavlja kut koji fazor (vektor koji rotira i mijenja fazu u vremenu) zatvara s realnom osi. Prednost trenutne faze je jednostavno promatranje fazne promjene, bez obzira na promjenu amplitudnih vrijednosti (**Taner et al., 1979**). Obzirom da je neovisan o trenutnoj amplitudi, atribut trenutne faze dobar je indikator diskontinuiteta, isklinjenja, neravnina, promjena nagiba i granica slojeva. Moguće je jasno odrediti granice između seizmičkih sekvencija, odnosno geometrijske odnose pojedinih sekvencija. Jednako tako moguće je lakše uočiti prekide seizmičkih refleksa, što ukazuje na položaj rasjeda na seizmičkim profilima (**Prskalo, 2005**).
Trenutna frekvencija (engl. *Instantaneous Frequency*) prikazuje vremensku promjenu trenutne faze (**Schlumberger, 2007**). Trenutna frekvencija ima pretežno jednolične i pozitivne vrijednosti, no može poprimiti i negativne vrijednosti (**Taner et al., 1979**). Atribut trenutne frekvencije je neovisan o amplitudi i zbog toga se koristi u razumijevanju svojstava ležišnih stijena (determinacija pukotinskih zona, promjene u debljini i bočne promjene). Ujedno, trenutna frekvencija ima veću rezoluciju nego amplituda što može biti primjenjivo kod kartiranja promjena facijesa. Područja isklinjenja, rubovi, te dodir vode i ugljikovodika uzrokuju oštre promjene trenutnih frekvencija. Pomak prema nižim frekvencijama (tzv. ″niskofrekvencijska sjena″) opaža se na refleksima ispod pijeska s plinom i kondenzatom te naftnih rezervoara. Razlomljene zone u kompaktnim stijenama mogu isto tako ponekad uzrokovati niskofrekvencijsku sjenu (**Taner, 2001**). Područja nižih frekvencija potencijalno ukazuju na zasićenje ugljikovodicima.

6.4.2.2 GEOMETRIJSKI ATRIBUTI

Geometrijski atributi ističu vidljivost geometrijskih osobina na seizmičkim podacima kao što su nagib, azimut i diskontinuiteti.
Strukturni atributi su zapravo geometrijski atributi koji se koriste za bolje razumijevanje strukturne interpretacije. Koriste se za tumačenje geoloških značajki kao što su rasjedi, kanali, te za identifikaciju fraktura i pukotina te su važni za prepoznavanje mogućih ležišta ugljikovodika. Ti atributi otkrivaju skrivene strukturne i stratigrafske elemente pomoću jednostavnog matematičkog proračuna međusobnog odnosa susjednih točaka površine (**Schlumberger, 2007**). Glavni geometrijski atributi koji se primjenjuju za strukturnu interpretaciju uključuju:

- strukturni atribut nagiba,
- strukturni atribut azimuta i
- koherenciju ili atribut sličnosti.

Strukturni atribut nagiba (engl. *Dip*) naglašava položaj slojnih ploha u odnosu na odabranu os na strukturu, tj. nagib strukture. Vremenska vrijednost točke na slojnoj plohi se stavlja u odnos s najbližim susjednim točkama te se tako utvrđuje lokalni položaj slojne plohe (približno kao kod karotažnog mjerenja dipmetrom). Nagib tako određene lokalne plohe naziva se atributom nagiba, tj. veličina nagiba lokalne plohe između susjednih točaka. Pomaže pri utvrđivanju položaja rasjeda (**Schlumberger, 2007**).

Strukturni atribut azimuta (engl. *Azimuth*) pokazuje orijentaciju lokalnog nagiba, tj. pokazuje smjer nagiba te lokalne plohe. Slična je standardnoj strukturnoj karti koja izolinijama prikazuje opći trend orijentacije plohe, međutim karta azimuta prikazuje lokalne osobine i otklone površina. Nagib i azimut na svojim kartama ukazuju na lokaciju i položaj rasjeda. Sve karte analiza površina moraju se promatrati zajedno kako bi se moglo doći do određenih zaključaka.

Atribut sličnosti *Similarity* je mjera koherentnosti seizmičkog oblika vala i daje kvantitativno mjerenje promjena refleksije koje prikazuju različite stratigrafske i strukturne značajke u istraživanju ugljikovodika. Visoka razina sličnosti ili koherentnosti ukazuje na bočno kontinuiranu geologiju kao što su kanali, dok niska razina sličnosti prikazuje razlomljene strukture poput rasjeda. To je oblik koherencije koji pokazuje koliko dva ili više segmenata u tragovima izgledaju podjednako. Poprima vrijednosti u granicama između nule i jedinice. Sličnost 1 pokazuje da su segmenti u tragovima potpuno identični u obliku vala i amplitudi, a sličnost 0 znači da su potpuno različiti (**Schlumberger, 2007**).

Strukturne, kao i sve druge atribute možemo prikazati kao atribute seizmičkih horizonata premda oni u klasičnoj podjeli zauzimaju svoje posebno mjesto.

6.4.2.3 KOMBINIRANI ATRIBUTI

Kombinirani atributi uzimaju u obzir zajedno fizičke i geometrijske atribute. Veliki broj seizmičkih atributa predstavljaju zbroj, umnožak ili kombinaciju osnovnih atributa. Iz osnovnih seizmičkih atributa izveden je velik broj različitih atributa, koji su najčešće podijeljeni s obzirom na vrstu programskog paketa koji se koristi u naftnoj industriji. Iz tih brojnih vrsta atributa je potrebno metodom pokušaja i pogrešaka pronaći one koji najbolje odgovaraju trenutnim potrebama, odnosno naglašavaju željene pojave (rasjedi, kanali, zasićenja ugljikovodicima). Ovisno o potrebama najbolje je koristiti atribute koji koreliraju sa samo jednom fizičkom ili geološkom varijablom koja je zanimljiva. Kombinirani atributi koji su se koristili su:

- spektralna dekompozicija i
- *Sweetness* atribut, $S= A(t)/\sqrt{\omega\ (t)}$ **(6.8)**

Gdje su:
A(t)=amplituda
ω (t)= frekvencija

Spektralna dekompozicija je metoda koja se uz seizmičke atribute koristi kao iznimna pomoć prilikom interpretacije seizmičkih podataka. Moguće ju je pridružiti vrsti kombiniranih složenih atributa. Može se upotrijebiti na vrlo velikom broju seizmičkih atributa iako je primjena na atributu trenutne frekvencije najčešća. Rezultat spektralnih podataka su frekvencijske i fazne komponente od kojih je izravna veličina relativna seizmička amplituda unutar frekvencijskog pojasa. Seizmički signal rastavlja se u njegove sastavne frekvencije i pretvara seizmičke podatke u frekvencijsku domenu pomoću matematičkih metoda kao što su npr. diskretna Fourierova transformacija (DFT) **(Chopra i Marfurt, 2015)**.
Za prikaz izrađenog atributa koristi se miješani prikaz boja i to crveno-zeleno-plava (RGB) kombinacija, gdje svaka boja odgovara određenom frekvencijskom području. Koriste se tri frekvencijska područja, najniži frekvencijski raspon u seizmičkom skupu podataka u crvenoj boji, dominantna frekvencija u seizmičkom skupu podataka u zelenoj boji i najviši frekvencijski raspon u skupu seizmičkih podataka u plavoj boji .

Glavna upotreba ovog atributa je pomoć u stratigrafskoj interpretaciji jer poboljšava rezoluciju tankih slojeva. Ova metoda pruža bolju predodžbu o kontinuitetu kanalnih tijela, varijabilnosti zasićenja ugljikovodicima i mogućoj kvaliteti rezervoara (**Chopra i Marfurt, 2016**).
Kombinirani seizmički atribut *Sweetness* može pružiti kvalitetniju sliku podzemlja, a dobiva se kada raznim računskim operacijama iz osnovnih atributa dobijemo združene podatke, kao u ovom slučaju amplitude i frekvencije. Atribut *Sweetness* je kombinirani atribut izračunat dijeljenjem trenutne amplitude i trenutne frekvencije. Upotrebljava se za isticanje tankih rezervoara, koji mogu sadržavati ugljikovodike (**Radovich et al., 1998**). Ovaj atribut detektira krupnozrnatije intervale. Ti intervali su vidljiviji i odmah se uočavaju na seizmičkoj sekciji, te ih nazivamo *sweet spot*, kao moguća mjesta koja ukazuju na potencijalnu akumulaciju nafte ili plina (**Hart, 2008**).
Vrijednosti ovog atributa smanjuju visoke frekvencije, te će područja koja sadrže veće amplitude i niže frekvencije (pješčani intervali) pokazivati najviše vrijednosti, dok će sedimenti niže amplitude i većih frekvencija pokazivati niže vrijednosti (šejlovi). Ta kombinacija je korisna za prepoznavanje zasićenja plinom jer njegove značajke pokazuju visoke vrijednosti S*weetness-a* zbog većih amplituda (**Novak Zelenika et al., 2018**).

6.5. AVO ANALIZA

6.6.1 UVOD U AVO ANALIZU

AVO (*Amplitude versus offset*) je seizmička metoda koja analizira amplitude s udaljenošću od izvora, odnosno s porastom kuta upada i uspješno se koristi u istraživanju ugljikovodika, osobito plinom zasićenih pijesaka/pješčenjaka. Drugo ime je *Amplitude versus angle* (AVA) odnosno varijacija u amplitudi u ovisnosti o kutu upada.
Za što točnije prikaze AVO analize potrebni su nam podaci kako o longitudinalnom ili p-valu, tako i o transverzalnom ili s-valu, čije se vertikalne vrijednosti određuju na temelju karotažnih mjerenja u bušotinama.
Jedan od načina prenošenja energije kroz prostor je valovito gibanje. Valovi koji se šire kroz elastična sredstva su mehanički valovi. U homogenoj izotropnoj elastičnoj sredini, valovi se od izvora oscilacija prenose radijalno u svim pravcima. Fronta vala je sfernog oblika s centrom u jednoj točki dok u heterogenoj sredini fronta vala ima kompliciraniji geometrijski oblik.

Prostiranje zvučnih valova je pod utjecajem elastičnih svojstava formacije i geometrije bušotine. Postoje različiti tipovi valova koji imaju različite brzine prostiranja i karakteristike frekvencija. Valovi se dijele na longitudinalne, transverzalne i površinske valove (**Šumanovac, 2007**).

Longitudinalni val nastaje ako čestice titraju oko položaja ravnoteže na pravcu kojim se širi val - zvučni valovi. Zovu se još i primarni - P, (uzdužni, kompresijski) i mogu se prostirati u čvrstim, tekućim i plinovitim sredinama. Transverzalni val nastaje ako čestice koje prenose val titraju okomito na smjer širenja vala. Zovu se još i sekundarni – S, poprečni, valovi smicanja), a mogu se prostirati samo u čvrstim sredinama (**Prskalo, 2006**).

Budući da se analiziraju jedino snimljene amplitude seizmičkih valova, a ne i njihova energija praktičnije je refleksivnost granice između dvaju slojeva definirati na temelju analize odnosa među amplitudama ulaznog i reflektiranog vala i izraziti u obliku koeficijenta refleksije R koji je jednak kvocijentu razlika akustičnih impedancija i njihovog zbroja promatranih slojeva. A akustična impedancija je umnožak brzine vala i gustoće odabranog sloja u podzemlju (**Sheriff, 1978**).

Koeficijent refleksije na granici slojeva (**Slika 6.5.1.1.**) računa se pomoću sljedećeg izraza:

$$R = \frac{A_2}{A_1} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{V_2\rho_2 - V_1\rho_1}{V_2\rho_2 + V_1\rho_1} \tag{6.9}$$

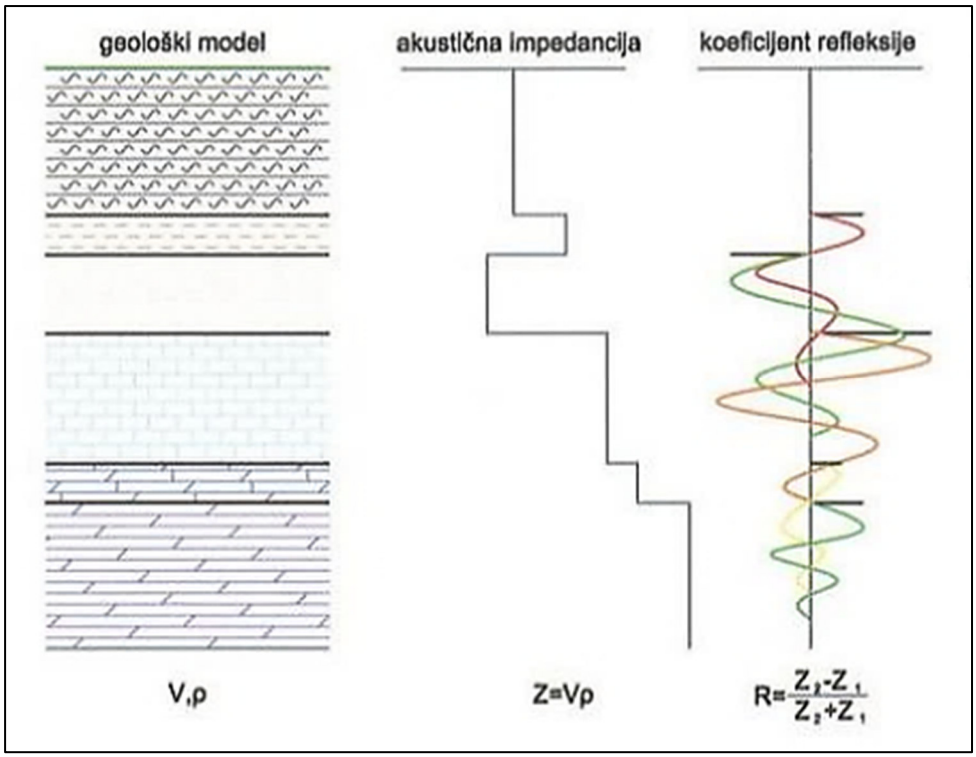
Gdje su:

A1, A2 – amplitude upadnog i reflektiranog vala

V1, V2 – brzine P–valova iznad i ispod granice dvaju slojeva

ρ1, ρ2 – gustoća gornjeg i donjeg sloja

R – koeficijent refleksije



Slika 6.5.1.1. Koeficijent refleksije na granici slojeva (Sheriff, 1978).

6.6.2 TEORIJSKE OSNOVE AVO ANALIZE

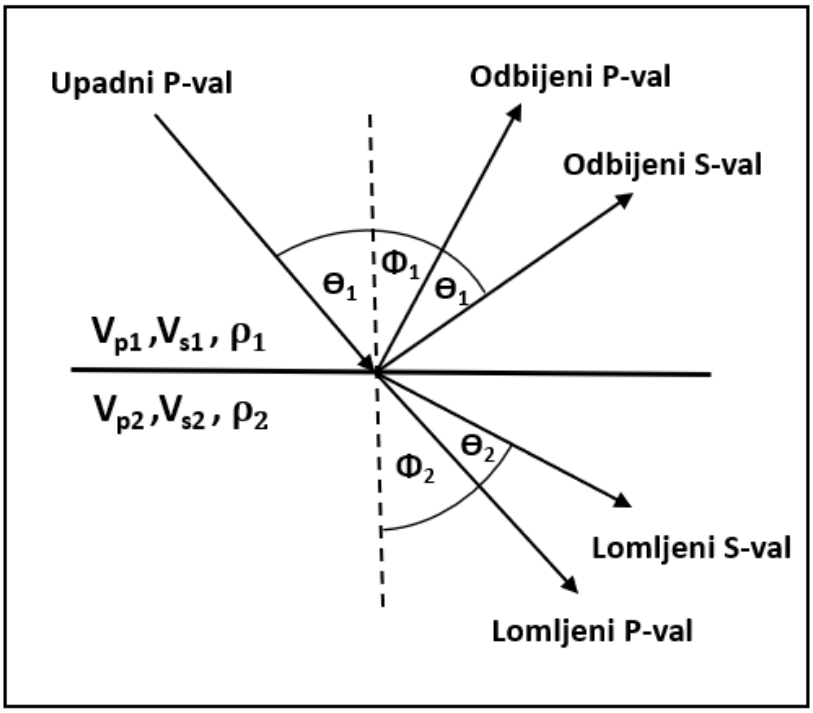
Teoretske osnove analize seizmičkih amplituda postavljene su početkom prošlog stoljeća (**Zoeppritz, 1919**) kada je utvrđeno da seizmičke amplitude ovise o brzini seizmičkih valova i gustoći materijala kroz koji ti valovi prolaze. Na temelju tih postavki, sastavljene su jednadžbe koje definiraju amplitudne promjene kao funkcije brzina longitudinalnih (P) i transverzalnih(S) valova, gustoće i upadnog kuta nailaska seizmičkih valova na reflektor. Primarni ili longitudalni te sekundarni ili transverzalni valovi zavise o elastičnim značajkama stijena, a one ovise o porozitetu i zasićenju fluidima u stijeni. Kod longitudinalnog vala čestice vibriraju u smjeru širenja vala, a kod transverzalnih valova čestice titraju okomito na smjer širenja vala.

Daljnji detaljan razvoj i prikaz praktične primjene ovisnosti amplitude o litološkom sastavu i zasićenju fluidima dao je **Ostrander (1984). Shuey (1985)** je objavio članak o jednadžbi linearne aproksimacije koja se koristi vrlo široko u praktičnoj primjeni AVO metoda.

AVO analiza je metoda koja primarno analizira varijacije u seizmičkoj amplitudi kao funkciju promjene u udaljenosti između točke paljenja i prijemnika (razlika u *offsetu*). AVO analiza se

vrlo uspješno koristi u prognoziranju zasićenja plinom. Ta tehnika jedna je od direktnih pokazatelja prisutnosti ugljikovodika u podzemlju (*engl. Direct hydrocarbon indicator*, DHI) (**Castagna & Swan, 1997**).

Kada seizmički izvor izazove impuls koji se širi kroz sedimentne slojeve stijena u podzemlju, valovi putuju slojevima različitim brzinama i lome se prema Snell-ovom zakonu. Ako seizmički val upada na granicu pod određenim kutom, na granici medija nastat će odbijeni (reflektirani) i lomljeni (refraktirani) primarni i sekundarni valovi (**Slika 6.5.2.1.**).



Slika 6.5.2.1.: Lom valova nastalih upadnim p-valom (v1<v2) (Russel et al., 2011)

Premda su otprije bile poznate jednadžbe koje opisuju amplitude valova na granici slojeva ovisno o kutu upada **Zoeppritz (1919)** je izveo jednadžbe koje prikazuju točne amplitude kao funkciju kuta. To je skup jednadžbi koje opisuju podjelu seizmičke energije na kontaktu stijena različitih litoloških karakteristika i povezuju amplitude longitudinalnih i transverzalnih valova (**Shuey, 1985**).

Računanje matričnog oblika Zoeppritzovih jednadžbi daje koeficijente kao funkciju kuta, no te jednadžbe ne daju osnovno razumijevanje kako se amplitude razlikuju ovisno o svojstvima stijene. Različiti autori kasnije su dali razne jednostavnije aproksimacije Zoeppritzovih jednadžbi: **Richards & Frasier (1976), Aki & Richards (1980), Ostrander (1984), Shuey (1985).**

$$\begin{bmatrix} R_P \\ R_S \\ T_P \\ T_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\sin\theta_1 & -\cos\phi_1 & \sin\theta_2 & \cos\phi_2 \\ \cos\theta_1 & -\sin\phi_1 & \cos\theta_2 & -\sin\phi_2 \\ \sin 2\theta_1 & \frac{V_{P1}}{V_{S1}}\cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2 V_{S2}^2 V_{P1}}{\rho_1 V_{S1}^2 V_{P2}}\cos 2\phi_1 & \frac{\rho_2 V_{S2} V_{P1}}{\rho_1 V_{S1}^2}\cos 2\phi_2 \\ -\cos 2\phi_1 & \frac{V_{S1}}{V_{P1}}\sin 2\phi_1 & \frac{\rho_2 V_{P2}}{\rho_1 V_{P1}}\cos 2\phi_2 & \frac{\rho_2 V_{S2}}{\rho_1 V_{P1}}\sin 2\phi_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sin\theta_1 \\ \cos\theta_1 \\ \sin 2\theta_1 \\ \cos 2\phi_1 \end{bmatrix}$$

(6.10)

Gdje su: R_p, R_s, T_p, T_s = koeficijenti refleksije reflektiranih (R) i refraktiranih (T) longitudinalnih (p) i transverzalnih (s) valova.

Θ_1 = kut upadnog p-vala
Θ_2 = kut lomljenog p-vala
Φ_1 = kut odbijenog s-vala
Φ_2 = kut lomljenog s-vala

Ostali autori kao što su **Aki & Richards (1980)** rezultate su pojednostavili, pretpostavljajući samo male promjene u elastičnim svojstvima preko kontakta dviju stijena. Ovaj oblik jednadžbi omogućuje da vidimo učinke gustoće i varijacije u brzini na amplitudu. Prema njima koeficijent refleksije P vala (Rp) varira s kutom upada Θ prema jednadžbi:

$$R_p(\Theta) \approx R(0)+B\sin 2\Theta \qquad \textbf{(6.11)}$$

Gdje je:

R_p=normalni kut upada P-vala;
B=AVO nagib ili gradijent

Shuey (1985) je uveo izmjenu filozofije u uređivanju Aki-Richardsove jednadžbe i doveo do preokreta u AVO analizi. Pretpostavio je da je Poissonov omjer elastično svojstvo koje je najizravnije povezano s kutnom ovisnošću s koeficijentom refleksije.

Tri faze Shuey-eve jednadžbe su :

$$R(\Theta)=R(0)+G\sin 2\Theta+F(\tan 2\Theta-\sin 2\Theta) \quad \textbf{(6.12)}$$

$$R(0)=\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta Vp}{Vp}+\frac{\Delta Vp}{Vp}\right) \quad \textbf{(6.13)}$$

$$G=\frac{1}{2}\frac{\Delta Vp}{Vp}-\frac{\Delta Vs^2}{Vp^2}\left(\frac{\Delta Vp}{Vp}+\frac{2\Delta Vs}{Vs}\right) \quad \textbf{(6.14)}$$

$$F=\frac{1}{2}\frac{\Delta Vp}{Vp} \quad \textbf{(6.15)}$$

Gdje je:

Θ = kut upada

V_p = brzina p vala

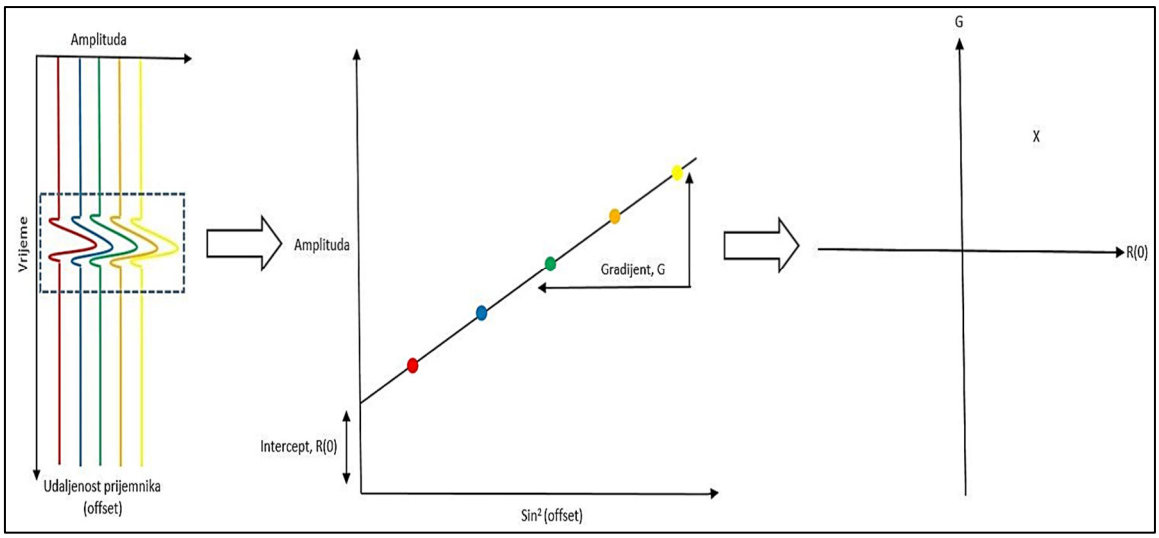
ΔV_p = razlika brzine p-vala preko kontakta između dva sloja (prelaska u drugi medij)

V_s = brzina s vala

ΔV_s = razlika brzine s-vala

ρ = gustoća

$\Delta\rho$ = razlika gustoće prilikom prelaska u drugi medij

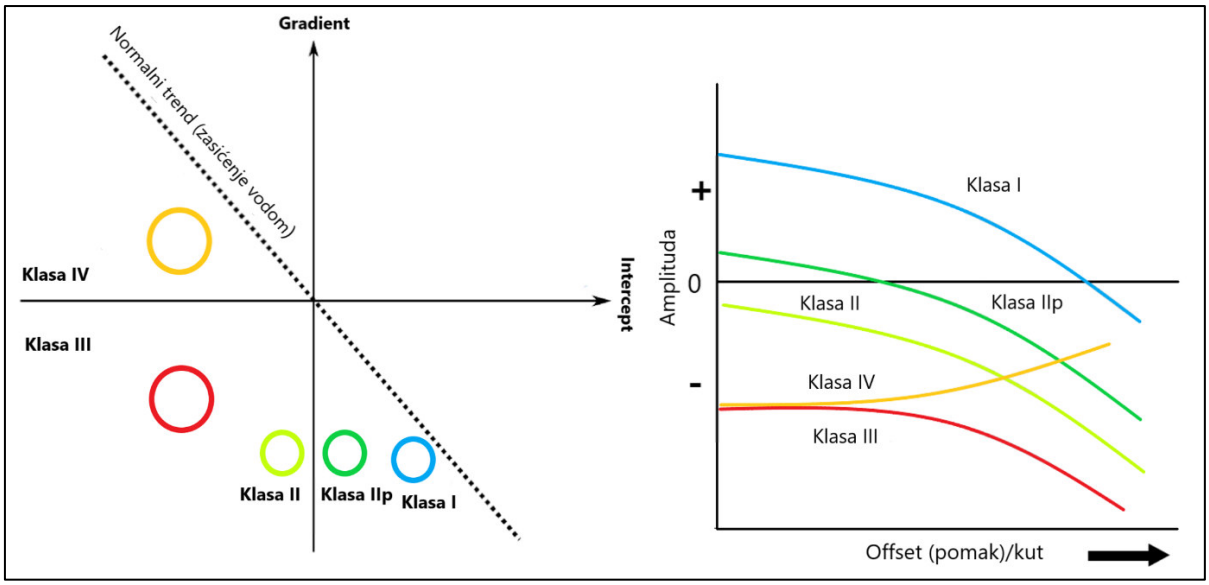


Slika 6.5.2.2: Konstrukcija križnog dijagrama intercept/gradient

R(0) je koeficijent refleksije pri normalnom kutu upada i kontrolira se razlikom između akustičnih impedancija. G je često poznat kao AVO gradijent i opisuje varijaciju amplitude refleksije na srednjim *offsetima*. Promjena u gradijentu može ukazivati na promjenu u sadržaju fluida, no također može označavati i promjenu litološkog sastava (**Castagna & Smith, 1994**).
F - opisuje ponašanje pri velikim kutovima/dalekim *offsetima*, koji su blizu kritičnog kuta. Ta se jednadžba može dodatno pojednostaviti pretpostavljajući da je kut upada manji od 30º (odnosno *offset* je relativno mali), tako da će treći izraz težiti prema nuli. Takav slučaj je najčešći kod većine seizmičkih istraživanja i daje Shuey-evu aproksimaciju:

$$R(\Theta)=R(0)+G\sin 2\Theta. \qquad \textbf{(6.16)}$$

AVO tehnika proučava promjene amplituda s udaljenošću prijemnika od točke paljenja na podacima prije zbrajanja tragova. Vrlo je važno da se prilikom obrade seizmičkih podataka sačuva relativan odnos amplituda. Procesom zbrajanja (stekiranja) gube se sve informacije koje se mogu koristiti za AVO analizu (**Castagna et al., 1998**).
Korištenjem linearne regresije možemo izračunati liniju najbolje prilagodbe koja opisuje kako se amplituda mijenja s udaljenošću od izvora (*offset*) koristeći samo dva parametra, a to su *intercept* P i *gradient* G. *Intercept* P odgovara R(0) tj. amplitudi refleksije pri nultom *offsetu*, a *gradient* G opisuje ponašanje pri ne-normalnom *offsetu* i to je vrijednost poznata kao AVO *gradient* (**Slika 6.5.2.2.**).
AVO odzivi se dijele u četiri klase po **Rutherford i Williams (1989)**, u zavisnosti ponašanja amplituda s udaljenošću od izvora vala. Također, ta četiri razreda temelje se i na povezanosti promjena u Poisson-ovom omjeru i prisutnosti ugljikovodika u ležištu (**Slika 6.5.2.3.**).



Slika 6.5.2.3. Klasifikacija AVO odziva plinom zasićenih pijesaka - AVO klase po Rutherford i Williams, (1989)

Ovisno o razlikama u brzinama i gustoći nekog sloja u podzemlju mijenjati će se akustična impedancija kao njihov produkt. U slučaju kada sloj u krovini ima manju akustičnu impedanciju (Z) nego sloj u podini, u AVO analizi definiramo klasu I. Koeficijent refleksije je pozitivan i na seizmičkim podacima možemo uočiti veliki pad amplitude povećanjem kuta, odnosno povećanjem udaljenosti izvora od prijemnika, te su u takvim slučajevima moguće i promjene faze **(Rutherford i Williams, 1989)**.

Klasa II opisana je u slučaju vrlo malih razlika u akustičnoj impedanciji između donjeg i gornjeg sloja, a u mnogim će se slučajevima brzine i gustoće promijeniti u suprotnim smjerovima. Koeficijent refleksije p vala je ili malo pozitivan ili malo negativan. U prvom se slučaju promjena faze javlja pri malim ili umjerenim kutovima.

Najpoželjnija klasa u smislu pronalaženja ugljikovodika je klasa III koja nastaje kada gornji sloj ima veću akustičnu impedanciju od donjeg sloja. Za anomalije ove klase koeficijent refleksije p-vala vrlo je negativan. Klasični *bright spot* pokazuje ponašanje klase III. Za šejlove iznad pijesaka zasićenih plinom često korišteno pravilo je da koeficijent refleksije postaje negativan s povećanjem kuta **(Rutherford i Williams, 1989)**.

U slučaju kad je koeficijent refleksije p-vala jako negativan i smanjuje se s kutom karakteristika je klase IV. Plinom zasićeni pijesci klase IV dokazani su u mnogim bazenima širom svijeta.

Na križnom dijagramu *intercept/gradient* (**Slika 6.5.2.3.)** vidljiva je klasifikacija AVO odziva plinom zasićenih pijesaka. Moguće je uočiti normalni trend, vodom zasićenim pješčenjaka, a

sve vrijednosti što se nalaze unutar grafa izvan tog trenda, pokazuju pojedinu klasu AVO anomalije koja može eventualno ukazivati na zasićenje ugljikovodicima.
Također možemo pratiti odnos između AVO klasa, relativnih akustičnih impedancija, predznaka *intercepta* i *gradienta*, te ponašanja amplitude u odnosu na *offset* (**Tablica 6.5.2.1**).

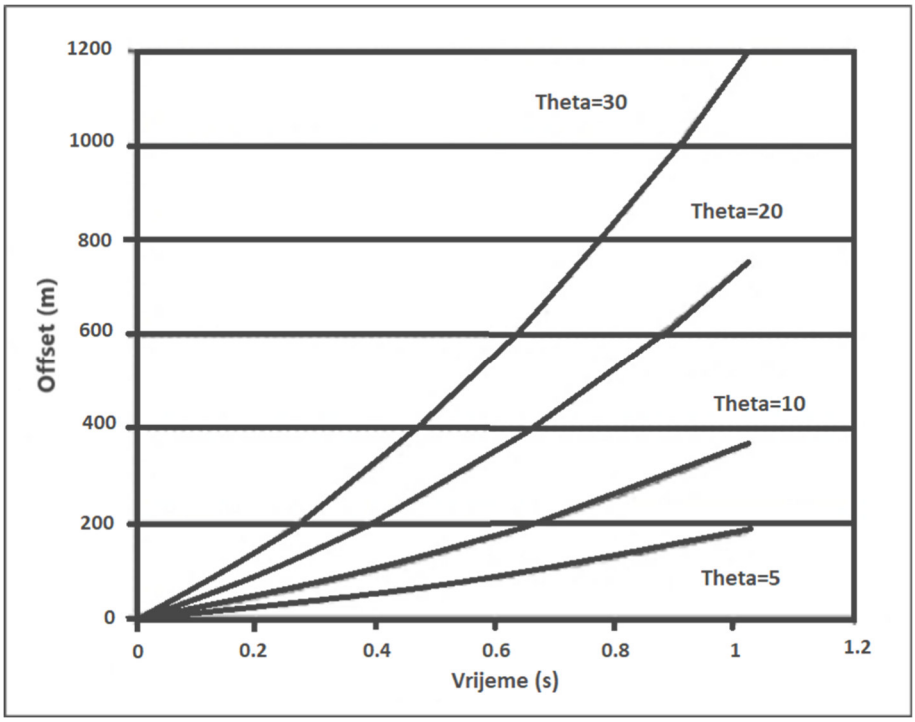
Tablica 6.5.2.1.Odnos AVO značajki i relativnih akustičnih impedancija

AVO KLASA	RELATIVNA AKUSTIČNA IMPEDANCIJA	KVADRANT	INTERCEPT	GRADIENT	AMPLITUDA U ODNOSU NA OFFSET
I	Veća od intervala u krovini	IV	+	-	Pada
II	Otprilike jednaka kao i interval u krovini	II, III ili IV	+ ili -	-	Pada ili raste, može mijenjati predznak
III	Manja od intervala u krovini	III	-	-	Raste
IV	Manja od intervala u krovini	II	-	+	Pada

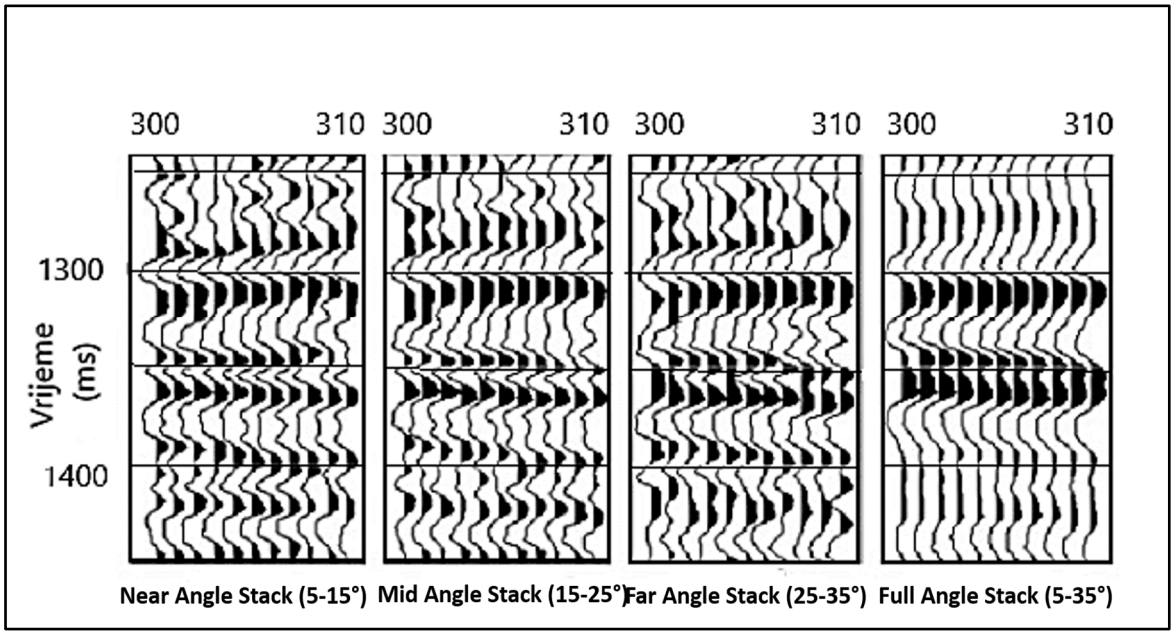
Razlikujemo dvije domene, *Offset* i *Angle* domenu koje se primjenjuju u AVO ili AVA analizi. Ispituju se i računaju kutovi te tako razlikujemo bliže (engl. *near*), srednje (engl. *mid*) ili daleke (engl. *far*) *offsete* ili kutove.

CMP *gatheri* se mogu transformirati u *Angle* domenu, bliži *offseti* će imati manje, a daleki *offseti* veće kutove. Takvi *gatheri* koriste se za računanje *Angle stackova*. Upadni kutovi u vremenu refleksije se računaju pomoću algoritma koji koristi jednodimenzionalnu aproksimaciju (varijablu dubine) za polje ulazne brzine na svakoj zajedničkoj središnjoj točki (CMP). U novijim istraživanjima koriste se intervalne brzine ulaznog intervala pomoću kojeg se računaju kutovi upada, a koriste se i RMS (*Root mean square*) brzine ili srednje kvadratne brzine koje se izračunavaju kao kvadratni korijen iz prosječnih vrijednosti kvadrata brzine.

Na **slici 6.5.2.4**. je prikazan grafički prikaz *Offset*/vrijeme s krivuljama za različite kutove od 5, 10, 20 i 30 stupnjeva. Možemo prikazati i *Angle gathere* ekvivalentne ulaznim CMP *gatherima* (**Slika 6.5.2.5**.). Iz takvih *gathera* možemo izračunati *Angle stackove* za bliže, srednje i daleke *offsete* (*near, mid, far*) odnosno male, srednje i velike kutove koji se koriste za daljnju AVO analizu (**Wei et al., 2006**).



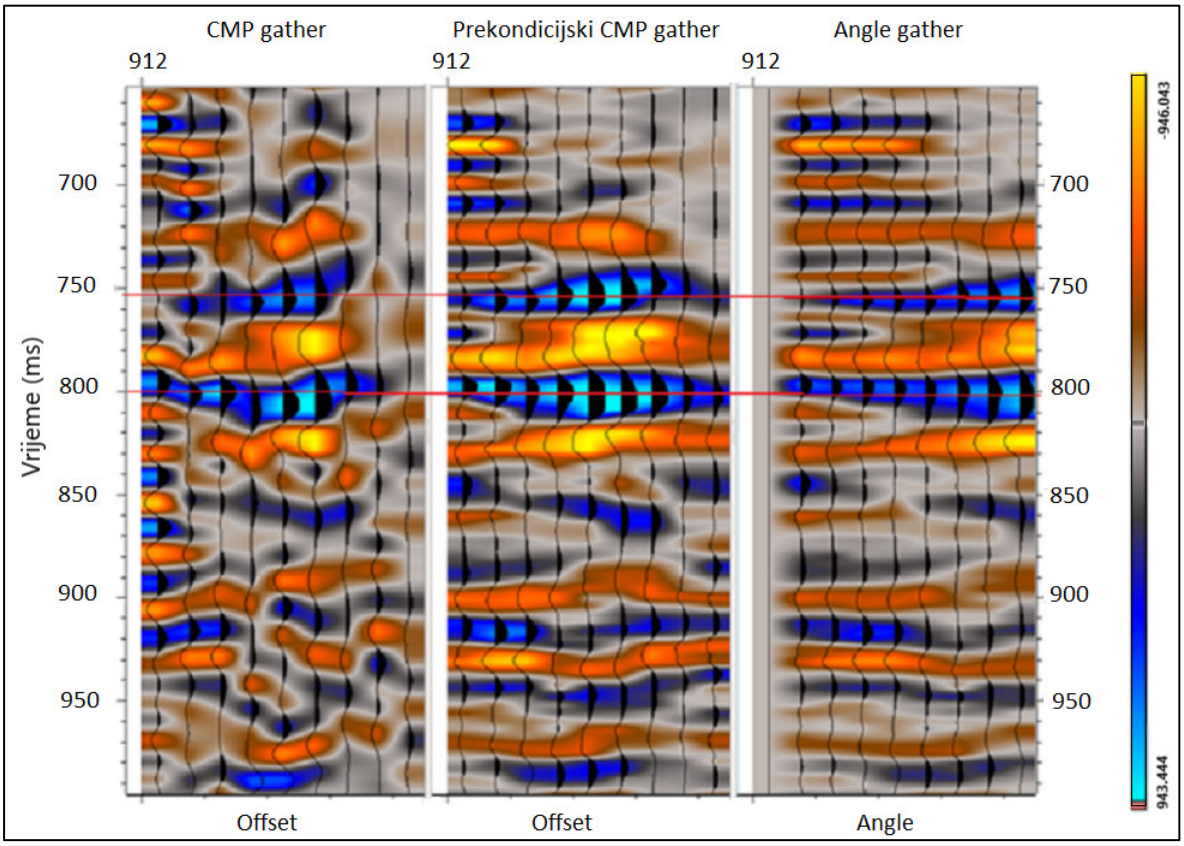
Slika 6.5.2.4.: Graf offset/vrijeme



Slika 6.5.2.5.: Usporedba seizmičkih parcijalnih stackova (modificirano prema Wei et al., 2006)

Na **slici 6.5.2.6.** je prikazan ulazni CMP *gather* i takozvani prekondicijski *gather* na kojem su primijenjeni neki alati koji poboljšavaju samu sliku, različiti filteri i korekcije te iz njega pomoću polja brzina izračunati *Angle gather.* Alati klasične seizmičke obrade podataka primijenjeni na poboljšanom ili prekondicijskom *gatheru* napravljeni su kako bi se što bolje uočilo ponašanje amplitude u odnosu na kut ili udaljenost od izvora do prijemnika (*offset*) što

nam može biti jedan od DHI, čemu i sama AVO analiza služi. Jer u istraživanju ugljikovodika jedan od direktnih pokazatelja prisutnosti može biti povećavanje amplitude u odnosu na *offset*, primjerice veća amplituda na dalekim o*ffsetima* pokazuje nam AVO klasu III ili klasičan *bright spot* (svijetla točka), seizmičku amplitudnu anomaliju koja svijetli na seizmičkom prikazu i može indicirati prisutnost ugljikovodika. *Bright spot* nastaje kao rezultat vrlo velike promjene u akustičnim impedancijama koje su produkt seizmičke brzine i gustoće (**Oilfield Glossary, Schlumberger**). Obzirom da ugljikovodici, a prvenstveno plin naglo smanjuju brzinu i gustoću, svijetla točka može ukazivati na plinom zasićene pijeske ispod pokrova većih impedancija što mogu bili lapori ili šejlovi, te ukazivati na eventualno ležište. No također tu pojavu mogu uzrokovati i nagle promjene u samom litološkom sastavu.



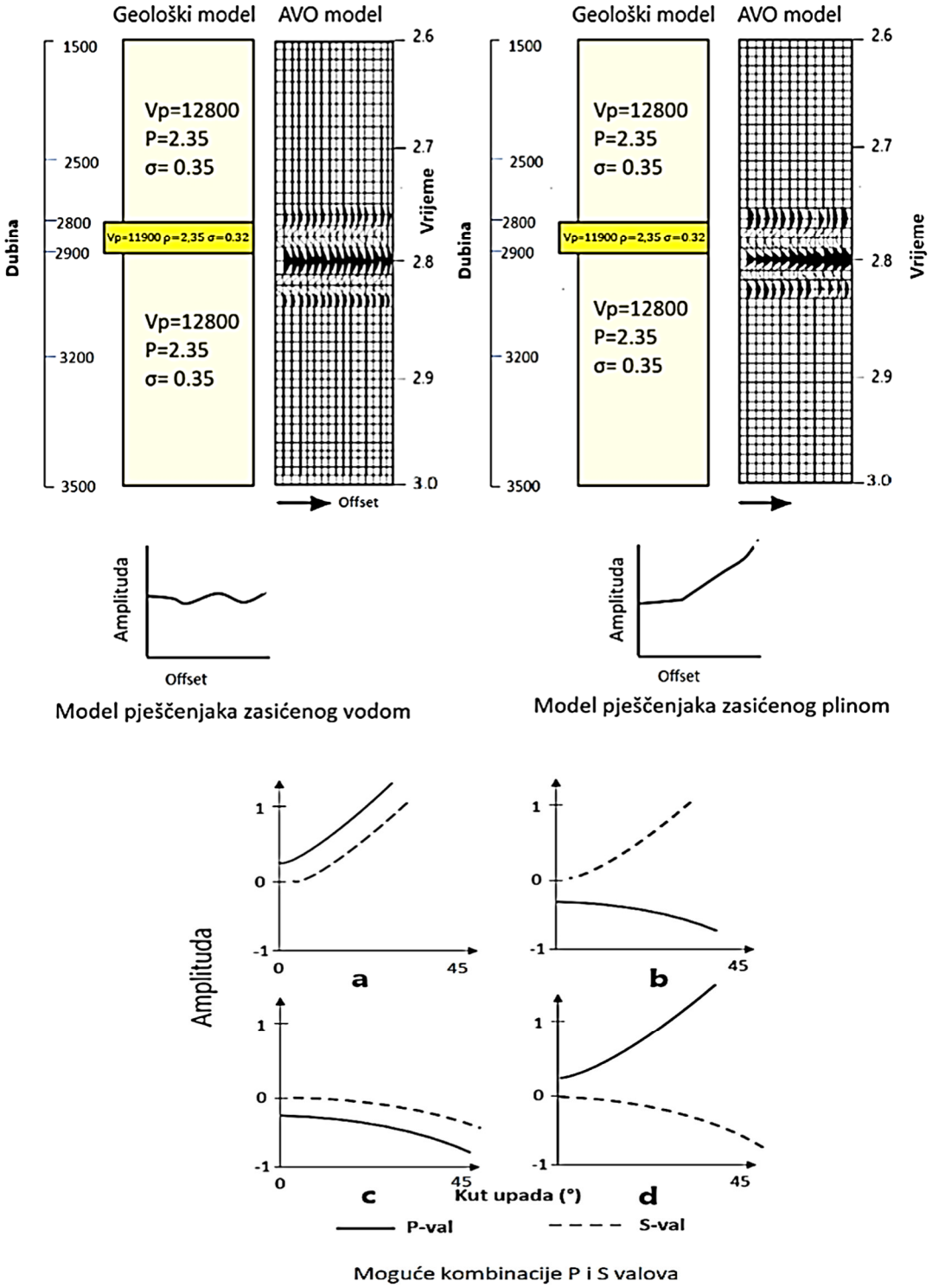
Slika 6.5.2.6.: Ulazni CMP gather, Prekondicijski i Angle gather(Konstruirani u programskom paketu Paradigma na podacima seizmičkog volumena Grubišno Polje)

Danas različiti kompjutorski programi mogu učinkovito mjeriti promjenu amplitude u odnosu na *offset* na svakom CMP *gatheru* za svaki uzorak i svaki trag i izračunati varijablu koja najbolje odgovara nagibu (*gradientu*) za tu promjenu amplitude. Dobiveni skup brojeva prikazuje se na

križnom dijagramu te se odsječak gradijenta interpretira, te se anomalije povezuju i koreliraju s prikazom na stack-u na kojem je interpretator već identificirao ključne horizonte i potencijalna područja strukturnih ili stratigrafskih zamki. Na taj način se vrlo brzo prepoznaju područja anomalnog ponašanja amplitude koja se zatim mogu proučavati detaljnim modeliranjem i kalibracijom s raspoloživim podacima iz bušotina. Moguće je pronaći podudarnost između seizmičkih podataka i karotažnih krivulja kalibracijom u dubinu odnosno izradom sintetskog seizmograma.

Daljnje metode uključuju fizikalna svojstva stijena (*Rock physics*). Za to nam je esencijalan snimljeni s-val. Koeficijent refleksije sastoji se od dva pojma: p – vala koji ovisi o impedanciji dvaju slojeva i kutu upada i s – vala koji ovisi o *Poisson*-ovom omjeru dvaju slojeva te također kutu upada. Slijedom toga moguća su četiri AVO odziva (**Slika 6.5.2.7.**):

Slučajevi a i c na slici predstavljaju konstruktivan zbroj oba vala te daju značajan AVO odziv dok kod slučajeva b i d, oba vala nisu konstruktivni te je AVO odziv neznatan. Slučaj c, ujedno pokazuje manje vrijednosti s – vala u odnosu na p – val, te u slučaju takvog snažnog odziva p-vala, također možemo imati visoki AVO odziv koji nije nužno povezan s promjenama u *Poisson*-ovom omjeru. Slike 2 i 3 prikazuju primjere AVO modela koji se sastoje od dvije vrste fluida, model pijeska zasićenog vodom i pijeska zasićenog plinom.



Slika 6.5.2.7.: Moguće kombinacije p i s – vala, te AVO odzivi za modele pijesaka zasićenih vodom i plinom (modificirano prema https://wiki.aapg.org/Amplitude_versus_offset_(AVO)_analysis#AVO_feasibility_studies)

Osnovni problem AVO analiza je što i vrlo skromne količine plina mogu prouzrokovati AVO efekt, takozvani *Fizz-gas* efekt (**Castagna & Backus, 1993**). Ova tehnika nažalost ne pokazuje

razliku između zasićenja plinom od 2 ili 90%. Također do povećanja amplitude (u slučaju klase III) može doći i zbog izmjene tankih slojeva pijesaka i lapora i općenito litoloških promjena, pa je zato potrebno kombinirati više metoda kako bi se mogla provesti konačna procjena (**Neidell, 1986**).

Daljnji izazovi u interpretaciji i analizi AVO rezultata odnose se na samu kakvoću obrade seizmičkih podataka jer se kod nedovoljno kvalitetne obrade integrira čitav slijed efekata koji mogu utjecati na pogrešno tumačenje rezultata. Seizmička obrada mora sačuvati relativan odnos amplitude, potrebno je obratiti pažnju na adekvatno balansiranje amplitude, NMO korekcije, parametre filtriranja i horizontalnu i vertikalnu rezoluciju. Neophodna je *pre-stack* migracija, pogotovo u strukturno složenim područjima (**Hilterman, 1990**).

Nadalje svi slijedeći primjeri mogu uzrokovati pogrešno tumačenje AVO odziva odnosno proizvesti anomaliju koja se ne može razlikovati od one uzrokovane komercijalnim nakupljanjem ugljikovodika (**Ross, 2000,Downton & Lines, 2001**):

- Šejlovi ili lapori, slojevi ugljena s niskom akustičnom impedancijom mogu se pogrešno protumačiti kao pješčenjak koji sadrži ugljikovodike. Možemo eventualno identificirati ovakve slojeve ako se potvrdi njihova prisutnost u obližnjim bušotinama.
- Vodom zasićeni pijesci visoke poroznosti mogu također imati vrlo niske akustične impedancije. Kriteriji za prepoznavanje ovakvih pojava su neusklađenost amplitude sa strukturnim zatvaranjem ili je seizmički događaj regionalni na velikom području.
- Vodom zasićeno ležište s vrlo niskom zasićenosti plinom (približno 10 %) glavni je faktor pogrešne identifikacije jakih seizmičkih amplituda. Rezidualni plinovi pojavljuju se često na malim dubinama i uglavnom su to biogeni plinovi. Ovaj primjer uključuje i zaostalo zasićenje plinom u probijenu zamku.
- Kompaktirani šejlovi ili lapori između tankih slojeva vodom zasićenih pješčenjaka
- Inverzni ili obrnuti polaritet može uzrokovati uzrokovati pogrešno tumačenje šejlova ili lapora visokih impedancija kao pijesaka malih impedancija.
- Karbonati, vulkaniti ili soli koji su obično vrlo visokih brzina mogu vrlo snažno odražavati amplitudu na seizmičkim podacima, te je važno odrediti fazu/polaritet podataka i pregledati geološku građu tog područja ne bi li se ustvrdilo da ove vrste naslaga uzrokuju amplitudnu anomaliju.
- *Tuning* efekti koji opisuju destruktivnu ili konstruktivnu interferenciju između reflektora od podine do krovine formacije. Seizmička amplituda varira ovisno o debljini

formacije posebno kod vrlo malih debljina. Promjene amplitude povezane s ležištem različite debljine mogu se pogrešno protumačiti kao ugljikovodici u ležištu.

- Promjena bočnog litološkog sastava kao promjene geometrije ležišta i promjena debljine.
- Konkavni geološki slojevi imati će fokusirajući efekt na moguće seizmičke uzorke povećavajući seizmičku amplitudu, dok će rasjedi ponekad prikazati slabiji odraz seizmičkog refleksa nego što je on doista.

6.6.3 AVO ATRIBUTI

AVO atributi pripadaju grupi *pre-stack* atributa. Mogu se prikazati kao 2D ili 3D seizmički volumen, te se prikazati i interpretirati uzduž *inline* ili *crossline* smjera, te duž vremenskih odsječaka (*time-slice*), te ekstrahirati duž pojedinog horizonta pogodnog za analizu. Dijele se na primarne i sekundarne AVO atribute. Primarni AVO atributi su *intercept* i *gradient* i najčešće se interpretiraju križnim dijagramima, jednostavnom vizualnom metodom, koja ističe anomalije povezane zasićenjem ugljikovodicima od trenda zasićenja vodom (**Castagna & Swan 1997**). No anomalije se interpretiraju i na njihovim volumenima.

- *Intercept* je vrlo koristan u litološkom smislu jer se zasniva na brzinama i gustoćama na suprotnim stranama reflektirajuće granice. Volumen primarnog AVO atributa računa se iz *Angle stackova* i služi kao podloga za osnovnu AVO analizu.

$$R(0)=\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta Vp}{Vp}+\frac{\Delta Vp}{Vp}\right)$$

- *Gradient* prikazuje ponašanje odnosno veličinu amplitude na dalekim *offsetima*/kutovima. Ako se prikazuje ekstrahiran duž nekog horizonta može poslužiti kao brzi pregled anomalnog ponašanja amplituda bolje nego što bi se to moglo uočiti na standardnom seizmičkom prikazu. Ako njegovu interpretaciju primijenimo u kombinaciji sa ostalim metodama moguće je brzo razlučiti područja mogućeg zasićenja ugljikovodicima.

$$G=\frac{1}{2}\frac{\Delta Vp}{Vp}-\frac{\Delta Vs^2}{Vp^2}\left(\frac{\Delta Vp}{Vp}+\frac{2\Delta Vs}{Vs}\right)$$

Neki od sekundarnih AVO atributa koji su korišteni u ovom radu su: Produkt *intercepta* i *gradienta* (I*G), *Sign* (*intercept*)**gradient* i AVO snaga.

- Produkt *intercepta* i *gradienta* (I*G) u jednom volumenu označava polaritet i varijacije amplitude u ovisnosti o kutu (**Castagna et al., 1998**).

- Sign(*intercept*)**gradient* čuva vrijednosti gradijenta ali na rezultat izravno utječu kombinirane vrijednosti intercepta i gradijenta. Također označava varijacije amplitude u ovisnosti o kutu i daje dobre rezultate u detektiranju mogućih ugljikovodika.

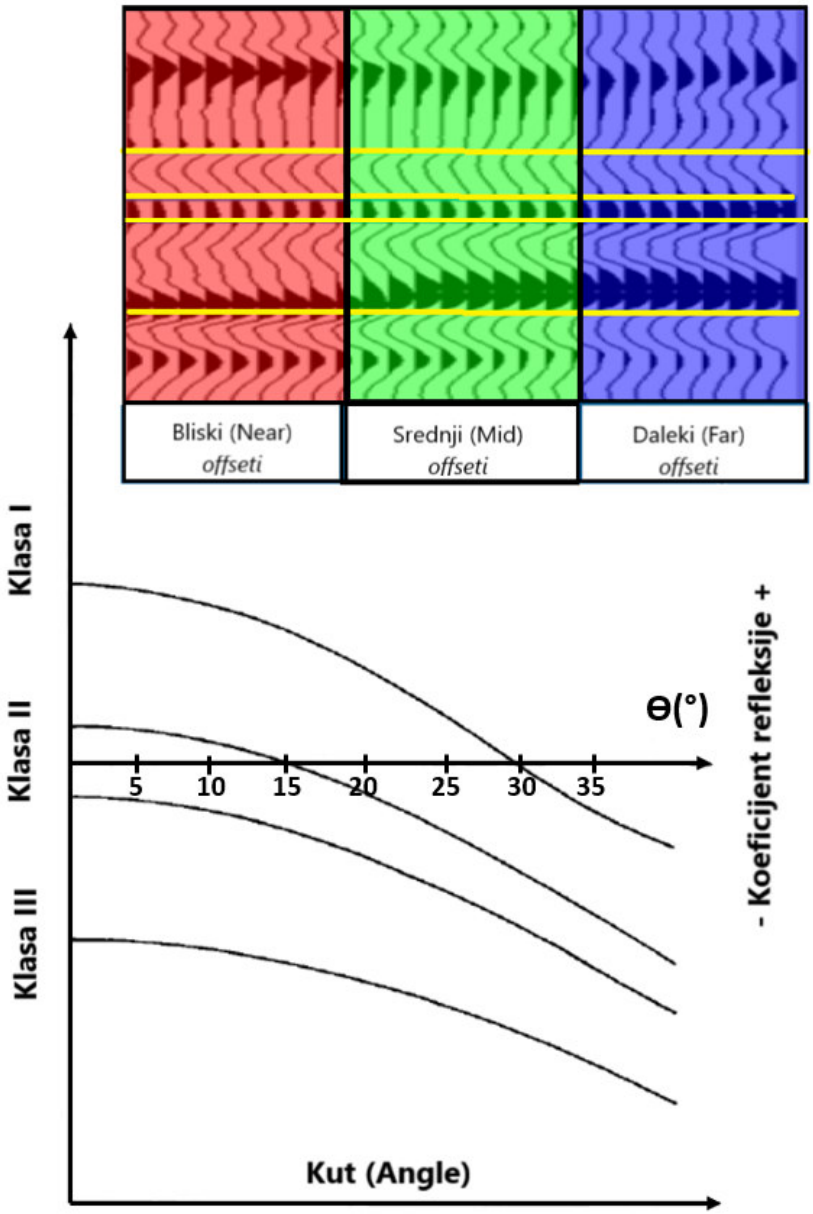
- AVO snaga povećava i bolje ističe amplitudne anomalije povezane sa plinom i vodom zasićene pijeske u odnosu na uobičajene AVO atribute. Opisuje mjeru udaljenosti točaka hodograma od izvora unutar odabranog prozora za analizu. Točke koje se nalaze na križnom dijagramu *Intercept/Gradient* mogu se smatrati oblakom točaka određene dužine. Veći oblak točaka imati će veću vrijednost AVO snage od manjeg oblaka (**Mahob & Castagna, 2003**).

6.6.4 ANGLE STACKOVI

Seizmička komponenta niskih frekvencija sadrži puno više informacija o fluidima koji predstavljaju glavni fokus u geofizičkim istraživanjima. *Pre-stack* podaci također sadrže veliki broj podataka koji bi mogli upućivati na zasićenje fluidima, ali je omjer signal/smetnja vrlo nizak. S druge strane *Post-stack* podaci nakon stekiranja imaju visoki odnos signal/smetnja, no tijekom obrade podataka mogući podaci o zasićenju mogu biti izgubljeni. Različiti *Angle stackovi* odražavaju različitu seizmičku amplitudu koja bi upućivala na zasićenje u usporedbi s *Near Angle stackom* koji se sastoji od zbrojenih tragova bližih udaljenosti izvora od prijemnika. *Far Angle stackovi* su izuzetno interesantni jer sadrže više komponenata nižih frekvencija što je korisnije za identifikaciju zasićenja fluidima (**Castagna & Backus, 1993**).
Angle stackovi sadrže korisne seizmičke informacije koje se koriste za AVO analizu. Konstruiraju se iz CMP *gathera* pomoću modela brzine. Računaju se kutovi za bliske, srednje i daleke *offsete* kako bi se dobili *Near, Mid i Far Angle stack*. U ovom radu su korišteni dubinski (PSDM-engl. *Pre stack Depth Migration*) migrirani podaci konvertirani u vremensku domenu. *Angle stackovima* se može manipulirati matematičkim operacijama. Jedan od kombiniranih

AVO atributa koji se koriste za brzu AVO analizu je korištenje *Angle stackova*, odnosno razlika *Far Angle stacka* i *Near Angle stacka* te produkt rezultata s *Far Angle stackom* -(*Far angle stack-Near angle stack*) * *Far angle stack*. Na kvalitativan način ova metoda je prilično učinkovita u otkrivanju eventualnog zasićenja. Također ističe AVO klasu II – reverziju faze i AVO klasu III – klasičan *Bright spot* (**Whitcombe et al., 2002**).

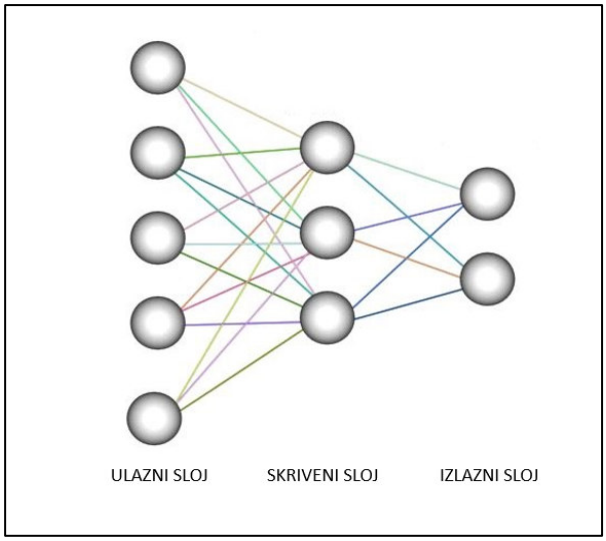
Također mogu se prikazati slično kao kombinirani atribut spektralne dekompozicije, AVO RGB *blending* metodom gdje podatke *Near Angle Stacka* uzimamo kao crveni dio spektra, *Mid Angle Stack* zeleni, a *Far Angle Stack* kao plavi dio spektra (**Slika 6.6.4.1.).**



Slika 6.6.4.1. AVO RGB Blending tehnika (prema Rutherford and Williams 1989)(modificirano prema https://www.petrole.gov.mr/IMG/pdf/2014_dana_avo_rgb_blending_v7_for_mauritanidespdf.pdf)

6.6. UMJETNE NEURONSKE MREŽE

Umjetna neuronska mreža (engl.: *Artificial Neural Network*, ANN) sastavljena je od umjetnih neurona (uglavnom kao apstraktnih pojmova) koji su uzajamno povezani i međudjelujući tijekom operacija obrade signala. Organizirana je po uzoru na ljudski mozak. Slojevi u mreži, u kojima su raspodijeljeni neuroni mogu biti ulazni, skriveni i izlazni. Ulazni sloj ima funkciju primanja podataka te slanja istih u skrivene slojeve. U skrivenim se slojevima informacije obrađuju te se, po realizaciji navedenog šalju u neurone izlaznog sloja nakon što su rezultati uspoređeni u odnosu na one ciljane u izlaznom sloju. Nakon toga informacije putuju unazad kroz mrežu, a vrijednosti težina između neurona prilagođavaju kako bi se odstupanje od željenog izlaza umanjilo (**Sarkar, 2018**).



Slika 6.6.1: Struktura neuronske mreže

Opisani se proces u mreži ponavlja onaj broj puta koliko je potrebno da se dobije izlaz najbliži željenom (realnom) izlazu (koji se na kraju prikazuje). Jakost veze između dva neurona prikazana je težinom veze, dok se proces detektiranja vrijednosti težina veza među neuronima naziva učenjem. Faze rada umjetnih neuronskih mreža mogu se podijeliti na:

- fazu učenja (treniranja);
- fazu selekcije (validacije);
- fazu testiranja;
- operativnu fazu (fazu povrata težina i ponavljanja postupka učenja).

Dvije temeljne faze rada umjetnih neuronskih mreža najčešće su faza učenja i faza testiranja. Nakon završetka procesa neuronske mreže se primjenjuje na novim slučajevima s nepoznatim rezultatima i fiksiranim težinama, tj. koristi se za predviđanje.

Učenje je tijek mijenjanja težina u mreži. Podaci prikazani u izlaznom sloju željene su vrijednosti izlaznih varijabli. Prije samog učenja potrebno je definirati model (ulazne i izlazne varijable) te pripremiti podatke na kojima će se mreža primijeniti. Podaci se uglavnom dijele u dva poduzorka: uzorak za treniranje i uzorak za testiranje. Ne postoji točno određeno pravilo za klasifikaciju podataka u uzorke, no raspodjela vrlo često je 70% naprema 30% u korist uzorka za treniranje. Nakon što je zadan model i pripremljeni ulazni i izlazni podaci te pravilo učenja, mrežu je neophodno učiti ili trenirati radi raspoznavanja veze među podacima i predviđanja izlaznih vrijednosti. Faza učenja je proces usklađivanja težina u mreži koja se odvija u više ponavljanja odnosno iteracija. Ne postoji pravilo za optimalni broj iteracija koju može biti od stotina do desetaka tisuća, a ovisi o brzini smanjenja pogreške između iteracija kako ne bi došlo do preuvježbavanja mreže.

Druga faza je testiranje neuronske mreže koja je zapravo odlučujuća faza za ocjenjivanje same mreže. U fazi testiranja mreža više ne uči, tj. vrijednosti težina su utvrđene na vrijednostima dobivenima u fazi učenja. Toj se mreži prikazuju nove ulazne vrijednosti (koje nisu sudjelovale u procesu učenja), a od mreže se očekuje da za predstavljenu novonastalu ulaznu vrijednost proizvede odgovarajuću izlaznu vrijednost. Valorizacija mreže procjenjuje se izračunom greške ili nekog drugog mjerila točnosti (npr. stope točnosti), na način da se izlazna vrijednost mreže korelira sa stvarnim izlaznim vrijednostima. Uspješnost tj. neuspješnost mreže tumači se pomoću dobivene greške na uzorku za validaciju. Najčešća greška koja se računa kod neuronskih mreža je korijen iz srednje kvadratne pogreške (*root mean square error*), prema formuli:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-1}(t_i - o_i)^2}{n}}, \tag{6.17}$$

gdje je:

- t_i izračunati izlaz koji daje mreža;
- o_i željeni (stvarni) izlaz za slučaj i;
- n broj slučajeva u uzorku.

Kao kriteriji se koriste i srednja kvadratna pogreška (*mean square error*), srednja apsolutna pogreška (*mean absolute error*) te koeficijenti korelacije.
Osnovna primjena neuronskih mreža je mogućnost traženja međuzavisnosti među podacima koji nisu u isključivo linearnoj vezi, a opet mogu se ujediniti u jedan složeni ulazni skup. Danas postoji nekoliko glavnih vrsta mreža, no temeljno je obilježje svih mreža, bez obzira na oblik i broj veza unutar njih, da se odlikuju svojstvom „učenja", tj. uvježbavanja kroz niz ponavljajućih postupaka analize. Od cijeloga skupa podataka veći dio upotrijebljen je za učenje, a manji za ponovno predviđanje poznatih vrijednosti. Tako je moguće izračunati pogrešku predviđanja, koja bi s većim brojem pokušaja trebala biti manja. Porastom uporabe neuronskih mreža razvili su se brojni algoritmi. Neki su univerzalni za sve tipove problema, dok su neki specificirani (**Sarkar, 2018**). Algoritme možemo podijeliti na (**Dumančić, 2014**):

- nadgledane (algoritmi za koje su potrebne poznate ulazne i izlazne vrijednosti);
- nenadgledane (algoritmi za koje su potrebne samo ulazne vrijednosti).

U nadgledane algoritme ubrajaju se:

1) za zadatke predviđanja

- mreža širenja unatrag (engl. *Back propagation*);
- modularna mreža (engl. *modular network*);
- mreža s radijalno zasnovanom funkcijom (engl. *radial-basis function network*);
- mreža opće regresije (engl. *general regression network*);

2) za zadatke razvrstavanja:

- vjerojatnosna mreža (engl. *probabilistic network*);
- mreža učeće vektorske kvantizacije (engl. *linear vector quantization*).

U nenadgledane algoritme ubrajaju se:

- Kohonenova mreža i samoorganizirajuće karte (engl. SOM);
- mreža adaptivne rezonantne teorije (engl. *adaptive resonance theory network*).

6.6.1 KOHONENOVE MREŽE

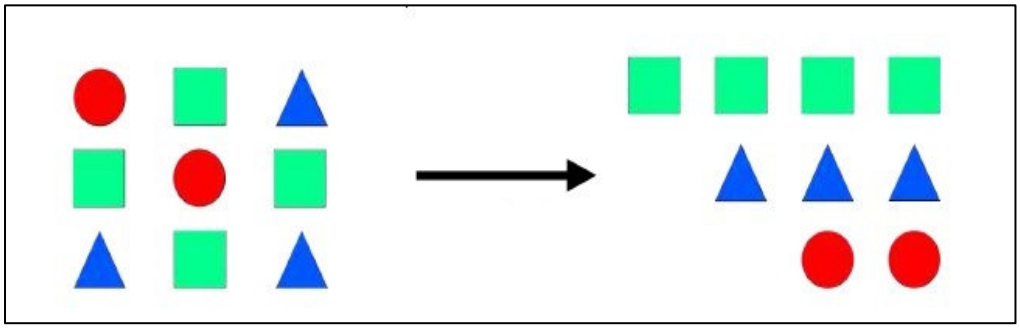
Kohonenove mreže jedna su od osnovnih vrsta samoorganizirajućih neuronskih mreža, te su sinonim za cijele skupine mreža koje koriste samoorganizirajuću metodu učenja natjecateljskog tipa.

Karta samoorganiziranja (SOM) mreža je neurona koji se prilagođavaju topološkom obliku skupa podataka, omogućujući nam vizualizaciju velikih skupova podataka i identificiranje potencijalnih klastera.

Karta samoorganiziranja (SOM) ili mapa značajki samoorganiziranja (SOFM) vrsta je umjetne neuronske mreže (ANN) koja se trenira pomoću nenadgledanog učenja kako bi se dobio nisko-dimenzionalni (obično dvodimenzionalni) prikaz odnosno ulazni prostor uzoraka treninga, nazvan karta. SOM uči oblik skupa podataka ponavljajući pomicanje svojih neurona bliže podatkovnim točkama.

Primjerice, kod nadgledanih mreža kako bi se klasificirale rukom napisane znamenke (0-9), nadzirani algoritam bi snimio 9000 slika takvih nacrtanih likova, zajedno s popisom 9000 naljepnica koje sadrže broj koji svaka slika predstavlja. Odabrani algoritam će zatim naučiti odnos između slika i pripadajućih etiketa abecede, a zatim primijeniti taj naučeni odnos kako bi klasificirao 1000 potpuno novih neobilježenih slika koje prije nije vidio. Ako uspije ispravno klasificirati 900 od ukupno 1000 ispitnih slika, reklo bi se da imaju točnost od 90% i pogrešku od 10% (**Sarkar, 2018**).

Druga kategorija kojoj pripadaju Kohonenove mreže, gdje je prostor ulaznih podataka nepoznat i ne sadrži pridružene podatke naziva se učenje bez nadzora. Cilj tada nije samo grupirati ulazne podatke u skupine, već i otkriti strukturu i obrasce samog ulaznog prostora, grupiranjem u klastere prema sličnosti među sobom (**Slika 6.6.1.1.**).

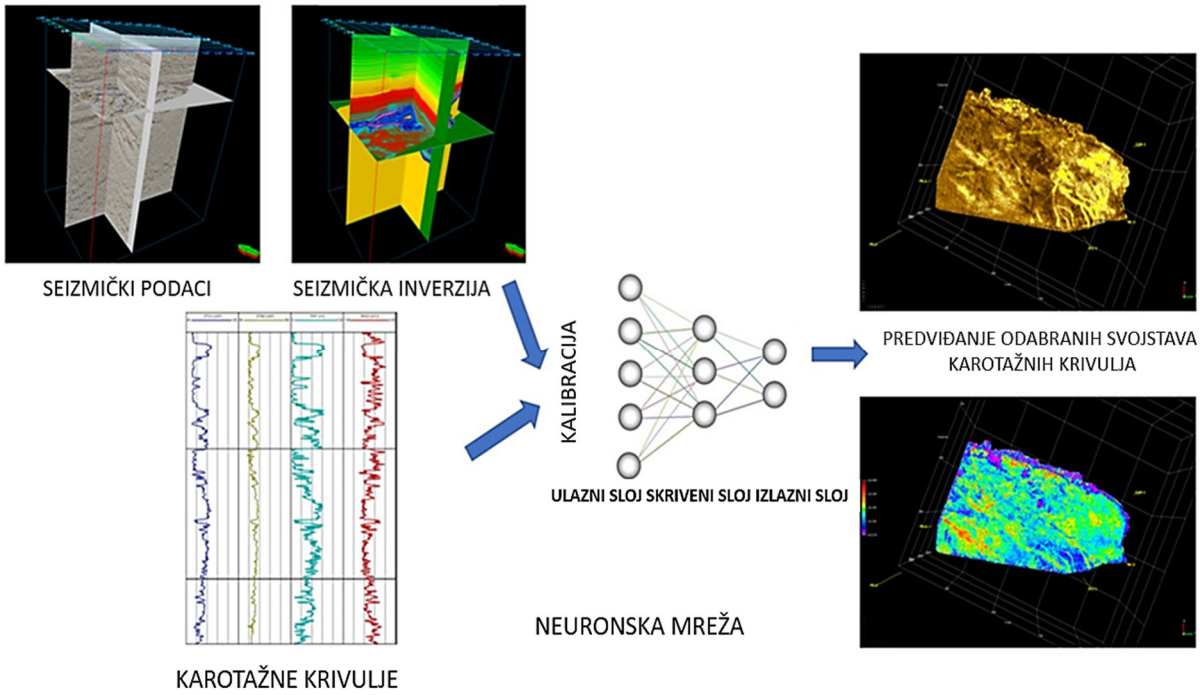


Slika 6.6.1.1. Podaci o nenadziranim klasterima učenja isključivo prema značajkama njihove sličnosti (Sarkar, 2018).

Za razliku od učenja pod nadzorom, ne možemo izravno izmjeriti točnost izračunatih ishoda jer ne postoje ciljani izlazi s kojima bismo ih mogli usporediti. Izvedba mreže je zato često subjektivna i specifična za pojedinu domenu. Važno svojstvo neuronskih mreža je da mali dio loših podataka ili mali dio nefunkcionalnih čvorova neće uništiti rezultate dobivene za cijelu mrežu.

