

Razvoj postupka seizmičke interpretacije ležišta ugljikovodika Bjelovarske depresije na temelju inverzije seizmičkih brzina

Vukadin, Domagoj

Doctoral thesis / Disertacija

2022

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:094682>

Rights / Prava: [Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International](#)/[Imenovanje-Nekomercijalno-Dijeli pod istim uvjetima 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**



Repository / Repozitorij:

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





Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Domagoj Vukadin

**RAZVOJ POSTUPKA SEIZMIČKE
INTERPRETACIJE LEŽIŠTA
UGLJKOVODIKA BJELOVARSKE
DEPRESIJE NA TEMELJU INVERZIJE
SEIZMIČKIH BRZINA**

DOKTORSKI RAD

Zagreb, 2022.



Sveučilište u Zagrebu

Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Domagoj Vukadin

**RAZVOJ POSTUPKA SEIZMIČKE
INTERPRETACIJE LEŽIŠTA
UGLJKOVODIKA BJELOVARSKJE
DEPRESIJE NA TEMELJU INVERZIJE
SEIZMIČKIH BRZINA**

DOKTORSKI RAD

Mentor:
dr.sc. Jasna Orešković, izv. prof.

Zagreb, 2022.



University of Zagreb

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering

Domagoj Vukadin

**DEVELOPMENT OF SEISMIC
INTERPRETATION PROCEDURE BASED
ON SEISMIC INVERSION FOR THE
BJELOVAR DEPRESSION RESERVOIRS**

DOCTORAL DISSERTATION

Supervisor:
Associate professor Jasna Orešković, Ph.D.

Zagreb, 2022

Doktorski rad izrađen je na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Mentorica:

dr. sc. Jasna Orešković, dipl. ing. fiz., izvanredna profesorica

Viša znanstvena suradnica

Zavod za geofizička istraživanja i rudarska mjerenja

Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Zahvale

Zahvaljujem mentorici izv. prof. dr. sc. Jasni Orešković na stručnom vođenju tijekom poslijediplomskog studija. Hvala na korisnim savjetima, pomoći, uloženom trudu i vremenu tijekom istraživanja, a posebno tijekom pisanja znanstvenih članaka i oblikovanja teksta doktorskog rada.

Hvala članovima povjerenstva izv. prof. dr. sc. Bruni Saftiću, dr. sc. Alanu Vranjkoviću i dr. sc. Renatu Buljanu na korisnim savjetima i komentarima koji su poboljšali ovaj rad.

Zahvaljujem INA - Industriji nafte d.d. na povjerenju, materijalnoj potpori studija i ustupljenim podacima. Također, zahvaljujem PSP - Podzemnom skladištu plina d.o.o. na ustupanju VSP podataka.

Veliko hvala kolegici Josipi Haviđić na pripremi i obradi VSP podataka te kolegama Marijani Radovčić i Goranu Joviću na pripremi seizmičkih podataka. Zahvaljujem kolegama iz INA - Laboratorija istraživanja i proizvodnje Marku Gaćini, dr. sc. Adaleti Perković i dr. sc. Jasmini Jelić-Balta na pomoći pri odabiru uzoraka te na petrofizikalnim analizama uzoraka. Hvala kolegi Csabi Kutasi i MOL Laboratoriju na snimanju brzina ultrazvučnih valova na uzorcima.

Hvala kolegama Lani Vlašić, Marini Vanjek, Josipi Perić, Stipici Brnadi i Tomi Molnaru na ispravicima teksta, a najviše na podršci svih ovih godina u INA-i. Zahvaljujem se svim ostalim kolegicama i kolegama koje nisam naveo, a pomogli su mi na bilo koji način.

Posebno se zahvaljujem roditeljima Stipi i Jakovici, braći Anti, Ivanu, Petru i Filipu na potpori i povjerenju tijekom cjelokupnog školovanja.

I na kraju, najveće hvala supruzi Maji i sinu Mislavu na ogromnom strpljenju, razumijevanju, bezuvjetnoj ljubavi i potpori.

Sažetak

Istraživačkim radom u okviru doktorske disertacije prikazan je metodološki pristup karakterizaciji ležišta ugljikovodika na temelju kvantitativne analize seizmičkih, bušotinskih i proizvodnih podataka. Predloženom metodologijom dobivaju se pouzdani podaci potrebni u postupku seizmičke karakterizacije ležišta koja će omogućiti procjenu prostorne raspodjele značajki ležišta kao što su poroznost i litološki sastav stijena. Metodologija je primijenjena na ležištima u jugozapadnom dijelu Panonskog bazenskog sustava, točnije u Bjelovarskoj depresiji. Predmet istraživanja su vapnenačko ležište na plinskom polju Grubišno Polje i pješčenjačko ležište na naftnom polju Letičani.

Za detaljnu seizmičku karakterizaciju ležišta od temeljnog značaja su brzine S-valova jer se interpretacija temelji na omjeru brzina V_p/V_s , impedanciji i Poissonovom koeficijentu. No, nedostatak mjerenih brzina smičnih valova tijekom istraživačkog bušenja iznjedrio je potrebu za definiranjem postupka modeliranja brzina. Predviđanje brzina V_s u bušotinama koje nemaju iste snimljene, velik je izazov i zahtijeva dodatan angažman. U plinskom ležištu Grubišnog Polja brzine V_s određene su pomoću modela Kuster-Toksöz i Xu-Payne, a u naftnom ležištu polja Letičani brzine V_s određene su empirijskim odnosom Greenberg-Castagna te su dobiveni pouzdani ulazni podaci za seizmičko modeliranje i seizmičku inverziju.

S ciljem definiranja elastičnih svojstava vapnenaca na polju Grubišno Polje izvedena su laboratorijska mjerenja ultrazvučnih brzina za različita zasićenja uzoraka i naprezanja. Ona su po prvi put napravljena za ležišne stijena u jugozapadnom dijelu Panonskog bazenskog sustava. Na temelju rezultata u laboratorijskim uvjetima definiran je empirijski odnos brzina smičnih valova (V_s) i brzina kompresijskih valova (V_p).

Glavni cilj je seizmičkom inverzijom rekonstruirati geološku građu podzemlja na temelju seizmičkih mjerenja. Postoje dvije vrste inverzije, deterministička i stohastička. Inverzijom su uspješno izdvojeni fizikalni parametri koji imaju i geološko značenje, a primijenjena su obje inverzije. U ovom radu prikazana je metodologija različitih seizmičkih inverzija i Poissonove impedancije. Analizom rezultata inverzije definirana je distribucija elastičnih parametara u prostoru, a time i kvalitete ležišnih stijena. Dijelovi ležišta s najboljim kolektorskim svojstvima izdvojeni su na temelju nižih vrijednosti impedancija i omjera V_p/V_s .

Predstavljena metodologija seizmičke interpretacije djelomično iscrpljenih naftnih i plinskih polja daje novi znanstveni doprinos jer podaci brzina smičnih valova u procesu

seizmičke inverzije nisu korišteni u dosad primjenjivanim metodama. Sveukupna analiza rezultata seizmičkih inverzija ponajviše je doprinijela u razumijevanju ležišta vapnenaca i pješčenjaka u jugozapadnom dijelu Panonskog bazenskog sustava. Najveći znanstveni doprinos predstavljaju definirani empirijski odnosi brzina smičnih valova (V_s) i brzina kompresijskih valova (V_p) te empirijski odnos poroznosti i brzina. Ovi rezultati predstavljaju prvi empirijski odnos za vapnence u jugozapadnom dijelu Panonskog bazenskog sustava.

Ključne riječi: Bjelovarska depresija, petrofizikalno modeliranje, ultrazvučne brzine, Poissonov koeficijent, seizmička inverzija.

Extended Summary

The studied oil and gas field are located in the northern part of Croatia. More specifically, in the Bjelovar depression of the Pannonian Basin. The geological development is closely connected with the complex geological history of the southern part of the Pannonian Basin, more precisely to the North Croatian Basin during the Neogene and Quaternary.

Bjelovar depression presents a separate geotectonic unit formed by the main transcurrent fault system, together with other accompanying fault systems transverse or diagonal to the direction of the central Drava fault. It was formed in the Early Miocene syn-rift phase linked to regional extension tectonic phase which generated several rift-type depressions in North Croatian Basin

The dissertation presents a methodological approach to the characterization of hydrocarbon reservoirs. It is based on the advanced methods of processing and interpretation of geophysical data. Hydrocarbon reservoir characterization refers to the quantitative analyzes of seismic, wellbore, and production data that contribute to a better understanding of the spatial distribution of reservoir characteristics such as porosity, lithology, and structural features. Different geophysical and laboratory methods are presented with the aim of integrating the available geological, laboratory and petrophysical data required for a better interpretation of seismic data.

The seismic interpretation was performed on 3D seismic data in time domain and it was controlled on depth migrated 3D seismic data. The analysis of seismic attributes verified the interpreted structural setting. Attributes used in the interpretation belong to the group of physical attributes (RMS amplitude, instantaneous frequency, sweetness) and to the group of geometric attributes (variance).

Shear wave velocities are fundamental for detailed seismic characterization of the reservoir because the interpretation is based on the velocity ratio V_p/V_s , impedance and Poisson's ratio. This dissertation presents the procedure for predicting V_s in wells without recorded V_s . Predicting V_s is a great challenge and requires a lot of effort to provide reliable input for seismic modeling and seismic inversion. In the Grubišno Polje gas reservoir, V_s velocities were determined using the Kuster-Toksöz and Xu-Payne models, and in the Letičani oil reservoir, V_s velocities were determined by the Greenberg-Castagna empirical relationship.

To define the elastic properties of limestone, the laboratory measurements of ultrasonic velocities under different saturation conditions, were made for the first time for a hydrocarbon reservoir in the southwestern part of the Pannonian Basin. The empirical relationship between shear wave velocities (V_s) and compressional wave velocities (V_p) was defined based on the laboratory results. The results of the laboratory measurements of ultrasonic velocities indicate that the porosity and density have the main influence on velocities, while the influence of calcite or dolomite is less significant.

In the seismic inversion process geological settings are reconstructed based on seismic data. Inversion seeks to define the physical parameters that also have geological meaning. In this dissertation, the methodology of the different seismic inversions and Poisson impedance is presented. Inversion results define the distribution of elastic parameters and the quality of reservoir rocks. The seismic inversion results obtained by the different methods show a similar range of the impedance values and V_p/V_s ratios for the same lithologies. The stochastic inversion shows results with a better vertical and lateral resolution that enable better integration with the well data, which is especially visible in the results of the Letičani field.

The main scientific contribution of this research is to establish the optimal methodology for seismic interpretation of partially depleted oil and gas fields using shear wave velocity data in seismic inversion. The parameters of the reservoir quality are defined using elastic properties of the reservoir, like Poisson's ratio, the shear modulus and the volume modulus for the first time, which was not used in the previous methods. The results of the ultrasonic laboratory measurements on the limestone samples under the different effective stresses and saturation states enable the analysis of the elastic properties of limestones and the definition of the pore space, i.e. shape and pore connection.

The most important scientific contributions of this thesis include establishing empirical relationships of shear wave velocities (V_s) and compression wave velocities (V_p), together with the empirical relationship of porosity and velocities. Throughout, this work determines the first empirical relationship for limestone in the southwestern part of the Pannonian Basin.

Keywords: Bjelovar Depression, rock physics, ultrasonic velocity, Poisson's ratio, seismic inversion.

Sadržaj

Zahvale	II
Sažetak.....	III
Extended Summary	V
Popis slika.....	X
Popis tablica	XVIII
Popis priloga.....	XVIII
Popis fizikalnih oznaka	XIX
Popis kratica.....	XX
1 Uvod	1
2 Strukturno-tektonski odnosi istraživanog područja	4
2.1 Strukturno-tektonski odnosi jugozapadnog dijela PBS-a.....	4
2.2 Strukturno-tektonski odnosi Bjelovarske depresije	7
3 Stratigrafski razvoj istraživanog prostora	11
3.1 Podloga neogena.....	16
3.2 Donji i srednji miocen – formacija Moslavačka gora.....	17
3.3 Gornji miocen	17
3.4 Geološki opis ležišnih stijena	18
4 Ulazni podaci.....	20
4.1 Seizmički i bušotinski podaci	21
4.2 Vertikalno seizmičko profiliranje (VSP).....	28
4.3 Povezivanje bušotinskih i seizmičkih podataka	31
5 Strukturna interpretacija	35
5.1 Model brzina.....	36
5.2 Strukturna interpretacija polja Grubišno Polje	37
5.3 Strukturna interpretacija polja Letičani	42

6	Osnove širenja seizmičkih valova	48
6.1	Empirijski odnosi brzine i poroznosti.....	50
6.2	Empirijski odnosi brzina V_p - V_s	52
7	Modeliranje fizikalnih parametara stijena	54
7.1	Modeli čvrstih elastičnih medija.....	54
7.2	Modeli čvrstih elastičnih medija s inkluzijama	60
7.2.1	Model Kuster-Toksöz.....	60
7.2.2	Model Xu-Payne	60
7.3	Elastična svojstva fluida	62
8	Određivanje smičnih brzina na temelju modeliranja fizikalnih parametara ..	64
9	Laboratorijska mjerenja na jezgrama	74
9.1	Pregled dosadašnjih istraživanja ultrazvučnih mjerenja jezgri.....	74
9.2	Priprema uzoraka i mjerenje poroznosti i propusnosti	78
9.2.1	Rezultati mjerenja poroznosti i propusnosti.....	81
9.3	Ultrazvučno mjerenja brzina	82
9.3.1	Metodologija i aparatura	83
9.3.2	Rezultati mjerenja na suhim uzorcima.....	87
9.3.3	Rezultati mjerenja na vodom zasićenim uzorcima.....	89
9.4	Analiza rezultata mjerenja brzina ultrazvučnih valova na uzorcima.....	91
9.4.1	Odnos brzina i poroznosti	91
9.4.2	Odnos brzina rasprostiranja P- i S-vala.....	94
9.4.3	Elastični parametri	99
10	Seizmička inverzija	102
10.1	Deterministička <i>post-stack</i> inverzija.....	105
10.2	Deterministička <i>pre-stack</i> inverzija	108
10.3	Stohastička inverzija	112
10.4	Poissonova impedancija.....	115

10.5	Rezultati seizmičkih inverzija.....	118
10.5.1	Rezultati seizmičkih inverzija na plinskom polju Grubišno Polje.....	119
10.5.2	Rezultati seizmičkih inverzija na naftnom polju Letičani.....	123
11	Primjena seizmičke inverzije u karakterizaciji ležišta.....	131
11.1	Seizmičko modeliranje dubine slojne vode.....	131
11.2	Raspodjela poroznosti.....	134
12	Pregled metodološkog pristupa seizmičke interpretacije ležišta ugljikovodika.....	139
13	Diskusija.....	142
13.1	Modeliranje fizikalnih parametara.....	142
13.2	Laboratorijska mjerenja na jezgrama.....	143
13.3	Seizmička inverzija.....	146
14	Zaključak.....	148
15	Literatura.....	151
	Životopis.....	166
	Popis objavljenih radova.....	167
	Prilozi.....	168

Popis slika

Slika 2-1 Reljefni prikaz istraživanog područja (prema EuroDEM: https://www.mapsforeurope.org/)	4
Slika 2-2 Pojednostavljena skica sinriftnog razvoja Panonskog bazena (prema Balázs et al., 2016)	6
Slika 2-3 Tektonska karta Sjevernohrvatskog bazena. Prilagođeno prema Schmid et al. (2004), Ustaszewski et al. (2014) i Pavelić i Kovačić (2018).....	8
Slika 2-4 Shematski prikaz tektonskih odnosa u Bjelovarskoj depresiji i zapadnom dijelu Dravske depresije. Rasjedni sklop je pojednostavljen na temelju regionalne interpretacije podloge neogena (prema Krpan et al., 2018). Legenda eksploatacijskih polja: 1. Legrad, 2. Kutnjak - Đelekovac, 3. Cvetkovec, 4. Petranec, 5. Gola, 6. Molve, 7. Ferdinandovac, 8. Stari Gradac, 10. Lepavina, 11. Jagnjedovac, 12. Mosti, 13. Čepelovac - Hampovica, 14. Letičani, 15. Šandrovac, 16. Bilogora, 17. Galovac - Pavljani, 18. Bačkovica, 19. Gakovo, 20. Grubišno Polje	9
Slika 2-5 Palinspastička rekonstrukcija na profilu poprečnom na pružanje Dravske i Bjelovarske depresije (prema Krpan et al., 2018).....	10
Slika 3-1 Geološka karta šireg područja istraživanja [preuzeta iz Matoš (2014), str. 28.; pojednostavljena prema OGK Jugoslavije (1:100 000), listovi: Koprivnica (Šimunić et al., 1994), Đurđevac (Hećimović, 1986), Bjelovar (Korolija i Crnko, 1985), Virovitica (Galović i Marković, 1979), Podravska Slatina (Maković, 1985), Orahovica (Jamičić i Brkić, 1987) i Sisak (Pikija, 1987)]	11
Slika 3-2 Sedimentološki i stratigrafski stup Sjevernohrvatskog bazena (prema Pavelić et al., 2016).	12
Slika 3-3 Geološki profil Bjelovarske depresije (Krpan et al., 2018)	14
Slika 3-4 Geološki stup zapadnog dijela Dravske i Bjelovarske depresije s naznačenim ležištima na Letičanima i Grubišmom Polju. Neformalna litostratigrafska podjela definirana prema Malvić i Cvetković, (2013).....	15
Slika 3-5 Shematski profil sedimentacijskog modela bioklastičnih vapnenaca na karbonatnoj platformi (prema Velić et al., 2000).....	18
Slika 4-1 Karta snimljenih seizmičkih volumena u hrvatskom dijelu PBS-a s prikazanim područjima istraživanja: (a) polje Letičani i (b) polje Grubišno Polje. Bušotine sa snimljenim vertikalnim seizmičkim profilom (VSP) prikazane su zelenom bojom. .	21

Slika 4-2 Frekvencijski spektar seizmičkih volumena	23
Slika 4-3 Geometrija snimanja. <i>Offset stack</i> volumen zbrojenih tragova definiran udaljenostima geofona od izvora vala; <i>angle stack</i> “ volumen zbrojenih tragova definiran kutovima upada seizmičkog vala.....	24
Slika 4-4 Usporedba profila <i>offset stack</i> s različitim udaljenostima	25
Slika 4-5 Usporedba profila <i>angle stack</i> s različitim kutovima	25
Slika 4-6 Prikaz izdvojenih seizmičkih valića - Grubišno Polje	26
Slika 4-7 Prikaz izdvojenih seizmičkih valića - Letičani	26
Slika 4-8 Raspon frekvencija i valnih duljina različitih seizmičkih mjerenja (prema Sheriff, 2002)	28
Slika 4-9. Geometrija VSP mjerenja: 1. bez odmakom (engl. <i>zero-offset VSP</i>), 2. s odmakom (engl. <i>offset VSP</i>), 3. mjerenje s višestrukim izvorima (engl. <i>multi-offset VSP</i>), 4. paralelnim pomicanjem izvora vala (engl. <i>walk-away VSP</i>), 5. paralelnim pomicanjem izvora vala i geofona (engl. <i>walk-above VSP</i>), 6. snimanje seizmičkih valova tijekom bušenja (engl. <i>seismic while drilling VSP</i>) i 7. geometrija širenja seizmičkih valova (prema Gupta, 2011).	29
Slika 4-10 Strukturna karta u vremenskoj domeni s naznačenim stajalištima izvora vala tijekom VSP-mjerenja na Grubišnom Polju.....	30
Slika 4-11 VSP seizmički profil bušotine A-1Z na Grubišnom Polju. Tragovi su zbrojeni prema komponentama geofona s prikazanom interpretacijom prvih nailazaka P- i S-valova	31
Slika 4-12 Kalibrirani sintetski trag na seizmičkom profilu za bušotine A-1Z i B-9.....	32
Slika 4-13 Prikaz seizmičke anomalije (žuto) na profilu pojedinačnih tragova (a) i profilu seizmičkog volumena (b)	33
Slika 4-14 Isječak operativnog geološkog dijagrama za bušotinu A-1Z (prema Trogrlić, 1994)	34
Slika 5-1 Strukturna karta po krovini metamorfita (temeljno gorje).....	38
Slika 5-2 Strukturna karta po krovini vapnenaca (Rs7)	39
Slika 5-3 Profil 1-1' s interpretiranim horizontima i rasjedima.	40
Slika 5-4 Profil 1-1' s prikazanim intervalnim brzinama iz 3D modela brzina	40
Slika 5-5 Profil 2-2' s interpretiranim horizontima i rasjedima.....	41
Slika 5-6 Karte seizmičkih atributa po krovini temeljnog gorja	42
Slika 5-7 Strukturna karta krovine ležišta Koprivnički pješčenjaci	43

Slika 5-8 Profil 3-3' na polju Letičani s interpretiranim horizontima krovine i podine ležišta Koprivnički pješčenjaci.....	44
Slika 5-9 Profil 3-3' s prikazanim intervalnim brzinama iz 3D modela brzina	45
Slika 5-10 Karta hidrodinamičkih jedinica koje su definirane različitim kontaktom nafta-voda (prema Vukadin et al., 2021).....	46
Slika 5-11 Seizmički atributi krovine ležišta Koprivnički pješčenjaci.....	47
Slika 6-1 Raspon kompresijskih i smičnih brzina u stijenama različitog litološkog sastava (Schön, 2015)	49
Slika 7-1 Shema tri modela za pješčenjake. Modul elastičnosti može biti volumni modul ili modul smicanja (prema Avseth et al., 2000).....	55
Slika 7-2 Različiti koncepti naprezanja za model Reuss i Voigt (prema Schön, 2015).....	56
Slika 7-3 Dijagram ovisnosti volumnog modula i kompresijskih brzina (V_p) za različite elastične modele	57
Slika 7-4 Fizikalno značenje Hashin-Shtrikman granica za volumni modul stijene sastavljene od dva minerala (Mavko et al., 2009).....	57
Slika 7-5 Ilustracija matriksa stijene	58
Slika 7-6 Dijagram odnosa elastičnih parametara s obzirom na stijene različitog litološkog sastava i promjene zasićenja stijena (prema Ødegaard i Avseth, 2004)	59
Slika 7-7 Odnos brzina i poroznosti za različite vrijednosti koeficijenta pora prema modelu Xu-Payne (Xu i Payne, 2009)	62
Slika 7-8 Dijagrami ovisnosti gustoće, brzine i volumnih modula ležišnih fluida polja Grubišno Polje o promjeni tlaka i temperature. (efektivno naprezanje 11 MPa, temperatura ležišta 80 °C, $S_w = 0,4$; $S_g = 0,6$; $S_o = 0$, salinitet 10 g/l)	63
Slika 8-1 Mikroskopski prikaz sekcije (uvećanje 40x) prikazuje mikro poroznost u vapnencu (lijevo) i morfološki prikaz uzorka snimljen elektronskim mikroskopom (uvećanje 750x) (desno) (Matošević et al., 2017).....	64
Slika 8-2 Usporedba (a) profila <i>offset stack</i> s različitim udaljenostima, (b) profila <i>angle stack</i> s različitim kutovima upada, (c) s geometrijom snimanja i (d) položajem točaka paljenja	65
Slika 8-3 Metodologija određivanja brzina S-valova na temelju modeliranja petrofizikalnih podataka	66
Slika 8-4 Odnos brzina P-valova i poroznosti s naznačenim krivuljama koeficijenta pora (α) za model Kuster-Toksöz (gore) i model Xu-Payne (dolje). Vrijednosti gama karotaže (GR) su naznačene spektrom boja. (Ulazni parametri su: kalcit $K=68$ GPa,	

$\mu=28$ GPa, S_w 26%, voda $K=2.2$ GPa, $\rho=1.0$ g/cm ³ , plin $K=0.038$ GPa, $\rho=0.15$ g/cm ³)	67
Slika 8-5 Prikaz bušotinskih krivulja za bušotinu A-1Z s vrijednostima ukupne poroznosti, gustoće, mjerenih brzina P-valova, intervalne brzine S-valova izračunate iz VSP-mjerenja, modelirane brzine P- i S- valova i relativne pogreške brzine P-valova; a) model Kuster-Toksöz, b) model Xu-Payne.....	68
Slika 8-6 Dijagram V_p - V_p koji prikazuje odnos izmjerenih brzina u bušotini i modeliranih brzina za različite teoretske modele i to za cjelokupno ležište i bez zone s većim udjelom lapora.....	69
Slika 8-7 Litološki profil bušotine A-1Z s rezultatima modeliranja brzina	70
Slika 8-8 Modelirane brzine V_s u bušotini B-9 na temelju: (a) empirijskog odnosa Greenberg-Castagna, (b) modela s kontaktnom cementacijom i (c) modela s konstantnim cementnim vezivom	72
Slika 8-9 Dijagram ovisnosti snimljene karotažne krivulje brzine V_p i modeliranih krivulja brzina V_s u bušotini B-9.....	73
Slika 9-1 Jezgre iz bušotina A-1Z (805 – 811 m) i A-2Z (972 – 976 m)	74
Slika 9-2 Odnos brzina P- i S-valova i poroznosti na temelju podataka istraživanja Rafavich et al. (1984).....	75
Slika 9-3 Dehidratorska komora.....	78
Slika 9-4 Princip mjerenja poroznosti volumetrijskom metodom.....	79
Slika 9-5 Odabrani uzorci Grubišnog Polja korišteni u laboratorijskim ispitivanjima	80
Slika 9-6 Odnos poroznosti i efektivnih napreznja uzoraka	81
Slika 9-7 Odnos propusnosti i poroznosti.....	82
Slika 9-8 Skica uređaja za ultrazvučno mjerenje brzina.....	83
Slika 9-9 Uređaj AVS 700 korišten za mjerenje ultrazvučnih valova koji omogućuje mjerenje brzina pod različitim vrijednostima efektivnih napreznja i pornog tlaka (izvor: https://vindum.com/ , 6. 12. 2021.)	84
Slika 9-10 Signal P- i S-vala suhog uzorka 3628 pri efektivnom napreznju od 9 MPa	86
Slika 9-11 Signal P- i S-vala zasićenog uzorka 3628 pri efektivnom napreznju od 9 MPa	86
Slika 9-12 Normalizirani tragovi P-vala i S-vala uzorka 3628 u suhom stanju pri različitim vrijednostima napreznja	87
Slika 9-13 Normalizirani tragovi P-vala i S-vala uzorka 3628 u zasićenom stanju pri različitim vrijednostima napreznja	89

Slika 9-14 Ovisnost brzine o promjeni poroznosti suhих i zasićenih uzoraka.....	91
Slika 9-15 Dijagram ovisnosti P-brzina, poroznosti i efektivnog naprezanja uzorka 1692 u suhom i zasićenjome stanju	92
Slika 9-16 Dijagram brzina P-vala i poroznosti s definiranim modelom Kuster i Toksöz za eliptični oblik pora. Podaci su obojani vrijednostima efektivnih naprezanja. Ulazni elastični parametri: $K=76.8$ GPa, $\mu=32$ GPa; slojna voda $K = 2.1$ GPa	93
Slika 9-17 Dijagram brzina P-vala i poroznosti s definiranim modelom Xu Payne. Podaci su obojani vrijednostima efektivnih naprezanja. Ulazni elastični parametri: $K = 76.8$ GPa, $\mu = 32$ GPa; slojna voda $K = 2.1$ GPa	94
Slika 9-18 Dijagram ovisnosti P-brzina i S-brzina suhих i zasićenih uzoraka.....	95
Slika 9-19 Dijagram ovisnosti P-brzina i S-brzina suhих (sivo) i zasićenih uzoraka (plavo) pri efektivnom naprezanju od 9 MPa	96
Slika 9-20 Dijagram ovisnosti P-brzina i S-brzina suhих (sivo) i zasićenih uzoraka (plavo) pri različitim efektivnim naprezanjima	96
Slika 9-21 Odnos V_p , V_s brzina u odnosu na poroznost.....	98
Slika 9-22 Odnos V_p - V_s brzina Grubišnog Polja uspoređen s rezultatima iz literature različitih vrijednosti efektivnog naprezanja i dubina	98
Slika 9-23 Dijagram ovisnosti V_p/V_s koeficijenta i akustičnih impedancija suhих (sivo) i zasićenih (plavo) uzoraka.....	99
Slika 9-24 Dijagram ovisnosti volumnih i smičnih modula suhих i zasićenih uzoraka.....	100
Slika 9-25 Dijagram ovisnosti Poissonovog koeficijenta i poroznosti suhих i zasićenih uzoraka	100
Slika 9-26 Dijagram ovisnosti V_p/V_s koeficijenta i poroznosti suhих i zasićenih uzoraka	101
Slika 10-1 Postupak seizmičke inverzije: pretvorba snimljenog seizmičkog traga u krivulju akustične impedancije	102
Slika 10-2 Frekvencijski spektar modela niskih frekvencija i snimljenih 3D seizmičkih podataka	106
Slika 10-3 Profil 1-1'- model niskih frekvencija (a) P-impedancija, (b) S-impedancija i (c) gustoće Grubišnog Polja. Model niskih frekvencija dobiven je prostornom distribucijom bušotinskih podataka ograničenog frekvencijskog spektra od 0 do 15 Hz.....	106
Slika 10-4 Korelacija sintetskog seizmograma i snimljenog seizmičkog traga tijekom procesa inverzije za bušotinu A-1Z na Grubišnom Polju	107

Slika 10-5 Seizmički profil nezbrojenih tragova (gathera) i izdvojeni seizmički valići za tri intervala kutova upada seizmičkih valova	108
Slika 10-6 Dijagrami prirodnog logaritma P-impedancija i S-impedancija te gustoće za plinsko polje Grubišno Polje.....	110
Slika 10-7 Korelacija sintetskog traga i snimljenog seizmičkog traga tijekom procesa <i>pre-stack</i> inverzije za Grubišno Polje.....	111
Slika 10-8 Korelacija sintetskog traga i snimljenog seizmičkog traga tijekom procesa <i>pre-stack</i> inverzije za polje Letičani.....	111
Slika 10-9 Frekvencijski spektri ulaznih podataka stohastičke inverzije.....	112
Slika 10-10 Postupak stohastičke inverzije: (a) početni model vertikalne rezolucije 1 ms, (b) povezivanje bušotinskih i seizmičkih podataka, (c) prostorna analiza podataka (variogram), (d) P-impedancija, (e) S-impedancija i (f) omjer V_p/V_s	113
Slika 10-11 Shematski prikaz dijagrama P- i S-impedancija s definiranim litologijama i zasićenjima. Krivulje raspodjele vrijednosti P- i S-impedancija za stijene različitog litološkog sastava i zasićenja se preklapaju, a rotacijom dijagrama za koficijent c dobiju se vrijednosti Poissonove impedancije čije vrijednosti se ne preklapaju za različite litologije i zasićenja (prema Quakenbush et al., 2006)	115
Slika 10-12 Određivanje koeficijenta rotacije (c) pomoću linearne korelacije između P-impedancije i S-impedancije	116
Slika 10-13 Definiranje koeficijenta rotacije c za impedancije LI i FI prema TCCA metodi. Koeficijent rotacije za litološku impedanciju (a) iznosi 2,78 (korelacija 0,65), a za impedanciju fluida (b) 1,75 (korelacija -0,82) (Sharma i Chopra, 2013).	117
Slika 10-14 Profil 1-1' s rezultatima <i>post-stack</i> inverzije: (a) P-impedancija i (b) S-impedancija	119
Slika 10-15 Rezultati <i>pre-stack</i> inverzije duž seizmičkog profila 1-1': (a) P-impedancija, (b) S-impedancija i (c) omjer V_p/V_s	121
Slika 10-16 Profil 1-1' s rezultatima P50 stohastičke inverzije: (a) P-impedancija, (b) S-impedancija i (c) omjer V_p/V_s	121
Slika 10-17 Rezultati <i>post-stack</i> inverzije duž profila 3-3' na polju Letičani: (a) P-impedancija i (b) S-impedancija	124
Slika 10-18 Rezultati <i>pre-stack</i> inverzije duž profila 3-3' na polju Letičani: (a) P-impedancija, (b) S-impedancija i (c) omjer V_p/V_s polja Letičani.....	124
Slika 10-19 Rezultati stohastičke inverzije duž profila 3-3' na polju Letičani: (a) P-impedancija, (b) S-impedancija i (c) omjer V_p/V_s polja Letičani.....	125

Slika 10-20 Usporedba profila stohastičke inverzije različitih rezolucija s petrofizikalnom interpretacijom bušotine B-9.....	126
Slika 10-21 Bušotinski profil s prikaznim krivuljama impedancija, Poissonovih impedancija s različitim vrijednostima koeficijenta c , mjerenja prirodne radioaktivnosti, zasićenja vodom i poroznosti bušotine A-1Z.....	128
Slika 10-22 Definiranje koeficijenta rotacije (c) na temelju TCAA metode prikazana u obliku matrica korelacija: (a) korelacija Poissonove impedancije s prirodnom radioaktivnosti, (b) korelacija Poissonove impedancije s poroznošću i zasićenjem vode.....	129
Slika 10-23 Rezultati Poissonove impedancije inverzije duž profila 3-3' na polju Letičani: (a) litološka impedancija i (b) impedancija fluida	130
Slika 10-24 Atributne karte rezultata Poissonove impedancije polja Letičani: (a) litološka impedancija i (b) impedancija fluida prikazane za dvije vertikalne zone po 10 ms (A i B).....	130
Slika 11-1 Seizmički model Grubišnog Polja konstruiran na temelju seizmičke interpretacije. Svaki sloj modela definiran je elastičnim parametrima dobiven laboratorijskim mjerenjima i na temelju rezultata seizmičke inverzije.	132
Slika 11-2 Analiza amplituda snimljenih i modeliranih seizmičkih tragova, za četiri različite dubine kontakta plin-voda na Grubišnom Polju.....	133
Slika 11-3 Dijagram odnosa brzina V_p i P-impedancija I_p seizmičkog modela za dubinu kontakta plin-voda od -752 m i bušotinskih podataka u bušotinama A-1Z i A-2Z.	133
Slika 11-4 Shema organizacije neuronske mreže (prema Malvić i Cvetković, 2009)	134
Slika 11-5 Modelirane ukupne poroznosti polja Grubišno Polje pomoću neuronske mreže (DFNN) (crvena linija) uspoređene s krivuljama poroznosti dobivenim u pseudo-bušotinama (crna linija).....	135
Slika 11-6 Karta poroznosti po krovini vapnenaca Grubišnog Polja	136
Slika 11-7 Modelirane ukupne poroznosti polja Letičani pomoću neuronske mreže (DFNN) (crvena linija) uspoređene s krivuljama poroznosti bušotina B-5, B-7 i B-9.	137
Slika 11-8 Karta poroznosti po krovini ležišta Koprivničkih pješčenjaka polja Letičani.	138
Slika 11-9 Raspodjela poroznosti duž profila 3-3' koji se proteže zapadnim dijelom polja Letičani.....	138
Slika 12-1 Tijek rada metodološkog pristupa seizmičke interpretacije ležišta ugljikovodika	141

Slika 13-1 Usporedba krivulja V_s dobivenih na temelju ultrazvučnog mjerenja i petrofizikalnog modeliranja (V_s -UMB brzina S valova dobivena ultrazvučnim mjerenjima primjenom formule 9-11; V_s -PM brzina S valova dobivena petrofizikalnim modeliranjem).....	143
Slika 13-2 Odnos poroznosti i volumnog modula zasićenih uzoraka dobivenih laboratorijskim mjerenjima i izračunatih pomoću Gassmannove jednadžbe (lijevo) i odnos volumnog modula zasićenih uzoraka dobivenih laboratorijskim mjerenjima i izračunatih pomoću Gassmannove jednadžbe (desno). Ulazni parametri za kalcit: $K = 76.8$ GPa, voda $K = 2.1$ GPa	144
Slika 13-3 Korelacija poroznosti i disperzije volumnog modula izračunatog Gassmannovom jednadžbom (lijevo) i dijagram promjene modula smicanja (G_d/G_{sat}) i razlike volumnog modula mjenog i izračunatog Gassmannovom formulom ($K_{sat} - K_{sat(Gassmann)}$).....	145

Popis tablica

Tablica 4-1 Parametri snimanja 3D seizmičkih podataka Grubišno Polje i Letičani.....	23
Tablica 4-2 Dostupni karotažni podaci po bušotinama	27
Tablica 6-1 Korelacija elastičnih modula u izotropnom mediju (Sheriff, 2002).....	48
Tablica 6-2. Koeficijenti Greenberg-Castagna korelacije za stijene različitog litološkog sastava	53
Tablica 9-1 Učinci zasićenja vodom na V_p , V_s i V_p/V_s u karbonatima (prema Baechle et al., 2009).....	76
Tablica 9-2 Rezultati mjerenja poroznosti i propusnosti odabranih uzoraka	81
Tablica 9-3 Vrijednosti volumetrijskih parametara uzoraka	85
Tablica 9-4 Rezultati laboratorijskih mjerenja na vapnencima u suhom stanju.....	88
Tablica 9-5 Rezultati laboratorijskih mjerenja na vapnencima u zasićenom stanju.....	90

Popis priloga

- Prilog 1. Karta rezultata P-impedancija seizmičkih inverzija krovine vapnenaca Grubišnog Polja: (a) *post-stack*, (b) *pre-stack* i (c) stohastička inverzija P50
- Prilog 2. Karte rezultata stohastičke seizmičke inverzije krovine vapnenaca Grubišnog Polja: (a) omjera V_p/V_s i (b) Poissonovog koeficijenta
- Prilog 3. Karta rezultata P-impedancija seizmičkih inverzija Koprivničkih pješčenjaka na polju Letičani: (a) *post-stack*, (b) *pre-stack* i (c) stohastička inverzija P50
- Prilog 4. Karta rezultata stohastičke seizmičke inverzije Koprivničkih pješčenjaka na polju Letičani: (a) omjera V_p/V_s , (b) Poissonovog koeficijenta

Popis fizikalnih oznaka

Oznaka	Jedinica	Naziv
α	-	Koeficijent pora
C	(v/v)	Udio minerala gline
c	-	Koeficijent rotacije Poissonove impedancije
E	-	Youngov modul
Φ	(v/v; %)	Poroznost
$I_P; I_S$	(m/s)(g/cm ³)	Impedancija P- i S-vala
K	Pa	Volumni modul
k_L	mD	Propusnost
$K_P; K_S$		Korekcijski faktor vremena prvog nailaska P- i S-vala
L	m	Duljina uzorka
λ	-	Lame-ova konstanta
M	Pa	Modul P-vala
μ	Pa	Modul smicanja
ν	-	Poissonov koeficijent
P^{mi}, Q^{mi}	-	Koeficijenti oblika pora ili pukotina Kuster-Toksöz metode
$R(\theta)$	-	Koeficijent refleksije u ovisnosti kuta upada θ seizmičkih valova
ρ	kg/m ³	Gustoća
σ_e	Pa	Efektivno naprezanje
$S_w; S_g; S_o$	(v/v; %)	Volumni udio pojedinačnih komponenti fluida (w – slojna voda, g – plin, o – nafta)
$T_P; T_S$	s	Vrijeme prvog nailaska P- i S-vala
V_P	m/s	Brzina širenja P-vala
V_S	m/s	Brzina širenja S-vala
V_{sh}	(v/v)	Volumni udio šejla
χ	(v/v)	Volumna koncentracija pora ili pukotina
Z	(m/s)(g/cm ³)	Impedancija

Popis kratica

AC	Akustična karotaža
CAL	Krivulja promjera bušotine
CN	Neutronska karotaža
DEN	Karotaža gustoće
GR	Karotaža prirodne radioaktivnosti
PBS	Panonski bazenski sustav
R16	Karotaža otpornosti raspona 16"
R64	Karotaža otpornosti raspona 64"
RD	Karotaža otpornosti duboki zahvat
RLML	Karotaža otpornosti - lateralni mikrolog
RNML	Karotaža otpornosti - normalni mikrolog

1 Uvod

Istraživano područje nalazi se u jugozapadnom dijelu Panonskog bazenskog sustava (PBS), točnije u Bjelovarskoj depresiji čiji geološki razvoj je vezan uz složenu geološku povijest jugozapadnog dijela Panonskog bazenskog sustava.