6.7. SEIZMIČKA INVERZIJA POMOĆU NEURONSKIH MREŽA

Seizmička inverzija pomoću neuronskih mreža procjenjuje svojstva karotažnih krivulja u području interesa. Predviđanje određenih svojstava mjerenih karotažnih krivulja pomoću neuronskih mreža, statistička je metoda koja integrira seizmičke i podatke mjerenih krivulja iz bušotine. Pomoću te metode invertiraju se seizmičke vrijednosti na željene volumene određenih svojstava karotažnih dijagrama koje želimo primijeniti (karotažnih krivulja otpornosti, gustoće, spontanog potencijala, prirodne radioaktivnosti itd.) (**Slika 6.7.1.**).



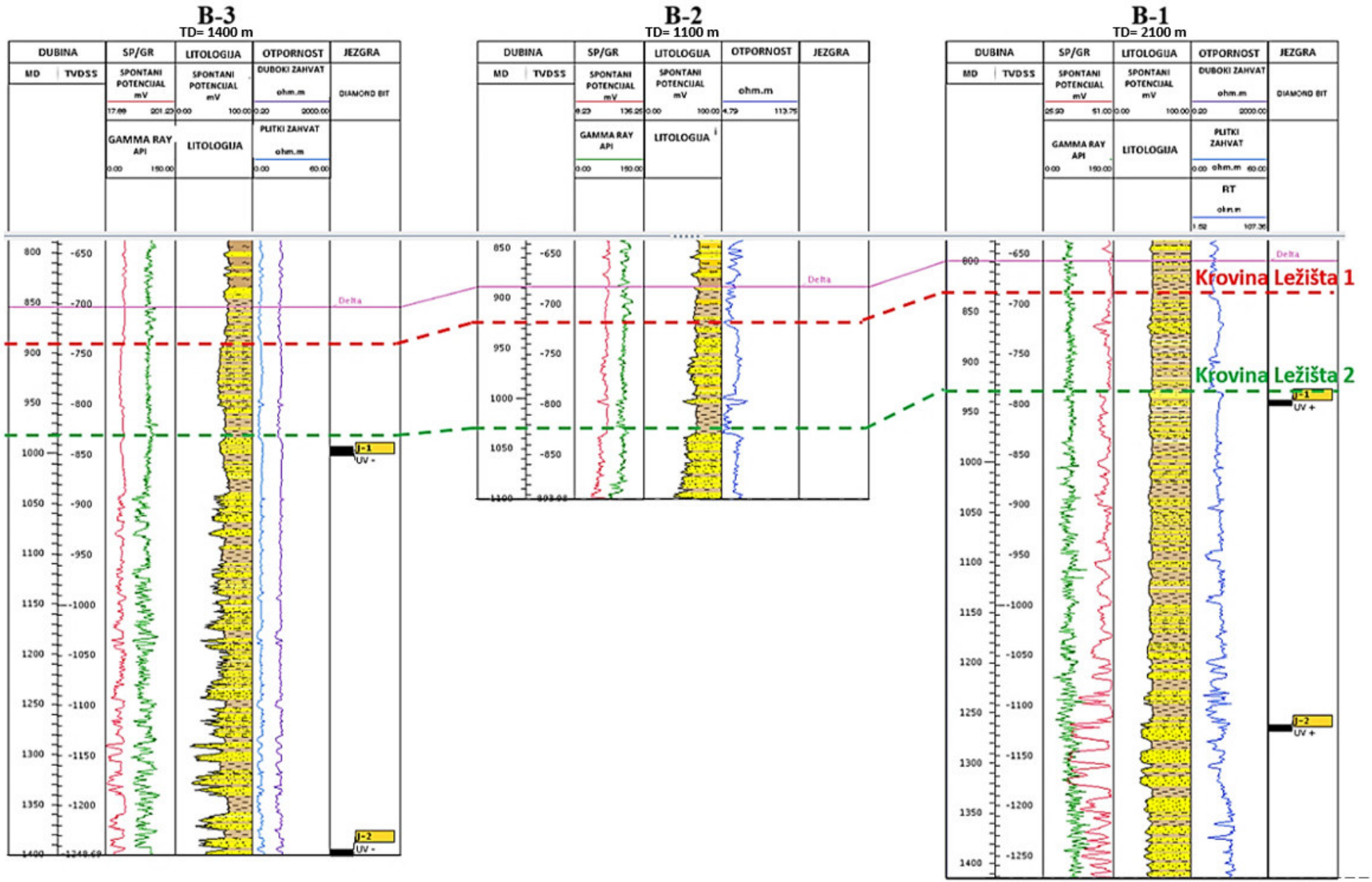
Slika 6.7.1.: Pojednostavljeni prikaz predikcije *odabranih svojstava pomoću neuronskih mreža*

Metoda se sastoji od dva koraka:

- Korak učenja trenira vezu između seizmičkog atributa i svojstava rezervoara. Metodom se pronalazi model traga na mjestima bušotina, a zatim se povezuje s područjima za koje ne postoje bušotinski podaci.
- Korak primjene izračunava srednju kvadratnu grešku i razinu unakrsne korelacije za svaku analiziranu karotažnu krivulju. Te vrijednosti nam na neki način govore o snazi predviđanja.

6.7.1 ANALIZE KAROTAŽNIH KRIVULJA POTREBNIH ZA NEURONSKE MREŽE

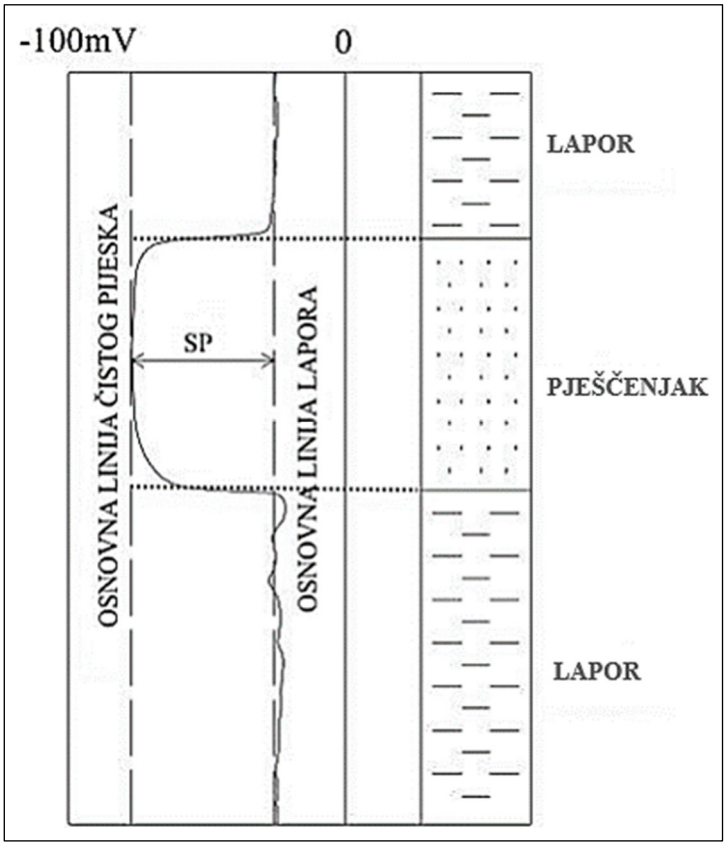
Cilj karotažnih mjerenja je odrediti fizikalne parametre potrebne za kvalitativnu i kvantitativnu karakterizaciju ležišta, a to su: poroznost, propusnost, zasićenje fluidima, tj. vodom i ugljikovodicima, litološki sastav, dubina zalijeganja i debljina propusnog sloja i granice zasićenja fluidima. Pomoću karotažnih krivulja rađene su analize neuronskih mreža za krivulje otpora, spontanog potencijala, gustoće i brzine.



Slika 6.7.2.: Korelacija triju analiziranih bušotina s prikazanim karotažnim krivuljama i krovinama dvaju ležišta (Tehnička dokumentacija, INA d.d.)

6.7.1.1 PRIMJENA I KARAKTERISTIKE KAROTAŽNIH KRIVULJA SPONTANOG POTENCIJALA

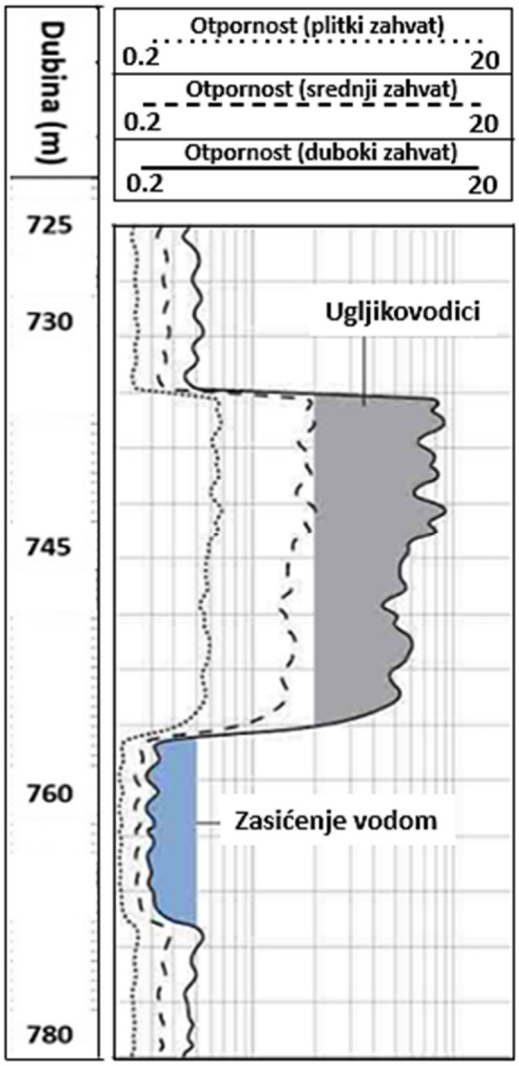
Pomoću logova spontanog potencijala (SP) možemo interpretirati uglavnom granice propusnih i nepropusnih slojeva odnosno logovi nam mogu poslužiti za određivanje litološkog sastava. Idealan slijed naslaga za mjerenje spontanog potencijala je izmjena pješčenjaka i lapora, naročito ako takva promjena obuhvaća deblje slojeve. Na mjestima tankih, propusnih slojeva, krivulja spontanog potencijala bit će prigušena (manjeg otklona), a kod vrlo tankih slojeva čak i otklonjena udesno. Nafta i plin u pješčenjaku, kao i povećani sadržaj gline, pomiču krivulju SP prema osnovnoj liniji nepropusnih stijena. Otkloni u lijevo (**Slika 6.7.1.1.1**.) utvrđuju se kao negativni, a desno kao pozitivni. Na krivulji SP-a može se povući pravac koji se naziva osnovna linija nepropusnih stijena (naslaga), osnovna linija lapora (ili šejla) ili osnovna linija SP-a. Niže vrijednosti ukazuju na propusne stijene i približavaju se osnovnoj liniji čistog pješčenjaka.



Slika 6.7.1.1.1. Izgled krivulje spontanoga potencijala s pripadajućim osnovnim linijama te probušenim litološkim sastavom. Niže vrijednosti ukazuju na propusne stijene (preuzeto iz Balić, 1993)

6.7.1.2 PRIMJENA I KARAKTERISTIKE KAROTAŽNIH KRIVULJA OTPORNOSTI

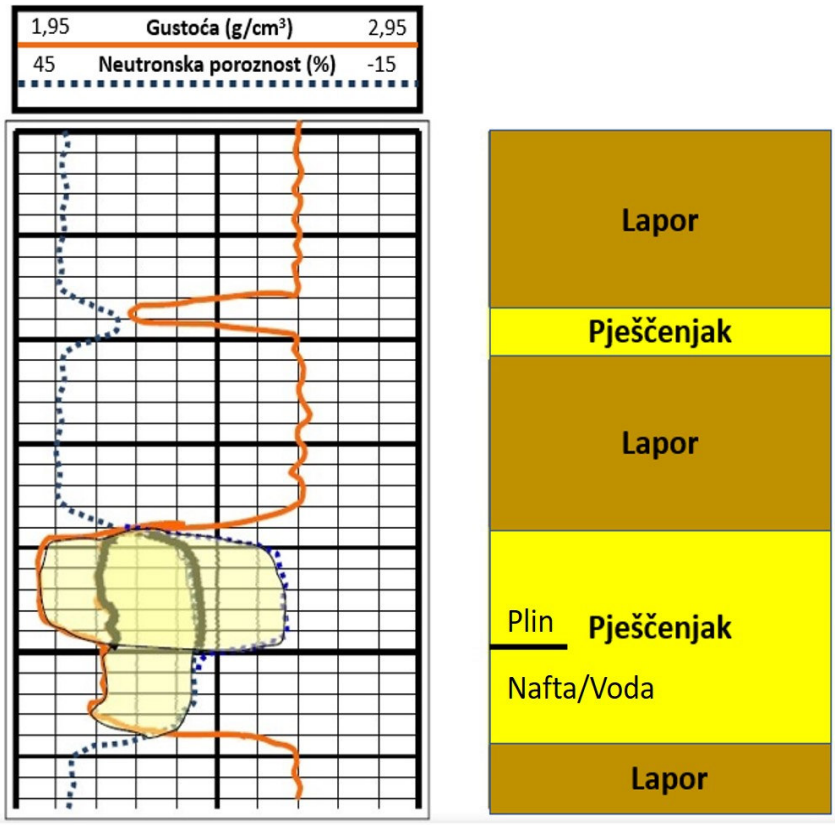
Mjerenje električne otpornosti primjenjuje se za određivanje kontakta slojne vode i ugljikovodika. Mjerenje otpornosti u bušotini daje vrijednost otpornosti minerala i fluida (tekućih i plinskih) u pornom prostoru. Pješčenjaci se odlikuju visokom otpornošću mineralnog matriksa, a visoke otpornosti označavaju plinske i tekuće ugljikovodike, te se svi oni smatraju izolatorima (**Malvić, 2011**).



Slika 6.7.1.2.1. Izgled karotažne krivulje otpornosti (preuzeto i modificirano iz https://www.slb.com/resource-library/oilfield-review/defining-series/defining-log-interpretation, 26.11.2021.)

6.7.1.3 PRIMJENA I KARAKTERISTIKE KAROTAŽNIH KRIVULJA GUSTOĆE

Karotažom gustoće (engl. *density log*) mjeri se apsorpcija gama-zračenja koja se smanjuje proporcionalno s gustoćom stijena. Primjenjuje se za određivanje poroznosti, granica formacija i litološku identifikaciju, te utvrđivanje prisustva plina u određenim uvjetima. Koristi se u kombinaciji s dijagramima γ-karotaže, neutronske karotaže ili akustične karotaže (**Slika 6.7.1.3.1.**). Plin izrazito smanjuje gustoću, pa će se na karotažnoj krivulji vidjeti nagli pomak ulijevo. Pješčenjaci, voda i tekući ugljikovodici također imaju manje gustoće (**Orešković, 2006**).



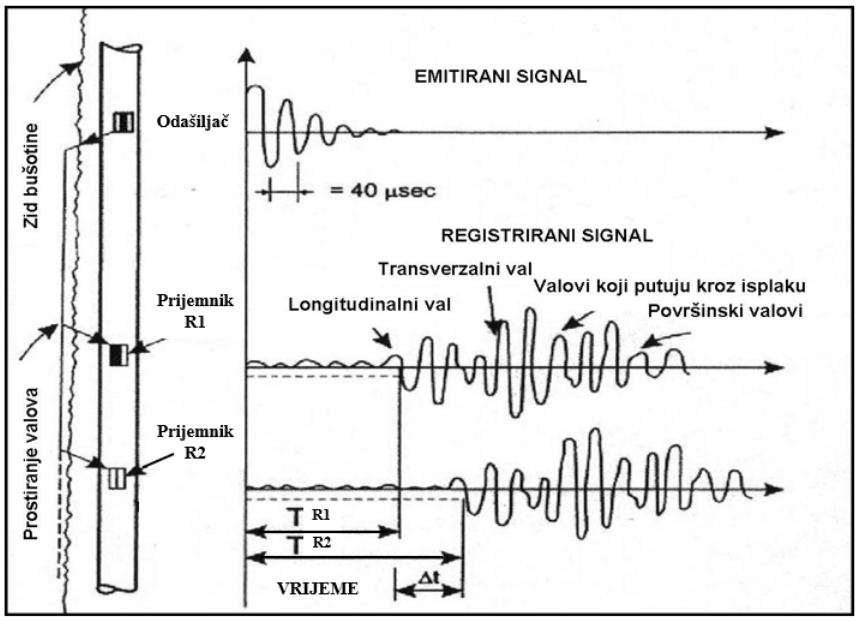
Slika 6.7.1.3.1.: Usporedni prikaz karotažne krivulje gustoće i neutronske poroznosti, te litološkog sastava (modificirano iz http://rgn.hr/~joresko/nids_joresko/Prvi_dio/Uvod.pdf , 2012)

6.7.1.4 PRIMJENA I KARAKTERISTIKE KAROTAŽNIH KRIVULJA BRZINE

Prostiranje elastičnih valova ovisi prije svega o mehaničkim svojstvima i gustoći formacije. Na putu od odašiljača (predajnika) do prijemnika elastični val prolazi kroz različite sredine (sonda, isplaka, formacija). Na svakoj granici dvije elastične sredine val se reflektira, refraktira i prelazi iz jednog oblika u drugi. Longitudinalni val koji se odašilje se prvo prostire kroz isplaku odgovarajućom brzinom. Na stijenci bušotine se refraktira i prostire kroz formaciju okomito na os bušotine mnogo većom brzinom u odnosu na brzinu kroz isplaku. Zbog toga će longitudinalnom valu koji se od izvora prvo prostire kroz isplaku, pa kroz formaciju najvećim dijelom puta, a zatim ponovno kroz isplaku do prijemnika biti potrebno mnogo manje vremena (iako prelazi duži put) nego valu koji se direktno kroz isplaku prostire do prijemnika (**Schlumberger, 2007**).

Karotažnim mjerenjima općenito, a i zvučnom karotažom dobivaju se podaci koji se koriste za poboljšanje interpretacije podataka dobivenih površinskim geofizičkim metodama odnosno refleksijskom seizmikom.

Obzirom na podatke o brzinama duž kanala bušotine može se uz pomoć sintetskog seizmograma omogućiti pouzdanije povezivanje stratigrafskih i litoloških granica na seizmičkom profilu , tj. mogu se povezati podaci u dubinskom mjerilu s podacima u vremenskom mjerilu.



Slika 6.7.1.4.1.: Osnovna sonda za zvučnu karotažu (Prostiranje valova u bušotini i formaciji), modificirano (Schlumberger, 2007)

Zvučnom karotažom mjeri se vrijeme prolaska elastičnog longitudinalnog vala na određenom putu ili intervalno vrijeme prolaska. Omjer vremena i puta obrnuto je proporcionalan brzini rasprostiranja vala i naziva se sporošću (*slowness*), a izražava se u mikro sekundama po metru. Brzina prostiranja zvučnih valova kroz formaciju (v) zavisi o brzini prostiranja valova kroz čvrstu fazu-matriks (v_m) i brzini prostiranja kroz fluide (v_f) koji se nalaze u pornom prostoru, pa samim time i o poroznosti stijene (Φ). Osnovna je namjena zvučne karotaže određivanje poroznosti stijena čija formula glasi:

$$\frac{1}{V_f} = \frac{\phi}{V_t} + \frac{1-\phi}{V_m} \tag{6.18}$$

Brzina u stijeni može ukazivati na litološki sastav, porozitet, stupanj kompakcije i cementaciju stijene.

6.7.1.5 KRATAK OPIS MJERENJA POJAVA NOVIH PLINOVA U BUŠOTINI

Geološki radovi za vrijeme bušenja sastoje se od vođenja laboratorija nadzora bušenja ili TDC laboratorija kako se uobičajeno naziva (engl. *total drilling control*). To je modularni terenski laboratorij s uređajima za automatsko praćenje promjena parametara bušenja i pojava ugljikovodika u bušotini.

U sklopu geološkog praćenja kod izrade svake bušotine se (uz standardne podatke kao što su između ostalih brzina bušenja i litološki sastav probušenih intervala), tzv. plinskom karotažom pomoću detektora plina određuju tijekom bušenja izdvojene pojave plinova na dubinama na kojima se otkriju. Najvažnije su pojave novih plinova (NP), a mjeri se i Background plin (BP).

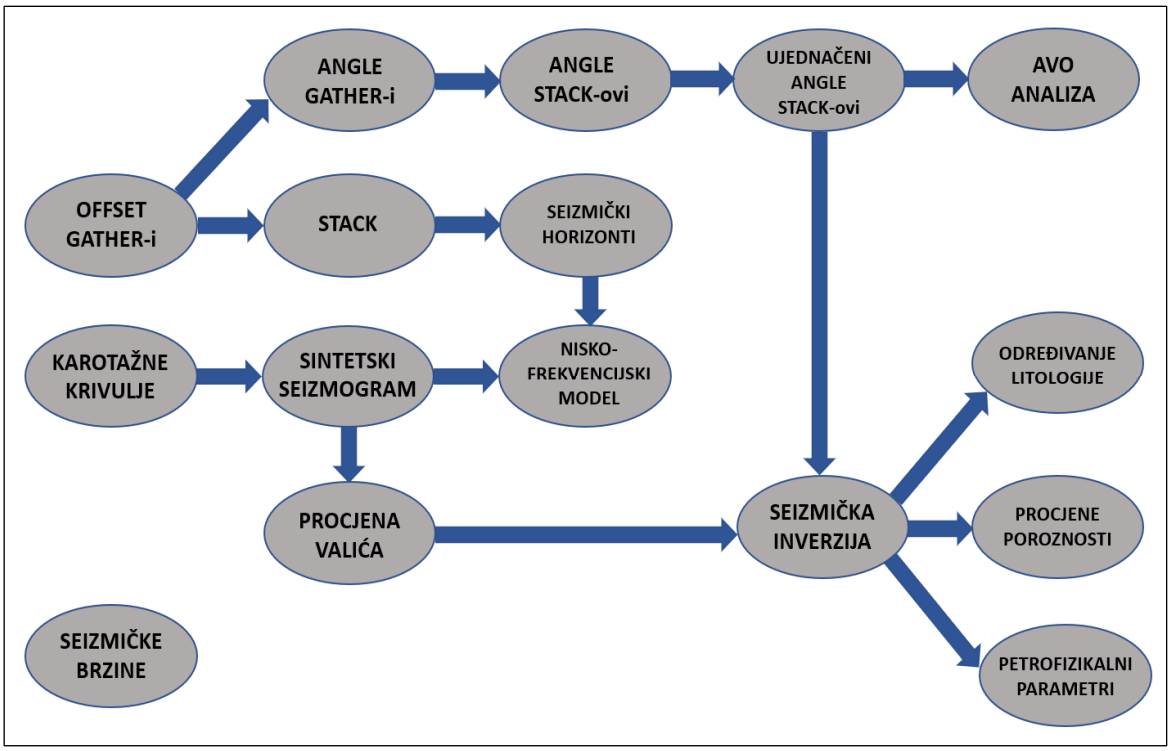
Novi plin potječe iz netom nabušenog sloja koji je, u većoj ili manjoj mjeri, zasićen ugljikovodicima (**Vrbanac, 1990**).

Background plin je plin koji dolazi iz fragmentiranog volumena stijene koja ne sadrži značajne količine ugljikovodika te plin koji je došao difuzijom kroz slojeve u blizini bušotine iz već probušenih kolektorskih stijena.

Rezultati geološkog praćenja bušotine nam prikazuju litološki sastav u postotcima probušen na određenoj dubini određenog datuma i pojave plinova također izražene u postotcima.

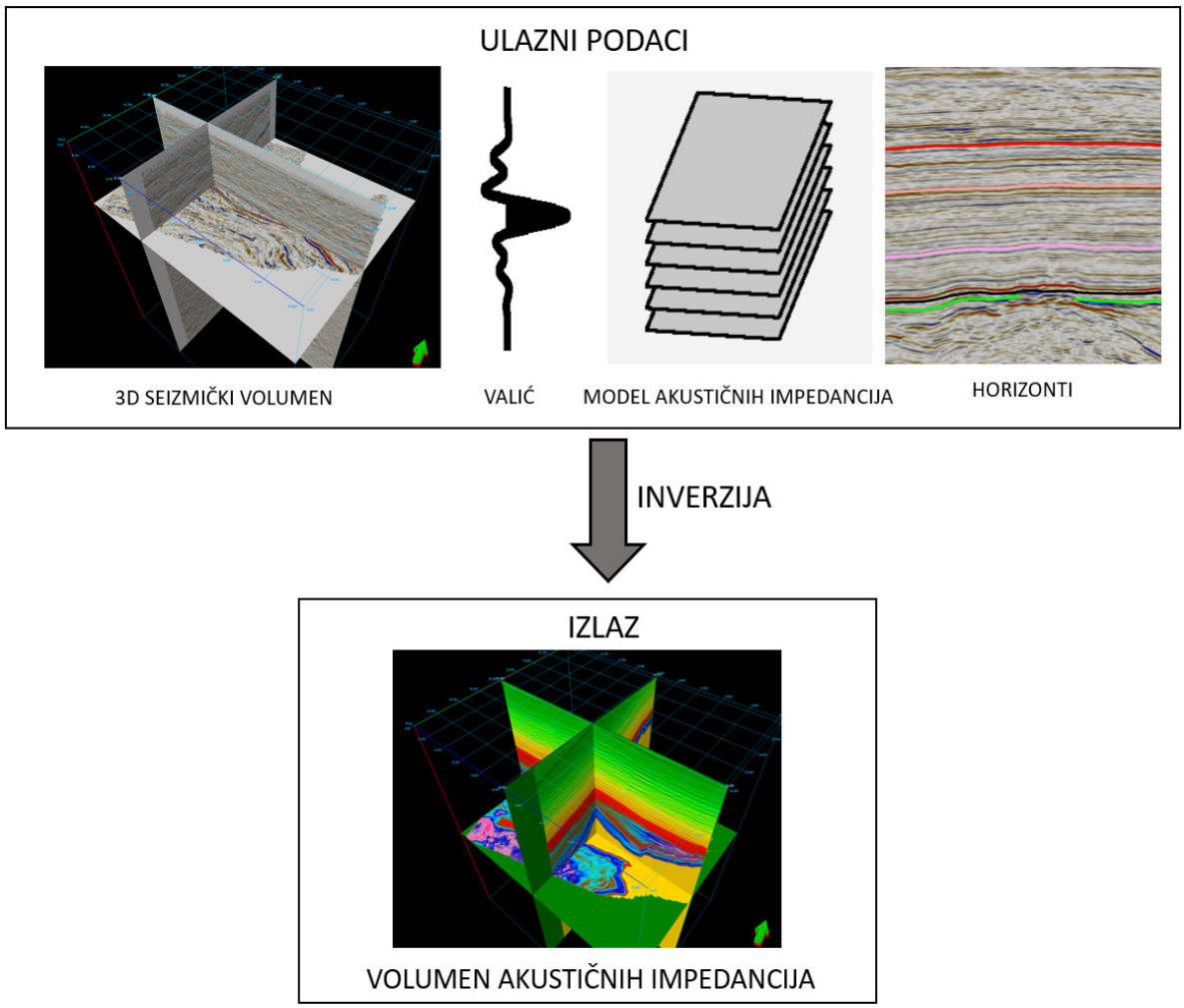
6.8. SEIZMIČKE INVERZIJE

Neophodni podaci kao i tijek obrade podataka potrebnih za izradu seizmičkih inverzija od kojih su i neki podaci potrebni za izradu AVO analiza prikazani su na **Slici 6.8.1**.



Slika 6.8.1.: Proces obrade podataka potrebnih za AVO analize i seizmičke inverzije

Seizmičke inverzije u istraživanju nafte i plina prvenstveno predstavljaju proces pretvaranja seizmičkih podatka u kvantitativni opis svojstava stijene ležišta. Na temelju ulaznih podataka dijele se na *pre-stack* i *post-stack* inverziju. U ovom radu korištene su metode *post-stack* seizmičke inverzije. Metode inverzije koje koriste seizmičke podatke nakon zbrajanja tragova ili stekiranja tzv. *post-stack* inverzije koriste se za transformaciju zbrojenih podatka uz podatke iz bušotina u kvantitativnu fiziku stijena, gdje se koriste i analiziraju podaci o akustičnim impedancijama (**Veeken & Silva, 2004**)(**Slika 6.8.2**.).



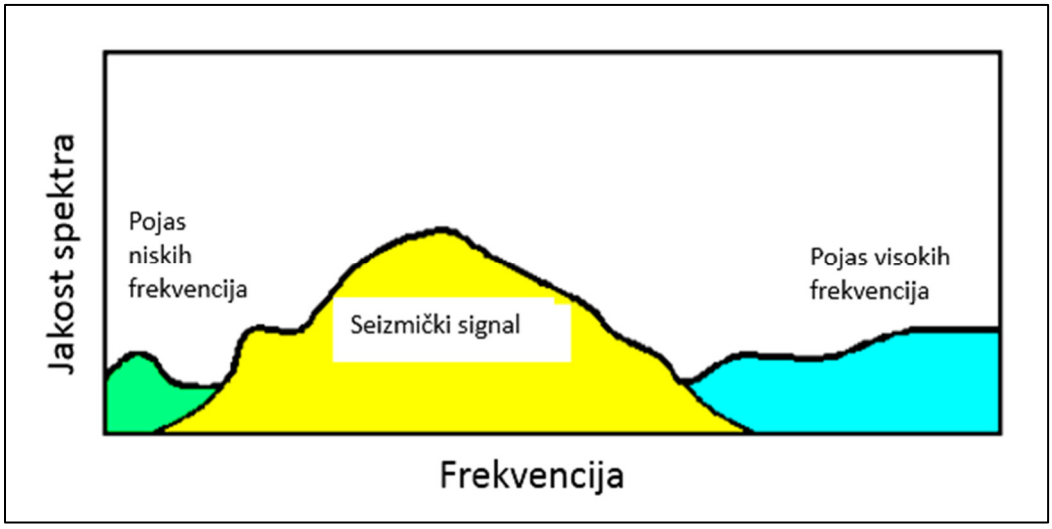
Slika 6.8.2.: Proces seizmičke inverzije

Postupak pripreme podataka zahtijeva vrijeme i stručnost. Danas postoji veliki broj tijekova rada od kojih je Inverzija u boji (*Colored inversion*) - CI jedna od privlačnih i brzih tehnika koja se lako može primijeniti na seizmičke podatke i izvodi se na jednostavan i razumljiv način (**Lancaster & Whitcombe, 2000**). Priprema podataka zahtijeva izradu nisko frekvencijskog modela (*Low frequency model* - LFM).

6.8.1. IZRADA NISKOFREKVENCIJSKOG MODELA

Modeliranje niskih frekvencija važan je aspekt za dobivanje apsolutnih svojstava stijena (**Slika 6.8.1.1**). Bez nisko frekvencijskog modela inverzija može pružiti samo relativne impedancije slojeva zato što je pojas seizmičkog signala ograničen nedostatkom niskih frekvencija. Pomoću relativnih elastičnih parametara moguće je identificirati anomalije no

apsolutne vrijednosti daju bolje rezultate. Inverzija s niskofrekventnim modelom naziva se apsolutna inverzija i njome se žele procijeniti cjelokupna elastična svojstva slojeva, neovisno o impedanciji gornjeg / donjeg sloja (**Innanen & Margrave, 2011**).



Slika 6.8.1.1: Utjecaj ograničenog pojasa seizmičkih podataka na inverziju

Također nedostajuće visoke frekvencije odgovorne su za nejedinstvenost tankih slojeva (visoka razlučivost akustičke impedancije).

Za izradu modela potrebni su seizmički volumeni za bliže *offsete* - *Near Angle Stack,* akustične impedancije izračunate iz karotažnih krivulja za bušotine od interesa i odabrani horizonti.

Vrijednost područja podataka procjenjuje se kao prosjek između vrijednosti u bušotinama na istoj dubini horizonta. Kvalitetna korelacija između bušotina je vrlo važna. Promjene između bušotina mogu se previdjeti, posebno ako podaci o brzini nisu dostupni. Bitno je napomenuti kako rezultati inverzije često ovise o samom LFM-u te da model uvelike ovisi o kvantiteti i kvaliteti bušotinskih podataka. Tako se, vrlo često varijacije između bušotina mogu propustiti, te se lokalne anomalije u bušotinama mogu uključiti u cijeli model.

6.8.2. INVERZIJA U BOJI (COLORED INVERSION-CI)

Inverzija u boji je konstruirana kako bi se aproksimativno podudarala s prosječnim spektrom invertiranih seizmičkih podataka u odnosu na srednju impedanciju spektra. Frekvencije spektra mogu se podijeliti na bijeli šum koji ima ravan spektar snage i frekvencije viših energija u kojima su više frekvencije u plavoj boji, dok crvenim spektrom prevladavaju

niže frekvencije. Zavisno o algoritmu koji se koristi inverzija pretvara podatke o refleksiji u fizička svojstva stijena poput akustične impedancije. Obzirom da se poroznost smanjuje s dubinom očekuje se da će se impedancija relativno povećavati s dubinom zbog kompakcije. Inverzija je najprikladnija za strukturnu i stratigrafsku interpretaciju i karakterizaciju ležišta. Jedan od brzih i pouzdanih oblika inverzije koja ujedno registrira i AVO efekte je upravo *Colored inversion* koja najbolje prikazuje relativne impedancije i koristi se zajedno s nisko frekvencijskim modelom. Međutim, zbog relativnih vrijednosti impedancija nije prikladna za upotrebu u kvantitativnoj procjeni ležišta. Također može pomoći u karakterizaciji svojstava kao što su tanki slojevi i diskontinuiteti.

Premda se računaju relativne impedancije kao krajnji produkt može se koristiti zajedno s nisko frekvencijskim modelom (**Lancaster & Whitcombe, 2000**).

Ova vrsta inverzije je pouzdana i brza, a i registrira AVO efekte.

Ulazni podaci u algoritmu za modeliranje su seizmički volumen od migriranih podataka u vremenskoj ili dubinskoj domeni, akustične impedancije odabranih bušotina i nisko frekvencijski model kao pozadinski model.

Izlazni podaci mogu se prikazati kao volumen ili ekstrahirani podaci duž odabranog horizonta, te se promatraju vrijednosti akustičnih impedancija. Obzirom da prisustvo ugljikovodika smanjuje brzinu i gustoću čiji je produkt akustična impedancija, jednostavno se promatraju područja nižih vrijednosti kako bi se locirala područja eventualnog zasićenja ugljikovodicima. Međutim, nagli pad impedancija mogu također uzrokovati i litološke promjene.

7. PREGLED REZULTATA ARHIVSKIH ANALITIČKIH METODA

Napravljen je pregled završnih geokemijskih izvješća i petrografsko-sedimentološke i biostratigrafske interpretacije izrađenih u Službi laboratorijskih istraživanja INA d.d. u razdoblju od 1997. do 2001. godine za sve tri bušotine (**Barić 1992, 1997, 2002; Troskot-Čorbić 2001, Raškaj 1997, Vlahović 1997, Krizmanić, 1997**). Također je u sklopu terenskog rada koji je uključivao odlazak u skladište jezgara u Mramor Brdo napravljen detaljan makroskopski pregled jezgara analiziranih bušotina te je načinjena provjera prethodno napisanih izvješća. U daljnjem tekstu prikazane su dosadašnje sveobuhvatne analize.

7.1 PREGLED DOSADAŠNJIH GEOKEMIJSKIH ANALIZA

Korištene su uobičajene geokemijske metode koje su uključivale bituminološko - luminiscentnu analizu, determinaciju ugljika organskog podrijetla, Rock-Eval pirolizu, optičku analizu kerogena, plinsko-kromatografske analize bitumena, nafte i kondenzata te izotopne analize ugljika i deuterija u plinu.

Dominantni ugljikovodični fluid polja Bačkovica je plin uz manje koncentracije kondenzata. Ugljikovodici su migracijskog podrijetla.

Plinovi polja Bačkovica sadrže metan u koncentraciji od 96,4 do 96,8 %, te nizak sadržaj dušika i ugljičnog dioksida. Sličnost molekularnih distribucija i analitičkih parametara ukazuje na isto genetsko podrijetlo ugljikovodika Bačkovica i Grubišno Polje odnosno sličnost uvjeta pri kojima su generirani te zatim migrirali u ležišne stijene.

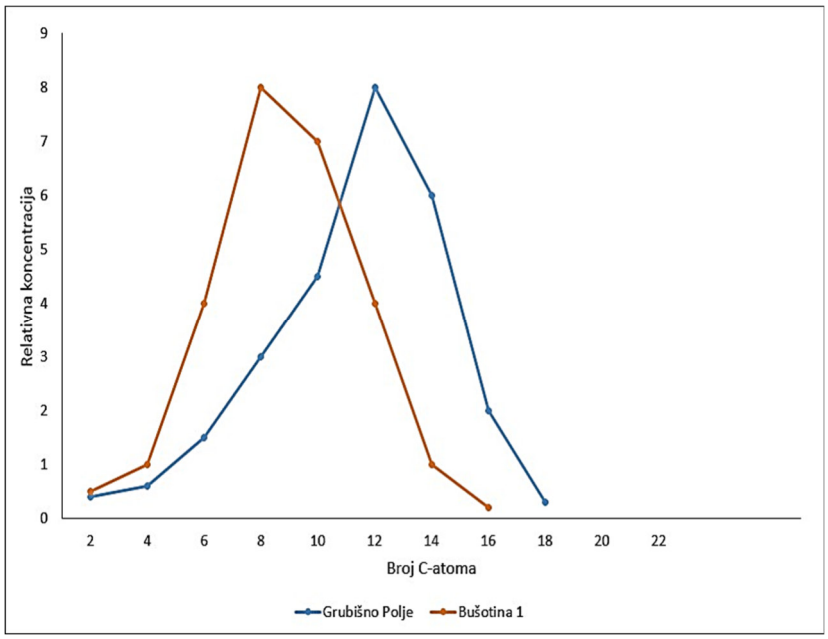
7.1.1 PREGLED GEOKEMIJSKIH ANALIZA ZA BUŠOTINU B-1

U B-1 jezgrovano je 5 jezgri od kojih samo jedna jezgra u intervalu 937 – 943 m unutar analiziranog intervala u Ležištu 1. Ležište 2 nije jezgrovano.

Uzorci krhotina stijena iz isplake u intervalu 600 – 2094 m također su bili geokemijski ispitani. Na temelju svih dostupnih analiza zaključeno je da kalcitni lapori na dubini 1640 – 1700 m, pokazuju izrazito nizak generirajući potencijal iz čega je moguće zaključiti da na području gdje se nalazi B-1 zapravo nema matičnih stijena te da su ugljikovodici sekundarni, migracijskog podrijetla.

Fluidi iz B-1 dobiveni remontnim ispitivanjem u intervalu 928 – 934 m pokazuju visoki stupanj sličnosti s fluidima iz bušotina Grubišnog Polja. Na temelju rezultata plinsko-kromatografskih

ispitivanja nafti-kondenzata i plinova (**Slika 7.1.1.1.**), te ostalih analiza kao što su usporedba gustoće i količine plinova i rezultata izotopnih mjerenja moguće je pretpostaviti slične uvjete pri kojima su generirani i migrirali u ležišne stijene odnosno zaključiti o njihovom istom genetskom podrijetlu. Dobiveni plin čine mješavina biogeno/dijagenetskog i termogenog plina, a po sastavu je jednak plinu iz Grubišnog Polja. Također, manja količina vrlo laganih tekućih ugljikovodika, po svojim molekularnim karakteristikama vrlo je slična ugljikovodicima sa Grubišnog Polja.



Slika 7.1.1.1. Usporedba ugljikovodične raspodjele nafti-kondenzata bušotine B -1 i bušotina Grubišno Polje(preuzeto i modificirano iz Barić, 1997)

Rezultati ispitivanja krhotina stijena iz isplake također kao i stijene zahvaćene jezgrovanjem pokazuju da nemaju svojstva matičnih stijena. Sadržaj organske tvari u ispitivanim uzorcima varira u rasponu od 0,12 do 1.77 % C_{org} i ovisi o litološkim karakteristikama stijena, odnosno o izmjeni nisko i visoko oksidacijskih okoliša.

Radi utvrđivanja plinskih pojava rađena je plinska karotaža duž cijelog kanala bušotine. U **Tablici 7.1.1.1.** prikazane su relativne koncentracije novih plinova u Formaciji Bilogora i Pješčenjacima Pepelana uključujući intervale za intervale Ležišta 1 i Ležišta 2.

Tablica 7.1.1.1. Relativne koncentracije novih plinova unutar bušotine B-1

Dubina (m)	Relativna koncentracija novih plinova (%)	Litostratigrafske jedinice
691	13	Formacija Bilogora
710	32	Bilogorska formacija
758	15	Pješčenjaci Pepelana
768	18	Pješčenjaci Pepelana
779	56	Pješčenjaci Pepelana
842	78	Pješčenjaci Pepelana
1000	7,5	Pješčenjaci Pepelana
1200	2,7	Pješčenjaci Pepelana

Uzorci krhotina iz isplake i mehaničkih jezgara osim topivih ugljikovodika sadrže i bitumene u promjenljivoj koncentraciji. Najveći sadržaj bitumena određen je u jezgri od 937 do 943 m. U dubljim naslagama također su prisutni bitumeni no u poprilično nižim koncentracijama.

7.1.2 PREGLED GEOKEMIJSKIH ANALIZA ZA BUŠOTINU B-2

Bušotina B-2 nije jezgrovana, već su se samo analizirali uzorci krhotina iz isplake u intervalu 1010 – 1100 m. U geokemijskom izvješću Službe laboratorijskih istraživanja INA-Naftaplina (**Barić, 1997**) navedeno je da u ovoj bušotini nisu utvrđene matične stijene. Sedimenti u ispitanom intervalu sadrže organsku tvar terigenog podrijetla djelomično oksidacijski izmijenjenu koja se može klasificirati kao tip kerogena III, no nemaju generirajuće sposobnosti. Usporedbom plinsko-kromatografskih analiza primjećuju se razlike u molekularnoj distribuciji i parametrima između ovih bitumena i bitumena s tragovima nafte bušotine B-1. Obzirom na količine uzoraka bušotine B-2 nisu se mogla provesti detaljna ispitivanja, kao ni korelacija. Na bušotini isto tako nije uzorkovan plin čime je spriječena njegova genetska karakterizacija.

Tijekom bušenja plinskom karotažom registrirane su pojave novog plina duž cijelog kanala bušotine (**Tablica 7.1.2.1.).** Prikazane su pojave novih plinova u Formaciji Bilogora i Pješčenjacima Pepelana uključujući intervale litostratigrafskih ekvivalenata Ležišta 1 i Ležišta 2.

Tablica 7.1.2.1. Relativne koncentracije novih plinova unutar bušotine B-2

Dubina (m)	Relativna koncentracija novih plinova (%)	Litostratigrafske jedinice
861	1,45	Formacija Bilogora
894	1,3	Pješčenjaci Pepelana
998	2,5	Pješčenjaci Pepelana
1015	5,32	Pješčenjaci Pepelana
1034	1,1	Pješčenjaci Pepelana

Tijekom bušenja registrirane su pojave novog plina unutar Pješčenjaka Pepelana. Bušotina B-2 probušila je litostratigrafski ekvivalent Ležišta 1 na dubini 928 – 967 m u debljini od 39 metara, koji je zalaporen i bez pojava ugljikovodika. Litostratigrafski ekvivalent Ležišta 2 probušen je na dubini od 1034 – 1051 m u debljini od 17 m koji je zavodnjen. U krovini je zabilježena pojava novog plina plinskom karotažom, relativne koncentracije 1,1 %.

7.1.3 PREGLED GEOKEMIJSKIH ANALIZA ZA BUŠOTINU B-3

Za bušotinu B- 3 jezgrovani su intervali Ležišta 2, Pješčenjaka Pepelana na dubini 992 – 1001 m, dok Ležište 1 nije jezgrovano. Jezgrovani su još dublji intervali.

Geokemijski su ispitani uzorci krhotina iz isplake bušotine B-3 u intervalu 610 – 1380 m, te uzorci iz dva jezgrovana intervala 992 – 1001 m i 1394 – 1140 m. U geokemijskom izvještaju Službe za laboratorijska ispitivanja navedeno je da u ovoj bušotini nisu utvrđene matične stijene. Također kao i u bušotini B-2 sedimenti duž cijele bušotine nemaju generirajuće sposobnosti i sadrže organsku tvar terigenog podrijetla odnosno djelomice oksidacijski izmijenjen tip kerogena III. Organska tvar je nezrela u dijagenetskom stupnju termičke pretvorbe te pokazuje trend rasta termičke izmjene s dubinom.

Tijekom bušenja plinskom karotažom registrirane su pojave novog plina unutar Formacije Bilogora i Pješčenjaka Pepelana, te je zabilježeno osam pojava novog plina duž cijelog kanala bušotine (**Tablica 7.1.3.1.**).

Tablica 7.1.3.1. Relativne koncentracije novih plinova unutar bušotine B-3

Dubina (m)	Relativna koncentracija novih plinova (%)	Litostratigrafske jedinice
869	1,4	Formacija Bilogora
987	6,95	Pješčenjaci Pepelana
1003	3	Pješčenjaci Pepelana
1020	5,5	Pješčenjaci Pepelana
1118	1,18	pješčenjaci Pepelana

Bušotina B-3 probušila je litostratigrafski ekvivalent Ležišta 1 na dubini od 888 – 919 m u debljini od 31 m koji je zaglinjen i bez pojava ugljikovodika.

Litostratigrafski ekvivalent Ležišta 2 probušen je na dubini od 987 – 999 m u debljini od 12 m. U krovini ležišta registrirana je pojava novog plina plinskom karotažom relativne koncentracije 6,95 %.

7.2 PREGLED DOSADAŠNJIH LABORATORIJSKIH PETROGRAFSKIH, SEDIMENTOLOŠKIH I BIOSTRATIGRAFSKIH ANALIZA

7.2.1 PREGLED ANALIZA ZA BUŠOTINU B-1

Na bušotini B-1 napravljene su detaljne analize stijena. Napravljene su petrografsko-sedimentološke i paleontološke analize stijena iz 5 jezgrovanih intervala i krhotina stijena iz isplake u intervalu od 800-2100 m.

Sve analize rađene su u tadašnjoj Službi laboratorijskih istraživanja, odjel za geologiju i geokemiju (**Raškaj 1997, Vlahović 1997, Krizmanić, 1997**). Obzirom da je napravljen vrlo veliki broj analiza, naknadne obrade više nisu rađene. Analize su rađene prije dvadeset i više godina. U ovom radu prikazani su samo intervali područja analiziranih ležišta (**Slika 6.7.2**.).

Biostratigrafska analiza:

Interval 1445 – 800 m (obuhvaća oba ležišta)

Abichi slojevi - sedimenti karakteristični za pont sastoje se od pjeskovitih lapora i pijesaka koji sadrže slatkovodnu makrofaunu, krhotine školjke *Paradacna abichi*, *Cyprina* sp. i mikrofaunu *Silicoplacentina hungarica*, te rijetke ostrakode i biljno trunje.U ovom intervalu napravljene su dvije palinološke analize.

Relikti višeg bilja, lignohuminski klasti kerogena su većinom veliki i smećkaste boje s vidljivom strukturom drveta, a ima ih i crnih, neprozirnih i potpuno oksidiranih, te su relativno

veliki. Svi macerali su snažno biodegradirani pa tako i fosili te to reducira broj odredivih taksona.

Neke od determiniranih palinomorfa koje su: *Operculodinium centrocarpum* (Deflandre & Cookson) Wall, *Impagidinium globosum* Sűtő-Szentai, *Achomosphaera* sp., *Spiniferites balcanica* (Baltes) Sűtő-Szentai, *Spirogyra* sp. (tip 1) Van Geel & Van der Hammen, te *Dinoflagellata* gen. Et. Sp. Indet. Zatim nađene su fosilne spore gljiva, gornjomiocenske spore i pelud među kojima su najčešća zrna peluda rodova *Bissacites, Saccites* i *Porates.*

Petrografske značajke uzoraka stijena iz odabranog intervala 937 – 943 m (interval između litostratigrafskog ekvivalenta oba ležišta):

Ovaj interval čine siltiti, lapori, filoareniti i sublitoareniti:

Siltiti se sastoje od kvarca i sitnolističavog muskovita – sericita u kalcitnom cementu i glinovito-karbonatnom matriksu. Mogu se primijetiti i rijetka zrna feldspata, kloritiziranog biotita i glaukonita. Veličina zrna kreće se u rasponu od sitnog i krupnog praha do vrlo sitnog pijeska te zatim prelaze u sitnozrnate pješčenjake bogate tinjcima – filoarenite.

Lapori su izgrađeni od kriptokristaliničnog karbonatno-glinovitog mulja i promjenjive količine silta.

Sublitoareniti su predstavljeni kao sitnozrnati, laminirani pješčenjaci koji se sastoje od uglatih slabozaobljenih zrna kvarca i tinjaca i fragmenata stijena kao što su karbonati i metamorfiti. Laminacija je izazvana paralelnim slaganjem listićavih minerala – muskovita, biotita i kloritiziranog biotita. Pješčenjak je cementiran kalcitom i ponegdje mlađim ferokalcitom.

7.2.2 PREGLED ANALIZA ZA BUŠOTINU 2

Bušotina B-2 nema jezgrovanih intervala već su analizirani samo uzorci krhotina iz isplake. Analize i interpretacija su napravljeni u tadašnjoj Službi istraživanja i laboratorijskih ispitivanja, laboratoriju za ispitivanje stijena i ležišnih fluida (**Raškaj 2001, Vlahović, 2001**). Detaljno su napravljene petrografsko-sedimentološke i paleontološke analize krhotina stijena iz isplake unutar bušotinskog intervala od 600-1100 m dubine. No zbog nemogućnosti izdvajanja litofacijesnih jedinica samo na osnovi rezultata analiza krhotina iz isplake, načinjena je korelacija petrografskih podataka i EK- dijagrama s podacima iz bušotine 3.

U analiziranom intervalu od 600-1100 m probušeni su klastični i pelitni nevezani do slabo vezani sedimenti (**Slika 6.7.2**.). Usporedbom ovih dviju bušotina, bušotina-2 zaliježe dublje otprilike 50-tak metara u odnosu na bušotinu 3.

Biostratigrafska analiza :

Interval 1100-850 m (obuhvaća litostratigrafski ekvivalent oba ležišta):

Određen je kao *Abichi* slojevi. Određena je slatkovodna do brakična fauna *Paradacna* sp., krhotine školjkaša i ostrakoda, *Silicoplacentina hungarica* (Kővary), *S. irregularis* (Kővary) i biljno trunje.

Petrografske značajke uzoraka stijena iz odabranog intervala 940 – 1040 m (obuhvaća litostratigrafski ekvivalent oba ležišta):

Ovaj interval se sastoji od krupnozrnatih siltita i sitno do srednjezrnatih sublitoarenita/litoarenita i lapora.

7.2.3 PREGLED ANALIZA ZA BUŠOTINU B-3

Na bušotini B-3 napravljene su brojne petrografsko-sedimentološke i paleontološke analize stijena unutar intervala dubine od 600 do 1400 metara (**Raškaj, 2001, Vlahović, 2001)**. Interval od 700 do 900 m nije bio petrografski obrađen obzirom da nije bilo u mogućnosti izraditi preparate jer u spomenutom intervalu prevladavaju muljeviti, pelitni i nevezani sedimenti. U izvještajima službe za laboratorijska ispitivanja navedeno je da su korišteni rezultati kemijskih, SEM i granulometrijskih analiza. Granice litofacijesnih jedinica su izdvojene prema analizama krhotina stijena iz isplake i elektro-karotažnih dijagrama, a genetska obilježja izdvojenih litofacijesa se temelje na sedimentološkim analizama stijena iz jezgri (**Slika 6.7.2**.).

Biostratigrafska analiza **:**

Interval 1100 – 850 m (obuhvaća litostratigrafski ekvivalent oba ležišta):

Određen je kao *Abichi* slojevi. Utvrđena je slatkovodna do brakična fauna *Paradacna abichi, Congeria* sp., rijetki ostrakodi te riblji zubi i biljno trunje.

Petrografske značajke uzoraka stijena iz odabranog intervala 920 – 980 m (obuhvaća područje između litostratigrafskih ekvivalenata oba ležišta)**:**

Ovaj interval se sastoji od siltita do sitnozrnatih sublitoarenita, ugljena i organskih ostataka.

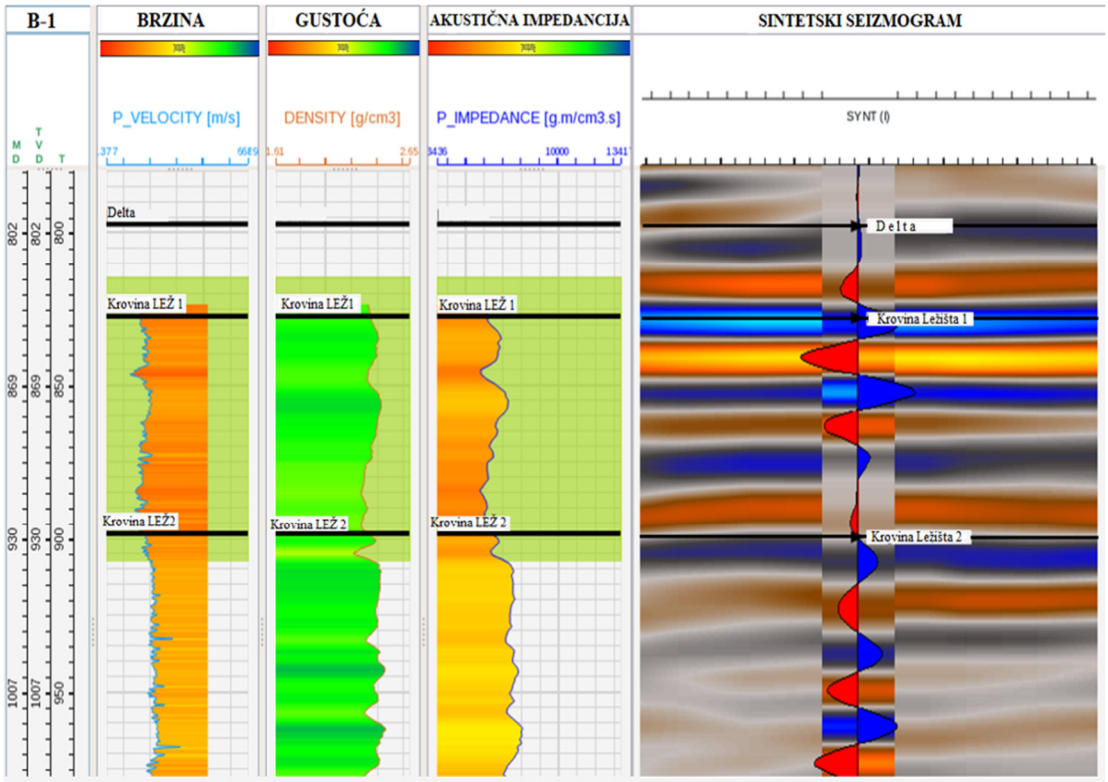
8. REZULTATI

8.1 SEIZMIČKA INTERPRETACIJA

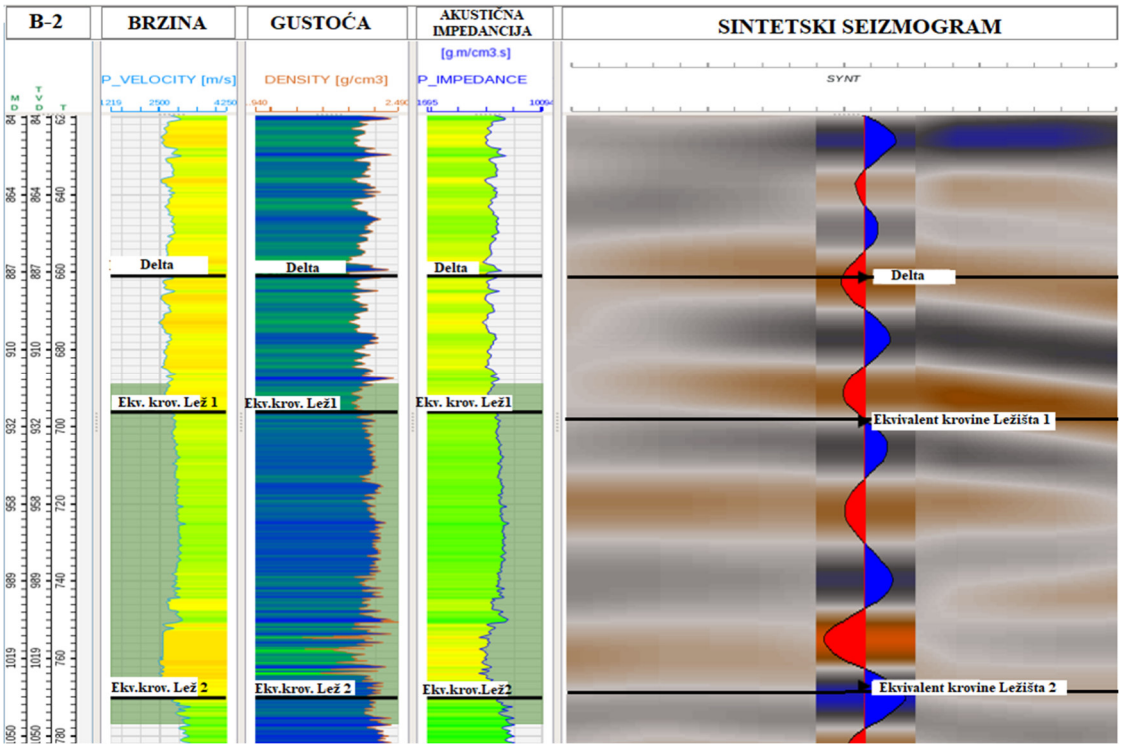
Osnovni cilj seizmičke interpretacije je raspoznati glavne strukturno-tektonske elemente, interpretirati horizonte koji su u korelaciji s ležištima na eksploatacijskom polju Bačkovica te opisati eventualna potencijalna područja mogućeg zasićenja ugljikovodicima. Ponovno obrađeni 3D seizmički podaci su rezolutni i dovoljno kvalitetni za uočavanje direktnih indikatora zasićenja ugljikovodicima (DHI) kao i za analize seizmičkih atributa, AVO analize i seizmičke inverzije.

8.1.1 IZRADA SINTETSKOG SEIZMOGRAMA

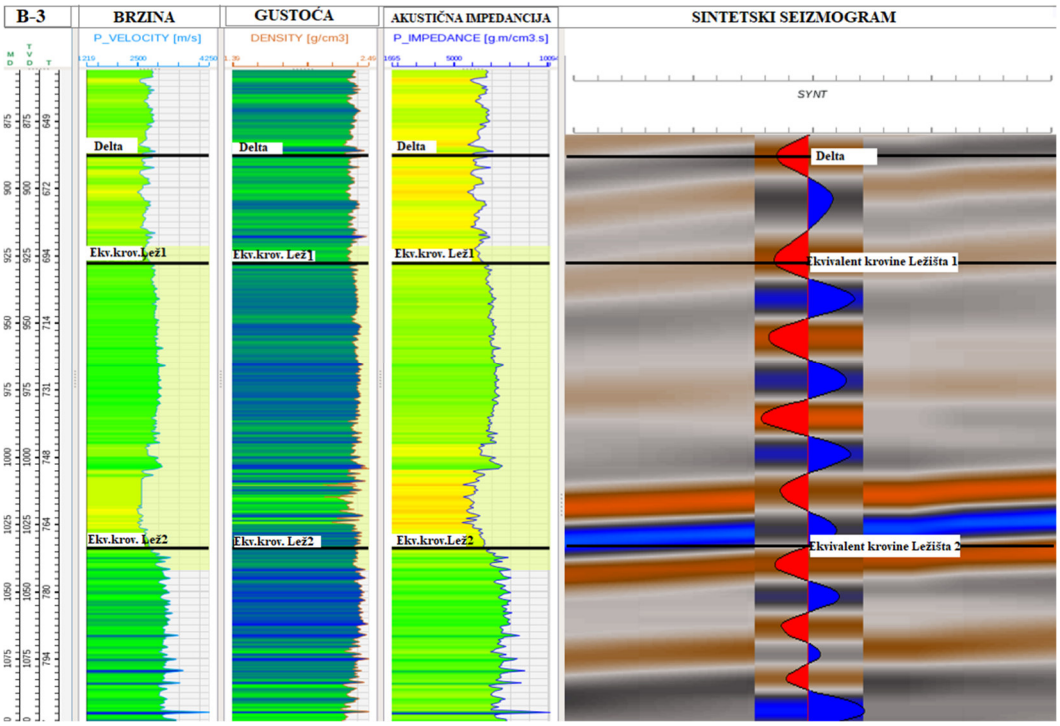
Kalibracija bušotinskih i seizmičkih podataka napravljena je na temelju izrađenih sintetskih seizmograma za bušotine B-1, B-2 i B-3 mjerenim zakonima brzina za bušotine B-1 i B-3. Zakoni su primijenjeni na sve bušotine te su korelacijom s definiranim dubinama zalijeganja pojedinih regionalnih markera pozicionirani horizonti koji su interpretirani. Sintetski seizmogram izrađeni su na osnovi karotažnih krivulja mjerenja prolaznog vremena (AC – *Sonic*), krivulje gustoće (DEN – *Density*), zakona brzina (VSP – *Vertical Seismic Profiling*) i valića. Razlika akustičkih impedancija uzrokovana je padom ili porastom brzina uslijed razlika akustičkih svojstava stijena. Dobiven sintetski seizmogram korelira se sa seizmičkim tragom. Slaganje sa seizmičkim podatcima je relativno dobre kvalitete. Sintetski seizmogrami su napravljeni kako bi se detektirala veza vremena i dubine (**Slika 8.1.1.1., Slika 8.1.1.2. i Slika 8.1.1.3**). TVD (*True vertical depth*) je u naftnoj industriji izraz za pravu vertikalnu dubinu mjerenu od površine do dna bušotine. TWT označava dvostruko vrijeme koje je proteklo od kada je val emitiran od izvora do određenog reflektora u podzemlju i natrag do prijemnika na površini Zemlje.



Slika 8.1.1.1.: Sintetski seizmogram za bušotinu B-1



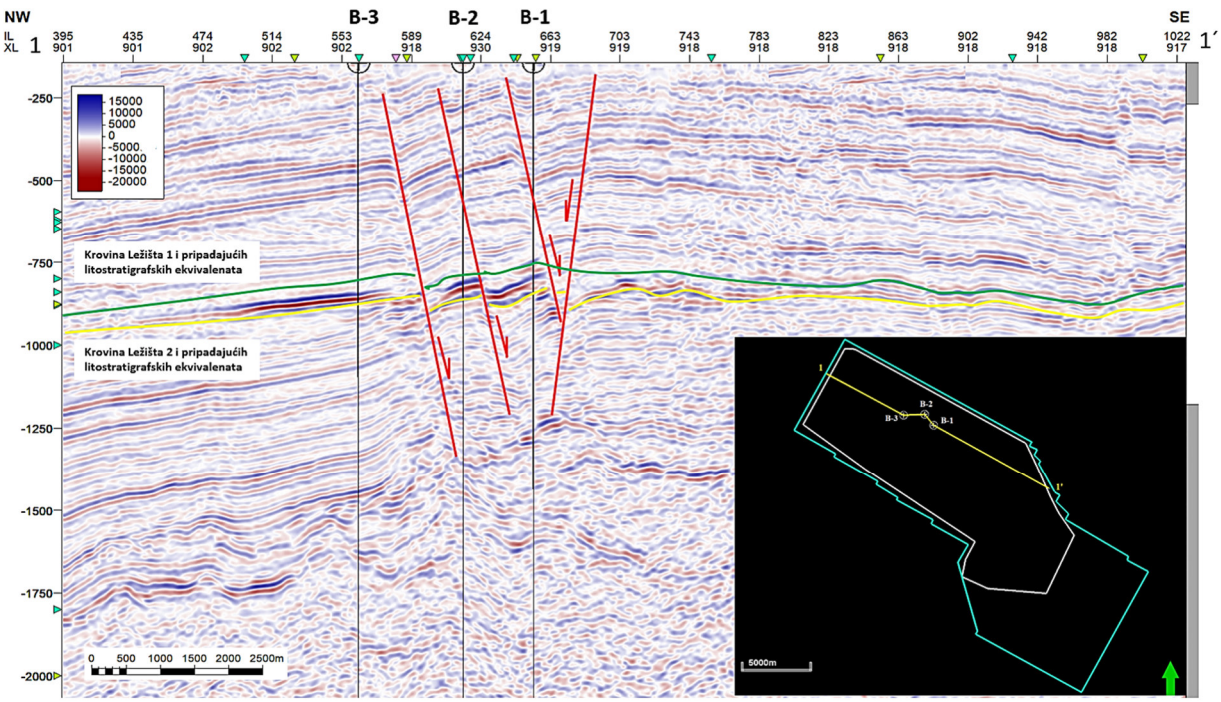
Slika 8.1.1.2.: Sintetski seizmogram za bušotinu B-2



Slika 8.1.1.3.: Sintetski seizmogram za bušotinu B-3

8.1.2 INTERPRETACIJA HORIZONATA

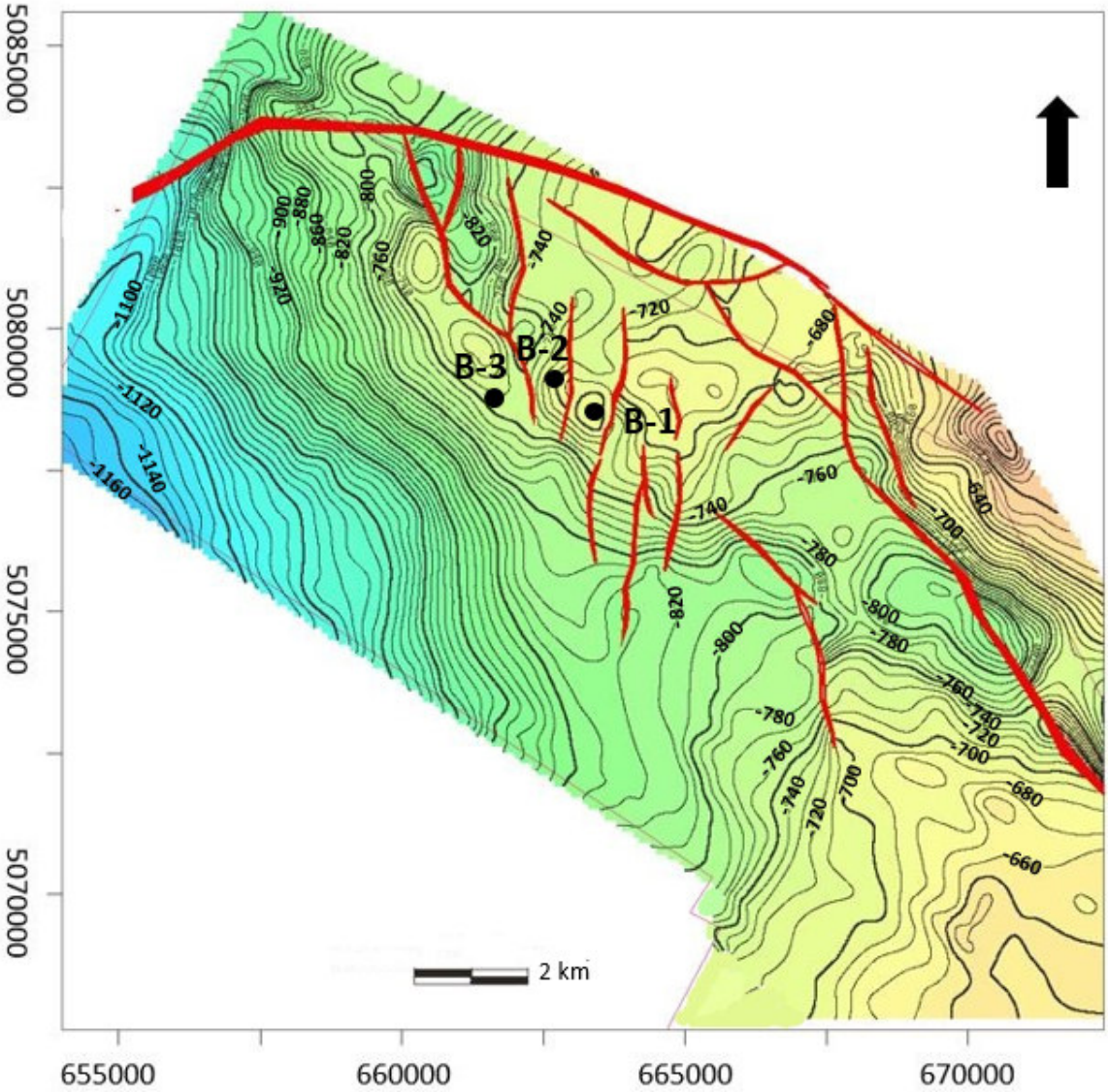
Na temelju izrađene kalibracije seizmike i bušotinskih podataka pozicionirani su i ponovno interpretirani seizmički horizonti krovine pješčenjaka Ležišta 1 i krovine pješčenjaka Ležišta 2 (**Slika 8.1.2.1**). Ti su horizonti detaljno analizirani AVO i atributnim analizama kao i seizmičkim inverzijama te neuronskim mrežama.



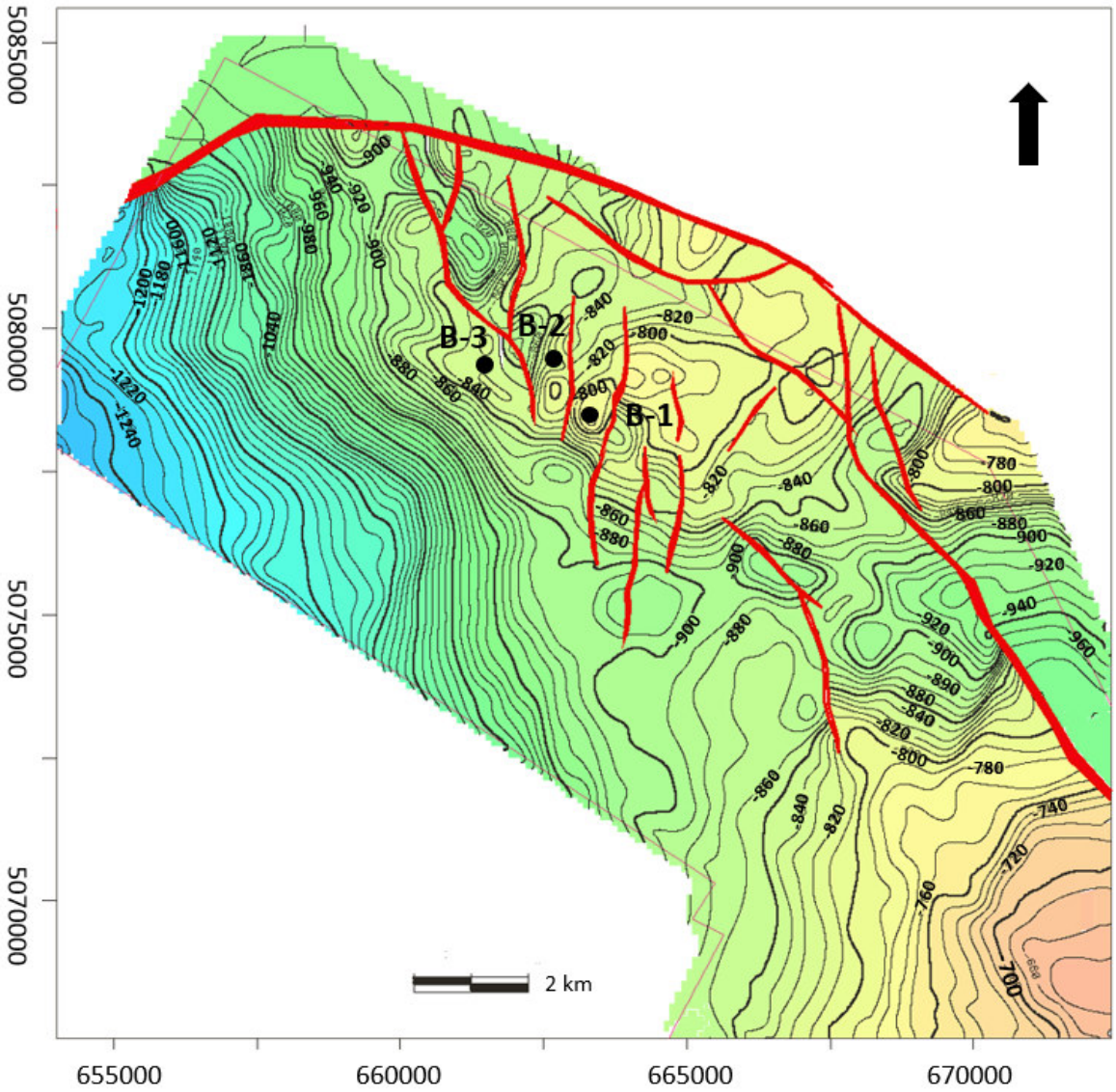
Slika 8.1.2.1.: Seizmički profil 1 - 1' kroz bušotinu B-1 s interpretiranim horizontima krovine Ležišta 1 i Ležišta 2 i pripadajućim litostratigrafskim ekvivalentima

8.1.3 STRUKTURNE KARTE

Strukturna interpretacija napravljena je na osnovu 3D seizmičke interpretacije i kalibracije s bušotinskim podacima i preuzeta je iz dosadašnjih interpretacija (Studija seizmičkih atributa, 2020, tehnička dokumentacija INA-e). Prema modelu brzina napravljene su dubinske strukturne karte po krovini Ležišta1 i Ležišta 2 (**Slika 8.1.3.1., 8.1.3.2**.) koje ukazuju na postojanje izdužene brahiantiklinale čija os ima pružanje sjeverozapad-jugoistok, a razlomljena je poprečnim normalnim rasjedima. Svi rasjedi su pružanja sjever-jug. Normalni rasjed zapadno od bušotine B-1 prikazuje moguću barijeru migraciji ugljikovodika, a istočni je najvjerojatnije barijera. Slojevi na krilima antiklinale postupno tonu, dok slojevi na jugozapadnom krilu tonu strmo u dublji dio Bjelovarske subdepresije.