Metodologija interpretacije seizmičkih podataka ovisi o primjeni samog istraživanja, tj. radi li se o regionalnim istraživanjima ili analizi eksploatacijskog polja. U nekim slučajevima dovoljna je strukturno-tektonska analiza interpretacijom seizmičkih amplituda, no ponekad potrebno je provesti detaljno istraživanje radi identifikacije seizmičkog odraza. Na taj način utvrditi ćemo da li je seizmička amplituda odraz promjene litološkog sastava ili zasićenja. Istraživačkim radom u okviru doktorske disertacije prikazan je metodološki pristup karakterizaciji ležišta ugljikovodika na temelju metoda obrade i interpretacije geofizičkih podataka. Karakterizacija ležišta ugljikovodika odnosi se na kvantitativne analize seizmičkih, bušotinskih i proizvodnih podataka koje doprinose boljem razumijevanju prostorne raspodjele značajki ležišta kao što su poroznost, litološki sastav i strukturne značajke.

Cilj istraživanja je analizom ulaznih petrofizikalnih podataka, detaljnom interpretacijom 3D seizmičkih podataka te kompleksnom analizom seizmičkih atributa, prvenstveno seizmičkom inverzijom brzina P- i S-valova, konstruirati model na primjeru ležišta vapnenaca u Grubišnom Polju i pješčenjaka na polju Letičani. Povezivanjem postojećih podataka i podataka dobivenih novim analizama akustičnih impedancija i elastičnih parametara ležišta razvijen je metodološki postupak izrade detaljnih geofizičkih modela naftnih ili plinskih ležišta. Istraživanje se temelji na interpretaciji seizmičkih podataka, petrofizikalnim analizama bušotinskih krivulja i laboratorijskom mjerenju brzina ultrazvučnih valova na jezgrama vapnenca.

Strukturno-tektonski odnosi šireg područja istraživanja definirani su interpretacijom seizmičkih podataka i povezivanjem s bušotinskim podacima. Analizom osnovnih seizmičkih atributa analizirano je prostorno rasprostiranje osnovnih fizikalnih svojstava ležišnih stijena.

Geofizičke analize ležišta ugljikovodika temelje se na seizmičkim podacima, tj. umjetno izazvanim valovima koji se rasprostiru kroz stijene i vraćaju na površinu gdje se njihov nailazak detektira geofonima. U stijenama određenog litološkog sastava moguć je određeni raspon brzina rasprostiranja valova, stoga seizmički odziv stijena ovisi o odnosu kompresijskih i smičnih brzina seizmičkog vala. Ti odnosi ovise o litološkom sastavu, poroznosti, obliku i

zasićenju pora te o tlaku. Sva ova svojstva utječu na širenje seizmičkih valova. Utvrđivanje zasićenja u stijenama zahtijeva znanje o promjenama elastičnih svojstava stijena, njihovom mineralnom sastavu i pornim fluidima, kao i modelu interakcije među njima.

Modeliranje fizikalnih parametara se posljednje desetljeće nametnulo kao novi pristup u kvantitativnoj seizmičkoj karakterizaciji ležišta. Ima važnu ulogu u povezivanju elastičnih parametara dobivenih seizmičkom inverzijom s ležišnim svojstvima kao što su litološki sastav, kompakcija, zasićenje fluidima i poroznost. U nedostatku snimljenih brzina smičnih valova (V_s) u ovom radu prikazan je postupak njihovog određivanja prema modelima Kuster-Toksöz i Xu-Payne. Predviđanje smičnih brzina od temeljnog je značaja za detaljnu seizmičku karakterizaciju ležišta. Stoga je predviđanje brzina V_s u bušotinama koje ih nemaju snimljene velik izazov i zahtijeva dodatan angažman da se omogući pouzdan ulazni podatak za seizmičko modeliranje i seizmičku inverziju.

S ciljem definiranja elastičnih svojstava vapnenaca napravljena su laboratorijska mjerenja brzina ultrazvučnih valova pod različitim stanjima zasićenja. Ona su po prvi put napravljena za ležište ugljikovodika u jugozapadnom dijelu Panonskog bazenskog sustava. Na temelju rezultata u laboratorijskim uvjetima definiran je empirijski odnos brzina smičnih valova (V_s) i brzina kompresijskih valova (V_p). Rezultati omjera V_p/V_s brzina uspoređeni su s dostupnim rezultatima iz različitih dijelova svijeta.

Seizmičkom inverzijom moguće je rekonstruirati geološku građu na temelju seizmičkih mjerenja. Inverzijom se nastoje izdvojiti fizikalni parametri koji imaju i geološko značenje. Time seizmička inverzija predstavlja kvantitativno tumačenje seizmičkih podataka. Postoje dvije vrste inverzije, deterministička i stohastička. Deterministička inverzija temelji se na minimiziranju razlike između modeliranog seizmičkog traga i stvarnog seizmičkog traga. Deterministička inverzija se dijeli prema ulaznim seizmičkim podacima na *post-stack* i *pre-stack* inverziju. Stohastička inverzija, zvana i geostatistička inverzija, rezultira višestrukim realizacijama impedancija, tj. daje višestruka rješenja akustičnih impedancija. Ovakva metoda koristi statističke parametre (analiza variograma) i veću rezoluciju modela (1 ms) što omogućuje bolju integraciju seizmičkih podataka u geološki model.

U radu su prikazani modeli *pre-stack*, *post-stack* i stohastičke seizmičke inverzije te Poissonove impedancije. Temeljem rezultata seizmičke inverzije definirana je raspodjela elastičnih parametara pa time i ležišna svojstva stijenskih masa na istraživanom području.

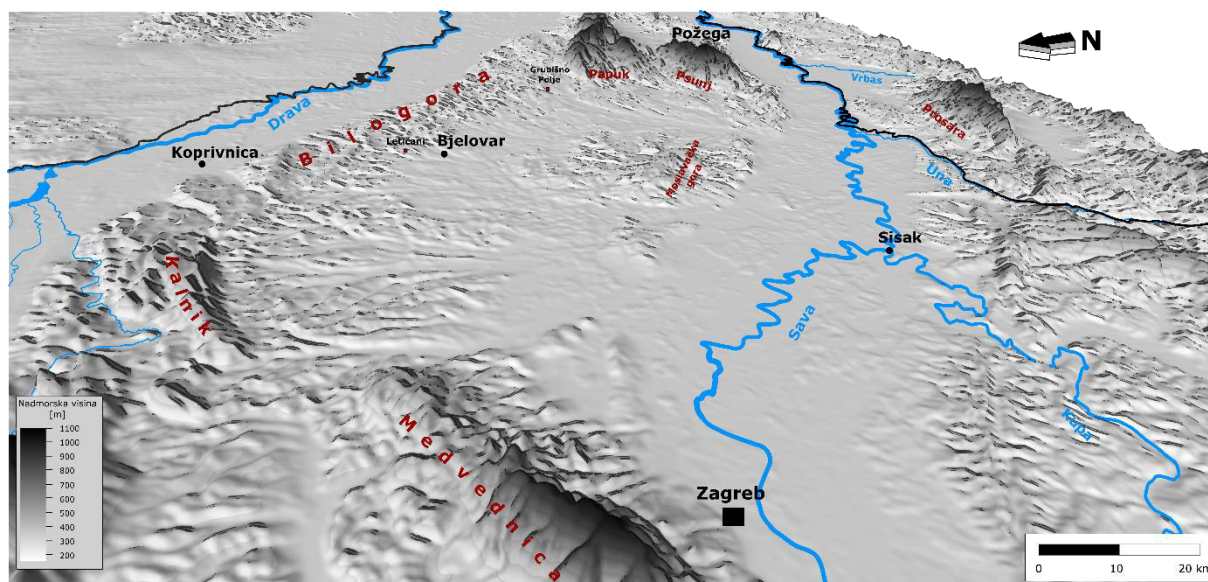
Karakterizacija ležišta ugljikovodika podrazumijeva prostorno predviđanje kvalitete ležišta i zasićenja ležišta ugljikovodicima. Petrofizikalne analize zbog nedostatka podataka nisu mogle točno definirati kontakt voda-plin glavne geološke strukture Grubišnog Polja. U radu je predstavljen metodološki pristup određivanja dubine slojne vode na temelju seizmičkog modeliranja.

Temeljni prikaz geoloških studija su karte poroznosti koje uz elastična svojstva ležišnih stijena bitno utječu na geološko-ekonomsku procjenu ležišta ugljikovodika. Točnost procjene elastičnih svojstava stijena pa tako i poroznosti ovisi o broju raspoloživih podataka, ponajviše o broju bušotina. Raspodjela poroznosti temeljena je na analizi karotažnih krivulja i seizmičkih podataka definiranjem korelacije između petrofizikalnih i seizmičkih podataka na lokacijama bušotina (Hampson et al., 2001). Neuronske mreže koristile su se za definiranje korelacije između ulaznih podataka. Također, predstavljen je tijek rada temeljen na provedenim istraživanjima u ovom radu. Prikazane su metode kojima je glavni cilj opisati geološke i fizikalne parametre ležišta.

Znanstveni doprinos ovog rada jest definiranje optimalne metodologije seizmičke interpretacije djelomično iscrpljenih naftnih i plinskih polja korištenjem podataka brzina smičnih valova u procesu seizmičke inverzije. Definiranjem elastičnih svojstava ležišta, Poissonovog koeficijenta te modula smicanja i volumnog modula prvi put se definiraju parametri kvalitete ležišta, što se u dosada primjenjivanim metodama nije moglo koristiti u području istraživanja. Rezultati ultrazvučnih laboratorijskih mjerenja na uzorcima vapnenca pod različitim efektivnim naprežanjima i stanjima zasićenja omogućili su analizu elastičnih svojstava vapnenaca i definiranje pornog prostora. Najveći znanstveni doprinos predstavljaju definirani empirijski odnosi brzina smičnih valova (V_s) i brzina kompresijskih valova (V_p) te empirijski odnos poroznosti i brzina koji ujedno predstavljaju prvi empirijski odnos za vapnenca u jugozapadnom dijelu Panonskog bazenskog sustava.

2 Strukturno-tektonski odnosi istraživanog područja

Istraživano područje se nalazi u jugozapadnom dijelu PBS-a, točnije u Bjelovarskoj depresiji. Geološki razvoj je vezan uz složenu geološku povijest jugozapadnog dijela Panonskog bazena, tj. Sjevernohrvatskog bazena (Pavelić, 2001) tijekom neogena i kvartara.



Slika 2-1 Reljefni prikaz istraživanog područja (prema EuroDEM: <https://www.mapsforeurope.org/>)

2.1 Strukturno-tektonski odnosi jugozapadnog dijela PBS-a

Panonski bazenski sustav (PBS) se sastoji od 10-tak bazena/depresija nastalih tijekom neogena u zaleđu Alpsko-karpatskog i Dinarskog planinskog sustava nasuprotnih vergencija (Royden et al., 1983b). PBS je nastao u ranom miocenu kontinentalnom kolizijom i subdukcijom Europske ploče i Afričke ploče (Royden et al., 1983a, Schmid et al., 2008). Ovi procesi utjecali su na razmještaj tektonskih jedinica koje se danas nalaze u podlozi PBS-a. U sjeverozapadnom dijelu PBS-a nalazi se ALCAPA megajedinica (Alpe, Karpati, Panonski bazen; Slika 2-2), derivirana s Jadranske mikroploče i kasnije suturirana s Europskom pločom uslijed kredno-eocenskih tektonskih pokreta (Schmid et al., 2004). Središnji prostor PBS-a zauzimaju megajedinice Tisza i Dacia (Slika 2-2) koje su se tijekom jure odvojile od Europske ploče (Schmid et al., 2008). Tisza megajedinica je suturirana s tektonskom jedinicom Dacia do starije krede zatvaranjem prijašnjih oceanskih područja (Schmid et al., 2008). U nastanku PBS-a važnu ulogu su imala dva geodinamska procesa:

- subdukcija Europske ploče pod Unutrašnje Karpate
- kolizija Jadranske mikroploče i Europske ploče u području Istočnih Alpa

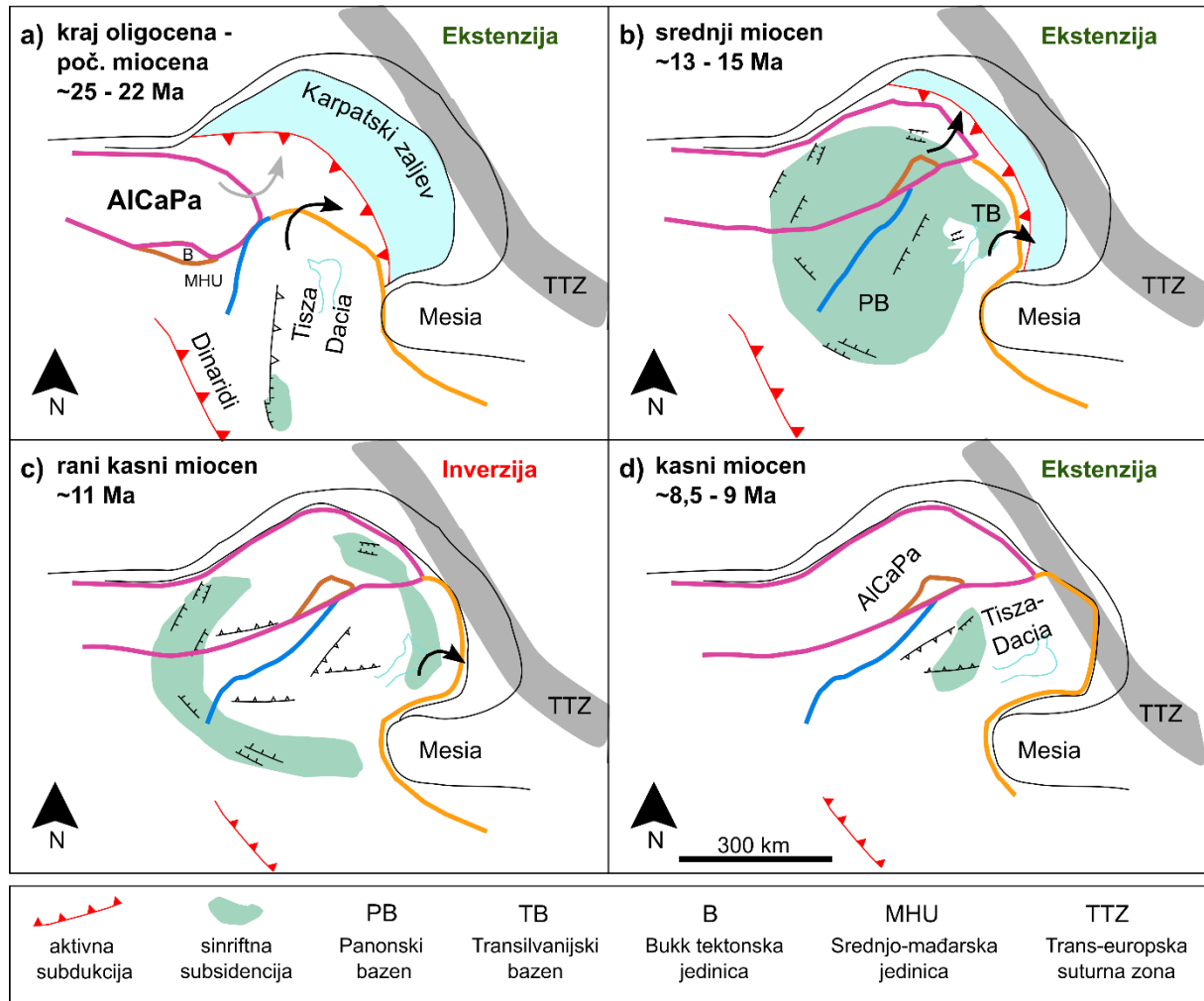
Subdukcija Europske ploče pod Unutrašnje Karpate uz istovremeno povlačenje Europske ploče prema istoku („slab retreat“) omogućuje ekstenziju u području Panonskog bazena (Royden et al., 1983a; Royden i Horváth, 1988; Royden i Burchfiel, 1989) (Slika 2-2b).

Kolizija Jadranske mikroploče i Europske ploče u području Istočnih Alpa uzrokovala je krajem oligocena lateralnu ekstruziju tektonsko-strukturne megajedinice ALCAPA-e (Alpe, Karpati, Panonski bazen) prema području Istočnih Karpata, koja je trajala tijekom miocena (Slika 2-2a) (Royden et al., 1983a; Ratschbacher et al., 1991; Tari et al., 1992; Horváth, 1993). Kolizija je dovela do istovremenog istiskivanja tektonsko-strukturnih jedinica ALCAPA-e i Tisza-e, koja se odvojila od Europske ploče tijekom srednje jure (Schmid et al., 2008) prema istoku uz rotaciju u smjeru kazaljke na satu (Fodor et al., 2005; Bada et al., 2007). Tisza predstavlja kontinentalni fragment koji je odvojen od Europske ploče tijekom srednje jure otvaranjem istočnog dijela Alpskog Tethysa – Piemont-Ligurijskog oceana (Schmid et al., 2008). Kretanje ova dva bloka je bilo izraženo duž Središnje mađarske rasjedne zone (Slika 2-2c i d) (Royden i Horváth, 1988; Ratschbacher et al., 1991; Tari et al., 1999). Ovakvi tektonski pokreti od ranog do srednjeg miocena doveli su do snažnih termalnih poremećaja u gornjem plaštu i posljedično normalnog rasjedanja, stanjivanja i ekstenzije kore (Tari et al., 1992; Tari i Pamić, 1998; Ustaszewski et al., 2010), odnosno do kontinentalnog riftnog sustava na području PBS-a (Royden, 1993).

Djelovanjem ekstenzijske tektonike i otvaranjem niza listričkih rasjeda, u jugozapadnom dijelu PBS-a, formirana su četiri izdužena bazena koji su činili glavne depocentre, a to su Dravska depresija, Bjelovarska depresija koja je zajedno s Požeškom kotlinom činila jedinstvenu polugrabu, Savska depresija i Karlovačka depresija (Pavelić, 2001).

Prva kompresijska faza koja je uočena na širem području PBS-a utvrđena je krajem sarmata (12-11 Ma), a karakterizirana je reversnim rasjedanjem i inverzijom prethodno stvorenih ekstenzijskih i smičnih rasjeda (Royden i Horváth, 1988; Horváth, 1995; Tomljenović i Csontos, 2001; Csontos et al., 2002; Bada et al., 2007; Ustaszewski et al., 2014). Kompresija je karakterizirana smjerom naprežanja SSI-ZSZ, što je dovelo do stvaranja reversnih rasjeda pružanja ISI, duž kojih su formirane inverzne strukture (Tomljenović i Csontos, 2001). Nakon kasnosarmatske inverzije, za cijeli prostor PBS-a karakteristična je regionalna termalna subsidencija litosfere (Royden et al., 1983b). U JZ dijelu Panonskog bazena razvoj ove

tektonske faze je sličan onome u ostalim dijelovima Panonskog bazena, a karakterizira ga taloženje debelog slijeda post-riftnih naslaga kao posljedica izostatske kompenzacije stanjenja kore i termalne kontrakcije litosfere (Royden i Horváth, 1988; Pavelić, 2001; Tomljenović i Csontos, 2001).



Slika 2-2 Pojednostavljena skica sinriftnog razvoja Panonskog bazena (prema Balázs et al., 2016)

Tektonska inverzija u pliocenu i kvartaru nastala je zbog otkidanja dijelova subducirane Europske ploče u istočnim Karpatima i postupnog završetka subdukcije što je dovelo do promjene režima naprezanja iz ekstenzijskog u kompresijski (Horváth et al., 2006, Horváth et al. 2018.). Ova tektonska faza nije se jedinstveno razvila na cijelom prostoru Panonskog bazena. Počela je na zapadnim dijelovima Panonskog bazena, a u središnjem dijelu bazena početak inverzije se procjenjuje između 4 i 7 Ma (Fodor et al., 2005; Horváth et al., 2006). Pliocensko-

kvartarna inverzija je karakterizirana inverzijom prethodno aktiviranih normalnih rasjeda uz stvaranje niza reversnih rasjeda s lijevim ili desnim pomakom i formiranje kontrakcijskih struktura (Balázs et al., 2016).

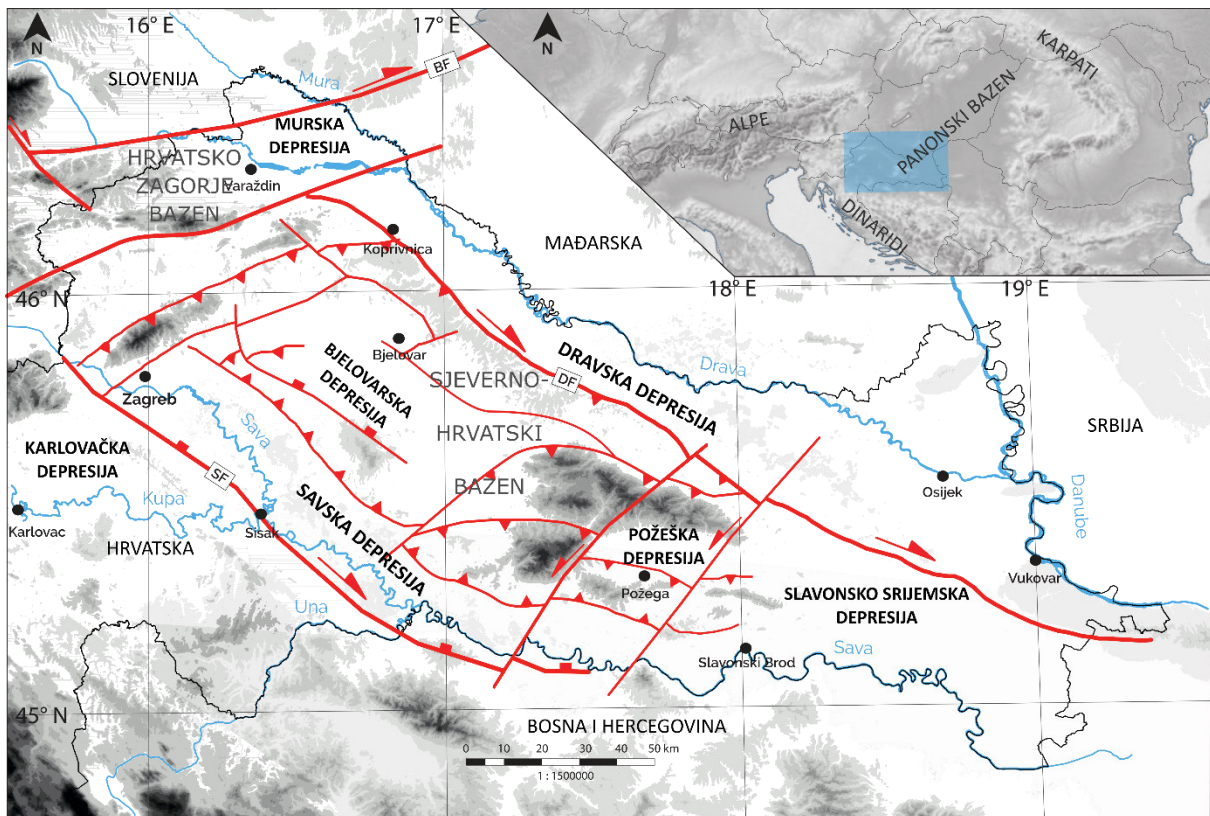
U naslovu ovog doktorskog rada područjem istraživanja definira se Bjelovarska depresija, iako mnogi autori (npr. Malvić, 2003; Vrbanac et al., 2010; Matoš, 2014 i dr.) definiraju ju kao subdepresija i razvoj Bjelovarske depresije (subdepresije) vežu uz razvoj Dravske depresije. Ovim naslovom i radom ne ulazi se u problematiku nastanka riftnih polugraba niti polemizira o točnosti definicije depresije i/ili subdepresije.

2.2 Strukturno-tektonski odnosi Bjelovarske depresije

Bjelovarska depresija predstavlja zasebnu geotektonsku cjelinu odvojenu recentno najmlađim transpresijskim rasjednim sustavom od Dravske depresije, zajedno s pratećim ostalim rasjednim sustavima koji su poprečni ili dijagonalni na Dravski rasjed (Royden i Horváth, 1988; Prelogović et al., 1998). Nastaje u ranom miocenu tijekom ekstenzijske tektonske faze, kada je normalnim listričkim rasjedima morfološki odvojena podinskim krilima od Dravske i Savske depresije te je s Požeškom kotlinom tvorila jedinstvenu cjelinu (Pavelić, 2001; Pavelić i Kovačić, 2018).

Prema Prelogoviću et al. (1998) tijekom plio-kvartarne inverzije pa sve do danas najvažniji transpresijski rasjedi s desnim pomakom u sveukupnom tektonskom razvoju tijekom kvartara imaju Periadriatski lineament, Dravski rasjed i rubni Savski rasjed. Maksimalni pomaci duž Dravskog rasjeda su bili 20 km na području planine Pohorje i 10 km uz Bilogoru (Prelogović et al., 1998).

Prema morfološkim analizama utjecaja recentnih tektonskih deformacija na reljef Matoš et al. (2016) zaključuju da su tijekom kvartara vertikalni pomaci izdizanja Bilogore uz Dravski rasjed različiti. Najveća, ali i najmlađa tektonska aktivnost događala se u SZ i središnjem dijelu Dravske depresije.



LEGENDA

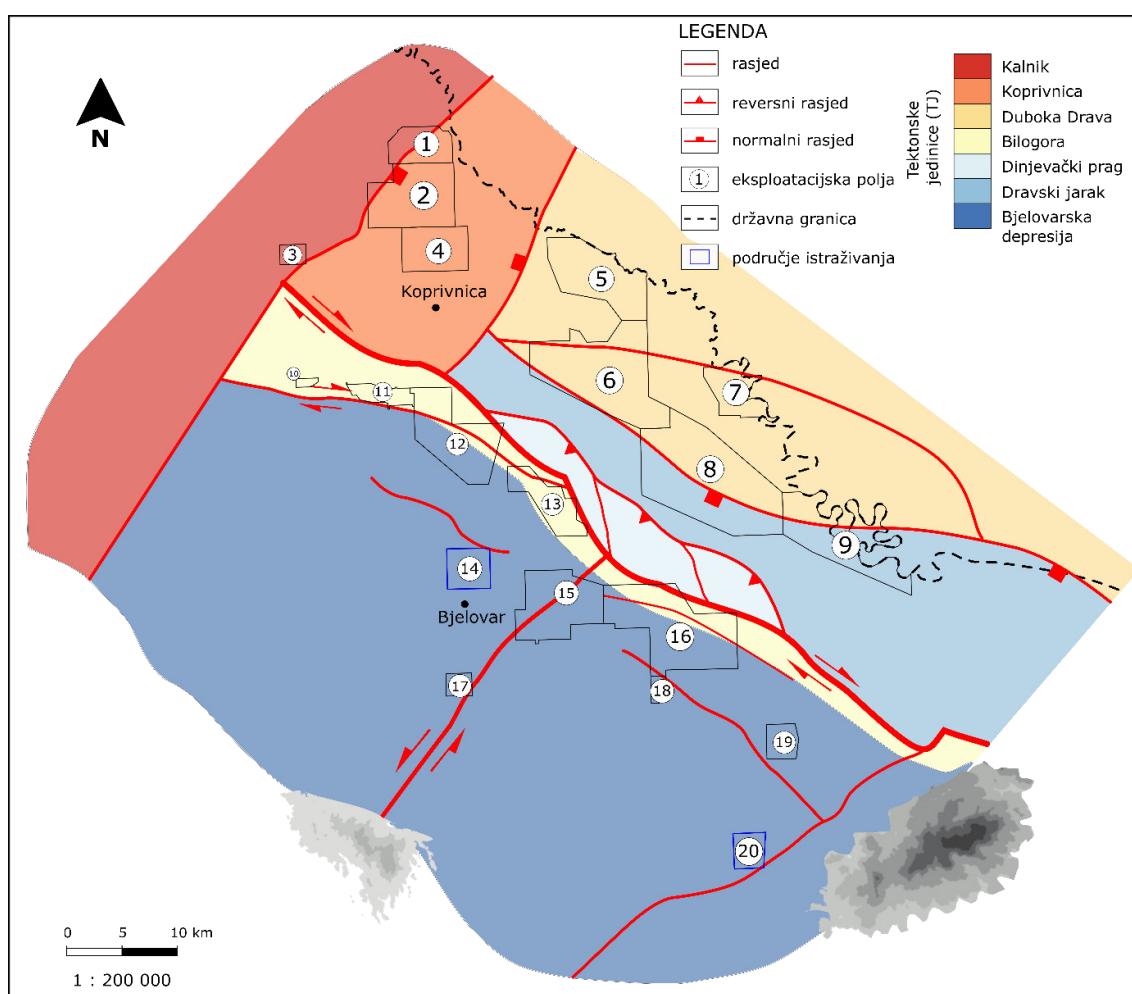
- | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------|--|-----------------|--|---------------|--|----------------|--|----------------|
| | Rasjed | | Normalni rasjed | | Savski rasjed | | Dravski rasjed | | Balaton rasjed |
| | Rasjed s horizontalnim pomakom | | Reversni rasjed | | | | | | |

Slika 2-3 Tektonska karta Sjevernohrvatskog bazena. Prilagođeno prema Schmid et al. (2004), Ustaszewski et al. (2014) i Pavelić i Kovačić (2018).

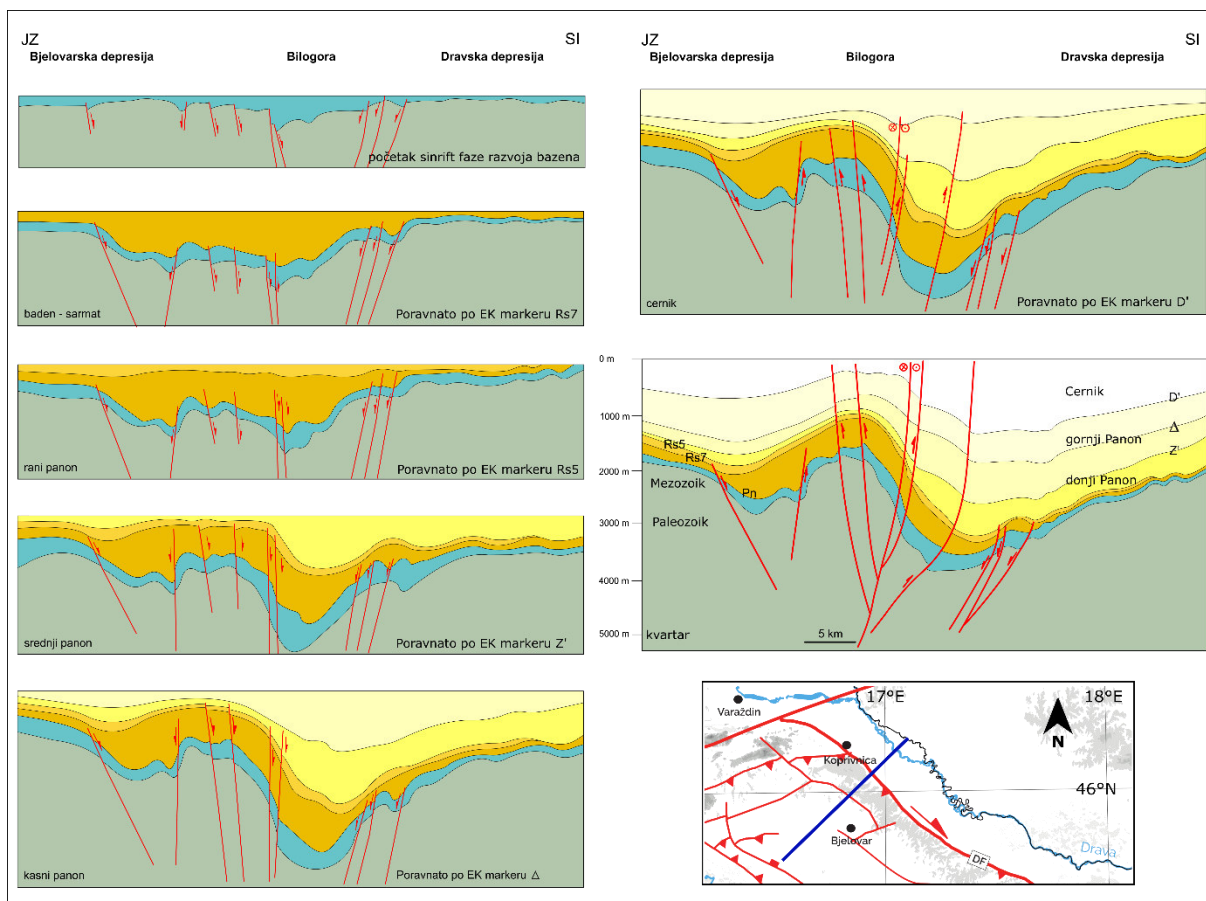
Tijekom pliocena se na području Bjelovarske depresije aktiviraju novi i reaktiviraju stari rasjedni sustavi, što za posljedicu ima izdizanje Bilogore te djelomično Papuka i Psunja. Uslijed pritiska Jadranske mikroploče tijekom kvartara, tektonska aktivnost se nastavlja uz rotaciju suprotno od kazaljke na satu (Horvath i Cloetingh, 1996; Fodor et al., 2005; Balázs et al., 2016). Bjelovarska depresija za razliku od ostalog dijela Dravske depresije i Savske depresije nije bila na putu glavnog donosa materijala u postekstenzijskoj fazi, stoga je prinos materijala bio znatno manji. Cijeli prostor Bjelovarske depresije je i manje zalegnut od ostaloga dijela Dravske depresije pa su sukladno tome i debljine neogensko-kvartarnih naslaga znatno manje nego u Dravskoj depresiji (Matoš, 2014).