Slika 8.1.3.1.: Strukturna karta po krovini Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata (Tehnička dokumentacija INA d.d)



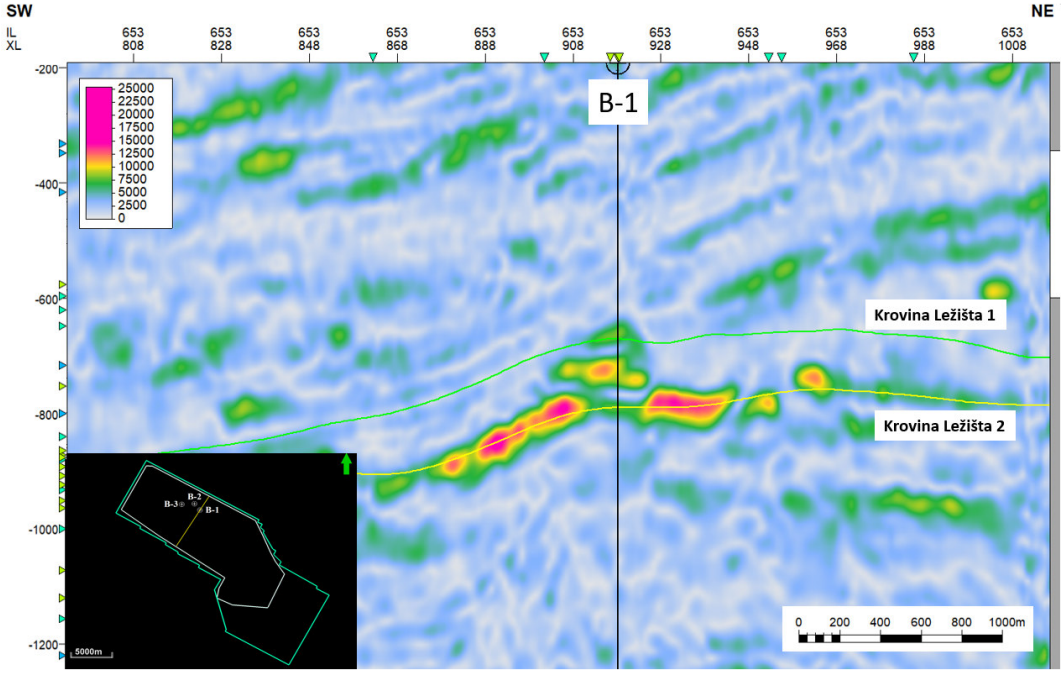
Slika 8.1.3.2. Strukturna karta po krovini Ležišta 2 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata (Tehnička dokumentacija INA d.d)

8.2 ANALIZE SEIZMIČKIH ATRIBUTA

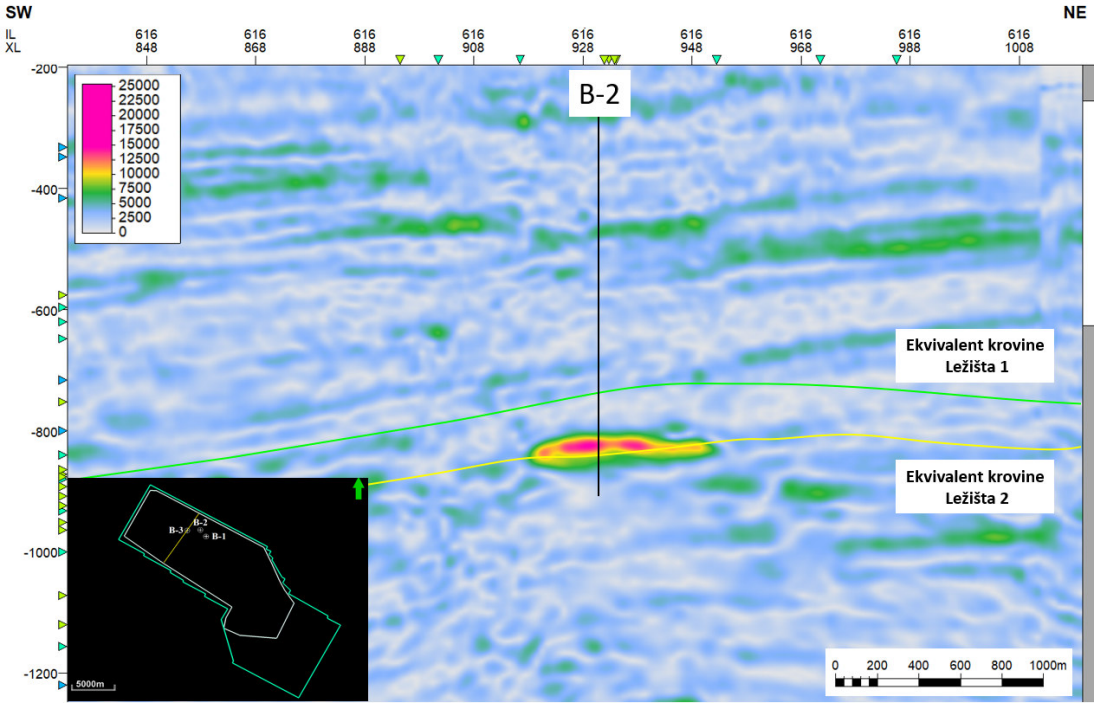
U ovom poglavlju opisuju se rezultati dobiveni analizom seizmičkih atributa, od jednostavnijih do složenih. Prikazani su atributi kompleksnog seizmičkog traga koji uključuju trenutnu amplitudu i frekvenciju, geometrijski atribut koherentnosti *Similarity*, te kombinirani atributi *Sweetness* i spektralna dekompozicija kao i njihova interpretacija.

8.2.1 ATRIBUT TRENUTNE AMPLITUDE

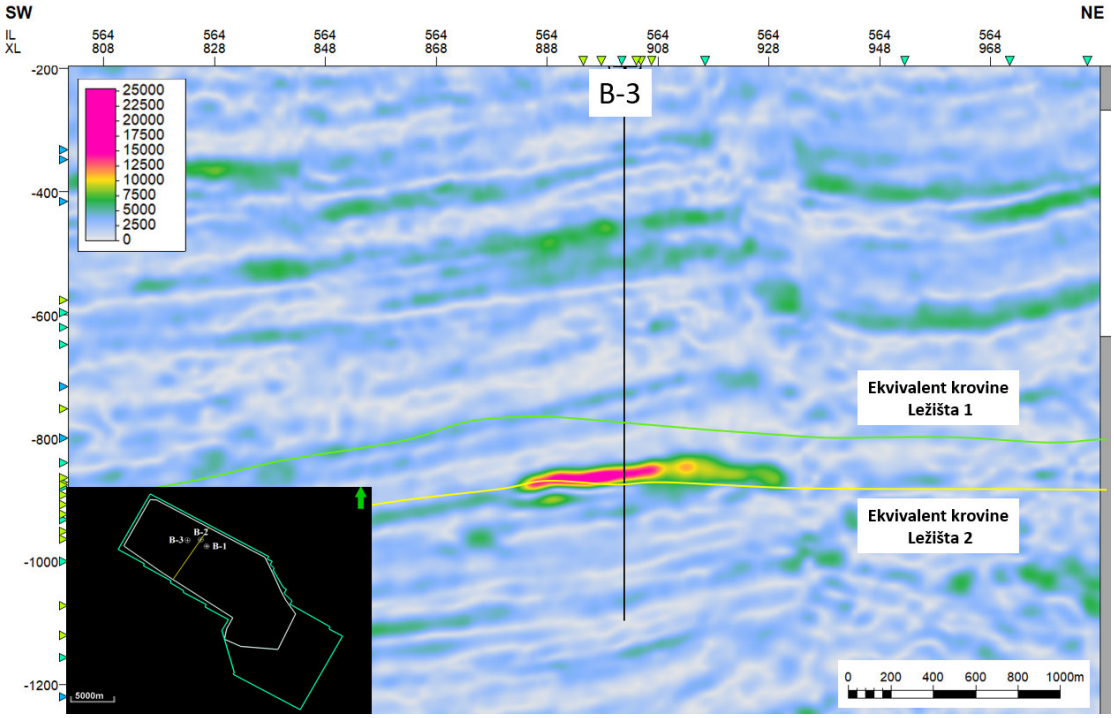
Najčešće se povezuje s litološkim i ležišnim značajkama kao što su litološki kontinuiteti i zasićenje plinom, jer pomaže kod prepoznavanja amplitudnih anomalija odnosno prikazuje razlike u akustičnim impedancijama (**Slika 8.2.1.1., Slika 8.2.1.2. i Slika 8.2.1.3**.)
Atribut trenutne amplitude pokazuje na sve tri bušotine u zoni oba ležišta izrazito povećanje amplitude, odnosno već i na klasičnim seizmičkim podacima vidljiv je tzv. *Bright spot* koji nam ukazuje na ulazak iz viših u zone znatno nižih akustičnih impedancija. Plin sam po sebi ima manju gustoću, te se brzine smanjuju, te taj podatak kod interpretacije može ukazivati na eventualno zasićenje. No također, to može ukazivati i na litološke promjene jer lapori ili šejlovi zbog manje gustoće i veće poroznosti također imaju niže akustične impedancije.



Slika 8.2.1.1.: Atribut trenutne amplitude – profil kroz bušotinu B-1(žuta i ružičasta boja prikazuju područja visokih amplituda koja mogu ukazivati na zasićenje ugljikovodicima, ali i na litološke promjene)



Slika 8.2.1.2.: Atribut trenutne amplitude – profil kroz bušotinu B-2 (žuta i ružičasta boja prikazuju područja visokih amplituda koja mogu ukazivati na zasićenje ugljikovodicima, ali i na litološke promjene)



Slika 8.2.1.3. Atribut trenutne amplitude – profil kroz bušotinu B-3(žuta i ružičasta boja prikazuju područja visokih amplituda koja mogu ukazivati na zasićenje ugljikovodicima, ali i na litološke promjene)

Na seizmičkim podacima atributa trenutne amplitude unesene su dubine pojava novih plinova na sve tri bušotine te su konvertirane u vrijeme. Tablica 8.2.1.1. prikazuje vrijednosti amplituda na vremenima pojavljivanja novih plinova (NP) gdje oznake 1 i 2 označavaju krovine Ležišta 1 i Ležišta 2 i njihovih litostratigrafskih ekvivalenata. Na pozitivnoj bušotini B-1 na nivou oba ležišta vidljive su izrazito visoke amplitude, većih vrijednosti u odnosu na druge dvije bušotine. Bez obzira na pojave novih plinova u manjim postocima, viši postoci novih plinova ipak ukazuju na više amplitude.

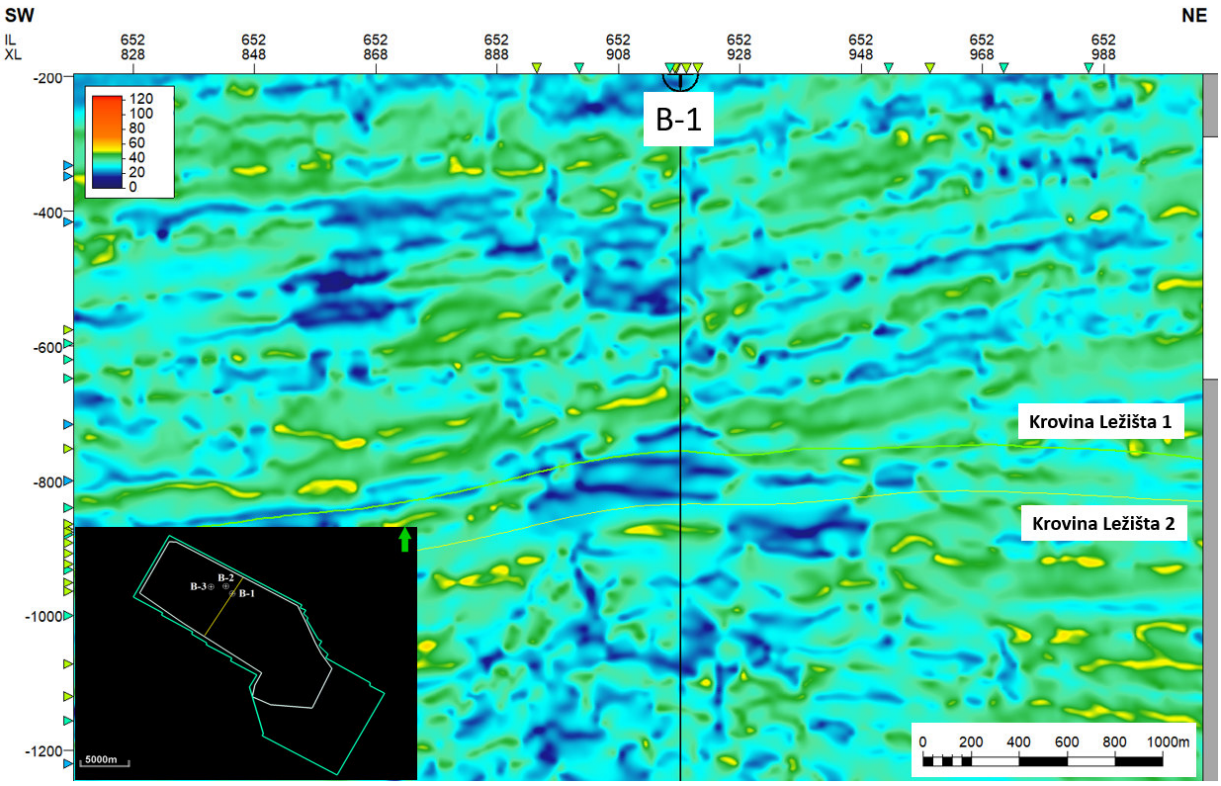
Tablica 8.2.1.1. Usporedne vrijednosti očitanih amplituda i pojava novih plinova (NP) (oznake 1 i 2 označavaju krovine Ležišta 1 i Ležišta 2 i njihovih litostratigrafskih ekvivalenata)

B-1			**B-2**			**B-3**		
Vrijeme (ms)	Očitana Amplituda	NP (%)	Vrijeme (ms)	Očitana Amplituda	NP (%)	Vrijeme (ms)	Očitana Amplituda	NP (%)
400	5034	0	400	4356	0	400	4087	0
691	6578	13	744	12376	1.45	781 **1**	10231	1,4
710	7213	32	770 **1**	4578	0	820	5476	0
758 **1**	22070	15	814	17303	2,5	853 **2**	18694	6,95
768	24468	18	837	15987	5,32	863	17953	3
779	23567	56	850 **2**	14983	1,1	873	16324	5,5
842 **2**	24728	78	900	3563	0	936	9253	1,18
1000	17893	7,5	1500	2877	0	955	9074	1,07
1300	16543	2,7	2000	3524	0	1000	9968	1,34

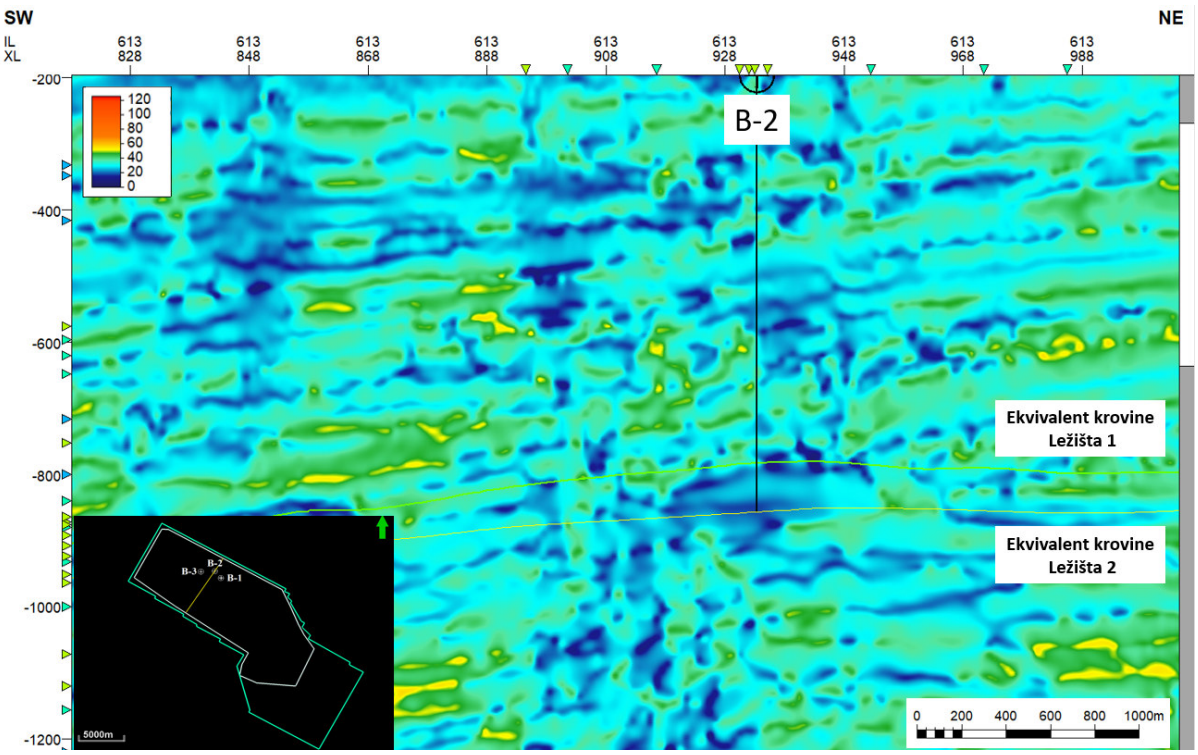
8.2.2 ATRIBUT TRENUTNE FREKVENCIJE

Atribut trenutne frekvencije u nekim slučajevima može biti indikator zasićenja ugljikovodicima koji pokazuje anomaliju takozvanih niskih frekvencija. Taj efekt se ponekad pojavljuje u nekonsolidiranim pijescima zbog sadržaja ugljikovodika u porama. Također razlomljene zone, područja isklinjenja, te dodir vode i ugljikovodika uzrokuje niskofrekvencijsku sjenu koja ukazuje na oštre promjene trenutnih frekvencija. **Slike 8.2.2.1., 8.2.2.2., i 8.2.2.3.** prikazuju atribut trenutne frekvencije na seizmičkim profilima kroz sve tri

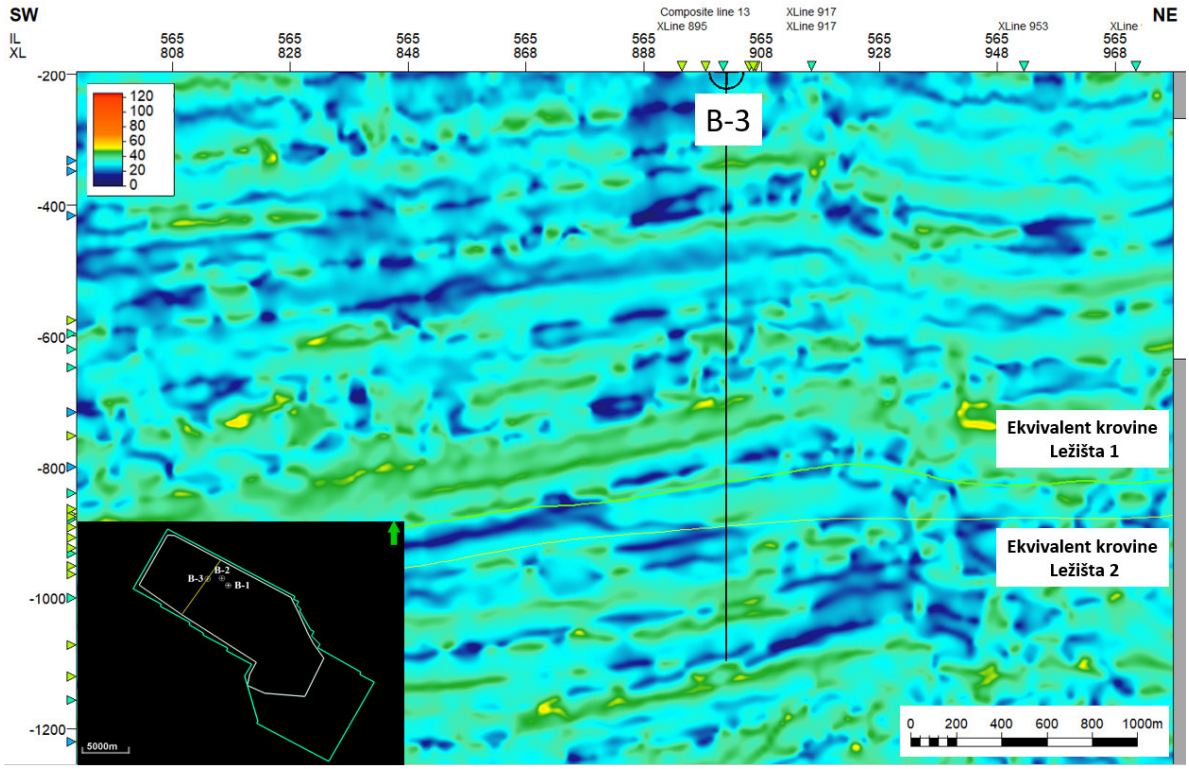
bušotine. Zona između oba ležišta (ili njihovih ekvivalenata) u bušotinama B-1 i B-2 nalazi se u području niskih frekvencija. U bušotini B-3 ulazak u litostratigrafski ekvivalent Ležišta 1 okarakteriziran je vrijednostima nižih frekvencija, dok su frekvencije veće duž krovine Pepelana pješčenjaka odnosno ekvivalenta Ležištu 2.



Slika 8.2.2.1: Atribut trenutne frekvencije – profil kroz bušotinu B-1(plava boja prikazuje područja niskih frekvencija koja mogu ukazivati na razlomljene zone ili niskofrekvencijsku sjenu)



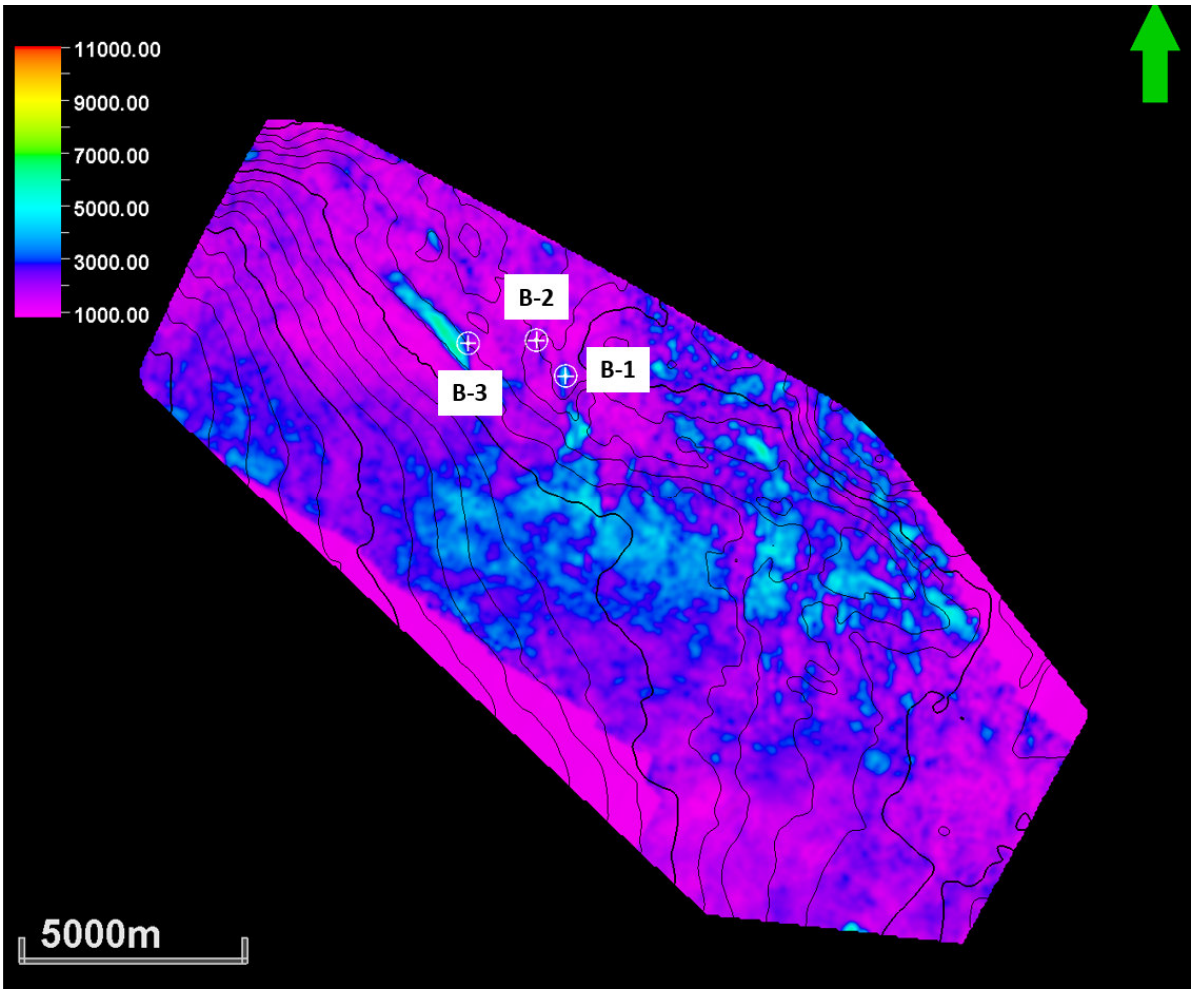
Slika 8.2.2.2: Atribut trenutne frekvencije – profil kroz bušotinu B-2(plava boja prikazuje područja niskih frekvencija koja mogu ukazivati na razlomljene zone ili ili niskofrekvencijsku sjenu)



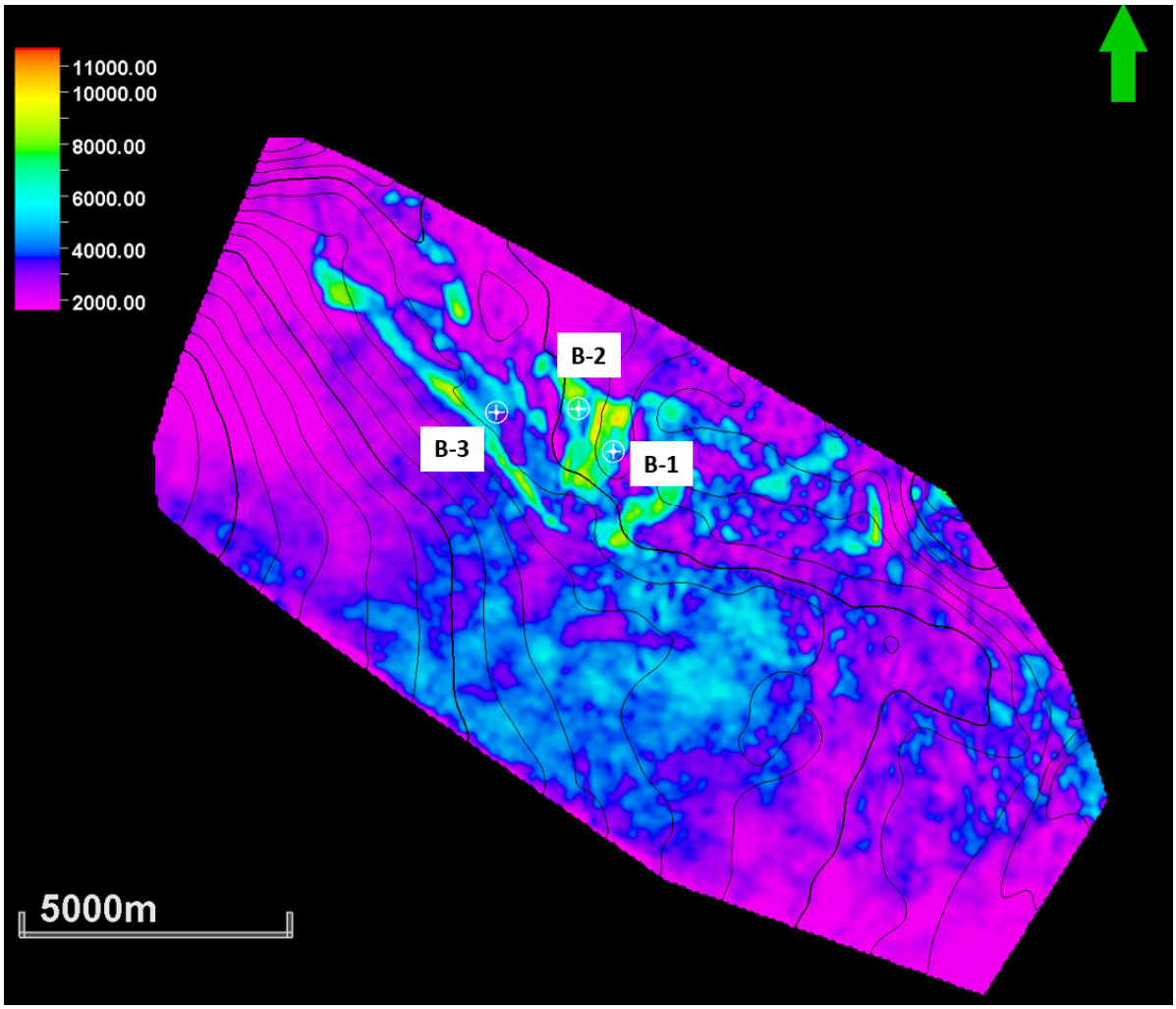
Slika 8.2.2.3: Atribut trenutne frekvencije – profil kroz bušotinu B-3(plava boja prikazuje područja niskih frekvencija koja mogu ukazivati na razlomljene zone ili ili niskofrekvencijsku sjenu)

8.2.3 ATRIBUT RMS AMPLITUDE

Također je ekstrahirana RMS amplituda duž horizonata krovine oba ležišta na seizmičkom volumenu na kojem nisu primijenjena nikakva filtriranja te je zadržan relativan odnos amplitude. Budući da RMS amplituda prikazuje ekstremne vrijednosti ovaj atribut nam ponekad ukazuje na bolja rezervoarska svojstva premda se treba korelirati s ostalim metodama jer nam sama po sebi ne može ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima. Na **slici 8.2.3.1.** je prikazana RMS amplituda duž krovine Ležišta 1 gdje su uočljive povišene vrijednosti samo uokolo pozitivne bušotine B-1, dok se duž krovine Ležišta 2 odnosno njegovih litostratigrafskih ekvivalenata (**Slika 8.2.3.2**.) sve tri bušotine nalaze u zonama povišenih vrijednosti.



Slika 8.2.3.1.: RMS amplituda po krovini Ležišta 1 odnosno njegovih litostratigrafskih ekvivalenata (povišene vrijednosti u svijetlo plavoj i zelenoj boji ukazuju na područja boljih rezervoarskih svojstava)

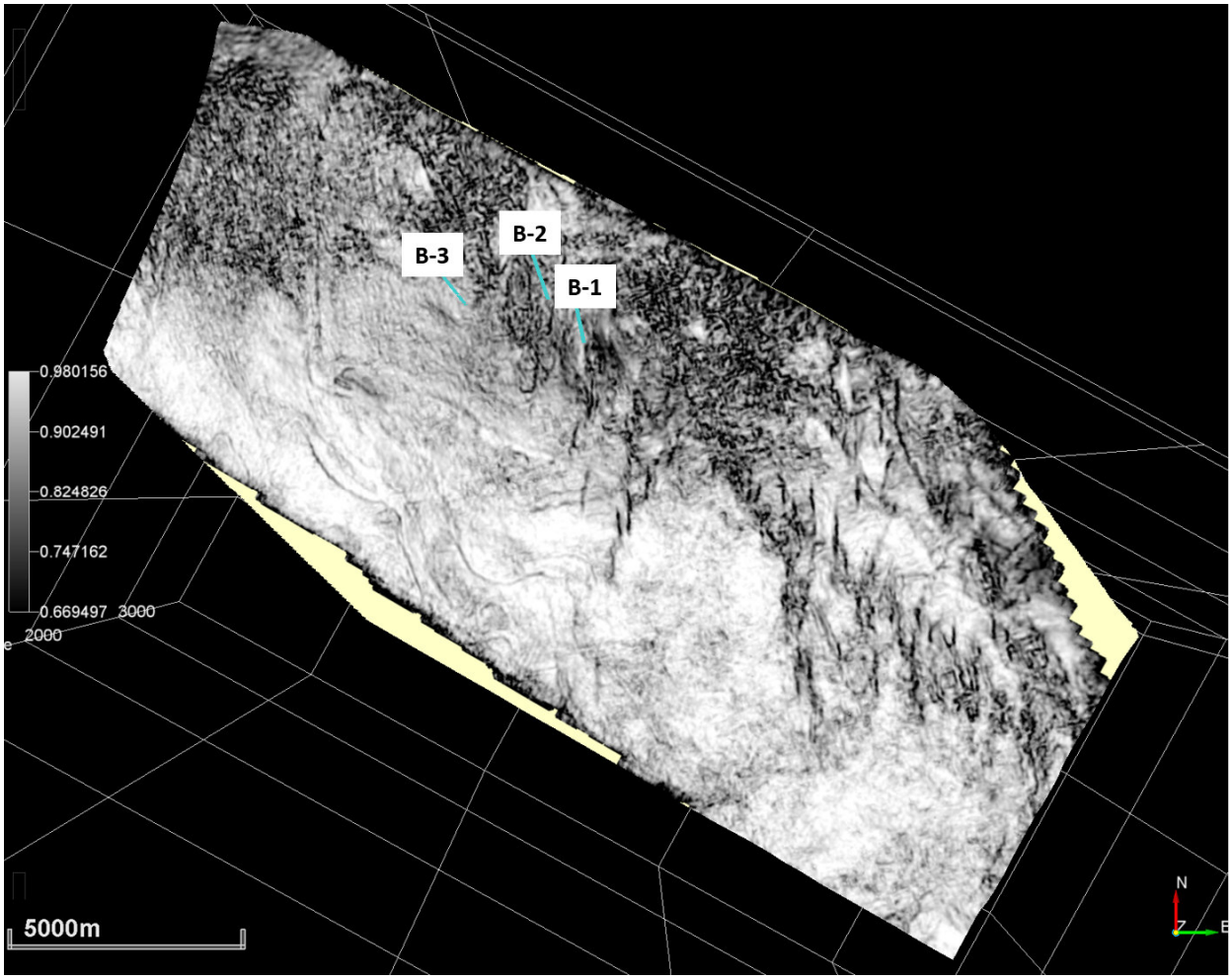


Slika 8.2.3.2.: RMS amplituda po krovini Ležišta 2 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata (povišene vrijednosti u zelenoj, žutoj i narančastoj boji ukazuju na područja boljih rezervoarskih svojstava)

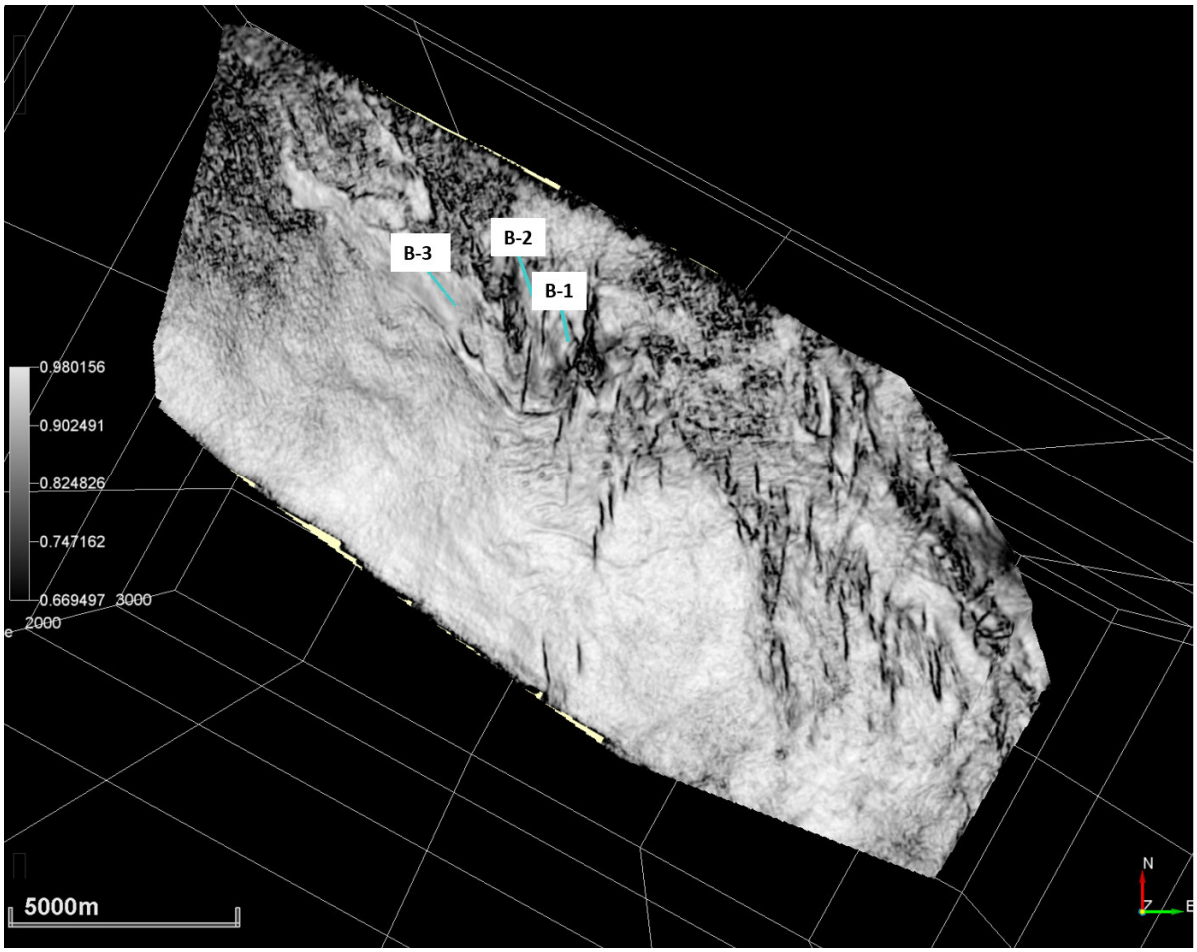
8.2.4 ATRIBUT KOHERENCIJE ILI SLIČNOSTI

Atribut koherencije je prikazan kao atribut horizonta. Na seizmičkim podacima prvo je izračunat volumen atributa koherencije te je nakon toga ekstrahiran duž horizonata krovine oba ležišta i njihovih ekvivalenata na negativnim bušotinama. Visoka razina sličnosti prikazuje nam značajke kao što su kanali, a niska razina razlomljene zone i rasjede. Uzduž krovine Ležišta 1 vidljivo je tijelo koje se proteže od sjeverozapada prema jugoistoku i koje bi se moglo interpretirati kao kanal, a probušila ga je bušotina B-3. Bušotine B-1 i B-2 nalaze se u razlomljenoj, kaotičnoj zoni premda se nazire tijelo nepravilnog oblika koje je probušila bušotina 1. Rasjednute zone vidljive su jugoistočno od bušotine B-1. Na **slici 8.2.4.1.** prikazan je atribut koherencije.

Na atributu koherencije duž krovine Ležišta 2 također se nazire kanal s pretpostavljenim donosom materijala SZ-JI (**Slika 8.2.4.2.**).



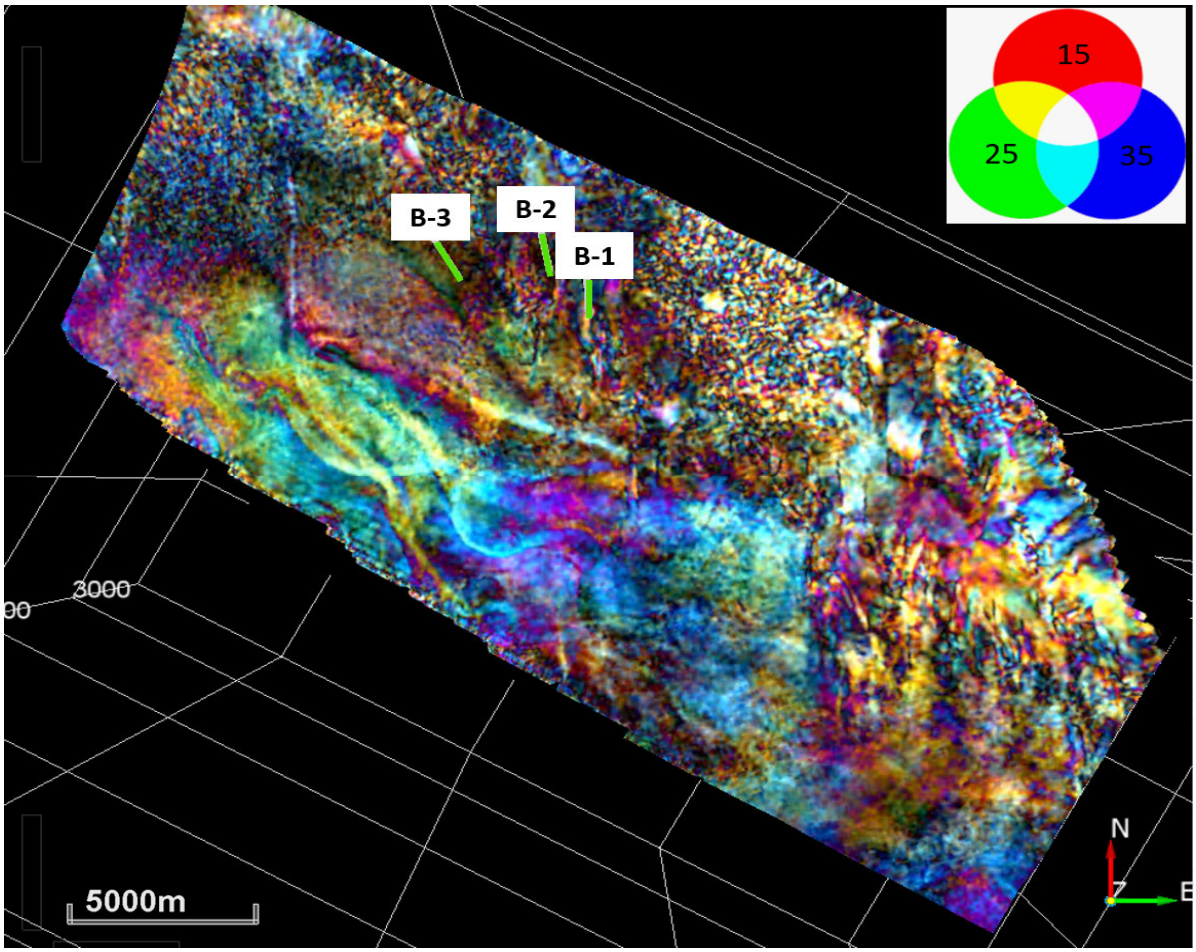
Slika 8.2.4.1.: Atribut koherencije po horizontu krovine Ležišta 1 i njihovih ekvivalenata (Visoka razina sličnosti u bijeloj i sivoj boji prikazuje značajke kao što su kanali, a niska razina u tamnim nijansama sive i crnoj boji razlomljene zone i rasjede).



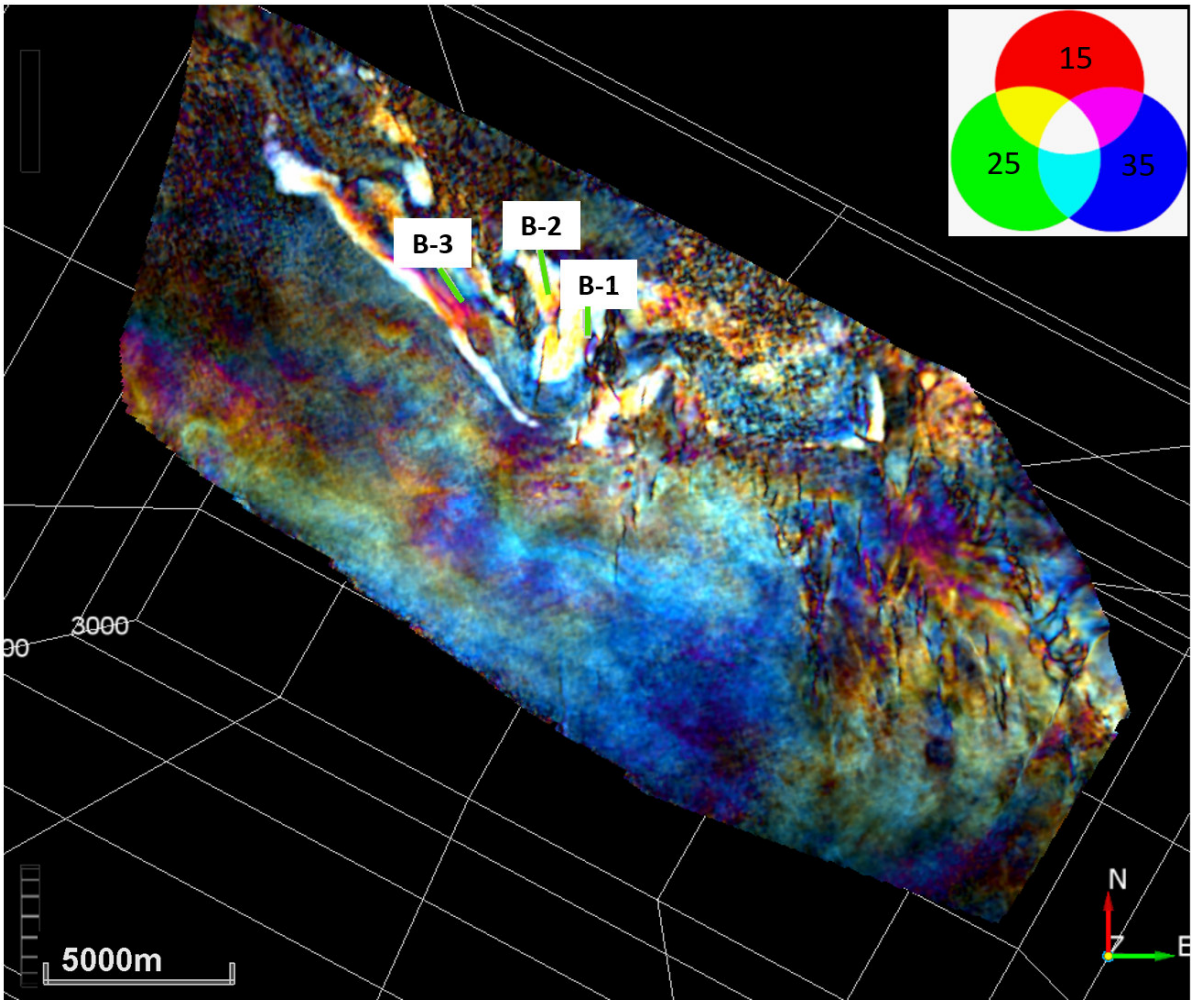
Slika 8.2.4.2.: Atribut koherencije po horizontu krovine Ležišta 2 i njihovih ekvivalenata (Visoka razina sličnosti u bijeloj i sivoj boji prikazuje značajke kao što su kanali, a niska razina u tamnim nijansama sive i crnoj boji razlomljene zone i rasjede).

8.2.5 SPEKTRALNA DEKOMPOZICIJA

Kombinirani atribut spektralne dekompozicije često se koristi u naftnoj industriji gdje se zajedno s atributom koherencije, distribucijski kanali mogu lakše identificirati i interpretirati. Koherencija osvjetljava rubove kanala dok spektralna dekompozicija prikazuje debljinu kanala. Po horizontu krovine Ležišta 1 vidljivo je da se bušotina B-1 nalazi u zoni spektralne komponente s bijelim svijetlim odzivima (**Slika 8.3.5.1.).** Južno od sve tri bušotine vidljiv je splet meandrirajućih kanala koji na dnu vjerojatno tvore lepezasto tijelo. Cijelo područje moglo bi biti interesantno što se tiče zasićenja ugljikovodicima, te će biti analizirano na osnovi drugih analiza i metoda. Duž krovine Ležišta 2 vidljiva su tijela bijele boje u zonama preklapanja frekvencijskih raspona, te se sve tri bušotine nalaze u tim zonama (**Slika 8.3.5.2.**).



Slika 8.3.5.1.: Spektralna dekompozicija po horizontu krovine Ležišta 1 (preklapanja boja prikazana su kao najniži frekvencijski raspon u seizmičkom skupu podataka u crvenoj boji-15 Hz, dominantna frekvencija u zelenoj boji-25 Hz i najviše frekvencije u plavoj boji- 35 Hz, a predstavljaju bolju predodžbu kontinuiteta kanalnih tijela i moguću kvalitetu rezervoara).



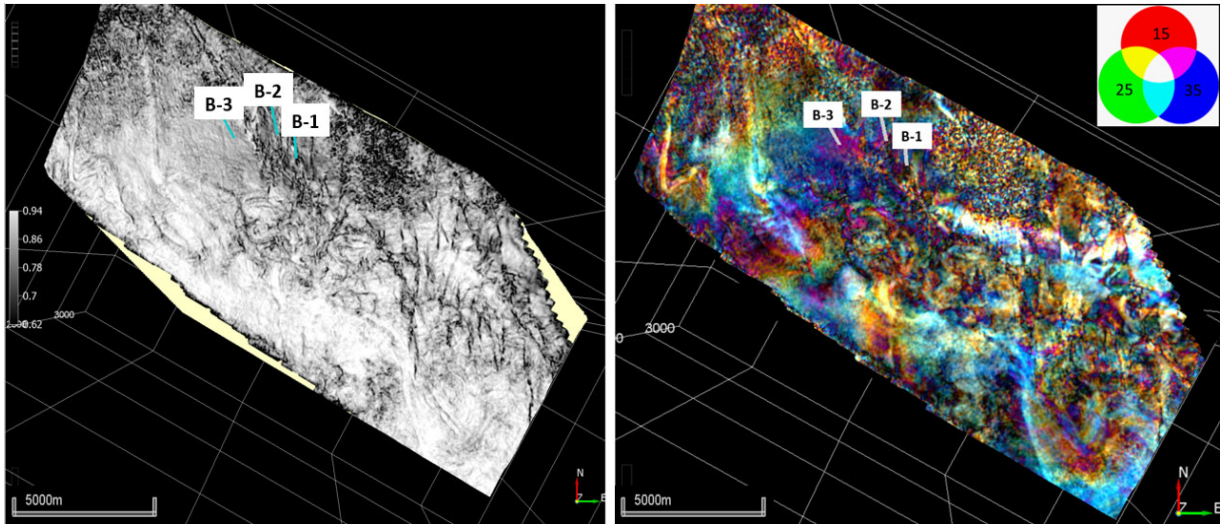
Slika 8.3.5.2.: Spektralna dekompozicija po horizontu krovine Ležišta 2(preklapanja boja prikazana su kao najniži frekvencijski raspon u seizmičkom skupu podataka u crvenoj boji-15 Hz, dominantna frekvencija u zelenoj boji-25 Hz i najviše frekvencije u plavoj boji- 35 Hz, a predstavljaju bolju predodžbu kontinuiteta kanalnih tijela i moguću kvalitetu rezervoara).

8.2.6 USPOREDBA ATRIBUTA KOHERENCIJE I SPEKTRALNE DEKOMPOZICIJE

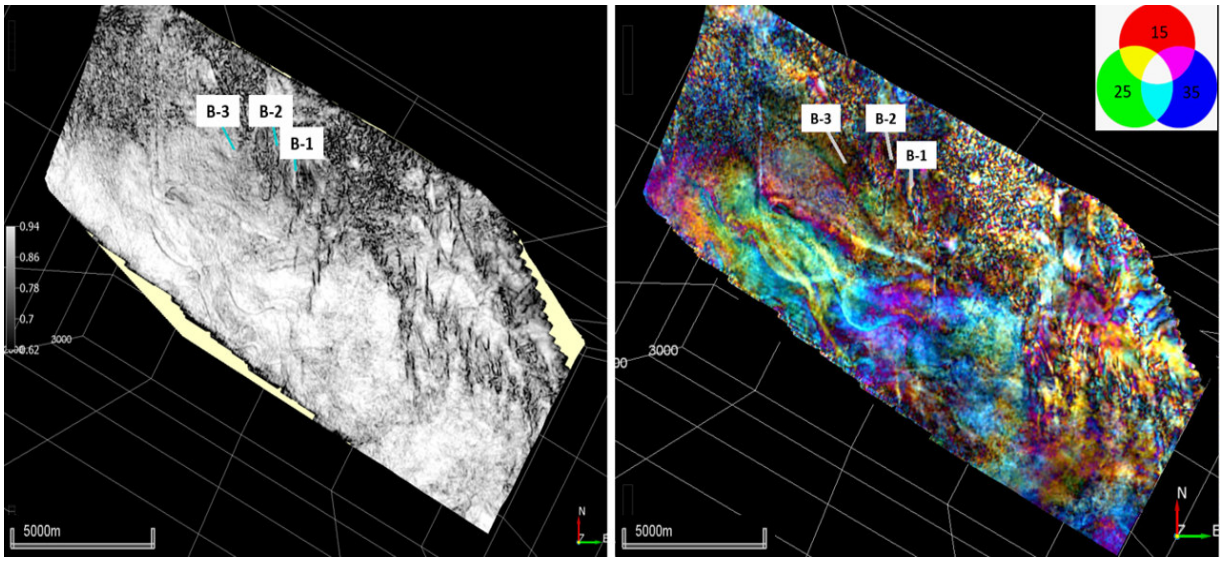
Geometrijski atribut koherencije *Similarity* i kombinirani atribut spektralne dekompozicije rađeni su u programskom paketu *OpendTect*. Oni se u većini slučaja prikazuju zajedno, a vrlo dobro prikazuju kontinuitete kanala. Obzirom da ta dva atributa vrlo dobro prikazuju geometrijske značajke radi pouzdanije interpretacije slijeda taloženja i opće slike varijabilnosti sedimentoloških karakteristika napravljeni su prikazi više horizonata između, iznad i ispod oba ležišta Pepelana pješčenjaka kako bi se dobio vjerodostojniji prikaz mogućeg slijeda događaja. Prikazani atributi rađeni su na interpretiranim horizontima približno svakih 20-40 ms što bi otprilike bilo svakih desetak-dvadesetak metara. Slika **8.2.6.1**. predstavlja horizont 40 ms iznad

Ležišta 1 gdje su na jugu vidljivi kanali koji meandriraju s pretpostavljenim donosom materijala SZ-JI, te se na jugoistoku šire u lepezno tijelo. Slika **8.2.6.2**. prikazuje spektralnu dekompoziciju usporedno s atributom koherencije *Similarity* po horizontu Ležišta 1 gdje su na jugu vidljivi broji meandrirajući kanali koji se isprepliću i nastavljaju u lepezasto tijelo. Bušotina B-3 nalazi se u obrisu kanalnog tijela koje je bilo ranije zapunjeno laporom i siltitom kako je dokazano analizama uzoraka jezgre. Na **slici 8.2.6.3.** po horizontu 70 ms iznad Ležišta 2 također se vide meandrirajući prepleteni kanali na jugu horizonta sa smjerom donosa SZ-JI koji se razvijaju u progradirajuću turbiditnu lepezu. Kanal kojeg je probušila bušotina B-3 bolje se ističe te se vidi da se počeo puniti sa sjeverozapada jer je vidljivo tijelo bijelih odziva preklapanja frekvencijskog spektra. Također se nazire punjenje kanala u okolici bušotine B-1. **Slika 8.2.6.4.** pokazuje horizont koji je oko 40 ms iznad Ležišta 2 te se već naziru oblici koji su na svim atributima karakteristični za krovinu Ležišta 2. Moguće je interpretirati kanal prethodnog preuzetog tumačenja koji meandrira između bušotina B-3 i B-2, zapadno od bušotine B-1 te se nastavlja vjerojatno kroz razlomljeno područje kaotičnih refleksa i koji se na krajnjem jugoistoku horizonta razvija u turbiditnu lepezu. Vidljiva su tijela bijelih odziva koja također predstavljaju zone povišenih amplituda na drugim atributima na temelju kojih je odlučeno bušenje svih triju bušotina.

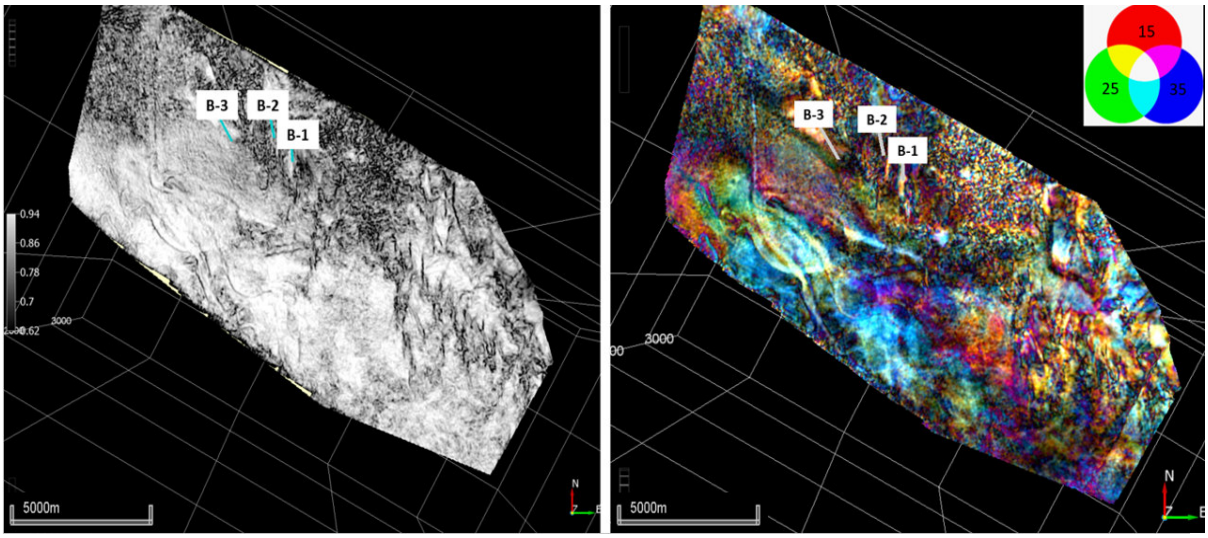
Slike 8.2.6.5. i 8.2.6.6. prikazuju iste atribute po horizontima 20 ms iznad Ležišta 2 i samog Ležišta 2 gdje se izrazitije vide rubovi kanala blizu bušotina, dok se lepezasto tijelo na jugu slabije uočava. **Slike 8.2.6.7. i 8.2.6.8.** opisuju horizonte oko 20 ms i 40 ms ispod Ležišta 2 koji se nalaze još uvijek u zoni Pepelana pješčenjaka i prikazuju splet drugačijih kanala s izgledom progradirajućih turbiditnih lepeza na jugu.



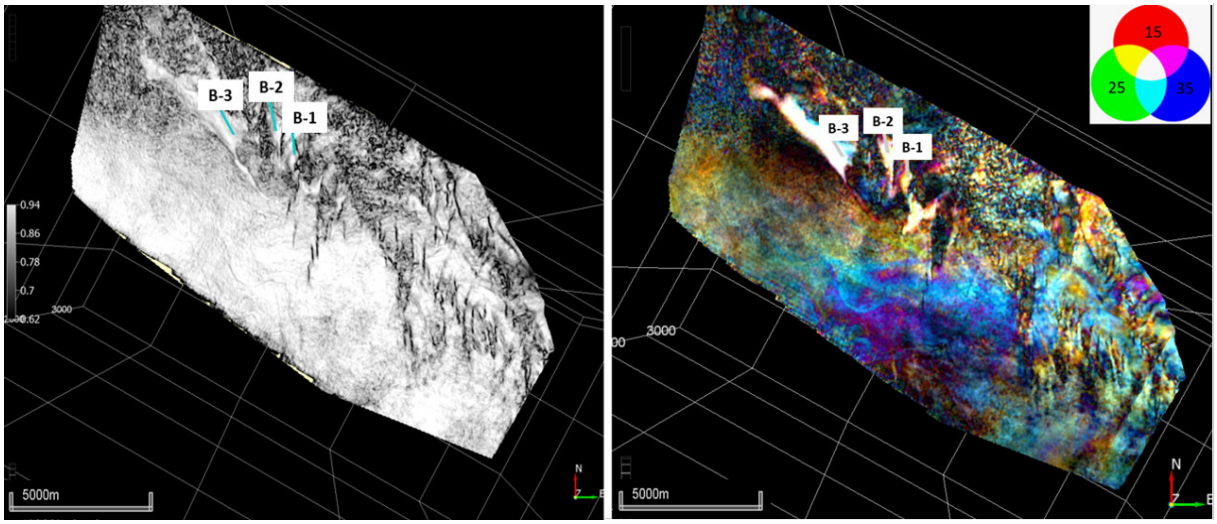
Slika 8.2.6.1.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu 40 ms iznad Ležišta 1



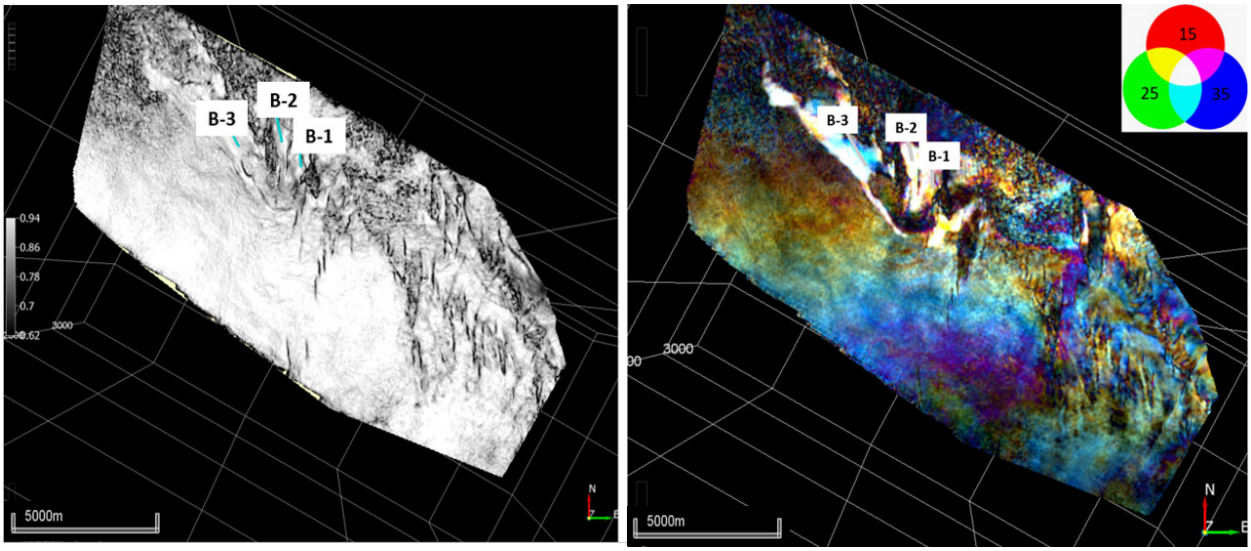
Slika 8.2.6.2.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu Ležišta 1



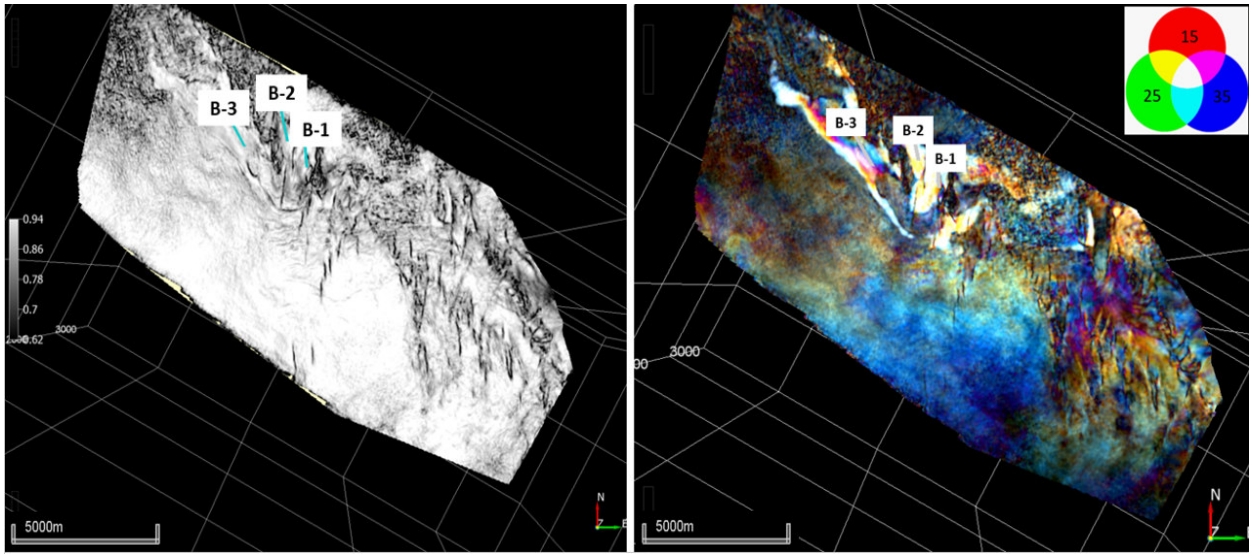
Slika 8.2.6.3.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu 70 ms iznad Ležišta 2



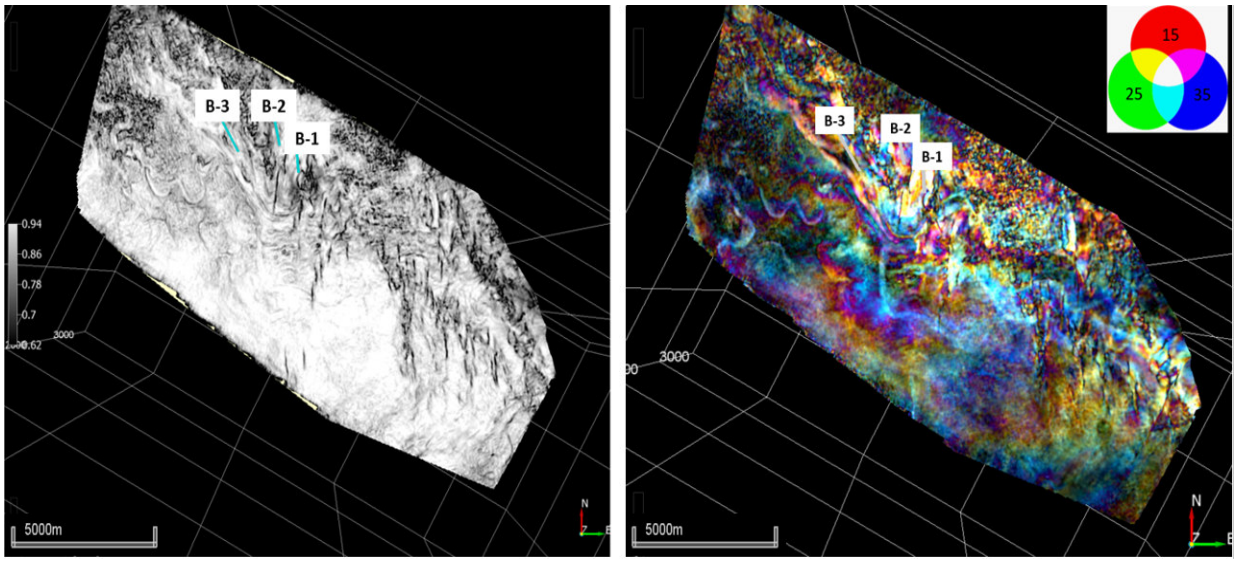
Slika 8.2.6.4.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu 40 ms iznad Ležišta 2



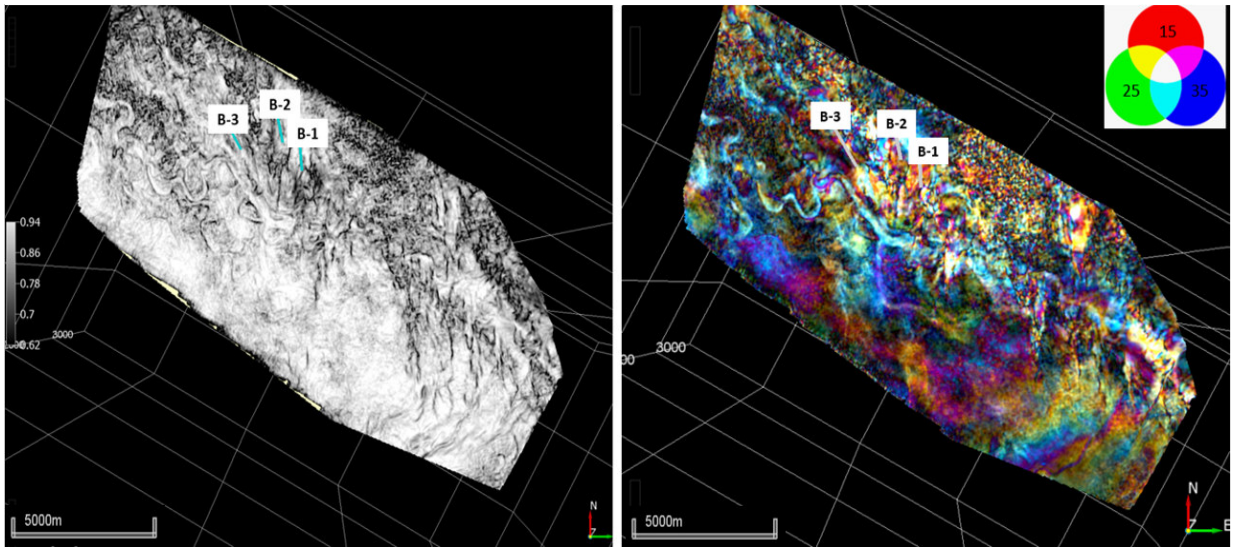
Slika 8.2.6.5.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu 20 ms iznad Ležišta 2



Slika 8.2.6.6.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu Ležišta 2



Slika 8.2.6.7.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu 20 ms ispod Ležišta 2

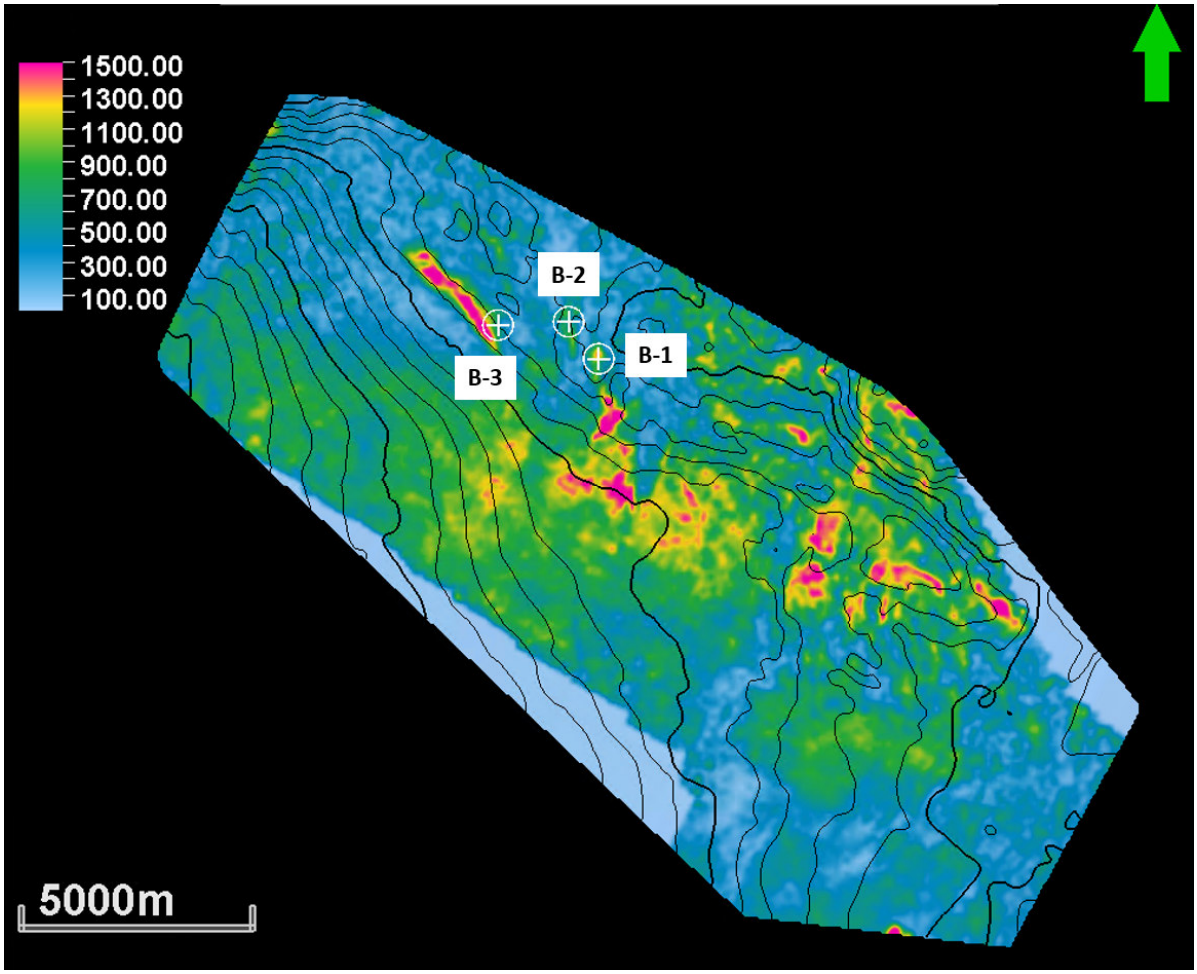


Slika 8.2.6.8.: Spektralna dekompozicija usporedno s atributom koherencije Similarity po horizontu 40 ms ispod Ležišta 2

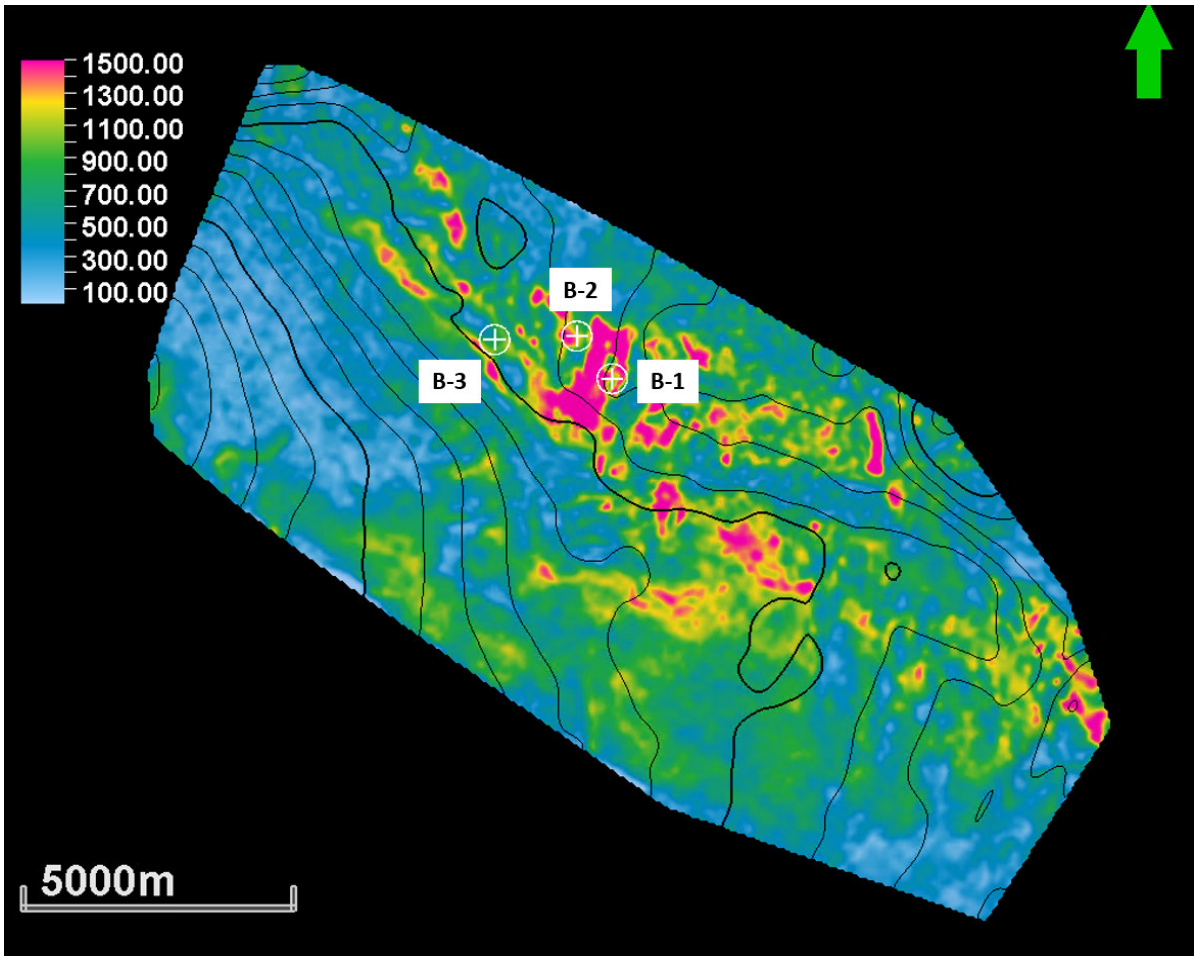
8.2.7 KOMBINIRANI SEIZMIČKI ATRIBUT *SWEETNESS*

Ovaj atribut otkriva uglavnom pješčane intervale kao moguća mjesta gdje bi moglo postojati zasićenje ugljikovodicima. Područja koja sadrže veće amplitude i niže frekvencije (pješčani intervali) pokazuju najviše vrijednosti na ovom atributu, dok sedimenti niže amplitude i većih frekvencija pokazuju niže vrijednosti (lapori i šejlovi). Za analizu je iz migriranih zbrojenih seizmičkih podataka izračunat volumen atributa *Sweetness* i ekstrahiran duž horizonata krovina

oba ležišta (**Slika 8.2.7.1., 8.2.7.2.**). Duž krovine Ležišta 1 samo se bušotina B-1 nalazi u zoni povišenih vrijednosti, dok se druge dvije bušotine B-2 i B-3, koje su proglašene neekonomičnim nalaze u zoni nižih vrijednosti. Atribut *Sweetness* duž krovine Ležišta 2 pokazuje da se bušotina B-1 nalazi neposredno pored zone povišenih vrijednosti, a bušotine B-2 i B-3 nalaze se na području visokih vrijednosti amplituda.



Slika 8.2.7.1.: Ekstrahirana RMS amplituda na seizmičkom volumenu atributa Sweetness po krovini Ležišta 1(Povišene vrijednosti amplituda u žutoj i crvenoj boji prikazuju područja boljih rezervoarskih svojstava)

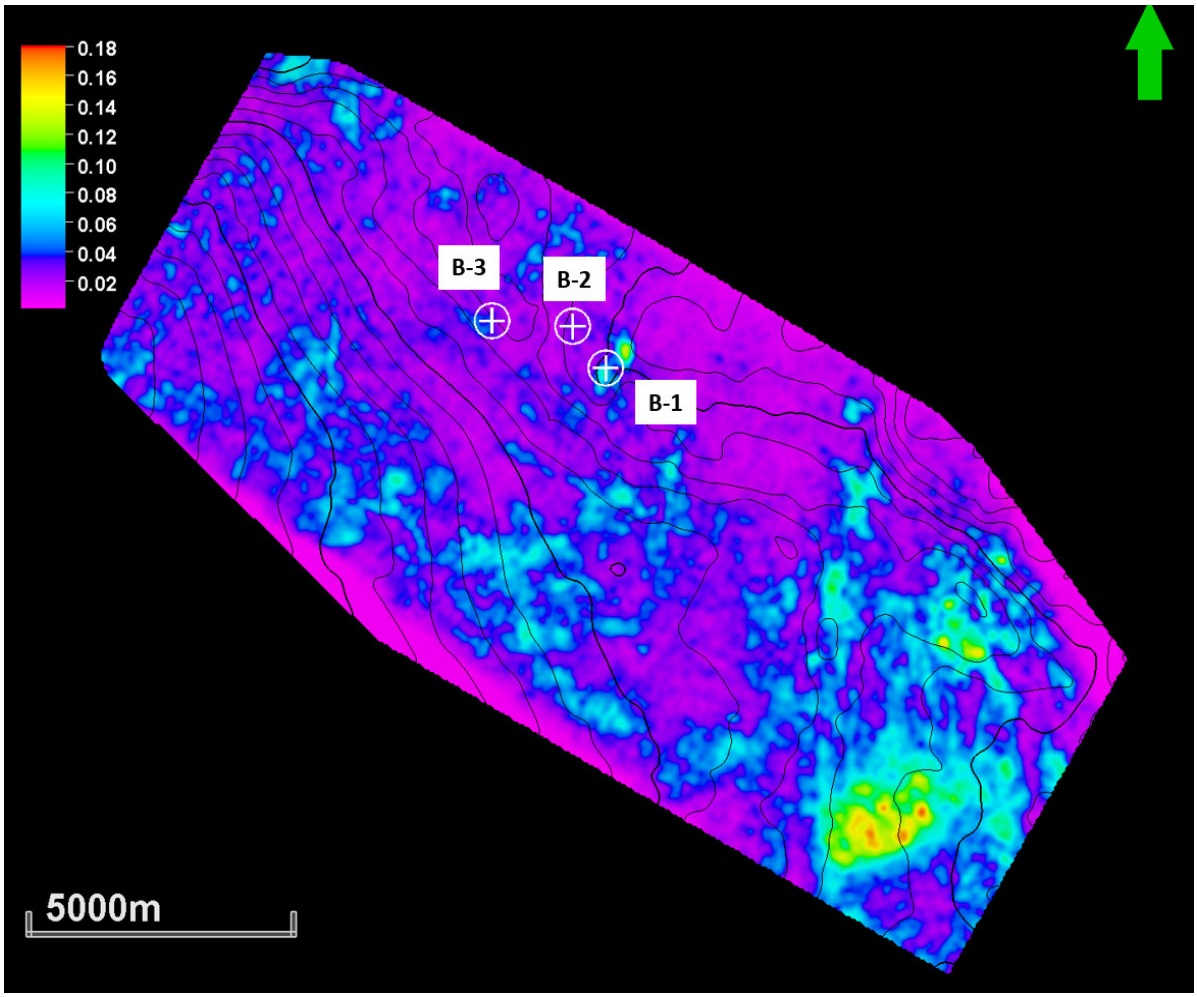


Slika 8.2.7.2.: Ekstrahirana RMS amplituda na seizmičkom volumenu atributa Sweetness po krovini Ležišta 2(Povišene vrijednosti amplituda u žutoj i crvenoj boji prikazuju područja boljih rezervoarskih svojstava)

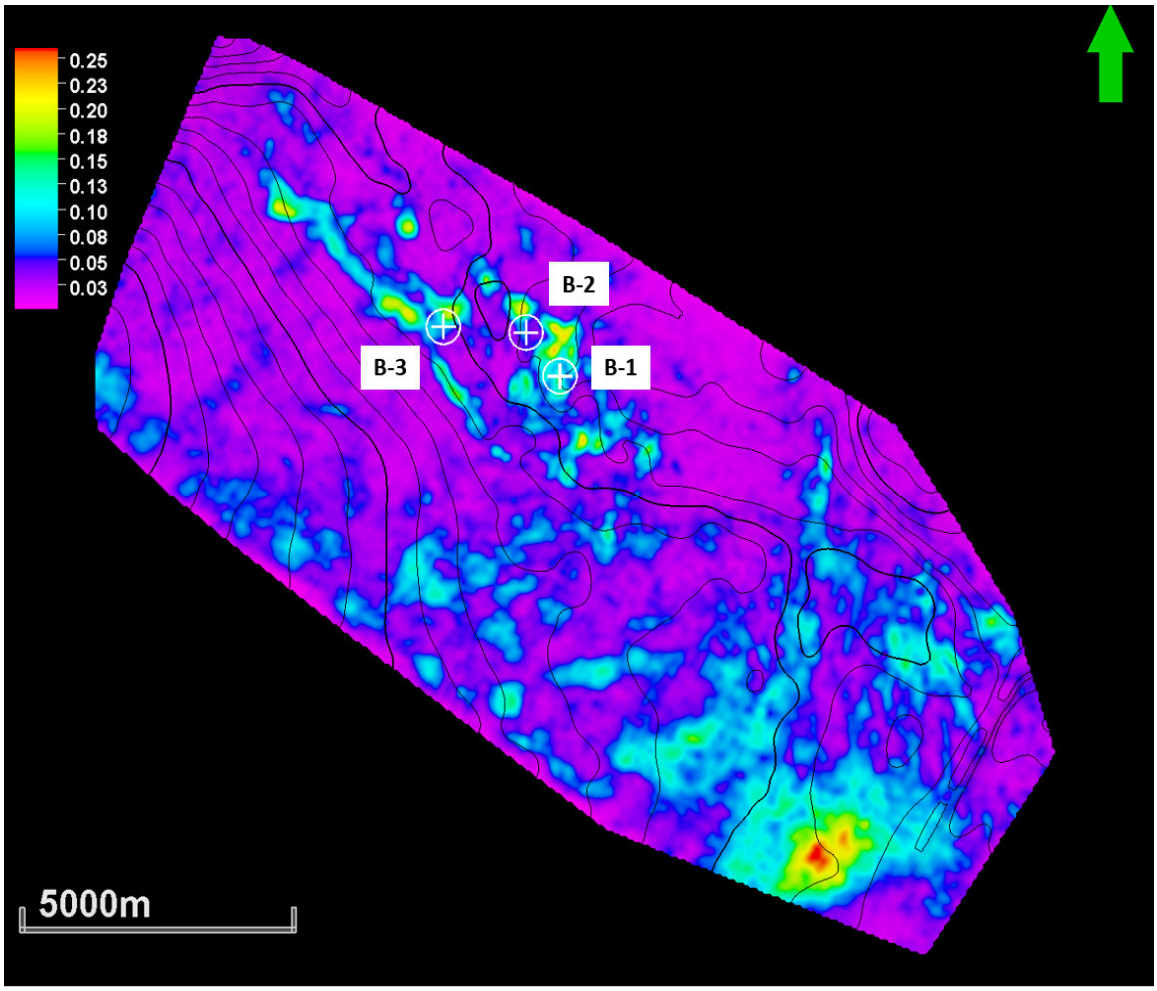
8.3 AVO ATRIBUTI

8.3.1 PRIMARNI AVO ATRIBUTI

Primarni AVO atributi su *intercept* i *gradient*. U istraživanju ugljikovodika često se koristi volumen gradienta jer on prikazuje ponašanje odnosno veličinu amplitude na dalekim *offsetima*/kutovima. Napravljen je prikaz ekstrahirane RMS amplitude po horizontima krovine oba ležišta unutar prozora +/- 10 milisekundi (ms) na primarnom AVO atributu *gradientu*. Na slici 8.3.1.1. prikazana je ekstrahirana RMS amplituda na volumenu *gradienta* duž krovine Ležišta 1 gdje je vidljivo da se samo bušotina B-1 nalazi u zoni povišenih vrijednosti. Duž horizonta krovine Ležišta 2, bušotina B-1 nalazi se u zoni povišenih vrijednosti dok se bušotine B-2 i B-3 nalaze rubno od anomalija viših amplituda.



Slika 8.3.1.1.: RMS amplituda na volumenu gradijenta po krovini Ležišta 1(područja povišenih vrijednosti amplituda u žutoj, narančastoj i crvenoj boji mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima)



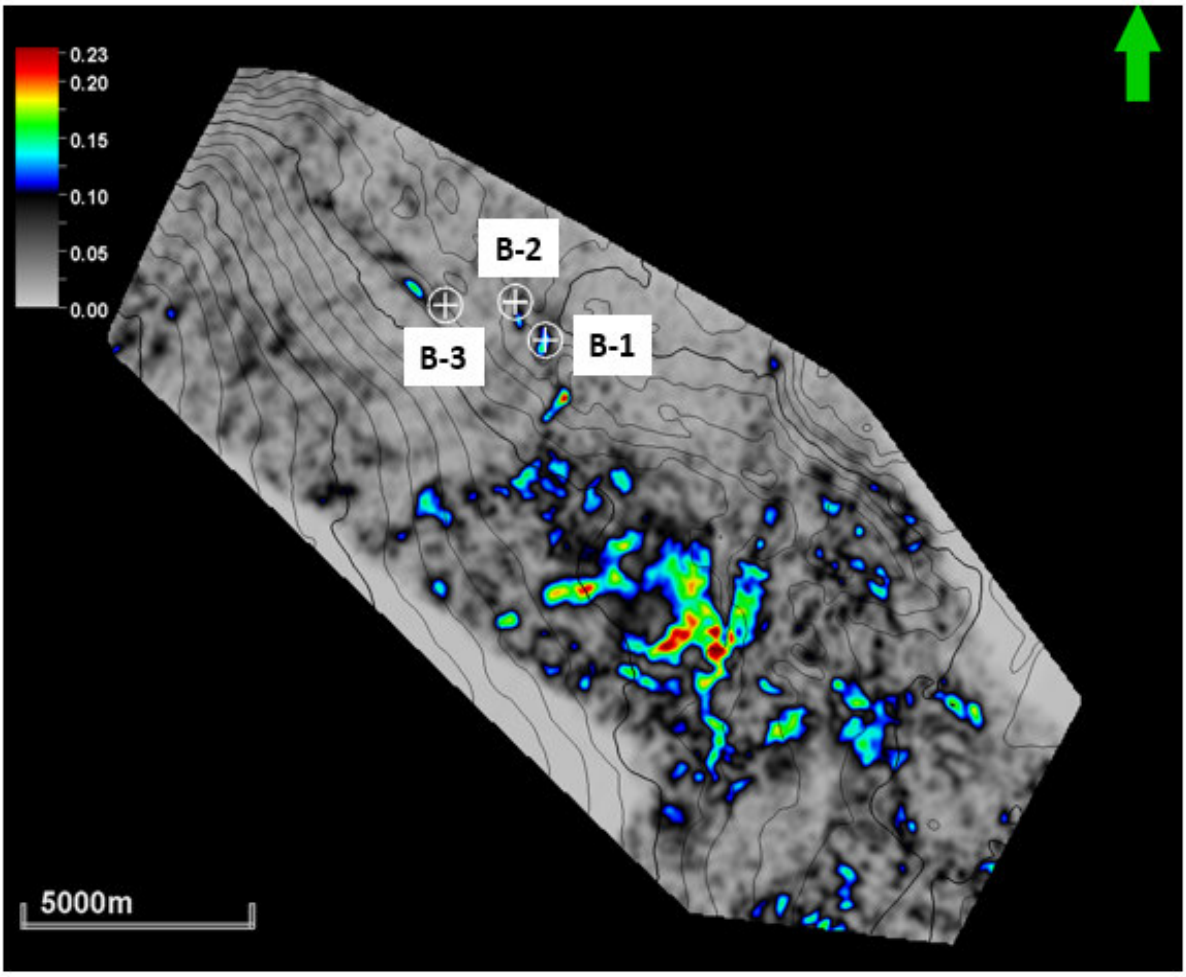
Slika 8.3.1.2.: RMS amplituda na volumenu gradijenta po krovini Ležišta 2(područja povišenih vrijednosti amplituda u žutoj, narančastoj i crvenoj boji mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima)

8.3.2 SEKUNDARNI AVO ATRIBUTI

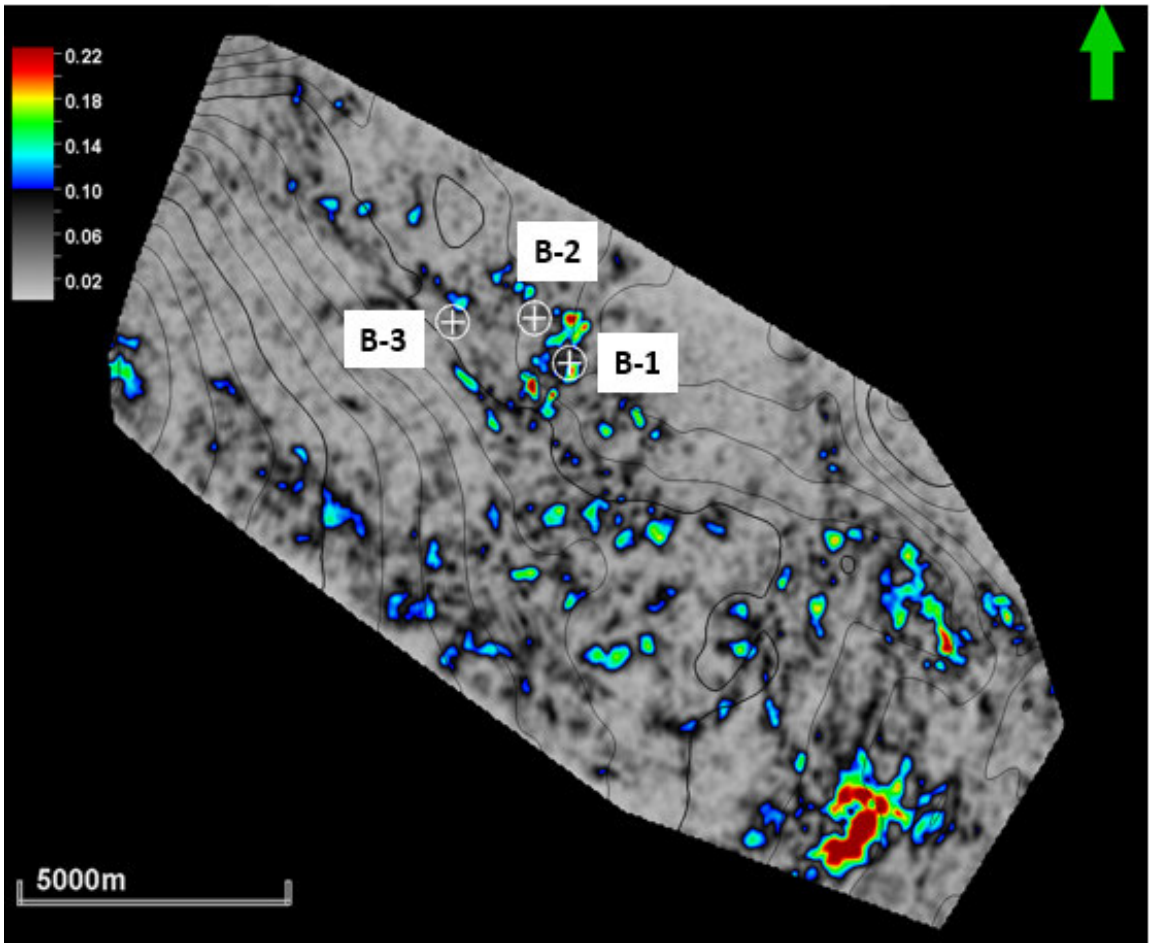
Od brojnih sekundarnih AVO atributa u ovom radu će biti prikazana tri, koji su mogli dati kvalitetne rezultate na ovom području.

Sekundarni AVO atribut *Sign(intercept) * gradient* produkt je primarnih atributa te daje njihove kombinirane vrijednosti s tim da čuva vrijednosti gradienta koji prikazuje povećane vrijednosti amplituda u odnosu na *offset*/kut i na taj način daje dobre rezultate u detektiranju ugljikovodika. Na **slici 8.3.2.1.** prikazana je ekstrahirana RMS amplituda na volumenu sekundarnog AVO atributa *Sign (intercept)*gradient* duž horizonta krovine Ležišta 1 unutar prozora +/- 10 ms. Zone povišenih vrijednosti vidljive su na mjestu bušotine B-1 koja je u zasićenju ugljikovodicima, dok se druge dvije bušotine nalaze u područjima nižih vrijednosti. **Slika**

8.3.2.2. prikazuje krovinu Ležišta 2 i zapravo sve tri bušotine nalaze se na rubovima anomalija dok je bušotina B-1 ipak u zoni veće anomalije.

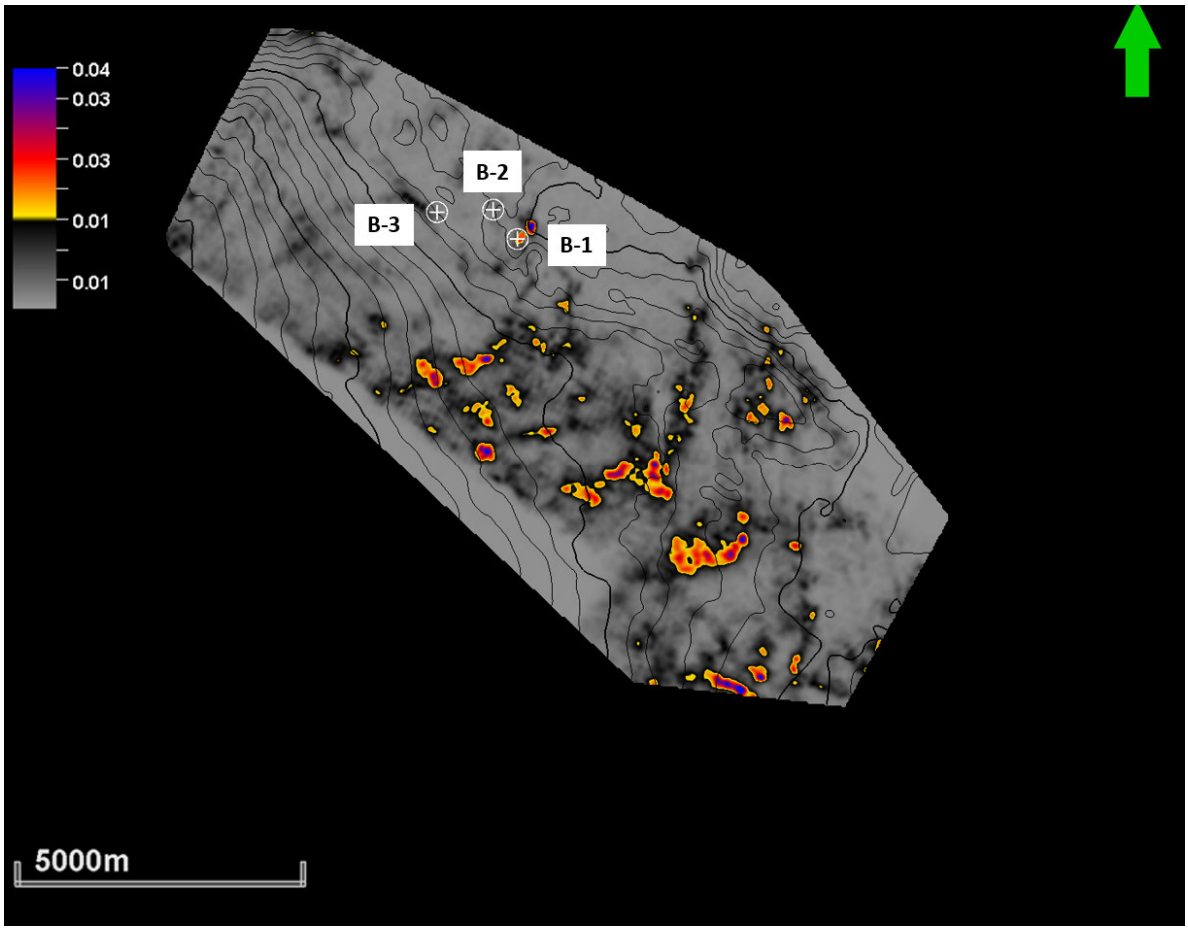


*Slika 8.3.2.1.: RMS amplituda na volumenu Sign (intercept) * gradient po krovini Ležišta 1 (područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od zelene do crvene boje na prikazanoj skali mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima)*

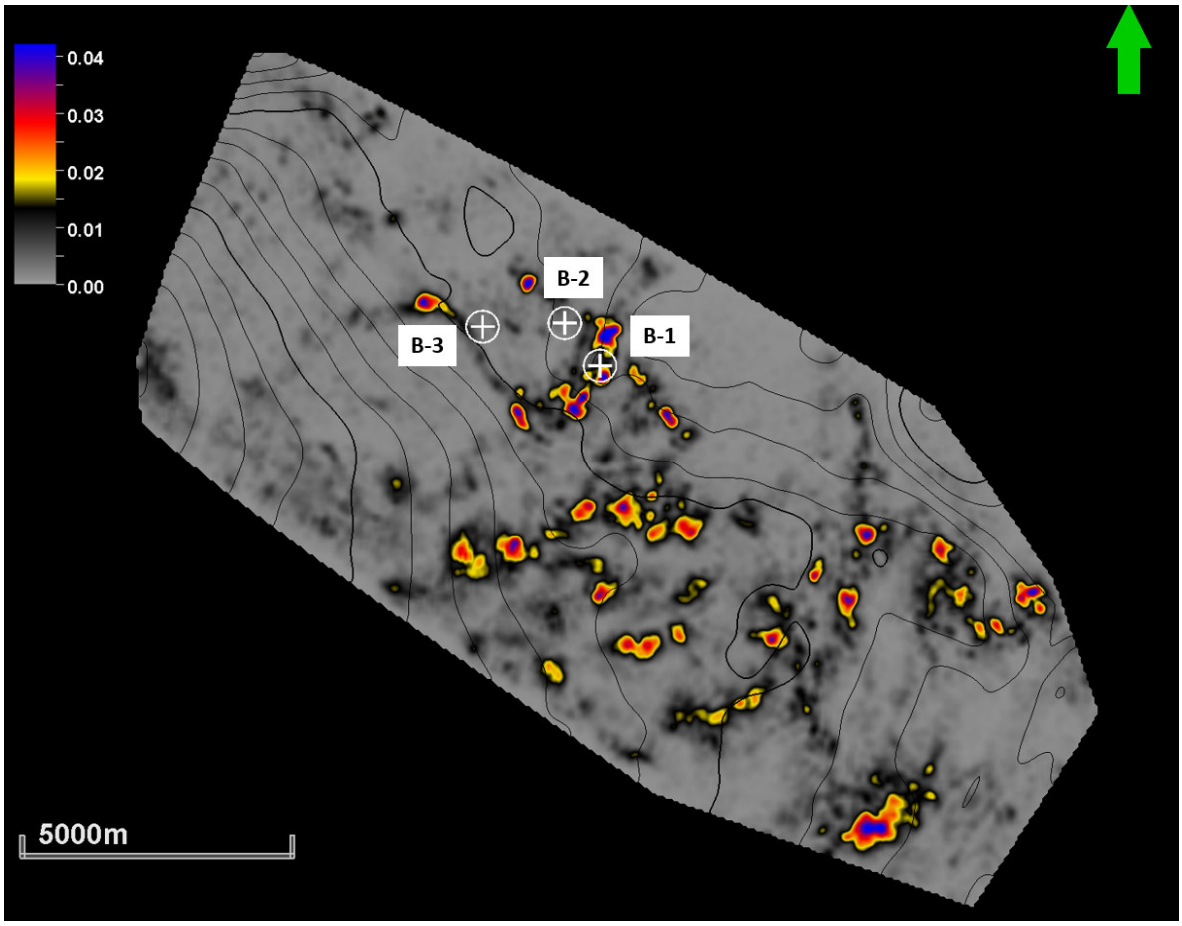


*Slika 8.3.2.2.: RMS amplituda na volumenu Sign (Intercept) * Gradient po krovini Ležišta 2(područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od zelene do crvene boje na prikazanoj skali mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima)*

Sekundarni AVO atribut *Intercept*Gradient* produkt je dvaju primarnih AVO atributa. U jednom volumenu prikazuje polaritet i varijacije u amplitudama. Na **slikama 8.3.2.3.** i **8.3.2.4.** je prikazana ekstrahirana RMS amplituda (*Root mean square* izračunata na trenutnom uzorku traga unutar zadanog prozora od +/-10 ms duž analiziranih horizonata) na volumenu sekundarnog AVO atributa *Intercept*Gradient* na horizontima krovine oba ležišta. Na ovoj vrsti prikaza jasno su uočljive zone povišenih vrijednosti amplituda u odnosu na offset/kut što može ukazivati na prisustvo ugljikovodika. Pozitivna bušotina B-1 na prikazima u oba ležišta nalazi se na mjestu povećanih vrijednosti, dok su obje negativne bušotine u zonama niskih amplituda.

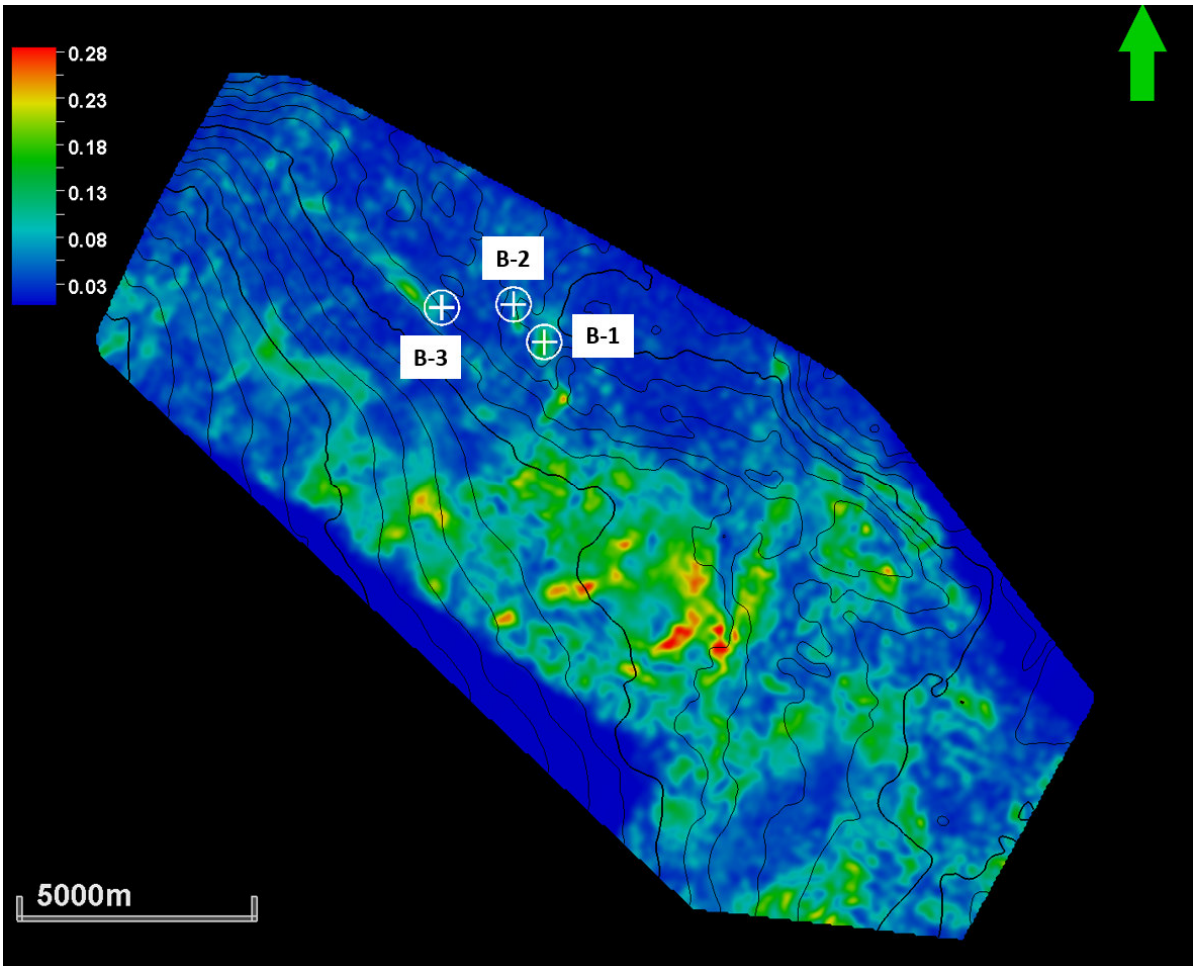


*Slika 8.3.2.3.: RMS amplituda na volumenu Intercept * Gradient po krovini Ležišta 1(područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od crvene do plave boje na prikazanoj skali mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima)*

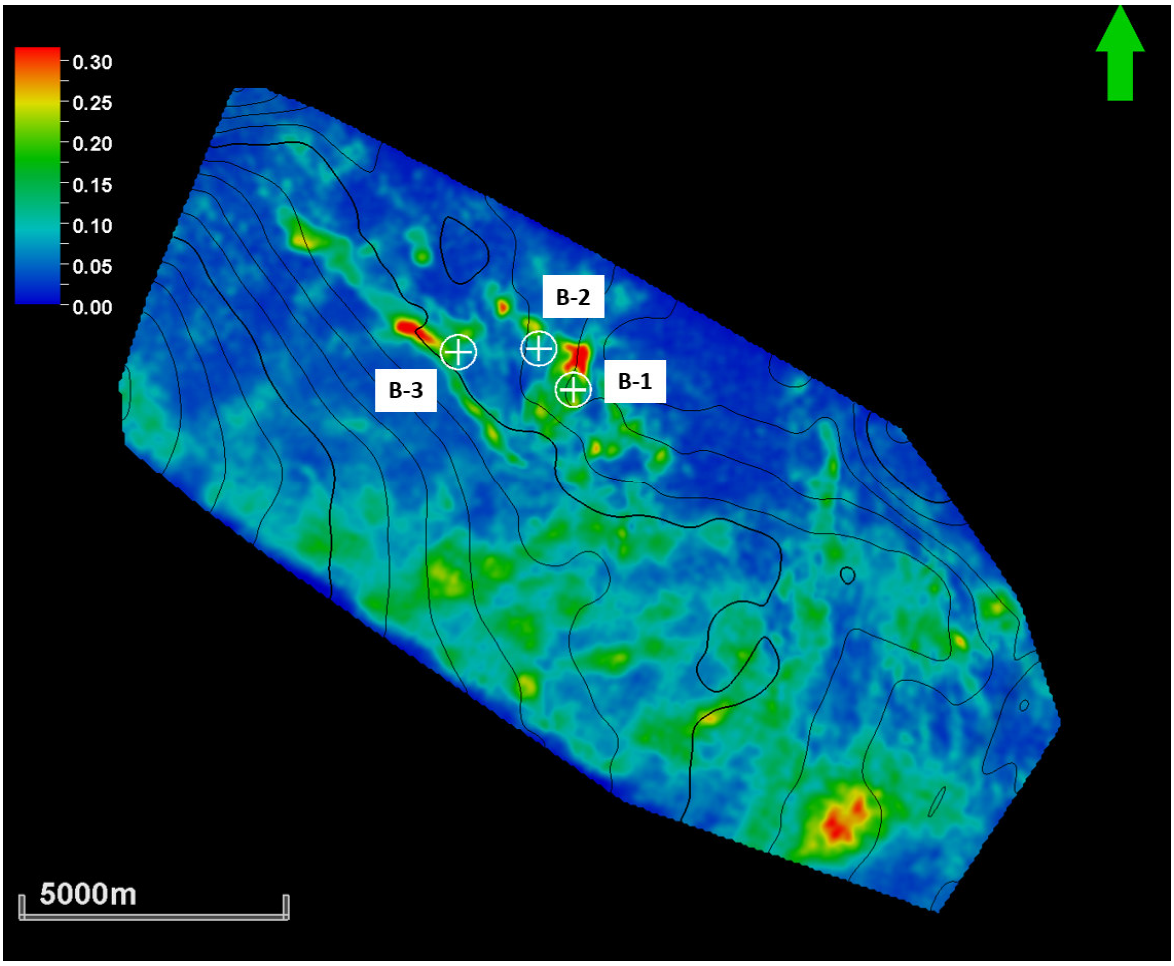


*Slika 8.3.2.4.: RMS amplituda na volumenu Intercept * Gradient po krovini Ležišta 2(područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od crvene do plave boje na prikazanoj skali mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima)*

AVO snaga uvećava i prikladnije naglašava amplitudne anomalije povezane s plinom i vodom zasićene pijeske u odnosu na klasične AVO atribute. Na **slikama 8.3.2.5.** i **8.3.2.6.** prikazane su ekstrahirane RMS amplitude duž horizonata krovina oba ležišta unutar prozora +/- 10 ms na atributu AVO snaga (AVO *strength*). Na oba horizonta bušotina B-1 nalazi se u područjima veće vrijednosti amplitude AVO snage, dok se na lokacijama druge dvije bušotine očitavaju niže vrijednosti. Područje jugoistočno od bušotina pokazuje povišene vrijednosti AVO snage što bi moglo upućivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima.



Slika 8.3.2.5.: RMS amplituda na volumenu atributa AVO snaga po krovini Ležišta 1(područja povišenih vrijednosti amplituda u u zelenoj boji na prikazanoj skali mogu ukazivati na bolja rezervoarska svojstva i žutoj i crvenoj na eventualno zasićenje ugljikovodicima)

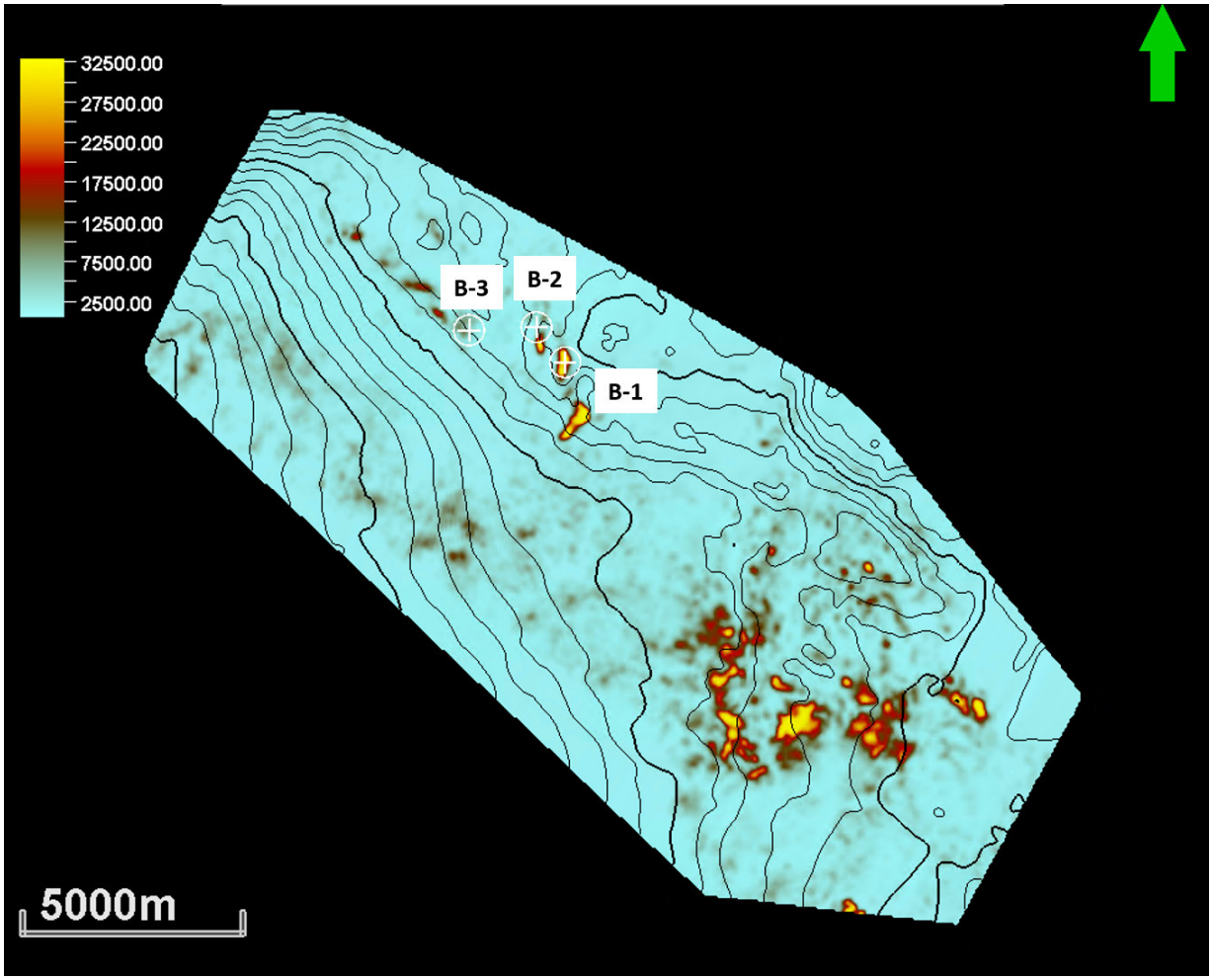


Slika 8.3.2.6.: RMS amplituda na volumenu atributa AVO snaga po krovini ekvivalent Ležišta 2 (područja povišenih vrijednosti amplituda u u zelenoj boji na prikazanoj skali mogu ukazivati na bolja rezervoarska svojstva i žutoj i crvenoj na eventualno zasićenje ugljikovodicima)

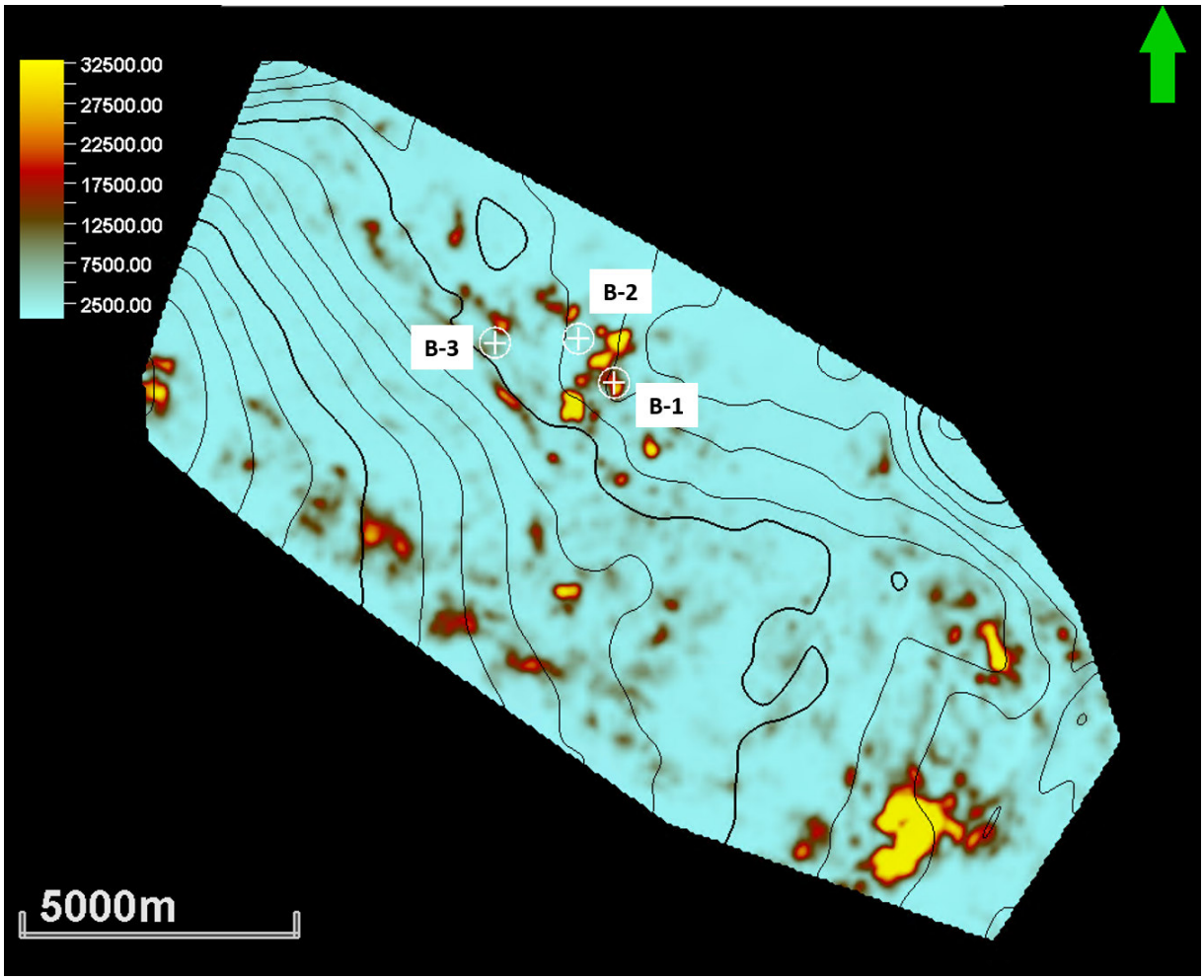
8.3.3 KOMBINIRANI AVO ATRIBUTI

Napravljen je kombinirani AVO atribut koji je izračunat iz volumena bliskih i dalekih *offseta*. *Near Angle Stack* je oduzet od *Far Angle Stack-a*, te je njihova razlika pomnožena s volumenom *Far Angle Stack-a ((Far-Near)*Far*), odnosno razlika bliskih i dalekih *offseta* je pomnožena s volumenom dalekih *offseta*. Ovaj AVO atribut se koristi za brzu kvalitativnu AVO analizu i prilično je učinkovit u otkrivanju eventualnog zasićenja. Najviše ističe AVO klasu III odnosno klasičan *Bright spot*, no može naglašavati i AVO klasu II, reverziju faze. AVO klasa III ili *Bright spot* inače opisuje pijeske s nižom akustičnom impedancijom u odnosu na okruženje odnosno slojeve ispod i iznad. Niža akustična impedancija također ukazuje na moguće zasićenje ugljikovodicima obzirom na smanjenu brzinu i gustoću. Na slici **8.3.3.1.**

je prikazana duž horizonta krovine Ležišta 1 ekstrahirana RMS amplituda s prozorom +/-20 ms na kombiniranom AVO atributu (F-N)*F, gdje je vidljivo da se samo pozitivna bušotina B-1 nalazi u zoni povišenih vrijednosti amplituda. Isto tako na slici **8.3.3.2.** duž krovine Ležišta 2 dvije negativne bušotine su u zonama niskih vrijednosti, a pozitivna bušotina B-1 u zoni visokih amplituda.



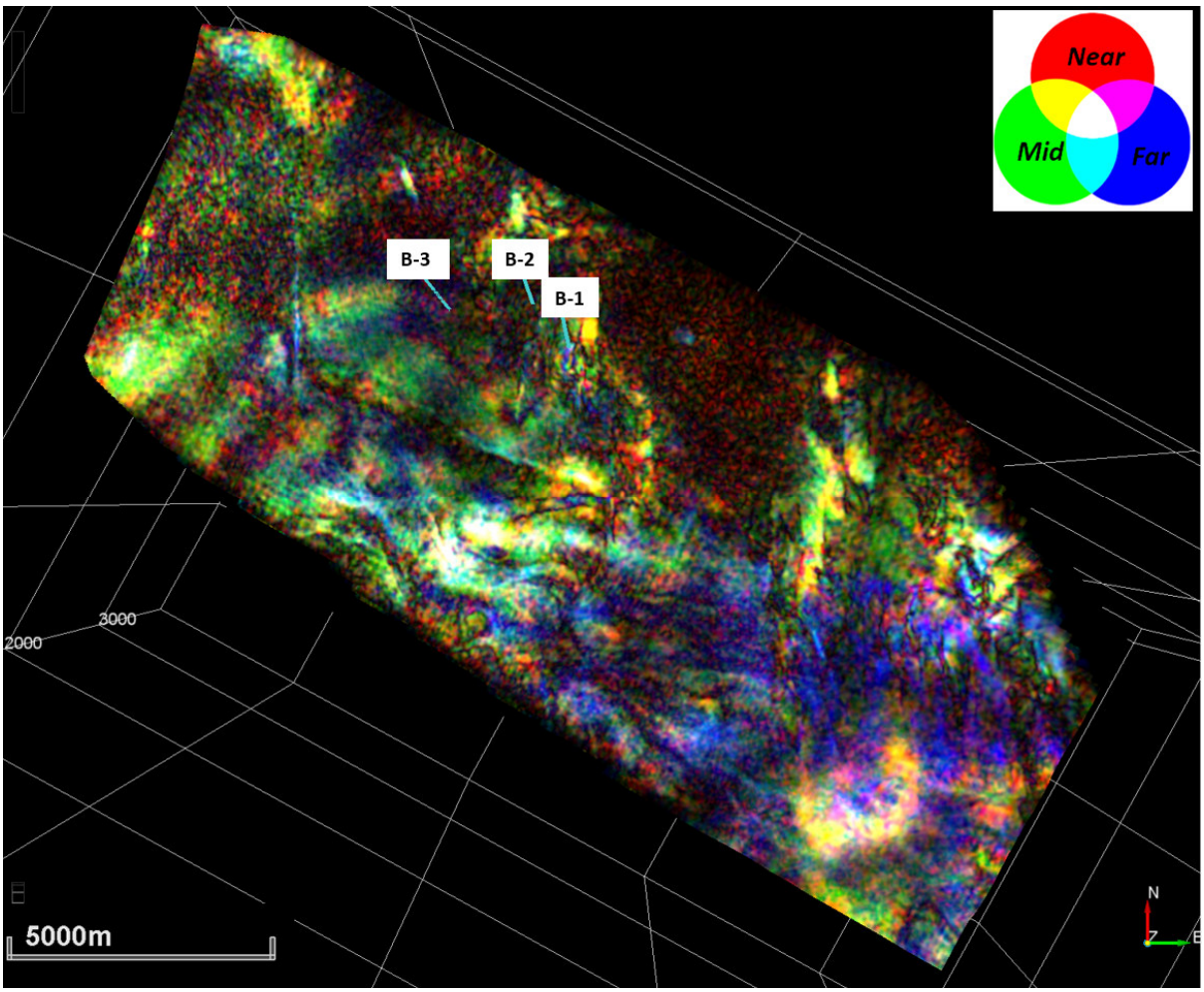
*Slika 8.3.3.1. Ekstrahirana RMS amplituda na kombiniranom AVO atributu (Far -Near) * Far po krovini Ležišta 1(područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od crvene do žute boje na prikazanoj skali ističu AVO anomalije klasa II & III i mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima)*



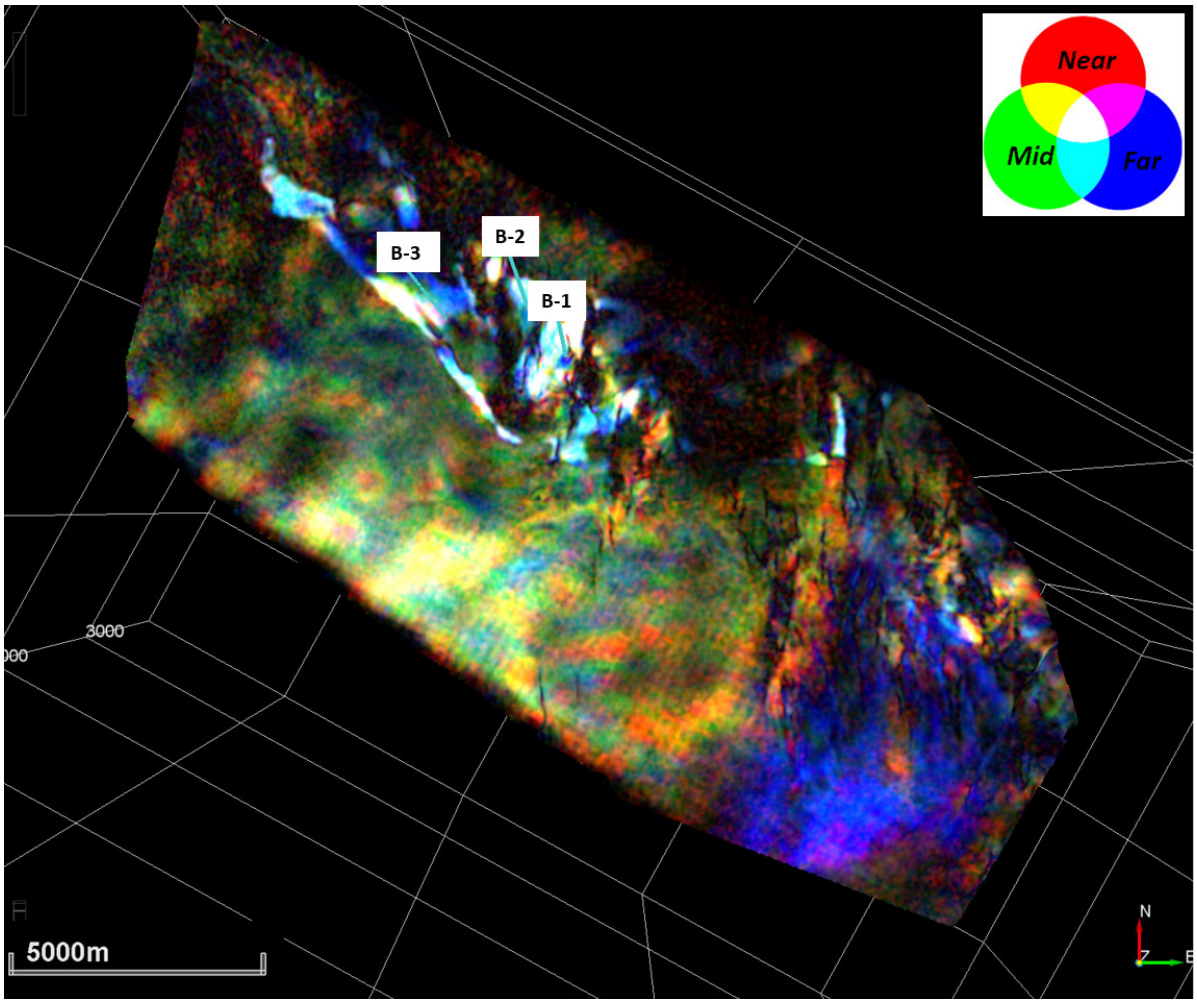
*Slika 8.3.3.2. Ekstrahirana RMS amplituda na kombiniranom AVO atributu (Far -Near) * Far po krovini Ležišta 2(područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od crvene do žute boje na prikazanoj skali ističu AVO anomalije klasa II & III i mogu ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima)*

Jedna od brzih i efikasnih AVO analiza je AVO RGB *Blending* tehnika. Ona se, kao i kod spektralne dekompozicije kod koje se preklapaju vrijednosti niskih, srednjih i visokih frekvencija gdje zone preklapanja frekventnog spektra svijetle u bijeloj boji, koristi preklapanjem bliskih, srednjih i dalekih *offseta*. Bliskim *offsetima* (*Near Angle Stack*) dodaju se crvene boje spektra, srednjim (*Mid Angle Stack*) zelene, a dalekim (*Far Angle Stack*) plave boje spektra. Eventualne moguće zone zasićenja također će biti okarakterizirane bijelim svijetlim odzivima. Ovaj atribut može nam pomoći u stratigrafskoj interpretaciji te prikazima kanalnih tijela. Na **slici 8.3.3.3.** prikazan je kombinirani atribut dobiven AVO RGB tehnikom duž horizonta krovine Ležišta 1 te se bušotina B-1 nalazi u blizini zone najsvijetlijih odziva. No južno od svih bušotina vrlo je dobro vidljiv splet meandrirajućih isprepletenih kanala koji

se pri kraju možebitno razvija u lepezasto tijelo. Kanali oko bušotina nisu toliko dobro vidljivi premda bi se moglo pretpostaviti da u ovom području također ima manjih prepletenih tokova. Područje istočno od bušotine B-1 nalazi se u razlomljenoj zoni, kaotičnih refleksa. Na slici **8.3.3.4.** je prikazan isti postupak koji je primijenjen na krovinu Ležišta 2 gdje su opet vidljivi kao i kod nekih spomenutih atributa kanal i nepravilna tijela u bijeloj boji gdje je bušotina B-1 unutar jednog takvog tijela, a ostale dvije bušotine se nalaze neposredno blizu takvih anomalija.



Slika 8.3.3.3. Kombinirani atribut dobiven AVO RGB blending metodom duž horizonta krovine Ležišta 1(preklapanje seizmičkih skupova podataka bližih offseta u crvenoj, srednjih u zelenoj i dalekih u plavoj boji jasnije ističe kontinuitet kanalnih tijela i razlomljene zone)

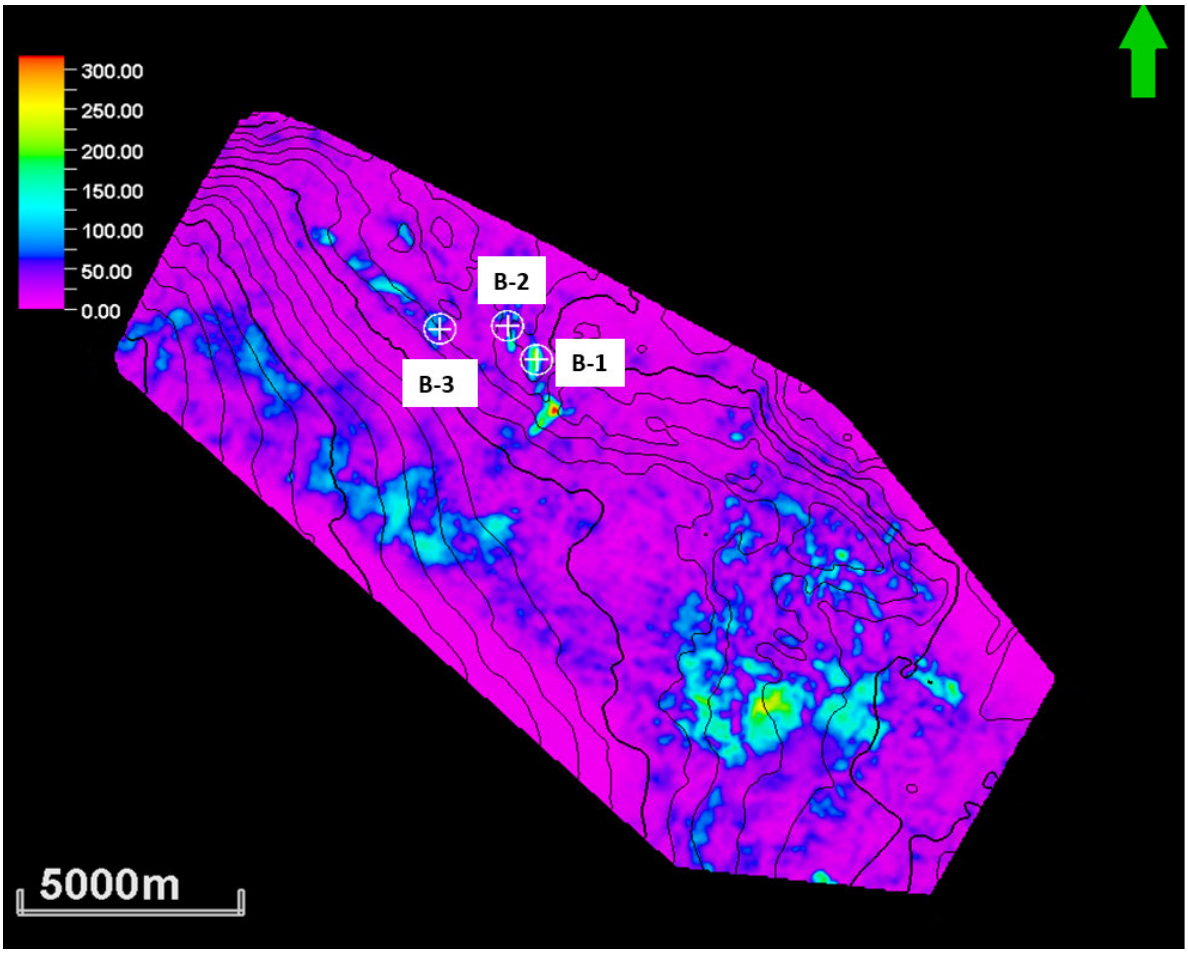


Slika 8.3.3.4. Kombinirani atribut dobiven AVO RGB blending metodom duž horizonta krovine Ležišta 2(preklapanje seizmičkih skupova podataka bližih offseta u crvenoj, srednjih u zelenoj i dalekih u plavoj boji jasnije ističe kontinuitet kanalnih tijela i razlomljene zone)

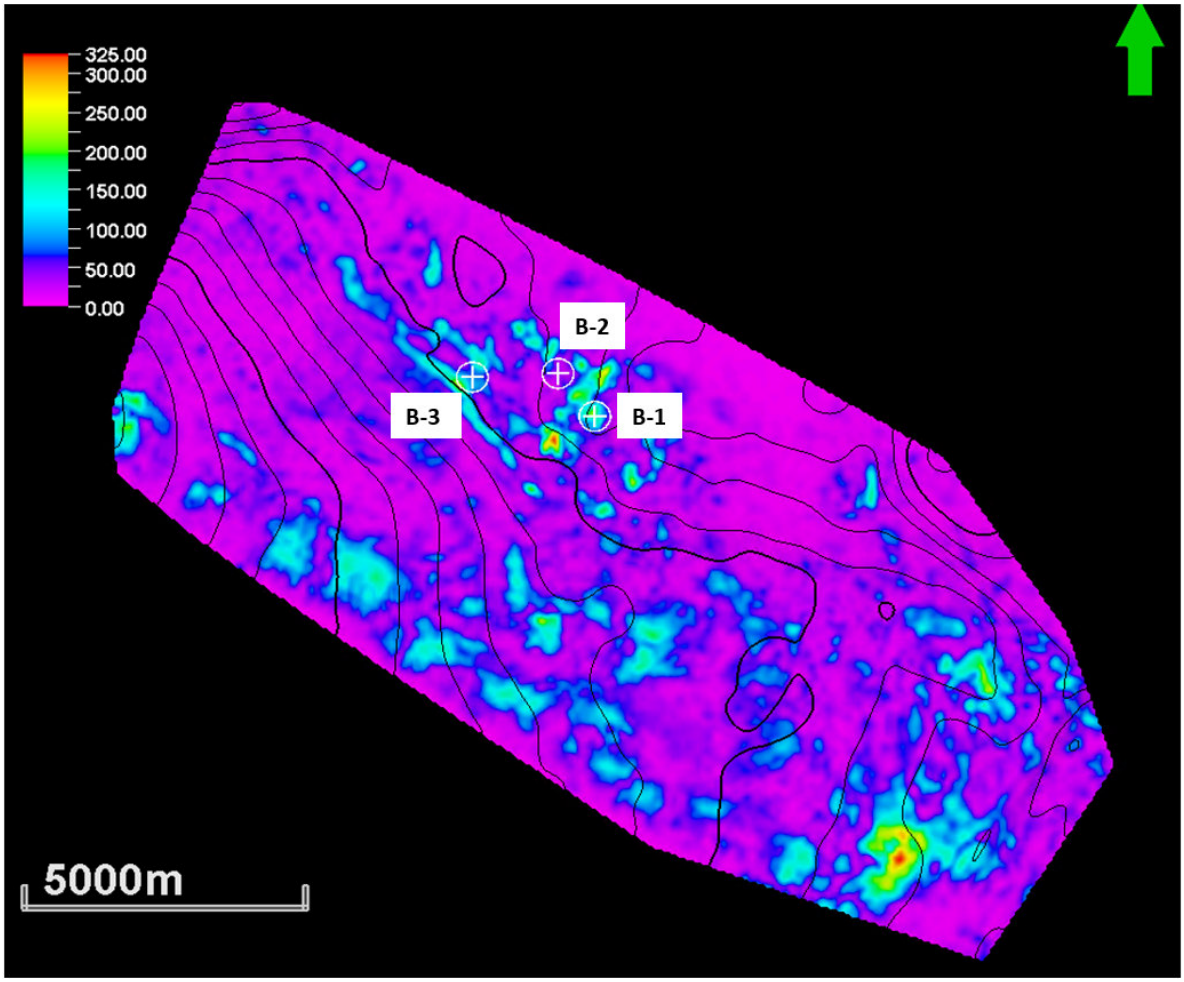
Obzirom da je jedan od nedostataka AVO metode što ne može razlikovati tzv. *Fizz-gas* od komercijalnog zasićenja plinom, potrebno je uzeti u obzir i druge metode. U slučaju kada nemamo podataka o S-valu, ponekad je korisno upotrijebiti Angle Stackove s velikim kutevima (većim od 30°). U velikoj mjeri na seizmičku refleksivnost jako utječu ne samo impedancije P-valova, već i impedancije S-valova, omjer P/S impedancija i kontrasti gustoće. Kao rezultat toga vrlo daleki offseti/kutevi mogli bi sadržavati informacije o količini zasićenja plinom što nam daje mogućnost razlikovanja pješčenjaka s vrlo malim količinama plina (do 5%) od značajnog zasićenja plinom. Naravno to ovisi i o kvaliteti seizmičkih podataka i mnogim drugim čimbenicima, no svakako je jedan od pokazatelja kojeg bi trebalo uvrstiti u analizu (**Chopra, 2004**). Izračunat je i napravljen *Far stack* daljih *offseta* (24°-36°) te je ekstrahirana RMS amplituda na njegovom volumenu duž horizonata krovina oba ležišta.

Na **slici 8.3.3.5.** vidljive su vrijednosti povećanih amplituda duž krovine Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata u području pozitivne bušotine B-1. Bušotina B-3 nalazi se na rubu anomalije, dok je bušotina B-2 u području niskih amplituda.

Slika 8.3.3.6. prikazuje horizont krovine Ležišta 2 gdje se bušotina B-1 nalazi u području povišenih vrijednosti amplituda, a druge dvije bušotine na negativnim dijelovima ili na samim rubovima anomalija.



Slika 8.3.3.5. Ekstrahirana RMS amplituda duž horizonta krovine Ležišta 1 na volumenu dalekih offseta (područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od zelene do crvene boje na prikazanoj skali mogu ukazivati na eventualno isplativo zasićenje ugljikovodicima)

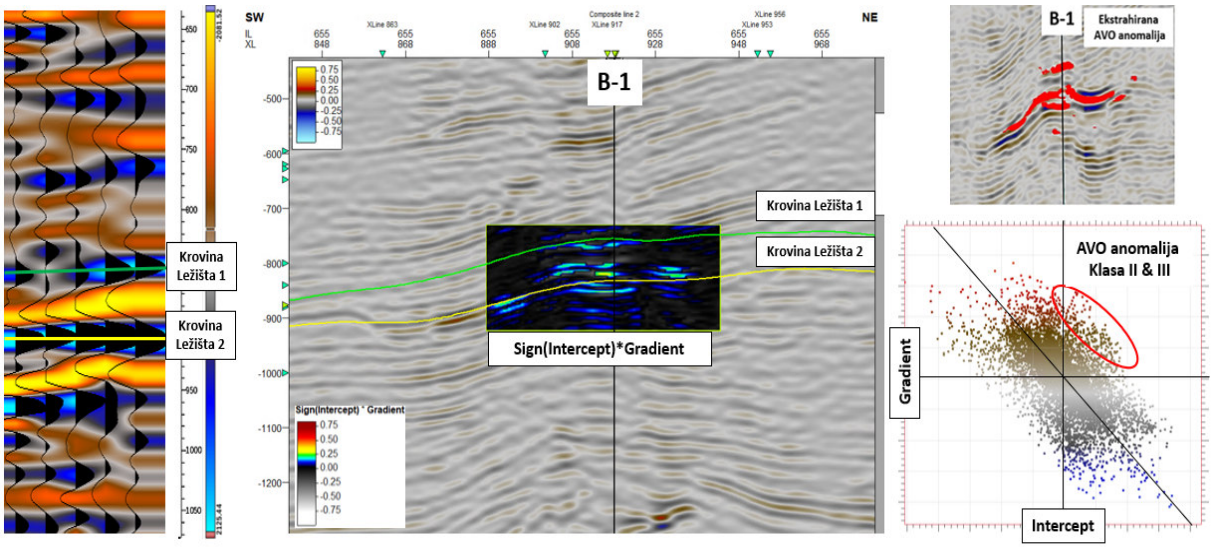


Slika 8.3.3.6. Ekstrahirana RMS amplituda duž horizonta krovine Ležišta 2 na volumenu dalekih offseta (područja povišenih vrijednosti amplituda u rasponu od zelene do crvene boje na prikazanoj skali mogu ukazivati na eventualno isplativo zasićenje ugljikovodicima)

8.4 AVO ANALIZA

8.7.1 AVO ANALIZA ZA BUŠOTINU B-1

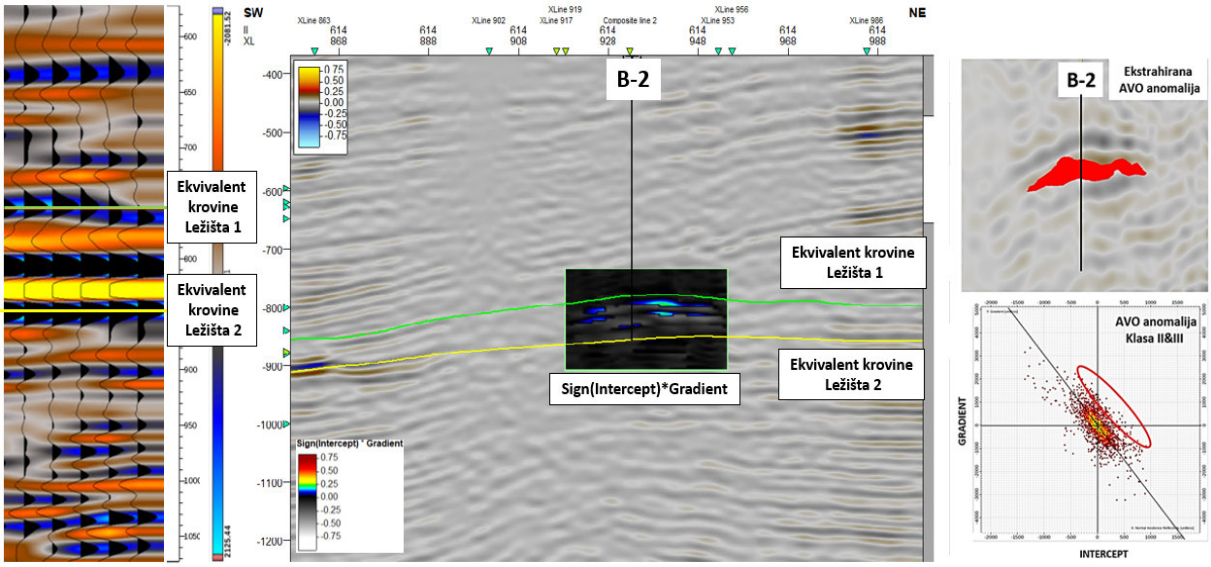
Na **Slici 8.4.1.1.** je lijevo prikazan prekondicijski *gather* na IL652/XL 919 na bušotini B-1. Na podacima koji su analizirani je primijenjeno vremenski ovisno pojačanje i kalibracija amplitude, te *Median Filter* (primjenjuje se na seizmičkim podacima za prigušenje koherentnih valnih polja kao oblika smetnje) veličine 2 %. Na *gathere* je primijenjen i *mute* kako bi se uklonile preostale smetnje. U zonama po horizontima Ležišta 1 i Ležišta 2 vidljivo je povećanje amplitude u odnosu na *offset* što može ukazivati na prisustvo plina. Analiza je napravljena u programskom paketu *Schlumberger Petrel E&P* unutar modula za kvantitativnu interpretaciju na seizmičkom volumenu *Intercepta* s normaliziranim amplitudama koji je izračunat iz *Angle stackova* (*Near Angle Stack;0-14°, Mid Angle Stack; 14-28° i Far Angle stack 28-42°*). Na prozoru koji je interesantan kao volumen u ovom slučaju područje između dva ležišta na bušotini B-1 (visina prozora 150 ms u rasponu od XL906-XL946) preklopljen je volumen *intercept*gradient* (I*G) te je na slici desno na profilu jasno uočljivo povećanje amplitude u zelenoj boji koji ukazuje na prisustvo plina. Također prikazan je križni dijagram *Intercept/gradient* gdje je crvenom bojom zaokružena AVO klasa III, te je taj volumen ekstrahiran također crvenom bojom na uvećanom seizmičkom profilu između dva ležišta u zoni gdje je vidljiv i „*bright spot*“ na bušotini B-1.



*Slika 8.4.1.1.: AVO analiza na bušotini B-1(na gatheru lijevo vidljivo je povećanje amplitude s offsetom duž krovina Ležišta 1 i 2, a na preklopljenom volumenu Sign(intercept)*gradient u sredini povećane vrijednosti amplituda koje su na križnom dijagramu Intercept/Gradient desno dolje zaokružene kao AVO klasa II i III što ukazuje na zasićenje ugljikovodicima)*

8.7.2 AVO ANALIZA ZA BUŠOTINU B-2

Za bušotinu B-2 na **Slici 8.4.2.2.** je također lijevo prikazan prekondicijski gather na sjecištu IL615/XL 941. Korišteno je vremenski ovisno pojačanje i standardizacija amplitude. U zonama po horizontima Ležišta 1 nije vidljivo povećanje amplitude u odnosu na *offset*, a po horizontu Ležišta 2 ga možemo pratiti što može ukazivati na prisustvo plina. Obzirom da je osnovni izazov AVO analiza da i vrlo skromne količine plina mogu prouzrokovati AVO efekt vjerojatno su ga minimalne količine plina koje su plinskom karotažom izmjerene unutar ovog intervala i izazvale. Unutar modula za kvantitativnu interpretaciju na prozoru prostora između dva ležišta (visina prozora 180 ms u rasponu od XL910-XL941) preklopljen je volumen *intercept*gradient* (I*G) te je na slici desno na profilu također vidljivo povećanje amplitude u zelenoj boji koje može ukazivati na prisustvo plina, u ovom slučaju skromnih količina. Na križnom dijagramu *Intercept/gradient* je crvenom bojom zaokružena AVO klasa III, te je taj volumen ekstrahiran u zoni gdje je vidljiv i *bright spot* na bušotini B-2.