Na području Bjelovarske depresije izdvojene su strukture kao što su Bilogora planina, antiklinorij prvog reda (horstovi) predstavljeni lokalnim antiklinorijima drugog reda na sjeveru

(Jagnjedovac, Lepavina, Mosti, Hampovica, Čepelovac, Sedlarica) te zone s antiklinorijima i antiklinalama drugog reda s manjim intezitetom izdizanja na južnim dijelovima masiva (Topolovac, Gakovo, Šandrovac, Pepelana, Grubišno Polje) u kojima su smještene glavne depresije i depocentri (Slika 2-4 i Slika 2-5) (Matoš, 2014). Stoga je razvoj Bjelovarske depresije usko vezan uz najmlađu pliokvartarnu tektonsku aktivnost kojom je odvojena od Dravske depresije Bilogorom, od Savske depresije Moslavačkom gorom (Prelogović et al., 1998; Saftić et al., 2003; Matoš, 2014) i Slavanskim planinama od Požeške kotline (Pavelić, 2001; Pavelić i Kovačić, 2018).



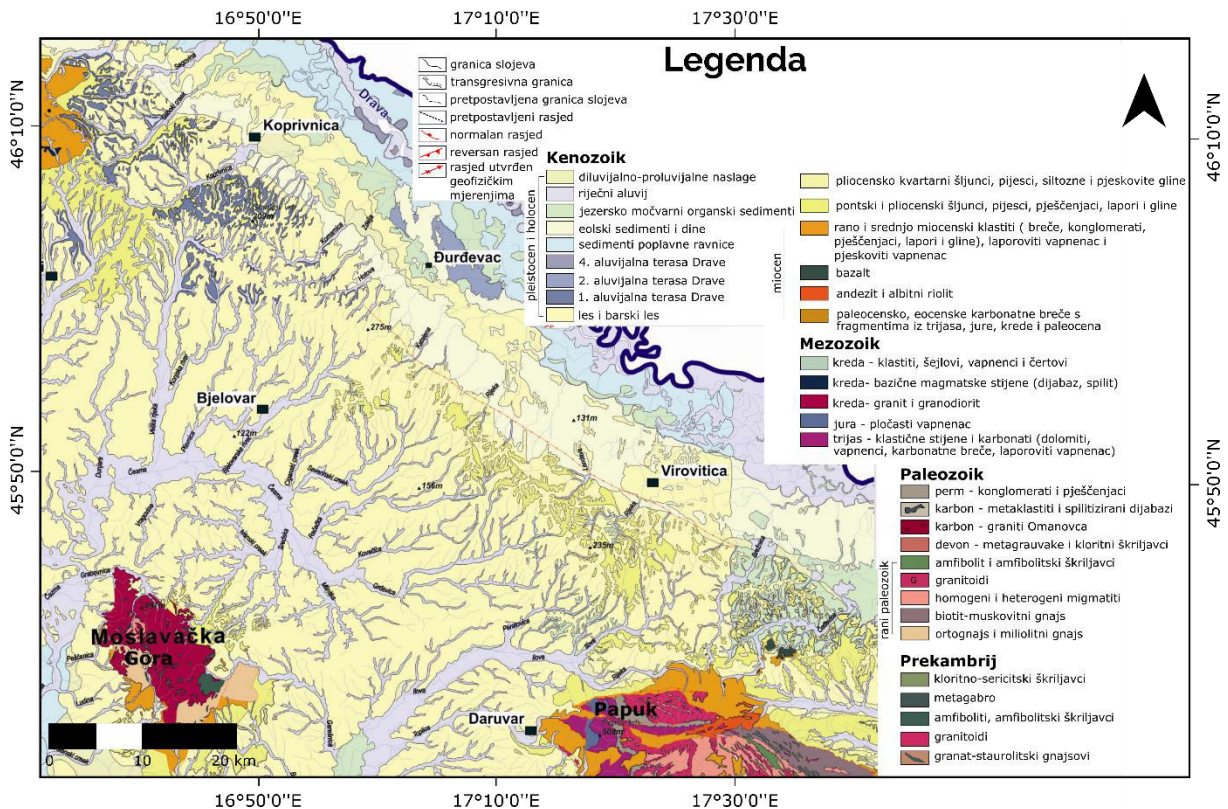
Slika 2-4 Shematski prikaz tektonskih odnosa u Bjelovarskoj depresiji i zapadnom dijelu Dravske depresije. Rasjedni sklop je pojednostavljen na temelju regionalne interpretacije podloge neogena (prema Krpan et al., 2018). Legenda eksploatacijskih polja: 1. Legrad, 2. Kutnjak - Đelekovac, 3. Cvetkovec, 4. Petranec, 5. Gola, 6. Molve, 7. Ferdinandovac, 8. Stari Gradac, 10. Lepavina, 11. Jagnjedovac, 12. Mosti, 13. Čepelovac - Hampovica, 14. Letičani, 15. Šandrovac, 16. Bilogora, 17. Galovac - Pavljani, 18. Bačkovica, 19. Gakovo, 20. Grubišno Polje



Slika 2-5 Palinspastička rekonstrukcija na profilu poprečnom na pružanje Dravske i Bjelovarske depresije (prema Krpan et al., 2018)

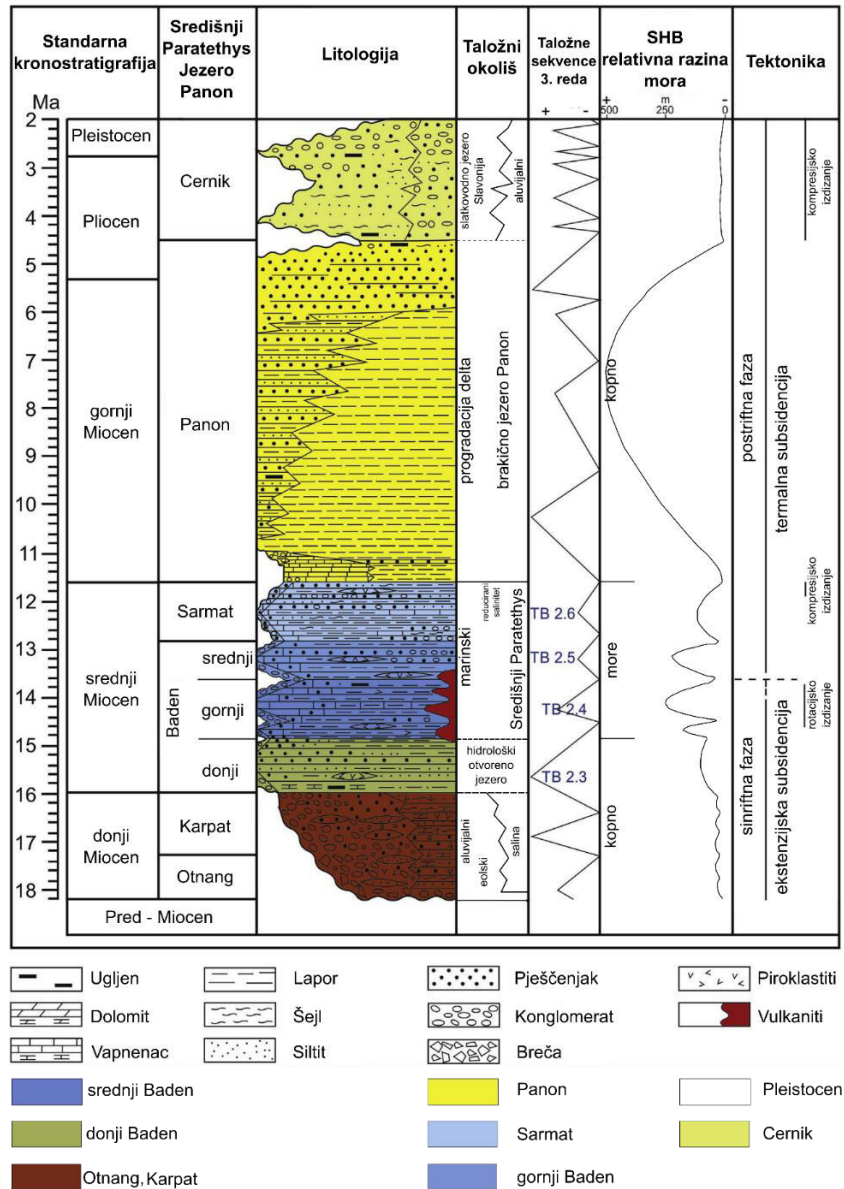
3 Stratigrafski razvoj istraživanog prostora

Detaljan pregled površinske geološke građe šireg područja istraživanja vidljiv je na listovima Osnovnih geoloških karata u mjerilu 1:100 000 (Slika 3-1). Područje Bilogore i dolina rijeke Drave je površinski izgrađena od kvartarnih sedimenata, dok se na obroncima Moslavačke Gore, Papuka i Krndije nalaze izdanci podloge neogenskih sedimenata, tj. magmatiti i metamorfiti paleozojske starosti i sedimentne stijene mezozoika.



Slika 3-1 Geološka karta šireg područja istraživanja [preuzeta iz Matoš (2014), str. 28.; pojednostavljena prema OGK Jugoslavije (1:100 000), listovi: Koprivnica (Šimunić et al., 1994), Đurđevac (Hećimović, 1986), Bjelovar (Korolija i Crnko, 1985), Virovitica (Galović i Marković, 1979), Podravska Slatina (Maković, 1985), Orahovica (Jamičić i Brkić, 1987) i Sisak (Pikija, 1987)]

Tektonski pokreti Afričke ploče koji su započeli u eocenu uzrokovali su potiskivanje Jadranske mikroploče pod panonski segment Europske ploče (Šumanovac i Dudjak, 2016; Šumanovac et al., 2017). Na području hrvatskog dijela Panonskog bazena razvijena su dva odvojena sedimentacijska bazena tijekom ranog miocena: bazen Hrvatskog zagorja (BHZ) i Sjevernohrvatski bazen (SHB) (Pavelić, 2001). BHZ se nalazio na prostoru SZ dijela Hrvatske i manjeg dijela Slovenije, a SHB se nalazio na području zapadne i središnje Hrvatske.



Slika 3-2 Sedimentološki i stratigrafski stup Sjevernohrvatskog bazena (prema Pavelić et al., 2016).

Prema Saftiću et al. (2003) taloženje neogenskih sedimenata se može podijeliti u tri megaciklusa odijeljena diskontinuitetima. Prvi megaciklus karakteriziran je ekstenzijskom tektonikom i taloženjem krupnozrnatih breča uz normalne rasjede, a fino-zrnatih klastičnih i karbonatnih sedimenata i piroklastita u dubljim dijelovima taložnih bazena. Drugi megaciklus vezan je za taloženje velikog slijeda sedimenata za vrijeme termalne subsidencije litosfere, a treći megaciklus karakterističan je za sedimente taložene tijekom tektonske inverzije.

Bazen Hrvatskog zagorja je pripadao središnjem Paratethysu gdje se tijekom egera (25-21 Ma) taložila karakteristična izmjena brakičnih i marinskih okoliša, a nastavlja se dijelom i kroz egenburg (21-18 Ma; Pavelić i Kovačić, 2018). U otnangu su karakteristični plitkovodni

taložni okoliši uz nisku energiju vode. U SHB sedimentacija je počela kasnije u odnosu na BHZ, u otnangu (Čorić et al., 2009) s karakterističnim riječnim taložnim okolišem i jezerskom sedimentacijom u slanim jezerima lokalnog donosa materijala.

U skladu s regionalnim tektonskim procesima razlikuju se dvije faze evolucije bazena s regionalnim transgresivno-regresivnim ciklusima, sinriftna i postriftna faza. Sinriftna faza traje od otnanga do srednjeg badena tijekom ekstenzije kore i tektonskog tonjenja litosfere. Taložni okoliš se postupno mijenja iz kontinentalnog (otnang) u marinski okoliš (srednji baden) (Čorić et al. 2009.). Sedimentacija je pod utjecajem ekstenzijske tektonike, listričkih i normalnih rasjeda, utjecaja vulkanizma i marinskih transgresivno regresivnih ciklusa (baden) (Pavelić, 2001; Kováč et al., 2007). U srednjem badenu BHZ i SHB se povezuju uslijed regionalne marinske transgresije (Pavelić, 2001; Kováč et al., 2007).

Postriftna faza počinje u kasnom badenu (13,8 Ma) uz slabu tektonsku aktivnost, slab vulkanizam, hlađenje litosfere i termalno tonjenje. Sedimentacijski okoliš se mijenja iz marinskog u kopneni, a dvjema kompresijskim fazama dolazi do inverzije bazena i izdizanja strukturnih blokova (Pavelić, 2001; Márton et al., 2002, Saftić, 2003). U sarmatu na prostoru JZ dijela Panonskog bazena dolazi do izolacije i slabljenja veze s otvorenim morem uz relativno minimalnu sedimentaciju i slab donos materijala jer su sedimenti zarobljeni duž ruba bazena (Pavelić, 2001). Većina sarmatskih sedimenata kontinuirano slijede badenske naslage, uglavnom taloženi u arhipelazima reduciranog saliniteta, a predstavljeni su uglavnom kalkarenitima, vapnencima i pretaloženim badenskim naslagama (Pavelić i Kovačić, 2018). U sarmatu dolazi do izolacije Panonskog bazena od otvorenog mora što dovodi do stvaranja brakičnog jezera Panon na koje upućuje razvoj niza endemičnih fosila (Vrsaljko, 1999; Vrsaljko i Sremac, 1999; Vrsaljko et al., 2005).

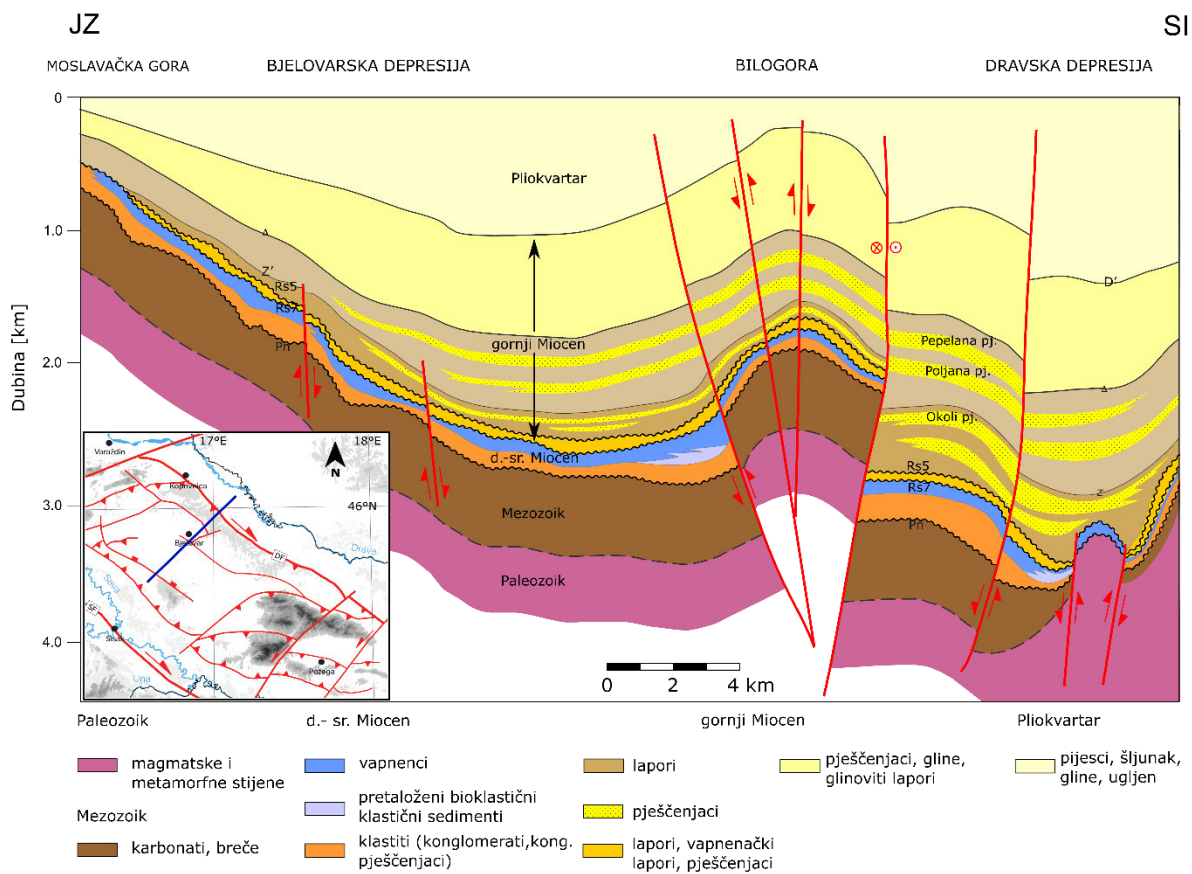
Panonski slijed naslaga predstavljen je ispunom jezera Panon (Sebe et al., 2020) koju karakterizira progradacija. U donjem panonu se talože lapori i vapnenci s međusobnim prijelazima, koji se nazivaju Croatica-naslagama prema fosilu *Radix croatica*. U gornjem panonu se talože lapori Banatica naslaga a prema Mandić et al. (2015) i Abichi i Rhomboidea naslage, a ne u pontu. Prema Mandić et al. (2015) na prostoru JZ dijela Panonskog bazena donji pont nema isti razvoj kao u istočnim dijelovima PBS, stoga dotad donjopontski sedimenti pripadaju panonu.

Prije 4,5 Ma kontinuiranim smanjenjem Panonskog jezera nastaje slatkovodno jezero Slavonsko jezero, čiji sedimenti pripadaju cerniku. Tijekom cernika talože se glinoviti i masivni

lapori s provodnim fosilom *Viviparus* (Mandić et al., 2015). U vrijeme cernika i kvartara uslijed regionalne kompresije aktiviranjem reversnih rasjeda i stvaranjem inverznih struktura (Pavelić, 2001; Tomljenović i Csontos, 2001) dolazi do erozije izdignutih blokova.

Neogenski sedimenti Bjelovarske depresije debljine preko 2500 m i taloženi su u dvije najveće sinklinale Bjelovarske depresije: u sinklinali Rovišće (Vrbanac et al., 2010) ili zapadno-bjelovarskoj sinklinali i sinklinali Velika Ciglena (Malvić, 2003).

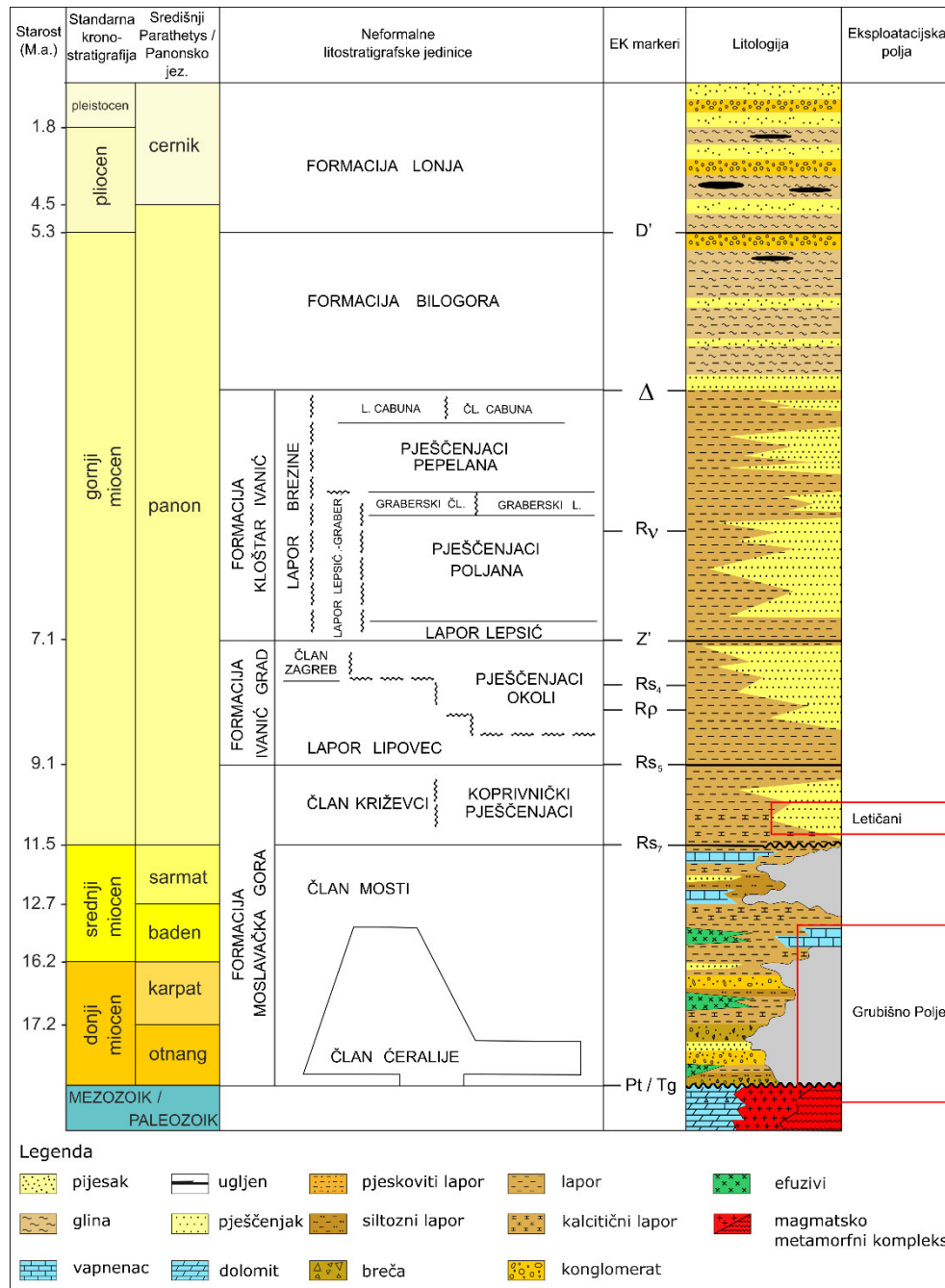
Usporedbom razvoja Bjelovarske depresije i taloženja neogenskih sedimenta s Dravskom i Savskom depresijom (Malvić, 2003; Vrbanac et al., 2010; Matoš, 2014) sedimenti su korelativni, ali s bitno manjim debljinama zbog ograničenog akomodacijskog prostora (Slika 3-3). Tijekom gornjeg panona u Bjelovarskoj depresiji su taloženi uglavnom hemipelagički lapori, a kasnije otvaranjem bazena prema SI talože se pješčenjaci turbiditnih tokova iz smjera SZ (Vrbanac et al., 2010).



Slika 3-3 Geološki profil Bjelovarske depresije (Krpan et al., 2018)

Pregled miocenskih naslaga i građe depresija hrvatskog dijela PBS-a objavljen je u nizu radova, a neki radovi definiraju neformalne litostratigrafske jedinice. Predložene su različite litostratigrafske podjele za zapadni i istočni dio Dravske depresije, a Bjelovarska depresija

litostratigrafski pripada zapadnom dijelu Dravske depresije (Šimon, 1973; Malvić i Cvetković, 2013). Na slici 3-4 prikazan je geološki stup zapadnog dijela Dravske depresije i Bjelovarske depresije s naznačenim ležištima za polja Letičani i Grubišno Polje te neformalnim litostratigrafskim jedinicama.



Slika 3-4 Geološki stup zapadnog dijela Dravske i Bjelovarske depresije s naznačenim ležištima na Letičanima i Grubišmom Polju. Neformalna litostratigrafska podjela definirana prema Malvić i Cvetković, (2013).

Prema podjeli zapadnog dijela Dravske depresije stijene donjeg i srednjeg miocena pripadaju formaciji Moslavačka Gora koja transgresivno naliježe na magmatske i metamorfne

stijene paleozojske starosti ili karbonatne stijene mezozojske starosti. Na formaciju Moslavačka Gora naliježu formacije Ivanić-Grad, Kloštar Ivanić, Bilogora i Lonja.

3.1 Podloga neogena

Podlogu neogenskog taložnog bazena teško je detaljno definirati prema starosti već se generalno dijele prema sastavu stijena, tj. na magmatske i metamorfne stijene i na karbonatne stijene. Magmaatske i metamorfne stijene paleozoika se nazivaju „temeljno gorje“. Temeljno gorje predstavljeno je pretežno granitima i gabrima te gnajsevima, amfibolitima i zelenim škriljavcima, koji su često kataklazirani i hidrotermalno izmijenjeni. Starost ovih stijena je u većini slučajeva pretpostavljena zbog višestrukih orogeneza. Karbonatne stijene koje naliježu na sedimentne stijene mezozojske starosti se nazivaju „podloga tercijara“.

Na području Grubišnog Polja temeljno gorje sastoji se od stijena niskog do srednjeg stupnja metamorfizma. Naslage temeljnog gorja nabušene su u četiri bušotine (A-1, A-2, A-1Z i A-2Z). Debljine nabušenih intervala su 8-136 m. Bušotinom A-2 i A-1Z nabušen je tinjčev škriljavac, a određen je analizom jezgre u A-2 na intervalu 902-903 m i u A-1Z u jezgrovanim intervalima 814-823 m i 950-953 m (Futivić i dr., 2006).

Granit-tinjčevi škriljavci su niskog do srednjeg stupnja metamorfizma, a pretrpjeli su višefazno kataklaziranje i djelomično retrogradnu metamorfozu. Na post-metamorfne deformacije ukazuju višestruka folijacija listićavih minerala, frakturiranje kvarcnih zrna te djelomična milonitizacija matriksa (Vukadinović, 1996; Futivić i dr., 2006). Iz analiza jezgara vidi se petrografska raznolikost stijena temeljnog gorja (Korolija i Crnko, 1985; Jamičić i Brkić, 1987).

Migmatitski gnajsevi se nalaze u jugozapadnom i istočnom dijelu, dok su graniti vjerojatno prisutni u sjevernom dijelu Bjelovarske depresije. Superpozicijom stijena unutar migmatitsko-metamornog kompleksa može se pretpostaviti da su graniti najstariji. EK-marker Tg predstavlja paleoreljef (Futivić et al, 2006).

Na području Letičana podloga tercijara sastoji se od kvarcno-kloritnog škriljavca te od konglomerata sastavljenoga od fragmenata kvarcita i kvarcnih pješčenjaka nabušena bušotinama B-1, B-2, B-3, B-4 i B-5, a ispod kojih je bušotinom B-1 potvrđen granito-gnajs (Dragičević, 1974.). Glavni mineralni sastojci su kvarc, feldspati i tinjci.

3.2 Donji i srednji miocen – formacija Moslavačka gora

Sedimenti donjeg i srednjeg miocena pripadaju Moslavačka gora formaciji koja se može detaljnije podijeliti na član Mosti i superponirani član Križevci koji je približno donjopanonske starosti (Šimon, 1973).

Sedimenti Mosti člana na području Grubišnog Polja transgresivno prekrivaju stijene podloge neogena na izdignutoj metamorfnoj podlozi. Sedimentacija je počela grauvakama i pjeskovitim vapnencima s ostacima grebenskih algi i pelitnih sedimenata. Zatim slijedi taloženje bioklastičnih sedimenata, biokalkrudita i biokalkarenita koji su izgrađeni trošenjem grebena i od skeleta algi te pretaloženi u zagrebenskim područjima niske razine mora.

Sedimenti donjeg miocena na području Letičana transgresivno leže na škriljalcima, a predstavljeni su kalcitičnim laporima u izmjeni sa sitnozrnatom i krupnozrnatom konglomeratičnim pješčenjacima (Mosti član). Trošni efuzivi prošarani kalcitnim žilama debljine 26 m, koji pripadaju članu Čeralije formacije Moslavačka gora (Slika 3-4), nabušeni su samo u bušotini B-5 (INA, 1981).

3.3 Gornji miocen

U sedimentnom slijedu nastavljaju se sitnozrnati kvarc-tinjčasti, ponekad siltozni pješčenjaci, Koprivnički pješčenjaci i bočni ekvivalent član Križevci formacije Moslavačka gora. Zatim slijedi izmjenjena pješčenjaka i lapora, Zagreb član formacije Ivanić-Grad, Lepsički lapor, Poljana pješčenjaci, Graberski lapor, Pepelana pješčenjaci i lapor Cabuna formacije Kloštar Ivanić. Na Grubišnom Polju formacija Kloštar Ivanić predstavljena je samo glinovito laporovitim sedimentima bez pješčanih članova, tj. laporom Brezine.

Slijede sedimenti Bilogorske formacije predstavljeni glinovitim laporom, a u manjoj mjeri sitnozrnatom pješčenjacima u izmjeni sa siltoznim laporima. Prosječna debljina formacije je između 300 i 400 m (Malvić, 2003).

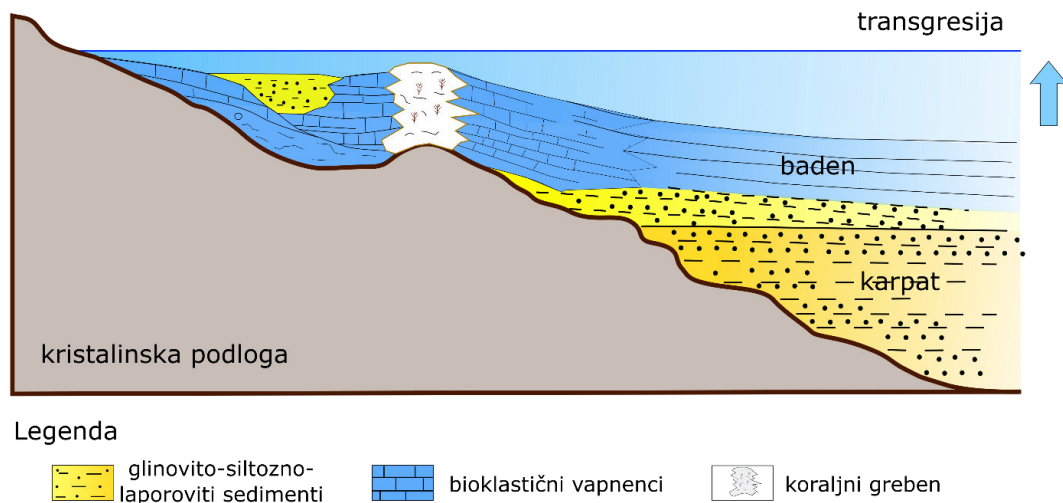
Sedimenti formacije Bilogora na prostoru Letičana sastoje se od pijesaka i slabo vezanih pješčenjaka različite granulacije, dok se sedimenti formacije Lonja sastoje od humusa, glina, pjeskovitih glina te šljunka i pijeska različite granulacije.

3.4 Geološki opis ležišnih stijena

Na Grubišnom Polju ležišne stijene predstavljaju vapnenci, tj. biokalkareniti badenske starosti koji su taloženi diskordantno na stijene podloge neogena, odnosno na tinjčeve škriljavce i migmatske gnajsove paleozojske starosti (Slika 3-4). Hidrodinamičkim mjerenjima potvrđeno je postojanje ležišta ugljikovodika u vršnom dijelu metamorfita temeljnog gorja i biokalkarenitima Mosti člana, formacije Moslavačka gora kao jedinstvene hidrodinamičke cjeline (Vukadinović, 1996).

Prema petrofizikalnim analizama krhotina stijena i jezgri u bušotinama A-1Z te A-2Z biokalkareniti se sastoje od detritičnih karbonatnih zrna izgrađenih od bioklasta plitkovodnih marinskih organizama. Sadrže brojne stilolitske šavove koji su ispunjeni netopivim glinovito-organskim ostatkom (Matošević et al., 2017).

Sedimentacijski model taloženja biokalkarenita prikazali su Velić et al. (2000) na primjeru biokalkarenita na obroncima Psunja. Vapnenci su taloženi na karbonatnoj platformi, tj. šelfu koji je krpastim grebenima zaštićen od utjecaja morskih struja u zagrebenkoj zoni (Slika 3-5). Krpasti grebeni su također predstavljali ishodišni materijal bioklasta plitkovodnih organizama koji su pretaloženi u zagrebenkoj i predgrebenkoj zoni. Prema Velić et al. (2000) vapnenci su taloženi tijekom transgresije u nekoliko faza: preliminarna faza u kojoj dolazi do taloženja siltozno-laporovitih sedimenata; pripremna faza taloženja u kojoj tektonske i klimatske promjene pogoduju stvaranju krpastih grebena; faza taloženja biokalkarenita.



Slika 3-5 Shematski profil sedimentacijskog modela bioklastičnih vapnenaca na karbonatnoj platformi (prema Velić et al., 2000)

Ležišne stijene polja Letičani predstavljaju sitno do srednjozrnasti litoarenit sa zrnima kvarca, feldspatima, različitim odlomcima stijena i muskovitom u karbonatnom vezivu. Detaljna litološka građa Koprivničkih pješčenjaka definirana je analizama jezgara u tri bušotine: B-3, B-4 i B-9. Unutar proslojaka pješčenjaka dolaze proslojci grubog i finog silta milimetarske do centimetarske debljine. Proslojci silta su heterogeno raspoređeni te značajno utječu na efektivnu debljinu ležišta.

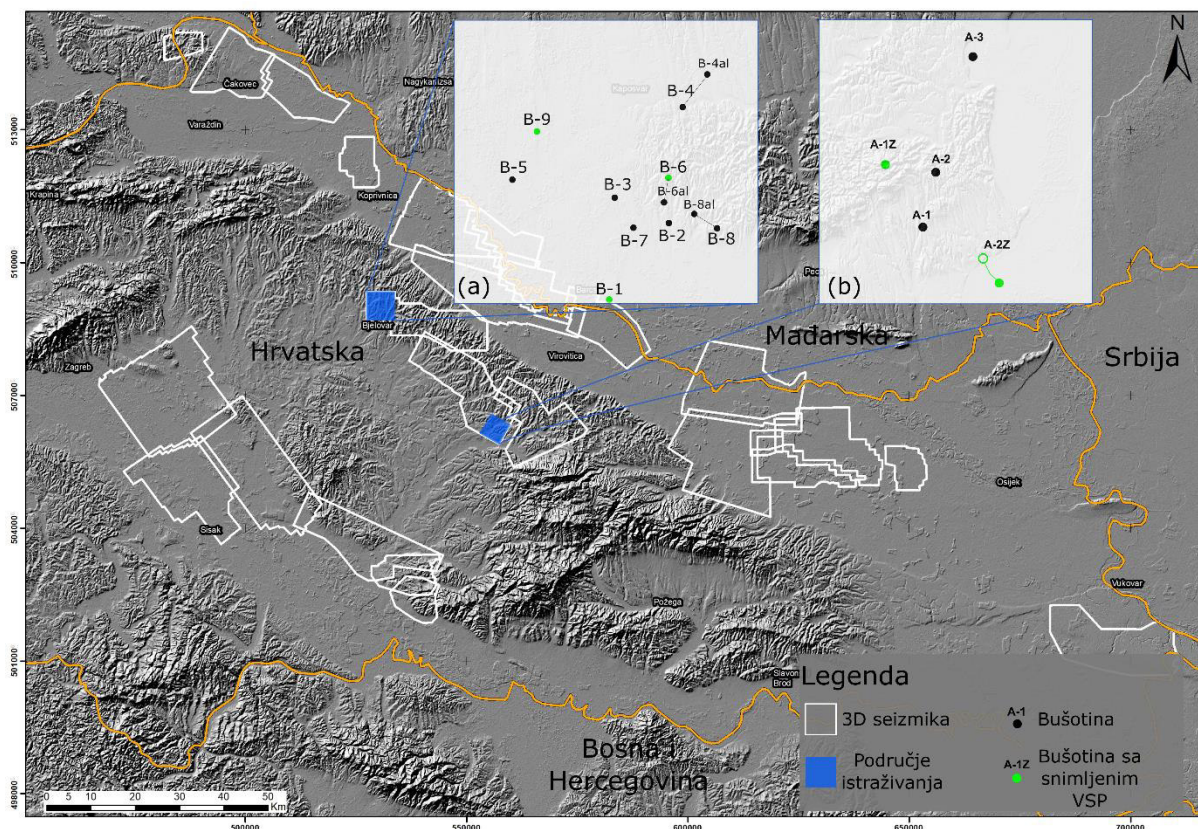
4 Ulazni podaci

U ovom radu korišteni su dostupni seizmički podaci, podaci vertikalnog seizmičkog profiliranja, karotažna mjerenja i eksploatacijski podaci na području plinskoga polja Grubišno Polje i naftnoga polja Letičani, koji su ustupljeni od INA – Industrija nafte i PSP – Podzemno skladište plina.