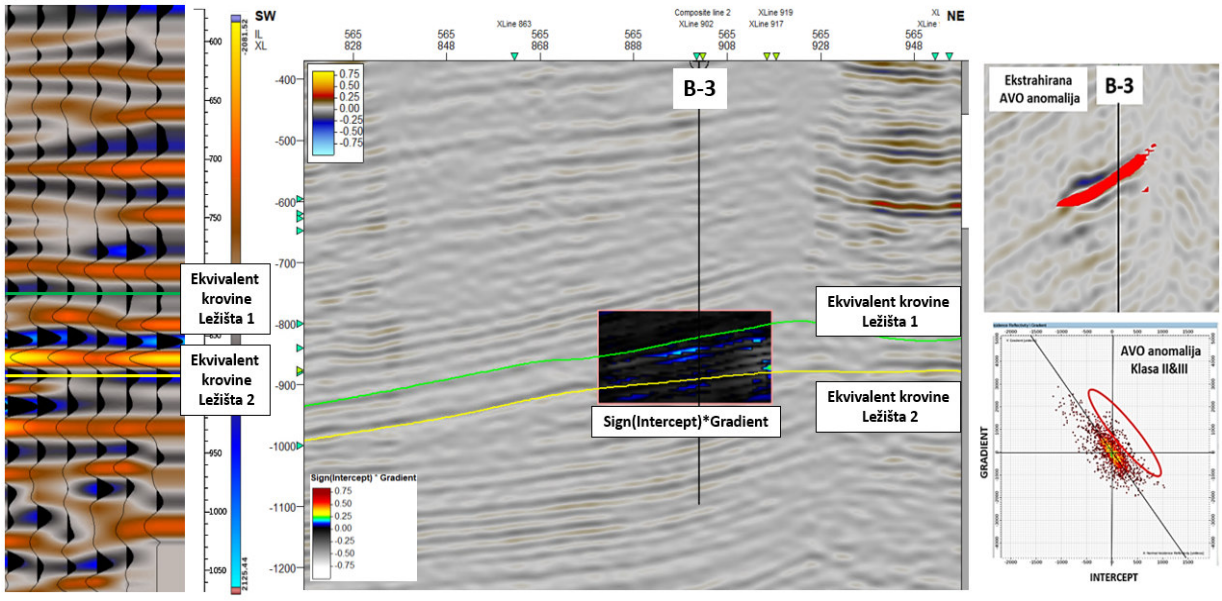


*Slika 8.4.2.2.: AVO analiza na bušotini B-2(na gatheru lijevo vidljivo je povećanje amplitude s offsetom duž krovine Ležišta 2, a na preklopljenom volumenu Sign(intercept)*gradient u sredini povećane vrijednosti amplituda koje su na križnom dijagramu Intercept/Gradient desno dolje zaokružene kao AVO klasa II i III što ukazuje na zasićenje ugljikovodicima u ovom slučaju u malim postocima)*

8.7.3 AVO ANALIZA ZA BUŠOTINU B-3

Bušotina B-3 na **Slici 8.4.3.1.** na prekondicijskom gatheru na kojem je također korišteno vremenski ovisno pojačanje i normalizacija amplitude na sjecištu IL564/XL 908 ne pokazuje po horizontu Ležišta 1 povećanje amplitude u odnosu na *offset*/kut, a po horizontu Ležišta 2 ga možemo uočiti što i u ovom slučaju ukazuje na male postotke novih plinova izmjerene unutar ovog intervala. Unutar volumena od interesa između dva ležišta (u intervalu 200 ms, raspona od XL880-XL930) na preklopljenom volumenu *intercept*gradient* (I*G) također je očigledno povećanje amplitude u zelenoj boji koje ukazuje na prisustvo plina no minimalnih količina. Na križnom dijagramu *Intercept/gradient* je crvenom bojom zaokružena AVO klasa III, te je taj volumen ekstrahiran na mjestu gdje je *bright spot* na bušotini B-3.

Razlika u raspršenju točaka na pozitivnoj i negativnim bušotinama je ipak različita, te je vjerojatno velika razlika u akustičnim impedancijama i odnosima brzina p i s valova u zonama s izmjenama tankih slojeva lapora i pješčenjaka. Veće raspršenje odnosno veća AVO anomalija može se pratiti na negativnim bušotinama koje u analiziranim intervalima plinskom karotažom imaju izmjerene količine novih plinova u rasponu od 1-7 %. Taj efekt potrebno je uzeti u obzir prilikom daljnjih ispitivanja i AVO analiza.

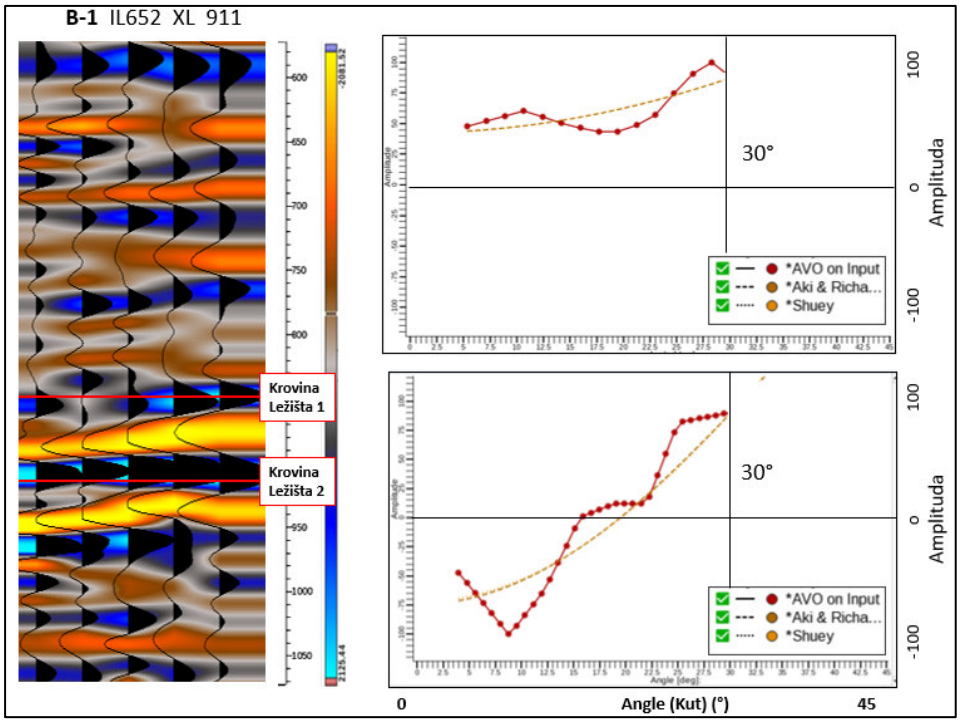


*Slika 8.4.3.1.: AVO analiza na bušotini B-3(na gatheru lijevo vidljivo je povećanje amplitude s offsetom duž krovine Ležišta 2, a na preklopljenom volumenu Sign(intercept)*gradient u sredini povećane vrijednosti amplituda koje su na križnom dijagramu Intercept/Gradient desno dolje zaokružene kao AVO klasa II i III što ukazuje na zasićenje ugljikovodicima u ovom slučaju u malim postocima)*

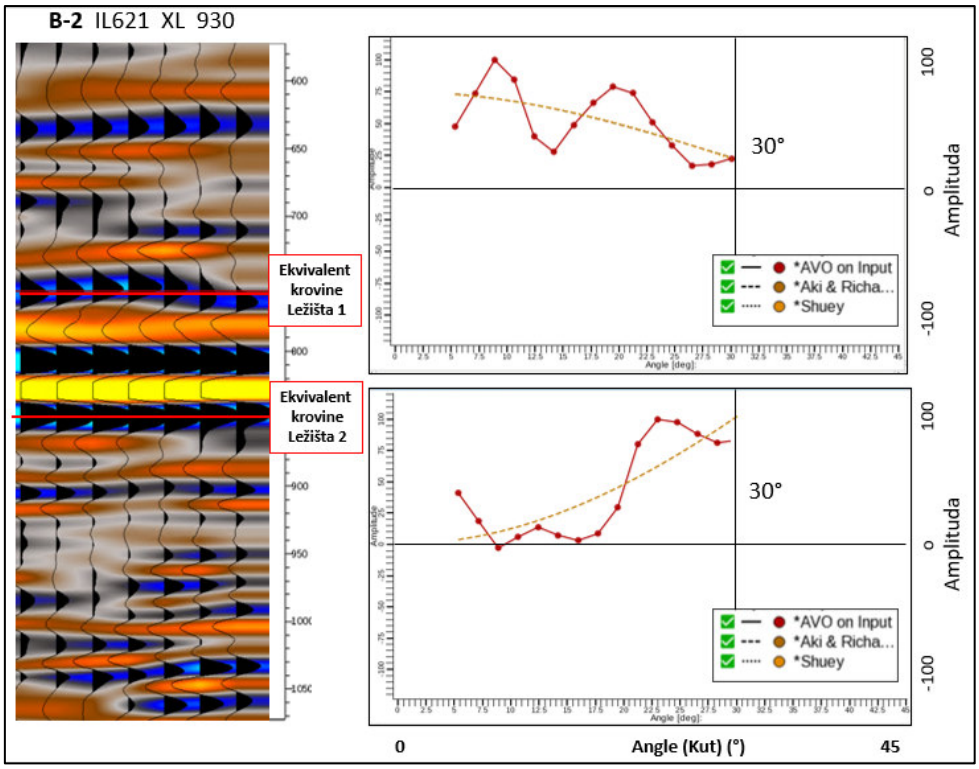
8.7.4 OCJENJIVANJE RAZLIČITIH ULAZNIH PODATAKA ZA AVO ANALIZU

AVO analiza napravljena je Shuey 2-term metodom **(Shuey, 1985; Verm and Hilterman, 1995**) koja se koristi za kutove do 30 stupnjeva. U naftnoj industriji se ponekad koriste i aproksimacije gdje se *Angle Stackovi* mogu računati i do 45 stupnjeva, što se smatra maksimumom za Shuey-evu 2-term aproksimaciju. No obzirom na izvornu Zoepritz-ovu formulu takve aproksimacije mogu implicirati grešku, no dozvoljava se uzeti maksimalan kut od 35 stupnjeva, a za sve kutove iznad ispravnije je koristiti Shuey 3-term metodu (**Shuey, 1985; Avseth et al., 2005, Went, 2021**).

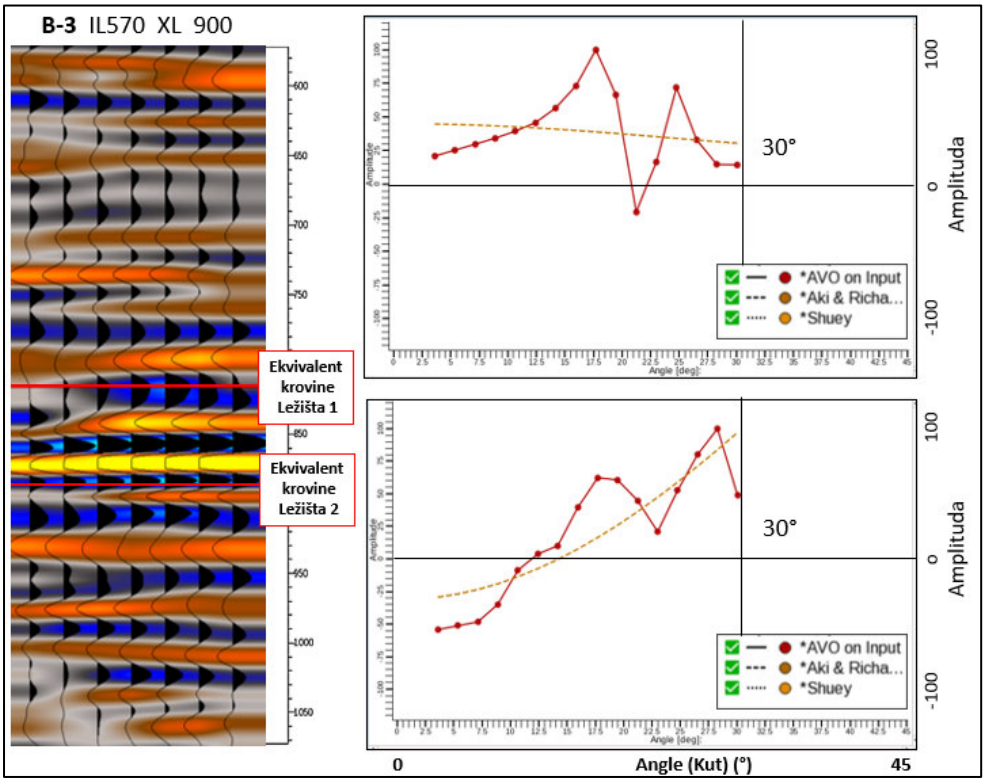
Napravljene su dvije analize na te su izračunati *Angle gatheri* do 30 i do 45 stupnjeva, te na temelju njih primarni AVO atributi *intercept* i *gradient* da bi se prikazala odgovarajuća razlika između izračunatih križnih dijagrama. Na slikama **8.4.4.1., 8.4.4.2.,** i **8.4.4.3**., su prikazani *Angle gatheri* s kutovima do 30 stupnjeva i pripadajući dijagrami ponašanja amplitude u odnosu na kut na Ležištu 1 i Ležištu 2, te njihovim litostratigrafskim ekvivalentima za sve tri bušotine.



Slika 8.4.4.1. Angle gather na bušotini B-1 te pripadajući dijagrami ponašanja amplitude u odnosu na kut od 30° za krovinu Ležišta 1 i Ležišta 2



Slika 8.4.4.2. Angle gather na bušotini B-2 te pripadajući dijagrami ponašanja amplitude u odnosu na kut od 30° za ekvivalente krovina Ležišta 1 i Ležišta 2

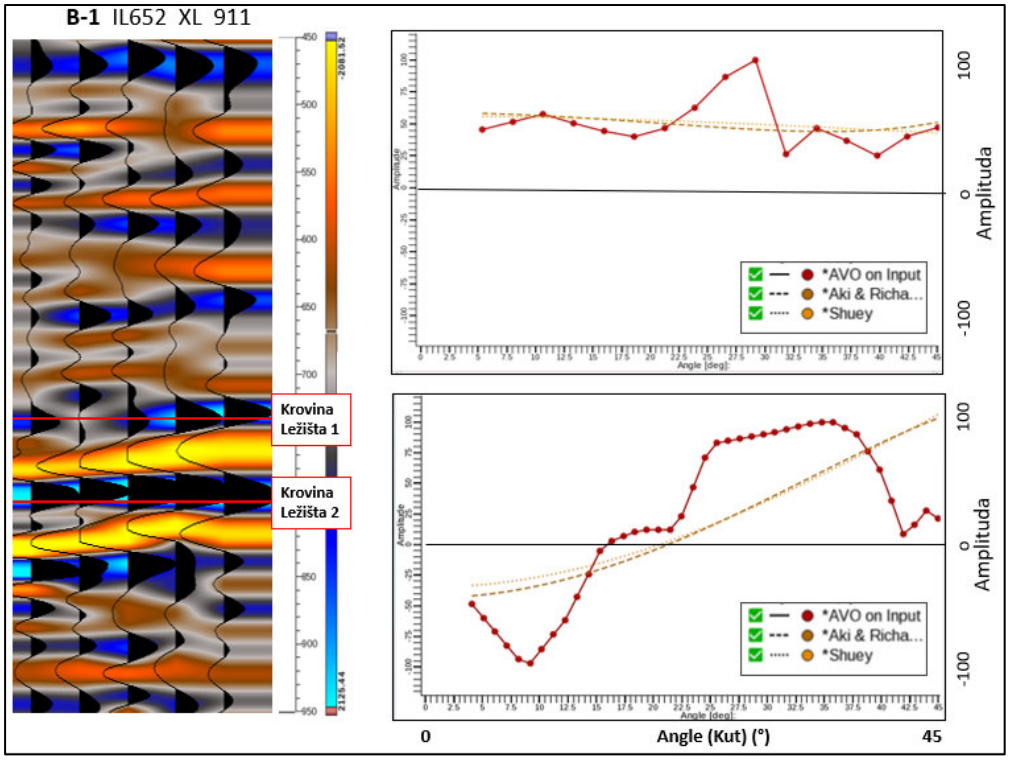


Slika 8.4.4.3.. Angle gather na bušotini B-3 te pripadajući dijagrami ponašanja amplitude u odnosu na kut od 30° za ekvivalente krovina Ležišta 1 i Ležišta 2

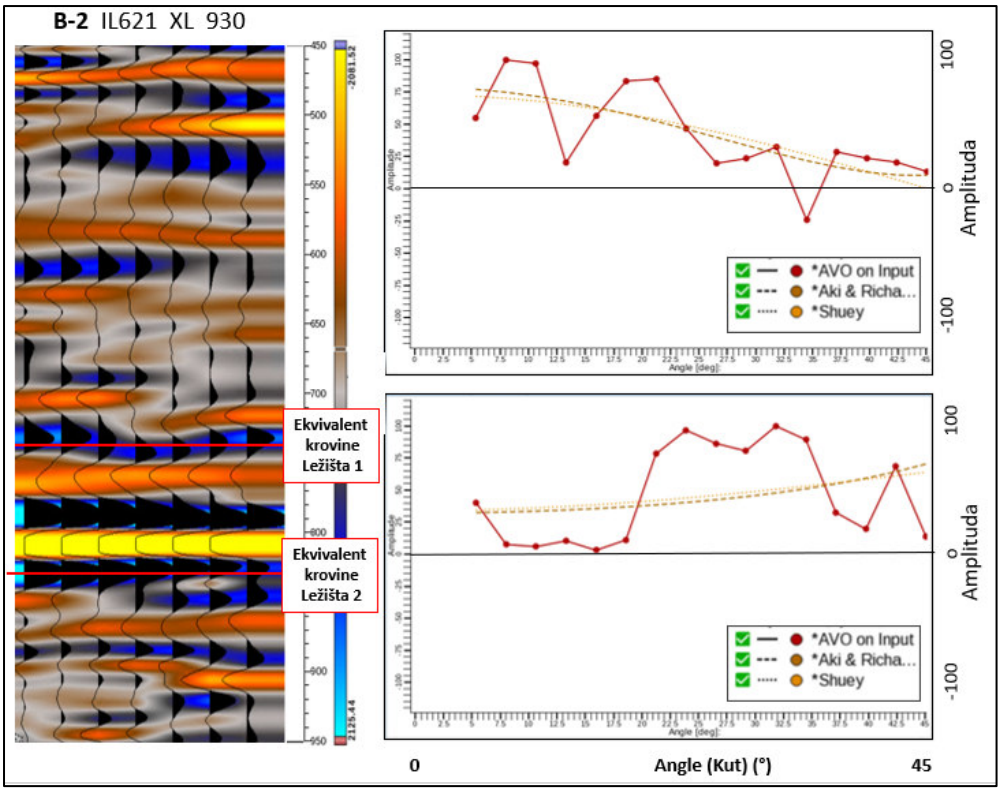
Na bušotini B-1 (**Slika 8.4.4.1.**) desno gore vidi se ponašanje amplitude u odnosu na kut za Ležište 1 gdje svaka točka prikazuje jedan trag u *gatheru*. Na samom *gatheru* su prikazani samo daleki kutovi radi lakšeg prikaza no dijagram točno prikazuje što se događa na bliskim, srednjim i dalekim kutovima. Amplituda raste pa pada, te je to prikazano crvenom linijom što označava AVO na ulaznim podacima. No narančasta linija pokazuje nam opći trend porasta amplitude Shuey-2 term metodom. U Ležištu 2 vidi se promjena polariteta i izraziti rast amplitude.

Na bušotinama B-2 i B-3 u oba ležišta na dijagramu Amplituda/Kut vidi se generalno povećanje amplitude (**Slike 8.4.4.2.i 8.4.4.3).**

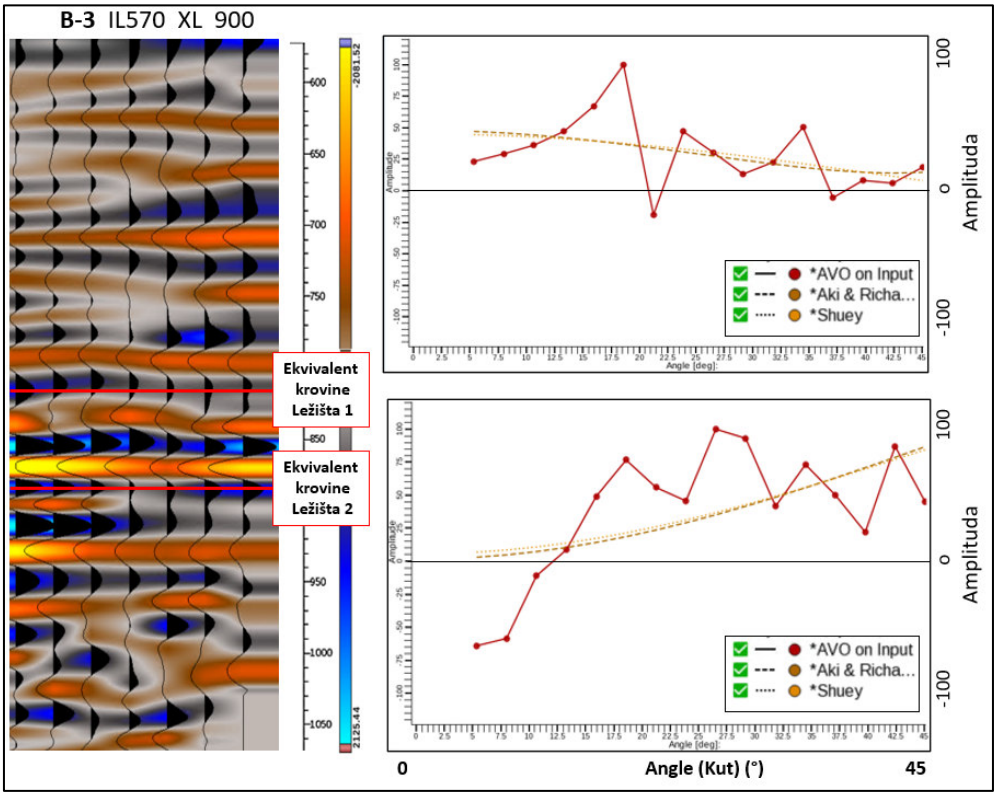
Nakon toga napravljeni su *Angle gatheri* do 45 stupnjeva te je prikazano ponašanje amplitude. Zanimljivo je da na bušotini B-1 koja je pozitivna amplitude pokazuju i dalje opći trend porasta dok na bušotinama B-2 i B-3 opći trend počinje lagano opadati bez obzira što na ulazu i vizualno može izgledati kao da amplitude rastu (**Slike 8.4.4.4, 8.4.4.5 i 8.4.4.6**).



Slika 8.4.4.4.. Angle gather na bušotini B-1 te pripadajući dijagrami ponašanja amplitude u odnosu na kut od 45° za za krovine Ležišta 1 i Ležišta 2

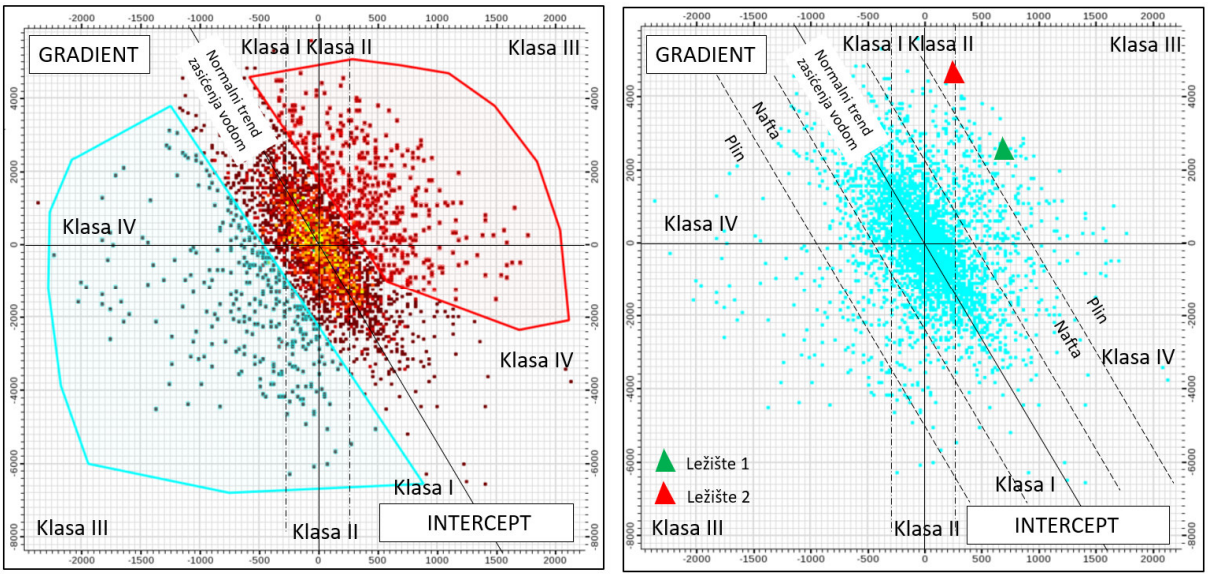


Slika 8.4.4.5. Angle gather na bušotini B-2 te pripadajući dijagrami ponašanja amplitude u odnosu na kut od 45° za ekvivalente krovina Ležišta 1 i Ležišta 2

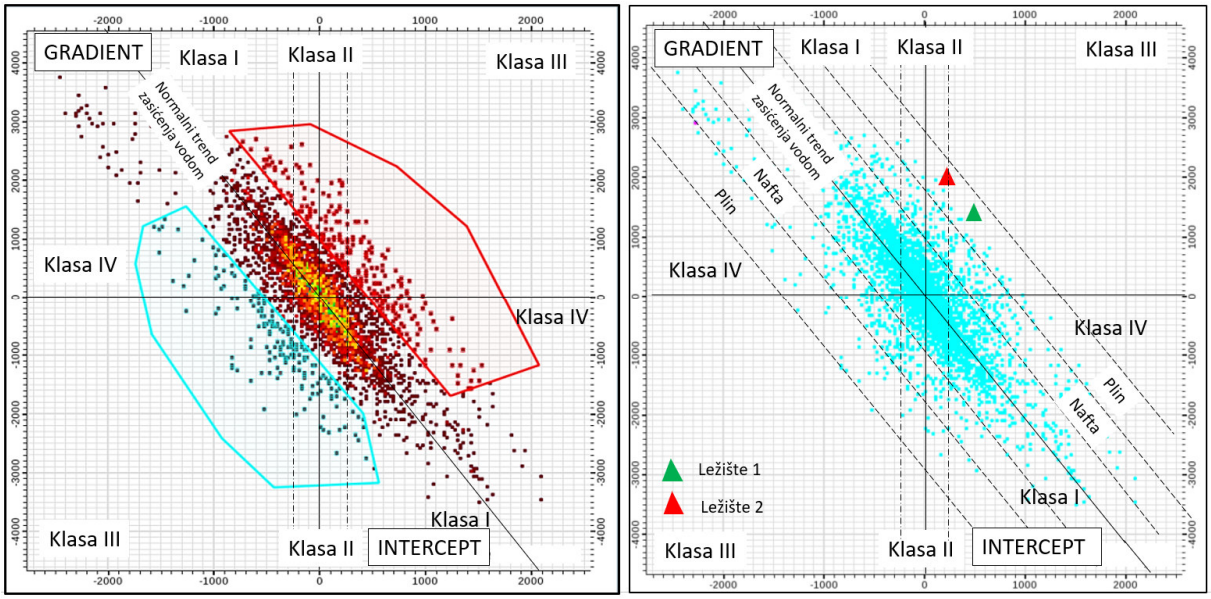


Slika 8.4.4.6. Angle gather na bušotini B-3 te pripadajući dijagrami ponašanja amplitude u odnosu na kut od 45 za za ekvivalente krovina Ležišta 1 i Ležišta 2

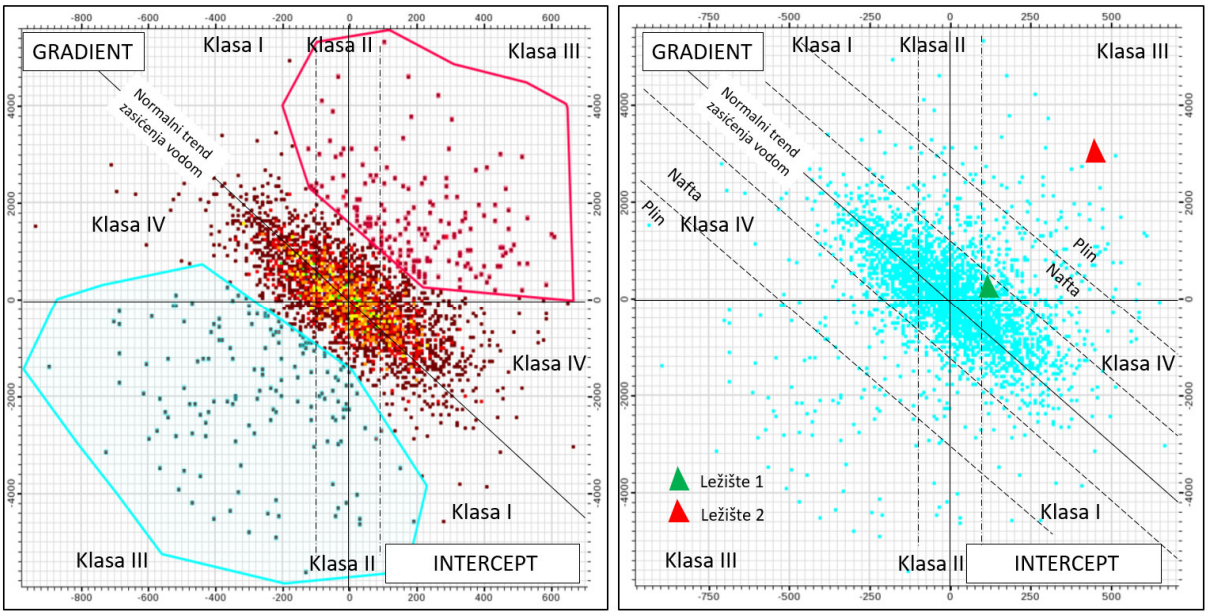
Napravljena usporedba križnih dijagrama *Intercept/Gradient* pomoću *Angle gathera* sa *offsetima* do 30 i do 45 stupnjeva za sve tri bušotine, te je također na bušotini B-1 ekstrahirana AVO anomalija unutar prozora koji je uzet za analizu prilikom kvantificiranja točkastih podataka križnog dijagrama na oba ležišta. Na taj način inače možemo korelirati anomalije ovisno o vrsti zasićenja, te vidjeti točno na bušotini na krovini ležišta u kojoj je klasi točkasti podatak. Na slici **8.4.4.7.** lijevo vidi se veće raspršenje i veće vrijednosti gradijenta te jača anomalija dok se na slici 8.4.4.8. kada su za računanje upotrjebljeni *gatheri* do 35 stupnjeva vidi manje raspršenje i manje vrijednosti gradijenta. Položaji točkastih podataka ostali su isti, no na ovaj način se željelo prikazati koliko je bitno pripremiti podatke prilikom ulaza u samo AVO analizu jer je moguće dobiti pogrešan ili zbunjujući rezultat. Isti način je primijenjen na bušotine B-2 i B-3 te prikazan na slikama **8.4.4.9., 8.4.4.10., 8.4.4.11.** i **8.4.4.12.** Vidljivo je veće raspršenje i veća anomalija na kutovima do 30 stupnjeva. Na ekvivalentu Ležišta 1 na obje negativne bušotine ekstrahirani točkasti podatak AVO anomalije nalazi se u zoni zasićenja vodom. Na Ležištu 2 nalazi se u zoni zasićenja plinom no karotažna mjerenja detektirala su pojave plina u malim koncentracijama. U svakom slučaju ove metode kao i način prikaza mogu nam znatno pomoći pri otkrivanju novih područja mogućeg zasićenja ugljikovodicima.



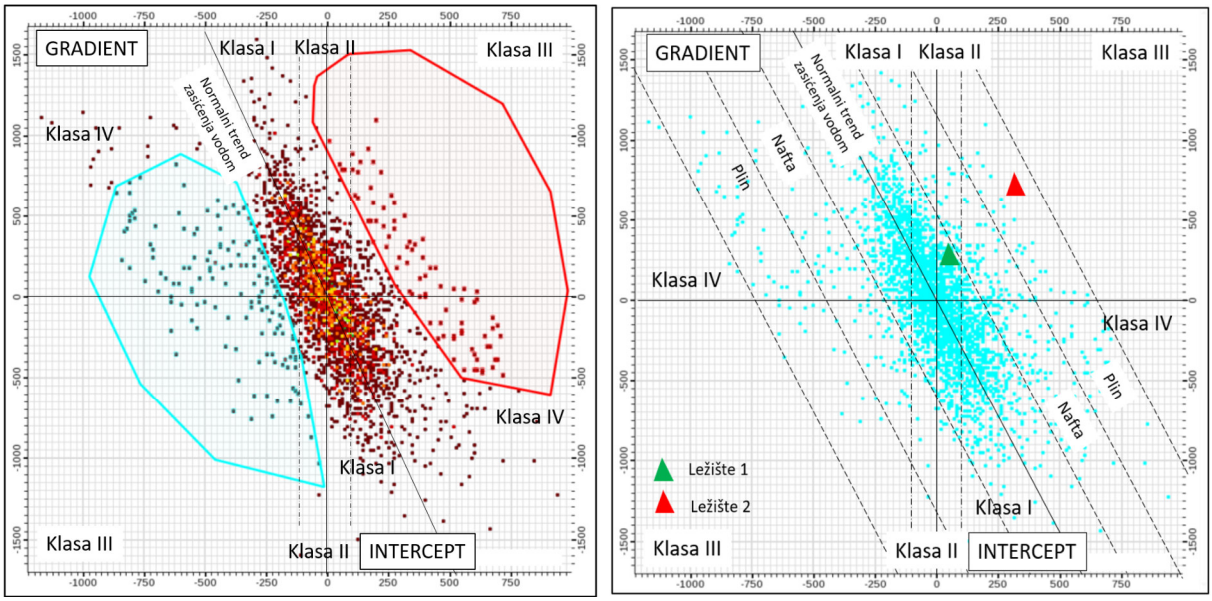
Slika 8.4.4.7. AVO križni dijagram Intercept/Gradient sa zaokruženom anomalijom u sve četiri klase (lijevo) i AVO križni dijagram s položajima anomalije pojedinih bušotina izdvojene kao točkasti podatak (desno) na bušotini B-1 u slučaju kada su se koristili kutovi do 30 stupnjeva



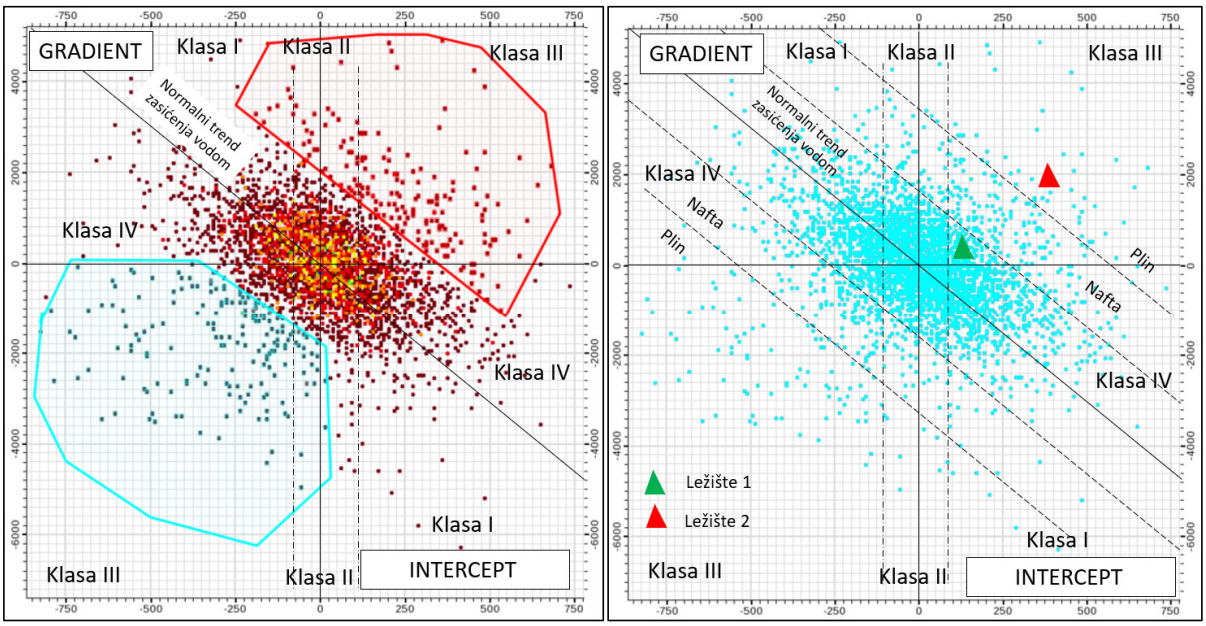
Slika 8.4.4.8. AVO križni dijagram Intercept/Gradient sa zaokruženom anomalijom u sve četiri klase (lijevo) i AVO križni dijagram s položajima anomalije pojedinih bušotina izdvojene kao točkasti podatak (desno) na bušotini B-1 u slučaju kada su se koristili kutovi do 45 stupnjeva



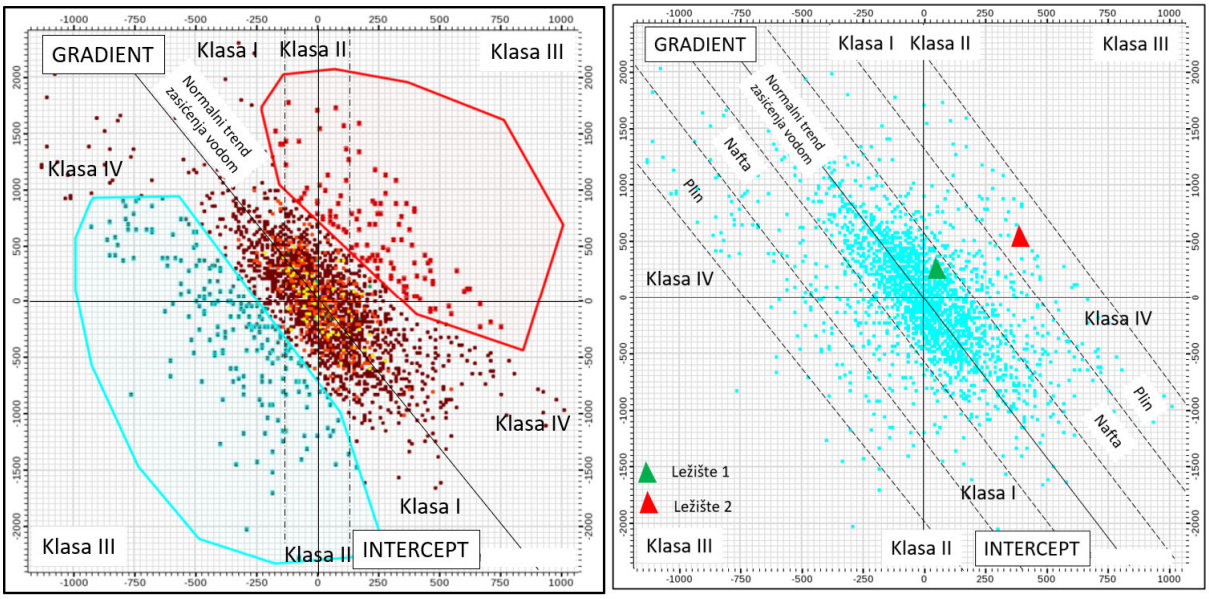
Slika 8.4.4.9. AVO križni dijagram Intercept/Gradient sa zaokruženom anomalijom u sve četiri klase (lijevo) i AVO križni dijagram s položajima anomalije pojedinih bušotina izdvojene kao točkasti podatak (desno) na bušotini B-2 u slučaju kada su se koristili kutovi do 30 stupnjeva



Slika 8.4.4.10. AVO križni dijagram Intercept/Gradient sa zaokruženom anomalijom u sve četiri klase (lijevo) i AVO križni dijagram s položajima anomalije pojedinih bušotina izdvojene kao točkasti podatak (desno) na bušotini B-2 u slučaju kada su se koristili kutovi do 45 stupnjeva



Slika 8.4.4.11. AVO križni dijagram Intercept/Gradient sa zaokruženom anomalijom u sve četiri klase (lijevo) i AVO križni dijagram s položajima anomalije pojedinih bušotina izdvojene kao točkasti podatak (desno) na bušotini B-3 u slučaju kada su se koristili kutovi do 30 stupnjeva

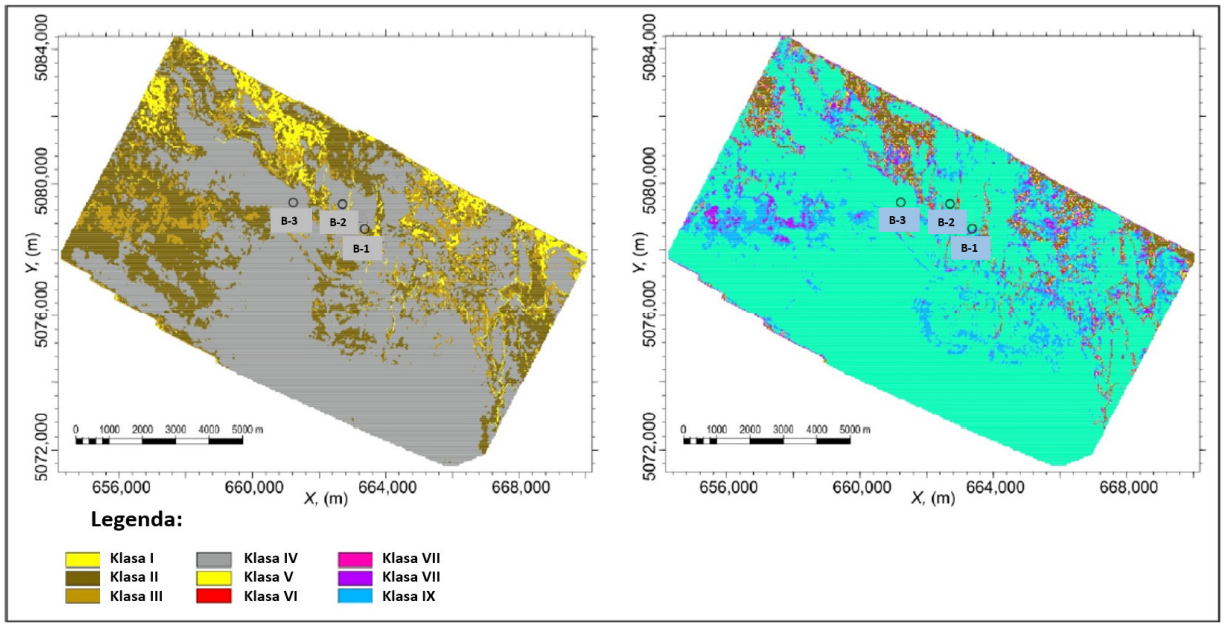


Slika 8.4.4.12. AVO križni dijagram Intercept/Gradient sa zaokruženom anomalijom u sve četiri klase (lijevo) i AVO križni dijagram s položajima anomalije pojedinih bušotina izdvojene kao točkasti podatak (desno) na bušotini B-3 u slučaju kada su se koristili kutovi do 45 stupnjeva

8.5 NEURONSKE MREŽE

8.5.1 SAMOORGANIZIRAJUĆE UMJETNE NEURONSKE MREŽE (SOANN)

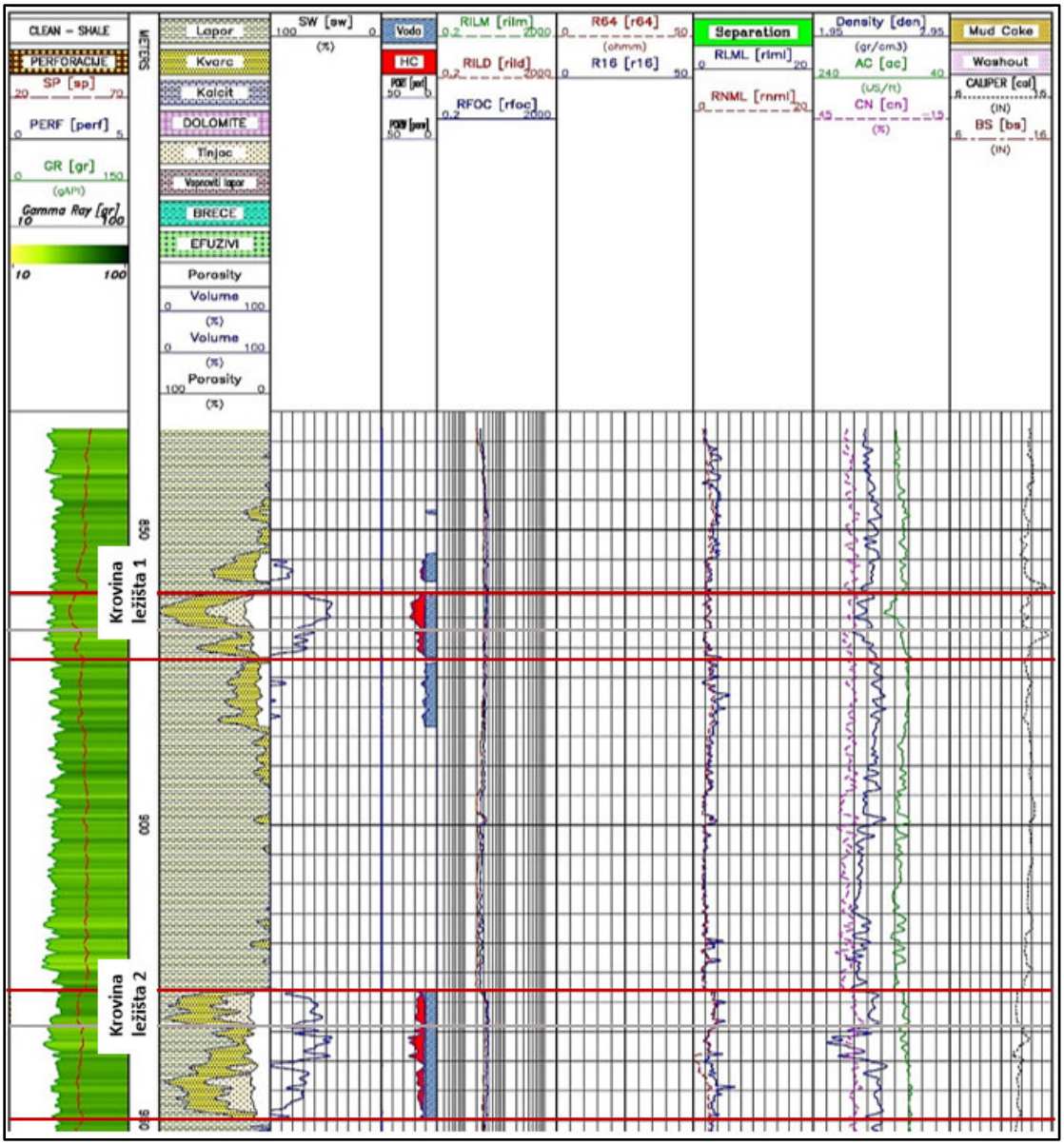
Jedna od primjena SOANN -a je analiza klastera pomoću Kohonen-ovih mreža kao predviđanja litološkog sastava iz različitih geofizičkih podataka. Ranija istraživanja u sličnim stratigrafskim intervalima bila su ograničena na nadzirane ANN -ove u svrhu predviđanja litololoških karakteristika i zasićenja ugljikovodicima. SOANN analiza provedena je pomoću softvera TIBCO STATISTICA duž krovine Ležišta 1 koristeći PSTM 3D seizmički volumen kako bi se prepoznali obrasci koji bi mogli implicirati varijacije litologije, anomalije uzrokovane eventualnim zasićenjem plinom ili strukturne elemente. Ekstrahirano je gotovo 170 000 točaka podataka uzduž horizonta krovine Ležišta 1 koristeći pridružene vrijednosti seizmičkih atributa trenutne amplitude, trenutne frekvencije, RMS amplitude, kaosa, kosinusa faze i kombiniranog seizmičkog atributa *Sweetness*. Ograničenje procesa učenja postavljeno je na 1000 ponavljanja korištenjem Kohonen-ovih mreža. Dobivena su dva rezultata topoloških klaster mapa dimenzija 2x2 i 3x3 polja ili kategorija napravljena za vizualizaciju značajki duž horizonta krovine Ležišta 1. Rezultati procesa učenja pokazuju relativno mali broj pogrešaka kod klasifikacije seizmičkih podataka unutar SOANN kategorija s 2x2 arhitekturom neuronske mreže što je rezultiralo dijeljenjem podatka na četiri klase i 3x3 arhitekturu. Podatkovne točke s pridruženim klasama importirane su u programski paket Petrel gdje su vrijednosti pridružene ćelijama unutar jednostavnog modela koji predstavlja horizont krovine Ležišta 1.



Slika 8.5.1.1.: SOANN mape 2x2 topološke distribucije (lijevo) i 3x3 topološke distribucije (desno) duž horizonta krovine Ležišta 1 (preuzeto i modificirano iz Ružić & Cvetković, 2021)

8.5.2 ANALIZE KAROTAŽNIH KRIVULJA POTREBNIH ZA SEIZMIČKU INVERZIJU POMOĆU NEURONSKIH MREŽA

Na **Slici 8.5.2.1.** je prikazana analiza elektrokarotažnih (EK) dijagrama bušotine B- 1 (Preuzeto iz tehničke dokumentacije INA d.d.).



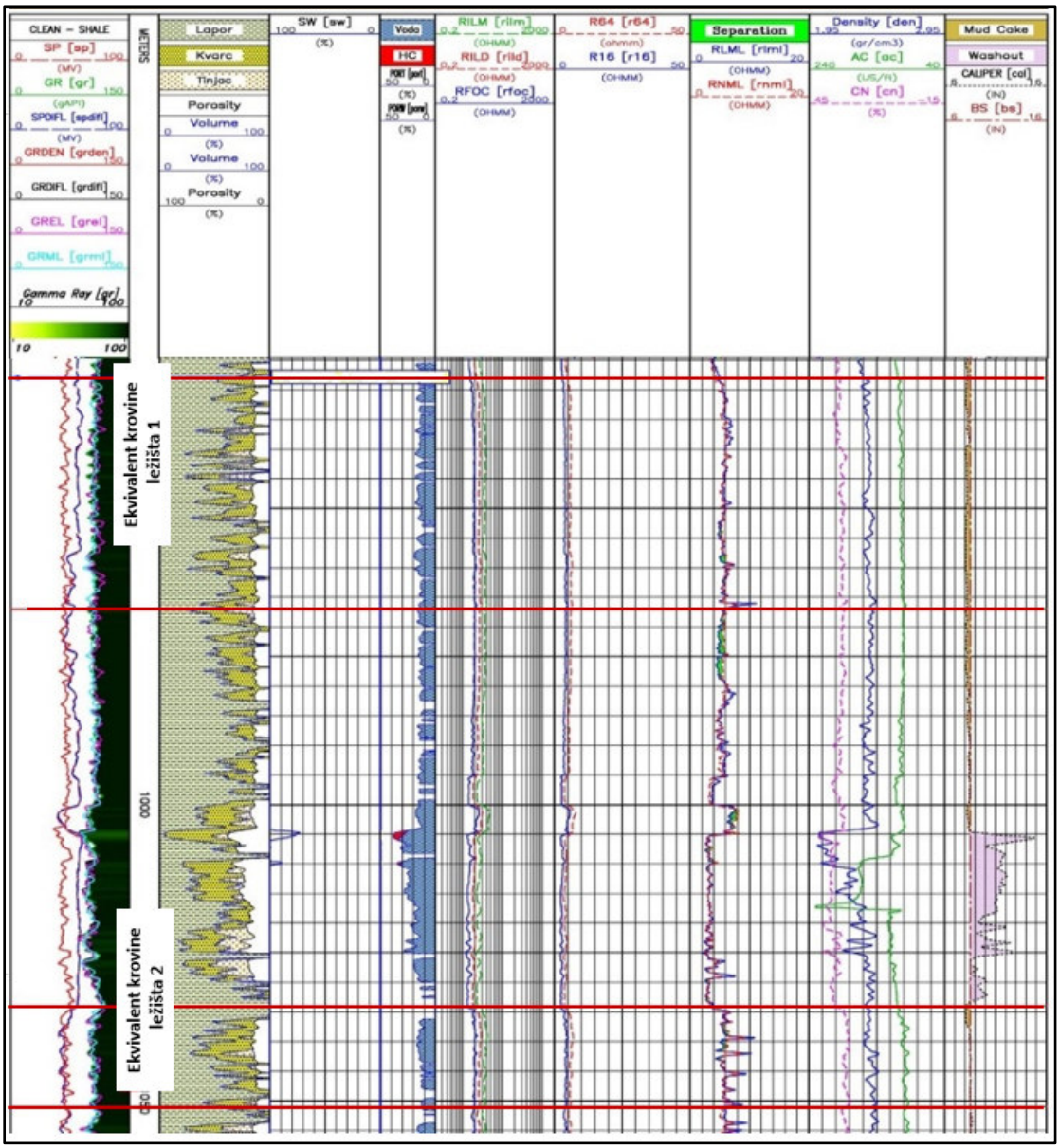
Slika 8.5.2.1.: Analiza EK dijagrama za bušotinu B -1

(Preuzeto iz Tehničke dokumentacije INA d.d.)

Unutar intervala Ležišta 1 koji se nalazi na dubini od 854 – 871 metara evidentirane su pojave novih plinova i to : NP= 18 % na 862 m i NP= 56 % na 864 m.

Interval Ležišta 2 je na dubini od 928 do 934 metara i ima registriranu pojavu novog plina NP= 78 % na 928 metra.

Na **slici 8.5.2.2.** je prikazana analiza EK dijagrama bušotine B-2. U ovoj bušotini registrirano je pet pojava novih plinova duž cijelog kanala bušotine, ali u vrlo malim koncentracijama. Litostratigrafski ekvivalent Ležišta 1 je zalaporen, i nalazi se na dubini od 928 do 967 metara. Ekvivalent Ležišta 2 na dubini od 1034 do 1051 m je zavodnjen i registrirana je samo jedna pojava novog plina u vrlo malom postotku NP= 1,1 % na 1034 m.

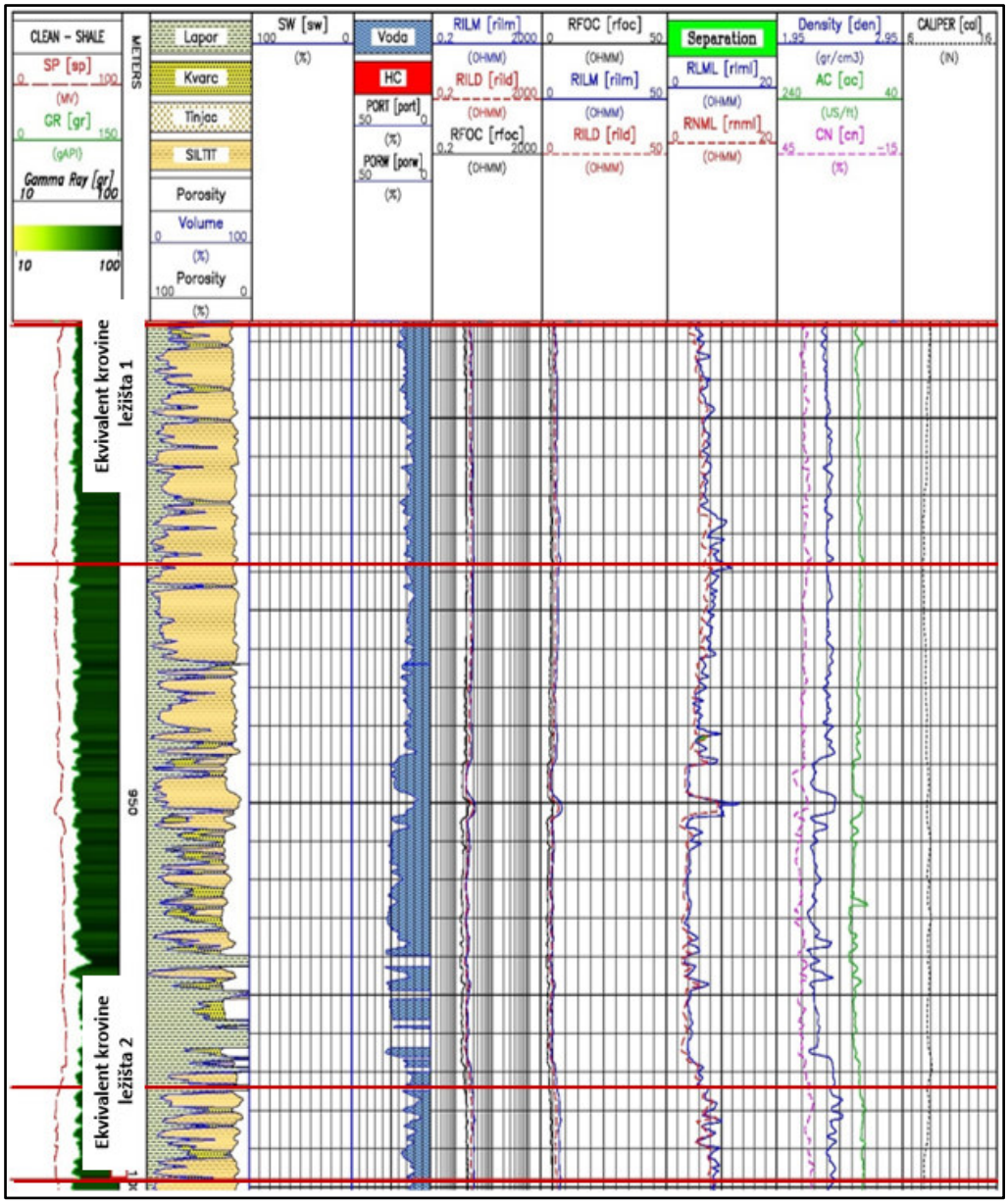


Slika 8.5.2.2.: Analiza EK dijagrama za bušotinu B -2

(Preuzeto iz Tehničke dokumentacije INA d.d.)

Na **Slici 8.5.2.3.** je prikazana analiza EK dijagrama bušotine B -3. Na ovoj bušotini detektirano je iz plinske karotaže osam pojava novog plina duž cijelog kanala bušotine također u vrlo niskim koncentracijama. Litostratigrafski ekvivalent Ležišta 1 je na dubini od 888 do 919 m i

ima pojava novih plinova NP=1,4 % na 895 m. Ekvivalent Ležišta 2 od 987 do 999 metra ima pojave novih plinova NP= 6,95 % na 987 metara.



Slika 8.5.2.3.: Analiza EK dijagrama za bušotinu B -3

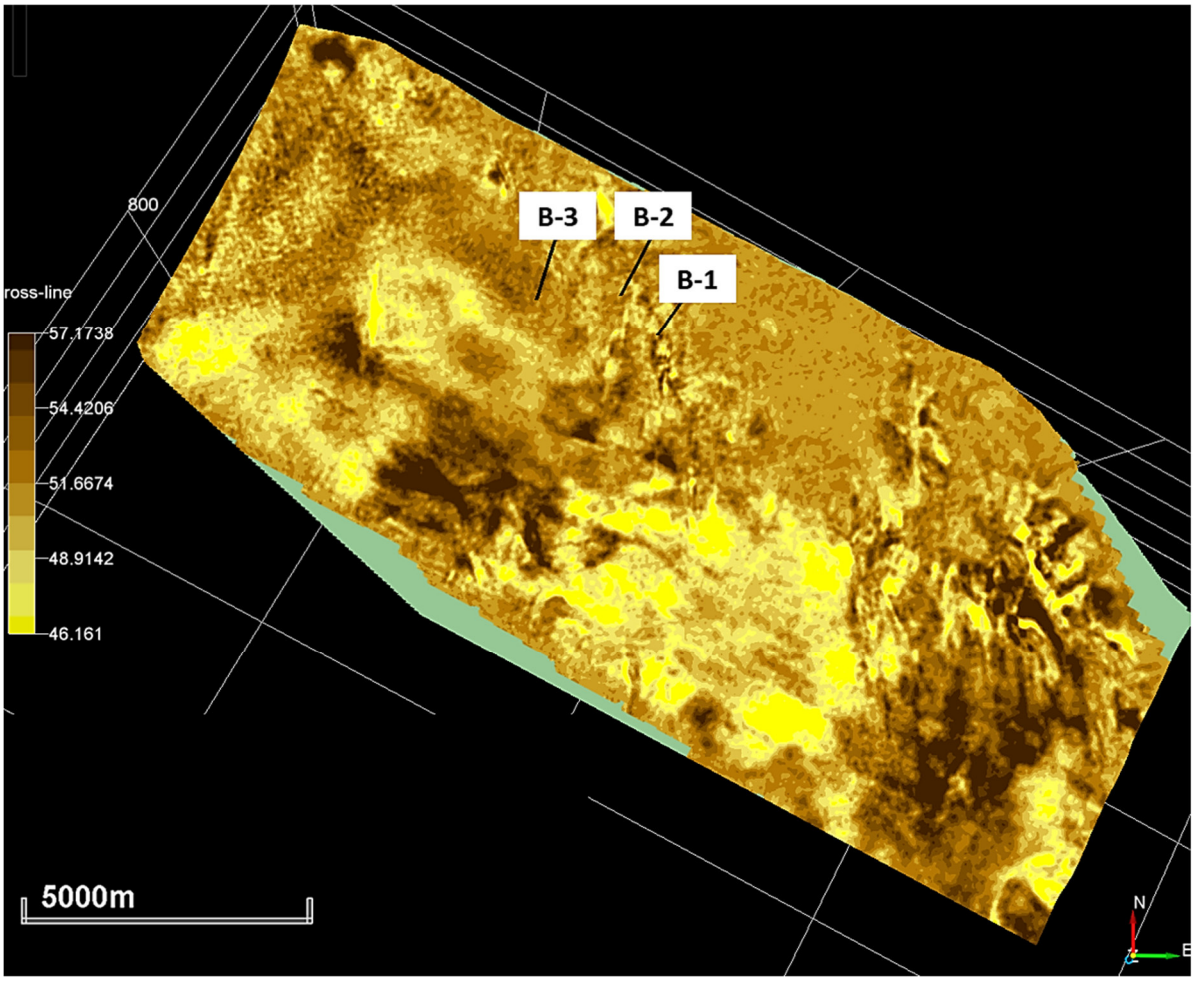
(Preuzeto iz Tehničke dokumentacije INA d.d.)

8.5.2.1 PREDVIĐANJE VRIJEDNOSTI SPONTANOG POTENCIJALA

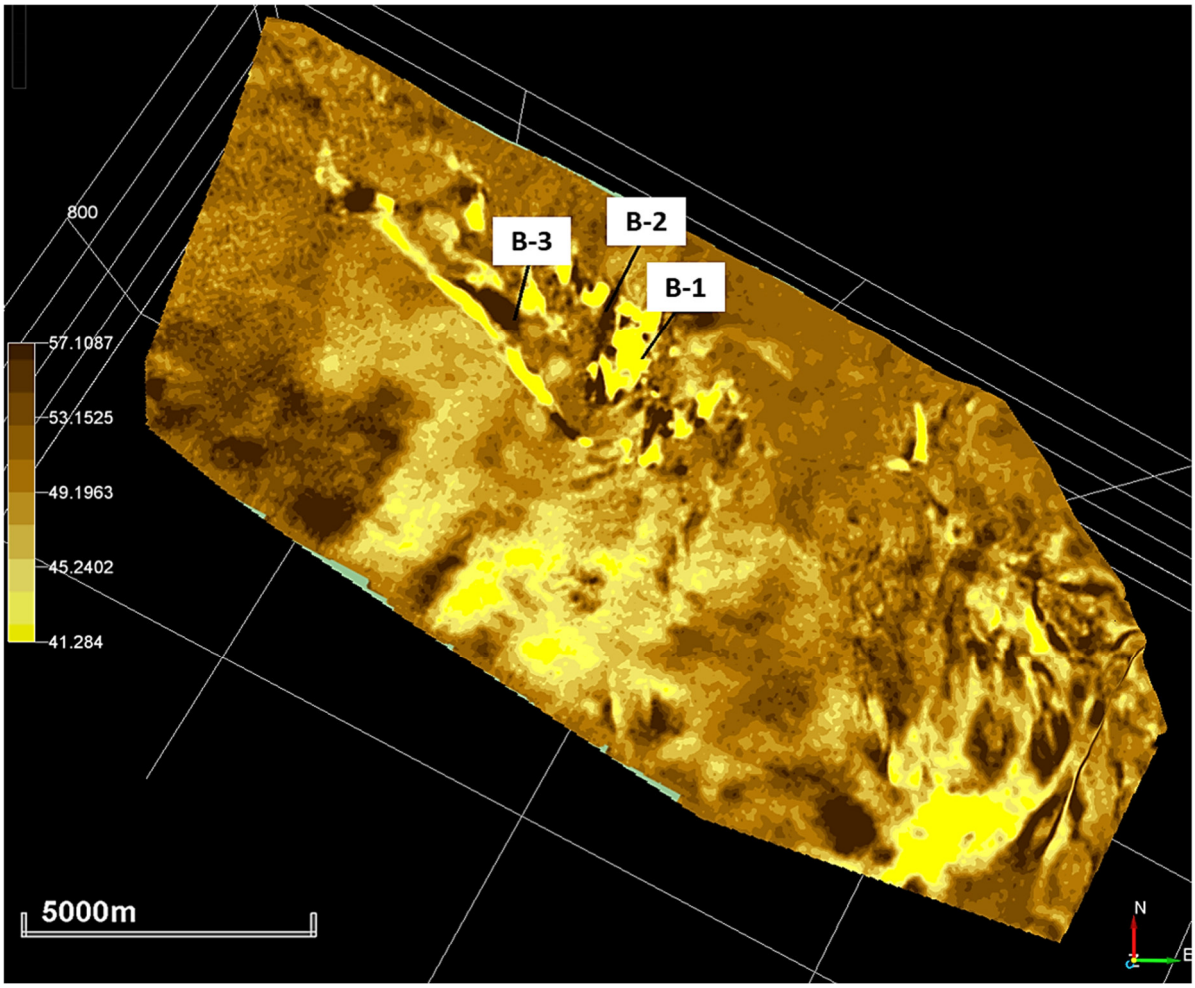
Niže vrijednosti spontanog potencijala pokazuju propusne stijene i približavaju se osnovnoj liniji čistog pješčenjaka. Cijelo ovo područje u odabranim nivoima zapravo karakterizira izmjena tankih slojeva pješčenjaka i lapora i uzorak je rađen na tri dostupne bušotine (veći broj bušotina daje točnije rezultate) tako da je predviđanje točnije u užem krugu oko bušotina uzetih za analizu. No na **Slici 8.5.2.1.1.** se može vidjeti da se bušotine koje su bez pojava ugljikovodika (B-3 i B-2) po nivou krovine Ležišta 1 nalaze u zoni viših vrijednosti spontanog potencijala, te se pomiču prema liniji nepropusnih naslaga, a bušotina B-1 koja je pozitivna se nalazi u zoni nižih vrijednosti odnosno pomiče se prema liniji propusnih naslaga. Po nivou Ležišta 2 (**Slika 8.5.2.1.2.**) razlika je slabije vidljiva.

Krivulje spontanog potencijala prije nego što su korištene za analizu su uređene, tako što su uklonjeni preveliki pikovi (*despike*) i zaglađene (*smooth*). Predikcija je napravljena na seizmičkom volumenu *Raw* (seizmički volumen koji nije filtriran nakon postupka migracije) kocke na kojoj je izračunata ukupna energija (*Energy + Raw*). Najčešća greška koja se računa kod neuronskih mreža je srednja vrijednost kvadrata pogreške (*Root mean square error*) na uzorku za validaciju kao rezultat kojim se tumači uspješnost i korisnost u primjeni za predviđanje na budućim podacima. Broj ulaznih varijabli kod ove analize bio je 15993 s nula pogrešnih ulaznih vektora. Srednja vrijednost kvadrata pogreške iznosi 0,9.

Analogno u kombinaciji sa drugim metodama i analizama ostalih atributa možemo zaključivati o širem području analiziranog lokaliteta.



Slika 8.5.2.1.1.: Predviđanje vrijednosti spontanog potencijala pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u žutoj boji prikazuju propusne stijene, a više vrijednosti u smeđoj boji nepropusne stijene)

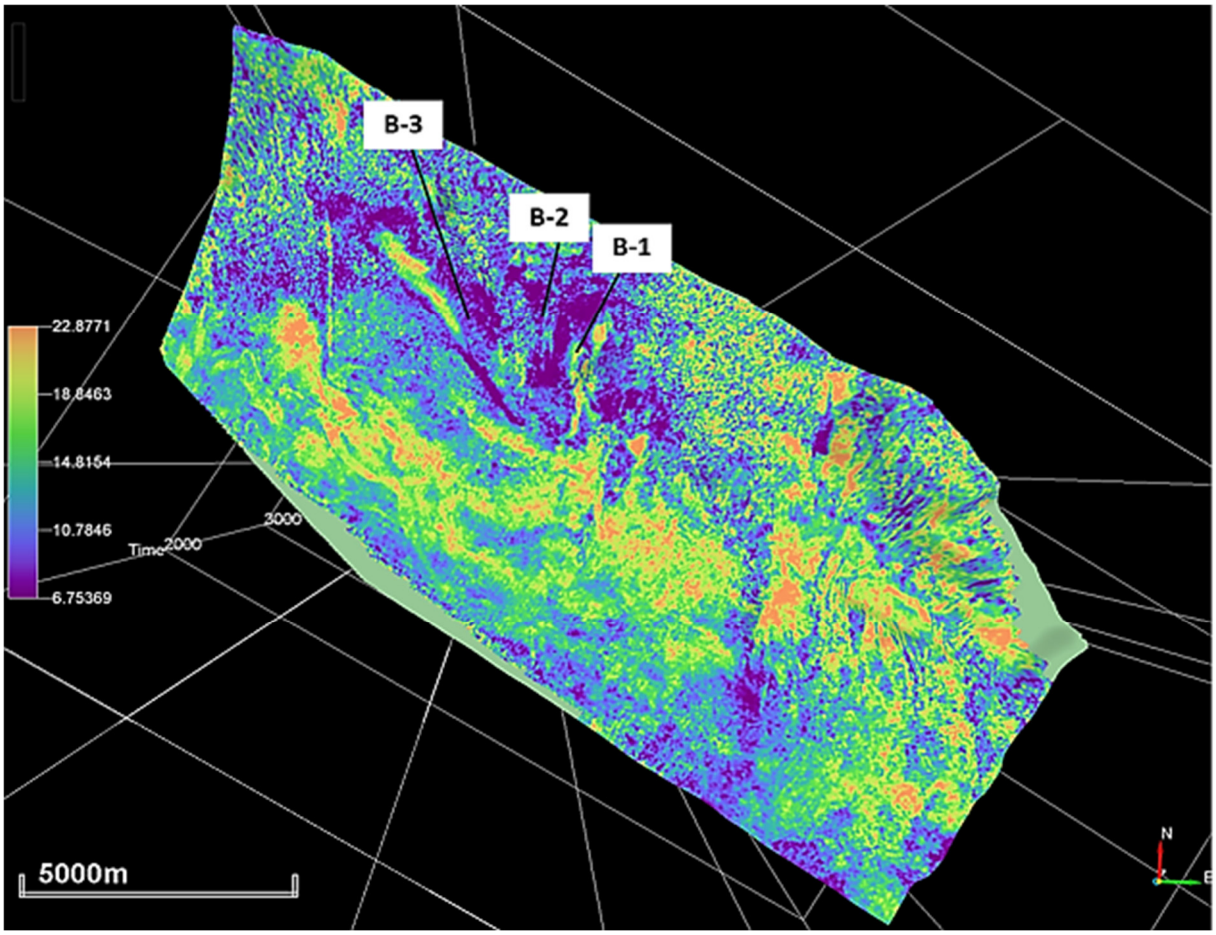


Slika 8.5.2.1.2.: Predviđanje karotažnih krivulja spontanog potencijala pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u žutoj boji prikazuju propusne stijene, a više vrijednosti u smeđoj boji nepropusne stijene)

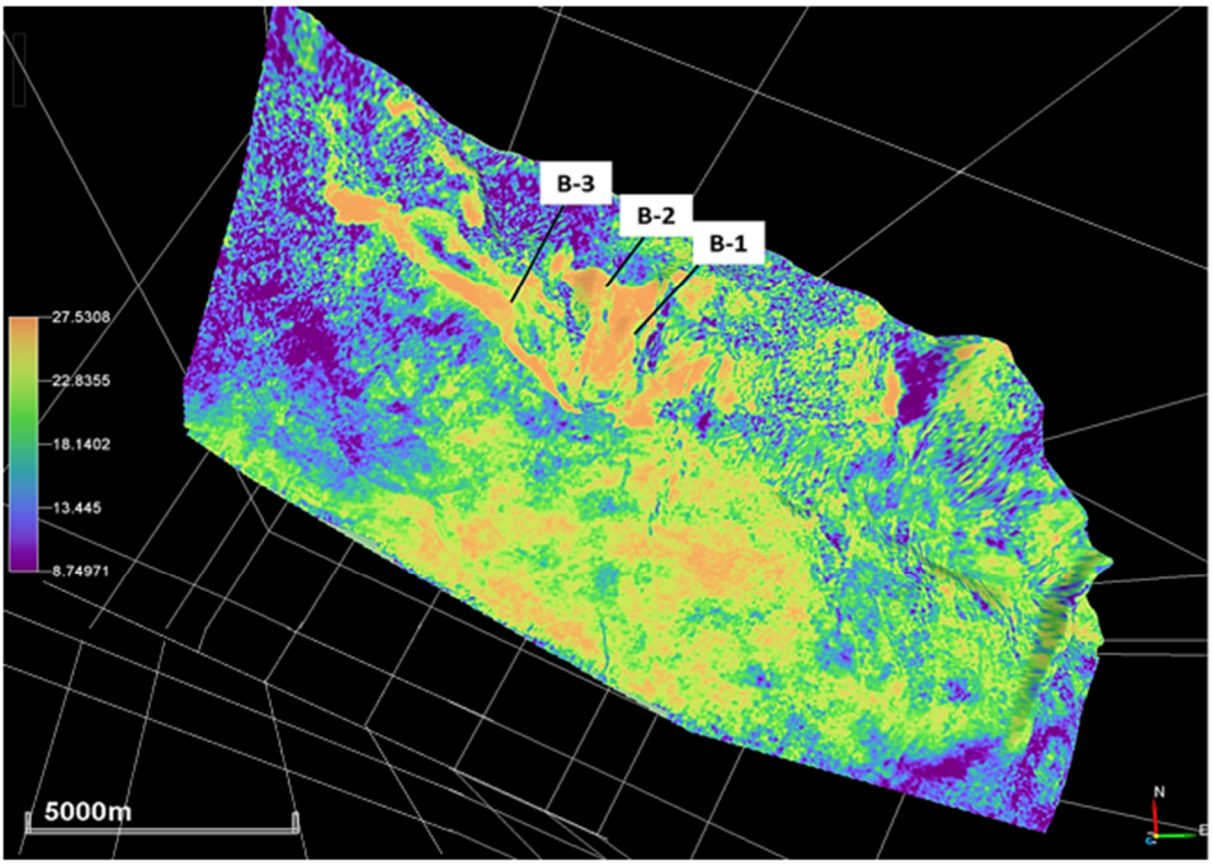
8.5.2.2 PREDVIĐANJE VRIJEDNOSTI OTPORNOSTI

Napravljena je seizmička inverzija pomoću neuronskih mreža predikcijom logova otpora. Krivulje su prije analize također uređene (uklonjene su anomalne amplitude – *despike i* izglađene - *smooth*). Na **Slici 8.5.2.2.1**. je prikazana predikcija logova otpora po nivou krovine Ležišta 1, te je jasno vidljivo povećanje otpora u zoni gdje se nalazi pozitivna bušotina B -1 dok su negativne bušotine u zoni niskih otpornosti.

Po nivou krovine Ležišta 2 (**Slika 8.5.2.2.2.**) razlike su također slabije vidljive, bušotina B-2 je u zoni niskih otpornosti, bušotina B-3 je u zoni viših, a B-1 u zoni još malo viših otpornosti. Kod bušotine B-3 to se može objasniti većim udjelom pješčanih proslojaka i udjelom plina većim od 5 %. Broj ulaznih varijabli kod ove analize bio je 18772 s nula pogrešnih ulaznih vektora. Srednja vrijednost kvadrata pogreške iznosi 0,9.



Slika 8.5.2.2.1.: Predviđanje vrijednosti otpornosti(B-1, B-2, B-3) pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u ljubičastoj boji prikazuju niže otpornosti, a više vrijednosti u narančastoj boji više otpornosti. Pješčenjaci i ugljikovodici odlikuju se visokim otpornostima)



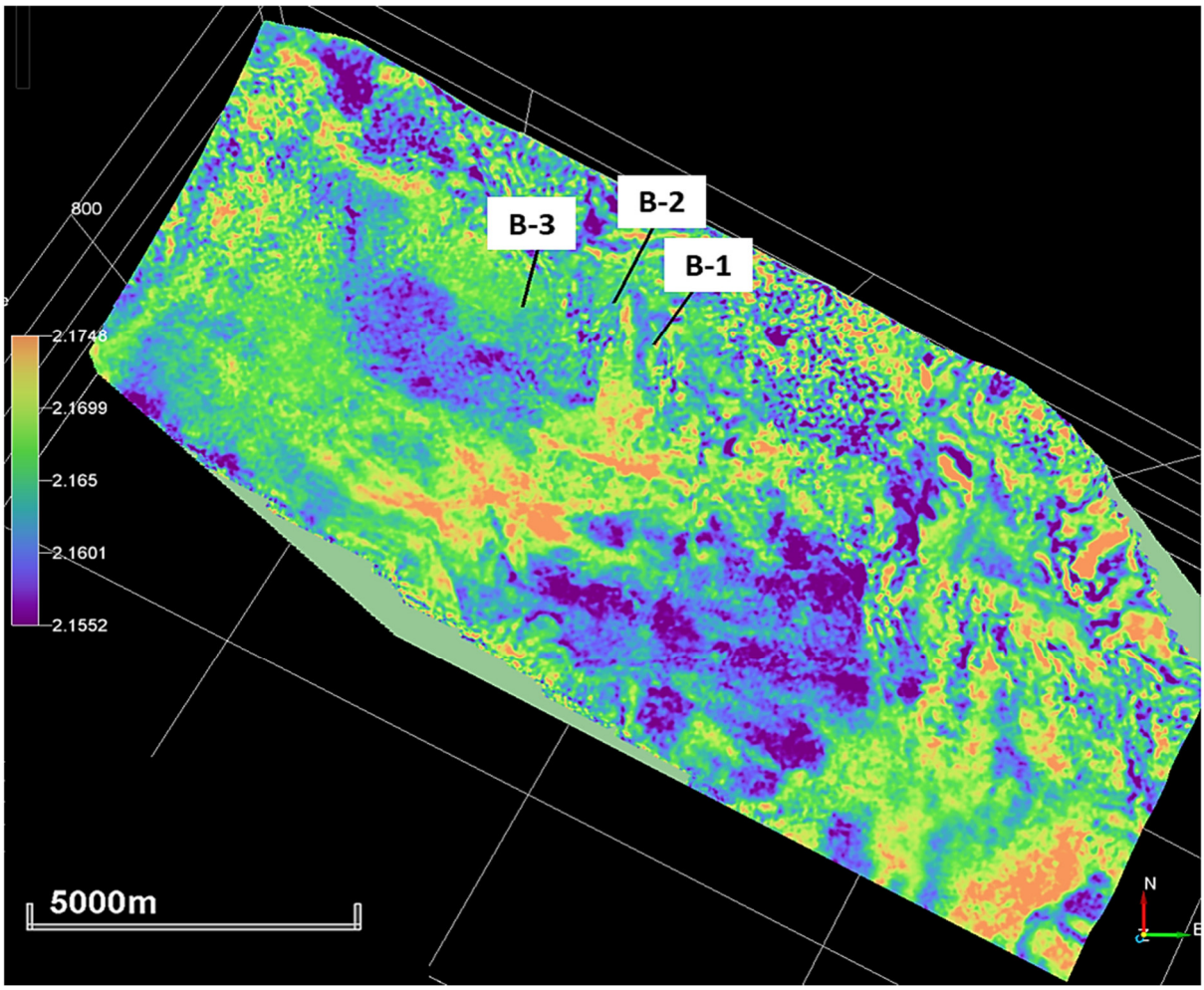
Slika 8.5.2.2.1: Predviđanje karotažnih krivulja otpornosti (B-1, B-2, B-3) pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u ljubičastoj boji prikazuju niže otpornosti, a više vrijednosti u narančastoj boji više otpornosti. Pješčenjaci i ugljikovodici odlikuju se visokim otpornostima)

8.5.2.3 PREDVIĐANJE VRIJEDNOSTI GUSTOĆE

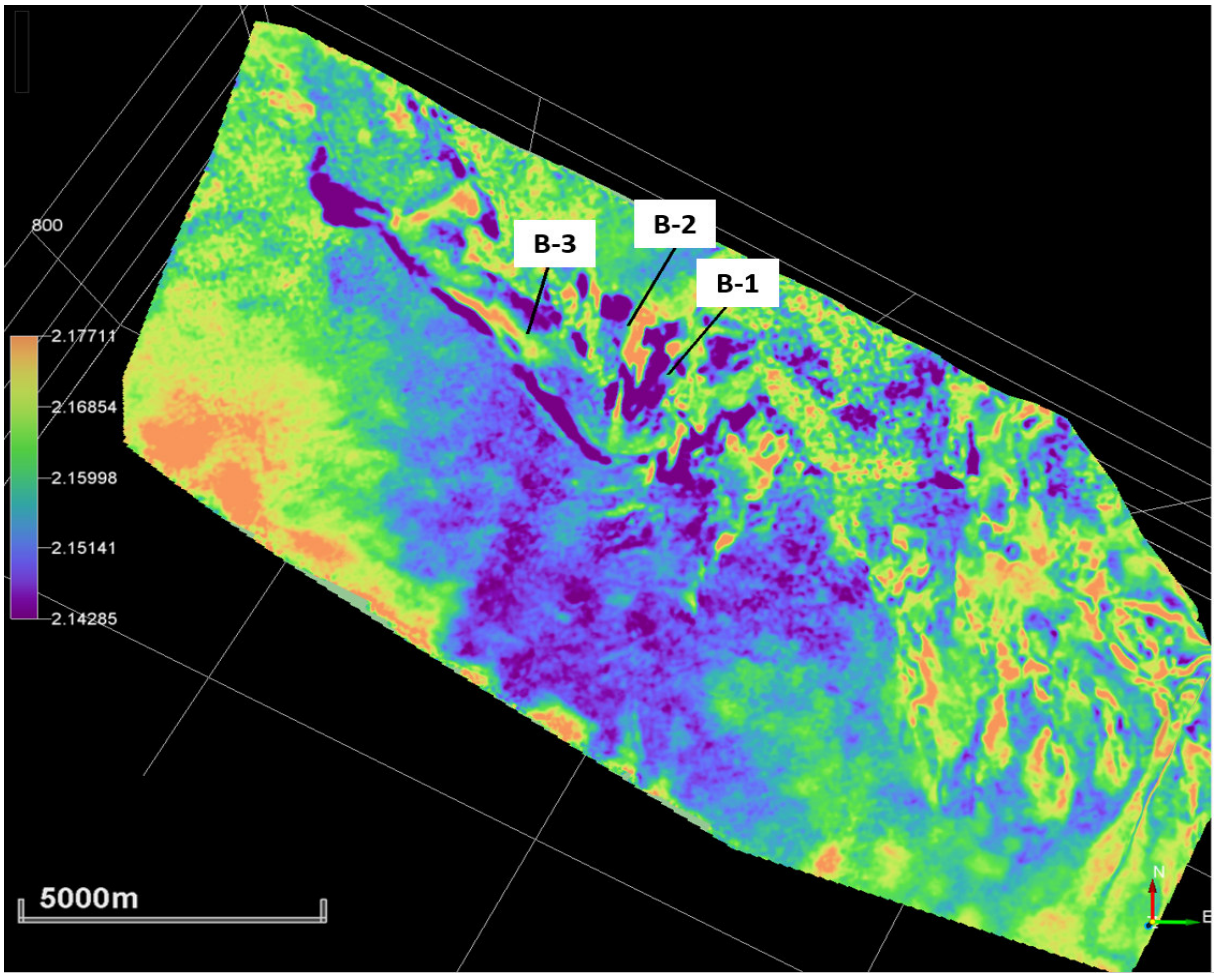
Plin izrazito smanjuje gustoću, pa će se na karotažnoj krivulji vidjeti nagli pomak ulijevo. Pješčenjaci, voda i tekući ugljikovodici također imaju manje gustoće u odnosu na stijene drugačijeg litološkog sastava.

Na **Slici 8.5.2.3.1.** po nivou Ležišta 1 je vidljivo da se bušotina B -1 koja je pozitivna nalazi u zoni nižih gustoća. Druge dvije bušotine smještene su u zonama većih gustoća. Po nivou krovine Ležišta 2 razlika je manje uočljiva premda su niže gustoće u blizini B-1, a u slučaju bušotine B-3 više vrijednosti gustoće vjerojatno možemo pripisati većem udjelu pješčanih proslojaka. Na **Slici 8.5.2.3.2.** je prikazana predikcija vrijednosti gustoće po horizontu ispod nivoa Pepelana pješčenjaka.

Broj ulaznih varijabli kod ove analize bio je 11668 s nula pogrešnih ulaznih vektora. Srednja vrijednost kvadrata pogreške iznosi 0,6. Područja smanjenih gustoća uzeta su u obzir analizom ostalih metoda.



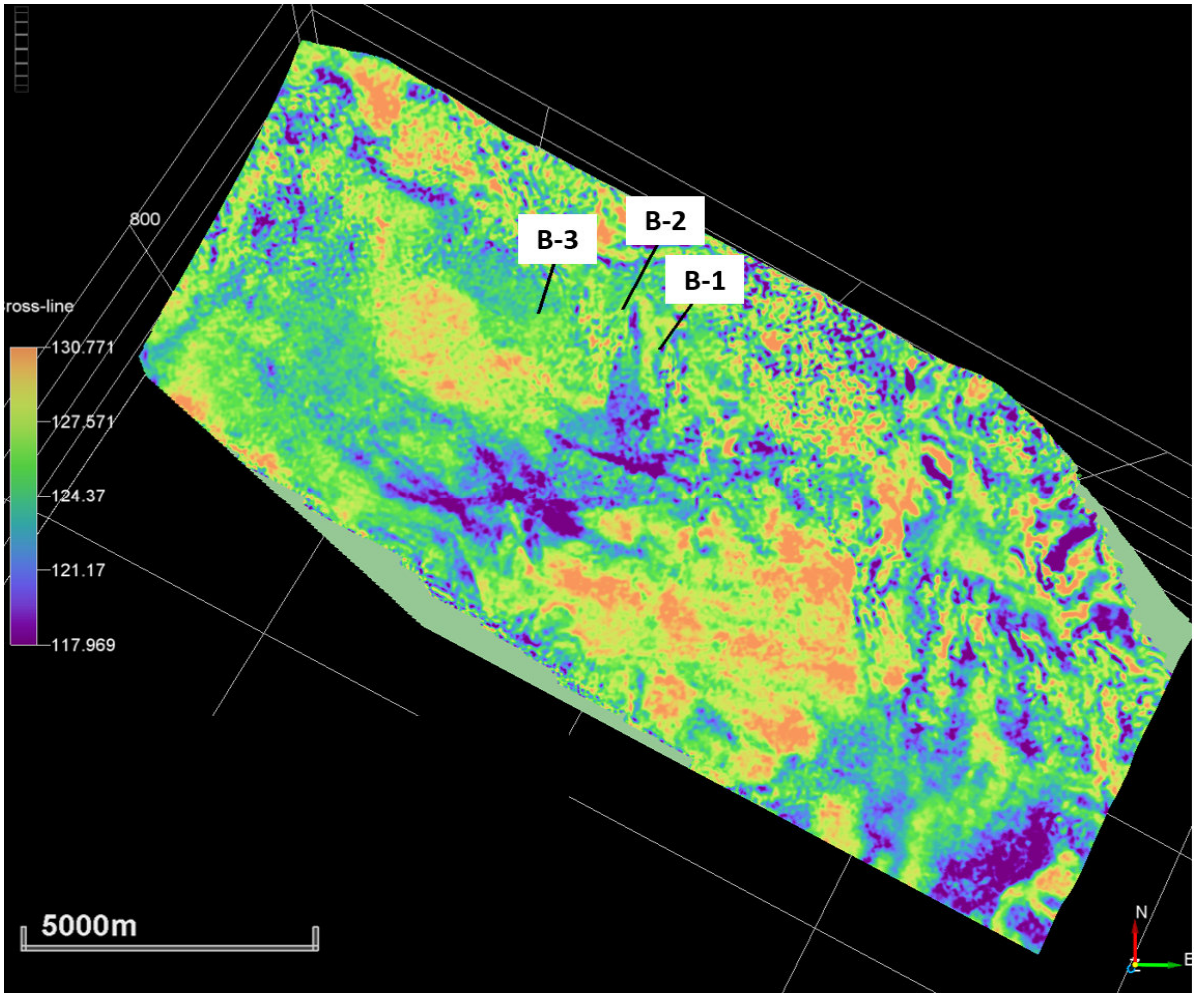
Slika 8.5.2.3.1. Predviđanje vrijednosti gustoće (B-1, B-2, B-3) pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u ljubičastoj boji prikazuju niže gustoće, a više vrijednosti u narančastoj boji veće gustoće. Pješčenjaci, voda i ugljikovodici smanjuju gustoću)



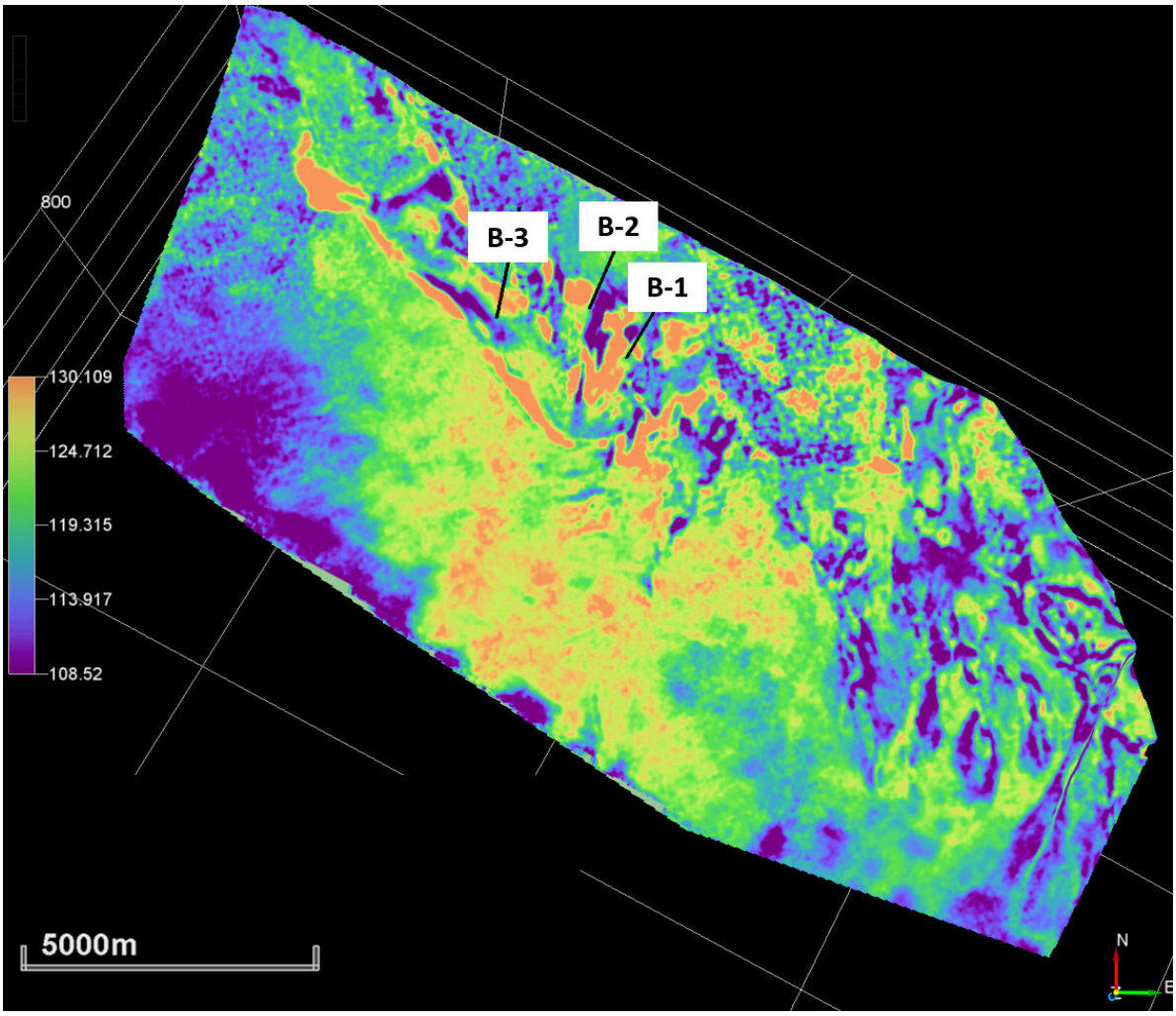
Slika 8.5.2.3.2.: Predviđanje vrijednosti gustoće (B-1, B-2, B-3) pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u ljubičastoj boji prikazuju niže gustoće, a više vrijednosti u narančastoj boji veće gustoće. Pješčenjaci, voda i ugljikovodici smanjuju gustoću)

8.5.2.4 PREDVIĐANJE VRIJEDNOSTI BRZINA

Napravljeno je i predviđanje brzina –*Sonic slowness* na nivoima krovine oba ležišta. Obzirom da su vrijednosti izražene kao 1/v odnosno u µs/m, na slikama mjesta koja su prikazana višim vrijednostima, zapravo su mjesta nižih brzina i obrnuto. U ovom slučaju predikcija u slučaju krovine Ležišta 1 nije pokazala jasnu vidljivost no po krovini Ležišta 2 te njegovih litostratigrafskih ekvivalenata može se uočiti da se bušotina B-1 nalazi u zoni nižih brzina (**Slike 8.5.2.4.1 i 8.5.2.4.2**). Obzirom da prisustvo plina utječe na smanjenje brzine seizmičkih valova ova vrsta seizmičke inverzije se također može koristiti prilikom interpretacije.



Slika 8.5.2.4.1: Predviđanje vrijednosti brzina- Sonic (B-1, B-2, B-3) pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u ljubičastoj boji prikazuju više brzine, a više vrijednosti u narančastoj boji niže brzine jer se radi o vrijednostima 1/v. Ugljikovodici smanjuju brzinu)



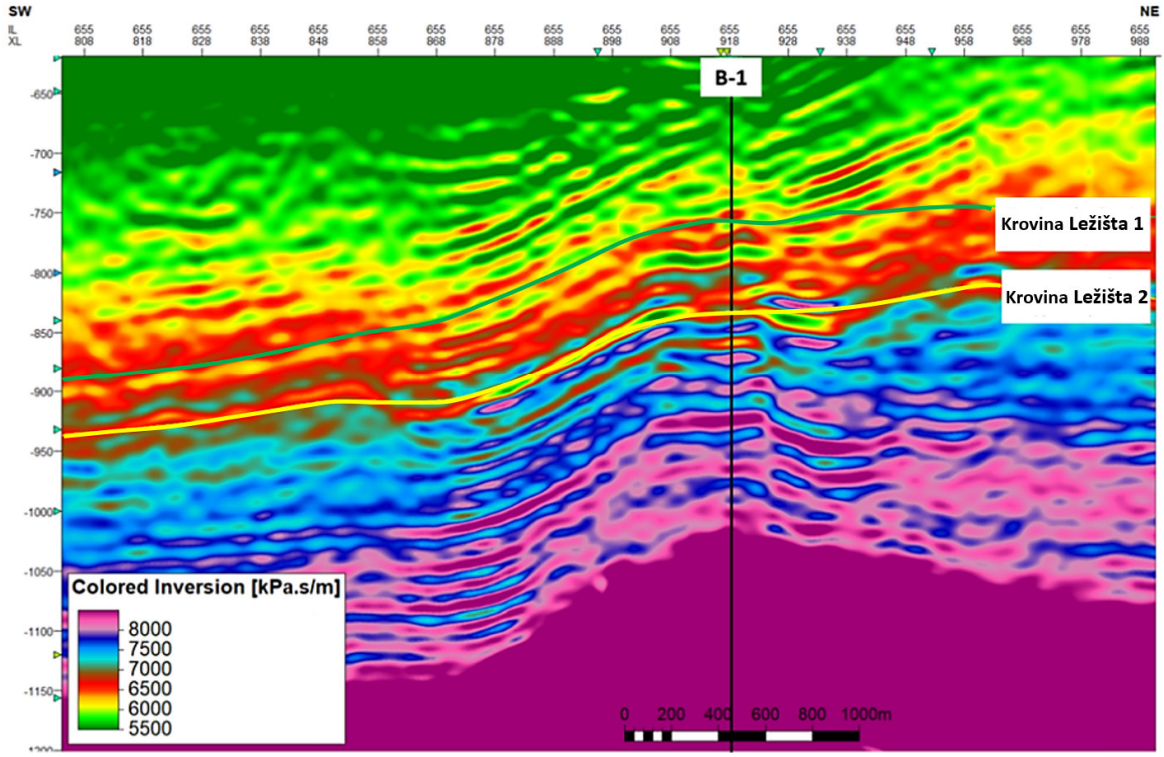
Slika 8.5.2.4.2.: Predviđanje vrijednosti brzina- Sonic (B-1, B-2, B-3) pomoću neuronskih mreža po nivou krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata (niže vrijednosti u ljubičastoj boji prikazuju više brzine, a više vrijednosti u narančastoj boji niže brzine jer se radi o vrijednostima 1/v. Ugljikovodici smanjuju brzinu)

8.6 SEIZMIČKE INVERZIJE (INVERZIJA U BOJI)

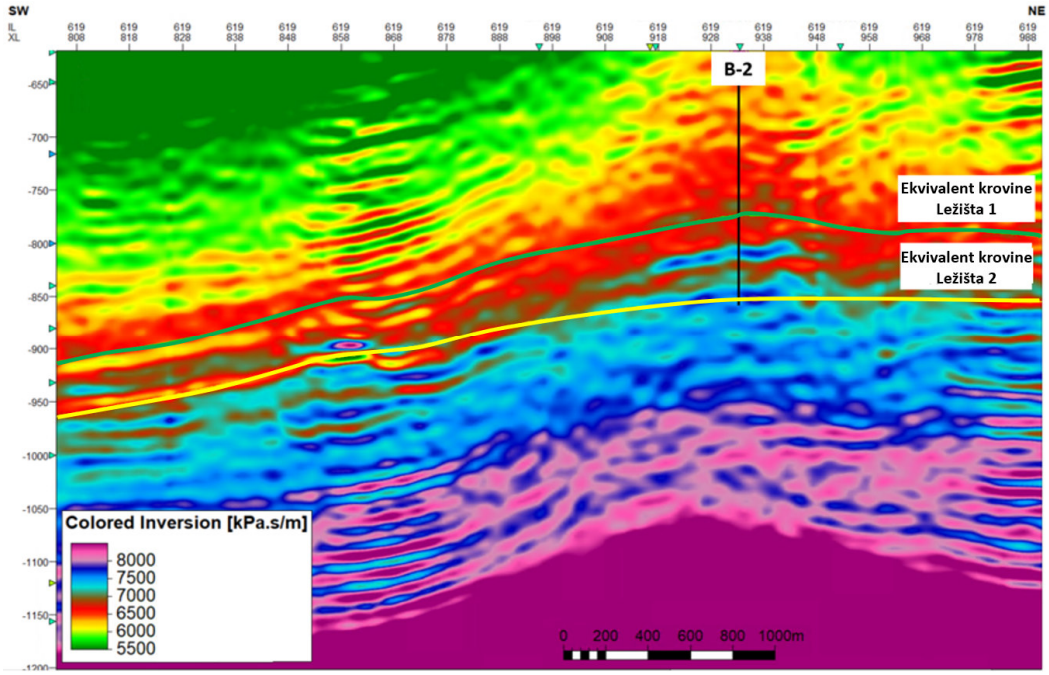
Od seizmičkih inverzija napravljena je *Post-stack* inverzija u boji (*Coloured inversion*) na osnovu koje je napravljen seizmički volumen analizirajući akustične impedancije. Obzirom da je akustična impedancija produkt gustoće i brzine, a poznato je da se ugljikovodici odlikuju manjim gustoćama od okolnih stijena kao što se i brzine smanjuju prolaskom kroz područja zasićenja, ova metoda može poslužiti kao brza tehnika koja može prikazati eventualne zone zasićenja. Prije računanja same inverzije potrebno je izračunati nisko frekvencijski model.
Bez nisko frekvencijskog modela inverzija može pružiti samo relativne impedancije slojeva zato što je pojas seizmičkog signala ograničen nedostatkom niskih frekvencija.
Niskofrekvencijski model je napravljen u programskom paketu *Petrel* pomoću modula „*Inversion Property Builder*“, a ulazi za izradu pozadinskog modela bili su *Near Angle stack*, akustične impedancije izračunate iz karotažnih krivulja za bušotine B-1, B-2 i B-3, te interpretirani horizonti. Bitno je napomenuti kako rezultati inverzije često ovise o samom niskofrekvencijskom modelu te da model uvelike ovisi o kvantiteti i kvaliteti bušotinskih podataka. Tako se, vrlo često varijacije između bušotina mogu propustiti, te se lokalne anomalije u bušotinama mogu uključiti u cijeli model.
U programskom paketu *Petrel* kao jedna vrsta atribucija napravljen je volumen interpretacije relativne impedancije inverzijom u boji koji na najbolji i brzi način vizualizira svojstva stijene. Ulazni podaci su bili *Raw* seizmički volumen, akustične impedancije svih triju bušotina, te je također korišten niskofrekvencijski model kao pozadinski model.
Na Slikama **8.6.1., 8.6.2. i 8.6.3.** je prikazan invertirani seizmički prikaz relativnih akustičnih impedancija na profilu koji prolazi kroz bušotine B-1, B-2 i B-3 gdje zelena boja pokazuje niske vrijednosti impedancija. Na bušotini B-1 vidljive su niske vrijednosti impedancija između dva ležišta kao i duž krovine Ležišta 2. Bušotina B-2 okarakterizirana je relativno višim vrijednostima impedancija u zonama ekvivalenata oba ležišta. Bušotina B-3 između ekvivalenata oba ležišta prikazuje lećasto tijelo izrazito visokih impedancija i neposredno ispod izrazito niskih impedancija.
Na **Slikama 8.6.4.** i **8.6.5.** prikazana je inverzija u boji po krovinama Ležišta 1 i Ležišta 2 odnosno njihovih ekvivalenata. Po krovini Ležišta 1 sve tri bušotine nalaze se u zonama nižih, dok je bušotina B-1 u zoni najnižih impedancija. Prikaz inverzije po krovini Ležišta 2 pokazuje da se bušotina B-2 nalazi u zonama nižih, dok druge dvije bušotine u zonama viših akustičnih impedancija.

Ova vrsta inverzije je pouzdana i brza, a i evidentira AVO efekte. Međutim, zbog relativnih vrijednosti impedancija nije prikladna za upotrebu u kvantitativnoj procjeni ležišta.

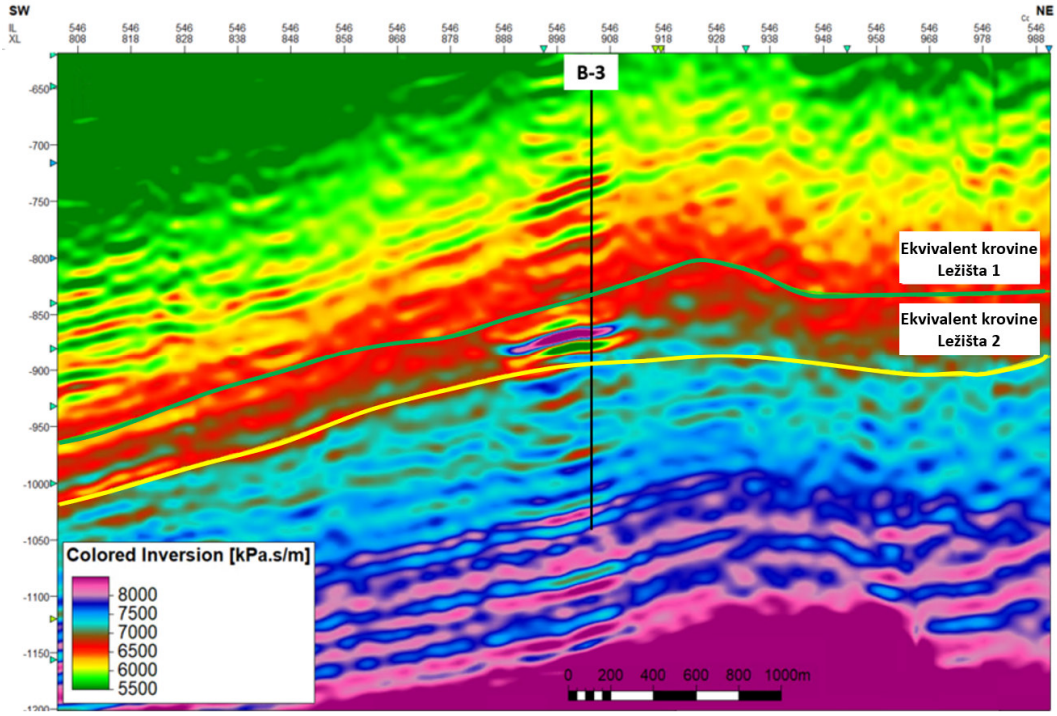
Seizmički podaci obrađeni su na način da je povećanje akustične impedancije na klasičnom seizmičkom prikazu interpretirano kao *peak*. U proučavanoj dubini intervali *peak* prema *trough* (brijeg prema dolu) označavaju lapore, a od *trough* do *peak* (dol prema brijegu) odgovaraju pijesku.



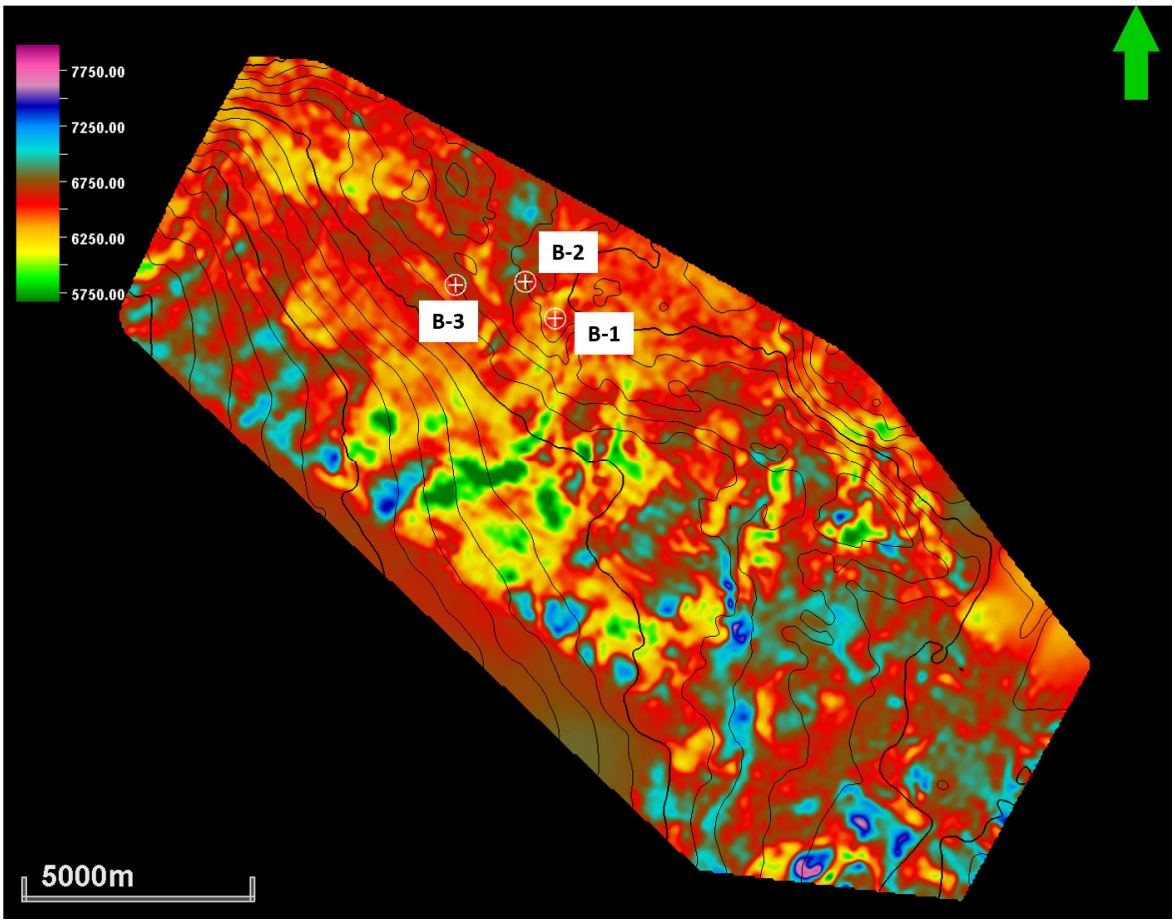
Slika 8.6.1.: Inverzija u boji na seizmičkom profilu kroz bušotinu B-1(vrijednosti na skali u ljubičastoj boji prikazuju područja visokih, a u zelenoj niskih akustičnih impedancija. Ugljikovodici smanjuju akustične impedancije, a plića područja se također odlikuju nižim akustičnim impedancijama).



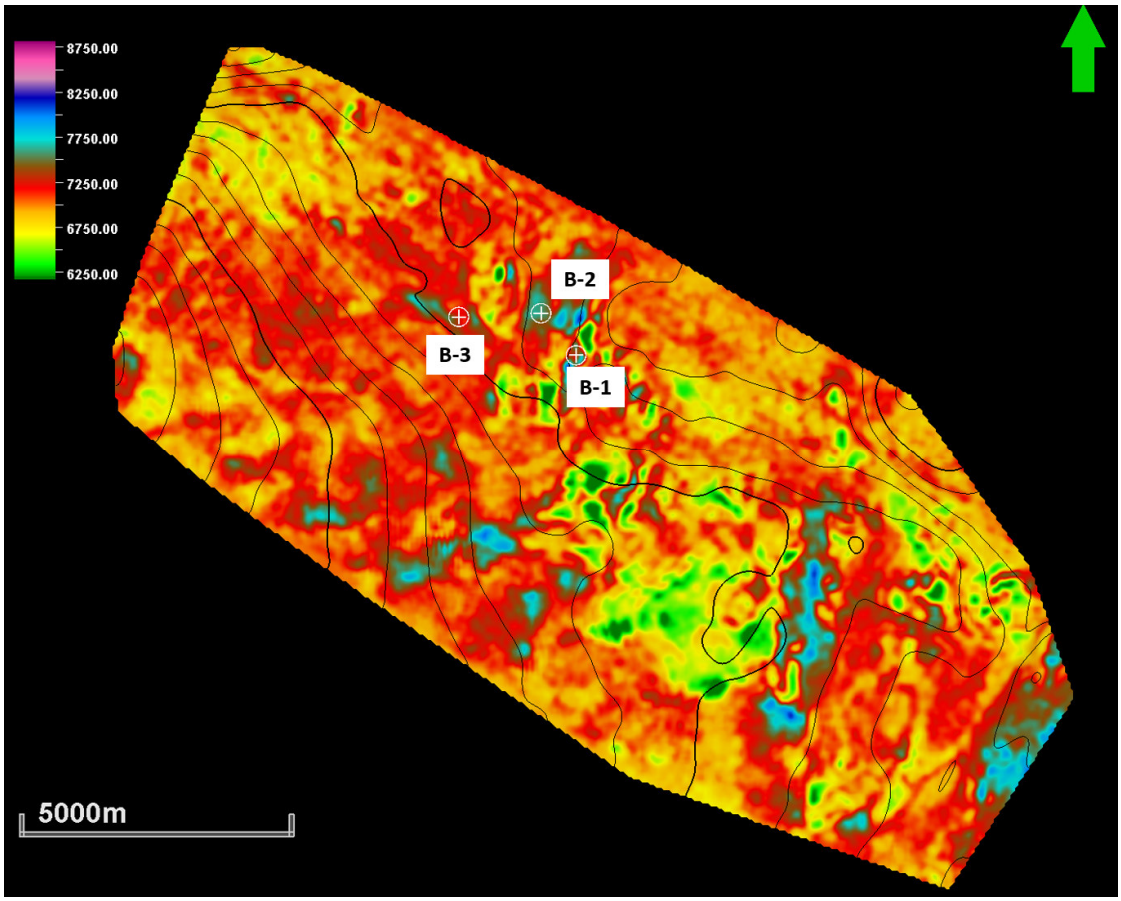
Slika 8.6.2.: Inverzija u boji na seizmičkom profilu kroz bušotinu B-2(vrijednosti na skali u ljubičastoj boji prikazuju područja visokih, a u zelenoj niskih akustičnih impedancija. Ugljikovodici smanjuju akustične impedancije, a plića područja se također odlikuju nižim akustičnim impedancijama).



Slika 8.6.3.: Inverzija u boji na seizmičkom profilu kroz bušotinu B-3(vrijednosti na skali u ljubičastoj boji prikazuju područja visokih, a u zelenoj niskih akustičnih impedancija. Ugljikovodici smanjuju akustične impedancije, a plića područja se također odlikuju nižim akustičnim impedancijama).



Slika 8.6.4: Inverzija u boji po horizontu krovine Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata (vrijednosti na skali u ljubičastoj boji prikazuju područja visokih, a u zelenoj niskih akustičnih impedancija. Ugljikovodici smanjuju akustične impedancije.)

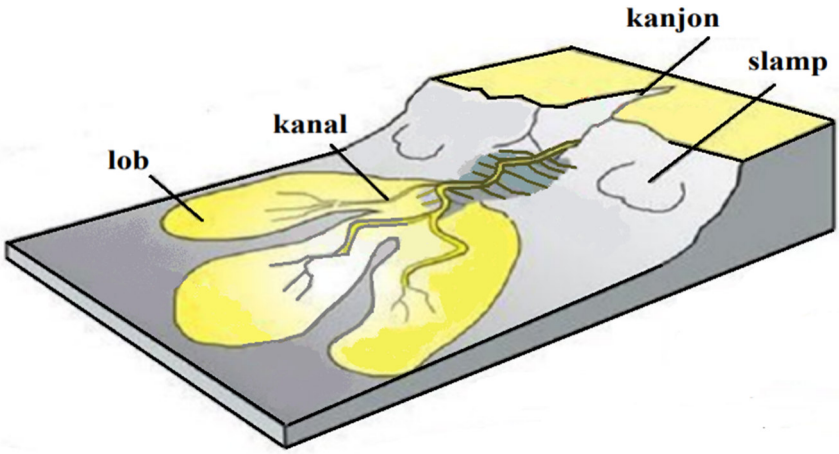


Slika 8.6.5: Inverzija u boji po horizontu krovine Ležišta 2 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata (vrijednosti na skali u ljubičastoj boji prikazuju područja visokih, a u zelenoj niskih akustičnih impedancija. Ugljikovodici smanjuju akustične impedancije.)

8.7 GEOLOŠKA INTERPRETACIJA

8.7.1 TEORIJSKI OPIS TALOŽNIH MEHANIZAMA U PROMATRANOM PROSTORU

Kroz ovo poglavlje ukratko je opisan taložni mehanizam turbiditnih struja.
Turbiditi su sedimenti taloženi iz turbiditnih struja čiji je mehanizam opisan u npr. Kuenen (1957). Ubrajaju se u dubokovodne klastične okoliše taloženja koji obuhvaćaju gornji rub kontinentalne padine, kontinentalnu padinu i bazensku ravnicu. Osnovna litološka i sedimentološka značajka turbidita je pravilnost vertikalnog redanja detritusa određenih granulometrijskih i teksturnih značajki kao posljedica načina taloženja iz mutnih struja. Cjelokupni prostor koji zauzima materijal istaložen iz turbiditne struje naziva se turbiditna lepeza ili podvodna lepeza. Turbiditni tokovi ili turbiditne struje (engl. turbidite flows, turbidite currents) obuhvaćaju gravitacijske tokove u kojima su veći klasti, zrna i sitni talog prenošeni jakom turbulencijom fluida izazvanih gravitacijom pa se mogu prenositi na velike udaljenosti niz velike padine malog kuta nagiba (0,5 do 1°). Razlikuju se turbiditne struje male i velike gustoće (**Middleton & Hampton, 1976**) iz koji se mogu taložiti sitnozrnati (pijesci, silt, glina i lapor), srednjezrnati (pješčani) i krupnozrnati (pijesci i šljunak) turbiditi.



Slika 8.7.1.1.: Turbiditna ili podvodna lepeza (modificirano prema Reading & Richards, 1994)

Turbiditne struje se stvaraju u nastavku čela delti u većim jezerima i morima. Glavni mehanizam prijenosa sedimenata u suspenziji je turbulencija, koja je najintenzivnija u gornjem dijelu struje. Nagomilani sedimenti u jednoj trenutku kliznu niz bazensku padinu (po

distribucijskom kanalu ili kanjonu). Do klizanja može doći npr. zbog poremećaja u ravnoteži sedimenata koji su istaloženi na bazenskoj padini, potresa, tsunamija ili iznenadnom aktivnošću sinsedimentacijskih ili rasjeda u podini deltnih taložina. Pokrenuta masa sedimenata u početku se kreće vrlo sporo jer još nije primila dovoljnu količinu vode. No, primanjem sve veće količine vode, zbog gravitacije i akceleracije sve brže. Krupnija zrna se talože u gornjem, a sitnija u donjem dijelu turbiditnog toka.

8.7.2 PREGLED PRETHODNE INTERPRETACIJE

U ovom poglavlju prikazana je dosadašnja geološka interpretacija preuzeta iz svih elaborata i studija tehničke dokumentacije INA d.d. navedenih u literaturi, te izmijenjena interpretacija. Analizirane su i interpretirane ležišne stijene u gornjomiocenskim naslagama sjevernog dijela Bjelovarske subdepresije. Na temelju studija iz tehničke dokumentacije INA d.d. navedenih u literaturi po interpretaciji iz 1997. godine određena su dva ležišta od kojih prvo pripada Formaciji Bilogora, a drugo Pješčenjacima Pepelana, Formacije Kloštar-Ivanić. No, 1999. godine je utvrđeno da se oba ležišta nalaze unutar Pepelana pješčenjaka, te je tako prikazano u ovom radu.

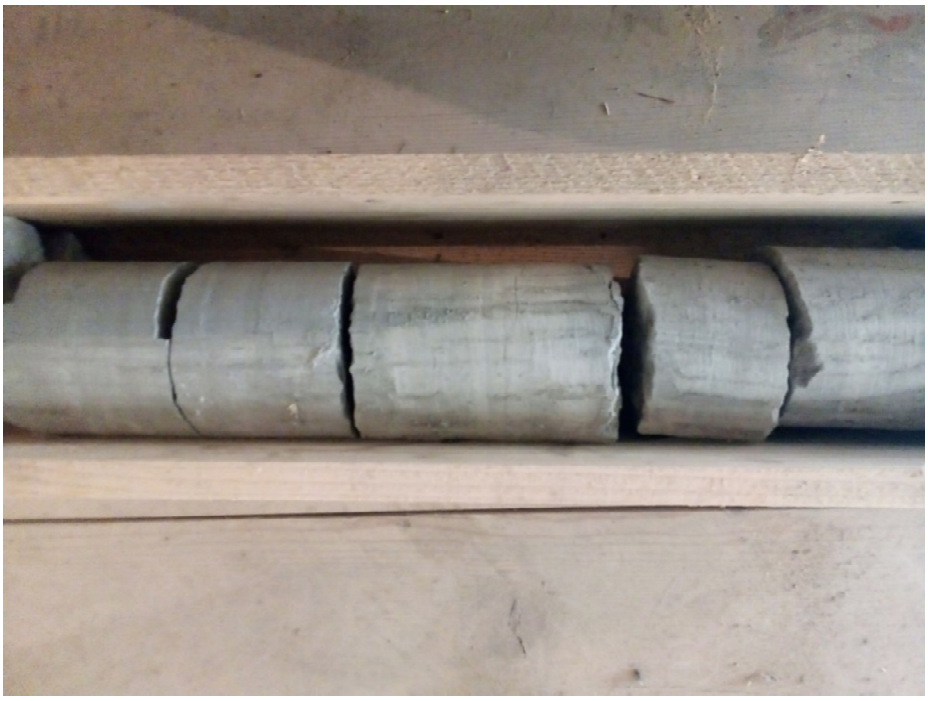
Pješčenjaci Pepelana prema bušotinskim podacima su utvrđeni na sjeveroistoku istraživanog područja dok na jugu i zapadu prelaze u bočni ekvivalent koji se naziva Lapor Brezine.

Krovinu Pješčenjaka Pepelana čini Lapor Cabuna kao vrlo dobar izolator. Litološki je to glinoviti i glinovito-pjeskoviti lapor (količine pješčenjaka su neznatne).

Pepelana pješčenjaci u bušotini B-1 debljine su oko 300 metara i u tom intervalu izvađena je i uzorkovana jezgra broj 1 duljine oko 20 metara. To su sivi sitnozrnati pješčenjaci do siltiti čiji slojevi prema krovini postaju sve tanji zbog porasta laporovite komponente. Tu je utvđeno plinsko ležište.

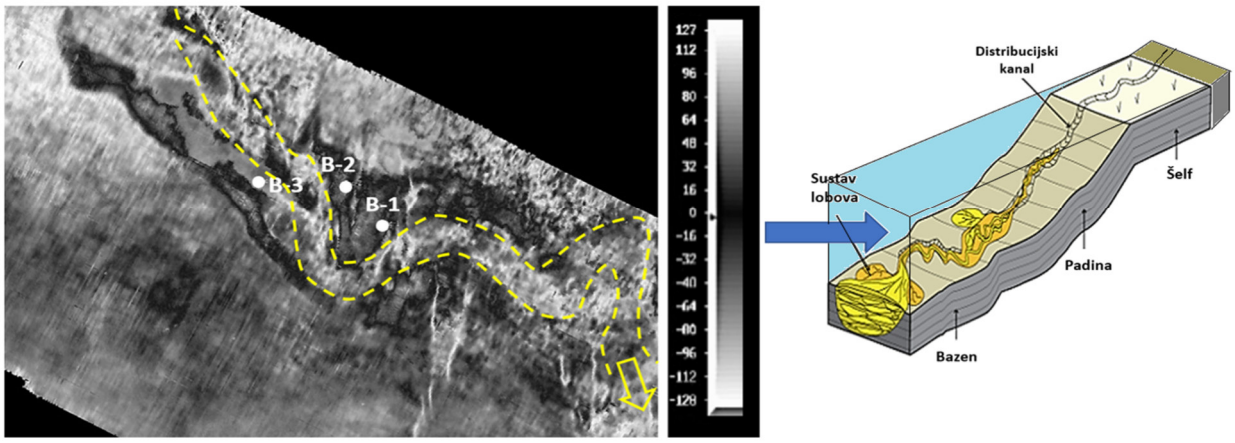
U bušotini B-2 jezgra nije vađena nego su analizirani samo uzorci krhotina stijena iz isplake i to klastični pelitni sedimenti u izmjeni sa slojevima ugljena.

Pepelana pješčenjaci unutar bušotine B-3 su zaglinjeni u gornjem dijelu i u izmjeni su s laporima (**Slika 8.7.1.**).



Slika 8.7.1.: B-3, J-1 (992-1001 m) prikaz II metra jezgrovanog intervala – Pepelana pješčenjaci

Analizom atributa *Variance* pretpostavljen je kanalski sustav, gdje su bušotine B-1, B-2, i B-3 smještene na nasipu kanala. Glavni smjer donosa materijala je SZ – JI. Sedimentacija se odvijala na padini u bočatom do slatkovodnom progradirajućem okolišu. Padina je ispresijecana kanalima i podvodnim režnjevima u distalnom dijelu. Meandrirajući kanali u podnožju padine, distalno su razvijeni u lobove. Sedimenti ležišnih svojstava (B-1) su međukanalni, dio distalnih i/ili padinskih lobova. Pokrov čine pelitni sedimenti (**Slika 8.7.2.**).



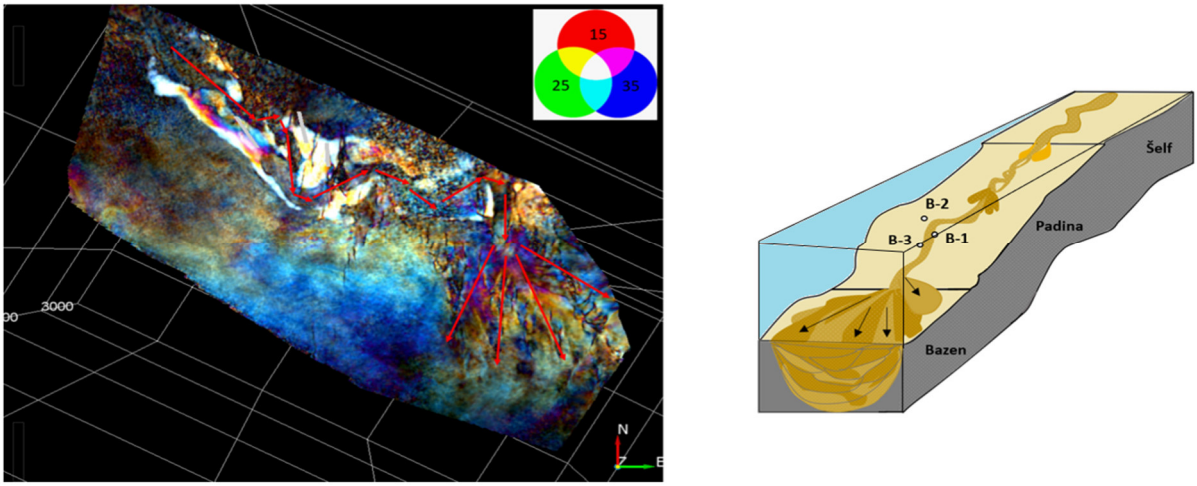
Slika 8.7.2.: Seizmički atribut Variance i paleookolišna interpretacija istraživanog područja (preuzeto iz tehničke dokumentacije INA d.d., Studija seizmičkih atributa, 2020)

Istražnom bušotinom B-1 otkrivena su ležišta plina u dva ležišta unutar Pješčenjaka Pepelana. U Ležištu 1 utvrđeno je plinsko ležište. Kromatografskom analizom dobivenog plina utvrđeno je da se radi o plinu u čijem je sastavu udio metana preko 95 %, etana 2 %, dok je udio viših ugljikovodičnih plinova manji od 1 %. Slojni tlak u ležištu je hidrostatski. Testiranjem nije dobiven dotok vode. Plin po svom sastavu predstavlja mješavinu biogeno dijagenetskog i termogenog plina.

Prema geološkom praćenju ležišna stijena je slabo vezani sitnozrni, kvarc tinjčasti pješčenjak. U intervalu Ležišta 2 od 934 do 928 metara dobiven je plin i manja količina lagane nafte.

Temeljem otkrića B-1 i na temelju 3D seizmičkih anomalija izbušene su još dvije pliće bušotine B-3 i B-2 koje su se pokazale nekomercijalnima. Bušotina B-3 je probušila zaglinjene i zalaporene ekvivalente ležišta bez pojava ugljikovodika, B-2 je probušila litostratigrafski ekvivalent Ležišta 1 koje je zalaporeno i ekvivalent Ležišta 2 koje je zavodnjeno s minimalnim pojavama ugljikovodika. Tadašnja interpretacija zasnivala se na tumačenju atributa koherencije *Variance* koji se kao i većina geometrijskih atributa koristi za interpretiranje geoloških formi poput rasjeda i stratigrafskih oblika kao što su kanali i delte. Na tom atributu interpretiran je vijugavi kanal smjera donosa materijala SZ-JI koji prelazi u podvodnu lepezu (**Slika 8.7.2.**).

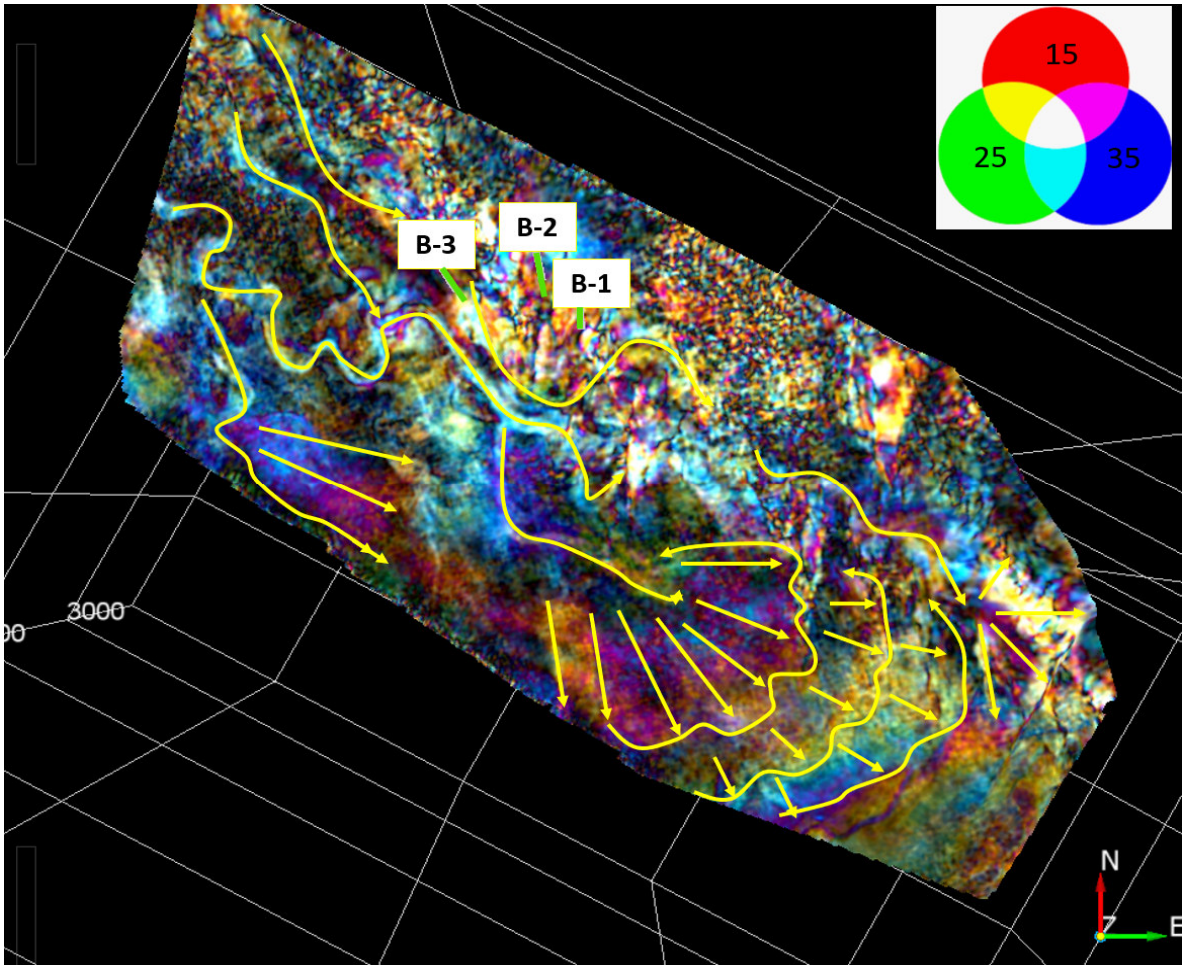
Analizirajući novonapravljene atribute jedna od vjerojatnijih interpretacija može potvrditi i starija tumačenja. Na **slici 8.7.3**. prikazana je interpretacija na kombiniranom atributu spektralne dekompozicije duž krovine Ležišta 2 koja zapravo potvrđuje preuzetu prvotnu interpretaciju. Obzirom da je vidljiv meandrirajući kanal i lepezasto tijelo može se pretpostaviti da je donos materijala bio iz smjera sjeverozapad-jugoistok. (crvene strelice na slici).



Slika 8.7.3.: Interpretacija na kombiniranom seizmičkom atributu spektralne dekompozicije duž horizonta Ležišta 2

8.7.1 INTERPRETACIJA ATRIBUTA SPEKTRALNE DEKOMPOZICIJE

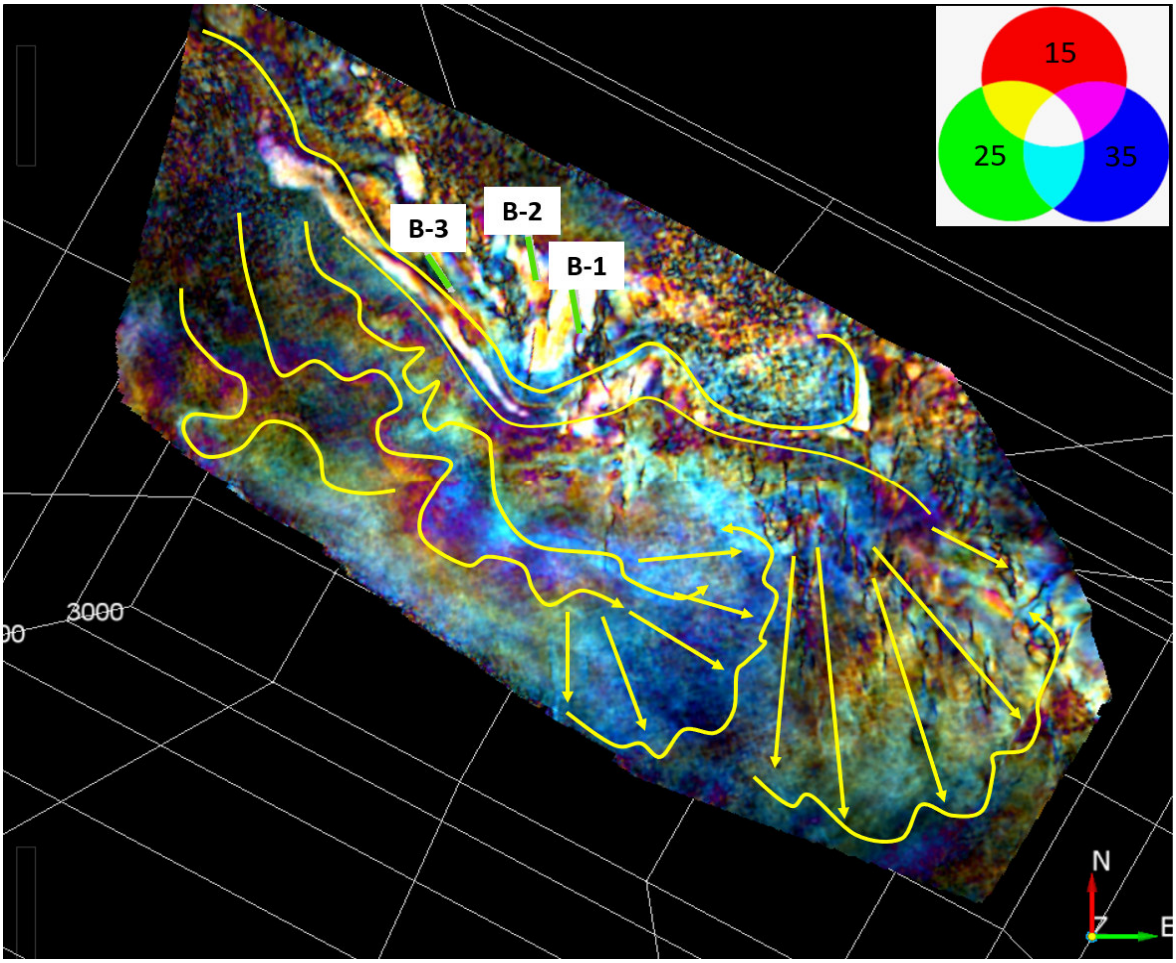
Nakon kombinirane interpretacije dvaju atributa prikazana je moguća interpretacija kombiniranog atributa spektralne dekompozicije koja pomaže pri interpretaciji određivanja kanala te pomaže u prepoznavanju orijentacije kao i relativne debljine svakog kanala koji su prikazani na slijedećim slikama (**Slike 8.7.1.1. - 8.7.1.8.)** od starijih prema mlađim naslagama. Cjelokupni interval svih horizonata koji su prikazani litostratigrafski pripadaju Pepelana pješčenjacima.



Slika 8.7.1.1.: Atribut spektralne dekompozicije na horizontu interpretiranom oko 40 ms ispod Ležišta 2

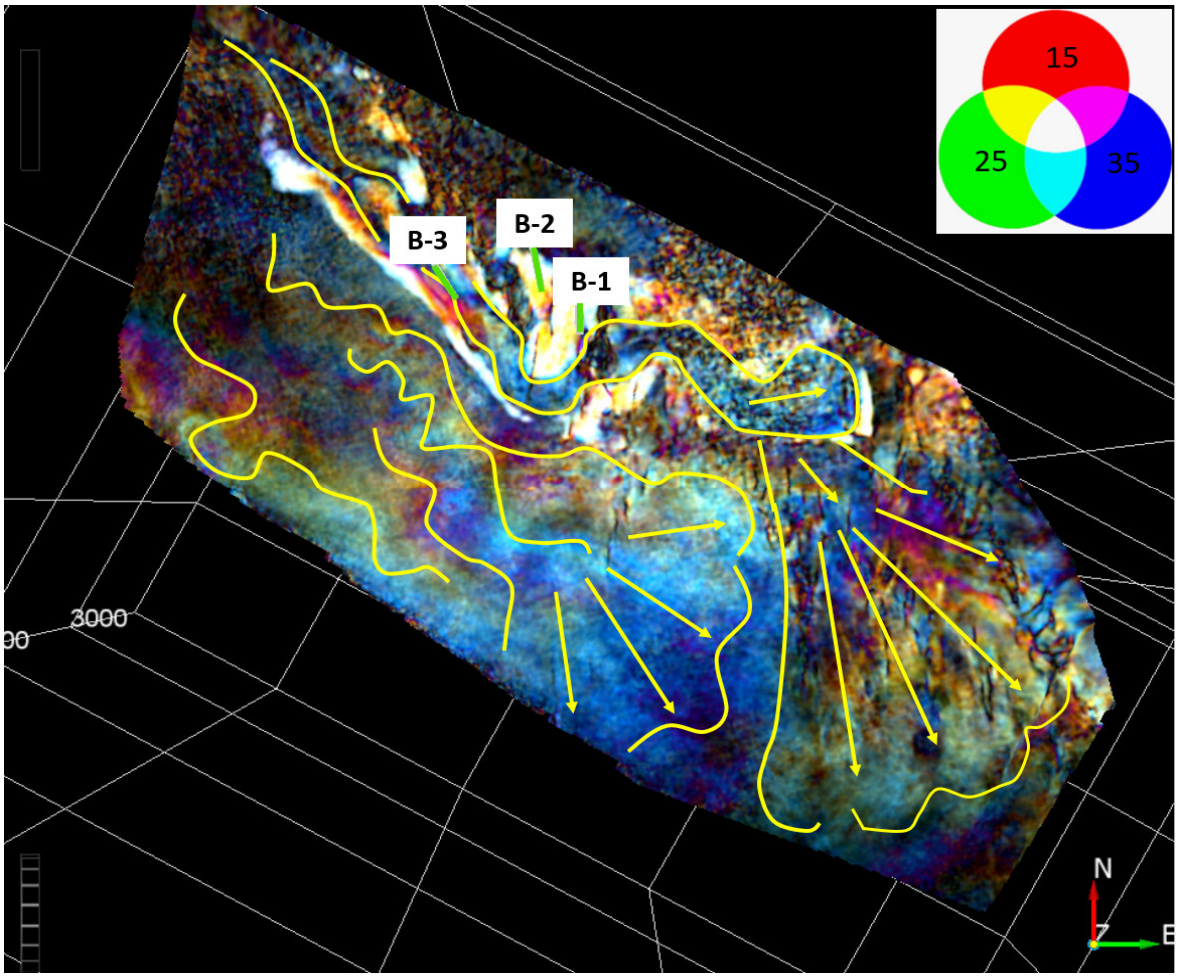
Na **slici 8.7.1.1.** na atributu spektralne dekompozicije duž horizonta interpretiranog oko 50 ms ispod Ležišta 2. Ova slika predstavlja istovremeno najdublji odnosno najstariji horizont u slijedu od svih kasnije prikazanih. Na prikazu je vidljiv kanal sa pretpostavljenim donosom materijala od sjeverozapada prema jugoistoku koji se potom dijeli na dva kanala od kojih se na

donjem južno vidi u nastavku progradacija turbiditnih lepeza sa dobro vidljivim lobovima, dok se drugi kanal nastavlja i razvija u moguće lepezasto tijelo na krajnjem jugu interpretiranog atributa. Također jugozapadno plavi odzivi ukazuju na oblik kanala koji se razvija u lepezasto tijelo. Bušotina B-3 se mogućno nalazi na nasipu jednog kanala. Područje gdje se nalaze druge dvije bušotine duž ovog horizonta nalazi se u dijelu koji nije dovoljno jasan za interpretaciju.



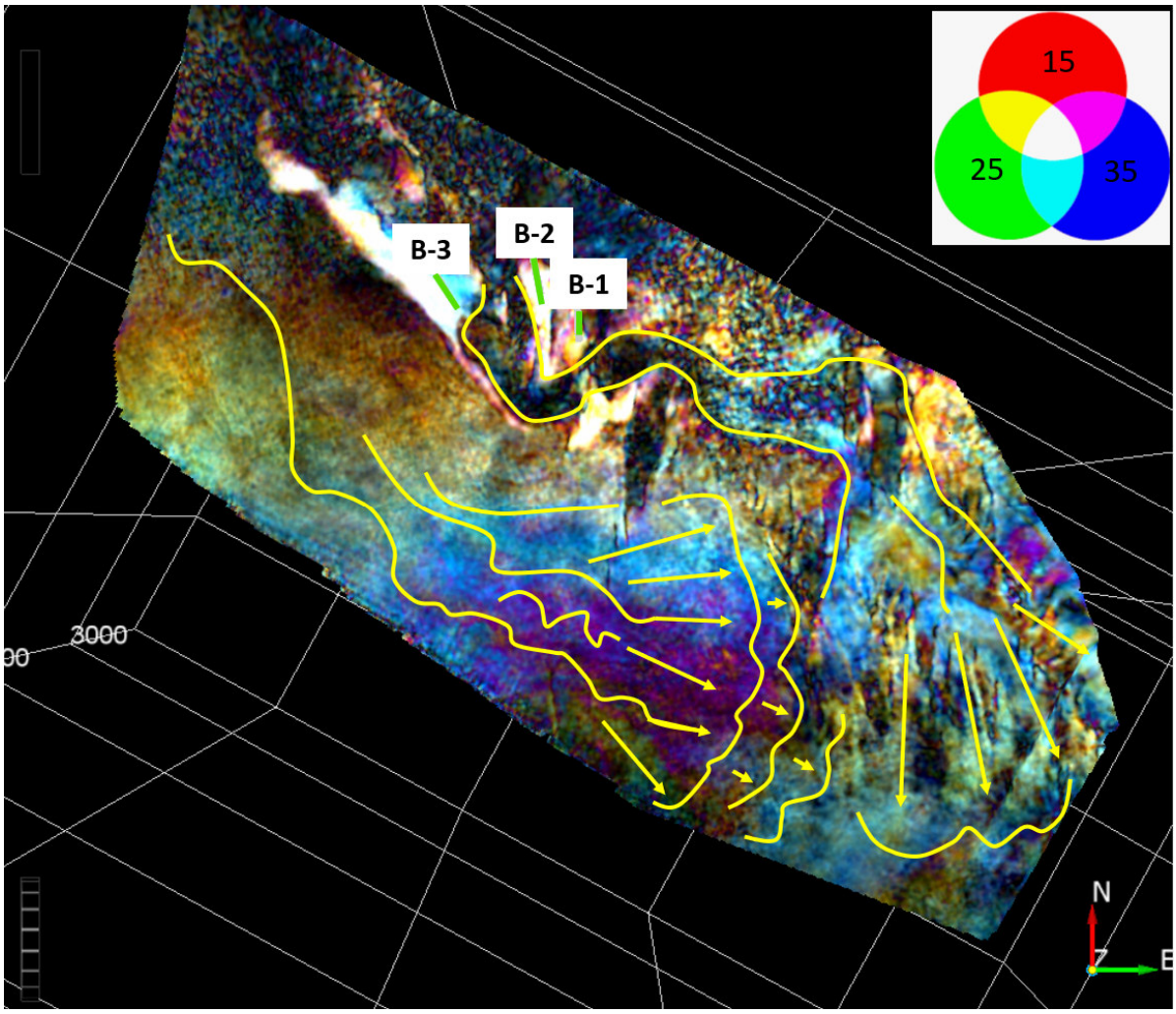
Slika 8.7.1.2.: Atribut spektralne dekompozicije na horizontu interpretiranom oko 20 ms ispod Ležišta 2

Slika 8.7.1.2. prikaz je interpretiranog atributa spektralne dekompozicije oko 20 ms ispod Ležišta 2. Turbiditna lepeza na jugu samostalno egzistira premda progradacija nije više tako jasno vidljiva. Vidljivi su i meandrirajući kanali. Čini se da se počinje stvarati kanal sa sjeverozapada sa jačim donosom materijala koji postaje širi, također mijenja smjer na jugoistoku i razvija se u puno veću turbiditnu lepezu. Mjestimično postoji još manjih kanala. Tijela bijelih svijetlih odziva u okolici triju bušotina vjerojatno su kanali. No na kasnijim prikazima postaje vjerojatnijim da su ona nastala drugim tokovima donosa materijala.