Karotažna mjerenja dostupna u pet bušotina na plinskom polju Grubišno Polje i dvanaest bušotina na naftnom polju Letičani obuhvaćaju karotažu otpornosti (R16, R64, RD, RLML, RNML), prirodne radioaktivnosti (GR), gustoće (DEN), spontanog potencijala (SP), neutronska karotažu (CN) i zvučnu karotažu (AC). Iz tih bušotina bile su dostupne litološke i mineraloške analize.

Karotaža gustoće se temelji na emitiranju gama zračenja visoke energije i mjerenju odziva stijenske mase. Neutronska karotaža mjeri odziv stijenske mase na protok brzih neutrona. Jezgra vodika usporava neutrone, a vodik se nalazi u fluidima te je koncentracija vodika povezana s poroznošću stijene. Time neutronska karotaža omogućuje mjerenje poroznosti stijenskih masa (Ellis i Singer, 2007). Zvučna karotaža mjeri vrijeme putovanja seizmičkog vala na određenoj udaljenosti, najčešće na udaljenosti između dva prijemnika sonde za mjerenje. Recipročna vrijednost zvučne karotaže predstavlja brzinu širenja seizmičkog vala (Sheriff, 2002).

Seizmički podaci obuhvaćaju snimljene 3D seizmičke podatke i podatke vertikalnog seizmičkog profiliranja (VSP) (Slika 4-1). Dostupni eksploatacijski podaci odnose se na početni tlak ležišta, temperaturu ležišta, početno zasićenje ugljikovodicima i vodom te eksploatirane količine ugljikovodika na pojedinim bušotinama.



Slika 4-1 Karta snimljenih seizmičkih volumena u hrvatskom dijelu PBS-a s prikazanim područjima istraživanja: (a) polje Letičani i (b) polje Grubišno Polje. Bušotine sa snimljenim vertikalnim seizmičkim profilom (VSP) prikazane su zelenom bojom.

4.1 Seizmički i bušotinski podaci

Seizmički podaci plinskoga polja Grubišno Polje snimljeni su 1998. godine, a naftnog polja Letičani 2017. godine. Seizmički podaci u vremenskoj domeni obrađeni su procesom vremenske migracije prije zbrajanja tragova (engl. *Pre-stack Time Migration - PSTM*) te zatim procesom dubinske migracije prije zbrajanja tragova (engl. *Pre-stack Depth Migration - PSDM*).

Tijek vremenske obrade seizmičkih podataka vremenske migracije na istraživanom prostoru (Jović i Budanović, 2018; Havičić, 2018) prema Prskalo (2005) može se ukratko podijeliti na:

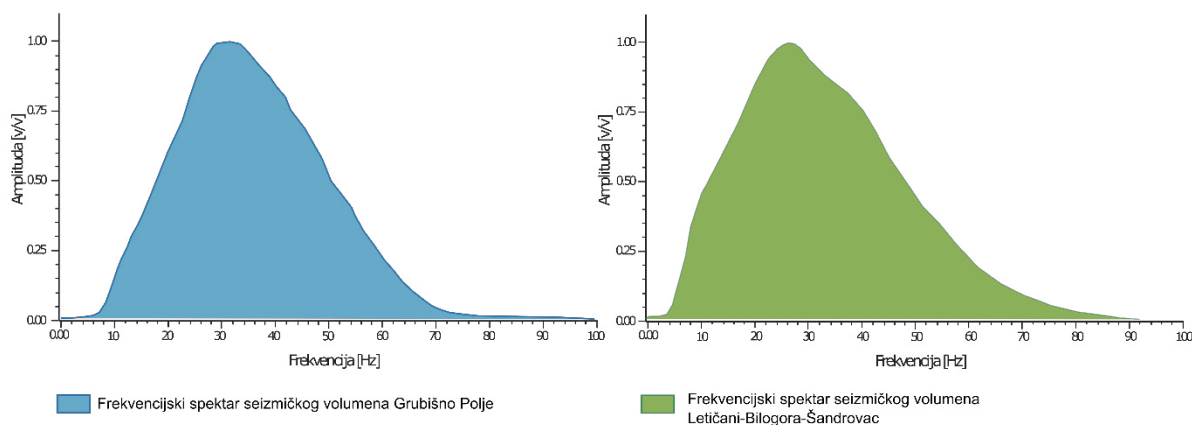
- Priprema podataka
 - primjena geodetskih podataka
 - definiranje grida
- Obrada signala prije zbrajanja
 - uklanjanje smetnji
 - korekcija amplitude
 - dekonvolucija
- Statičke korekcije
 - refrakcijske statičke korekcije
 - rezidualne statičke korekcije
- Migracija
 - analiza brzina i dinamičke korekcije (*NMO*)
 - *pre-stack* Kirchhoff vremenska migracija
- Post migracijska obrada seizmičkih podataka
 - filter nulte faza
 - analiza rezidualnih amplituda

Kirchhoffovom *pre-stack* vremenskom migracijom refleksi se pozicioniraju na njihovo pravo mjesto u podzemlju. Procijenjene vrijednosti amplituda se zbrajaju duž difrakcijskih krivulja. Difrakcijske krivulje su izračunate iz polja brzina, a određene su kao dvostruko vrijeme potrebno da signal stigne s površine u dubinu.

PSDM proces sastoji se od definiranja početnog modela brzina te nakon toga niza iteracija tomografskih inverzija. U model brzina uključeni su parametri anizotropije. Svakom iteracijom tomografske inverzije pokušavaju se smanjiti rezidualne brzine u odnosu na karotažne podatke. Nakon procesa tomografske inverzije vrijednosti rezidualnih brzina značajno su manje u odnosu na početne. Nakon toga Kirchhoffovom *pre-stack* dubinskom migracijom kreira se konačni seizmički volumen u dubinskoj domeni (Jović i Budanović, 2018).

Glavni cilj obrade seizmičkih podataka je poboljšanje omjera signal/šum uz očuvanje relativnih odnosa amplituda te povećanje prostorne i vertikalne rezolucije seizmičkih podataka.

Frekvencijski spektar seizmičkog volumena je u rasponu 8 - 80 Hz (Slika 4-2). Parametri snimanja prikazani su tablično, Tablica 4-1.



Slika 4-2 Frekvencijski spektar seizmičkih volumena

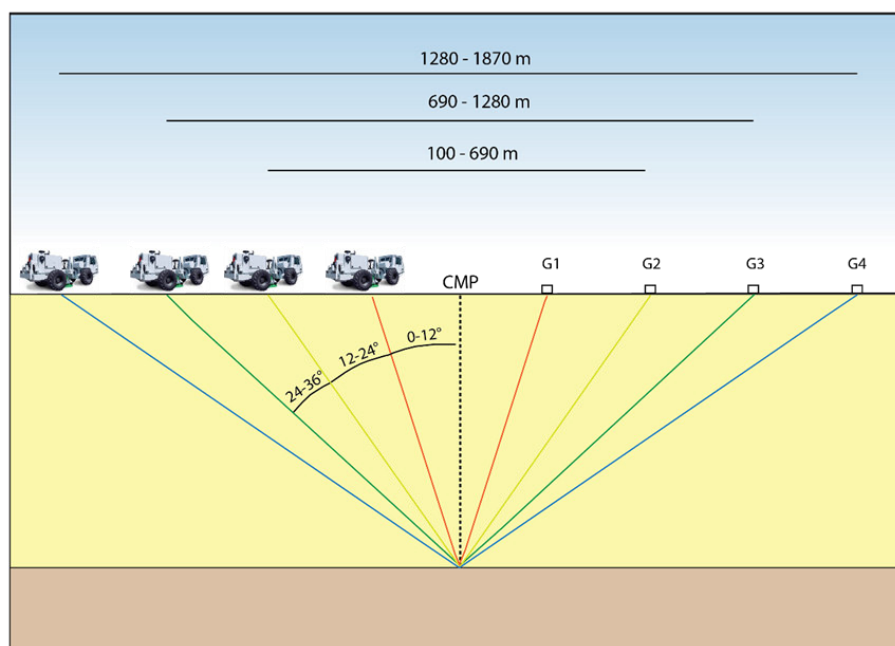
Tablica 4-1 Parametri snimanja 3D seizmičkih podataka Grubišno Polje i Letičani

	Grubišno Polje	Letičani
Nominalno prekrivanje	30	90
Razmak prijemnika (m)	50	40
Razmak točaka izvora (m)	50	40
Razmak linija prijemnika (m)	200	40
Razmak linija izvora (m)	300	240
Broj aktivnih linija prijemnika	12	20
Broj aktivnih prijemnika po liniji	60	108
Ukupan broj aktivnih prijemnika	720	2160
Orientacija linija prijemnika	JZ-SI	I-Z
Orientacija linija izvora	SZ-JI	S-J
Duljina snimke (ms)	4000	6000
Uzorkovanje (ms)	2	2
Vrsta izvora	vibrator i dinamit	vibrator i dinamit
Frekvencija vibriranja (Hz)	8 -72	8 - 90
Trajanje vibriranja (s)	16	16
Vrsta vibriranja	linearni	linearni

Kao dodatni seizmički volumeni korišteni su seizmički volumeni s djelomično zbrojenim tragovima (engl. *Partial stack*) (Slika 4-3):

- *Offset stack* volumen (Slika 4-4):
 - 100 – 690 m
 - 690 – 1280 m
 - 1280 – 1870 m

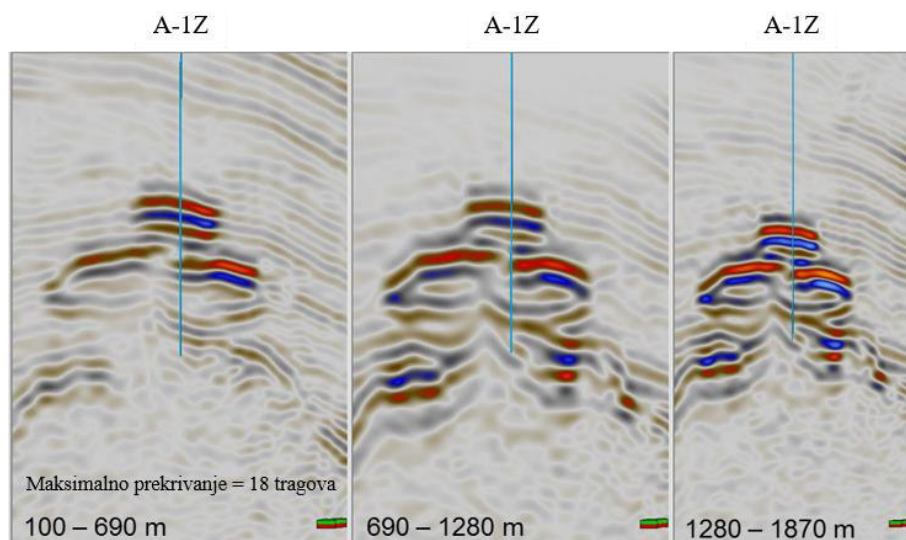
- *Angle stack* volumen (Slika 4-5):
 - 0° – 12°
 - 12° – 24°
 - 24° – 36°



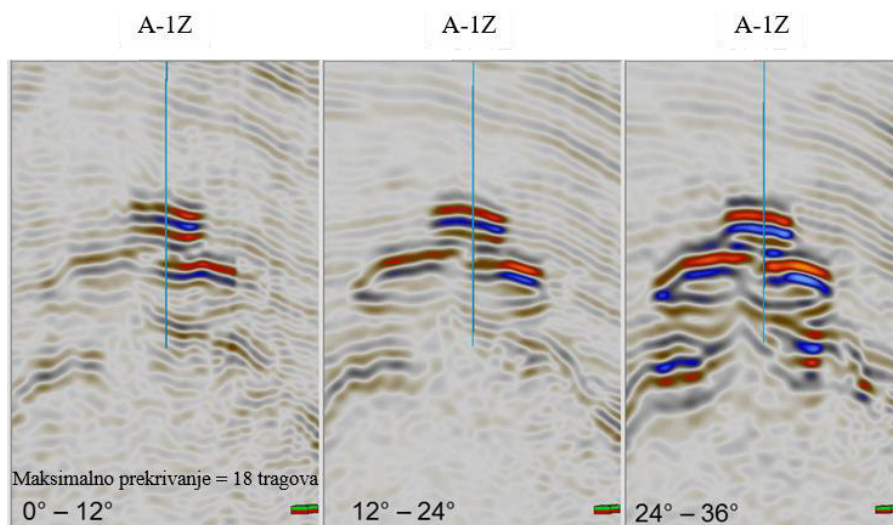
Slika 4-3 Geometrija snimanja. *Offset stack* volumen zbrojenih tragova definiran udaljenostima geofona od izvora vala; *angle stack* volumen zbrojenih tragova definiran kutovima upada seizmičkog vala

Konvencionalni seizmički volumen, nastao zbrajanjem svih tragova (engl. *Full stack*) koristi se za karakterizaciju ležišta, no u određenim geološkim uvjetima npr. plinska zasićenja u ležištu ima nižu rezoluciju. Rezolucija podataka koji potječu od S-valova zbrajanjem svih tragova je bitno snižena, a time se gube važne informacije o zasićenju ležišta. Seizmičke amplitude snimljene pod različitim kutovima mogu biti značajno različite, osobito pri prisutnosti ugljikovodika (Wei et al., 2006).

Seizmički volumeni s različitim zbrojenim tragovima imaju različiti seizmički prikaz (Slika 4-4 i Slika 4-5). Volumeni sa zbrojenim tragovima u udaljenostima 100 – 690 m te 0 - 12° imaju prikaz refleksa sa slabije izraženom amplitudom.



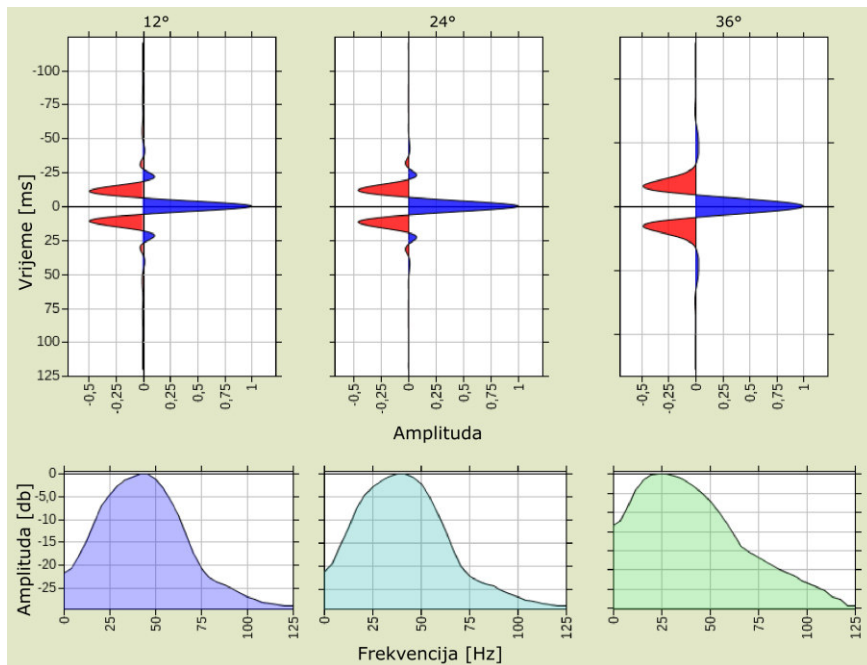
Slika 4-4 Usporedba profila *offset stack* s različitim udaljenostima



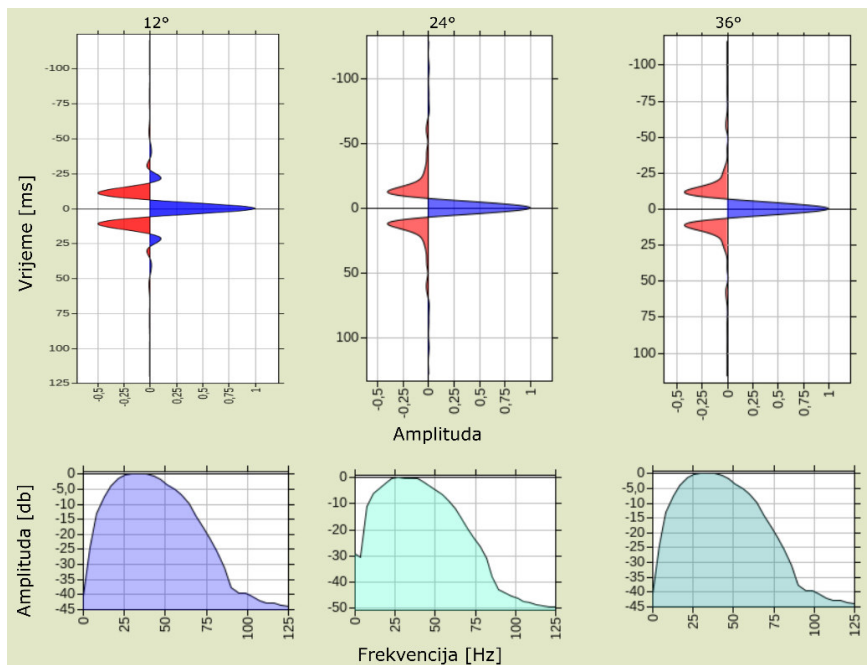
Slika 4-5 Usporedba profila *angle stack* s različitim kutovima

Za svaki set djelomično zbrojenih seizmičkih tragova izdvojeni su seizmički valići, koji su potrebni tijekom procesa inverzije za izradu sintetskih tragova radi usporedbe sa stvarnim seizmičkim podacima (Slika 4-6 i Slika 4-7). Metodologija izdvajanja seizmičkih valića temeljena je na radu Zabihi Naeini et al. (2017). Uzimajući u obzir njihovu metodologiju rada, zaključeno je da seizmički valić konstantne faze daju najbolje rezultate u ovim analizama. Vidljivo je da su svi seizmički valići sličnog oblika, no imaju različit frekvencijski spektar

(Slika 4-6). Najviše amplitude *full stack* seizmičkog volumena pripadaju frekvencijskom spektru između 40 i 50 Hz, dok seizmički valići za *offset* i *angle stack* volumene pripadaju frekvencijskom spektru između 20 i 40 Hz. Frekvencijski spektar ima znatan utjecaj na izgled sintetskog seizmičkog traga.



Slika 4-6 Prikaz izdvojenih seizmičkih valića - Grubišno Polje



Slika 4-7 Prikaz izdvojenih seizmičkih valića - Letičani

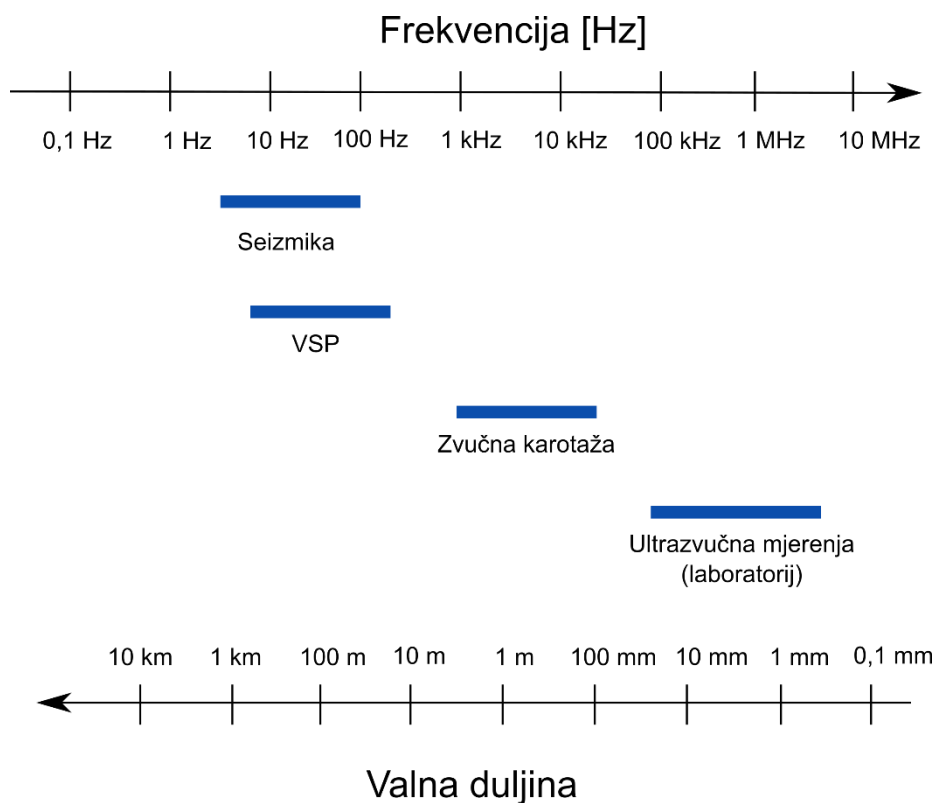
Seizmičkoj interpretaciji i inverziji prethodila je provjera svih dostupnih bušotinskih podataka. Raspoloživi podaci po bušotinama prikazani su u tablici 4-2. Većina bušotina ima snimljene podatke zvučne karotaže i gustoće, neophodne za kalibraciju seizmičkih i bušotinskih podataka te seizmičku inverziju. U radu su korištene petrofizikalne analize iz Fonda stručne dokumentacije INA-e potrebne za seizmičku inverziju i raspodjelu poroznosti. Karotažne krivulje poroznosti (POR) i zasićenja vodom (SW) izračunate su na temelju krivulja AC, CN i DEN. Također, prilikom laboratorijskih mjerenja širenja seizmičkih valova u vapnencima korišteni su podaci o jezgrama, petrofizikalne, sedimentološke i petrološke analize jezgara.

Tablica 4-2 Dostupni karotažni podaci po bušotinama

Bušotina	AC	DEN	GR	CAL	R16	R64	RD	RLML	RNML	CN	POR	SW
A-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A-1Z	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+
A-2	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-
A-2Z	+	+	+	+	-	-	+	-	-	-	+	+
A-3	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-
B-1	+	+	+	+	+	+	-	+	+	-	+	+
B-2	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
B-3	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
B-4	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+
B-4AL	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-
B-5	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+
B-6	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	-	-
B-6AL	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+
B-7	-	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+
B-8	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+
B-8AL	-	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+
B-9	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+

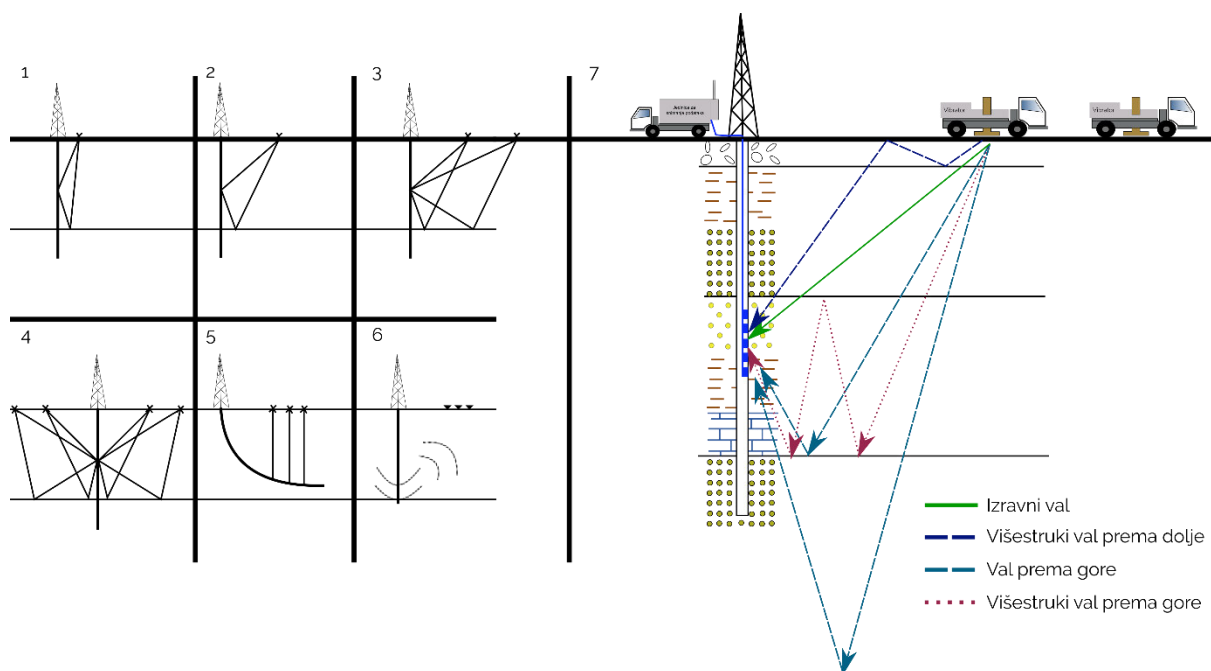
4.2 Vertikalno seizmičko profiliranje (VSP)

Vertikalno seizmičko profiliranje je sustav mjerenja seizmičkih valova koji se sastoji od tro-komponentnih geofona spuštenih u bušotinu i izvora seizmičkog vala na površini. Koristi se za određivanje seizmičkih brzina i povezivanje seizmičkih i bušotinskih podataka. Zbog kraćeg puta seizmičkih valova zadržane su visoke frekvencije koje omogućuju bolju razlučivost. Raspon frekvencijskog spektra vertikalnog seizmičkog profila u usporedbi s ostalim seizmičkim mjerenjima prikazan je na sljedećem dijagramu, Slika 4-8



Slika 4-8 Raspon frekvencija i valnih duljina različitih seizmičkih mjerenja (prema Sheriff, 2002)

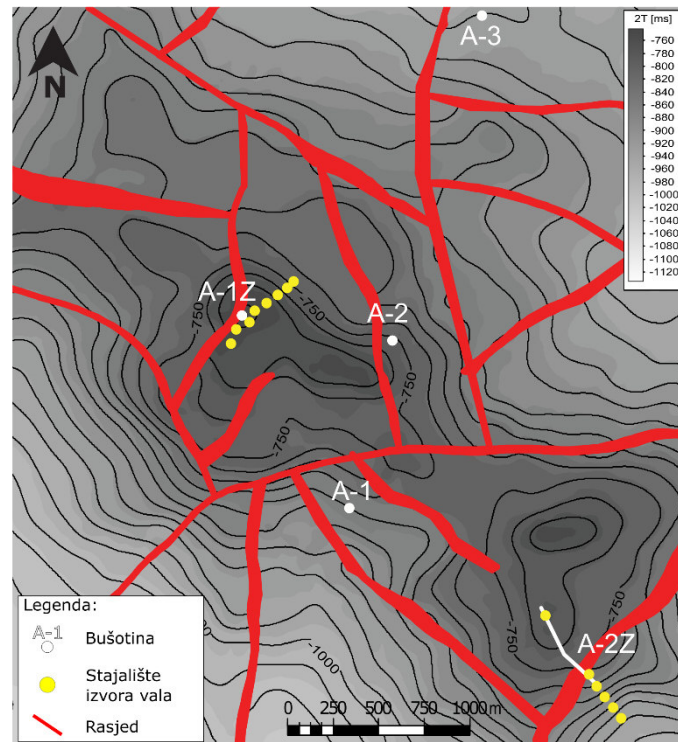
Vrste VSP mjerenja se uglavnom dijele prema položaju izvora vala u odnosu na bušotinu na VSP bez odmaka, s odmakom, mjerenje s višestrukim izvorima te mjerenje paralelnim pomicanjem izvora vala i geofona. Na slici 4-9 prikazane su različite geometrije mjerenja VSP i geometrija širenja seizmičkih valova.



Slika 4-9. Geometrija VSP mjerenja: 1. bez odmaka (engl. *zero-offset VSP*), 2. s odmakom (engl. *offset VSP*), 3. mjerenje s višestrukim izvorima (engl. *multi-offset VSP*), 4. paralelnim pomicanjem izvora vala (engl. *walk-away VSP*), 5. paralelnim pomicanjem izvora vala i geofona (engl. *walk-above VSP*), 6. snimanje seizmičkih valova tijekom bušenja (engl. *seismic while drilling VSP*) i 7. geometrija širenja seizmičkih valova (prema Gupta, 2011).

Vertikalno seizmičko profiliranje na plinskom polju Grubišno Polje izvedeno je s višestrukim izvorima, sa sedam točaka paljenja u rasponu od 50 do 450 m od ušća bušotine (Slika 4-10), dok je na naftnom polju Letičani snimljen VSP bez odmaka.

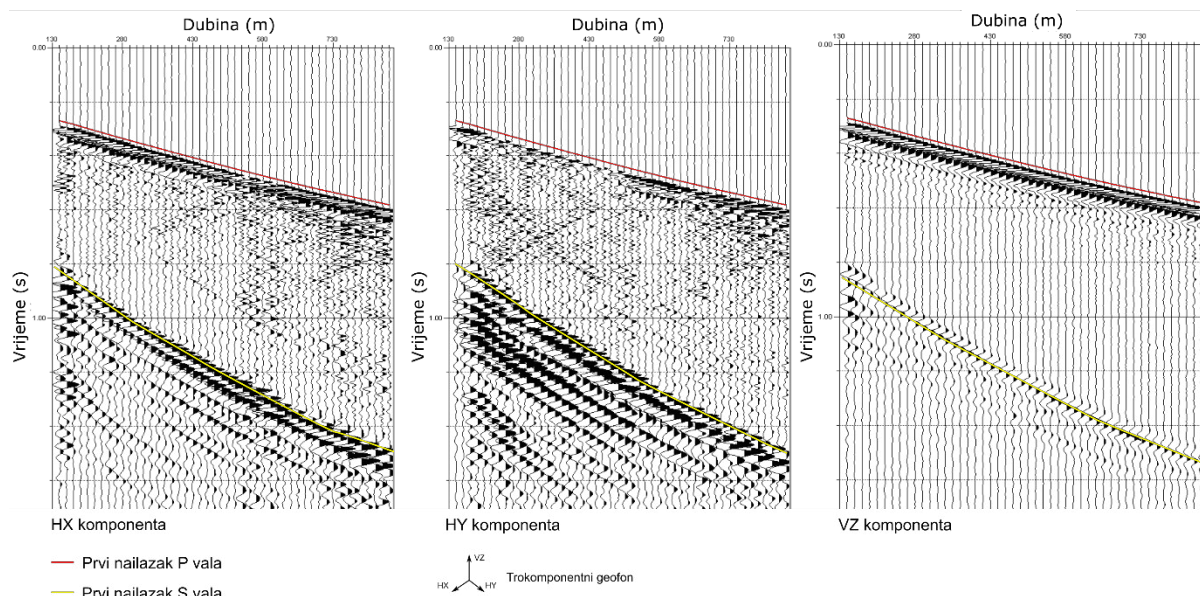
Izvedba mjerenja počinje spuštanjem geofona na dno bušotine koji se tijekom mjerenja podižu u intervalima stajališta prema ušću bušotine. Za svako stajalište geofona inicira se u izvoru seizmički val. Stajališta geofona ovise o valnoj duljini postignutih seizmičkih valova te bi trebali biti na polovici postignute valne duljine (obično 20 – 50 m). Stajališta geofona za VSP-mjerenja u bušotinama Grubišnog Polja bila su u razmaku 15 m (Vedriš, 2012), a na polju Letičani u razmaku 25 m (Vedriš i Haviđić, 2018).



Slika 4-10 Strukturna karta u vremenskoj domeni s naznačenim stajalištima izvora vala tijekom VSP-mjerenja na Grubišnom Polju

Obrada VSP podataka se sastoji od pregleda tragova za svako stajalište geofona, izdvajanja loših tragova, definiranja geometrije širenja seizmičkih valova, interpretiranja prvih nailazaka, izračuna brzina, primjene pojasnog filtera, odvajanja valova prema gore i dolje, dekonvolucije, zbrajanja tragova i izrade VSP tragova (engl. *corridor stack*). Odvajanje valova prema gore i dolje omogućeno je Fourierovom transformacijom valnih nailazaka iz vremenske domene u domenu frekvencija - valni broj (f - k domena).

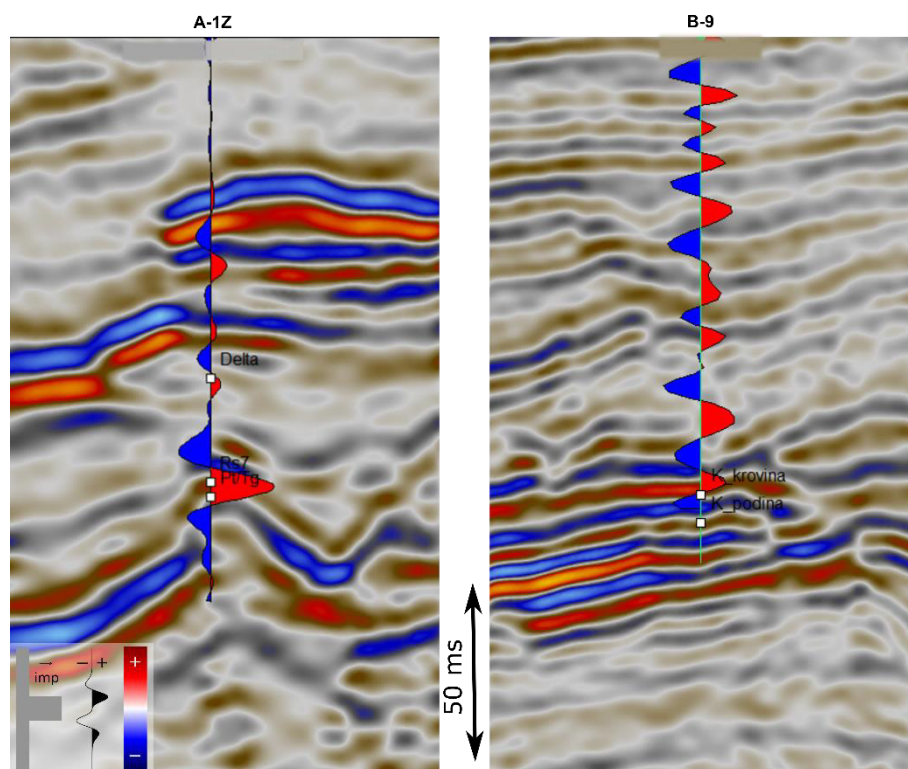
VSP mjerenja na polju Letičani korištena su za bolje povezivanje bušotinskih i seizmičkih podataka, dok su VSP mjerenja na Grubišnom Polju korištena i za definiranje intervalnih P- i S-brzina neophodnih u postupku petrofizikalnog modeliranja.



Slika 4-11 VSP seizmički profil bušotine A-1Z na Grubišnom Polju. Tragovi su zbrojeni prema komponentama geofona s prikazanom interpretacijom prvih nailazaka P- i S-valova

4.3 Povezivanje bušotinskih i seizmičkih podataka

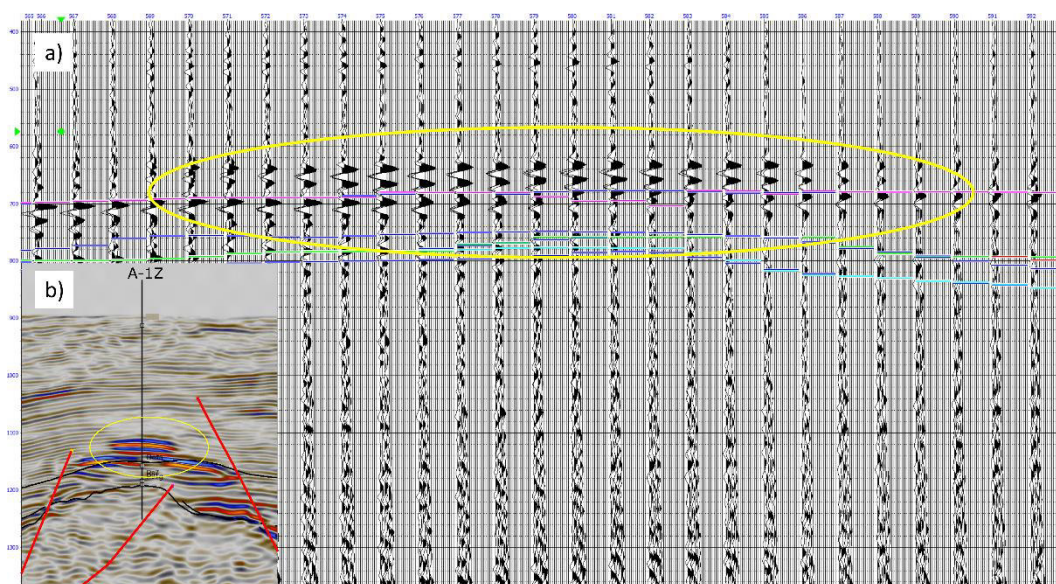
Prije interpretacije seizmičkih mjerenja provedeno je povezivanje bušotinskih podataka sa seizmičkim podacima u bušotinama A-1Z i A-2Z za koje su dostupni VSP (vertikalni seizmički profil) podaci na polju Grubišno Polje i u bušotinama B-1; - 6 i -9 na Letičanima. Povezivanje bušotinskih i seizmičkih podataka napravljeno je sintetskim seizmogramima, a primjer za bušotine A-1Z i B-9 prikazan je slikom 4-12.



Slika 4-12 Kalibrirani sintetski trag na seizmičkom profilu za bušotine A-1Z i B-9

Sintetski seizmogram je izračunati izgled seizmičke sekcije za zadani geološki model. Umjetni seizmički odziv izračunat je uz pretpostavku oblika ulaznog seizmičkog vala koji se prostire kroz zadani geološki model definiran gustoćama slojeva i seizmičkim brzinama u pojedinom sloju (Sheriff, 2002).

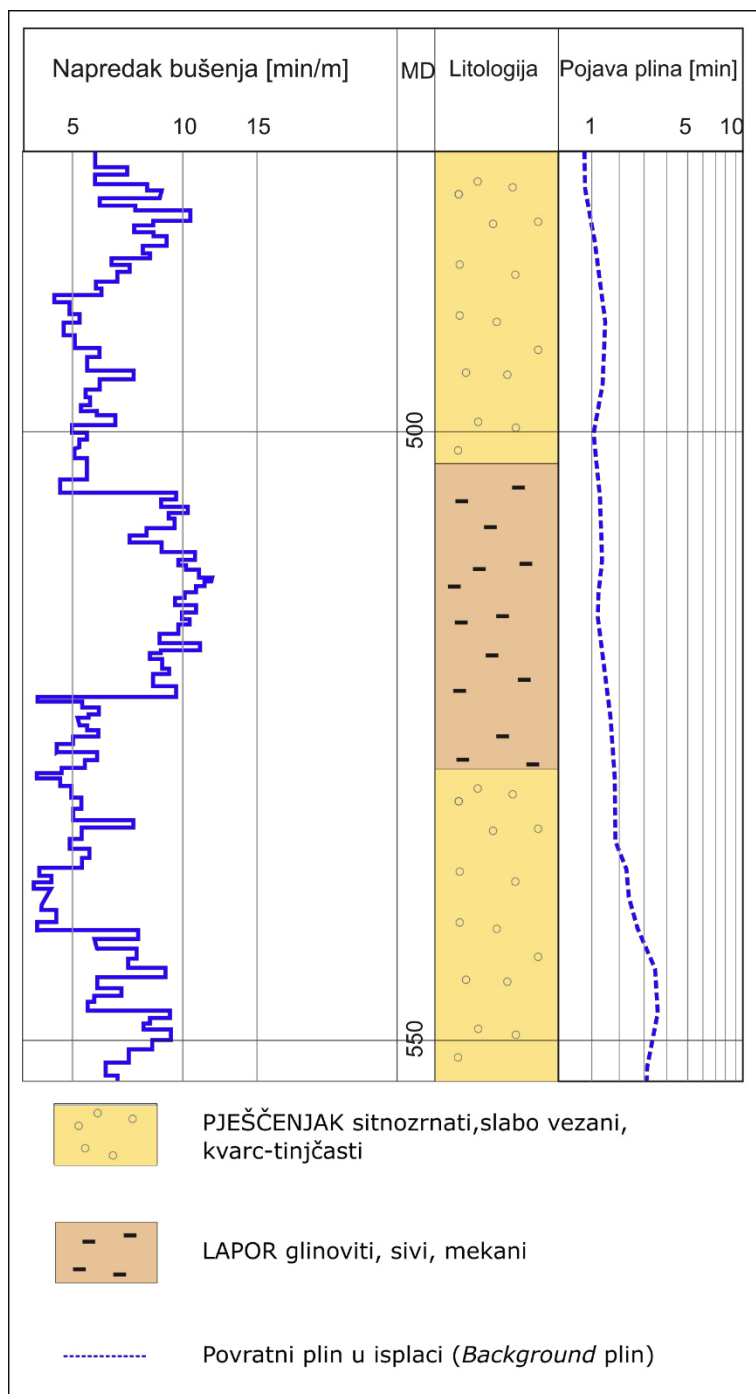
Tijekom interpretacije polja Grubišno Polje uočena je amplitudna anomalija na području bušotine A-1Z, iznad EK markera Delta. Takav amplitudni odraz karakterističan je za ležišta sa značajnijim zasićenjima ugljikovodika. Analizom *pre-stack* pojedinačnih tragova (Slika 4-13) dokazano je da amplitudni odraz nije rezultat pogrešne *NMO* (engl. *Normal Moveout*) korekcije tragova prilikom obrade podataka. Stoga uzrok amplitudne anomalije može biti samo litološka promjena ili zasićenje ugljikovodicima.



Slika 4-13 Prikaz seizmičke anomalije (žuto) na profilu pojedinačnih tragova (a) i profilu seizmičkog volumena (b)

Pregledom dokumentacije bušotine A-1Z i operativnog geološkog dijagrama, uočeno je da na dubini koja odgovara amplitudnoj anomaliji dolazi do naglog pada napretka bušenja na dubini oko 500 m (Slika 4-14). Napredak bušenja indikativno ukazuje na značajnije promjene litološkog sastava, gdje napredak bušenja naglo opada prijelazom iz „mekše“ stijenske mase u „tvrđu“. Analizom uzoraka sa sita tijekom bušenja definiran je prijelaz iz kvarc tinjčastih pješčenjaka u glinoviti lapor. Za navedeni interval koji odgovara seizmičkoj anomaliji detektirana je relativna koncentracija povratnog plina u isplaci (*background* plin) od 1-3%.

Povratni plin u isplaci se definira kao plin iz razmrvljenog volumena stijene koja ne sadrži značajnije količine ugljikovodika. Lapor, gline i ostale slabo propusne stijene često sadrže minimalne količine plina nastalog raspadom organskog materijala (Vrbanac, 1990). Stoga je navedena anomalija odraz nagle litološke promjene i malih koncentracija plina.



Slika 4-14 Isječak operativnog geološkog dijagrama za bušotinu A-1Z (prema Trogrlić, 1994)

5 Strukturna interpretacija

Strukturna interpretacija plinskoga polja Grubišno Polje i naftnoga polja Letičani napravljena je na temelju 3D seizmičke interpretacije i kalibracije s karotažnim bušotinskim podacima. Strukturna interpretacija napravljena je u vremenskom mjerilu te pomoću modela brzina pretvorena u dubinsko mjerilo.

U ovom radu seizmički horizonti odgovaraju regionalnim markerima, tj. repnim slojevima definiranim na bušotinama. Prema Malvić i Cvetković, (2013) markeri su regionalno prepoznatljivi. Litostratigrafske jedinice Dravske depresije definirane su na temelju brojnih bušotina, uglavnom pomoću karotažnih krivulja otpornosti. U radu su interpretirani sljedeći stratigrafski horizonti:

Delta (Δ) - granica između formacije Bilogora i formacije Kloštar Ivanić (≈ 6.3 Ma),

Rs5 - granica između formacije Moslavačka gora i formacije Ivanić Grad (≈ 9.3 Ma). Bitno je naglasiti kako je krovina ležišta Koprivnički pješčenjaci na polju Letičani definirana u donjem intervalu člana Koprivnički pješčenjaci, stoga EK marker ne predstavlja krovinu ali je konkordantan krovini ležišta.

Rs7 - granica između članova Mosti i Križevci unutar formacije Moslavačka gora (≈ 11.5 Ma),

Pt/Tg - granica između formacije Moslavačka gora i starijih stijena podloge.

Analizom seizmičkih atributa provjeren je interpretirani strukturni sklop. Korišteni atributi prema Taner et al. (1979) pripadaju skupini fizikalnih atributa (RMS amplituda, trenutna frekvencija, *sweetness*) i skupini geometrijskih atributa (varijanca).

RMS amplituda (engl. *Root-Mean-Square*) definira se kao atribut seizmičkog traga ili horizonta. Izračunava se za svaki trag, unutar odabranog vremenskog intervala te predstavlja korijen amplitudnih vrijednosti za zadani interval. Visoke vrijednosti često su posljedica značajnih litoloških promjena susjednih slojeva, a mogu biti vezane i uz akumulacije plina. Koristi se i za definiranje debljine i kvalitete ležišta, ali zbog osjetljivosti na ekstremne vrijednosti amplituda za detaljniju karakterizaciju ležišta potrebno je ovaj atribut kontrolirati i s drugim seizmičkim atributima.

Trenutna frekvencija predstavlja vremensku promjenu trenutne faze, tj. brzinu promjene trenutne faze. Vrijednost trenutne frekvencije neovisna je o amplitudi i fazi te predstavlja

srednju frekvenciju frekvencijskog spektra (Taner et al., 1979). Koristi se za vertikalne i horizontalne litološke promjene te za definiranje svojstava ležišta kao što su zasićenje ugljikovodicima, debljina sedimenata, isklinjenja ili rubove kontakta ugljikovodik - voda. Niže vrijednosti frekvencija su karakteristične za raspucana ležišta ili rasjedne zone, također pomak prema nižim frekvencijama se često zapaža ispod pješčenjaka zasićenog plinom i kondenzatom te naftnih ležišta.

Atribut *sweetness* je kombinirani atribut izračunat dijeljenjem trenutne amplitude i trenutne frekvencije. Koristi se za isticanje tankih ležišta, koja mogu sadržavati ugljikovodike. 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 (šejlovi) pokazivati niže vrijednosti. Ta kombinacija je korisna za prepoznavanje zasićenja plinom jer njegove značajke pokazuju visoke vrijednosti *sweetness*-a zbog većih amplituda.

Seizmički atribut varijance (van Bemmelen et al., 2000) predstavlja mjeru sličnosti, točnije razliku između seizmičkih tragova i služi za identificiranje diskontinuiteta seizmičkih refleksa. Vertikalni vremenski prozor ima značajan utjecaj na rezultate, veći vremenski prozor pogodan je za analizu rasjednog sklopa, a manji za definiranje rubova sedimentnih tijela.

5.1 Model brzina

Prilikom pretvorbe vremenskih karata u dubinsko mjerilo korišten je model brzina kreiran tijekom procesa dubinske konverzije seizmičkih podataka prije zbrajanja tragova (engl. *Pre-Stack Depth Migration*) napravljen u INA-i (Jović i Budanović, 2018; Havičić, 2018). U procesu pretvorbe podataka u dubinsko mjerilo koriste se interpretirani seizmički horizonti u vremenskom mjerilu i bušotinski podaci.

Postupak dubinske migracije počinje kreiranjem inicijalnog modela brzina. Seizmički tragovi se analiziraju i primjenjuju se rezidualne korekcije (engl. *RMO – Residual Moveout*), a nagibi reflektora se analiziraju iz volumena zbrojenih tragova. Na temelju površinske geometrije snimanja definira se putanja seizmičkih zraka te se izračunaju linearne jednadžbe RMO korekcije. Ako seizmički tragovi u dubinskoj domeni nisu ravni, iterativno se tomografskom inverzijom mijenjaju rezidualne korekcije dok seizmički tragovi nisu ravni

(Woodward et al., 2008). Takav postupak, osim pouzdanog modela brzina rezultira seizmičkim volumenom u dubinskom mjerilu s boljom horizontalnom i vertikalnom rezolucijom.

5.2 Strukturna interpretacija polja Grubišno Polje

Interpretacija triju horizonata, po EK – markerima Delta, Rs7 i Pt/Tg napravljena je na *PSTM* seizmičkoj kocki (Slika 5-3). Pretvorba vremenski interpretiranih horizonata u dubinsko mjerilo napravljena je na temelju modela brzina koji je kao konačni rezultat tomografske inverzije korišten za dubinsku migraciju tijekom reobrade seizmičkih podataka (Slika 5-4).

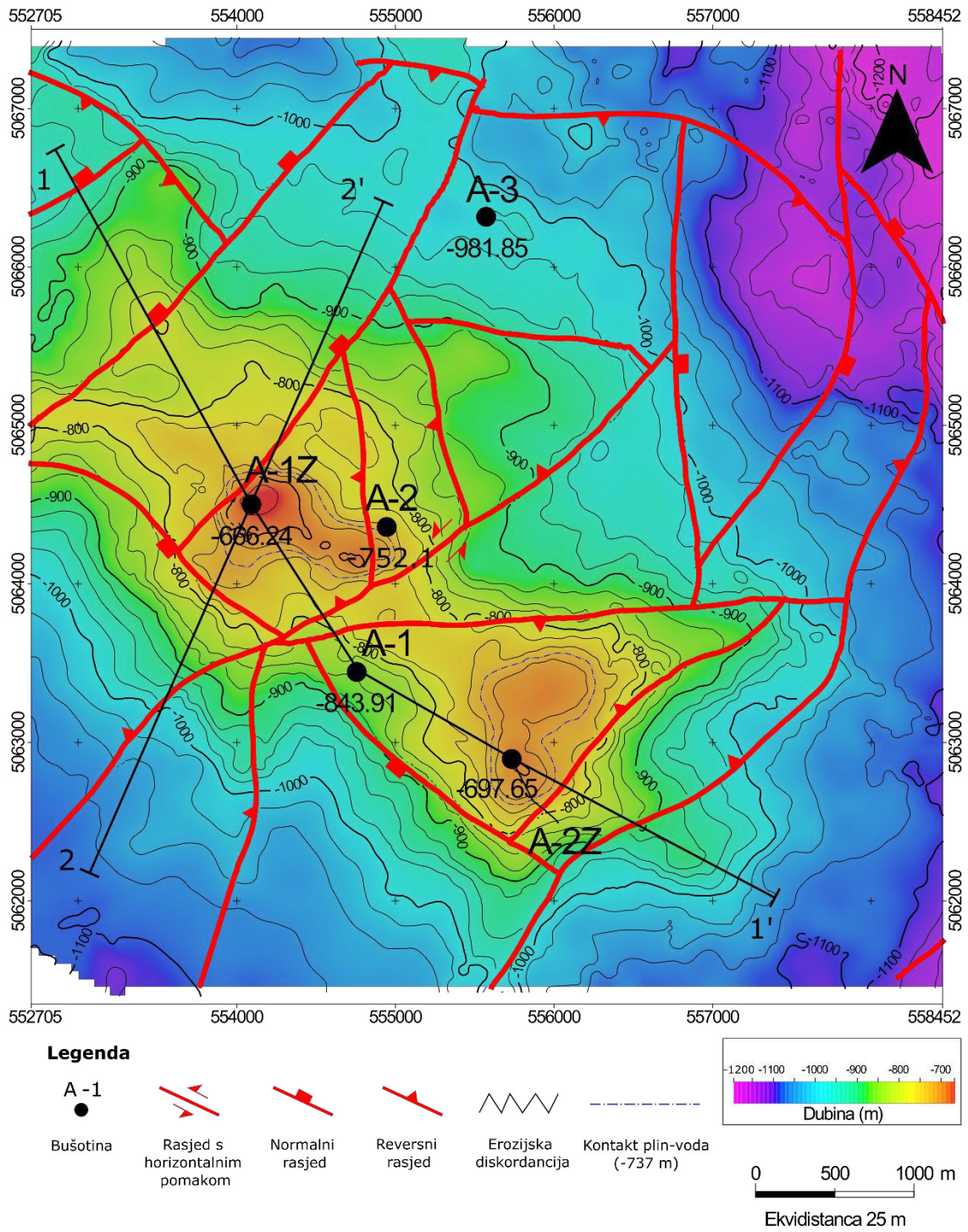
Na temelju korelacije bušotinskih i seizmičkih podataka (Slika 4-12) krovina vapnenaca interpretirana je po maksimumu negativne amplitude, čiji refleks je jasno prepoznatljiv na cijelom području istraživanja. Refleks predstavlja diskordanciju koja kronostratigrafski odgovara krovini donjo-miocenskih vapnenaca. Krovina metamorfita također je interpretirana po maksimumu negativne amplitude i predstavlja temeljno gorje.

Interpretirani horizonti u vremenskoj domeni pretvoreni u dubinske horizonte pomoću modela brzina kontrolirani su na dubinskom seizmičkom volumenu (*PSDM*) radi kontrole kvalitete interpretacije.

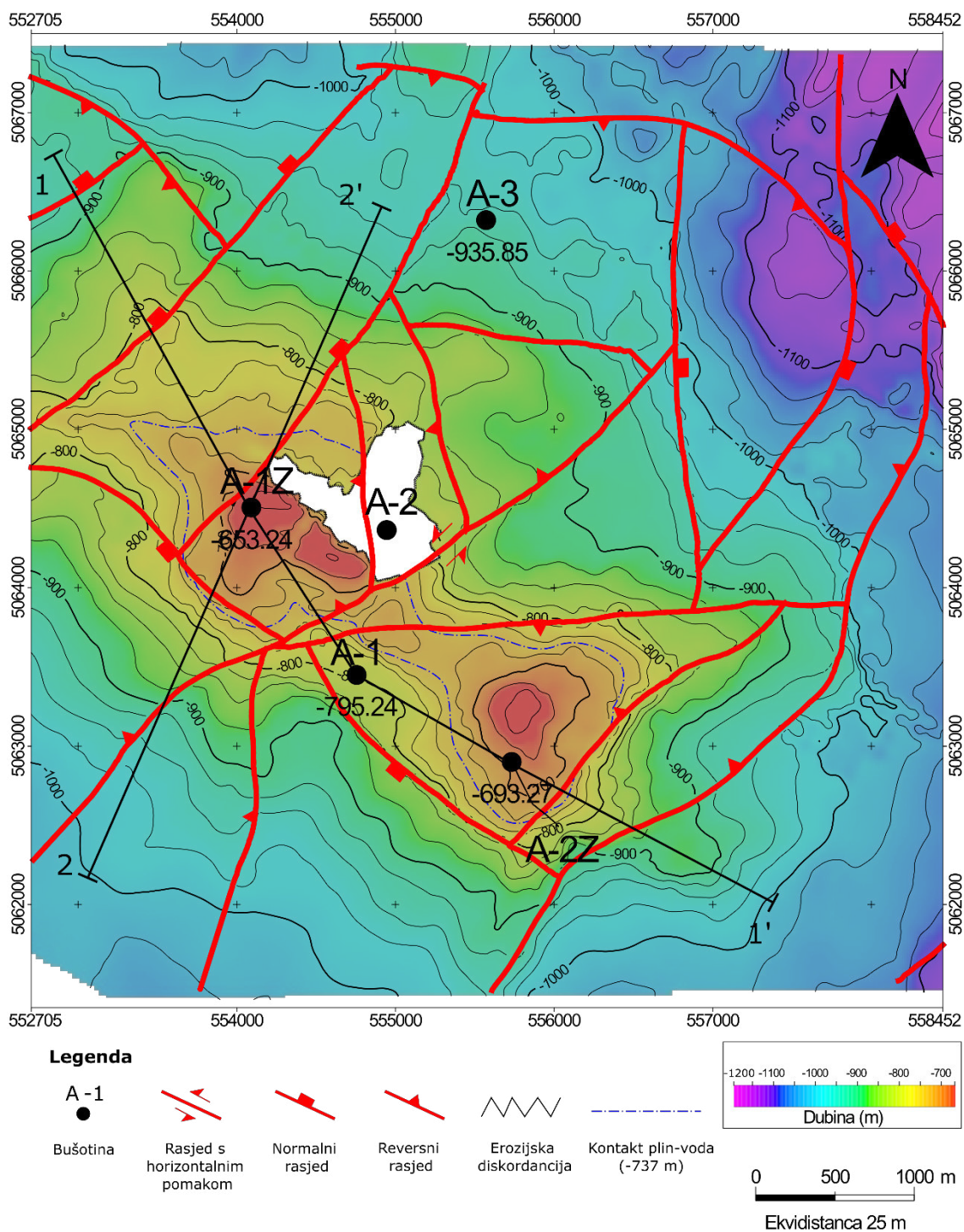
Na temelju interpretacije napravljene su sljedeće strukturne karte:

- strukturna karta po krovini metamorfita (temeljno gorje) (Slika 5-1),
- strukturna karta po krovini vapnenaca (Rs7) (Slika 5-2).

Sve strukturne karte ukazuju na postojanje izdužene antiklinale koja ima dva maksimuma. Na jednom vršnom dijelu antiklinale izbušena je bušotina A-1Z, a na drugom je izbušena usmjerena bušotina A-2Z. Duža os antiklinale pruža se pravcem sjeverozapad-jugoistok, a razlomljena je uzdužnim normalnim i reversnim rasjedima. Kontakt plin-voda je pretpostavljen na dubini od -737 m. Detaljna diskusija utvrđivanja kontakta plin-voda na Grubišnom Polju se nalazi u poglavlju 11.1.

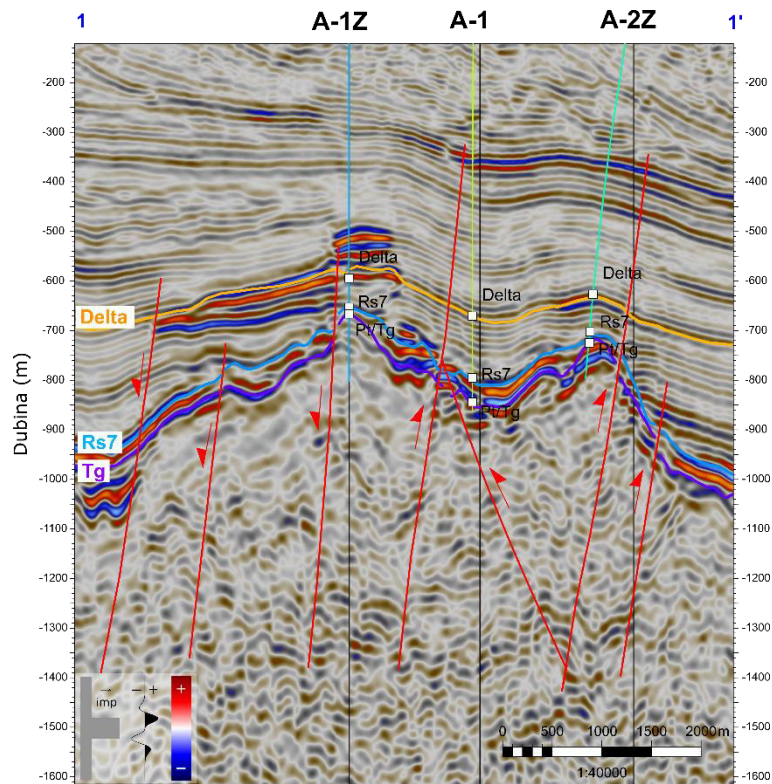


Slika 5-1 Strukturna karta po krovini metamorfita (temeljno gorje)

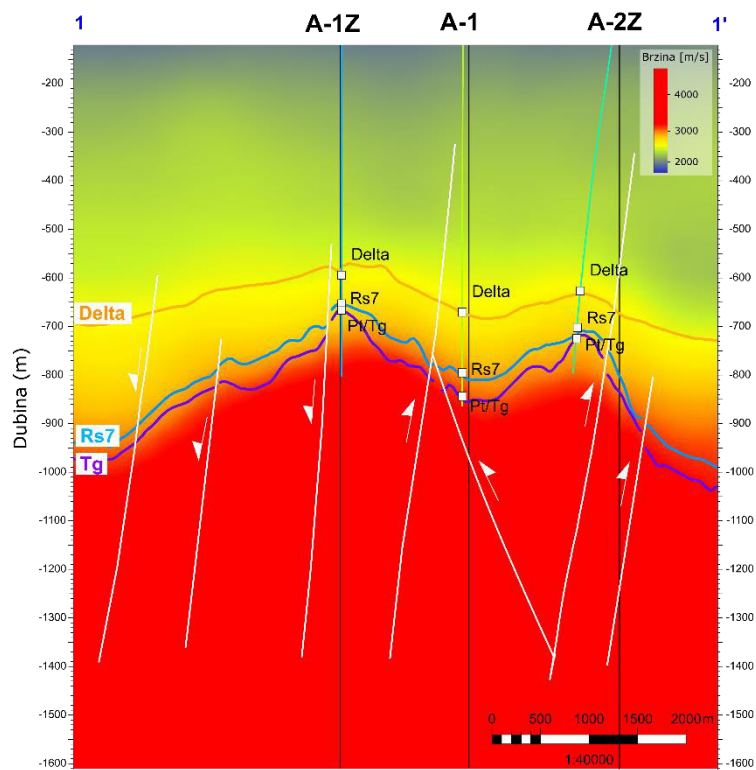


Slika 5-2 Strukturna karta po krovini vapnenaca (Rs7)

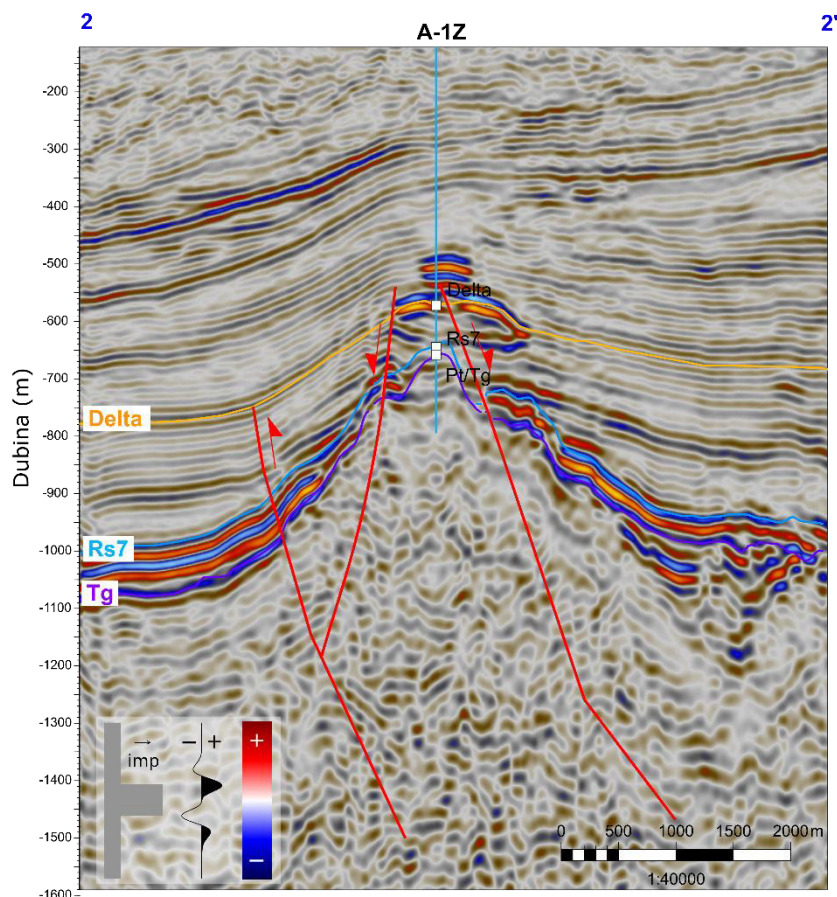
Vrijednosti interpretiranih dubina krovine ležišta u metamorfitima kreću se od -1240 do -660 m, dok se vrijednosti interpretiranih dubina ležišta u vapnencima kreću od -1220 do -630 m. Dvije antiklinalne strukture razdvojene su rasjedom sa subhorizontalnim lijevim pomakom i reversnim karakterom prema bušotini A-1Z. Najveći skok od 42 m definiran je na normalnom rasjedu zapadno od bušotine A-1Z.



Slika 5-3 Profil 1-1' s interpretiranim horizontima i rasjedima.

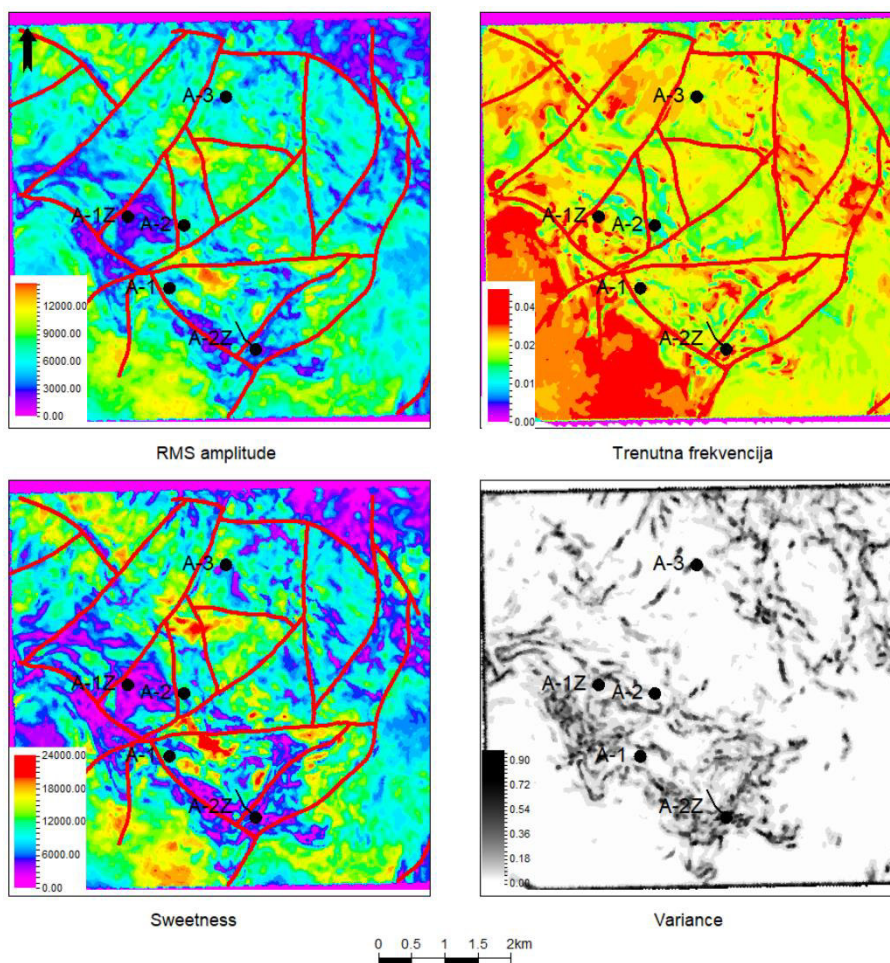


Slika 5-4 Profil 1-1' s prikazanim intervalnim brzinama iz 3D modela brzina



Slika 5-5 Profil 2-2' s interpretiranim horizontima i rasjedima

Analizom osnovnih seizmičkih atributa utvrđeno je prostorno rasprostiranje osnovnih fizikalnih svojstava ležišnih stijena (Slika 5-6). Analizom atributa RMS amplitude i *Sweetness-a* utvrđeno je da su niže vrijednosti ovih atributa rasprostranjene na strukturalno plićim dijelovima antiklinala, dok su visoke vrijednosti zastupljene u strukturalno dubljim dijelovima oko antiklinala. Visoke vrijednosti trenutne frekvencije utvrđene su na strukturalno plićim dijelovima antiklinala, dok su niže vrijednosti utvrđene na rubnim dijelovima antiklinala što upućuje na raspucanost na rubnim dijelovima antiklinala. Seizmički atribut varijanca prikazuje nagle prekide kontinuiteta seizmičkih refleksa te potvrđuje složene tektonske odnose na krilima antiklinala.

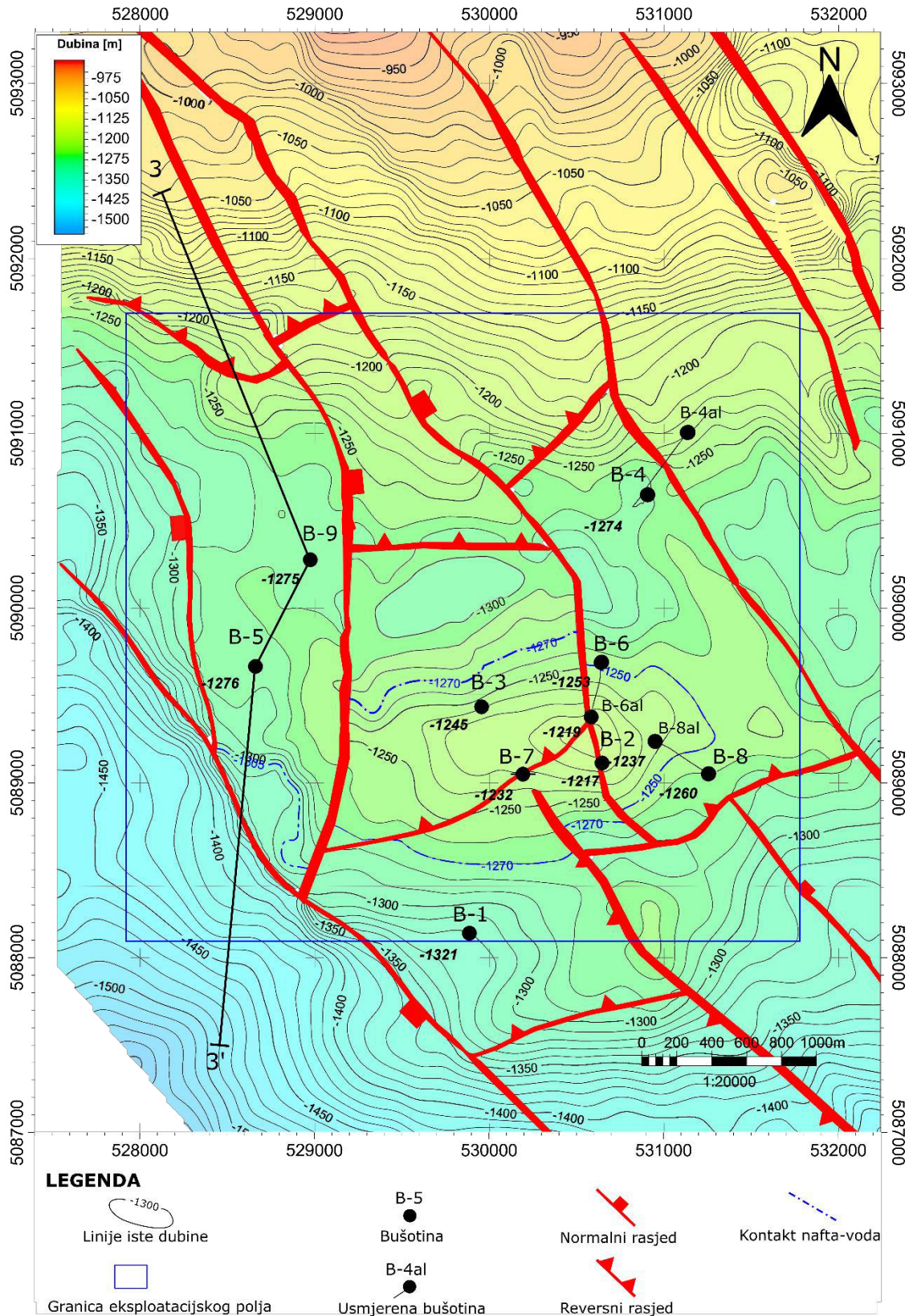


Slika 5-6 Karte seizmičkih atributa po krovini temeljnog gorja

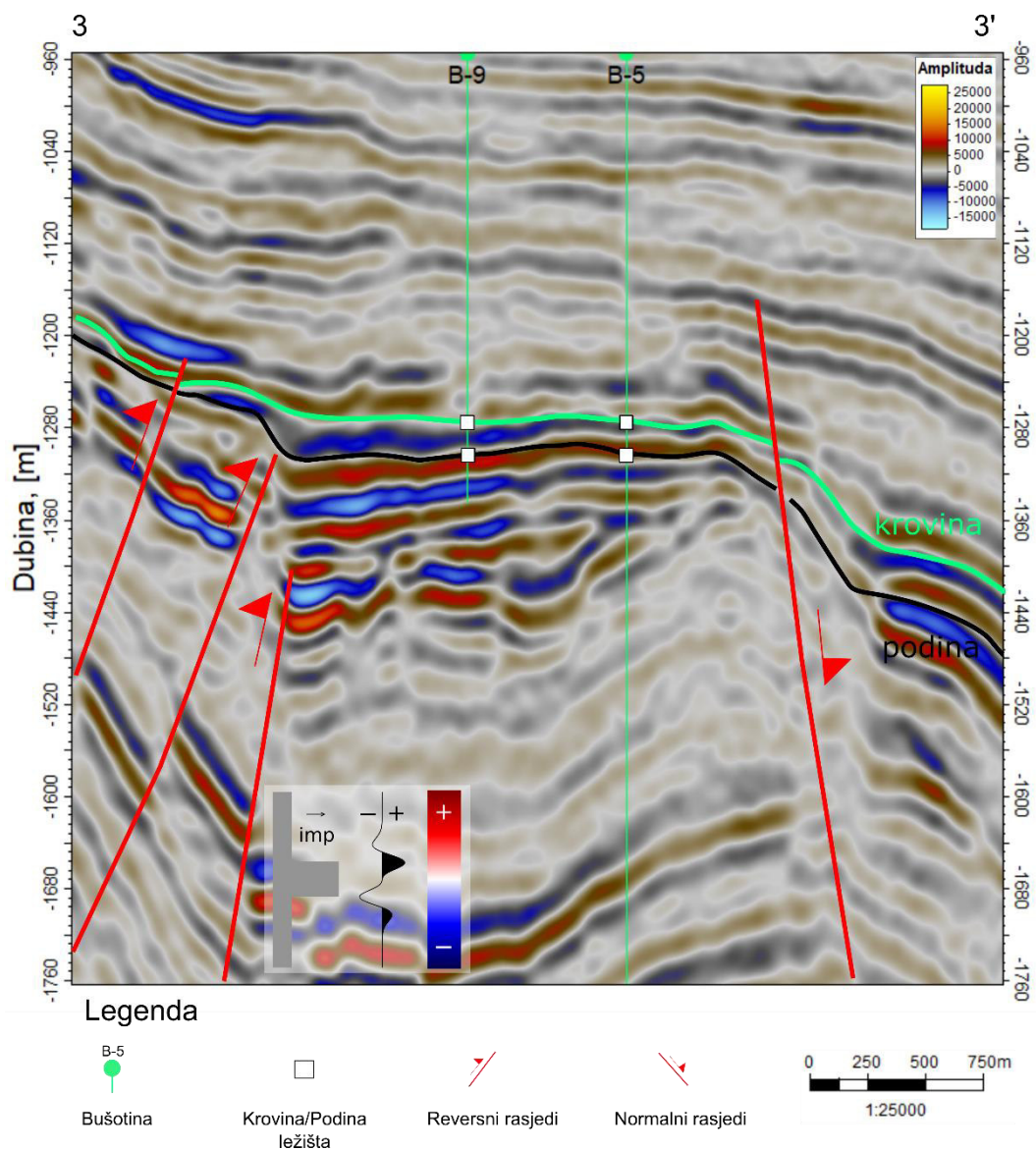
5.3 Strukturna interpretacija polja Letičani

Na polju Letičani interpretirano je ležište Koprivnički pješčenjaci, točnije dublji interval koprivničkih pješčenjaka. Na temelju korelacije bušotinskih i seizmičkih podataka sintetskim seizmogramom definirano je da krovina ležišta odgovara minimumu faze (Slika 5-8). Naime, ležište pripada dubljem intervalu Koprivničkih pješčenjaka te se iznad krovine ležišta nalazi također pješčenjak pa nema značajnije promjene akustičnih impedancija.