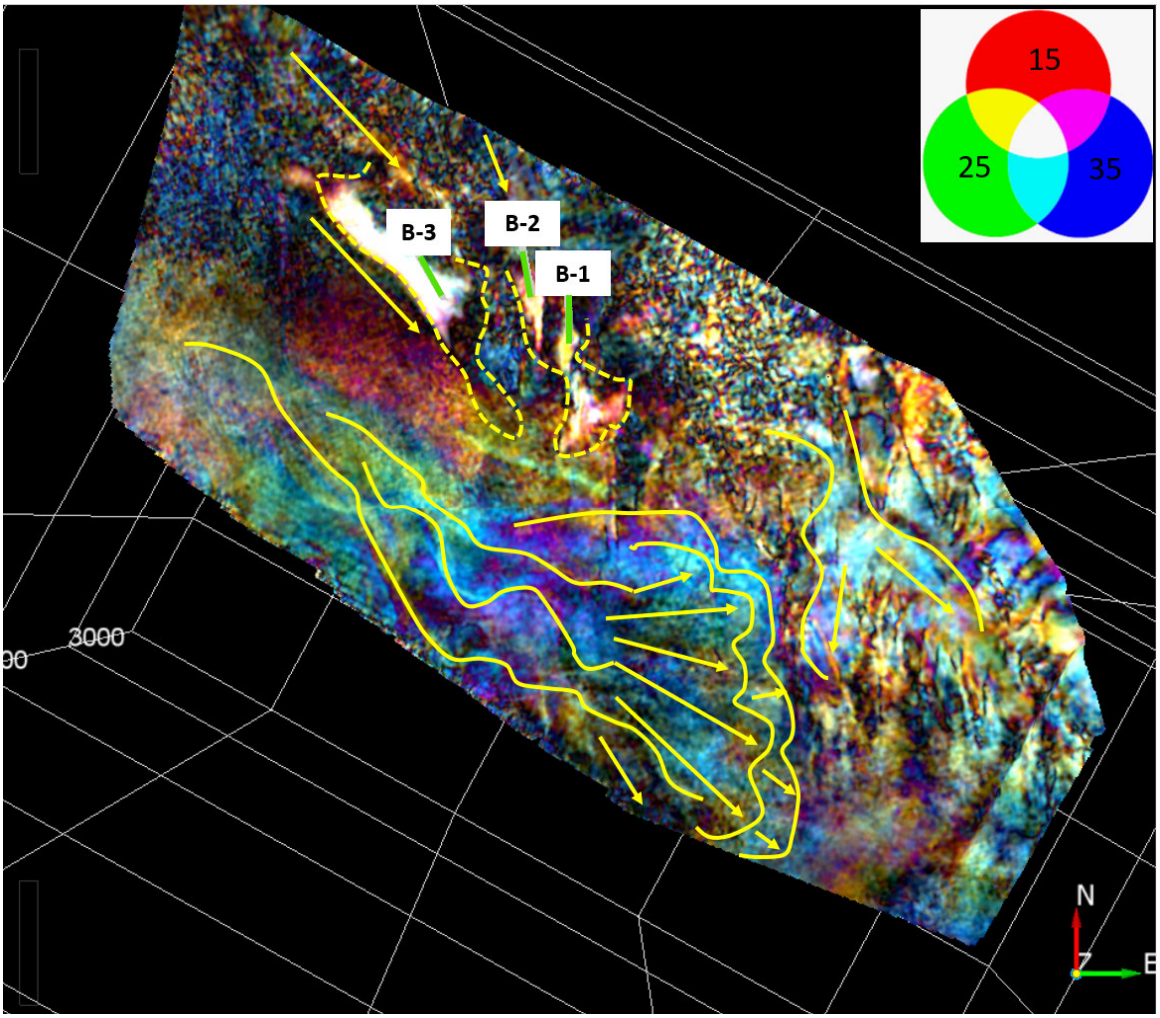
Slika 8.7.1.3.: Atribut spektralne dekompozicije na horizontu Ležišta 2

Na **slici 8.7.1.3.** prikazana je krovina Ležišta 2 s malo drugačijom interpretacijom od tumačenja preuzetih iz interne dokumentacije INA d.d. na temelju koje su se bušile sve tri bušotine. Vidljiv je meandrirajući kanal koji je tada interpretiran i vrlo je vjerojatno njegovo postojanje, no tu je tumačanje malo promijenjeno. Na ovom prikazu čini se kao da su postojala dva kanala sa pretpostavljenim donosom materijala kod oba iz smjera sjeverozapada. Kanal koji prolazi smjerom kroz sve tri bušotine kao da se ne razvija u lepezu. Drugi kanal neposredno ispod na kraju se razvija u turbiditnu lepezu iz prethodne preuzete interpretacije. Tijela koja svijetle bijelim odzivima na lokalitetima triju bušotina nastala su vjerojatno zapunjavanjem nekih u prošlosti nastalih kanala.



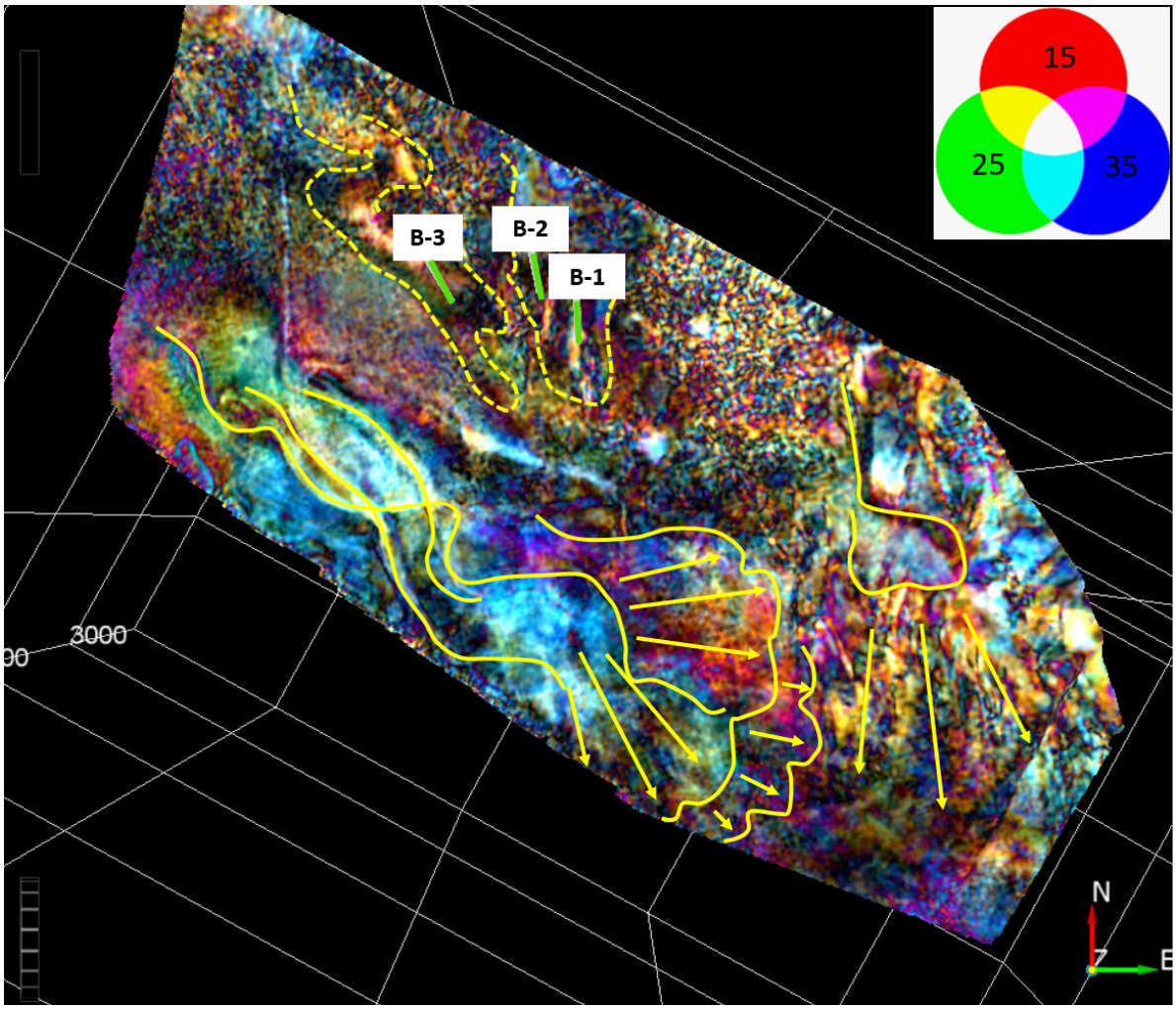
Slika 8.7.1.4.: Atribut spektralne dekompozicije na horizontu 20 ms iznad Ležišta 2

Slika 8.7.1.4. prikazuje atribut spektralne dekompozicije otprilike 20 ms iznad krovine Ležišta 2. Vidi se kanal koji prolazi između triju bušotina te se na jugoistoku razvija u podvodnu turbiditnu lepezu. Tijela svijetlih bijelih odziva preklapanja frekvencijskog spektra u okolici triju analiziranih bušotina predstavljaju kanale koji su nastali drugim tokovima vjerojatno turbiditnim ili gravitacijskim. Turbiditna lepeza na jugu promatranog horizonta i dalje postoji i naziru se vjerojatni lobovi gdje je vidljiva progradacija.



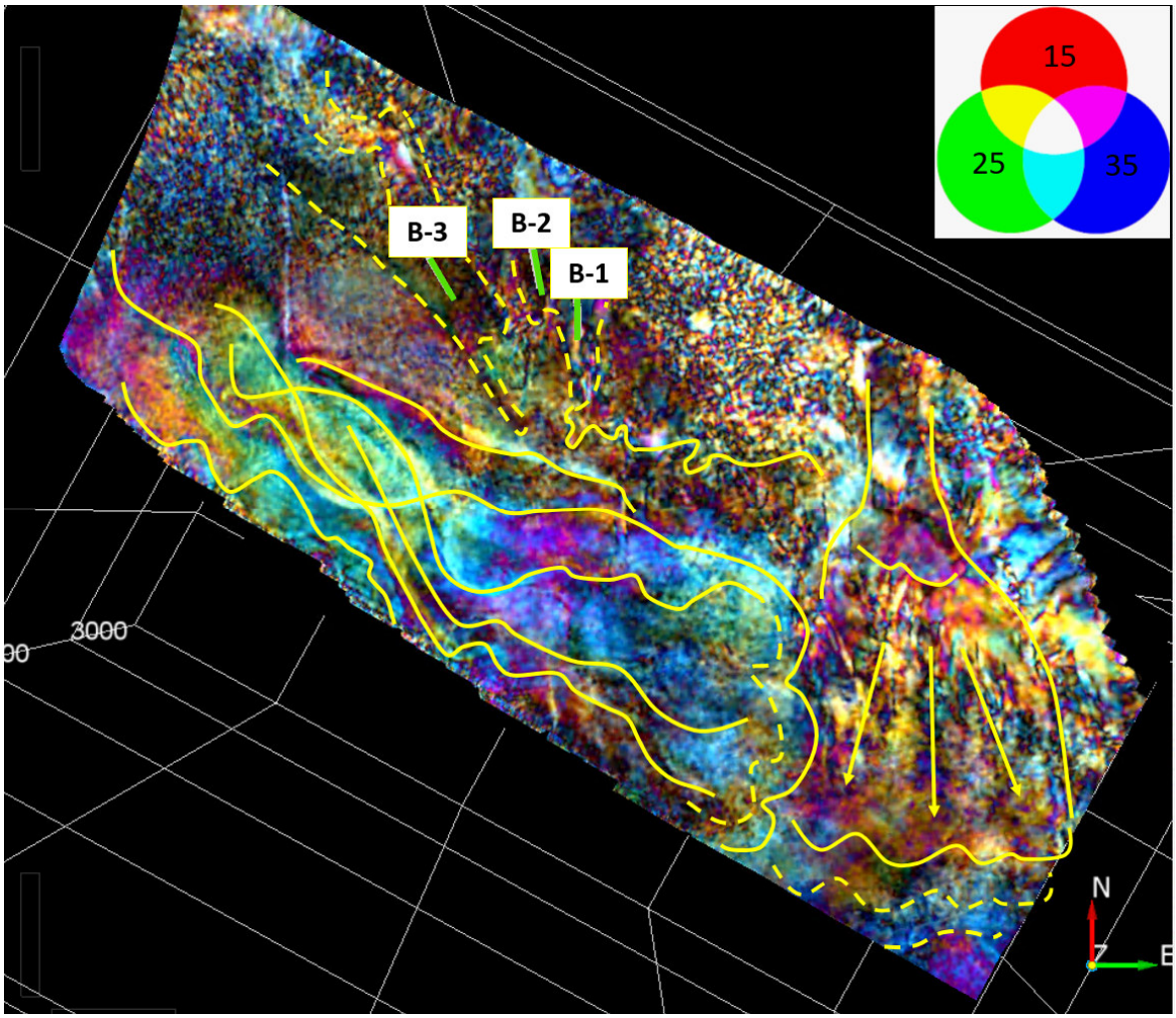
Slika 8.7.1.5.: Atribut spektralne dekompozicije na horizontu 40 ms iznad Ležišta 2

Slika 8.7.1.5. predstavlja tumačenje duž horizonta interpretiranog 40 ms iznad Ležišta 2. Na jugu se vide isprepleteni meandrirajući kanali koji prelaze u lepezasto tijelo. Također je vidljiv dio kanala i dio turbiditne lepeze koja se razvija u lobove na jugoistoku. Tijelo koje se na atributu spektralne dekompozicije nalazi u zoni preklapajućeg frekvencijskog spektra u bijeloj boji a probušila ga je bušotina B-3 predstavlja zasebni kanal sa donosom materijala iz smjera sjeverozapada. Također isto takvo tijelo koje su probušile bušotine B-1 i B-2 prestavlja drugi kanal manih dimenzija.



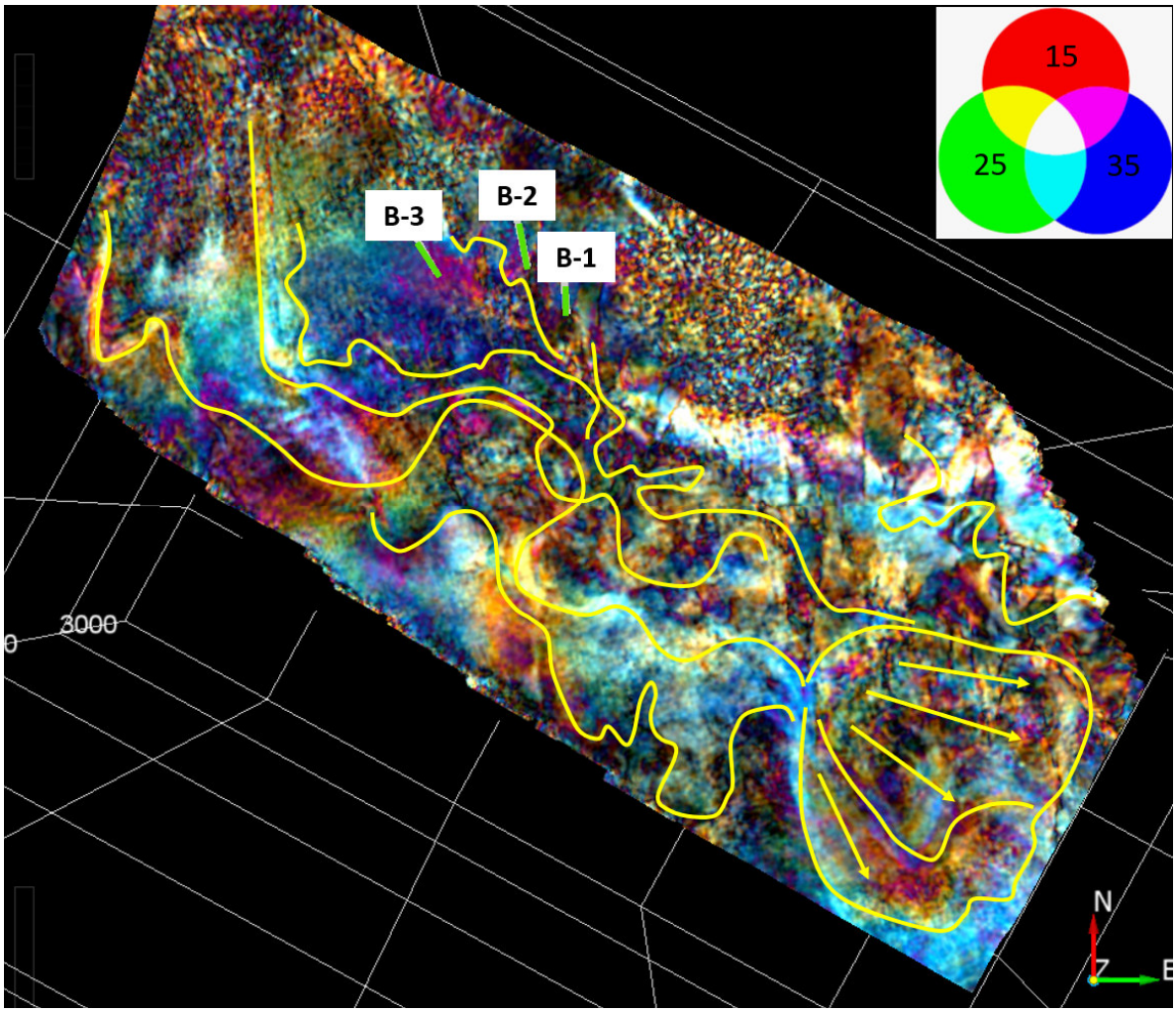
Slika 8.7.1.6.: Atribut spektralne dekompozicije na horizontu 70 ms iznad Ležišta 2

Slika 8.7.1.6. prikazuje atribut spektralne kompozicije duž horizonta koji se nalazi oko 20 ms ispod krovine Ležišta 1. Na jugu se i dalje vide kanali koji meandriraju i završavaju turbiditnom lepezom, te je vidljiva i progradacija lobova. Na jugoistoku se nazire kanal te se također nazire lepeza na jugoistoku, no nemoguće je sa sigurnošću ustvrditi postojanje kanala sa donosom materijala iz smjera sjeverozapada. Predio između triju bušotina i vjerojatne turbiditne lepeze nalazi se u zoni kaotičnih refleksa, odnosno rasjedanog područja. Iz smjera sjeverozapada u okolici bušotine B-3 vidljiv je kanal gdje je započelo taloženje i njegovo zapunjavanje (karakteristični vidljivi bijeli svijetli odzivi duž horizonta krovine Ležišta 2) koji također postaju očigledni na ovom primjeru kao meandrirajući kanal iz smjera sjeverozapada koji se kreće prema bušotini B-3.



Slika 8.7.1.7.: Atribut spektralne dekompozicije duž horizonta Ležišta 1

Slika 8.7.1.7. prikazuje interpretaciju duž krovine Ležišta 1. Dvije turbiditne lepeze i meandrirajući kanali na jugu i jugoistoku su vidljivi kao i njihovo napredovanje, dok kanali blizu bušotina ovdje ne svijetle, ali vidljivi su njihovi obrisi. Ovaj je horizont mlađi od prethodnog a obrisi kanala koji imaju svijetle bijele odzive vidljive na prethodnim prikazima ovdje su prikazani crtkanom žutom linijom. Iz smjera sjeverozapada iznad bušotine B-3 vidljiv je začetak kanala odnosno donosa materijala. Isto se odnosi i na okolicu bušotina B-1 i B-2. Vidljivi su obrisi tijela koji na starijim horizontima poprimaju karakteristični oblik, te najvjerojatnije predstavljaju donos materijala lokalnim manjim tokovima neovisnim o dvije vidljive turbiditne lepeze.



Slika 8.7.1.8.: Atribut spektralne dekompozicije na horizontu iznad 40 ms iznad Ležišta 1

Slika 8.7.1.8. prikazuje horizont oko 40 ms iznad Ležišta 1 i vidljiva je već posve drugačija slika. Prepleteni i meandrirajući kanali koji se na svom kraju spajaju prelazeći u turbiditnu lepezu s vidljivim lobovima no smještenu više prema jugoistoku interpretiranog atributa.

9. RASPRAVA

9.1 INTERPRETACIJA SEIZMIČKIH ATRIBUTA

Obzirom na poznatu činjenicu da ulaskom u ležište dolazi do promjene amplitude, frekvencije i faze seizmičkog signala, promatrale su se također i kombinacije osnovnih atributa, atributi horizonata krovine dvaju ležišta, hibridni atributi, kao i primarni i sekundarni AVO atribute. Nažalost promjene u amplitudama i frekvencijama neće uvijek ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima, već na njih mogu utjecati različite litološke promjene, kao i izmjene tankih proslojaka pijesaka i lapora koji su evidentirani u jezgrama triju analiziranih bušotina. Isprva su se analizirali podaci na tri dostupne bušotine na ovome području kako bi se mogla procijeniti sličnost sa mogućim novim prostorima koji bi mogli ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima.

9.1.1 INTERPRETACIJA OSNOVNIH ATRIBUTA

Atribut trenutne amplitude pokazuje vrlo visoke vrijednosti na područjima bušotina u zonama oba ležišta no ugljikovodici odnosno plin je potvrđen u bušotini B-1 u ležištima koja se nalaze u strukturno-stratigrafskoj zamki s laporima kao pokrovnom izolatorskom stijenom i rasjedima koji omeđuju ležište. Vrijednosti izrazito povišenih amplituda u bušotinama B-2 i B-3 izgledaju kao izolirana sedimenta lećasta tijela koja se mogu interpretirati kao vrsta stratigrafskih zamki s pojedinačnim pojavama plina u vrlo malim količinama, gdje se on nije zadržao nego je prošao na svom migracijskom putu (**Slike 8.2.1.1., 8.2.1.2., 8.2.1.3**.). S druge strane, atribut trenutne frekvencije pokazuje anomaliju niskih frekvencija koja se ponekad javlja u prisustvu ugljikovodika u bušotinama B-1 i B-2, dok su vrijednosti frekvencija u bušotini B-3 između ekvivalenata oba ležišta visoke (**Slike 8.2.2.1, 8.2.2.2., i 8.2.2.3**). Rezultati ekstrahirane RMS amplitude kroz oba ležišta svojim povišenim vrijednostima ukazuju na bolja rezervoarska svojstva (**Slike 8.2.3.1, 8.2.3.2**).

9.1.2 INTERPRETACIJA KOMBINIRANIH ATRIBUTA

Kombinirani atributi izvode se iz velikog broja različitih atributa te se primjenjuju u svrhu jačeg naglašavanja različitih značajki kao što su kanali, rasjedi ili zasićenje ugljikovodicima. Kombinirani atributi koji su se koristili u ovom radu su *Sweetness* atribut i spektralna dekompozicija, a koristila se i kombinirana interpretacija atributa koherencije i spektralne dekompozicije.

6.7.1.6 INTERPRETACIJA ATRIBUTA SWEETNESS

Seizmički atribut *Sweetness* otkriva područja viših amplituda i nižih frekvencija što bi najvećim dijelom mogli biti pješčani intervali zasićeni ugljikovodicima, a sedimente kao što su lapori ili šejlovi prikazuje kao područja nižih vrijednosti. Povišene vrijednosti mogu ukazivati i na kvalitetu pješčenjaka i veće vrijednosti poroziteta nego na samo zasićenje.
Duž horizonta krovine Ležišta 1 vidljiva su mjesta viših vrijednosti u području oko bušotine B-1 i na jugoistoku analiziranog horizonta. Duž horizonta krovine Ležišta 2 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata područja povišenih vrijednosti su u zonama gdje su bušene sve tri bušotine (**Slike 8.2.7.1., 8.2.7.2.**).

6.7.1.7 INTERPRETACIJA ATRIBUTA SPEKTRALNE DEKOMPOZICIJE

Nakon kombinirane interpretacije dvaju atributa prikazana je moguća interpretacija kombiniranog atributa spektralne dekompozicije koja pomaže pri interpretaciji određivanja kanala te pomaže u prepoznavanju orijentacije kao i relativne debljine svakog kanala.
Iz svim prikazima interpretacije atributa spektalne dekompozicije (Slike **8.7.1.1. - 8.7.1.8.** vidljiva je progradacija turbiditne lepeze u smjeru sjeverozapad- jugoistok na jugu promatranih horizonata. Također i podvodna turbiditna lepeza na krajnjem jugoistoku, premda jasnije diferencirana i vidljivija samo na nekim prikazima. Strelice progradacije su naznačene samo na horizontima gdje je napredovanje vidljivo, no prikazi pojednih promatranih horizonata ovise o amplitudnom i frekvencijskom spektru, pa su pojedine značajke nekad više, a ponekad manje uočljive.
Tijela sa karakterističnim svijetlim odzivima nastala su zapunjavanjem kanala lokalnim donosom materijala. Atributi prikazuju više događaja kroz geološko vrijeme gdje su se između turbiditnih struja taložili bazenski lapori.

6.7.1.8 KOMBINIRANA INTERPRETACIJA ATRIBUTA KOHERENCIJE I SPEKTRALNE DEKOMPOZICIJE

Tumačenje ovih prikaza već je dato u prethodnom poglavlju, no atribut koherencije je poslužio kao dodatan argument mogućoj interpretaciji.

Kombinirana interpretacija ova dva atributa vrlo dobro opisuje geometrijske karakteristike, te su zbog vjernije interpretacije slijeda taloženja i opće slike predviđanja sedimentoloških značajki napravljeni prikazi više horizonata između, iznad i ispod krovine oba ležišta Pepelana pješčenjaka kako bi se dobio pouzdaniji prikaz mogućeg slijeda događaja. Prikazani atributi rađeni su na interpretiranim horizontima približno svakih 20-40 ms što bi otprilike bilo svakih dvadesetak metara. Na atributima su vidljivi kanali koji meandriraju s pretpostavljenim donosom materijala od sjeverozapada prema jugoistoku, te se na jugoistoku šire u lepezno tijelo (**Slike 8.2.6.1., 8.2.6.2., 8.2.6.3., 8.2.6.4**.). **Slike 8.2.6.5. i 8.2.6.6.** prikazuju iste atribute po horizontima 20 ms iznad Ležišta 2 i samog Ležišta 2 gdje se izrazitije vide rubovi kanala blizu bušotina, dok se lepezasto tijelo na jugu slabije uočava. **Slike 8.2.6.7. i 8.2.6.8.** opisuju horizonte oko 30 ms i 50 ms ispod Ležišta 2 koji se nalaze još uvijek u zoni Pepelana pješčenjaka i prikazuju splet drugačijih kanala s formom progradirajućih turbiditnih lepeza na jugu.

9.2 USPOREDBA DIJELA REZULTATA S DOSADAŠNJIM ISTRAŽIVANJIMA

Interpretacija i analiza geomorfologije turbiditnih sustava dubljevodnih bazena gdje se vizualiziraju građevni elementi turbiditnih lepeza (pomoću karti seizmičkih atributa, a naročito spektralne dekompozicije) počelo se primjenjivati zadnjih godina. Prije svega jer dubokovodni pješčenjaci u Panonskom jezeru imaju dokazanu ekonomsku vrijednost zbog velikog broja akumulacija ugljikovodika uglavnom u strukturnim zamkama (**Pogácsás et al., 1994; Horváth & Tari, 1999; Lučić et al., 2001; Vrbanac, 2002; Saftić et al., 2003; Magyar et al., 2006; Corver et al., 2009**). Također u unutrašnjosti bazena stratigrafske zamke u turbiditnim sustavima u kombinaciji s nagibima progradacija su od sve većeg interesa, pogotovo u najnovijim rezultatima istraživanja, te razrada detaljnog taložnog modela može ukazivati na ležišta ugljikovodika (**Sztanó et al., 2013**).

U radu Sztanó et al. (2013) na seizmičkim profilima interpretirane su agradacijske i progradacijske klinoforme ruba šelfa, padine i središta bazena Mako depresije unutar slijedova

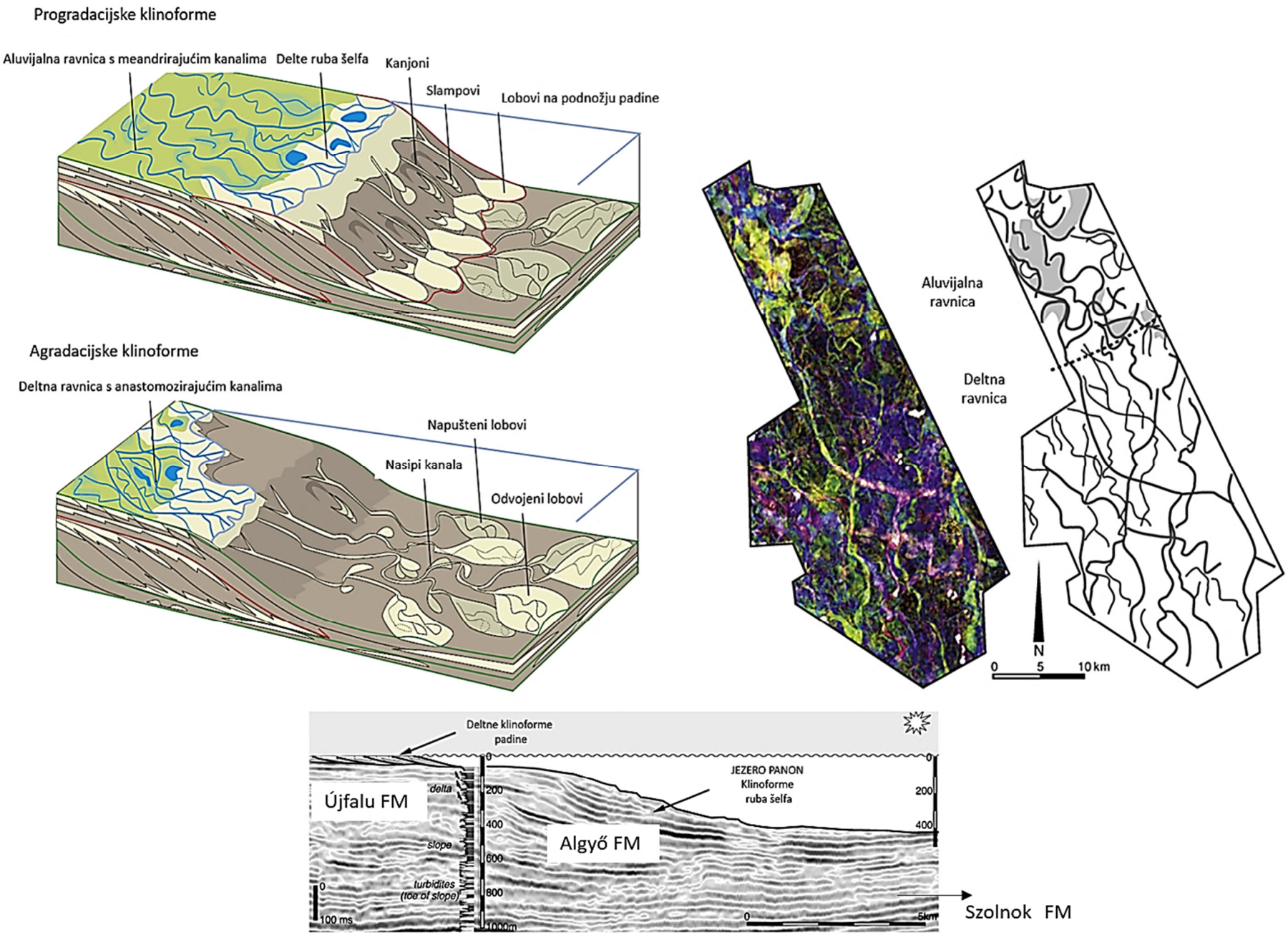
na padini, kao i različite karte atributa horizonata različitih formacija za prikaz paleo-geomorfologije.

U Mako depresiji u Mađarskoj proučavane su uz ostale formacije i naslage donjeg dijela padine te povezane turbiditne Formacije Algyő (turbiditi podnožja padine) i Szolnok (bazenski turbiditi) (**Sztanó et al., 2013**). Formacija Szolnok i dio Formacije Algyő može se korelirati s Formacijom Kloštar-Ivanić (**slika 5.3.2.**) te također predstavlja sustave turbidita na padinama i prema središtu bazena (**Berczi, 1988; Juhazs, 1994; Sztanó et al., 2013**).

Na **slici 9.2.1.** prikazan je depozicijski model turbiditnih sustava Formacije Algyő s agradacijskim i progradacijskim klinoformama. Sediment je transportiran meandrirajućim rijekama te deltama na rubu šelfa. Prikazane su klinoforme ruba šelfa Formacije Algyő, dok se klinoforme na padinama obično u rasponu seizmičke vertikalne rezolucije ne mogu detektirati na konvencionalnim seizmičkim podacima. Ne mogu se uspoređivati s klinoformama ruba šelfa uobičajeno vidljivim na seizmičkim profilima (**Porebski & Steel, 2003; Johannessen & Steel, 2005, Henriksen et al., 2011, Magyar et al., 2013**) (**Slika 9.2.1.** dolje).

Na slici desno prikazan je kombinirani atribut spektralne dekompozicije usporedno s interpretacijom aluvijalne i deltne ravnice gdje su vidljivi meandrirajući kanali aluvijalne ravnice te mreža anastomozirajućih kanala.

Neki su morfološki elementi dovoljno veliki da se mogu analizirati na seizmičkim profilima. Ostali morfološki elementi koji su ispod seizmičke razlučivosti identificirani su kao amplitudne anomalije. Ti se elementi mogu jasnije vizualizirati na mapama seizmičkih atributa (**Sztanó et al., 2013**).



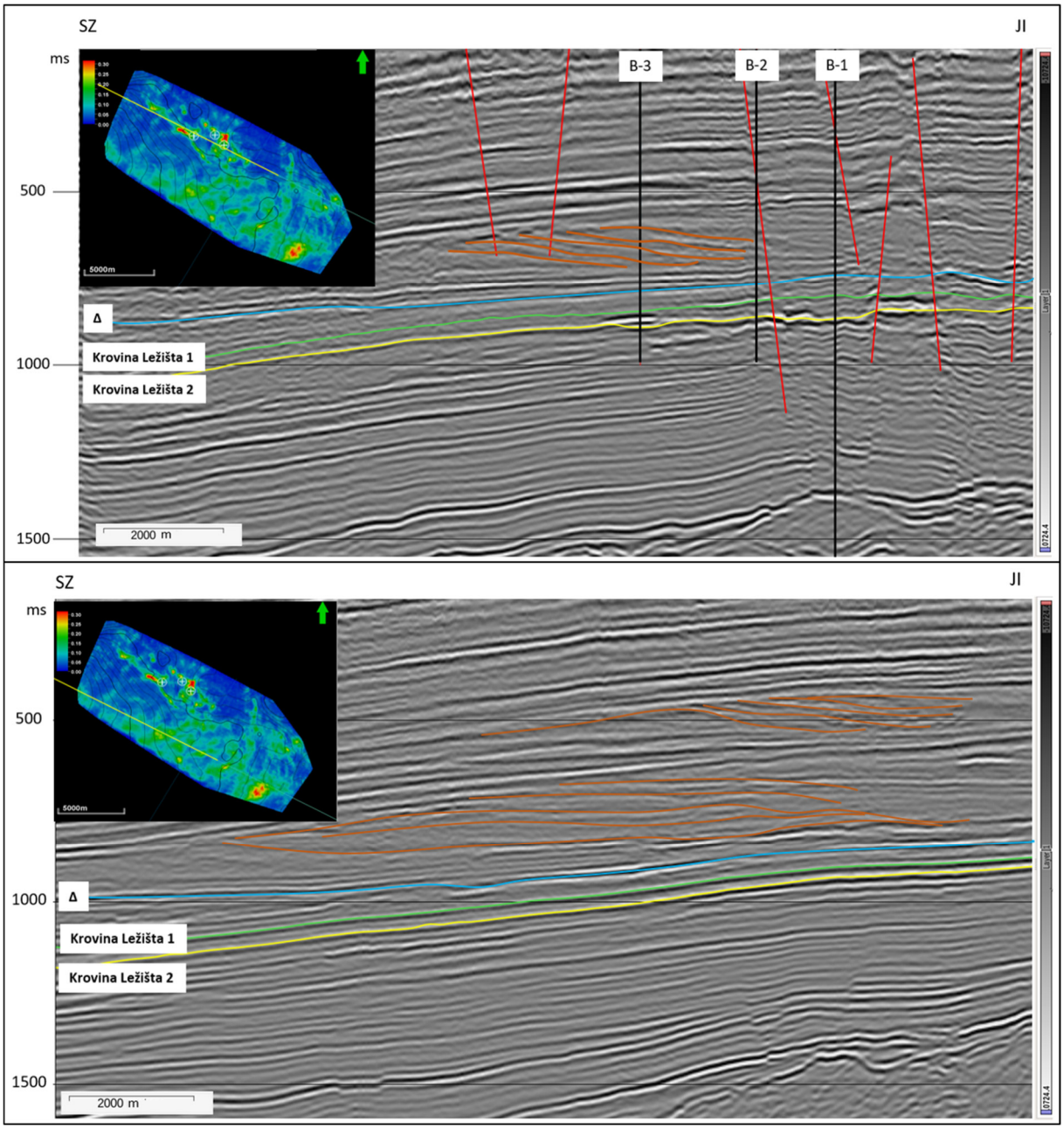
Slika 9.2.1.: Taložni model agradacijskih i progradacijskih klinoformi turbiditnih sustava Formacije Algyő Mako depresije u Mađarskoj, klinoforme ruba šelfa Formacije Algyő i kombinirani atribut spektralne dekompozicije usporedno s interpretacijom aluvijalne i deltne ravnice (preuzeto i modificirano iz Sztanó et.al., 2013).

Na seizmičkim profilima Formacija Szolnok obuhvaća paralelne refleksije umjerene amplitude i kontinuiteta dok se padina sastoji od sigmoidnih i kosih reflektora. Prijelaz padine niskog kuta u podinu bazena je široko s relativno visokom amplitudom i više kontinuiranih reflektora (**Sztanó et al., 2013**).

Za razliku od debelih, naslaganih pješčanih tijela formacije Szolnok, pješčenjaci u donjem dijelu Formacije Algyő su samo 10–40 m debljine. Pješčana tijela se tumače kao jednostavni lobovi i ispune kanjona ili kanala naizmjenično sa šejlovima padine (slampovi) i šejlovima koji označavaju prekide u opskrbi pješčanim sedimentom (**Phillips et al., 1994, Juhász, 1991; Sztanó et al.,2013**).

Analizirano područje uključuje pješčenjake Pepelana Formacije Kloštar-Ivanić koju je po novijim saznanjima moguće korelirati s Formacijom Szolnok i eventualno donjim dijelom Formacije Algyő (**Sebe et al., 2020**) (**Slika 5.3.2**.). Turbiditni sustavi mogu pokazivati progradacijske klinoforme, no obzirom da se područje nalazi u donjem dijelu padine prema bazenu na seizmičkim profilima vidljive su također paralelne refleksije umjerenog kontinuiteta. Isto tako istraživano područje je male debljine te su neki elementi ispod seizmičke razlučivosti (**Slika 9.2.2**.).

Na **slici 9.2.2.** prikazana su dva profila (gornji prolazi područjem triju bušotina, a donji interpretiranom turbiditnom lepezom na jugu) gdje su iznad Formacije Kloštar Ivanić, iznad EK markera Δ. vidljive progradacije gornjih formacija koje se mogu korelirati s Formacijama Algyő i Újfalu.



Slika 9.2.2. Vidljive klinoforme iznad formacije Kloštar Ivanić unutar Bilogora formacija (Δ dijeli ove dvije formacije)

Atribut spektralne dekompozicije koristio se na sličan način kao i u radu Sztanó et al. (2013), pomoću kojeg se kanali i turbiditne lepeze mogu lakše izdvojiti i interpretirati.

Ovaj uzorak agradacijskih do progradacijskih klinoforma ruba šelfa uočen je u cijelom Panonskom bazenu. Brze klimatski izazvane varijacije razine jezera pojačavaju učinak autigenih procesa na šelfu odnosno varijaciju donosa sedimenta na kratkim udaljenostima (**Kovács et al., 2021**).

Smjer progradacije dominatno je bio od sjeverozapada prema jugoistoku, no seizmički prikazi visoke razlučivosti u južnom prednjem dijelu Transdanubijskog pojasa – Blatno jezero prikazuju prisutnost progradacija jug-jugoistok u vidu klinoforma visine nekoliko desetaka metara (**Sacchi et al., 1998.; Sztanó i Magyar, 2007; Horváth et al., 2010, Magyar et al., 2012**). Prije 8,6 mil.god. rubovi šelfa paleo Dunava i paleo Tise kao dva zasebna sustava spojili su se i formirali jednolični šelf (**Magyar et al., 2012**).

9.3 AVO ANALIZA

Napravljena je i AVO analiza na *Angle gatherima* gdje se usporedno prikazala i anomalija unutar analiziranog prozora uključujući anomalije na sve tri bušotine u kojem je preklopljen volumen sekundarnog AVO atributa *Sign (intercept)*gradient* te izračunat križni dijagram *Intercept/Gradient* na temelju kojeg možemo zaključivati o AVO klasama na sve tri bušotine (**Slike 8.4.2.2., 8.4.2.3., 8.4.2.4.).**

Analizom *gathera* na sve tri bušotine izrazito je vidljivo povećanje amplitude s *offsetom*/kutom. Na svim bušotinama vidljive su AVO anomalije klasa II i III. Anomalija na dvije negativne bušotine također se nalazi u zoni zasićenja plinom što je vrlo dvoznačno obzirom da su prilikom bušenja u tim intervalima dokazane pojave novih plinova u vrlo malim koncentracijama. Jedan od osnovnih nedostataka AVO metode je što ona može detektirati i vrlo male pojave plina, što u konačnici dovodi do teže raščlambe područja neznatnog ili komercijalnog zasićenja.

Napravljene su i analize *Angle gathera* koristeći kuteve do 30 i do 45 stupnjeva, te su na temelju njih izračunati AVO atributi intercept i gradient i napravljeni njihovi križni dijagrami. Usporedba je napravljena kako bi se dokazao utjecaj pažljivog biranja raspona kutova koji mogu uvelike utjecati na pravilnu interpretaciju. Premda su rezultati slični za sve tri bušotine, te pokazuju istovjetne rezultate, disperzija točaka je drugačija, kao i položaj točkastih podataka oba ležišta i njihovih ekvivalenata (**Slike 8.4.4.7.- 8.4.4.12**.).

9.2.1 ANALIZA AVO ATRIBUTA

Analizirani su i pojedini primarni i sekundarni AVO atributi duž krovina oba ležišta. Ekstrahirana RMS amplituda na primarnom AVO atributu gradijenta duž krovine Ležišta 1 i njihovih litostratigrafskih ekvivalenata pokazuje vrijednosti povišenih amplituda na lokaciji bušotine B-1 i rubu bušotine B-3.

Također, vrijednosti povišenih amplituda nalaze se južno i jugoistočno u području prepletenih kanala i turbiditne lepeze interpretirane na atributu spektralne dekompozicije. Povišene vrijednosti gradijenta ukazuju na povećanje amplitude na dalekim offsetima što može ukazivati na zasićenje ugljikovodicima. Duž krovine Ležišta 2 povišene vrijednosti RMS amplitude na volumenu gradijenta nalaze se u području bušotine B-1, a bušotine B-2 i B-3 nalaze se na rubovima anomalija. Vide se mjesta povišenih amplituda u području interpretiranih turbiditnih lepezi južno i jugoistočno, te u području kanala koji je interpretiran na atributu spektralne dekompozicije u smjeru sjeverozapad-jugoistok, a kojeg je rubno probušila bušotina B-3 (**Slike 8.3.1.1., 8.3.1.2.**).

Sekundarni AVO atribut *Sign (intercept) * gradient* možemo smatrati jednim od indikatora zasićenjem ugljikovodicima. Duž krovine Ležišta 1 pokazuje povišene vrijednosti uokolo pozitivne bušotine B-1 što se i potvrđuje dokazanim plinskim zasićenjem dok se druge dvije negativne bušotine nalaze u zonama niskih vrijednosti amplituda, no vrlo blizu povišenim vrijednostima. Područje interpretirane turbiditne lepeze na jugu promatranog horizonta pokazuje izrazito povišene vrijednosti u svom distalnom dijelu, te postoje i anomalna područja manjih dimenzija na jugoistoku. (**Slika 8.3.2.1.).**

Povišene vrijednosti amplituda duž krovine horizonta Ležišta 2 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata vidljive su u okolici pozitivne bušotine B-1, dok su negativne bušotine u zoni niskih vrijednosti. Turbiditna lepeza na jugu nazire se pojedinačnim anomalijama manjih dimenzija, dok lepeza na jugoistoku promatranog horizonta pokazuje izrazito povišene vrijednosti (**Slika 8.3.2.2**).

Na sekundarnom AVO atributu produkta intercepta i gradienta duž krovine Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata područja povišenih vrijednosti izostaju u okolici svih triju bušotina, no izrazito su vidljiva u distalnom području turbiditne lepeze na južnom dijelu promatranog horizonta (**Slika 8.3.2.3**.). Prikaz ekstrahirane RMS amplitude duž krovine Ležišta 2 prikazuje bušotinu B-1 u zonama povećanih amplituda što nam i je direktan pokazatelj

prisutnosti ugljikovodika, dok se druge dvije bušotine nalaze u zonama sniženih vrijednosti. Južno i jugoistočno vidljivo je mnoštvo anomalija malih dimenzija (**Slika 8.3.2.3**.).

Atribut AVO snage izrazito naglašava amplitudne anomalije povezane s plinskim zasićenjem, no isto tako može ukazivati i na kvalitetu rezervoara, kao i na nekomercijalne pojave plina.

Slika 8.3.2.5. prikazuje RMS amplitudu ekstrahiranu na atributu AVO snage duž Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata. Sve tri bušotine nalaze se rubno ili na područjima anomalija malo povišenih amplituda. Vidljive su povišene vrijednosti na jugu promatranog horizonta na temelju kojih se može potvrditi interpretacija turbiditne lepeze. Također jugoistočno mjesta povišenih amplituda ukazuju na oblik druge lepeze.

Duž horizonta krovine Ležišta 2 opet je vidljiva anomalija oblikovana kao kanalsko tijelo povišenih vrijednosti u blizini bušotine B-3 koja može ukazivati na eventualno zasićenje plinom ali i na prisustvo plina u malim koncentracijama što je jedan od nedostataka AVO metode. Bušotina B-1 nalazi se na rubu jake anomalije, a bušotina B-2 u zoni nižih vrijednosti, no u okolici su vidljiva područja viših amplituda. Turbiditne lepeze interpretirane na atributu spektralne dekompozicije južno i jugoistočno nalaze se u zonama povišenih vrijednosti amplituda (**Slika 8.3.2.6.).**

Angle stackovi i kombinirani AVO atributi koriste se za brzu kvalitativnu AVO analizu, te se njihovi rezultati moraju kombinirati s drugim metodama kako bi se dobila vjerodostojna interpretacija. (Far -Near) * Far atribut izrazito naglašava vrlo visoke vrijednosti amplituda čije povećanje ukazuje na zasićenje ugljikovodicima i indikator je AVO klasa II i III. Duž krovine Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata vidljivo je izrazito povećanje amplitude na lokaciji bušotine B-1, dok su druge dvije negativne bušotine u zonama niskih vrijednosti premda u blizini anomalija. Izrazito povećane vrijednosti vidljive su u području turbiditne lepeze na jugoistoku (**Slika 8.3.3.1.**). Prikaz atributa po horizontu Ležišta 2 pokazuje povećane vrijednosti u okolici bušotine B-1, dok se druge dvije negativne bušotine nalaze u zonama vrlo niskih amplituda. Također jugoistočno u distalnom području interpretirane turbiditne lepeze vide se područja izrazito povišenih vrijednosti. Obzirom da nam pozitivna bušotina potvrđuje izgled amplituda ovaj atribut može se smatrati korisnim u istraživanju zasićenja ugljikovodicima (**Slika 8.3.3.2**.).

Kombinirani atribut dobiven AVO RGB blending metodom je koristan u interpretaciji razlikovanja vrsta facijesa, te ističe kanalna tijela kao i podvodne lepeze. Osim toga, vjerodostojnije prikazuje i rasjedne zone i razlomljena područja. Atribut ekstrahiran duž krovine Ležišta 1 izrazito ističe kanal iz smjera sjeverozapada koji na jugu horizonta prelazi u mnoštvo prepletenih meandrirajućih kanala koji na svom kraju tvore lepezasto tijelo. Također

je vidljiva i vjerojatna turbiditna lepeza na jugoistoku horizonta. Sve tri bušotine se nalaze u zoni manjeg spleta kanala. Istočno od bušotine B-1 vidljiva je razlomljena zona kaotičnih refleksa (**Slika 8.3.3.3**.). Atribut prikazan duž krovine Ležišta 2 odnosno pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata prikazuje turbiditnu lepezu na jugu. Vidljiv je kanal koji prolazi područjem triju bušotina te tvori vlastitu podvodnu lepezu taloženu iz turbiditnih struja. Vidljiva su kanalna tijela u okolici triju bušotina u bijeloj boji preklapajućeg spektra koje ukazuju na kanale i tokove koji egzistiraju zasebno (**Slika 8.3.3.4**.).

Jedan od atributa koji može ukazivati na zasićenje ugljikovodicima je ekstrahirana RMS amplituda na seizmičkom volumenu dalekih offseta. Na tom atributu duž horizonta Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata bušotina B-1 nalaze se u području visokih vrijednosti, dok se druge dvije bušotine nalaze rubno. Također se područja povišenih vrijednosti mogu uočiti južno i jugoistočno duž promatranog horizonta gdje su interpretirane turbiditne lepeze (**Slika 8.3.3.5.).**

Ekstrahirana RMS amplituda duž krovine Ležišta 2 pokazuje povećane vrijednosti u okolici bušotine B-1, ali i negativne bušotine B-3 (koja na tom nivou ima dokazane pojave novih plinova 6 %). Bušotina B-2 je u zoni niskih, premda okružena područjima viših amplituda. Povećane vrijednosti također se mogu pratiti na jugu i jugoistoku horizonta na mjestima interpretiranih turbiditnih lepezi (**Slika 8.3.3.6**.).

9.4 ANALIZA ATRIBUTA DOBIVENIH SEIZMIČKOM INVERZIJOM POMOĆU NEURONSKIH MREŽA

Predviđanje vrijednosti karotažnih podataka odnosno krivulja spontanog potencijala, gustoće, otpornosti i brzina rađene su koristeći seizmički volumen koji nije filtriran nakon postupka migracije i krivulje sa sve tri bušotine te su podaci ekstrahirani duž krovina Ležišta 1 i Ležišta 2.

Predviđanje krivulja spontanog potencijala može nam pomoći pri raščlanjivanju propusnih i nepropusnih naslaga. Premda su za čitavo područje uzete u obzir samo krivulje s tri dostupne bušotine što nam daje slabiju moć predviđanja i manje vjerodostojne rezultate nego u slučaju većeg broja bušotina, ipak će područja u blizini bušotina pokazivati pouzdanije rezultate.

Na **slici 8.5.2.1.1.** se može vidjeti da se bušotine koje su bez pojava ugljikovodika (B-3 i B-2) po nivou krovine ekvivalent Ležišta 1 nalaze u zoni viših vrijednosti te se pomiču prema liniji nepropusnih naslaga, a bušotina B-1 koja je pozitivna se nalazi u zoni nižih vrijednosti odnosno propusnih naslaga. Turbiditna lepeza koja se nalazi na jugu promatranog horizonta također se nalazi u vjerojatnoj zoni propusnih naslaga. Po nivou Ležišta 2 (**Slika 8.5.2.1.2.)** negativne bušotine nalaze se u zoni nepropusnih dok je bušotina B-1 u zoni propusnih naslaga. Na jugu u području interpretirane turbiditne lepeze vidljiva su područja propusnijih naslaga, kao i na krajnjem jugoistoku, na distalnom području druge interpretirane turbiditne lepeze. Treba naglasiti da ugljikovodici pomiču vrijednosti spontanog potencijala prema liniji nepropusnih naslaga, te se stoga analiza ovog atributa treba kombinirati s drugim metodama.

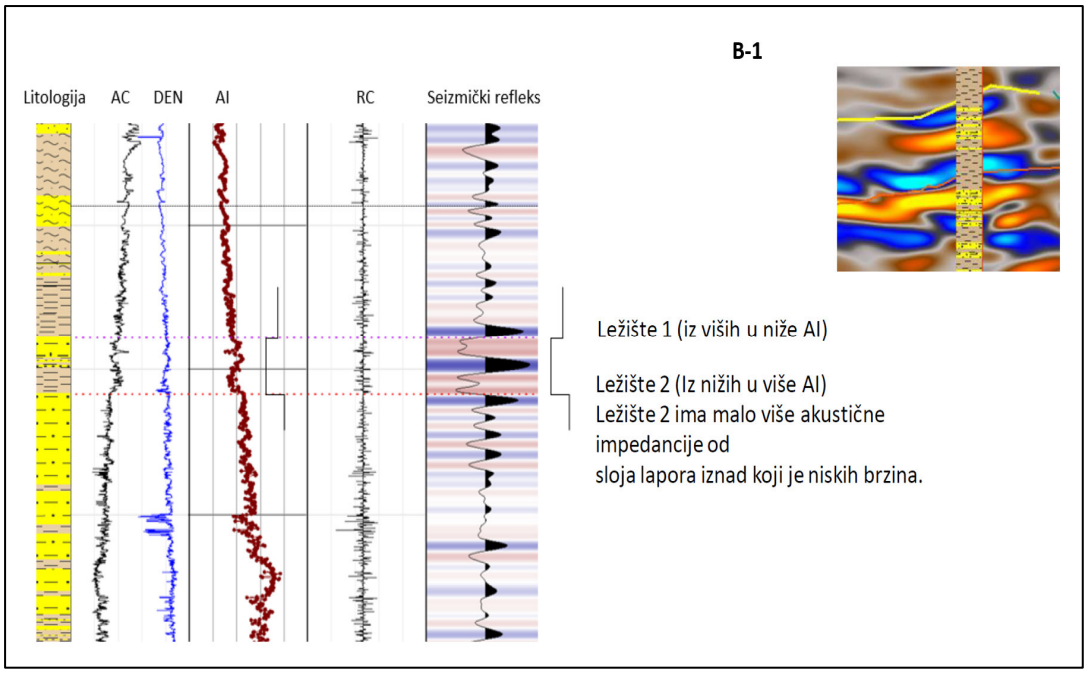
Predviđanje krivulja otpora može nam kao jedan od podataka u kombinaciji sa drugim analizama pružiti informaciju o područjima većih i manjih otpornosti. Ugljikovodici se odlikuju povišenim vrijednostima otpornosti. Na **slici 8.5.2.2.1**. prikazano je predviđanje logova otpora duž krovine Ležišta 1. Pozitivna bušotina B-1 nalazi se u zoni povišenih vrijednosti otpornosti, koje mogu ukazivati na eventualno prisustvo ugljikovodika, dok su druge dvije negativne bušotine u zonama nižih vrijednosti. Područje isprepletenih kanala koji završavaju oblikom lepezne delte također je u zoni povišenih vrijednosti kao i delta na jugoistoku. Rezultati duž krovine Ležišta 2 nisu toliko jednoznačni, sve bušotine nalaze se u zonama viših vrijednosti dok je bušotina B-1 na rubu viših otpornosti, kao i interpretirana turbiditna lepeza na jugu (**Slika 8.5.2.2.1**.).

Predviđanje karotažnih krivulja gustoće može nam također pomoći u razotkrivanju karakteristika eventualnih ležišta. Plinom zasićeni pješčenjaci odlikuju se manjim gustoćama od vodom zasićenih pješčenjaka.

Na **slici 8.5.2.3.1.** duž horizonta krovine Ležišta 1 sve tri bušotine nalaze se u zonama srednjih vrijednosti gustoće. Vidljivo je lepezasto tijelo niskih gustoća na jugu promatranog horizonta. Predviđanje vrijednosti gustoće duž krovine Ležišta 2 ne pokazuje jednoznačne rezultate jer se sve tri bušotine nalaze rubno između područja viših i nižih vrijednosti gustoća (**Slika 8.5.2.3.2.**). Napravljeno je i predviđanje vrijednosti brzine izražene u vrijednostima 1/v gdje su na slikama **8.5.2.4.1** i **8.5.2.4.2** mjesta koja su prikazana višim vrijednostima, zapravo mjesta nižih brzina i obrnuto. Obzirom da prisustvo plina smanjuje brzine seizmičkih valova, ova vrsta seizmičke inverzije se također može koristiti prilikom interpretacije. Na ovom primjeru predikcija u slučaju krovine Ležišta 1 nije pokazala jasno razgraničenje, sve tri bušotine nalaze se u zonama srednjih vrijednosti brzina. No bez obzira što razlika nije jasno vidljiva, po krovini Ležišta 2 može se uočiti da se bušotina B-1 nalazi u zoni nižih brzina.

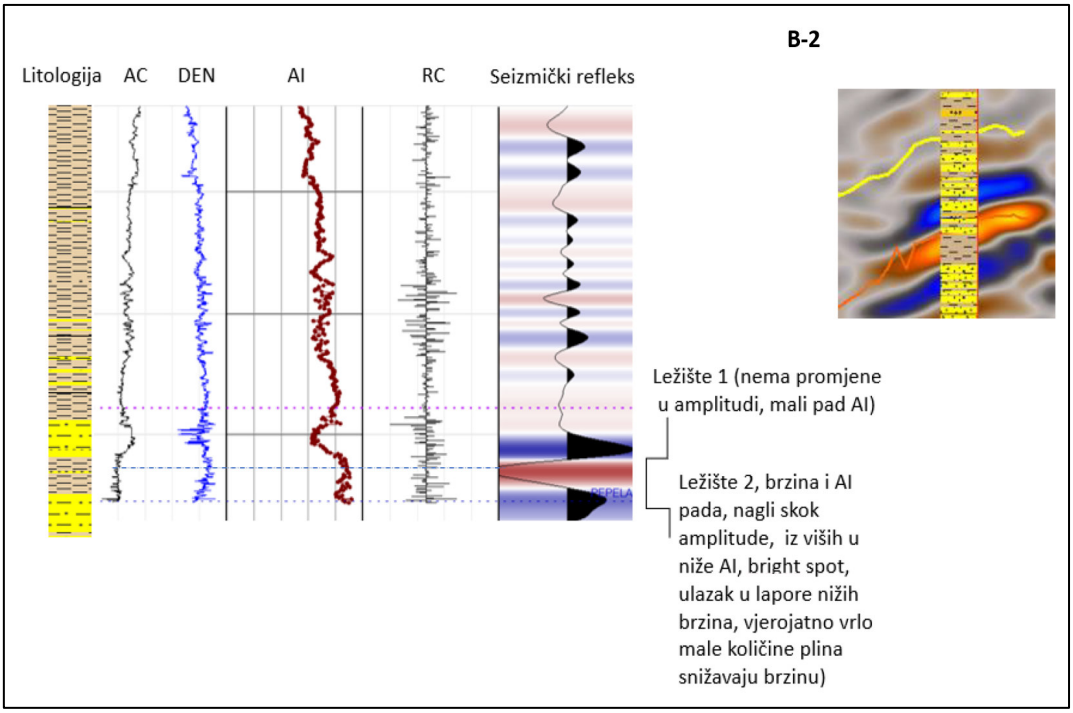
9.5 ANALIZA AKUSTIČNIH IMPEDANCIJA

Napravljena je analiza akustičnih impedancija promatrajući vrijednosti brzina i gustoća usporedo sa izgledom seizmičkog refleksa na sve tri bušotine na krovinama oba ležišta i njihovih litostratigrafskih ekvivalenata na negativnim bušotinama. Na **slici 9.9.** prikazana je litologija, krivulje brzine (AC) i gustoće (DN) dobivene karotažnim mjerenjima iz kojih je izračunata akustična impedancija (AI) te su prikazani i pripadajući koeficijenti refleksije te izgled seizmičkih refleksa na bušotini B-1. Na ulazu u Ležište 1 vidljiv je pad akustičnih impedancija, a u Ležište 2 porast impedancija zbog sloja lapora iznad koji ima niže brzine vjerojatno zbog količina plina manjih koncentracija koji mu snižavaju brzinu.



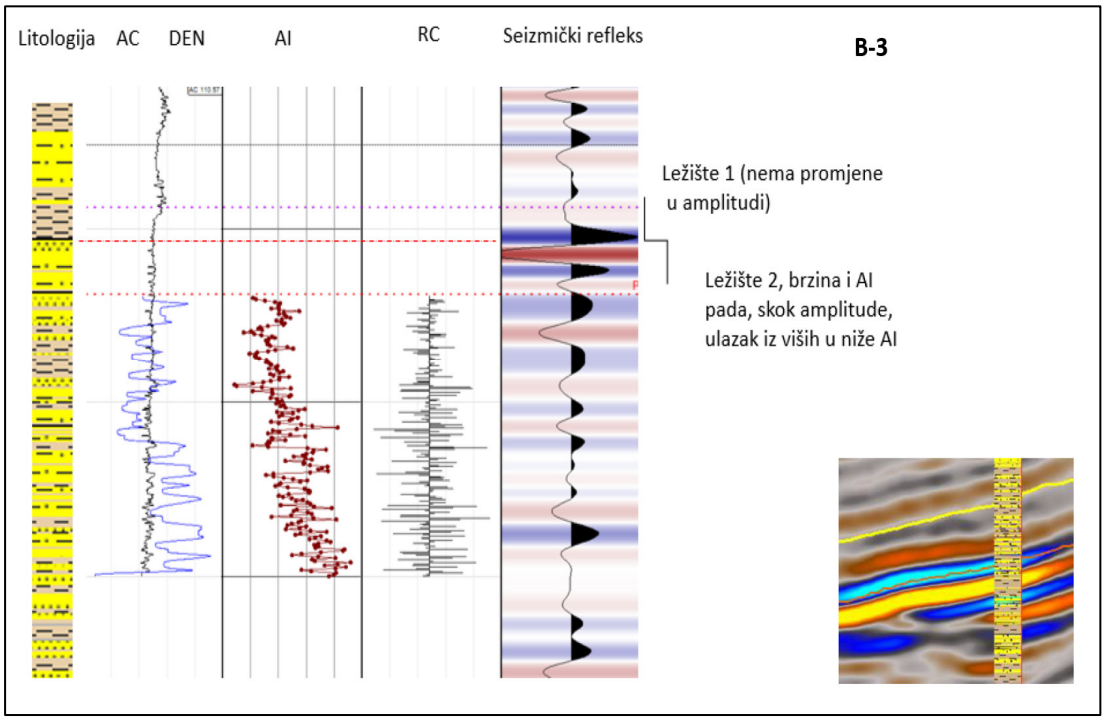
Slika 9.9. Akustične impedancije i izgled seizmičkog refleksa na krovinama oba ležišta u bušotini B-1

Na **slici 9.10.** litostratigrafski ekvivalent Ležišta 1 u bušotini B-2 nema promjene u amplitudi i zabilježen je mali pad akustičnih impedancija. Na ulasku u Ležište 2 vidljiv je nagli skok amplitude i ulazak u niske akustične impedancije.



Slika 9.10. Akustične impedancije i izgled seizmičkog refleksa na krovinama oba ležišta u bušotini B-2

Slika 9.11., koja se odnosi na bušotinu B-3, prikazuje litostratigrafski ekvivalent Ležišta 1 bez promjena u amplitudi i akustičnim impedancijama, a ulazak u ekvivalent Ležišta 2 očituje se naglim skokom amplitude i ulaskom iz viših u niže akustične impedancije. Na seizmici to izgleda kao *Bright spot* kako je već bilo govora i zaključak koji proizlazi iz anomalnog ponašanja amplitude jest da se u oba negativna ležišta vjerojatno nalaze niske koncentracije plina koje smanjuju brzinu i gustoću. Na temelju tih analiza još uvijek se ne može jednoznačno ustvrditi razlika između komercijalnih i nekomercijalnih ležišta.



Slika 9.11. Akustične impedancije i izgled seizmičkog refleksa na krovinama oba ležišta u bušotini B-3

9.6 ANALIZA AKUSTIČNIH IMPEDANCIJA DOBIVENIH INVERZIJOM U BOJI

Na temelju rezultata seizmičke inverzije u boji (*Coloured inversion*-CI) na podacima nakon zbrajanja *post-stack* analizom akustičnih impedancija prikazani su seizmički profili kroz sve tri bušotine, kao i prikaz po horizontima krovina oba ležišta i njihovih pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata. Obzirom da pad akustičnih impedancija odnosno pad brzine i gustoće može ukazivati na eventualno zasićenje ugljikovodicima, ovom vrstom analize dobiveni su zadovoljavajući rezultati. Na **slici 8.6.2.** ulaskom u Ležište 1 vide se niže vrijednosti akustičnih impedancija, dok je ulazak u Ležište 2 okarakteriziran najnižim vrijednostima. Cijeli interval između oba ležišta pokazuje zone smanjenih brzina i gustoća. Prikaz inverzije u boji na seizmičkom profilu kroz bušotinu B-2 na čitavom intervalu između oba ležišta zapravo pokazuje zone povišenih vrijednosti impedancija (**Slika 8.6.3).** Slika 8.6.4. prikazuje profil seizmičke inverzije kroz bušotinu B-3 gdje se između oba ležišta vide leće niskih impedancija, koje prelaze u izrazito visoke, pa opet u niske akustične impedancije. Sam ulazak u litostratigrafski ekvivalent Ležišta 1 pokazuje relativno niže vrijednosti, dok je ulazak u ekvivalent Ležišta 2 obilježen visokim vrijednostima akustičnih impedancija.

Mjerenjem vrijednosti količine novih plinova iz plinske karotaže dobiveno je 6,95 % plina između oba ležišta što je vjerojatno smanjilo vrijednosti brzina i gustoća.

Analizirajući rezultate seizmičke inverzije odnosno vrijednosti relativnih akustičnih impedancija duž horizonta krovine Ležišta 1 kao i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata na **slici 8.6.5.** moguće je uočiti da se pozitivna bušotina B-1 nalazi u zoni sniženih vrijednosti impedancija, dok se druge dvije bušotine B-2 i B-3 nalaze u zoni nešto viših vrijednosti. Dakako obzirom da rezultati ne pokazuju oštro razgraničenje već se nalaze u okvirima relativno bliskih vrijednosti ne možemo sa sigurnošću ustvrditi jeli možda područje isprepletenih meandrirajućih kanala koji završavaju podvodnom lepezom na jugu doista u zoni zasićenja ugljikovodicima, premda neki dijelovi ukazuju da bi to mogao biti slučaj.

Rezultati analize po krovini Ležišta 2 i njegovih ekvivalenata na **slici 8.6.6.** pokazuju da se bušotina B-1 nalazi u zoni sniženih vrijednosti akustičnih impedancija, a to vrijedi i za bušotinu B-3. Bušotina B-2 je u zoni povišenih vrijednosti. Interpretirana lepeza na jugu u nekim dijelovima pokazuje izrazito snižene vrijednosti, dok na jugoistoku visoke vrijednosti. Rezultati nisu jednoznačni. No obzirom da su u cijelu kvantifikaciju uzete relativne vrijednosti akustičnih impedancija samo triju dostupnih bušotina, kao i kod svih vrsta seizmičkih inverzija rezultati udaljenih područja ne mogu se smatrati krajnje pouzdanim, premda nam mogu dati opću sliku.

9.7 ZBIRNI ZAKLJUČCI SVIH ATRIBUTNIH ANALIZA

Tablice **9.7.1. i 9.7.2.** prikazuju zbirno ponašanje amplituda promatrajući jednostavne i kombinirane atribute i AVO atribute na lokacijama analiziranih bušotina B-1, B-2 i B-3, te područjima interpretiranih turbiditnih lepeza na jugu i jugoistoku promatranih horizonata krovina Ležišta 1 i Ležišta 2, te njihovih litostratigrafskih ekvivalenata. Izrazita povećanja vrijednosti amplituda prikazana su znakom plus (+), dok su područja niskih vrijednosti prikazana znakom minus (-). Znak +/- na područjima bušotina prikazuju da se bušotina nalazi na rubu anomalije, a u slučaju interpretiranih turbiditnih lepeza južno i jugoistočno da su samo pojedina područja u zonama povišenih vrijednosti.

Od ukupno osam seizmičkih i AVO atributa, bušotina B-1 duž krovine Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata pokazuje povišene vrijednosti amplituda za sedam atributa koji upućuju na eventualno zasićenje ugljikovodicima. U bušotini B-1 dokazano je plinsko ležište duž ovog horizonta, te rezultati potvrđuju realni status.

Bušotina B-2 duž krovine Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata se na prikazu sedam atributa nalazi u zonama niskih vrijednosti amplituda, dok se na jednom nalazi na rubnim područjima. U ovoj bušotini na nivou litostratigrafskog ekvivalenta Ležišta 1 nema pojava novih plinova što potvrđuje rezultate.

Bušotina B-3 duž krovine Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata se nalazi na rubnom području anomalija za četiri atributa i u zonama niskih vrijednosti preostala četiri analizirana atributa. U ovoj bušotini na nivou litostratigrafskog ekvivalenta Ležišta 1 ima pojava novih plinova NP=1,4 % na 895 m. AVO atributi mogu prikazivati anomaliju i u slučaju vrlo malih količina plina što je glavni nedostatak ove metode.

Bušotina B-1 duž krovine Ležišta 2 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata nalazi se u području povišenih vrijednosti na šest atributa, te na jednom na rubnom području. Na ovom nivou u ovoj bušotini također je dokazano plinsko ležište, te rezultati analiza mogu potvrditi kombinirani pristup interpretacije svih atributa primjenjivim u budućim istraživanjima eventualnih ležišta ugljikovodika. Bušotina B-2 duž krovine Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata se nalazi na prikazima pet analiziranih atributa u područjima niskih vrijednosti, na dva na rubnom području i na jednom u području viših vrijednosti. Na ovom nivou registrirana je samo jedna pojava novog plina u vrlo malom postotku NP= 1,1 %.

Na području bušotine B-3 duž krovine Ležišta 2 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata zona povećanih vrijednosti amplituda nalazi se na tri analizirana atributa, na dva atributa bušotina se nalazi na rubnom području anomalije, a na dva AVO atributa na mjestima niskih vrijednosti

amplituda. U ovoj bušotini na nivou litostratigrafskog ekvivalenta Ležišta 2 pojavljuju se novi plinovi u postotku NP= 6,95 %.

Promatrajući sekundarne AVO atribute *Sign(intercept)*gradient* i *Intercept*Gradient*, obje negativne bušotine nalaze se na oba nivoa u područjima niskih amplituda, dok se pozitivna bušotina B-1 na nivou Ležišta 1 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata na analiziranom atributima nalazi u zoni povećanih vrijednosti. Duž krovine Ležišta 2 i njegovih litostratigrafskih ekvivalenata bušotina B-1 pokazuje izrazito povišene vrijednosti za oba atributa u odnosu na druge dvije bušotine. Rezultati pokazuju mogućnost primjene u budućim istraživanjima plinskih ležišta (**Slike 8.3.2.1., 8.3.2.2.,8.3.2.3 i 8.3.2.4.**).

Interpretirana turbiditna lepeza na jugu duž krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata pokazuje zone povećane vrijednosti amplituda za četiri analiziranih atributa. Tri su u pojedinim područjima viših vrijednosti, a jedan atribut pokazuje snižene vrijednosti amplituda. Na jugoistoku četiri atributa pokazuju zone povišenih vrijednosti duž interpretirane turbiditne lepeze, a četiri u nekim područjima.

Duž krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata na jugu tri atributa pokazuju povišene vrijednosti, dok pet pokazuju visoke vrijednosti u pojedinim područjima. Na jugoistoki šest atributa pokazuju povišene vrijednosti.

Tablica 9.7.1. Prikaz povišenih i niskih vrijednosti amplituda na analiziranim seizmičkim i AVO atributima duž krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata

Jednostavni, kombinirani i AVO atributi								
Krovina Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata	RMS amplituda	Sweetness	Gradient	Sign (Intercept) * Gradient	Intercept * Gradient	AVO snaga	(Far - Near) * Far	Far stack
B-1	+	+	+	+	+	+/-	+	+
B-2	-	-	-	-	-	+/-	-	-
B-3	+/-	+/-	-	-	-	+/-	-	+/-
Jug	+	+	+/-	+	+/-	+	-	+/-
Jugoistok	+/-	+	+	+/-	+/-	+/-	+	+

Tablica 9.7.2. Prikaz povišenih i niskih vrijednosti amplituda na analiziranim seizmičkim i AVO atributima duž krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata

Jednostavni, kombinirani i AVO atributi								
Krovina Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata	RMS amplituda	Sweetness	Gradient	Sign (Intercept) * Gradient	Intercept * Gradient	AVO snaga	(Far - Near) * Far	Far stack
B-1	+	+	+	+	+	+/-	+	+
B-2	+	+/-	+/-	-	-	-	-	-
B-3	+	-	+/-	-	-	+/-	-	+
Jug	+	+	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+
Jugoistok	+/-	+/-	+	+	+	+	+	+

Rezultati analiza predviđanja svojstava karotažnih krivulja pomoću neuronskih mreža (spontanog potencijala, otpora, gustoće i brzine) kao jedne vrste seizmičkih inverzija zajedno s rezultatima inverzije u boji prikazane su na tablicama **9.7.3. i 9.7.4**. U prvom stupcu predviđanja spontanog potencijala oznaka plus (+) predstavlja propusne naslage, dok oznaka minus (–) nepropusne. Kod predviđanja vrijednosti otpora, gustoće i brzine, povišene vrijednosti označene su sa plus (+), a snižene s minus (-). Oznaka +/- predstavlja rubna područja ili srednje vrijednosti odabranog svojstva. Inverzija u boji znakom – predstavlja područja niskih vrijednosti akustičnih impedancija, dok su područja viših označeni znakom +/-, a izrazito visokih znakom +.

Bušotina B-1 duž krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata nalazi se prema predviđanju vrijednosti spontanog potencijala u zoni propusnih naslaga, povišenih vrijednosti otpora, relativno sniženih gustoća, nižih brzina i niskih vrijednosti impedancija što sve ukazuje na prisustvo ugljikovodika odnosno u ovom slučaju plina.

Bušotina B-2 nalazi se u području nepropusnih naslaga, niskih vrijednosti otpora, relativno sniženih gustoća, niskih brzina i sniženih akustičnih impedancija. Vrijednosti akustičnih impedancija malo su više nego u bušotini B-1. Od pet analiziranih rezultata seizmičkih inverzija samo dva bi eventualno mogla ukazivati na zasićenje.

Bušotina B-3 ima identične rezultate analiza prikaza inverzija pomoću neuronskih mreža i inverzije u boji (kao bušotina B-2) za razliku od pozitivne bušotine B-1 gdje nam svi prikazi mogu ukazivati na zasićenje.

Interpretirana turbiditna lepeza na jugu pokazuje svojstva vrlo slična pozitivnoj bušotini B-1, propusne naslage, povišene vrijednosti otpora, snižene vrijednosti brzine i gustoće, a time i akustične impedancije. Lepeza na jugoistoku na nekim dijelovima pokazuje zone propusnih, a na nekim nepropusnih naslaga, vrijednosti otpora su povišene, no gustoće su malo više, te su time i vrijednosti akustičnih impedancija povećane, no još uvijek u zoni srednjih vrijednosti (**tablica 9.7.2.**).

Bušotina B-1 duž krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata nalazi se prema predviđanju vrijednosti spontanog potencijala u zoni propusnih naslaga, povećanih vrijednosti otpora, te srednjih vrijednosti gustoća brzina i akustičnih impedancija (npr. **slika 8.6.6**.).