Vrijednosti interpretiranih dubina krovine ležišta kreću se od -1540 do -900 m (Slika 5-7), a strukturno-tektonski odnosi rezultirali su stvaranjem različitih hidrodinamičkih jedinica s različitim kontaktom nafta/voda, koji su potvrđeni mjerenjima na bušotinama (Slika 5-10). Na temelju strukturno-tektonskih odnosa i analize tlakova ležišta na bušotinama definirane su tri hidrodinamičke jedinice, tj. tektonska bloka s utvrđenim kontaktom nafta-voda na -1305 m, -1270 m i -1250 m (Vukadin et al., 2021) (Slika 5-10).

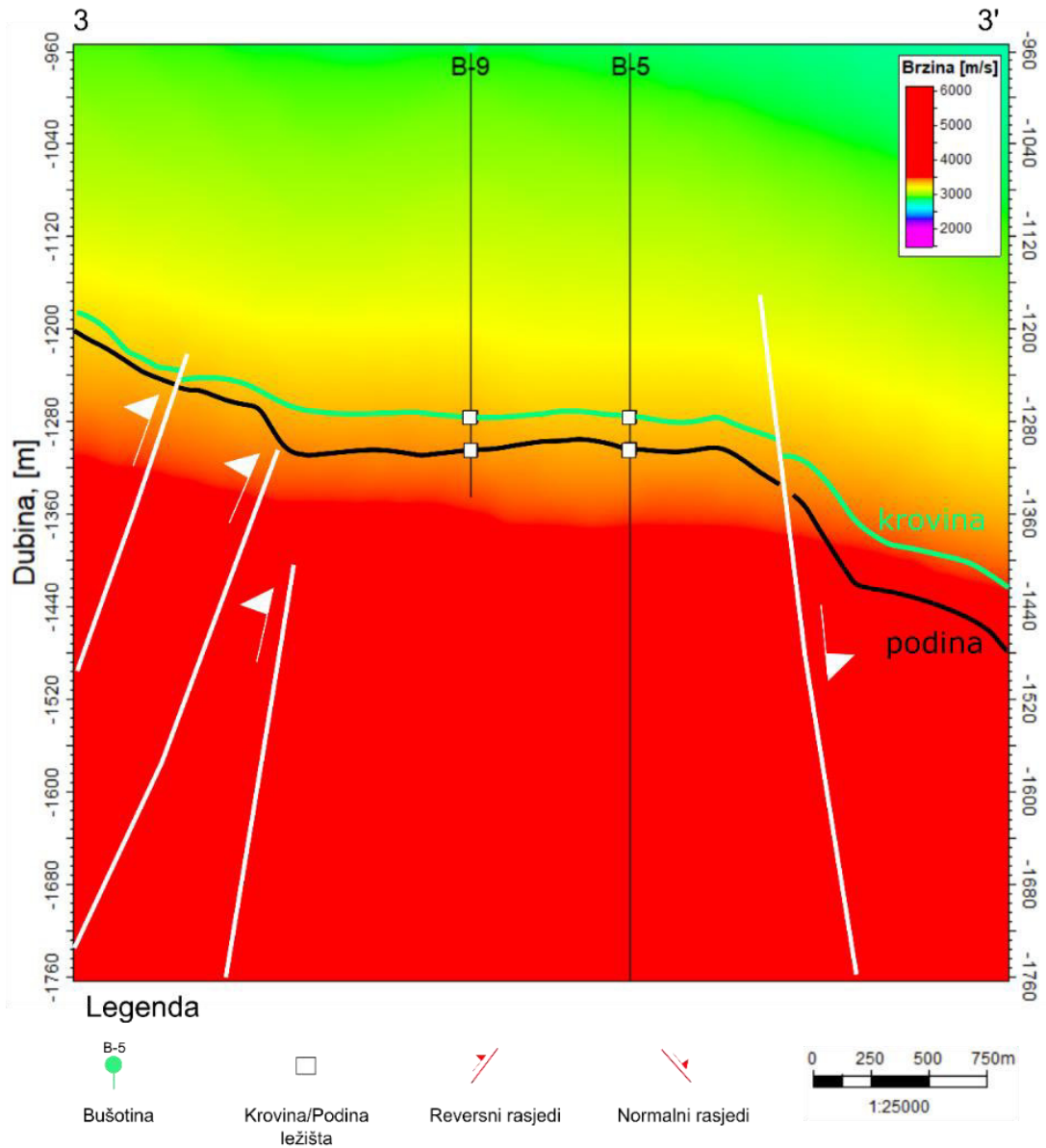


Slika 5-7 Strukturna karta krovine ležišta Koprivnički pješčenjaci

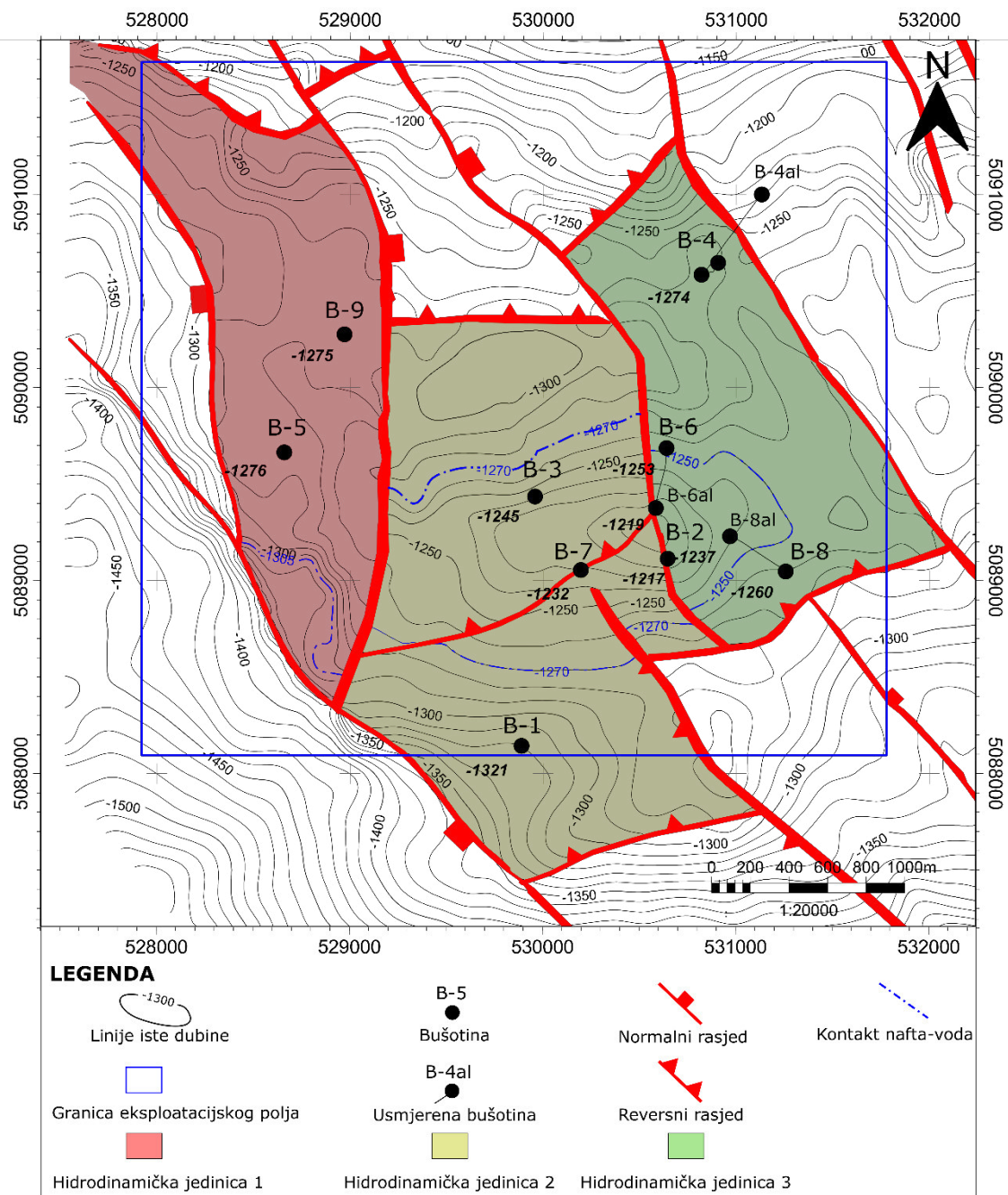


Slika 5-8 Profil 3-3' na polju Letičani s interpretiranim horizontima krovine i podine ležišta Koprivnički pješčenjaci

Interpretirana krovina i podina ležišta u vremenskoj domeni pretvorene su u dubinske horizonte pomoću 3D modela brzina korištenog za PSDM pretvorbu seizmičkog volumena iz vremenske domene u dubinsku (Slika 5-9).



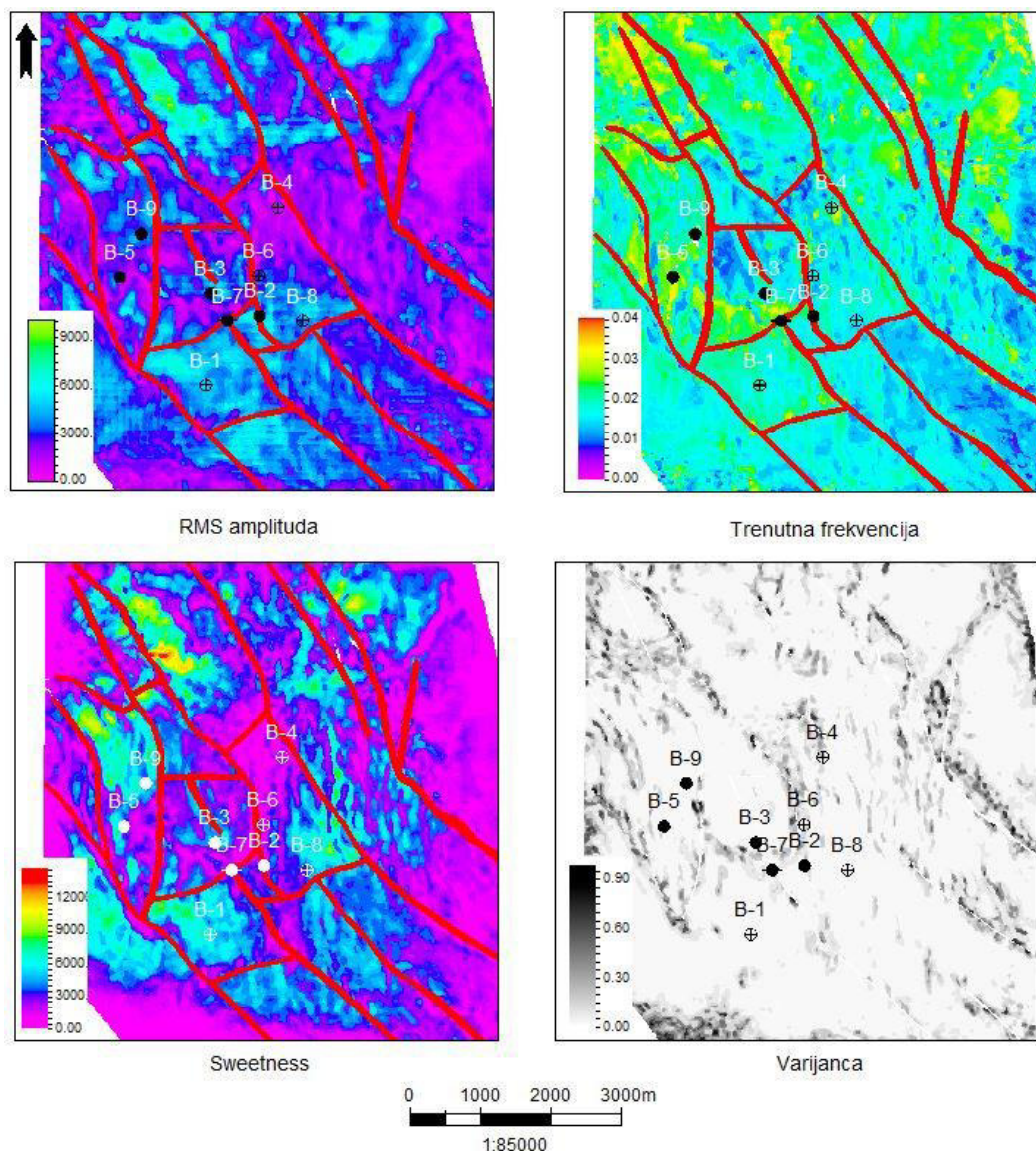
Slika 5-9 Profil 3-3' s prikazanim intervalnim brzinama iz 3D modela brzina



Slika 5-10 Karta hidrodinamičkih jedinica koje su definirane različitim kontaktom nafta-voda (prema Vukadin et al., 2021)

Nakon seizmičke interpretacije pristupilo se analizi i izradi seizmičkih atributa (Slika 5-11). Kompleksni seizmički tragovi odraz su fizikalnih karakteristika ležišta ugljikovodika. Cilj analize seizmičkih atributa je dobiti informacije o litološkim varijacijama u sedimentnim tijelima i lateralnim promjenama u kvaliteti ležišnih stijena. Napravljeni su osnovni atributi tragova i volumni atributi za ležište Koprivnički pješčenjaci.

Usporedbom seizmičkih atributa i eksploatacijskih podataka vidljiva je korelacija iz koje se kvantitativno može analizirati kvaliteta ležišta. RMS amplituda ima povišene vrijednosti atributa u prostoru oko bušotina B-5 i B-9 te bušotina B-3 i B-6AL koje su trenutno u proizvodnji. Takva korelacija indicira na dobra svojstva ležišnih stijena. *Sweetness* rezultira istim odnosima kao snaga refleksije, osobito u prostoru sjeverno, sjeverozapadno od bušotine B-9. Atribut varijanca potvrđuje interpretirani rasjedni sklop s glavnim setom rasjeda orijentacije SZ-JI.



Slika 5-11 Seizmički atributi krovine ležišta Koprivnički pješčenjaci

6 Osnove širenja seizmičkih valova

Geofizičke analize ležišta ugljikovodika temelje se na seizmičkim mjerenjima tj. umjetno izazvanim valovima koji se rasprostiru kroz stijene u podzemlju i vraćaju na površinu gdje se njihov nailazak detektira geofonima. Širenje elastičnih valova kroz stijene temelji se na teoriji linearne elastičnosti, prema kojoj je deformacija izravno proporcionalna naprezanju. Iako stijene općenito nisu linearno elastične, za dovoljno male promjene naprezanja za vrijeme širenja valova, može se pretpostaviti linearnost.

Postoje tri vrste seizmičkih valova, primarni ili kompresijski (P-valovi), sekundarni ili smični (S-valovi) i površinski valovi koji putuju duž površine Zemlje. Brzina širenja valova kroz stijene ovisi o elastičnim svojstvima stijena koja su opisana elastičnim modulima kao što su volumni modul (k), modul smicanja (μ), Youngov modul (E) i Poissonov koeficijent (ν).

Tablica 6-1 Korelacija elastičnih modula u izotropnom mediju (Sheriff, 2002)

	Modul P-vala M	Youngov modul E	Modul smicanja μ	Lame-ova konstanta λ	Volumni modul k	Poissonov koeficijent ν
E, ν	$\frac{E \cdot (1 - \nu)}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}$		$\frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$	$\frac{E \cdot \nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}$	$\frac{E}{3 \cdot (1 - 2\nu)}$	
E, μ	$\frac{\mu \cdot (4\mu - E)}{3\mu - E}$			$\mu \cdot \frac{E - 2\mu}{3\mu - E}$	$\frac{\mu \cdot E}{3 \cdot (3\mu - E)}$	$\frac{E - 2\mu}{2\mu}$
E, k	$\frac{3k \cdot (3k + E)}{9k - E}$		$\frac{3kE}{9k - E}$	$\frac{3k(3k + E)}{9k - E}$		$\frac{3k - E}{6k}$
k, ν	$\frac{3k \cdot (1 - \nu)}{1 + \nu}$	$3k \cdot (1 - 2\nu)$	$\frac{3k(1 - 2\nu)}{2 \cdot (1 + \nu)}$	$3 \cdot \frac{k \cdot \nu}{1 + \nu}$		
k, μ	$k + \frac{4\mu}{3}$	$\frac{9k \cdot \mu}{3k + \mu}$		$k - \frac{2\mu}{3}$		$\frac{3k - 2\mu}{2 \cdot (3k + \mu)}$
k, λ	$3k - 2\lambda$	$9k \cdot \frac{k - \lambda}{3k - \lambda}$	$\frac{3}{2} \cdot (k - \lambda)$			$\frac{\lambda}{3k - \lambda}$
μ, λ	$\lambda + 2\mu$	$\mu \cdot \frac{3\lambda + 2\mu}{\lambda + \mu}$			$\lambda + \frac{2}{3} \cdot \mu$	$\frac{\lambda}{2 \cdot (\lambda + \mu)}$
μ, ν	$2\mu \cdot \frac{1 - \nu}{1 - 2 \cdot \nu}$	$2\mu \cdot (1 + \nu)$		$\mu \cdot \frac{2\nu}{1 - 2\nu}$	$\frac{2\mu}{3} \cdot \frac{1 + \nu}{1 - 2\nu}$	
λ, ν	$\lambda \cdot \frac{1 - \nu}{\nu}$	$\lambda \frac{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}{\nu}$	$\lambda \cdot \frac{1 - 2\nu}{2\nu}$		$\lambda \cdot \frac{1 + \nu}{3\nu}$	

Brzina širenja kompresijskih i smičnih valova dana je izrazom:

$$V_p = \sqrt{\frac{M}{\rho}} \quad (6-1)$$

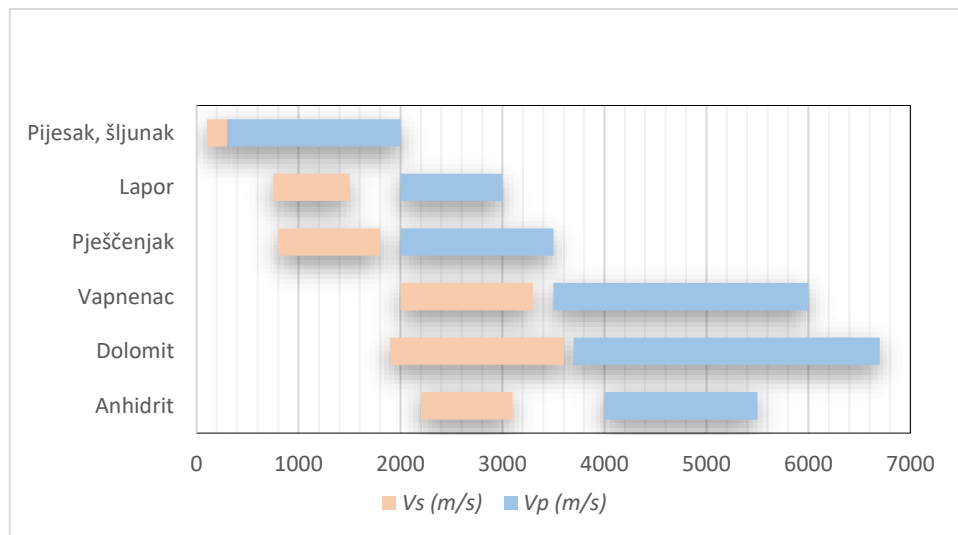
$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1-\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (6-1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (6-2)$$

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{2 \frac{1-\nu}{1-2\nu}} \quad (6-3)$$

gdje je V_p - brzina širenja P-valova, V_s - brzina širenja S-valova, M – modul P-valova, ρ – gustoća, ν – Poissonov koeficijent, λ – Lamé-ova konstanta, E – Youngov modul.

Stijene različitog litološkog sastava definirane su različitim mineralnim sastavom i stupnjem dijageneze, a time različitim vrijednostima elastičnih modula, no brzine ovise i o raspucanosti i šupljikavosti stijena pa postoji raspon vrijednosti brzina za svaku litologiju.



Slika 6-1 Raspon kompresijskih i smičnih brzina u stijenama različitog litološkog sastava (Schön, 2015)

Cilj interpretacije i analize seizmičkih podataka je povezati seizmički signal s litološkim sastavom i zasićenjem. Iz tablice na slici 6-1 vidljivo je da svaka litologija ima određeni raspon brzina, stoga seizmički odziv stijena ovisi o odnosu kompresijskih i smičnih brzina seizmičkog vala. Odnosi kompresijskih i posmičnih brzina seizmičkog vala ovise o litologiji, stupnju dijageneze, poroznosti, obliku i zasićenju pora i tlaku koji svi zajedno utječu na širenje seizmičkih valova. Definiranje zasićenja u stijenama zahtijeva znanje o promjenama elastičnih svojstava stijena, njihovom mineralnom sastavu i fluidima u porama, kao i model interakcije među njima. Modeliranje fizikalnih parametara (engl. *rock physics*) omogućuje povezivanje fizikalnih svojstava stijena i njihovog seizmičkog odziva, a ta veza omogućuje korelaciju brzina P-valova (V_p), brzina S-valova (V_s) i gustoću (ρ) stijena s modulima elastičnosti stijena.

Tijekom 1980-ih i 1990-ih godina uočene su prednosti primjene brzina S-valova u analizi ležišta ugljikovodika, jer se S-valovi drugačije „ponašaju“ u odnosu na P-valove te su S-valovi osjetljiviji i na najmanje zasićenje ugljikovodicima pa time omogućuju smanjenje rizika od lažnih bijelih mrlja (engl. *bright spot*). Stoga je tijekom protekla četiri desetljeća definirano niz empirijskih odnosa V_p - V_s , ili V_p - Φ - V_s . Ti empirijski odnosi temelje se na laboratorijskim ili bušotinskim podacima i stoga imaju pretpostavke koje se moraju zadovoljiti kako bi se odnosi mogli smisleno primijeniti.

Nur et al. (1991) su predložili da bi brzine P- i S-valova u stijeni trebaju imati vrijednosti između vrijednosti brzina rasprostiranja u samim mineralnim zrnima (minimalna poroznost) koji izgrađuju stijenu i brzina rasprostiranja u visoko poroznim stijenama zasićenih fluidom. Njihov prijedlog temelji se na opažanju da većina poroznih materijala ima kritičnu poroznost, ispod koje su mineralna zrna u kontaktu, a iznad vrijednosti kritične poroznosti stijena postaje suspenzija.

6.1 Empirijski odnosi brzine i poroznosti

- **Wyllieva formula**

Istraživanja Wyllie et al. (1956, 1958, 1963) su pokazala da se relativno statistički pouzdan odnos između brzine i poroznosti u sedimentnim stijenama može utvrditi kada: (1) stijene imaju relativno ujednačen mineralni sastav, (2) su zasićene tekućinom i (3) su pod visokim efektivnim tlakom. Wyllie et al. Definirali su te odnose izrazom:

$$\frac{1}{V_p} = \frac{\Phi}{V_{pfl}} + \frac{1 - \Phi}{V_{p0}} \quad (6-4)$$

gdje je V_p brzina P-valova u zasićenoj stijeni, V_{p0} brzina P-valova u matriksu (ili zrnu), V_{pfl} brzina P-valova u fluidu, a Φ poroznost. Ova jednadžba se često koristi za određivanje poroznosti dobro konsolidiranih pješčenjaka.

Jednadžba (6-5) definira da je brzina u ležištu zasićenom plinom manja nego za ležišta zasićena naftom. Wyllieva jednadžba primjenjiva je za dobro konsolidirane pješčenjake koji imaju poroznosti u rasponu od 10% do 25%, ali precjenjuje brzinu P-valova pri velikim poroznostima ili niskom efektivnom naprezanju te za slabo konsolidirane stijene. Wyllieva jednadžba obično ne predviđa pravilno učinak promjene sastava ugljikovodika na seizmičke brzine i ne bi se trebala koristiti u tu svrhu.

- **Hanova empirijska jednadžba**

Han (1986) je ustanovio empirijske odnose na temelju laboratorijskih mjerenja ultrazvučnih brzina, pod različitim efektivnim tlakovima s obzirom na poroznost i volumen minerala glina u uzorcima. Mjerenja su provedena na 80 uzoraka dobro konsolidiranih pješčenjaka iz Meksičkog zaljeva s rasponom poroznosti (Φ) od 3% do 30% i volumnim udjelima minerala glina (C), u rasponu od 0% do 55%. Rezultati su pokazali da se brzine u čistom pješčenjaku mogu empirijski povezati s poroznošću i to s vrlo velikom točnošću, a definirani su empirijskim izrazima 6-8 do 6 - 17.

Empirijski odnosi čistih pješčenjaka, zasićenih vodom, definirani na 10 uzoraka. Vrijednosti V_p i V_s izražene su u km/s:

$$40 \text{ MPa} \quad V_p = 6,08 - 8,06 \Phi \quad (6-5)$$

$$40 \text{ MPa} \quad V_s = 4,06 - 6,28 \Phi \quad (6-6)$$

Empirijski odnosi glinovitih pješčenjaka, zasićenih vodom, definirani na 70 uzoraka uz efektivne tlakove između 5 i 40 MPa:

$$40 \text{ MPa} \quad V_p = 5,59 - 6,93 \Phi - 2,18C \quad (6-7)$$

$$40 \text{ MPa} \quad V_s = 3,52 - 4,91 \Phi - 1,89C \quad (6-8)$$

$$30 \text{ MPa} \quad V_p = 5,55 - 6,93 \Phi - 2,18C \quad (6-9)$$

$$V_s = 3,47 - 4,84 \Phi - 1,87C \quad (6-10)$$

20MPa

$$V_p = 5,49 - 6,94 \Phi - 2,17C \quad (6-11)$$

$$V_s = 3,39 - 4,73 \Phi - 1,81C \quad (6-12)$$

10 MPa

$$V_p = 5,39 - 7,08 \Phi - 2,13C \quad (6-13)$$

$$V_s = 3,29 - 4,73 \Phi - 1,74C \quad (6-14)$$

5 MPa

$$V_p = 5,26 - 7,08 \Phi - 2,02C \quad (6-15)$$

$$V_s = 3,16 - 4,77 \Phi - 1,64C \quad (6-16)$$

- **Empirijski odnos Castagna i ostali (1985)**

Na temelju laboratorijskih mjerenja, Castagna et al. (1985) utvrdili su empirijske odnose s obzirom na poroznost i volumen minerala gline u uzorcima. Za lapore (klastična silikatna stijena sastavljena uglavnom od gline i karbonatnih čestica veličine mulja) utvrdili su odnos V_p i V_s (u km/s):

$$V_p = 1,36 + 1,16V_s \text{ [km/s]} \quad (6-17)$$

gdje su V_p i V_s brzina P- i S-valova u km/s. Za glinovite pješčenjake formacije Frio, u Teksasu, SAD definirani su odnosi:

$$V_p = 5,81 - 9,42 \Phi - 2,21C \text{ [km/s]} \quad (6-18)$$

$$V_s = 3,89 - 7,07 \Phi - 2,04C \text{ [km/s]} \quad (6-19)$$

gdje je Φ poroznost, a C volumni udio glina.

6.2 Empirijski odnosi brzina V_p - V_s

Odnosi brzina V_p - V_s ključni su za određivanje litološkog sastava stijena na temelju karotažnih podataka, kao i za kvantitativnu seizmičku karakterizaciju ležišta, kao što je npr. AVO analiza. Zbog nedostatka snimljenih brzina S-valova mnogi autori su definirali empirijske odnose brzina na temelju laboratorijskih i karotažnih podataka.

Castagna (1993) je prikazao razvoj empirijskih odnosa brzina. Bitno je napomenuti da se znanstveni radovi temelje na osnovnim pretpostavkama da su pore zasićene jednom fazom,

vodom ili zrakom i međusobno su povezane. Stoga se ovi empirijski odnosi mogu izravno primjenjivati na ležišta zasićena vodom, a za ležišta zasićena ugljikovodicima potrebno je primijeniti Gassmannovu zamjenu fluida (vidi poglavlje 7).

Na temelju ultrazvučnih ispitivanja brzina na uzorcima Castagna (1993) definirao je empirijske odnose za stijene različitog litološkog sastava:

- *Pješčenjaci i lapor*

$$V_s = 0,804V_p - 0,856 \text{ [km/s]} \quad (6-20)$$

- *Vapnenci*

$$V_s = -0,055V_p^2 + 1,017V_p - 1,031 \text{ [km/s]} \quad (6-21)$$

- *Dolomiti*

$$V_s = 0,583V_p - 0,078 \text{ [km/s]} \quad (6-22)$$

Greenberg i Castagna (1992) definirali su opću korelaciju brzina V_p i V_s za polimineralne, vodom zasićene stijene na temelju empirijskih odnosa. Brzine S-valova se lako izračunaju pomoću koeficijenata korelacije definiranih za svaku litologiju.

$$V_s = a_0 + a_1V_p + a_2V_p^2 \text{ [km/s]} \quad (6-23)$$

a koeficijenti su dani u Tablici 6-2.

Tablica 6-2. Koeficijenti Greenberg-Castagna korelacije za stijene različitog litološkog sastava

Litologija	a_2	a_1	a_0	R^2
Pješčenjak	0	0,80416	-0,85588	0,98352
Vapnenac	-0,05508	1,01677	-1,03049	0,99096
Dolomit	0	0,58321	-0,07775	0,87444
Lapor	0	0,76969	-0,86735	0,97939

7 Modeliranje fizikalnih parametara stijena

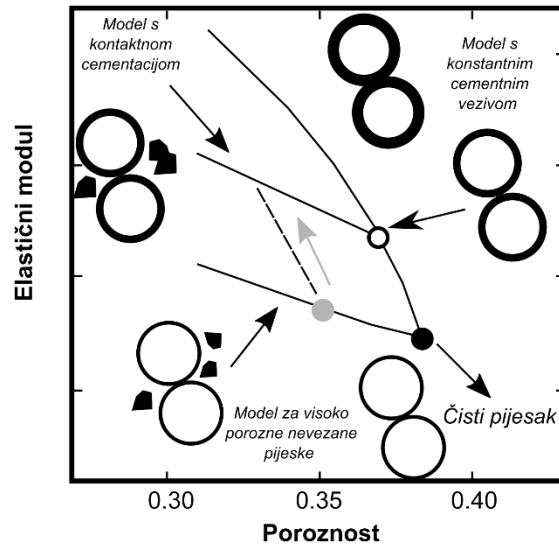
Modeliranje fizikalnih parametara stijena (engl. *rock physics*) se posljednje desetljeće nametnulo kao novi pristup u kvantitativnoj seizmičkoj karakterizaciji ležišta ugljikovodika. *Rock Physics* povezuje elastična (fizikalna) svojstva stijena s mineraloškim sastavom, poroznošću, oblikom pora, zasićenjem, propusnošću, itd. Glavni cilj ove metode je razumjeti kako litološki sastav, poroznost, efektivno naprezanje, porni tlak, tip zasićenja stijena, anizotropija i temperatura utječu na brzine kompresijskih (V_p) i smičnih (V_s) valova u stijenama i obrnuto (King, 2005). Modeliranje ima važnu ulogu u povezivanju elastičnih parametara dobivenih seizmičkom inverzijom (impedancija, gustoća, omjer V_p/V_s) sa značajkama ležišta kao što su litološki sastav, kompakcija, zasićenje fluidima i poroznost.

Modeliranje se temelji na petrofizikalnim podacima, geološkim podacima o stijenama i laboratorijskim rezultatima elastičnih vrijednosti stijena i fluida. Na temelju takvih podataka modeliraju se seizmički odrazi za različite ležišne uvjete, mijenjajući parametre ležišta kao što su poroznost, zasićenje, volumni udjeli minerala i/ili litološki sastav, koji se uspoređuju sa snimljenim seizmičkim podacima.

7.1 Modeli čvrstih elastičnih medija

Postoji više *rock physics* modela koji opisuju različite vrste stijena: pješčenjake, lapore i karbonatne stijene. Najpoznatiji modeli su definirani za pješčenjake (Slika 7-1):

- model za visoko porozne nevezane pijeske (engl. *Friable-sand model*; Dvorkin i Nur, 1996)
- model s kontaktnom cementacijom (engl. *Contact cement model*) – tijekom litifikacije pijesci postaju pješčenjaci s cementnim vezivom. Vezivo može biti dijagenetski kvarc, kalcit, albit ili druga mineralna ispuna.
- model s konstantnim cementnim vezivom (engl. *Constant cement model* Avseth et al., 2000) – predstavlja ideju da svi pijesci različitog sortiranja i poroznosti imaju jednak volumen mineralne ispune. Kompakcija i mineralizacija uslijed toka fluida u porama utječe na smanjenje poroznosti.



Slika 7-1 Shema tri modela za pješčenjake. Modul elastičnosti može biti volumni modul ili modul smicanja (prema Avseth et al., 2000)

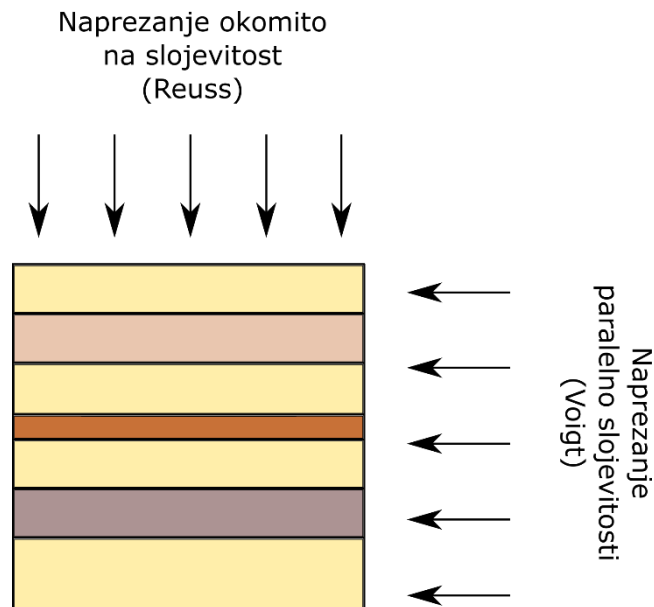
Osnovna pretpostavka modela za čisti pijesak je pravilno pakiranje identičnih zrnaca kvarca koji u početku imaju kritičnu poroznost koja se smanjuje zbog kompaktacije, cementacije ili taloženja čestica gline. Na slici 7-1 prikazani su odnosi poroznosti i elastičnih modula za različite modele. Vidljivo je da čisti pijesak ima visoke vrijednosti poroznosti i male vrijednosti elastičnih modula, a procesom cementacije i kompaktacije smanjuje se poroznost te se povećavaju vrijednosti elastičnih modula (model s konstantnim cementnim vezivom). U modelu s kontaktnom cementacijom vrijednosti poroznosti i elastičnih modula rasti tijekom istog procesa. Ovi modeli su važni za klastične stijene, jer se na malim dubinama (0 – 2 km) poroznost smanjuje uglavnom kompaktacijom, a na dubinama većim od 2 km nastupa cementacija koja utječe na elastična svojstva stijena (Avseth et al., 2000). Ovakvi jednostavni modeli izbjegavaju korištenje kompliciranih idealizacija i aproksimacija elastičnih svojstava stijena. Apsolutnu gornju i donju granicu elastičnih svojstava za bilo koju izotropnu ili anizotropnu stijenu može se definirati s Reuss (1929) i Voigt (1928) modelom.

$$M_R = \sum_{i=1}^N \left(\frac{V_i}{M_i} \right)^{-1} \quad (7-1)$$

$$M_V = \sum_{i=1}^N V_i M_i \quad (7-2)$$

gdje su M_R , M_V - elastični modul (npr. volumni modul, modul smicanja) za Reuss i Voigt model, V_i - volumni udio frakcije i , M_i - elastični modul frakcije i .

S fizikalnog stajališta Reuss-ov model definira ekvivalentno naprezanje na sve slojeve koje je primijenjeno okomito na slojevitost, dok Voigt definira ekvivalentno naprezanje primijenjeno paralelno slojevitosti (Slika 7-2). Hill je (1952) radi pojednostavljenja definiranja elastičnih svojstava stijena definirao elastična svojstva kao aritmetičku sredinu Voigt i Reuss modela, koja se u literaturi naziva Voigt-Reuss-Hill model.



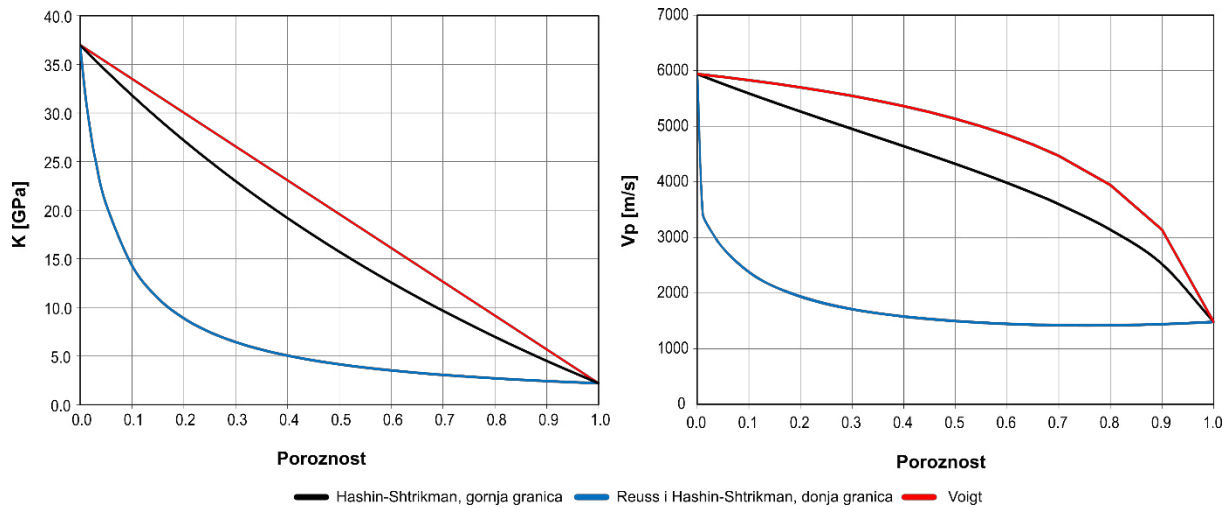
Slika 7-2 Različiti koncepti naprezanja za model Reuss i Voigt (prema Schön, 2015)

Hashin i Shtrikman (1963) predstavili su sofisticiraniji model graničnih vrijednosti (Slika 7-3 i Slika 7-4). Donja granica predstavlja sferičnu mineralnu građu s krutom jezgrom, a gornja granica predstavlja sferičnu mineralnu građu s mekšom jezgrom. Donja granica identična je Reussovoj granici.

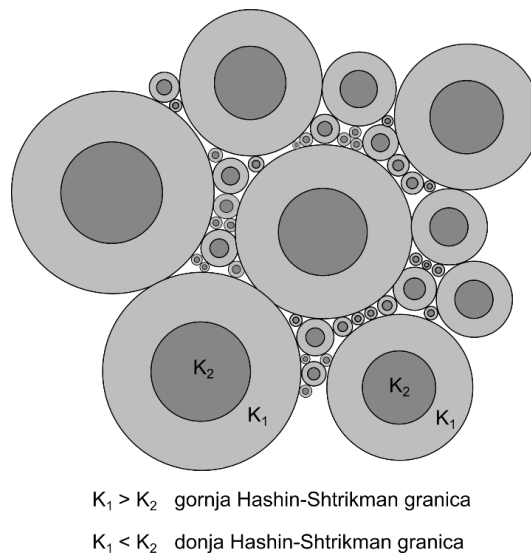
$$K^{HS\pm} = K_1 + \frac{V_2}{(K_2 - K_1)^{-1} + V_1 \left(K_1 + \frac{4}{3} \mu_1 \right)^{-1}} \quad (7-3)$$

$$\mu^{HS\pm} = \mu_1 + \frac{V_2}{(\mu_2 - \mu_1)^{-1} + \frac{2V_1(K_1 + 2\mu_1)}{5\mu_1 \left(K_1 + \frac{4}{3} \mu_1 \right)}} \quad (7-4)$$

gdje su: K^{HS} , K_1 , K_2 - volumni moduli; μ^{HS} , μ_1 , μ_2 - moduli smicanja; V_1 , V_2 - volumni udjeli litologije 1 i 2.



Slika 7-3 Dijagram ovisnosti volumnog modula i kompresijskih brzina (V_p) za različite elastične modele



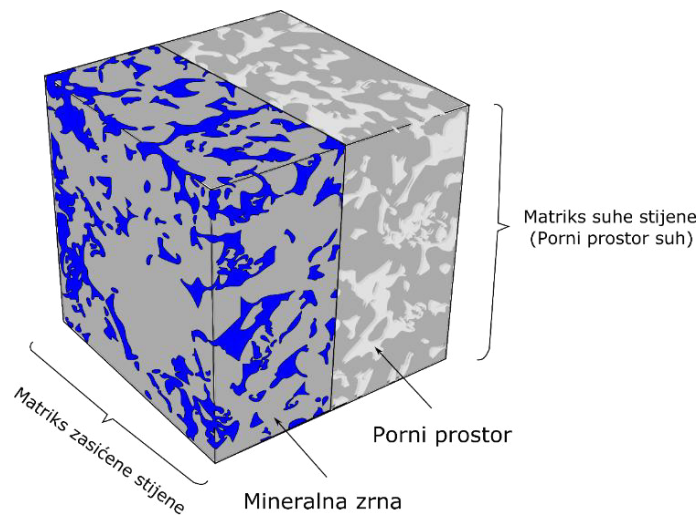
Slika 7-4 Fizikalno značenje Hashin-Shtrikman granica za volumni modul stijene sastavljene od dva minerala (Mavko et al., 2009)

Uzimajući u obzir geološke značajke, zasićenje fluidima, elastična svojstva fluida i stijena, na temelju Gassmann-Biot teorije (Gassmann, 1951; Biot, 1956) i različitih korelacijskih parametara (Mavko et al., 2009) izrađuju se sintetski seizmički odrazi čime se umanjuje problem seizmičke višeznačnosti prilikom karakterizacije ležišta.

Ključni koncept u tumačenju seizmičkih amplituda je razumijevanje utjecaja promjene fluida kojim je zasićena stijena, na njena elastična svojstva, na primjer, zamjene slojne vode

ugljikovodicima. Jednadžbe brzine širenja seizmičkih valova postaju komplicirane za određivanje elastičnih modula, gustoće i brzine kompresijskih i smičnih valova, stoga seizmički odziv ovisi o vrsti fluida u porama. Uobičajeno polazište za modeliranje učinaka zamjene fluida u porama na seizmičke frekvencije je Gassmannova jednadžba (Gassmann, 1951). Njome se stijene opisuju u smislu glomaznih modula dvofaznog medija (porni fluidi i matriks stijene). Odnosi se na predviđanje brzina u stijenama zasićenim slojnom vodom, plinom ili naftom (Slika 7-5). Ona omogućuje izračun volumnog modula zasićene stijene K_{sat} pomoću volumnog modula nezasićene porozne stijene (suhe stijene) K_d , volumnih modula minerala koji formiraju stijenu (matriks) K_m , volumnog modula pornih fluida K_f i poroznosti stijena Φ .

$$K_{sat} = K_d + \frac{\left(1 - \frac{K_d}{K_m}\right)^2}{\frac{\Phi}{K_f} + \frac{1 - \Phi}{K_m} + \frac{K_d}{(K_m)^2}} \quad (7-5)$$



Slika 7-5 Ilustracija matriksa stijene

Rock physics obrasci koji opisuju korelaciju brzine i poroznosti za visoko porozne pješčenjake predstavljeni su od Dvorkin i Nur (1996). Bosch et al. (2010) prikazao je postupke seizmičke inverzije koji uključuju *rock physics* i geostatističku analizu, dok su Avseth et al. (2010) sistematično prikazali različite *rock physics* modele i pristupe.

Ødegaard i Avseth (2004) predstavili su *rock physics* obrasce koji olakšavaju litološku interpretaciju i zasićenja stijena, kao i definiranje elastičnih parametara stijena (Slika 7-6). Obrazac definira trendove poroznosti za stijene različitog litološkog sastava i zasićenja

7.2 Modeli čvrstih elastičnih medija s inkluzijama

Za karbonatne stijene se primjenjuju modeli s inkluzijama. Modeli inkluzija pretpostavljaju teorijski elastični čvrsti medij bez pora u koji se uvrštavaju inkluzije različitih oblika i koncentracija. Pristup je drukčiji u odnosu na stijene građene od klastita, ali odgovara karbonatnim stijenama koje mogu imati različite oblike pora.

Razlikuju se modeli s inkluzijama koji stijenu idealiziraju kao elastični medij s pukotinama ili porama, koje su nasumično orijentirane (Kuster i Toksöz, 1974; Budiansky i O'Connell, 1976), ili paralelno orijentirane (Hudson, 1981).

7.2.1 Model Kuster-Toksöz

Kuster i Toksöz (1974) su predstavili izraze za elastične parametre stijena koristeći teoriju raspršenja seizmičkih valova velike valne duljine s pretpostavkom malih koncentracija pora u stijeni. Temeljem njihove teorije izrazi za efektivne module K i μ uz nasumično orijentirane pore ili pukotine glase (Kuster i Toksöz, 1974; Berryman, 1980):

$$(K_{KT} - K_m) \frac{K_m + \frac{4}{3} \mu_m}{K_{KT} + \frac{4}{3} \mu_m} = \sum_{i=1}^N \chi_i (K_i - K_m) P^{mi} \quad (7-6)$$

$$(\mu_{KT} - \mu_m) \left(\frac{\mu_m + \xi_m}{\mu_{KT} + \xi_m} \right) = \sum_{i=1}^N \chi_i (\mu_i - \mu_m) Q^{mi} \quad (7-7)$$

$$\xi = \frac{\mu (9K + 8\mu)}{6 (K + 2\mu)} \quad (7-8)$$

gdje su: K_{KT} , μ_{KT} - efektivni moduli stijene, K_m , μ_m - moduli matriksa stijene, K_i , μ_i - moduli pora ili pukotina stijene, χ - volumna koncentracija pora ili pukotina, P^{mi} , Q^{mi} - koeficijenti oblika pora ili pukotina.

Koeficijenti P^{mi} , Q^{mi} definiraju oblik pora/pukotina i odnose se na značajke matriksa stijene i značajke pora ili pukotina (Berryman, 1995 i Mavko et al., 2009).

7.2.2 Model Xu-Payne

Model Xu-Payne (Xu i Payne, 2009), također poznat kao prošireni model Xu-White (Xu i White, 1995) definira porni prostor za karbonatne stijene i to kao povezane pore, izolirane pore i mikro pukotine, a ukupna poroznost definirana je izrazom 7-9. Mikropukotine su definirane kao izolirane, fluidom zasićene pore koje ne mogu otpustiti porni tlak. Model Xu-

Payne na izolirani porni prostor ne primjenjuje Gassmannovu zamjenu fluida. Ovaj model daje odnose P- i S-brzina za klasične i karbonatne stijene.

$$\Phi_{uk} = \Phi_{gline} + \Phi_{pukotine} + \Phi_{meduzrska} + \Phi_{izolirane\ pore} \quad (7-9)$$

Izolirani porni prostor u glinama (Φ_{gline}) se odnosi na prisutnost gline i silta u karbonatnim stijenama. Prema Xu i White, (1995) udio Φ_{gline} se definira izrazom:

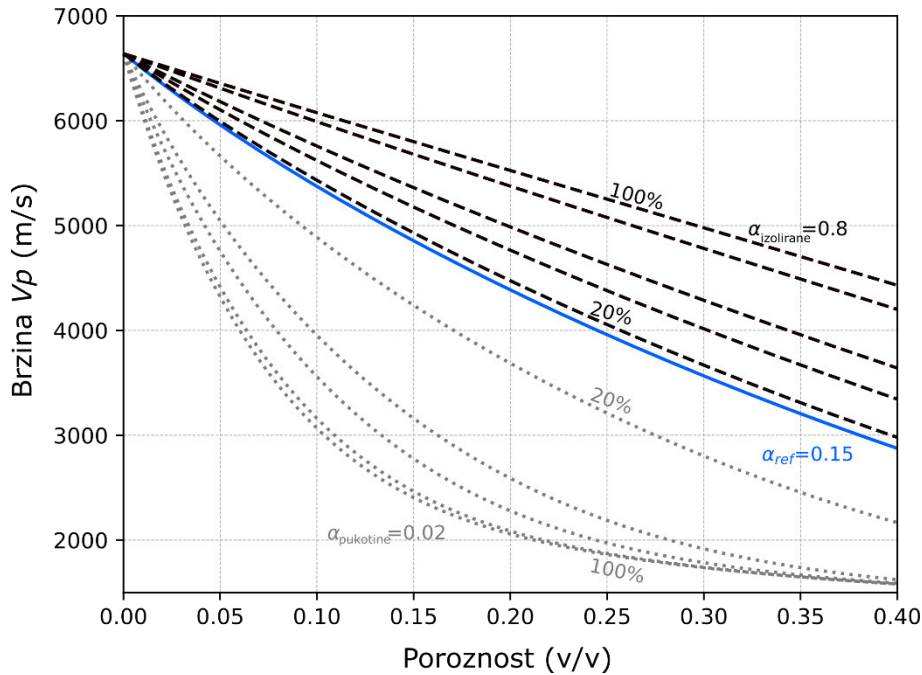
$$\Phi_{gline} = V_{sh} \Phi_{uk} \quad (7-10)$$

gdje je V_{sh} volumni udio šejla, a Φ_{uk} ukupna poroznost. Pukotinska poroznost je posljedica efektivnog naprezanja. Pukotinska poroznost ovisi o efektivnom naprezanju (σ_e) i početnoj poroznosti (Φ_0) u stanju bez efektivnog naprezanja i koeficijentu β koji ovisi o odnosu brzina P i S-valova pri različitim vrijednostima naprezanja.

$$\Phi_{pukotine} = \Phi_0 e^{-\beta \sigma_e} \quad (7-11)$$

Međuzrska poroznost je karakteristična za sedimentne stijene, a u karbonatima je povezana s ranom fazom dijageneze karbonata. Izolirane krute pore su posljedica procesa otapanja u karbonatnim stijenama.

Na promjenu brzine širenja seizmičkih valova u karbonatnim stijenama veliku ulogu imaju mikropukotine i izolirane krute pore, jer se povećanjem volumena takvih pora mijenjaju elastična svojstva stijene, a time i brzine širenja seizmičkih valova. U modelu se pore definiraju koeficijentom pora (α) koji definira omjer duljina poluosi elipse te time definira oblik i veličinu pora ($\alpha = 1$ oblik kružnice, $\alpha < 1$ oblik elipse, $\alpha \ll 1$ oblik pukotine) (Slika 7-7).



Slika 7-7 Odnos brzina i poroznosti za različite vrijednosti koeficijenta pora prema modelu Xu-Payne (Xu i Payne, 2009)

7.3 Elastična svojstva fluida

Fizikalna svojstva fluida u ležištu ovise o svojstvima svake komponente koje čini fluid (slojna voda, plin, nafta). Princip definiranja volumnih modula ležišnih fluida je sličan definiranju elastičnih parametara stijena. Ako su sve pojedinačne komponente ležišnih fluida u savršenoj hidrauličkoj komunikaciji onda se volumni modul definira koristeći Wood-ovu formulu (Wood, 1955):

$$\frac{1}{K_{fl}} = \frac{S_w}{K_w} + \frac{S_g}{K_g} + \frac{S_o}{K_o} \quad (7-12)$$

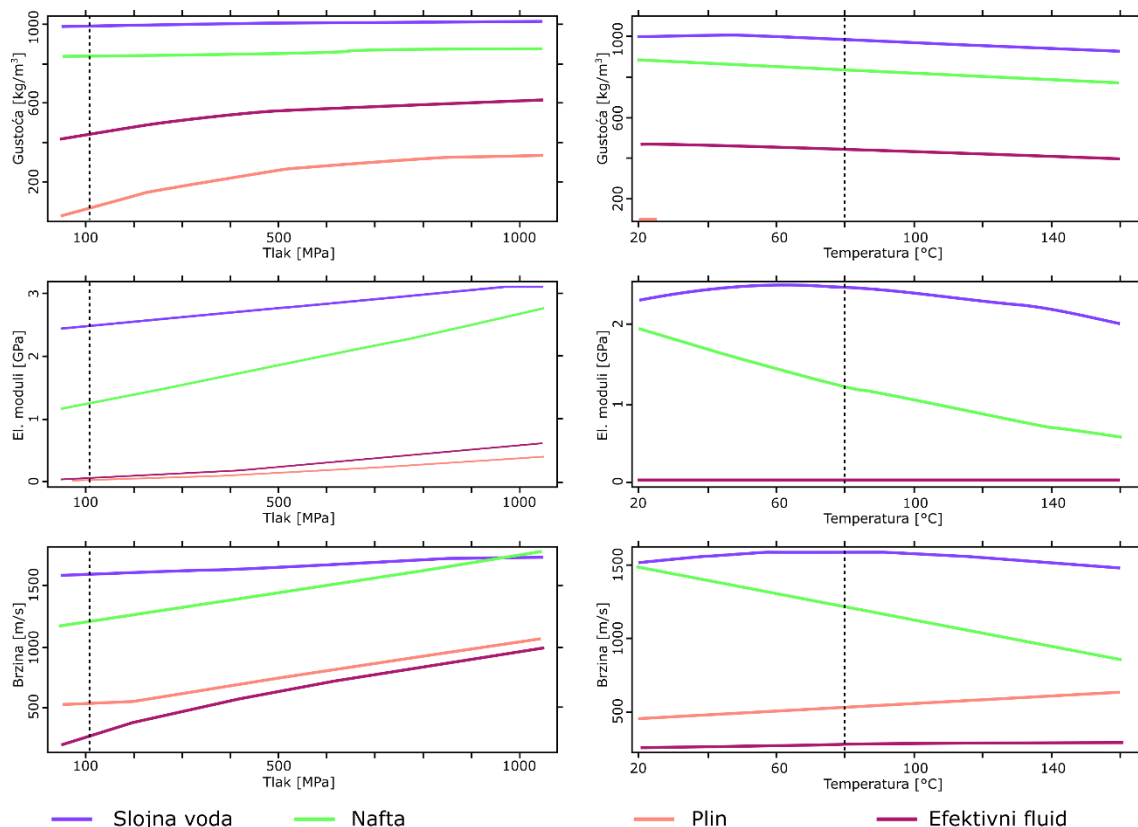
gdje je K volumni modul ležišnih fluida i pojedinačnih fluidnih komponenti, a S volumni udio pojedinačnih fluidnih komponenti (fl – ležišni fluid, w – slojna voda, g – plin, o – nafta). Pri tome vrijedi da je $S_w + S_g + S_o = 1$.

Prema tome, gustoća ležišnog fluida (ρ_{fl}) i brzina širenja elastičnih valova u fluidu (V_{fl}) definirana je sljedećim formulama:

$$\rho_{fl} = \sum_{i=1}^N S_i \rho_i \quad (7-13)$$

$$V_{fl} = \sqrt{\frac{K_{fl}}{\rho_{fl}}} \quad (7-14)$$

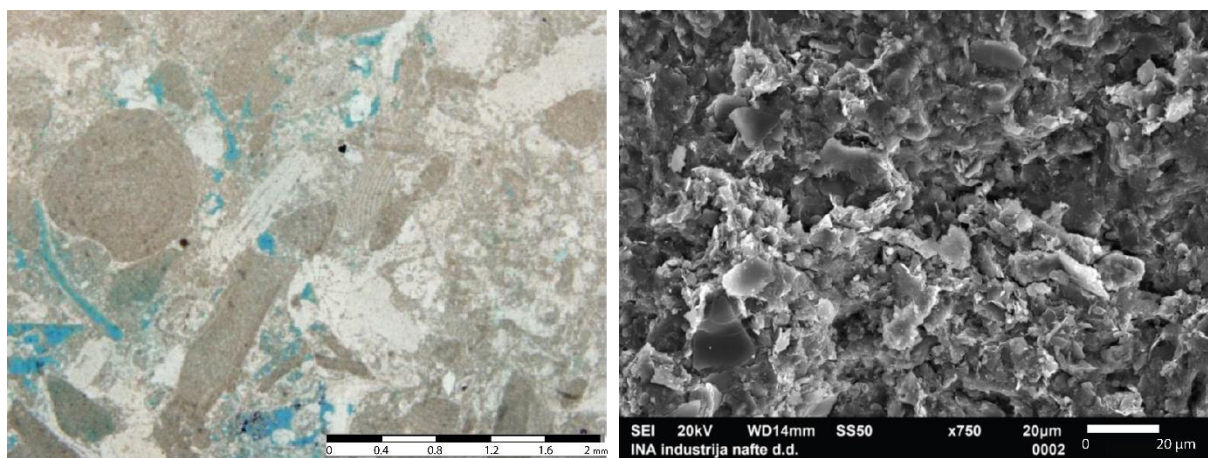
Svojstva ležišnih fluida također ovise o salinitetu, volumnim udjelima svake pojedinačne komponente, volumenu otopljenog plina u nafti, gustoći ali i o tlaku i temperaturi. Na temelju Batzle i Wang, (1992) jednadžbi moguće je prikazati fizikalna svojstva ležišnih fluida s promjenom temeljnih fizikalnih parametara. Na slici 7-8 prikazani su dijagrami ovisnosti gustoće, brzine rasprostiranja P-valova i volumnih modula za ležišne fluide polja Grubišnog Polja o promjeni tlaka i temperature. Pri tome je efektivno naprezanje iznosilo 11MPa (110 bar), temperatura ležišta 80 °C, $S_w = 0,4$; $S_g = 0,6$; $S_o = 0$, salinitet 10 g/l



Slika 7-8 Dijagrami ovisnosti gustoće, brzine i volumnih modula ležišnih fluida polja Grubišno Polje o promjeni tlaka i temperature. (efektivno naprezanje 11 MPa, temperatura ležišta 80 °C, $S_w = 0,4$; $S_g = 0,6$; $S_o = 0$, salinitet 10 g/l)

8 Određivanje smičnih brzina na temelju modeliranja fizikalnih parametara

PBS ima dugu povijest naftnogeoloških istraživanja, a to znači da se danas raspolaže s podacima prikupljenim brojnim istražnim bušotinama. No, postoji mali broj bušotina sa snimljenim smičnim brzinama, posebno u hrvatskom dijelu Panonskog bazena. Poznavanje brzina smičnih valova (V_s) od temeljnog je značaja za detaljnu seizmičku karakterizaciju ležišta. Stoga je predviđanje brzina V_s u bušotinama koje nemaju iste snimljene velik izazov i zahtijeva veliki napor kako bi se dobio pouzdan ulazni podatak za seizmičko modeliranje i seizmičku inverziju. U nedostatku snimljenih brzina S-valova u ovom radu je prikazan postupak određivanja smičnih brzina za plinsko ležište na Grubišnom Polju prema modelu Kuster-Toksöz i Xu-Payne. Dostupni petrofizikalni i seizmički podaci te podaci VSP-mjerenja korišteni su u modeliranju, kao i petrografski podaci dobiveni skenirajućim elektronskim mikroskopom (SEM). SEM i mikroskopske snimke korištene su za početno definiranje pornog prostora vapnenaca tj. oblika pora. Ulazni podaci za modeliranje su dostupni petrofizikalni podaci i petrološke analize uzoraka vapnenaca.

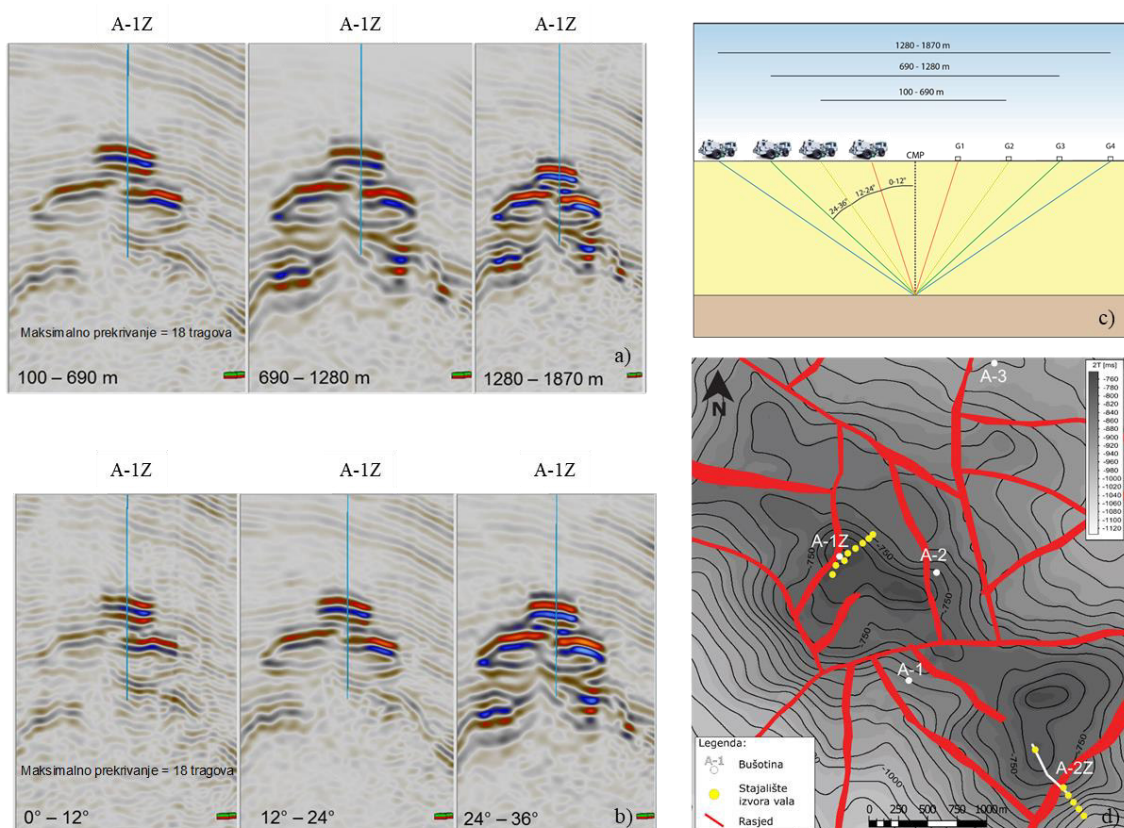


Slika 8-1 Mikroskopski prikaz sekcije (uvećanje 40x) prikazuje mikro poroznost u vapnencu (lijevo) i morfološki prikaz uzorka snimljen elektronskim mikroskopom (uvećanje 750x) (desno) (Matošević et al., 2017)

Slikom 8-1 prikazan je mikroskopski presjek vapnenca iz bušotine A-1Z u kojem je vidljiva primarna i sekundarna poroznost. Iz primarne poroznosti može se izdvojiti poroznost unutar biogenih skeleta i međuzrnska poroznost, a iz sekundarne poroznosti interkristalna, tj. pukotinska poroznost. SEM snimka (Slika 8-1, desno) također prikazuje da je karbonatni dio

sastavljen isključivo od vapnenca u obliku romboedarskih kristala kalcita ili od fragmenata fosila. Silikatni dio sastoji se uglavnom od glinovite komponente, minerala sericita ili ilita.

Na temelju snimljenog vertikalnog seizmičkog profila (VSP) određene su intervalne brzine S-valova potrebne za kontrolu rezultata modeliranja. Snimanje VSP podataka na bušotinama A-1Z i A-2Z izvršeno je s osam točaka izvora vala (Slika 8-2b) uz vertikalna stajališta prijarnika u razmaku od 15 m. VSP-intervalne brzine definirane su odabirom prvih nailazaka S-valova na zbrojenim tragovima (Slika 4-11).

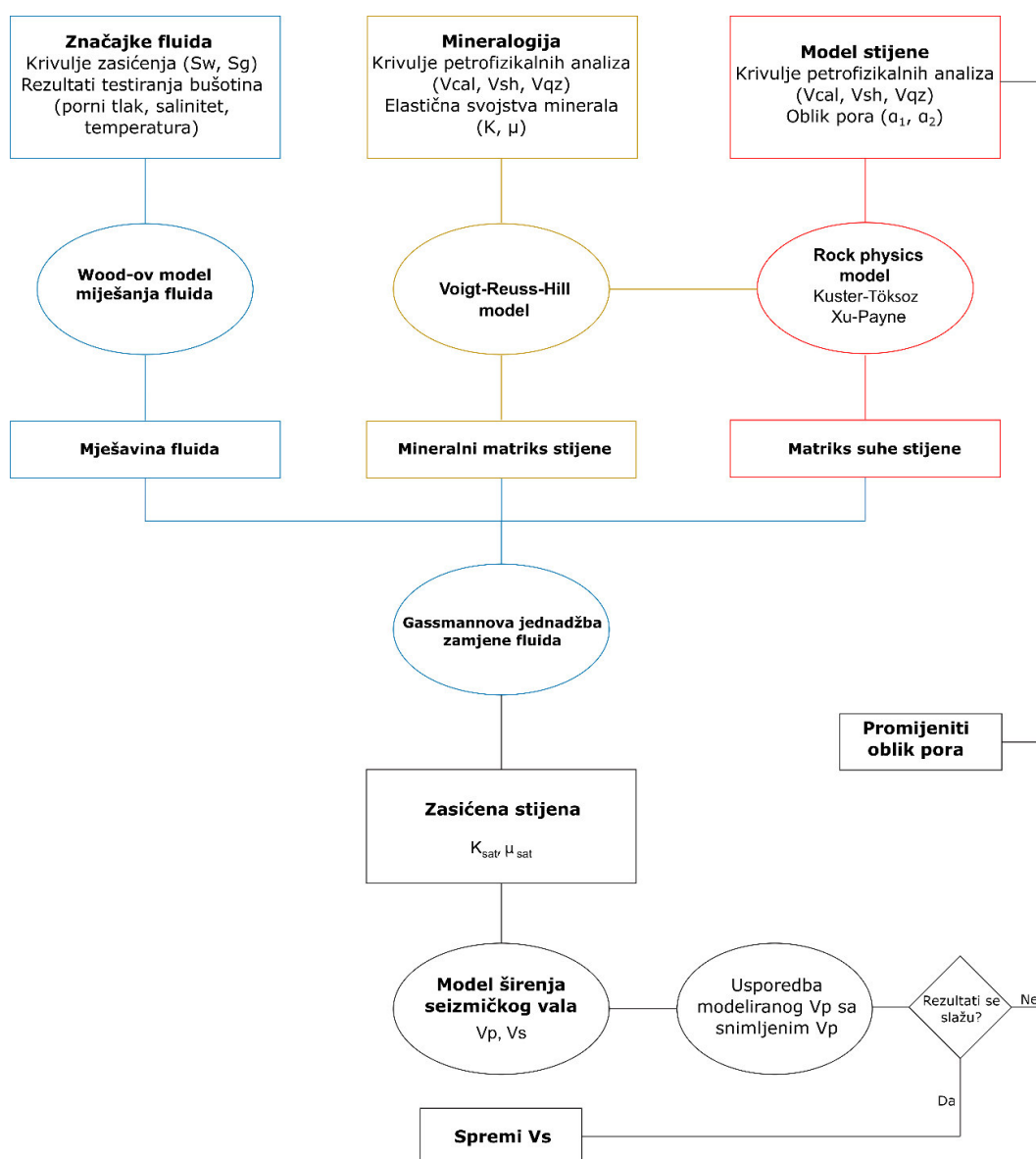


Slika 8-2 Usporedba (a) profila *offset stack* s različitim udaljenostima, (b) profila *angle stack* s različitim kutovima upada, (c) s geometrijom snimanja i (d) položajem točaka paljenja

Metodologija predviđanja V_s brzina temelji se na istraživanju Yang et al. (2019) koji su modelirali V_p brzine i uspoređivali rezultate s bušotinskim brzinama. U ovom radu volumen mineralnih komponenti stijene, zasićenje i poroznost su ulazni podaci temeljeni na petrofizikalnim analizama bušotinskih podataka. Elastična svojstva fluida su izračunata na temelju Wood-ove formule (Wood, 1955), a elastična svojstva matriksa stijena izračunata su na temelju Voigt–Reuss–Hill modela. Elastična svojstva suhe, nezasićene stijene su izračunata na temelju Kuster-Toksöz formule i Xu-Payne modela. Gassmannova teorija koristi se za

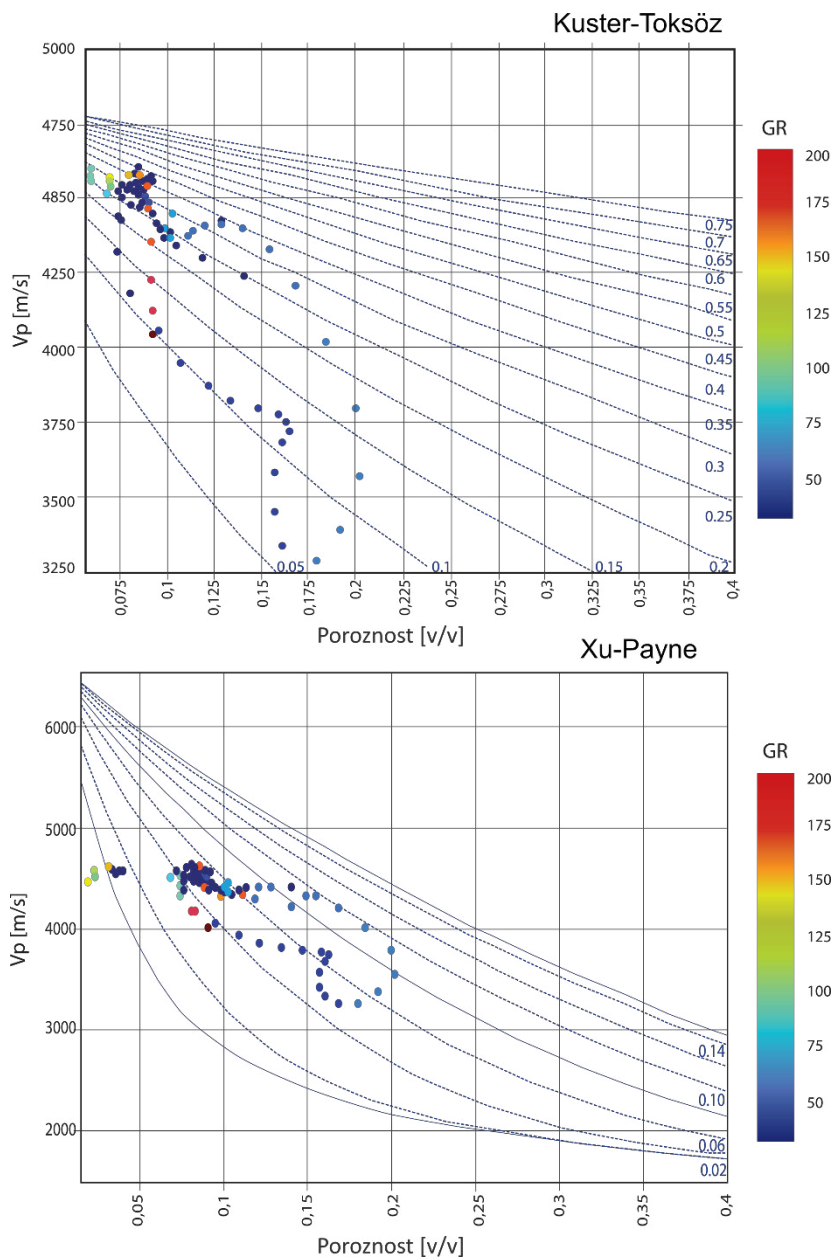
izračunavanje volumnog i smičnog modula zasićenih stijena uzimajući u obzir izračunata elastična svojstva fluida (izraz 7-5).