Bušotina B-2 nalazi se u zoni nepropusnih naslaga, sniženih vrijednosti otpora, srednjih vrijednosti gustoća, niskih brzina i srednjih vrijednosti akustičnih impedancija. Rezultati analiza bušotine B-3 pokazuju iste rezultate. Kao i kod rezultata u tablici 9.7.3. duž krovine Ležišta 1 analize nam ukazuju da svi rezultati na pozitivnoj bušotini B-1 mogu ukazivati na zasićenje što se može iskoristiti u budućim istraživanjima.

Rezultati analiza interpretirane turbiditne lepeze na jugu promatranog horizonta jednaki su rezultatima kao i kod horizonta krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata. Na jugoistoku su vidljiva područja propusnih naslaga i srednjih vrijednosti otpora, gustoće, brzine i akustičnih impedancija.

Tablica 9.7.3. Prikaz rezultata seizmičkih inverzija duž krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata

Inverzije					
Krovina Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata	Vrijednosti spontanog potencijala	Vrijednosti Otpornosti	Vrijednosti gustoće	Vrijednosti brzine	Inverzija u boji
B-1	+	+	+/-	-	-
B-2	-	-	+/-	-	+/-
B-3	-	-	+/-	-	+
Jug	+	+	-	-	-
Jugoistok	+/-	+	+	+/-	+/-

Tablica 9.7.4. Prikaz rezultata seizmičkih inverzija duž krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata

Inverzije					
Krovina Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata	Vrijednosti spontanog potencijala	Vrijednosti Otpornosti	Vrijednosti gustoće	Vrijednosti brzine	Inverzija u boji
B-1	**+**	**+**	**+/-**	**-**	**-**
B-2	**+/-**	**+**	**+/-**	**+/-**	**+**
B-3	**+/-**	**+**	**+/-**	**+**	**+**
Jug	**+**	**+**	**-**	**-**	**-**
Jugoistok	**+**	**+/-**	**+/-**	**+/-**	**+/-**

Geometrijski atribut koherencije zajedno s kombiniranim seizmičkim atributom spektralne dekompozicije usporedno s prikazima rezultata AVO RGB *Blending* metode pokazuju da kombinacijom njihove interpretacije lakše možemo uočiti kanale, obrise kanala, razlomljene zone i turbiditne lepeze (**Tablice 9.7.5 i 9.7.6**.).

Tablica 9.7.5. Prikaz rezultata atributa koherencije, spektralne dekompozicije i atributa dobivenog AVO RGB Blending metodom duž krovine Ležišta 1 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata

Geometrijski i kombinirani atributi			
Krovina Ležišta 1	Koherencija	Spektralna dekompozicija	AVO Blending RGB metoda
B-1	**Kanal**	**Kanal**	**Kanal**
B-2	**Razlomljena zona**	**Obrisi kanala**	**Razlomljena zona**
B-3	**Kanal**	**Obrisi kanala**	**Razlomljena zona**
Jug	**Kanali**	**Kanali + turbiditna lepeza**	**Turbiditna lepeza**
Jugoistok	**Razlomljena zona/kanali**	**Turbiditna lepeza**	**Turbiditna lepeza**

Tablica 9.7.6. Prikaz rezultata atributa koherencije, spektralne dekompozicije i atributa dobivenog AVO RGB Blending metodom duž krovine Ležišta 2 i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata

Geometrijski i kombinirani atributi			
Krovina Ležišta 2	Koherencija	Spektralna dekompozicija	AVO Blending RGB metoda
B-1	**Kanal**	**Kanal**	**Kanal**
B-2	**Kanal**	**Kanal**	**Kanal**
B-3	**Kanal**	**Kanal**	**Kanal**
Jug	**Kanali**	**Turbiditna lepeza**	**Turbiditna lepeza**
Jugoistok	**Razlomljena zona/kanali**	**Turbiditna lepeza**	**Turbiditna lepeza**

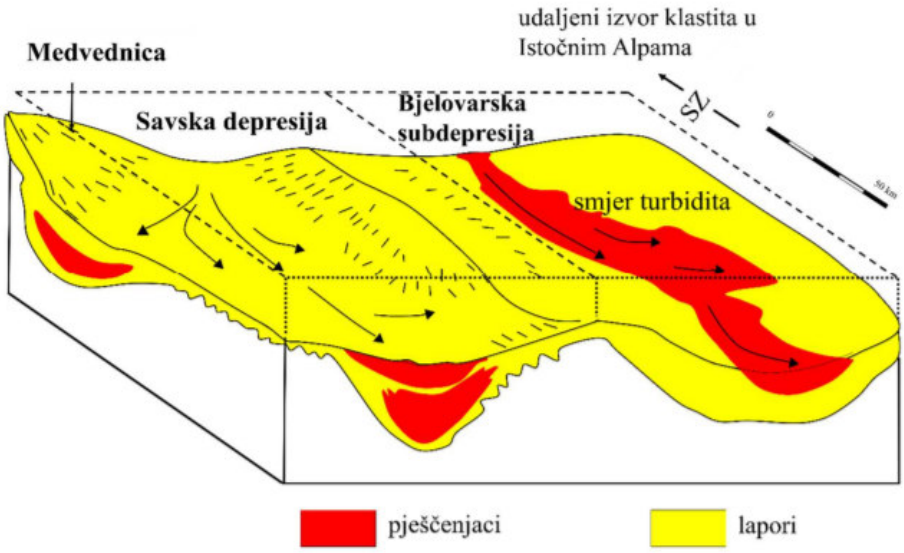
9.8 PREGLED I ZAKLJUČCI NA TEMELJU LABORATORIJSKIH ANALIZA

Na temelju pregleda i provjere geokemijskih analiza napravljenih u Službi laboratorijskih ispitivanja INA d.d. u razdoblju od 1997. do 2001. godine zaključeno je da svijetlosivi do svijetlosmeđi vapnenački lapori na dubini od 1640 do 1700 m (određeni na osnovu GR i CDL krivulja i postotka karbonatne komponente 76-84 % $CaCO_3$) koji pripadaju Križevci članu (donji panon) pokazuju izrazito nizak generirajući potencijal što navodi na zaključak da na ovom području gdje se nalazi prvenstveno bušotina B-1 zapravo nema matičnih stijena te su ugljikovodici sekundarni i migracijskog porijekla. Provedena su ispitivanja naftnog polja Šandrovac, sjeverozapadno od istraživanog područja, te Grubišno Polje (jugoistočno od istraživanog područja) te je zaključeno da fluidi iz bušotine B-1 pokazuju vrlo visoki stupanj sličnosti s fluidima iz bušotina s Grubišnog Polja. Na temelju svih provedenih analiza moguće je pretpostaviti slične uvjete pri kojima su generirani i migrirali u ležišne stijene te zaključiti o zajedničkom genetskom podrijetlu. Niski sadržaj organske tvari u ispitivanim uzorcima ovisi o litološkim značajkama stijena te sugerira izmjenu nisko i visoko oksidacijskih okoliša. Organska tvar je većinom oksidacijski izmijenjena i nema generirajućeg potencijala zbog izmjena pelitnih sedimenata s manjim ili većim proslojcima pješčenjaka. Udio organske komponente u kalcitom bogatim laporima malo raste s dubinom, no iako oni imaju karakteristike matičnih stijena malih su debljina što ukazuje na vrlo ograničavajuće generirajuće sposobnosti. U bušotinama B-2 i B-3 na temelju svih dostupnih postojećih analiza također je zaključeno da sedimenti nemaju generirajuće sposobnosti i sadrže organsku tvar terigenog porijekla opisanu kao djelomično oksidacijski izmijenjen tip kerogena III. Topljivi ugljikovodici i bitumeni u vrlo malim koncentracijama (obzirom na minimalne količine detaljna ispitivanja nisu izvršena) su sekundarnog migracijskog porijekla, no mogu se opaziti razlike u molekularnoj distribuciji i parametrima s bitumenima i tragovima nafti iz bušotine B-1.

U podinskom dijelu Formacije Bilogora određeno je ležište plina Ležište 1 te je izdvojeno kao ekvivalent Bregi pješčenjaka 1997. godine, no interpretacijom 1999. godine zaključeno je da ipak pripada Pješčenjacima Pepelana. Formacija Kloštar-Ivanić pripada donjem pontu po starijoj klasifikaciji i ona se opisuje također i u Savskoj i u Dravskoj depresiji. EK marker Δ približno dijeli formacije Kloštar-Ivanić i Bilogora; dijeli nekadašnji donji i gornji pont. U Savskoj depresiji pješčenjaci koje možemo omeđiti EK markerom Δ u podini i markerom R_f u krovini i odvajaju Formacije Kloštar-Ivanić i Široko Polje nazivamo Pješčenjaci Bregi. Unutar tog vremenskog raspona unutar formacije Bilogora u Dravskoj depresiji

nailazimo na slične pješčenjake, pa je stoga potrebno napomenuti da se radi o ekvivalent pješčenjacima Bregi. No utvrđeno je da se ipak radi o Pepelana pješčenjacima jer se oba ležišta zapravo nalaze ispod EK markera Δ (**Slika 6.7.2.**).

Kloštar Ivanić formacija čiji su član pješčenjaci Pepelana predstavlja intenzivno taloženje turbiditnih facijesa širom Bjelovarske subdepresije (npr. **Vrbanac et al., 2010**). Na **slici 9.6.1.** prikazan je primjer paleosmjera turbiditnih struja tijekom taloženja ove formacije u HPBS-u (prema **Vrbanac et al., 2010, Andrić, 2021**).



Slika 9.6.1. Smjer paleo-turbiditnih struja na prostoru Bjelovarske sudepresije u vrijeme taloženja Kloštar Ivanić formacije (modificirano prema Vrbanac et al., 2010; Malvić & Velić, 2011; Malvić, 2012; Andrić, 2021)

Pepelana pješčenjaci u bušotini B-1 debljine su oko 300 metara i u tom intervalu izvađena je i uzorkovana jezgra broj 1 duljine oko 20 metara. To su sivi sitnozrnati pješčenjaci do siltiti. Prema bušotinskim podacima su utvrđeni na sjeveroistoku istraživanog područja dok na jugu i zapadu prelaze u bočni ekvivalent koji se naziva Lapor Brezine. To je sivi do tamno sivi lapor srednje tvrdoće nalazi se i probušile su ga sve bušotine na području Grubišnog polja. Krovinu Pješčenjaka Pepelana čini Lapor Cabuna kao vrlo dobar izolator. Probušen je na sjeveru i sjeveroistoku promatranog područja i litološki je određen kao glinoviti i glinovito-pjeskoviti lapor.

Petrografsko-sedimentološkm i paleontološkim analizama jezgara () bušotine B-3 unutar Kloštar-Ivanić formacije uočeno je da u donjem dijelu intervala sedimente karakterizira periodička izmjena kanalskih pjeskovito – siltozrnih klastita i glinovitih jezerskih sedimenata.

U bušotini B-2 jezgra nije vađena nego su analizirani samo uzorci krhotina stijena iz isplake. Pepelana pješčenjaci su vrlo zalaporeni što se vidi iz krivulje spontanog potencijala koja je slabo razvijena, te su loših kolektorskih svojstava. To su pješčenjaci u izmjeni s laporima (**Slika 8.5.2.2**.).

Ova bušotina pripada tijelu koje bi moglo pripadati dijelu jednog turbiditnog kanala, a koje je naknadno poremećeno i rasjedano **(Slike 8.2.6.3.-8.2.6.5.).** Bušotina B-2, a i bušotina B-1 dio su jednog takvog kanala sa pretpostavljenim neuobičajenim lokalnim donosom materijala iz smjera sjevera (**Slika 8.7.4.**).

Pepelana pješčenjaci unutar bušotine B-3 su zaglinjeni u gornjem dijelu i u izmjeni su s laporima (**Slika 8.5.2.3**.).

Bušotina B-3 probušila je rubni dio kanala s pretpostavljenim donosom materijala SZ-JI. (**Slike 8.2.6.1-8.2.6.4**.).

10.ZAKLJUČAK

Ponovno obrađeni 3D seizmički podaci bili su prikladni za izradu atributnih analiza, AVO analiza kao i za izdvajanje direktnih indikatora zasićenja ugljikovodicima (DHI) obzirom da su obrađeni u smislu očuvanja relativnog odnosa amplituda.

Usporedno tumačenje geometrijskog atributa koherencije i kombiniranog seizmičkog atributa spektralne dekompozicije zajedno s atributom dobivenog AVO RGB *Blending* metodom ukazuje na postojanje jedne turbiditne lepeze na jugu promatranih horizonata i jedne na jugoistoku. Vidljivi kanal koji je probušen bušotinama B-1 i B-2 vjerojatno je dio zasebnog turbiditnog sustava na donjem dijelu i podnožju padine lokalnog donosa iz smjera sjevera, dok je kanal kojeg je izbušila bušotina B-3 također zasebni sustav sa donosom materijala u smjeru sjeverozapad-jugoistok. AVO RGB *Blending* metoda puno jasnije prikazuje razlomljene zone, obrise kanala, kanale i turbiditne lepeze, te bi njezina primjena bila od izuzetne koristi za točniju interpretaciju u budućim istraživanjima.

Rezultati analiza seizmičkih atributa, kombiniranih atributa, primarnih i sekundarnih AVO atributa, te kombiniranih AVO atributa pokazuju da se pozitivna bušotina B-1 nalazi u području anomalnih odnosno povećanih vrijednosti amplituda duž krovina oba ležišta i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata, za razliku od druge dvije negativne bušotine (B-2 i B-3). Premda neki atributi pokazuju povišene vrijednosti i na negativnim bušotinama, gotovo svi pokazuju povišene vrijednosti amplituda u okolici bušotine B-1. Time se potvrđuje njen realni status i upućuje na zaključak da slični rezultati na drugim analiziranim područjima mogu ukazivati na eventualne pojave ugljikovodika, u ovom slučaju plina. Izrazito razgraničenje pokazuju sekundarni AVO atributi *Sign(intercept)*gradient* i *Intercept*Gradient,* te njihova primjena ukazuje na pozitivne indikacije u budućim istraživanjima ležišta plina (**Tablica 10.1**).

Područja gdje su interpretirane turbiditne lepeze na jugu i jugoistoku na oba analizirana horizonta krovina Ležišta 1 i Ležišta 2 te njihovih litostratigrafskih ekvivalenata, uspoređujući ih s rezultatima na tri bušotine, indiciraju pozitivne naznake zasićenja plinom.

Rezultati analiza predviđanja vrijednosti odabranih svojstava (spontani potencijal, gustoća, otpornost, brzina) pomoću neuronskih mreža kao vrste seizmičke inverzije zajedno s interpretacijom analiza inverzije u boji također pokazuju dobar rezultat na području pozitivne bušotine B-1 na kojoj je dokazano plinsko ležište.

Područja dviju interpretiranih turbiditnih lepezi na jugu i jugoistoku promatranih horizonata pokazuju da se nalaze u zonama propusnih naslaga, povećanih otpornosti i nižih do srednjih vrijednosti akustičnih impedancija, te da se neki od rezultata mogu korelirati sa bušotinom B-

1. Premda rezultati nisu toliko jednoznačni, primjena ovih metoda svakako može pomoći prilikom tumačenja rezultata u budućim istraživanjima.

Na temelju svih atributnih analiza, AVO analiza i seizmičkih inverzija počevši od jednostavnih do kompleksnijih metoda, rezultati perspektivnih područja na jugu i jugoistoku pokazuju pozitivne indikacije na zasićenje plinom.

Tablica 10.1. Rezultati svih atributnih analiza i inverzija

Rezultati svih atributnih analiza i inverzija	**B-1**	**B-2**	**B-3**	**Jug**	**Jugoistok**
Krovina **Ležišta 1** i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata					
RMS amplituda	√	x	√/ x	√	√/ x
Sweetness	√	x	√/ x	√	√
Gradient	√	x	x	√/ x	√
*Sign(Intercept)*Gradient*	√	x	x	√	√/ x
*Intercept*Gradient*	√	x	x	√/ x	√/ x
AVO snaga	√/ x	√/ x	√/ x	√	√/ x
*(Far-Near)*Far*	√	x	x	x	√
Far stack	√	x	√/ x	√/ x	√
Vrijednosti spontanog potencijala	√	x	x	√	√/ x
Vrijednosti otpornosti	√	x	x	√	√
Vrijednosti gustoće	√/ x	√/ x	√/ x	√	√/ x
Vrijednosti brzine	√	√	√	√	√/ x
Inverzija u boji	√	√/ x	x	√	√/ x
Krovina **Ležišta 2** i pripadajućih litostratigrafskih ekvivalenata					
RMS amplituda	√	√	√	√	√/ x
Sweetness	√	√/ x	x	√	√/ x
Gradient	√	√/ x	√/ x	√/ x	√
*Sign(Intercept)*Gradient*	√	x	x	√/ x	√
*Intercept*Gradient*	√	x	x	√/ x	√
AVO snaga	√/ x	x	√/ x	√/ x	√
*(Far-Near)*Far*	√	x	x	√/ x	√
Far stack	√	x	√	√	√
Vrijednosti spontanog potencijala	√	√/ x	√/ x	√	√
Vrijednosti otpornosti	√	√	√	√	√/ x
Vrijednosti gustoće	√/ x	√/ x	√/ x	√	√/ x
Vrijednosti brzine	√	√/ x	x	√	√/ x
Inverzija u boji	√	x	x	√	√/ x

√ - dokazana ležišta plina u Bušotini B-1 i pozitivne naznake mogućih ležišta ugljikovodika (plina) južno i jugoistočno

X - nema naznaka

√/ x- periferna područja anomalija na lokacijama triju bušotina ili pojedina područja južno i jugoistočno koja mogu predstavljati moguća ležišta ugljikovodika

11.PROŠIRENI SAŽETAK

Bjelovarska subdepresija nalazi se u hrvatskom dijelu Panonskog bazenskog sustava (HPBS), unutar jugozapadnog dijela Dravske depresije. Geografski je okružena Kalnikom na sjeverozapadu, Bilogorom na sjeveroistoku, Papukom, Ravnom Gorom i Psunjem na istoku, te Moslavačkom gorom na jugu. Analizirano plinsko polje nalazi se u Bjelovarskoj subdepresiji. Na ovom su području izbušene tri bušotine: B-1, B-2 i B-3.

Formiranje Panonskog bazenskog sustava (PBS) započelo je u ranom miocenu riftovanjem uslijed subdukcije euroazijske ploče ispod fragmenata panonske kore. Između južne i sjeverne granice PBS-a otvorila su se brojna lokalna proširenja kao preteča kasnijih depresija i subdepresija. Glavne depresije u hrvatskom dijelu Panonskog bazena su: Murska, Dravska, Savska i Slavonsko-srijemska depresija. Bjelovarska subdepresija je dio jedne veće cjeline unutar hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava (HPBS). Ona predstavlja jugozapadni ogranak Dravske depresije i graniči sa Savskom depresijom. Fokus ovog istraživanja nalazi se unutar formacije Kloštar Ivanić gdje se Ležišta 1 i 2 nalaze unutar Pepelana pješčenjaka.

Ponovna obrada seizmičkih podataka izvedena je korištenjem najnovijih tehnika obrade i završila je s *Kirchhoffovom Pre-Stack* vremenskom migracijom (PSTM). Ulazni seizmički podaci za *Kirchhoffovu Pre-Stack* dubinsku (PSDM) migraciju bili su isti kao i za vremensku migraciju. PSDM migracija rezultirala je boljim izgledom podzemnih struktura i stratigrafskih odnosa omogućujući pouzdaniju interpretaciju pogotovo u područjima niskog omjera signal/smetnja.

Pouzdana i detaljna analiza tankih slojeva mogla se ostvariti samo na ponovno obrađenim i ponovno interpretiranim 3D volumenima.

Općim smanjenjem nadoknadivih rezervi prirodnog plina na kopnu i moru potreba za pronalaženjem novih akumulacija je evidentna. Istraživanje ležišta ugljikovodika ovisi o vrlo velikom broju ulaznih podataka prilikom karakterizacije podzemlja. Ovaj rad se temelji na upotrebi analize seizmičkih atributa na seizmičkim volumenima, analizi amplitude u odnosu na *offset* (AVO) te traženju obrazaca unutar mnogih izdvojenih seizmičkih atributa pomoću neuronskih mreža.

Svaka vrijednost ekstrahirana iz seizmičkih podataka može se smatrati seizmičkim atributom koji koristi primarne odvojene atribute, trenutnu amplitudu, frekvenciju i fazu te iz njih izvedene sve moguće kombinacije. Analizom seizmičkih atributa dobiva se detaljna karakterizacija i kvantifikacija ležišta. Seizmički atributi su skup svih izmjerenih, izračunatih

ili promatranih podataka dobivenih iz seizmičkih podataka, te mogu uvelike pridonijeti boljoj interpretaciji podzemlja.

Atributi koji se uobičajeno koriste u procesu istraživanja i pronalaženja mogućih akumulacija ugljikovodika su varijanca, *Sweetness*, spektralna dekompozicija i primarni i sekundarni AVO atributi koji su korišteni u ovom radu. Rezultati analize seizmičkih atributa ukazuju na perspektivno područje mogućeg zasićenja ugljikovodicima južno i jugoistočno od otkrivenog polja.

Za analizu intercepta i gradijenta, kao primarnih AVO atributa korišteni su podaci prije zbrajanja metodom zajedničke dubinske točke (CDP). Na dobivenom križnom dijagramu *intercept/gradent* moguće je odrediti AVO klasu koja pokazuje promjenu amplitude u odnosu na pomak.

Povećanje amplitude s udaljenošću od izvora (pomak) može se koristiti za predviđanje područja zasićenih plinom. AVO anomalija prisutna je na lokacijama svih triju bušotina. Ekstrahirani točkasti podaci za svako ležište i svaku bušotinu nalaze se većinom unutar trećeg kvadranta na križnom dijagramu *intercepta* i *gradienta* i pokazuju AVO klase II i III. AVO klasa III pokazuje povećanje amplitude s udaljenošću i prikazuje klasičan *Bright spot*. To također znači da postoji velika razlika u akustičnim impedancijama između dvaju reflektora. Razlog mogu biti nagle litološke promjene kao i prisutnost vrlo malih količina plina. Samo mali postotak plina uzrokovati će značajan pad volumnog modula u stijeni. Prema tome snimljeni longitudinalni P-val obično može odrediti samo prisutnost plina, ali ne i zasićenje. S-val nije snimljen u niti jednoj bušotini. Stoga ne možemo sa sigurnošću odrediti količinu zasićenja. Međutim, druge metode poput analize seizmičkih atributa kao i analize neuronskih mreža mogu pridonijeti sigurnijoj interpretaciji. Dvije negativne bušotine nalaze se izvan ili na rubu anomalija gotovo na svim atributima.

Razlikovanje malih količina plina u odnosu na komercijalno zasićenje koristeći seizmičke podatke, kao i podatke iz bušotina još uvijek predstavlja izazov. Rješenje nam preostaje u korištenju i snimanju kvalitetnih podataka s-vala, skaliranju i prikladnijoj obradi podataka te analizi drugih seizmičkih atributa.

Napravljena je i seizmička inverzija kao prikladan alat za strukturnu i stratigrafsku interpretaciju i karakterizaciju ležišta.

Na temelju pregleda i analize svih dostupnih geokemijskih analiza napravljenih u INA d.d. zaključeno je da svijetlosivi do svijetlo smeđi vapnenački lapori koji pripadaju Križevci članu pokazuju izrazito nizak generirajući potencijal sugerirajući da na ovom području nema odgovarajućih matičnih stijena, nego da su ugljikovodici sekundarnog migracijskog porijekla.

Provedena su ispitivanja nafti polja Šandrovac, sjeverozapadno od istraživanog područja, te iz Grubišnog Polja (jugoistočno od istraživanog područja) te je zaključeno da fluidi iz bušotine B-1 pokazuju vrlo visok stupanj sličnosti s fluidima iz bušotina s Grubišnog Polja. Na temelju svih provedenih analiza moguće je pretpostaviti slične uvjete pod kojima su nastali i migrirali u ležišne stijene te zaključiti o istom genetskom podrijetlu.

Na svim odvojenim lokacijama na temelju ukupne analize svih dostupnih atributa, AVO analiza i seizmičkih inverzija, počevši od jednostavnih do složenijih metoda, uzimajući u obzir znanje o tome kako ugljikovodici utječu na seizmičke podatke, a na temelju usporedbe s poznatim bušotinskim podacima, rezultati pokazuju da neki dijelovi analiziranog područja istraživanja pokazuju pozitivne indikacije mogućeg zasićenja ugljikovodicima.

12.EXTENDED ABSTRACT

The Bjelovar Subdepression is in the Croatian part of the Pannonian Basin System (CPBS), within the southwestern part of the Drava Depression. Geographically, it is surrounded by the Kalnik Mt. in the northwest, Bilogora Mt. in the northeast, Papuk Mt., Ravna Gora Mt. and Psunj Mt. in the east and Moslavačka Gora Mt. in the south.

The analyzed gas field is located in the Bjelovar Subdepression. Three wells were drilled in this area: B-1, B-2 and B-3.

The formation of the Pannonian Basin System (PBS) began in Early Miocene when the Eurasian plate began to subduct under the Pannonian crustal fragment. Numerous local transtensions as proto areas of later depressions and subdepressions opened between the southern and northern boundaries of the PBS. Major structural depressions, in the Croatian part of the Pannonian Basin, are the Mura, Drava, Sava and Slavonija-Srijem depressions. The Bjelovar subdepression is part of a larger unit within the Croatian part of the Pannonian Basin System (HPBS). It represents the southwestern branch of the Drava Depression and borders the Sava Depression. This research is focused on the Kloštar Ivanić Fm., where Reservoir 1 and Reservoir 2 are located within Pepelana sandstones.

Seismic data reprocessing was done using up to date processing techniques and ended with Kirchhoff pre-stack time migration (PSTM) flow. The input seismic data to the Kirchhoff pre-stack depth migration (PSDM) was the same set as for the time migration. The final pre-stack depth migration image resulted in better representation of the subsurface structures and stratigraphy, enabling greater interpretation confidence especially in the area of low signal to noise ratio.

Reliable and detailed analysis of thin deposits could only be performed on reprocessed and reinterpreted 3D volumes.

With a general decrease in the recoverable reserves of natural gas both onshore and offshore, the need to locate new accumulations is more than evident. Exploration for hydrocarbon reservoirs relies on many input data for subsurface characterization. This work focuses on the usage of attribute analysis on seismic volume, amplitude versus offset (AVO) analysis as well as searching for patterns within many extracted seismic attributes by neural networks.

Any value derived from seismic data can be a seismic attribute using primary differentiated attributes, instantaneous amplitude, frequency and phase and their various combinations. By analyzing seismic attributes, detailed reservoir characterization and

quantification can be obtained. Seismic attributes are a compendium of all the measured, computed or observed information obtained from seismic data that can greatly contribute to better interpretation of the subsurface.

Commonly used attributes in the exploration and detection process of possible hydrocarbons accumulations are variance, azimuth, dip, sweetness, spectral decomposition and AVO primary and secondary attributes that were used in this study.

Results of the seismic attribute analysis indicate prospective areas east and southeast from the discovered field. For the analysis of interception and gradient as primary AVO attributes, pre-stack data or common depth point (CDP) gathers data used by the method of summing traces from common depth points in the subsurface. Obtained cross plot of intercept and gradient can determine the appropriate AVO class that shows changes in amplitude relative to the offset.

AVO attributes were analyzed via cross plot intercept/gradient. Normally, amplitude decreases with offset. Increasing amplitude with distance from the source (offset) can be used to predict gas saturation areas. The AVO anomaly is present at all three well locations. The data were extracted for each reservoir and each well and are located within the third quadrant on the cross-plot *intercept/gradient* and show AVO class II and III. AVO class III shows an increase in amplitude with distance and shows a classic bright spot.

This also means that there is a large difference in acoustic impedances between the reflectors. The reason may be sudden lithological changes as well as very small amounts of gas. Only a small percent of the gas will cause a significant drop in the effective fluid modulus, and consequently a significant drop in the bulk modulus in the rock. Therefore, P-wave seismic can usually only determine the presence of gas, but not the saturation. The S-wave was not recorded in any of the wells. Therefore, the level of saturation cannot be determined with certainty. However, other methods such as seismic attribute analysis and neural networks can help in such interpretations. Two negative wells are located outside or on the edge of anomalies.

Distinguishing “fizz gas” from “commercial gas” saturations with surface seismic and borehole data remains a challenge. The solution and help can be in obtaining and using quality S-wave data, scaling and attenuation in data processing and analysis of other seismic attributes.

A seismic inversion was also made, which is a suitable tool for structural and stratigraphic interpretation and reservoir characterization.

Based on the review and analysis of all the available geochemical analyses made in INA d. d., it can be concluded that the light gray to light brown limestone marls of the Križevci member show extremely low generating potential, suggesting that there are no source rocks in

this area and that hydrocarbons are of secondary migration origin. Tests on Šandrovac and Grubišno Polje hydrocarbons were performed, and it was concluded that fluids from well B-1 are highly like fluids from Grubišno Polje Field. Based on all the analyzes performed, it is possible to assume similar conditions under which they were generated and migrated to the reservoir rocks and to suggest their same genetic origin.

However, based on overall attribute analyzes, AVO analyzes and seismic inversions starting from simple to more complex methods, considering previous knowledge of how hydrocarbons affect seismic data, and based on comparisons with known well data, the results are showing positive indications on hydrocarbon saturation in parts of the study area.

13.POPIS KORIŠTENE LITERATURE

13.1. OBJAVLJENI RADOVI

AKI, K. & RICHARDS, P.G. (1980): Quantitative Seismology: Theory and Methods, University Science Books, California, 687str.

AVANIĆ, R., PAVELIĆ, D., PÉSCKAY, Z., MIKNIĆ, M., TIBLJAŠ, D. & WACHA, L. (2021): Tidal deposits in the Early Miocene Central Paratethys: the Vučji Jarek and Čemernica members of the Macelj formation (NW Croatia), Geologia Croatica, 74, 41-56.

BÁLDI, T., 1980. A korai Paratethys története. Földtani Közlöny, 110, 456-472.

BASCH, O. (2009): Klastiti i ugljen (pont – M7) [Clastites and coal (Pontian – M7)– in Croatian]. – U: VELIĆ, I. & VLAHOVIĆ, I. (Ur.): Tumač Geološke karte Republike Hrvatske 1:300.000 (Explanatory note of the Basic Geological Map of the Republic of Croatia 1:300000 – in Croatian), Croatian Geological Survey, Zagreb, 141 str.

BASCH, O., PAVELIĆ, D. & BAKRAČ, K. (1995): Gornjopontski facijesi sjevernog krila Konjšćinske sinklinale kod Huma Zabočkog (Hrvatsko Zagorje) – U: VLAHOVIĆ, I., VELIĆ, I., & ŠPARICA (Ur.): M 1, hrvatski geološki kongres, Zbornik radova, 57-61.

BÉRCZI, I. (1988): Preliminary sedimentological investigation of a Neogene depression in the Great Hungarian Plain. – U: ROYDEN, L.H. & HORVÁTH, F. (Ur.): The Pannonian Basin. AAPG Memoir, 45, 107–116.

BRLEK, M., KUTTEROLF, S., GAYNOR, S., KUIPER, K., BELAK, M., BRČIĆ, V., HOLCOVÁ, K., WANG, K.-L., BAKRAČ, K., HAJEK-TADESSE, V., MIŠUR, I., HORVAT, M., ŠUICA, S. & SCHALTEGGER, U. (2020): Miocene syn-rift evolution of the North Croatian Basin (Carpathian-Pannonian Region): new constraints from Mts. Kalnik and Požeška gora volcaniclastic record with regional implications. International Journal of Earth Sciences, 109, 2775-2880.

BROWN, A. R. (2001): Understanding seismic attributes, Geophysics,66, 47–48.

CASTAGNA, J. P. & SMITH, S. W. (1994), Comparison of AVO indicators: A modelling study, Geophysics, 59, 1849–1855.

CASTAGNA, J.P.& SWAN, H.W. (1997): Principles of AVO cross plotting, The Leading Edge, 16, 337–344.

CASTAGNA, J.P. & SWAN, H.W. (1998): Framework for AVO gradient and intercept interpretation, Geophysics, 63, 948–956.

CASTAGNA, J.P. & BACKUS, M.M. (1993): Offset-Dependent Reflectivity—Theory and Practice of AVO Analysis, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, 346 str.

CHOPRA, S. & MARFURT K. J. (2005): Seismic attributes – A historical perspective, Geophysics,70(5), 3–28.

CHOPRA, S. & MARFURT K. J. (2015): Choice of mother wavelets in CWT spectral decomposition, 83rd Annual International Meeting, Seg Technical Program, Expanded Abstracts, 2957–2961.

CHOPRA, S. & MARFURT K. J. (2016): Spectral decomposition and spectral balancing of seismic data, The Leading Edge, 176–179.

CORVER, M.P., DOUST, H., VAN WEES, J.D., BADA, G. & CLOETHING, S. (2009): Classification of rifted sedimentary basins of the Pannonian Basin System according to the structural genesis, evolutionary history and hydrocarbon maturation zones, Marine and Petroleum Geology 26, 1452–1464.

ĆORIĆ, S., PAVELIĆ, D., RÖGL, F., MANDIC, O., VRABAC, S., AVANIĆ, R. JERKOVIĆ, L. & VRANJKOVIĆ, A. (2009): Revised Middle Miocene datum for initial marine flooding of North Croatian Basins (Pannonian Basin System, central Paratethys), Geologia Croatica, 62/1, 31–43.

DOWNTON, J. & LINES L. (2001): AVO Feasibility and Reliability Analysis in the Presence of Random Noise, Recorder, 26, 6, 43–53.

HALAMIĆ, J., BELAK, M., PAVELIĆ, D., AVANIĆ, R., FILJAK, R., ŠPARICA, M.,BRKIĆ, M., KOVAČIĆ, M., VRSALJKO, D., BANAK, A. & CRNKO, J. (2019): Osnovna geološka karta Republike Hrvatske mjerila 1 : 50 000 - Požeška gora (Basic Geological Map of the Republic of Croatia 1:50000 - Požeška gora – in Croatian), Hrvatski geološki institut, Odjel za geologiju, Zagreb.

HART, B. (2008): Channel detection in 3-D seismic data using sweetness. AAPG Bulletin, 92(6), 733–742.

HARZHAUSER, M. (2004): Oligocene Gastropod Faunas of the Eastern Mediterranean (Mesohellenic Trough/Greece and Esfahan-Sirjan Basin/Central Iran), Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 248: 93–181, 1–16.

HARZHAUSER, M. & PILLER, W.E. (2007): Benchmark data of a changing sea – Palaeogeography, palaeobiogeography and events in the Central Paratethys during the Miocene, Elsevier, 253, 8–31.

HARZHAUSER, M. & MANDIC, O. (2008): Neogene lake systems of Central and South-Eastern Europe: Faunal diversity, gradients, and interrelations, Elsevier, 260, 417–434.

HAUER, F. (1873): Geologische Übersichtskarte der österreichisch-ungarischen Monarchie, Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, 23, 71–116.

HENRIKSEN, S., HELLAND-HANSEN, W. & BULLIMORE, S. (2011): Relationship between shelf edge trajectories and sediment dispersal along depositional dip and strike: a different approach to sequence stratigraphy, Basin Research, 23, 3–21.

HILGEN, F.J., LOURENS, L.J. & VAN DAM, J.A. (2012): The Neogene Period. U: GRADSTEIN, F.M., OGG, J.G., SCHMITZ, M. & OGG, G. (Ur.): A Geologic Time Scale, Elsevier, Amsterdam, 923–978.

HILTERMAN, F. (1990): Is AVO the seismic signature of lithology? A case history of Ship Shoal-South Addition, The Leading Edge, 9:6,15–22.

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.

HORVÁTH, F. & CLOETHING, S. (1996): Stress-induced late stage subsidence anomalies int he Pannonian Basin, Tectonophysics, 266, 287–300.

HORVÁTH, F. & TARI, G. (1999): IBS Pannonian Basin project: a review of the main results and their bearings on hydrocarbon exploration – U: DURAND, B., JOLIVET, L., HORVÁTH, F., SÉRANNE, M. (Ur.), The Mediterranean basins: Tertiary extension within the Alpine orogen, Geological Society London Special Publications 156, 195–213.

HORVÁTH, F., SACCHI, M., DOMBRÁDI, E. (2010): Seismic stratigraphy and tectonics of Late Miocene basin fill in southern Transdanubia and below Lake Balaton, Foldtani Kozlony, 140(4), 391–418.

INNANEN, K. A. H. & MARGRAVE, G. F. (2011): Seismic inversion and the importance of low frequencies, Crewes Research Report,13, 23–52.

JAMIČIĆ, D. (1995): The role of sinistral strike-slip faults in the formation of the structural fabric of the Slavonian Mts. (Eastern Croatia), Geologia Croatica, 48, 155–160.

JENKO, K. (1944). Stratigrafski i tektonski snošaj Pliocena južnog pobočja Požeške gore i Kasonje brda, Vjestnik Hrvatskog državnog geoložkog zavoda i Hrvatskog državnog geoložkog muzeja, 2/3, 89–159.

JOHANNESSEN, E.P. & STEEL, R.J. (2005): Shelf-margin clinoforms and prediction of deepwatersands, Basin Research 17, 521–550.

JUHÁSZ, GY. (1991): Lithostratigraphical and sedimentological framework of the Pannonian (s.l.) sedimentary sequence in the Hungarian Plain (Alföld), Eastern Hungary, Acta Geologica Hungarica, 34, 53–72.

JUHÁSZ, GY. (1994): Comparison of the sedimentary sequences in Late Neogene subbasins in the Pannonian Basin, Hungary, Földtani Közlöny, 124, 341–365.

KOCH, F. (1889): Prilog geološkom poznavanju Moslavačke gore, Rad JAZU, 139(27), 1–28.

KONDELA. J, BAULOVIČ.J, PANDULA, B. & DUGAČEK, D. (2018): Analysis of seismic waves and its application for prediction of impacts on blasting operations in the quarry Trebejov environment, Egrse, 8–21.

KOVÁCS Á., BALÁZS A., ŠPELIĆ M., SZTANÓ O., (2021): Forced or normal regression signals in a lacustrine basin? Insights from 3D stratigraphic forward modelling in the SW Pannonian Basin. Global and Planetary Change, 196, 103–376.

KOVÁČ, M., HUDÁČKOVÁ, N., HALÁSOVÁ, E., KOVÁČOVÁ, M., HOLCOVÁ, K., OSZCZYPKO-CLOWES, M., BÁLDI, K., LESS, G., NAGYMAROSY, A., RUMAN, A., KLUČIAR, T. & JAMRICH, M. (2017): The Central Paratethys palaeoceanography: a water circulation model based on microfossil proxies, climate, and changes of depositional environment, Acta Geologica Slovaca, 9/2, 75–114.

KOVÁČ, M., HALÁSOVÁ, E., HUDÁČKOVÁ, N., HOLCOVÁ, K., KOVÁČOVÁ, M., HYŽNY, M., JAMRICH, M. & RUMAN, A. (2018): Towards better correlation of the Central Paratethys regional time scale with the standard geological time scale of the Miocene Epoch, Geologia Carpathica, 69/3 283–300.

KOVAČIĆ, M. & GRIZELJ, A. (2006): Provenance of the Upper Miocene clastic material in the southwestern part of the Pannonian Basin, Geologica Carpathica, 57/6, 495–510.

KOVAČIĆ, M., ZUPANIČ, J., BABIĆ, LJ., VRSALJKO, D., MIKNIĆ, M., BAKRAČ, K., HEĆIMOVIĆ, I., AVANIĆ, R & BRKIĆ, M. (2004): Lacustrine basin to delta evolution in the Zagorje Basin, a Pannonian sub-basin (Late Miocene: Pontian, NW Croatia), Facies, 50, 19–33.

KUENEN, PH.H., 1957. Sole markings of graded graywacke beds, Journal of Geology, 65, 231-258.

LANCASTER, S. & D. WHITCOMBE, (2000): Coloured inversion, The Leading Edge, 36, 46–50.

LEEVER, K. A.; MATENCO, L.; RABAGIA, T. & CLOETING, S. (2010): Messinian sea level fall in the Dacic Basin (Eastern Paratethys): Palaeogeographical implications from seismic sequence stratigraphy, Terra Nova, 22(1),12–17.

LUČIĆ, D., SAFTIĆ, B., KRIZMANIĆ, K., PRELOGOVIĆ, E., BRITVIĆ, V., MESIĆ, I. & TADEJ, J. (2001): The Neogene evolution and hydrocarbon potential of the Pannonian Basin in Croatia, Marine and Petroleum Geology, 18, 133–147.

MAHOB, P.N. & CASTAGNA, J.P. (2003): AVO polarization and hodograms: AVO strength and polarization product, Geophysics, 68:3, 849–862.

MAGYAR, I. & GEARY, D.H. (2012): Biostratigraphy in a Late Neogene Caspian-type lacustrine basin: Lake Pannon, Hungary – U: BAGANZ, O.V., BARTOV, Y., BOHÁCS, K. & NUMMEDAL, D. (Ur.): Lacustrine sandstone reservoirs and hydrocarbon systems, AAPG Memoir 95, 255–264.

MAGYAR, I. (1995): Late Miocene mollusc biostratigraphy in the Eastern part of the Pannonian Basin (Tiszántúl, Hungary), Geologia Carpathica, 46, 29-36.

MAGYAR, I., GEARY, D.H., SÜTŐ-SZENTAI, M., LANTOS, M. & MÜLLER, P. (1999): Integrated biostratigraphic, magnetostratigraphic and chronostratigraphic correlations of the Late Miocene Lake Pannon deposits, Acta Geologica Hungarica,42, 5–31.

MAGYAR, I., FOGARASI, A., VAKARCS, G., BUKÓ, L. & TARI, G.C. (2006): The largest hydrocarbon field discovered to date in Hungary: Algyő – U: GOLONKA, J., PICHA, F.J. (Ur.), The Carpathians and their foreland: geology and hydrocarbon resources, AAPG Memoir 84, 619–632.

MAGYAR, I., RADIVOJEVIĆ, D., SZTANÓ, O., SYNAK, R., UJSZÁSZI, K. & PÓCSIK, M. (2013): Progradation of the paleo-Danube shelf margin across the Pannonian Basin during the Late Miocene and Early Pliocene, Global and Planetary Change, 103, 168–173.

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), Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 18, 63–70.

MALVIĆ, T. (2011): Geological maps of Neogen sediments in the Bjelovar Subdepression (northern Croatia), Journal of Maps, 304–317.

MALVIĆ, T. (2012): Review of Miocene shallow marine and lacustrine depositional environments in Northern Croatia, Geological quarterly, 56/3, 493–504.

MALVIĆ, T. & CVETKOVIĆ, M. (2013): Lithostratigraphic units in the Drava Depression (Croatian and Hungarian parts) – a correlation, Nafta, 64/1, 27–33.

MALVIĆ, T. & PRSKALO, S. (2008): Značenje amplitudnog atributa u predviđanju poroznosti - primjer iz Dravske depresije, Nafta, 59/1, 39–51.

MALVIĆ T. & VELIĆ, J. (2011): Neogene tectonics in Croatian part of the Pannonian Basin and reflectance in hydrocarbon accumulations – U: New Frontiers in Tectonic Research - at the Midts of Plate Convergence, InTech, 215–238.

MALVIĆ, T. IVŠINOVIĆ, J., VELIĆ, J. & RAJIĆ, R. (2019): Interpolation of Small Datasets in the Sandstone Hydrocarbon Reservoirs, Case Study of the Sava Depression, Geosciences, 9/5, 201–211.

MANDIĆ, O., DE LEEUW, A., BULIĆ, J., KUIPER, K.F., KRIJGSMAN, W., JURIŠIĆ-POLŠAK, Z. (2012): Paleogeographic evolution of the southern Pannonian Basin: 40Ar/39Ar

age constraints on the Miocene continental series of northern Croatia, International Journal of Earth Science, 101, 1033–1046.

MANDIC, O., KUREČIĆ, T., NEUBAUER, T.A. & HARZHAUSER, M. (2015): Stratigraphic and palaeogeographic significance of lacustrine molluscs from the Pliocene Viviparus beds in central Croatia, Geologia Croatica, 68/3, 179–207.

MANDIC, O., HAJEK-TADESSE, V., BAKRAČ, K., REICHENBACHER, K., GRIZELJ, A. & MIKNIĆ, M. (2019): Multiproxy reconstruction of the middle Miocene Požega palaeolake in the Southern Pannonian Basin (NE Croatia) prior to the Badenian transgression of the Central Paratethys Sea. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 516, 203-219.

MARKOVIĆ, F., KUIPER, K., ĆORIĆ, S., HAJEK-TADESSE, V., HERNITZ KUČENJAK, M., BAKRAČ, K., PEZELJ, Đ. & KOVAČIĆ, M. (2021): Middle Miocene marine flooding: new 40Ar/39Ar age constraints with integrated biostratigraphy on tuffs from the North Croatian Basin, Geologia Croatica,74/3, 237–252.

MÁRTON, E., PAVELIĆ, D., TOMLJENOVIĆ, B., PAMIĆ, J. & MÁRTON, P. (1999): First paleomagnetic results on Tertiary rocks from the Slavonian Mountains in the Southern Pannonian Basin, Croatia, Geologia Carpathica, 50, 273-279.

MÁRTON, E., PAVELIĆ, D., TOMLJENOVIĆ, B., AVANIĆ, R., PAMIĆ, J. & MÁRTON, P. (2002): In the wake of a counter clockwise rotating Adriatic microplate: Neogene paleomagnetic results from northern Croatia, International Journal of Earth Sciences, 91, 514–523.

MATENCO, L. & RADIVOJEVIĆ, D. (2013): On the formation and evolution of the Pannonian Basin: Constraints derived from the structure of the junction area between the Carpathians and Dinarides, Tectonics, 31 (6), TC6007, 1–31.

MIDDLETON, G.V. & HAMPTON, M.A. (1976): Subaqueous sediment transport and deposition by sediment gravity lows. –U: STANLEY, D. J. & SWIFT, D.J.P. (Ur.): Marine Sediment Transport and Environmental Management, 197-218.

MÜLLER, P., GEARY, D. H. & MAGYAR, I. (1999): The endemic molluscs of the Late Miocene Lake Pannon: their origin, evolution, and family level taxonomy, Lethaia, 32, 47–60.

MURPHY, M.A., & SALVADOR, A. (1998): International Stratigraphic Guide – An abridged version, Episodes, Vol. 22, no. 4, 255–272.

NEIDELL, N.S. (1986): Amplitude variation with offset, The Leading Edge, 5:3,47–51.

NEUBAUER, T.A., HARZHAUSER, M., KROH, A., GEORGOPOULOU, E. & MANDIC, O. (2015): A gastropod based biogeographic scheme for the European Neogene freshwater systems, EarthScience Reviews, 143, 98–116.

NOVAK ZELENIKA, K., NOVAK MAVAR, K., BRNADA, S. (2018): Comparison of the Sweetness Seismic Attribute and Porosity–Thickness Maps, Sava Depression, Croatia, Geosciences, 8(11), 426, 1–14.

OSTRANDER, W.J. (1984): Plane-Wave Reflection Coefficients for Gas Sands at Nonnormal Angles of Incidence. Exploration Geophysics, 49,1580–1813.

PAMIĆ, J. (1997): Vulkanske stijene Savsko-dravskog međuriječja i Baranje, Nafta, 192 str.

PARRA, J., C. HACKERT, XU, P.C. & COLLIER, H. A. (2006): Attenuation analysis of acoustic waveforms in a borehole intercepted by a sand-shale sequence reservoir, The Leading Edge, 25, 186–193.

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

PAVELIĆ, D. (2002): The South-Western Boundary of Central Paratethys, Geologia Croatica, 55/1, 83–92.

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

PHILLIPS, R.L., RÉVÉSZ, I. & BÉRCZI, I. (1994): Lower Pannonian deltaic–lacustrine processes and sedimentation, Bikes Basin. – U: TELEKI, P.G., MATTICK, R., KÓKAI, J. (Ur.), Basin Analysis in Petroleum Exploration, A Case Study from the Békés Basin, Hungary, Geology, 67–82.

PILLER, W.E., & HARZHAUSER, M. (2005): The myth of the brackish Sarmatian Sea, Terra Nova, 17, 450–455.

PILLER, W.E., HARZHAUSER, M. & MANDIC, O. (2007): Miocene Central Paratethys stratigraphy - current status and future directions, Stratigraphy 4, 151–168.

PLETIKAPIC, V. (1964) Naftoplinonosnost Dravske potoline, Nafta, 9, 250–254.

PLETIKAPIĆ, Ž., GJETVAJ, I., JURKOVIĆ, M., URBIHA, H. & HRNČIĆ, LJ. (1964): Geologija i naftoplinonosnost Dravske potoline, Geološki vjesnik, 17, 49–78.

POGÁCSÁS, G., MATTICK, R.E., ELSTON, D.P., HÁMOR, T., JÁMBOR, Á., LAKATOS, L., LANTOS, M., SIMON, E., VAKARCS, G., VÁRKONYI, L. & VÁRNAI, P. (1994): Correlation of seismo and magnetostratigraphy in south eastern Hungary. – U: TELEKI, P.G., MATTICK, R., KÓKAI, J. (Ur.), Basin Analysis in Petroleum Exploration. A Case Study from the Békés Basin, Hungary, Geology, 143–160.

POPOV, S. V., RÖGL, F., ROZANOV, A. Y., STEININGER, F. F., SHCHERBA, I. G. & KOVÁC, M. (2004): Lithological-Paleogeographic maps of Paratethys, 10 Maps Late Eocene to Pliocene, Courier Forschungsinstitut Senckenberg, 250, 1–46.

POREBSKI, S.J. & STEEL, R.J. (2003): Shelf-margin deltas: their stratigraphic significance and relation to deepwater sands, Earth-Science Reviews, 62, 283–326.

PRELOGOVIĆ, E. (1975): Neotektonska karta SR Hrvatske, Geološki vjesnik, 28, 97–108.

PRELOGOVIĆ, E., SAFTIĆ, B., KUK, V., VELIĆ, J., DRAGAŠ, M. & LUČIĆ, D. (1998): Tectonic activity in the Croatian part of the Panononian Basin, Tectonophysics, 297, 283–293.

RADOVICH, B.J. & OLIVEROS., B (1998): 3-D sequence interpretation of seismic instantaneous attributes from the Gorgon Field, The Leading Edge,17:9,1286–1293.

READING, H. G. & RICHARDS, M.: Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system, American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 1994, 78, 702-822.

RICHARDS, P.G. & FRAISER, C.W. (1976): Scattering of elastic waves from depth-dependent inhomogeneities, Geophysics, 41, 441–458.

RÖGL, F. (1996a): Migration pathways between Africa and Eurasia-Oligocene-Miocene, Paleogeography, 10, 23–26.

RÖGL, F. (1996b): Stratigraphic correlation of the Paratethys Oligocene and Miocene, Mitteilungen der Gesellschaft der Geologie-und Bergbaustudenten Österreich, 41, 65–73.

RÖGL, F. (1998): Palaeogeographic Considerations for Mediterranean and Paratethys Seaways (Oligocene to Miocene), Annalen des Naturhistorischen Museum in Wien, 99A, 279–310.

RÖGL, F. (1999): Mediterranean and Paratethys. Facts and hypotheses of an Oligocene to Miocene paleogeography (short overview), Geologica Carpathica, 59, 339–349.

RÖGL, F. & STEININGER, F.F. (1983): Vom Zerfall der Tethys zu Mediterranean und Paratethys, Annalen des Naturhistorischen Museum in Wien, 85A, 135–163.

ROYDEN, L.H. (1988): Late Cenozoic tectonics of the Pannonian Basin System. – U: ROYDEN, L.H., HORVÁTH, F. (Ur.), The Pannonian Basin, A Study in Basin Evolution, AAPG Memoir, 45, 27–48.

ROSS, C.P. (2000): Effective AVO cross plot modelling: A tutorial, Geophysics 60, 1398–1408.

RUSSEL, B., GRAY, D., HAMPSON, D.P. (2011): Linearized AVO and poroelasticity, Geophysics, 76(3),1–24.

RUTHERFORD, S.R. & WILLIAMS, R.H. (1989): Amplitude-versus-offset variations in gas sands, Geophysics, 54, 680–688.

RUŽIĆ, T. & CVETKOVIĆ, M. (2021): Geological Characterization of the 3D Seismic Record within the Gas Bearing Upper Miocene Sediments in the Northern Part of the Bjelovar Subdepression - Application of Amplitude Versus Offset Analysis and Artificial Neural Network, Energies, 14, 4161, 1–16.

SACCHI, M., TONIELLI, R., CSERNY, T., DÖVÉNYI, P., HORVÁTH, F., MAGYARI, O., MCGEE, T.M., MIRABILE, L. (1998): Seismic stratigraphy of the Late Miocene sequence beneath Lake Balaton, Pannonian basin, Hungary. Acta Geologica Hungarica 41, 63–88.

SAFTIĆ, B., VELIĆ, J., SZTANÓ, O., JUHÁSZ, GY. & 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, 101–122.

SCHMIDT, S.M., BERNOULLI, D., FÜGENSCHUH, B., MATENCO, L., SCHEFER, S., SCHUSTER, R., TISCHLER, M. & USTASZEWSKI, K. (2008): The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units, Swiss Journal of Geosciences, 101, 139–183.

SEBE K., KOVAČIĆ, M., MAGYAR, I., KRIZMANIĆ, K., ŠPELIĆ, M., BIGUNAC, D., SÜTŐ-SZENTAI, M., KOVÁCS, M., SZUROMI-KORECZ, A., BAKRAČ, K., HAJEK-TADESSE, V., TROSKOT-ČORBIĆ, T. & SZTANO, O. (2020): Correlation of upper Miocene-Pliocene Lake Pannon deposits across the Drava Basin, Croatia and Hungary, Geologia Croatica, 73/7, 177–195.

SHERIFF, R.E. (1978): A first course in geophysical exploration and interpretation, International Human Resources Development Corporation, 313 str.

SHERIFF, R.E. (1992):Vertical and Lateral Seismic Resolution and Attenuation: Part 7. Geophysical Methods. –U: ME 10: Development Geology Reference Manual; MORTON-THOMPSON, D., WOODS, A.M., (Ur.), AAPG, Tulsa, 388–389.

SHUEY, R.T. (1985): A simplification of the Zoeppritz equations: Geophysics, 50, 609–614.

STEININGER, F.F. & WESSELY, G. (2000): From the Tethyan Ocean to the Paratethys Sea: Oligocene to Neogene Stratigraphy, Paleogeography and Paleobiogeohraphy of the circum-Mediterranean region and the Oligocene to Neogene Basin evolution in Austria. Mitt. Österr. Geol. Ges., 92 (1999), 95–116.

SZTANÓ, O.& MAGYAR, I., (2007): Deltaic parasequences on gamma logs, ultra-high-resolution seismic images and outcrops of Lake Pannon deposits. Joannea Geologie und Paläontologie 9, 105–108.

SZTANÓ, O., SZAFIÁN, P., MAGYAR, I., HORÁNYI, A., BADA, G., HUGHES, D.W., HOYER, D.L. & WALLIS, R.J. (2013) Aggradation and progradation controlled clinothems and deep-water sand delivery model in the Neogene Lake Pannon, Makó Trough, Pannonian Basin, SE Hungary, Global and Planetary Change, 103, 149–167.

SZTANÓ, O., KOVAC, M., MAGYAR, I. & ŠUJAN, M (2016): Late Miocene sedimentary record of the Danube/Kisalföld Basin: Interregional correlation of depositional systems, stratigraphy and structural evolution, Geologica Carpathica, 67(6), 525–542.

ŠIKIĆ, L. (1968): Stratigrafija miocena sjeveroistočnog dijela Medvednice na osnovu faune foraminifera, Geološki. vjesnik, 21, 213–227.

ŠUMANOVAC F. (2007): Geofizička istraživanja podzemnih voda, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 244 str.

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

TANER, M.T. (2001): Seismic attributes. Canadian Society of Exploration Geophysicists Recorder, 49–56.

TANER. M. T., SHERIFF, R. E.. KOEHLER, F., & FRYE, D. (1976): Extraction and interpretation of the complex seismic trace: presented at the 46th Annual Intl. SEG Meeting. October 28 in Houston.

TANER, M.T. & SHERIFF, R.E. (1977): Application of amplitude, frequency and other attributes to stratigraphic and hydrocarbon determination. Seismic Stratigraphy – Application to Hydrocarbon Exploration (Editor: Payton C.E.), AAPG Memoir 26, p. 301–303.

TANER, M. T., KOEHLER, F. & SHERIFF, R. E. (1979): Complex seismic trace analysis: Geophysics, 44, 1041–1063.

TANER, M. T., SCHUELKE, J.S., O'DOHERTY, R. & BAYSAL, E. (1994): Seismic attributes revisited, SEG Technical Program Expanded Abstracts, 1104–1106.

TOMLJENOVIĆ, B. & CSONTOS, L. (2001): Neogene–Quaternary structures in the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian basin (Hrvatsko zagorje and Karlovac basins, Croatia).– Int. J. Earth Sciences (Geol. Rundschau), 90, 560–578.

TUĆAN, F. (1904): Pegmatit u kristaličnom kamenju Moslavačke gore, Rad JAZU, 159, 166–208.

USTASZEWSKI, K., HERAK, M., TOMLJENOVIĆ, B., HERAK, D. i MATEJ, S. (2014): Neotectonics of the Dinarides-Pannonian Basin transition and possible earthquake sources in the Banja Luka epicentral area. Journal of Geodynamics, 82, 52–68.

VAN GELDER, I.E., MATENCO, L., WILLINGSHOFER, E., TOMLJENOVIĆ, B., ANDRIESSEN, P.A.M., DUCEA, M.N., BENIEST, A. & GRUIĆ, A. (2015): The tectonic

evolution of a critical segment of the Dinarides-Alps connection: kinematic and geochronological inferences from the Medvednica Mountains, NE Croatia. Tectonics, 34, 1952-1978.

VEEKEN, P., & SILVA, M.D. (2004). Seismic inversion methods and some of their constraints. First Break, 22, 47–70.

VELIĆ, J., WEISSER, M., SAFTIĆ, B., VRBANAC, B. i IVKOVIĆ, Ž. (2002): Petroleum-geological characteristics and exploration level of the three Neogene depositional megacyclus in the Croatian part of the Pannonian basin, Nafta, 53/6-7, 239–249.

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

VRBANAC, B. (2002): Chrono horizons Based on Resistivity Curve Variations – Upper Miocene Sediments of the Ivanić Grad Formation in the Sava Depression (NW Croatia).- Geologia Croatica, 55/1, 11–23.

VRBANAC, B.; VELIĆ, J.; MALVIĆ, T. (2010): Sedimentation of deep-water turbidites in main and marginal basins in the SW part of the Pannonian Basin, Geologica Carpathica. 61, 1, 55–69.

VUKOTINOVIĆ, LJ. (1852): Geognostische Skizze vom Warasdiner Teplitz in Croatien, Jahrb. Geol. Reichsnast., 3/4, 13–17, Wien.

WHITCOMBE, D.N., CONNOLLY, P., REAGAN, R.L, REDSHAW, T.C. (2002): Extended elastic impedance for fluid and lithology prediction, Geophysics, 67, 63–67.

ZOEPPRITZ, K. (1919): On reflection and propagation of seismic waves, Gottinger Nachrichten, Volume I, 66–84.

13.2. NEOBJAVLJENI I OCJENSKI RADOVI

ANDRIĆ, K. (2021): Analize i kartiranje geokemijskih i geoloških varijabli u prostoru Bjelovarske subdepresije, diplomski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet u Zagrebu, 66 str.

CVETKOVIĆ, M. (2013): Naftnogeološki potencijal i litostratigrafska razdradba trećega neogensko-kvartarnoga megaciklusa u savskoj depresiji, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 210 str.

DUMANČIĆ, S. (2014): Neuronske mreže, diplomski rad, Sveučilišni diplomski studij Fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera, Osijek, 42 str.

HERNITZ KUČENJAK, M., PREMEC FUĆEK, V., KRIZMANIĆ, K., TADEJ, J., ZLATAR, S. & MATOŠEVIĆ, M. (2018): Karpatian and Badenian transgression in Croatian part of the pannonian Basin System (biostratigraphy and palaeoenvironments), Forams 2018, Temporary Abstracts Collection, Edinburgh, Scotland, UK, 273-274 (poster, međunarodna recenzija, neobjavljeni rad, znanstveni).

KOVAČIĆ, M. (2004): Sedimentologija gornjomiocenskih naslaga jugozapadnog dijela Panonskog bazena (Sedimentology of the upper Miocene deposits from the southwestern part of Pannonian basin − in Croatian with an English Summary), doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet u Zagrebu, 203 str.

LOVRIĆ, D. (1992): Detaljna gravimetrijska i geomagnetska ispitivanja - Bjelovarska depresija 1992., Fond stručne dokumentacije, Odjel za gravimagnetometriju, Geofizika, Zagreb.

MALVIĆ, T. (1998): Strukturni i tektonski odnosi, te značajke ugljikovodika širega područja naftnoga polja Galovac - Pavljani, 1998., magistarski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 111 str.

MALVIĆ, T. (2003): Naftno geološki odnosi i vjerojatnost pronalaska novih zaliha ugljikovodika u bjelovarskoj uleknini, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 123 str.

MARKOVIĆ, F. (2017): Miocenski tufovi Sjevernohrvatskoga bazena, doktorska disertacija, Prirodoslovno - matematički fakultet, Zagreb, 174 str.

MESIĆ KIŠ, I. (2017). Kartiranje i reinterpretacija geološke povijesti Bjelovarske subdepresije univerzalnim kreiranjem te novi opći metodološki algoritmi za kartiranje sličnih prostora. doktorska disertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb,182 str.,

NAJDENOVSKI, J. (1988): Dubinski geološki odnosi i razvitak struktura u tercijarnim sedimentima Požeške kotline, doktorska disertacija, Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 146 str.

OREŠKOVIĆ, J. (2006). Procjena ležišnih značajki korištenjem seizmičkih atributa i seizmičkog modeliranja na primjeru polja Stari Gradac. Zagreb: magistarski rad, Zagreb, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 211 str.

SAFTIĆ, B. (1998): Genetska stratigrafska sekvencijska analiza u pontskim naslagama zapadnog dijela Savske depresije, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 136 str.

SARKAR E. (2018): Artificial Neural Networks: Kohonen Self-Organising Maps, Bachelor Thesis, Faculty of Science and Engineering, Department of Computer Science, university of Liverpool, 191 str.

SCHLUMBERGER (2007): Interpreter's guide to seismic attributes, Petrel Introduction Course book, 115 str.

ŠIMON, J. (1980): Prilog stratigrafiji i taložnom sustavu pješčanih rezervoara Sava-grupe naslaga mlađeg tercijara u Panonskom bazenu sjeverne Hrvatske, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 63 str.

VRBANAC, B. (1996): Palaeostructural and sedimentological analyses of Late Pannonian sediments of Ivanić Grad formation in the Sava depression, doktorska disertacija, Prirodoslovno - matematički fakultet, Zagreb, 303 str.

VRSALJKO, D. (2003): Biostratigrafija miocenskih naslaga Žumberačkog i Samoborskog gorja na temelju mekušaca (Biostratigraphy of Miocene deposits from Žumberačko and Samoborsko gorje Mts. based on Molluscs – in Croatian, with an English Abstract). – doktorska disertacija, Prirodoslovno - matematički fakultet, Zagreb, 147 str.

13.3. FOND STRUČNE DOKUMENTACIJE

BALIĆ, D. (1993): Odabrana poglavlja iz interpretacije karotažnih dijagrama (kratki tečaj za geologe na bušotini), Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d ,Zagreb.

BARIĆ, G. (1992): Ugljikovodici u sjeverozapadnom i srednjem dijelu dravske depresije, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

BARIĆ G. (1997): Geokemijski izvještaj istražne bušotine Bačkovica-1, Služba laboratorijskih ispitivanja, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

BARIĆ, G. (2002): Karakterizacija ugljikovodika u centralnom dijelu dravske depresije, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

CIRKOVIĆ, B. (1997):Završni geološki izvještaj za duboku istražnu bušotinu Bačkovica – 1 (Bac-1), Fond stručne dokumentacije, INA Industrija nafte d.d., Zagreb.

KRIZMANIĆ, K. (1997): Palinološka interpretacija, završno izvješće Bačkovica -1, Fond stručne dokumentacije, INA Industrija nafte d.d., Zagreb.

NAJDENOVSKI, J., HAJNŠEK, S. (1980): O strukturnim odnosima i konsedimentacijskom razvoju struktura u bjelovarskoj sinklinali dravske potoline. Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

NAJDENOVSKI, J., HAJNŠEK, S. (1982): Strukturni odnosi Bjelovarskog sinklinorija i graničnog područja Savske i Dravske depresije, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

PAVELIĆ, D., TOMLJENOVIĆ, B., VRANJKOVIĆ, A. (2010): Tectonic model, sedimentary environments and depositional mechanisms of potential hydrocarbon reservoirs in the middle and western part of the Drava Depression from the basement to the Miocene, studija, INA - Industrija nafte & Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

PRSKALO, S. (2005): Istraživanje ugljikovodika seizmičkim metodama, I i II dio, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

RAŠKAJ, N. (1997): Petrografsko-sedimentološka i biostratigrafska interpretacija, završno izvješće Bačkovica -1, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

RAŠKAJ, N. (2001): Petrografsko-sedimentološka i biostratigrafska interpretacija, završna izvješća Bačkovica-2 i Bačkovica -1Zapad, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

ŠIMON, J. (1966): Litostratigrafske jedinice polja Ivanić–Grad, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

ŠIMON, J. (1968): Informativne litostratigrafske jedinice tercijarnog kompleksa u profilima dubokih bušotina na području Dravske potoline, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

TROSKOT-ČORBIĆ T. (2001a): Geokemijsko izvješće Bačkovica-1zapad, Geokemijske analize i interpretacija, Služba istraživanja i laboratorijskih ispitivanja, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

TROSKOT-ČORBIĆ T. (2001b): Geokemijsko izvješće Bačkovica -2 (Bač-2), Geokemijske analize i interpretacija, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

VLAHOVIĆ, T. (1997): Biostratigrafska interpretacija, završno izvješće Bačkovica -1, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

VLAHOVIĆ, T. (2001): Biostratigrafska interpretacija, završna izvješća Bačkovica-2 i Bačkovica -1zapad, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

VRBANAC, B. (1990): Osnove teorijske i praktične spoznaje vezane za otkrivanje ugljikovodika u toku bušenja, Priručnik, Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

13.4. DOSSIER BUŠOTINA, ELABORATI I STUDIJE FONDA STRUČNE DOKUMENTACIJE

Dossier bušotina (izvještaji i analize mjerenja u bušotinama polja Bačkovica), Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

Elaborat o rezervama ugljikovodika Istražnog prostora Drava, plinsko polje Bačkovica, stanje 31.12.2005. godine, 2006., Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

Elaborat o rezervama ugljikovodika eksploatacijskog polja Gakovo (2006), Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

Elaborat o rezervama ugljikovodika eksploatacijskog polja Bačkovica (2013), Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

Ležišna studija lokaliteta Bačkovica (2004), Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

Procjena ugljikovodičnog potencijala lokaliteta Mala Jasenovača (2017), Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

Studija seizmičkih atributa (2020), Fond stručne dokumentacije, INA-Industrija nafte d.d., Zagreb.

Geološka studija, Plinonosni potencijal područja Grubišno Polje i Bačkovica, Fond stručne dokumentacije, INA Industrija nafte d.d., Zagreb.

13.5. INTERNETSKI IZVORI

https://subsurfwiki.org/wiki/Gather (10.05.2021)

https://glossary.oilfield.slb.com/en/terms/s/stack Oilfield Glossary, Schlumberger (17.6.2021.)

https://wiki.aapg.org/Amplitude_versus_offset_(AVO)_analysis#AVO_feasibility_studies (12.08.2021.)

https://www.petrole.gov.mr/IMG/pdf/2014_dana_avo_rgb_blending_v7_for_mauritanidespdf.pdf (24.11.2021.)

http://rgn.hr/~joresko/nids_joresko/Prvi_dio/Uvod.pdf , 2012 (16.7.2021.).

CHOPRA, S. (2004): Expert Answers, https://csegrecorder.com/columns/view/ expert-answers-200410 (23. 5. 2021).

14.ŽIVOTOPIS I POPIS OBJAVLJENIH RADOVA

Tihana Ružić rođena je 23. travnja 1977. godine u Zagrebu. Godine 2004. godine završila je studij geologije (smjer: diplomirani inženjer geologije) na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu. Tijekom studija radila je kao vodič na geološko-paleontološkom postavu i mineraloško-petrografskom postavu Hrvatskog prirodoslovnog muzeja u Zagrebu. Nakon završetka studija radila je kao vanjski suradnik u nastavi Geološko-paleontološkog zavoda Prirodoslovno-matematičkog fakulteta.

Od 2007. godine zaposlena je u tvrtki INA-Industrija nafte d.d. u službi za obradu 2D i 3D geofizičkih podataka gdje je sudjelovala u brojnim projektima. Od 2018. godine radi u obradi i interpretaciji podataka AVO analiza, gdje je sudjelovala u izradi istraživačkih studija područja hrvatskog dijela Panonskog bazenskog sustava (Dravska i Murska depresija). Kroz rad je surađivala sa stručnjacima raznih specijalističkih znanja te znanstvenicima iz raznih institucija. Član je Hrvatskog geološkog društva (HGD), gdje je tajnica Geofizičkog odsjeka.

Objavljeni znanstveni radovi:

1. **Ružić, T.** (2015): Overview and Reinstatement of Some Geophysical Interpretations in the Eastern Sava Depression-The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin, 30, No 1,37-44

2. **Ružić, T.**, Cvetković, M. (2021): Geological characterization of the 3D seismic record within the gas bearing Upper Miocene sediments in the northern part of the Bjelovar subdepression - application of artificial neural network and amplitude versus offset analysis – Energies 2021, 14, 4161, 1-16

Objavljeni znanstveni i stručni radovi u zbornicima skupova:

1. Radovčić, M., Nagl, I., Čumbrek S., **Ružić, T.**: 3D Seismic Data Merging: A Case Study in the Croatia – Hungary Border Area, 6th Conference and Exhibition of Balkan Geophysical Society, European Association of Geoscientists & Engineers-EAGE, Conference paper, EarthDoc -online Geoscience database, cp-262-00017

2. Kovačić N., **Ružić, T.**, Pejić, K.: „Short History of Technological Development in Geophysical Surveys & Processing in INA E&P, 6th Conference and Exhibition of Balkan Geophysical Society, European Association of Geoscientists & Engineers - EAGE, Conference paper, EarthDoc -online Geoscience database

Objavljeni sažeci u zbornicima skupova:

1. **Ružić, T.**, Kovačić N., Mihaljević I., Čumbrek S.: Seismic multiple removal methods (Seizmičke metode uklanjanja višestrukih refleksa), 2nd Central and Eastern European international Oil and Gas conference and exhibition, Knjiga sažetaka, HUNIG,20 (02.-05.10. 2012. Šibenik)

2. Jović, G., Radovčić, M., **Ružić, T.** : Surface related Multiple elimination-Case study the South Adriatic 3D Seismic Project, 2nd Central and Eastern European international Oil and Gas conference and exhibition, Knjiga sažetaka, HUNIG,35 (02.-05.10. 2012. Šibenik)

3. Nagl, I., Sruk, I., **Ružić, T.** : Acquisition of 2D & 3D marine seismic on the South Adriatic, 2nd Central and Eastern European international Oil and Gas conference and exhibition, Knjiga sažetaka, HUNIG,140 (02.-05.10. 2012., Šibenik)

4. Nagl, I., **Ružić, T.**, Radovčić, M., Španić-Naumovski, V.: Anomalous amplitude attenuation- NGP 3D (Ublažavanje amplitudnih anomalija – NGP 3D), 5th International Oil and Gas Conference, Knjiga sažetaka, HUNIG, 60 (29.09.-1.10.02009., Šibenik)

5. Havidić, J., **Ružić, T.**, Kovačić N.: Application of Benford's law on seismic data, 8th Central and Eastern European international Oil and Gas conference and exhibition, Knjiga sažetaka, HUNIG,20 (Šibenik, 2015)

6. **Ružić, T.**, Nagl, I., Radovčić, M.: Sava 3d-extension – Presentation of structural forms before and after the migration process (Sava 3d-nastavak – Prikaz strukturnih oblika prije i nakon primjene procesa migracije), Knjiga sažetaka 4. hrvatskog geološkog kongresa, Horvat, M. Zagreb: Hrvatski geološki institut, 2010. str. 293

7. **Ružić, T.**, Malvić, T.: Ponovno tumačenje dijela geofizičkih mjerenja na istoku Savske depresije, Knjiga sažetaka 5. hrvatskog geološkog kongresa, Horvat, M., Wacha, L. (ur.). Zagreb: Hrvatski geološki institut, 2015. str. 227-228 (poster, međunarodna recenzija, sažetak, znanstveni)

8. **Ružić, T.**, Sulaiman W.: 3D Seismic Characterization of Upper Miocene Deposits (Drava Trough), Knjiga sažetaka 6. hrvatskog geološkog kongresa, Horvat, M. ; Wacha, L., Matoš B. (ur.). Zagreb: Hrvatski geološki institut, 2019. str. 170

9. Baketarić, T., Pleić, M., Krpan, B., Jović, G., **Ružić, T.**, Vranjković, A., Bubnić, J.: Channel-lobe systems as a new play in Drava Depression, CPBS , X. Međunarodna konferencija i izložba, Hunig- 2019, Naftno-plinsko gospodarstvo i primarna energija, Hrvatska Šibenik, 2019.

10. **Ružić, T.**, Baketarić, T., Krpan, B., Nagl, B., Pleić, M., Jović, G: Geological characterization of the 3D seismic volume on Bačkovica production field (Bjelovar Subdepression, CPBS), Petroconf 2.0, Ina-Mol Group Conference, Budapest, 2019

11. Jović, G., Radovčić, M., Jankov, J., **Ružić, T.**: Application of Depth Imaging for Field Development Study-Kozarice, Jamarice, Lipovljani 3D, Petroconf 2.0, Ina-Mol Group Conference, Budapest, 2019

12. **Ružić, T.**, Baketarić, T., Krpan. B, Pleić, M.: Geološka karakterizacija seizmičkog zapisa sjevernog dijela Bjelovarske subdepresije, Knjiga sažetaka - Simpozij studenata doktorskih studija PMF-a 2020., Zagreb: Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 2020 (zbornik sažetaka), str.133