Brzine su modelirane pri svakom koraku iteracije, a koraci su definirani promjenom koeficijenta pora. Razlika u brzini P-valova i modelirane vrijednosti brzine pri svakom koraku iteracije nastoji se dovesti do minimalne razlike (Slika 8-3). Pore su idealiziranog oblika, kružnice, elipse ili oblika diska. Izmjerena brzina P-valova izvedena je iz podataka zvučne karotaže.

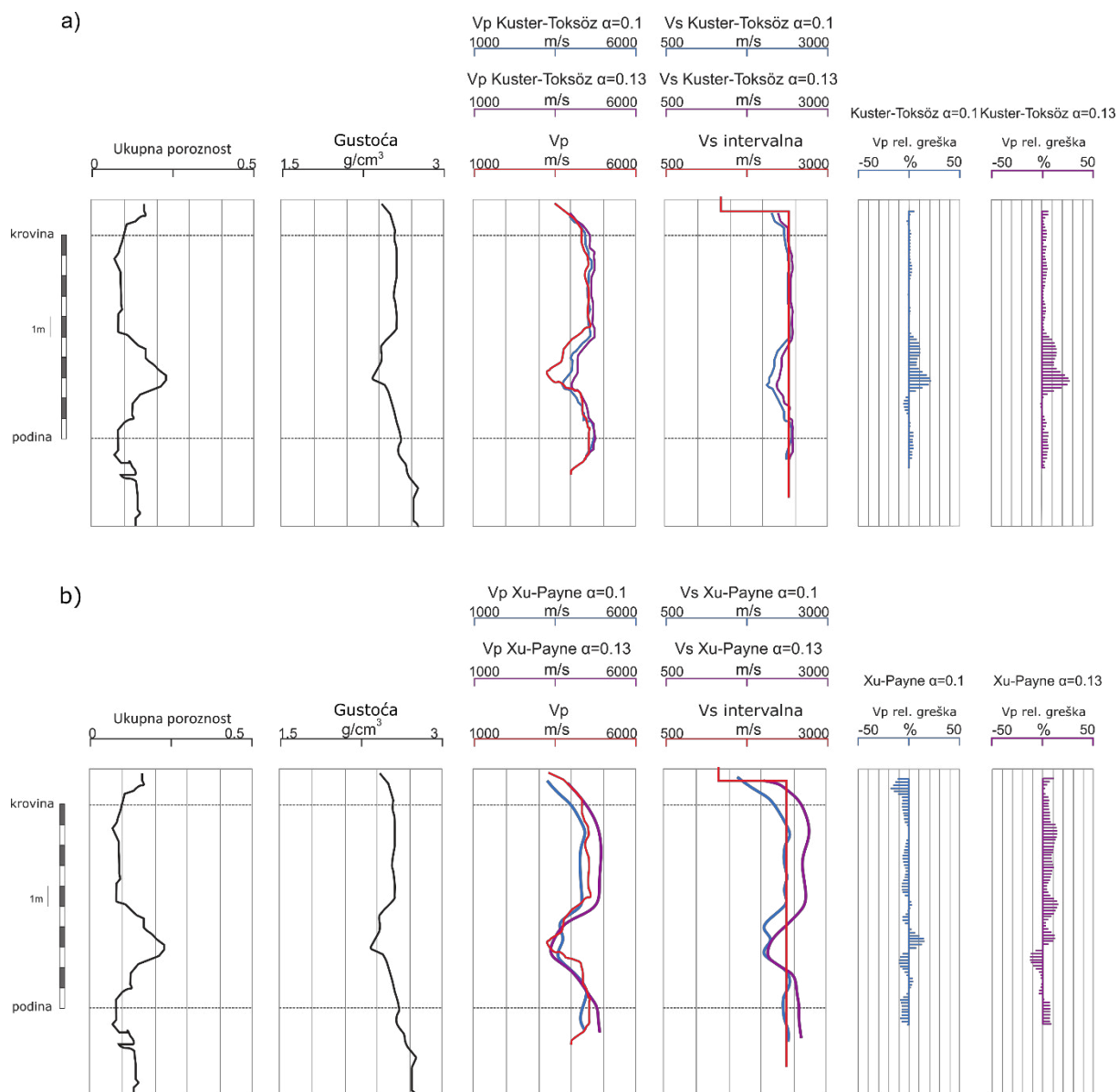


Slika 8-3 Metodologija određivanja brzina S-valova na temelju modeliranja petrofizikalnih podataka

Dijagram odnosa brzina i poroznosti s naznačenim krivuljama koeficijenta pora (α) za Kuster-Toksöz i Xu-Payne model su prikazani na slici 8-4. Rasponi vrijednosti koeficijenta pora korištenih u daljnjem tijeku modeliranja definiran je na temelju odnosa brzina P-valova i poroznosti. Iz dijagrama (Slika 8-4) definirane su referentne vrijednosti koeficijenta pora 0,05 do 0,30 za modeliranje brzina P-valova.



Slika 8-4 Odnos brzina P-valova i poroznosti s naznačenim krivuljama koeficijenta pora (α) za model Kuster-Toksöz (gore) i model Xu-Payne (dolje). Vrijednosti gama karotaže (GR) su naznačene spektrom boja. (Ulazni parametri su: kalcit $K=68$ GPa, $\mu=28$ GPa, S_w 26%, voda $K=2.2$ GPa, $\rho=1.0$ g/cm³, plin $K=0.038$ GPa, $\rho=0.15$ g/cm³)

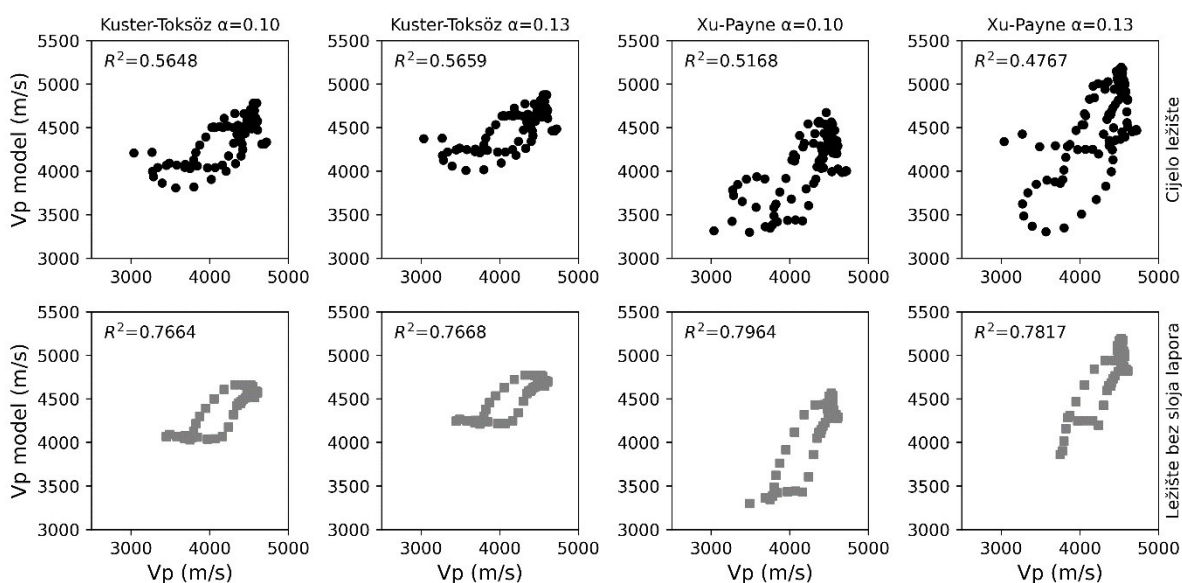


Slika 8-5 Prikaz bušotinskih krivulja za bušotinu A-1Z s vrijednostima ukupne poroznosti, gustoće, mjenjenih brzina P-valova, intervalne brzine S-valova izračunate iz VSP-mjerenja, modelirane brzine P- i S- valova i relativne pogreške brzine P-valova; a) model Kuster-Toksöz, b) model Xu-Payne

Rezultati pokazuju dvije najbolje modelirane brzine dobivene svakom navedenom metodom za definirani koeficijent pora. Slika 8-5 prikazuje rezultate modeliranja u odnosu na snimljene brzine P-valova i intervalne VSP S-brzine. Prema rezultatima, model Kuster-Toksöz rezultira dobrom korelacijom s bušotinskim podacima, za koeficijente pora 0,10 i 0,13. Rezultati dobiveni primjenom modela Xu-Payne (Slika 8-5b) pokazali su da brzine P-valova za koeficijent pora 0,1 imaju bolju korelaciju u usporedbi s brzinama P-valova za koeficijent pora 0,13.

Rezultati modela Kuster-Toksöz imaju slabiju korelaciju s bušotinskim brzinama P-valova u zoni 5 do 7m ispod krovine ležišta u usporedbi s prvih 5 m ispod krovine ležišta (Slika 8-5a). Rezultati modela Xu-Payne pokazuju zadovoljavajuću korelaciju (Slika 8-5b). U tom dijelu ležišta nalazi se zona s većim udjelom lapora (Slika 8-7) pa je statistička analiza rezultata napravljena za cijelo ležište i bez zone s povećanim udjelom lapora. Statistička analiza rezultata može se vidjeti na dijagramima brzina-brzina (Slika 8-6). Korelacijski odnos je veći od 0,50 osim za model Xu-Payne s omjerom pora 0,13. Rezultati sugeriraju da za cjelokupno ležište model Kuster-Toksöz daje pouzdanije rezultate s korelacijskim faktorom 0,56 i 0,57 u usporedbi s modelom Xu-Payne koji ima korelacije 0,52 i 0,48.

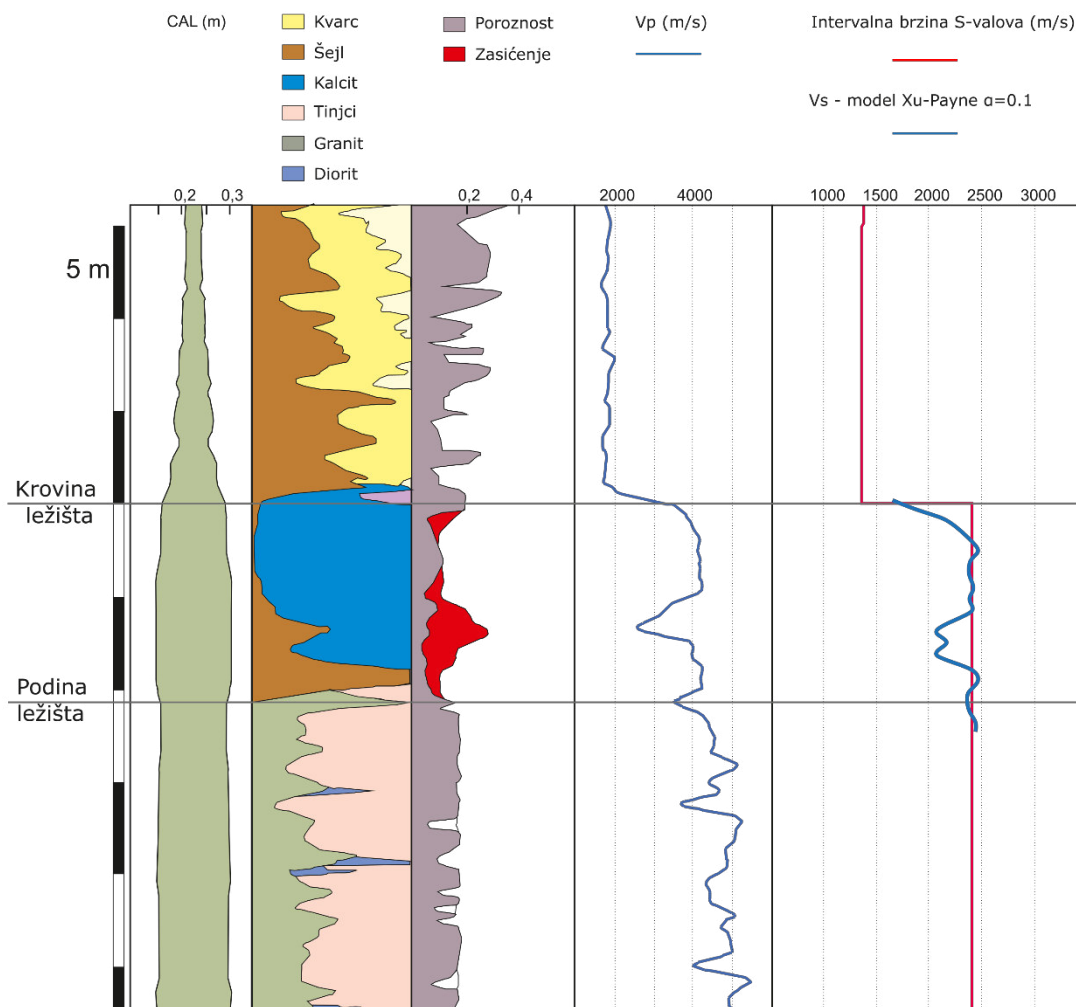
Rezultati bez zone s proslojcima lapora pokazuju da sva 4 modela imaju bolji faktor korelacije, posebno model Xu-Payne za omjer pora 0,1 s faktorom korelacije 0,7964. Rezultati modeliranja za omjer pora 0,10 ukazuju na to da se porni sustav sastoji uglavnom od povezanih pora i male količine mikropukotina, uzimajući u obzir klasifikaciju pora prema Xu-Payne modelu (Slika 7-7).



Slika 8-6 Dijagram V_p - V_p koji prikazuje odnos izmjerenih brzina u bušotini i modeliranih brzina za različite teoretske modele i to za cjelokupno ležište i bez zone s većim udjelom lapora

Proslojci lapora vidljivi su u zoni 5 do 7 m ispod krovine ležišta (Slika 8-7). Kao što je poznato, lapor ima određeni volumen vode zarobljene u izoliranim porama. Rezultati smičnih brzina dobivenih modelom Kuster-Toksöz za koeficijent pora 0,1 i 0,13 te model Xu-Payne za koeficijent pora 0,1 imaju dobru korelaciju s intervalnim brzinama S-valova dobivenih iz VSP-

mjerenja, dok je Xu-Payneov model za koeficijent pora 0.13 ne pokazuje zadovoljavajuću korelaciju (Slika 8-6). Dobra korelacija rezultata za koeficijent pora 0,10 ukazuje da se sustav pora u ležištu sastoji uglavnom od međuzrnske poroznosti s malim volumnim udjelom mikropukotinske poroznosti, uzimajući u obzir Xu-Payneovu klasifikaciju pora (Xu i Payne, 2009).



Slika 8-7 Litološki profil bušotine A-1Z s rezultatima modeliranja brzina

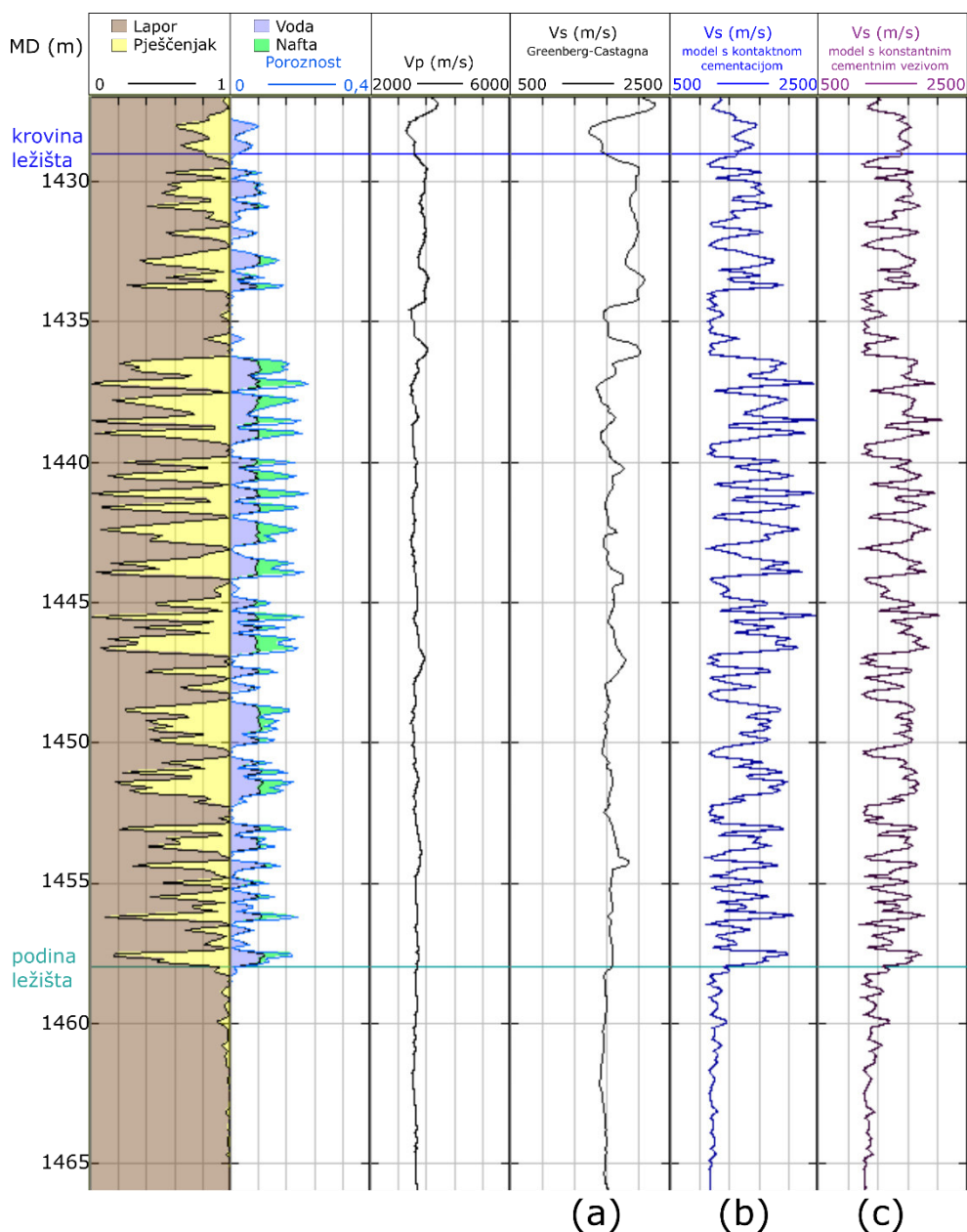
Iz svega navedenog zaključuje se da je petrofizikalni model vapnenaca važan u procjeni i modeliranju seizmičkih parametara bitnih za detaljnu seizmičku karakterizaciju ležišta. Iako je model ležišta idealiziran u odnosu na stvarne geološke uvjete, dobivena je zadovoljavajuća korelacija između modelirane i izmjerene brzine P-valova, kao i između modelirane brzine S-valova i intervalne brzine S-valova koji su dobiveni iz VSP-mjerenja.

Rezultati pokazuju da model Kuster-Toksöz s koeficijentom pora 0,1 i 0,13 ima dobru povezanost s podacima iz bušotine, osim u zoni ležišta s povećanjem volumena lapora, tj. s povećanjem volumena izoliranih pora. U prvih 5 m ispod krovine ležišta, relativna greška brzine P-valova za koeficijent pora 0,10 je manja od 5%, dok je vrijednost relativne greške brzine P-valova za koeficijent pora 0,13 između 5% i 10%. Vrijednost pogreške u zoni s povećanjem volumena lapora za koeficijent pora 0,10 iznosi od 10% do 20%, dok je vrijednost pogreške za koeficijent pora 0,13 između 10% i 30%.

Rezultati dobiveni modelom Xu-Payne s koeficijenta pora 0,1, imaju pogreške brzine P-valova ispod 10% u cijelom intervalu ležišta i bolju korelaciju u usporedbi s rezultatima koeficijenta pora 0,13. Rezultati modela Xu-Payne pokazuju bolju povezanost u zoni ležišta s povećanim volumenom lapora u odnosu na rezultate modela Kuster-Toksöz. U zoni ležišta s povećanjem volumena lapora naglašen je problem definiranja koeficijenta pora koji nije konstantan za određenu poroznost ležišne stijene što utječe na vrijednosti brzina (Sayers, 2008).

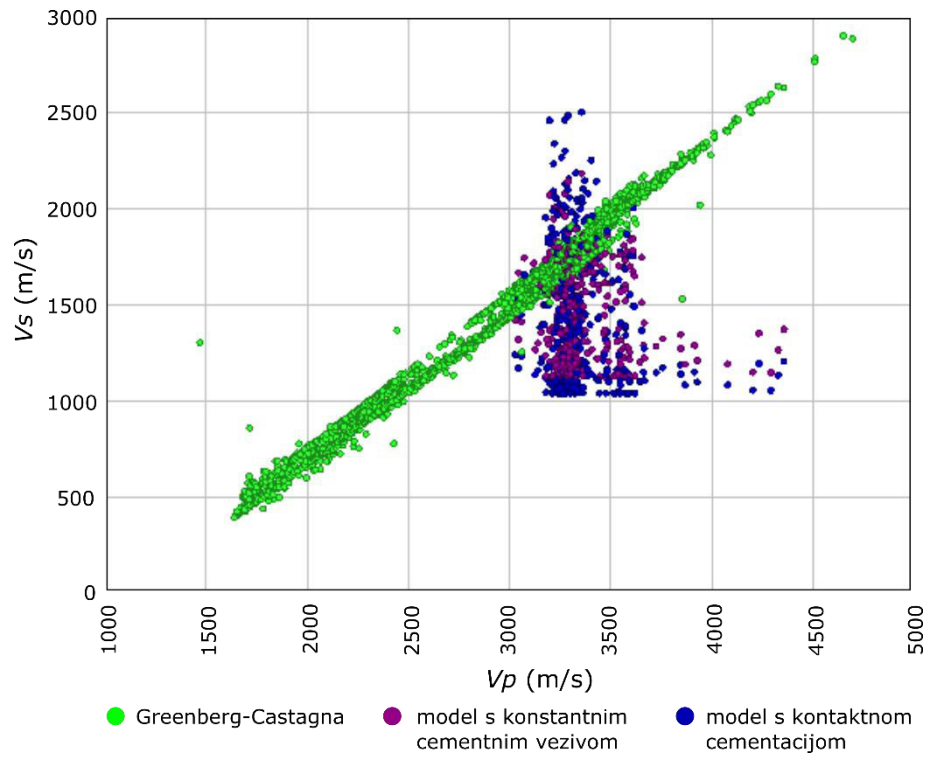
Treba uzeti u obzir da se modeli stijena temelje na generalizaciji i idealizaciji svojstava i strukture stijena i predstavljaju prosječna elastična efektivna svojstva složene stijenske strukture. No, u nedostatku stvarnih podataka, *rock physics* modeliranje kontrolirano bušotinskim podacima i intervalnim brzinama S-valova daje valjane i pouzdane rezultate koji su potrebni za karakterizaciju i definiranje ležišnih svojstava.

Na polju Letičani krivulje brzina S-valova konstruirane su na temelju petrofizikalnih modela i empirijskih odnosa brzina V_p - V_s . Za konstrukciju brzina V_s korišten je empirijski odnos Greenberg-Castagna (Slika 8-8a), model s kontaktnom cementacijom (Slika 8-8b) i model s konstantnim cementnim vezivom (Slika 8-8c). Na bušotinskom profilu bušotine B-9 (Slika 8-8) vidljivo je da rezultati modela s kontaktnom cementacijom i modela s konstantnim cementnim vezivom prikazuju izraženije promjene vrijednosti brzine s promjenom litologije u odnosu na rezultate empirijskog odnosa Greenberg-Castagna. Model s kontaktnom cementacijom i model s konstantnim cementnim vezivom je temeljen na karotažnim krivuljama poroznosti što rezultira izraženijim promjenama vrijednosti s povećanjem dubine.



Slika 8-8 Modelirane brzine V_s u bušotini B-9 na temelju: (a) empirijskog odnosa Greenberg-Castagna, (b) modela s kontaktnom cementacijom i (c) modela s konstantnim cementnim vezivom

Analizom snimljenih brzina V_p i rezultata modeliranih krivulja V_s napravljena je statistička analiza linearne povezanosti. Iz slike 8-9 vidljivo je da V_p i V_s konstruiran na temelju empirijskog odnosa imaju linearnu povezanost s koeficijentom korelacije (R^2) 0,984. Krivulje V_s konstruirani modelom s kontaktnom cementacijom i modelom s konstantnim cementnim vezivom nemaju vidljivu linearnu povezanost, što se odražava i koeficijentom korelacije koji iznose 0,016 i 0,012. U daljnjim analizama karotažnih krivulja za polje Letičani korištene su krivulje konstruirane empirijskim odnosom Greenberg-Castagna.



Slika 8-9 Dijagram ovisnosti snimljene karotažne krivulje brzine V_p i modeliranih krivulja brzina V_s u bušotini B-9

9 Laboratorijska mjerenja na jezgrama

Ultrazvučno mjerenje brzina provedeno je za vapnenačko ležište s plinskoga polja Grubišno polje. Uzorkovano je osam valjčića iz jezgre bušotine A-1Z i A-2Z, na kojima su napravljene laboratorijske analize poroznosti, propusnosti i mjerenja brzina pod različitim tlakom opterećenja. Cilj laboratorijskih mjerenja je definiranje elastičnih parametara stijena koji se mogu koristiti u izradi detaljnih seizmičkih modela u procesu inverzije.



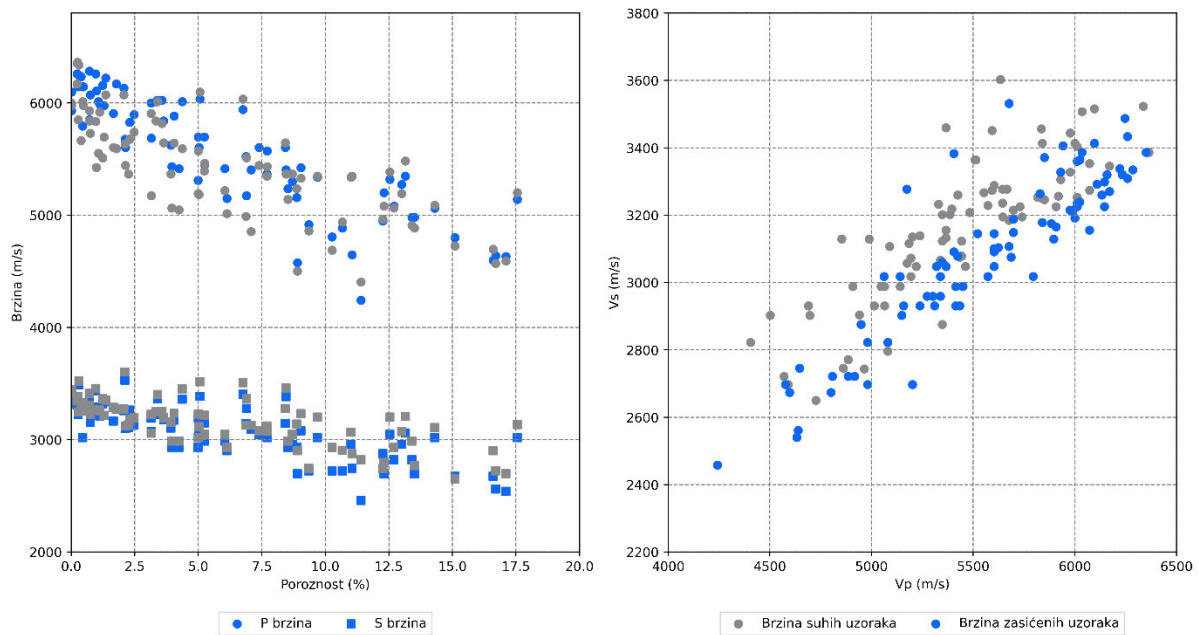
Slika 9-1 Jezgre iz bušotina A-1Z (805 – 811 m) i A-2Z (972 – 976 m)

9.1 Pregled dosadašnjih istraživanja ultrazvučnih mjerenja jezgri

U takvom konceptualno jednostavnom mjerenju ultrazvučni P- ili S-valni impuls širi se s jednog na drugi kraj valjčića poznate duljine. Mjeri se vrijeme odašiljanja ovog impulsa, a brzina je jednostavno odnos duljine prema ovom vremenu. Mjerenja obično nije tako lako tehnički izvršiti, zbog toga su provedena mnoga istraživanja za mjerenje brzine širenja kompresijskih i smičnih valova u karbonatnim stijenama. Laboratorijska mjerenja su pokazala da je brzina u vodom zasićenim karbonatima pod utjecajem poroznosti i tipa pora (Rafavich et al., 1984; Anselmetti et al., 1997; Wang, 1997; Baechle et al., 2009)

Navedena istraživanja pokazala su da se brzina općenito smanjuje s povećanjem poroznosti, a osim toga, primijetili su veliku promjenjivost brzina.

Rafavich et al. (1984) su laboratorijski analizirali ultrazvučne brzine P- i S-valova u uzorcima karbonata iz 4 bušotine različite poroznosti i mineralnog sastava, kao što su vapnenci, dolomiti i anhidriti karbonske starosti iz Williston bazena, SAD. Ispitivanja su napravljena za 98 suhih i vodom zasićenih uzoraka pod efektivnim naprežanjem od 40 MPa. Njihovi rezultati pokazali su da brzina P-valova varira između 4000 m/s i 6500 m/s, a S-brzina varira između 2500 m/s i 3500 m/s (Slika 9-2). Zaključili su da su poroznost i gustoća glavni čimbenici koji utječu na brzinu.



Slika 9-2 Odnos brzina P- i S-valova i poroznosti na temelju podataka istraživanja Rafavich et al. (1984)

Zaključili su da se brzina smanjuje s povećanjem sadržaja kvarca iako je njegov utjecaj manji od poroznosti i gustoće. Njihovi rezultati pokazali su da je utjecaj kalcita i dolomita zanemariv. Anselmetti i Eberli, (1993) izmjerili su brzine širenja P- i S-valova u različitim uzorcima karbonata iz različitih ležišta. Njihovi rezultati su pokazali da se brzina P-valova uvelike razlikuje, između 1700 m/s i 6500 m/s, a S-brzina varira između 700 m/s i 3400 m/s. Zaključili su da je utjecaj mineralnog sastava u karbonatima minimalan i da ne može biti razlog za velike promjene brzine te stijene s primarnom poroznošću imaju niže vrijednosti brzina u odnosu na stijene sa sekundarnom poroznošću.

Bakhorji (2010) je napravio laboratorijske analize na 37 uzoraka karbonata iz Saudijske Arabije permske starosti i Kanade devonske starosti. Analizirao je ultrazvučne brzine uzoraka

i deformacije pri efektivnom naprezanju od 2,5 do 25 MPa. Prema rezultatima analize zaključuje da su brzine P- i S-valova ovisne o efektivnom tlaku naprezanja i da generalno opadaju s porastom poroznosti. Usporedbom rezultata brzina s teorijskim modelima (Gassmann, 1951; Biot, 1956) zaključuje da Gassmannov model dosljedno precjenjuje vrijednosti brzina zasićenih uzoraka pri niskom efektivnom tlaku, a vrijednost brzina zasićenih uzoraka pri visokom efektivnom tlaku su približno jednake. Biotov model precjenjuje vrijednosti brzina zasićenih uzoraka u većini analiziranih uzoraka. Gegenhuber i Pupos (2015) su na osnovi laboratorijskih rezultata ultrazvučnih brzina uzoraka vapnenaca i dolomita s područja Austrije definirali *rock physics* obrazac za seizmičku interpretaciju i karakterizaciju ležišta.

Elastični parametri se mijenjaju s obzirom na zasićenje uzoraka te su vrijednosti volumnih modula zasićenih uzoraka veće od suhih uzoraka.

Zamjenom fluida u pornom prostoru, npr. plin s vodom smanjuje se kompresibilnost pora, što dovodi do povećanja volumnog modula stijene. Ovaj učinak trebao bi povećati vrijednosti V_p bez značajnog utjecaja na V_s . Ako se zamjenom plina vodom povećava samo gustoća, gdje voda ne utječe na kompresibilnost pora, V_p i V_s se smanjuju. U takvom se slučaju omjer V_p/V_s ne mijenja. U tablici 9-1 prikazan je utjecaj zamjene pornih fluida plina u vodi na elastična svojstva u poroznim medijima (Baechle et al., 2009).

Tablica 9-1 Učinci zasićenja vodom na V_p , V_s i V_p/V_s u karbonatima (prema Baechle et al., 2009)

	Elastični moduli	V_p	V_s	V_p/V_s
Smanjenje kompresibilnosti	$K \uparrow$	\uparrow	-	\uparrow
Porast gustoće	-	\downarrow	\downarrow	-
Jačanje modula smicanja	$\mu \uparrow, K \uparrow$	\uparrow	\uparrow	\uparrow
Slabljenje modula smicanja	$\mu \downarrow, K \uparrow$	\downarrow	\downarrow	\uparrow

Porast ili smanjenje P-brzina zasićenjem vodom se može objasniti povećanjem krutosti pora kad je porni fluid manje kompresibilan od ugljikovodika i povećanjem volumne gustoće sa zasićenjem.

Adam et al. (2006) su laboratorijski analizirali uzorke karbonata u širokom rasponu frekvencija, od seizmičke do ultrazvučne frekvencije. Uočili su da je modul smicanja stijena osjetljiv na zasićenje, osobito na seizmičkim frekvencijama. Slabljenje modula smicanja može se dogoditi zbog gubitka površinske energije i/ili kritičnog razvoja pukotina u sekundarnim porama, uglavnom pri niskim diferencijalnim pritiscima. Ovi mehanizmi nisu u skladu s pretpostavkom Gassmannove teorije, tj. da fluid ne utječe na matriks stijene.

Modul smicanja vode iznosi nula i teoretski modul smicanja zasićene stijene neće se promijeniti. No brojni radovi (Anselmetti i Eberli, 1993; Baechle et al., 2009; Gegenhuber i Pupos, 2015) zaključuju da su vrijednosti modula smicanja zasićenih uzoraka manje od modula smicanja suhih uzoraka. Takva pojava je nazvana efektom slabljenja modula smicanja.

Baechle et al. (2009) su izmjerili ultrazvučne brzine na 38 uzoraka vapnenca čija je poroznost bila u rasponu od 5% do 30% u suhom i vodom zasićenom stanju. Zaključili su kako su promjene brzina izravno vezane za oblik i tip pora. Potvrdili su da se elastični moduli mijenjaju ovisno o zasićenju te je volumni modul zasićenih uzoraka vapnenaca veći od suhih.

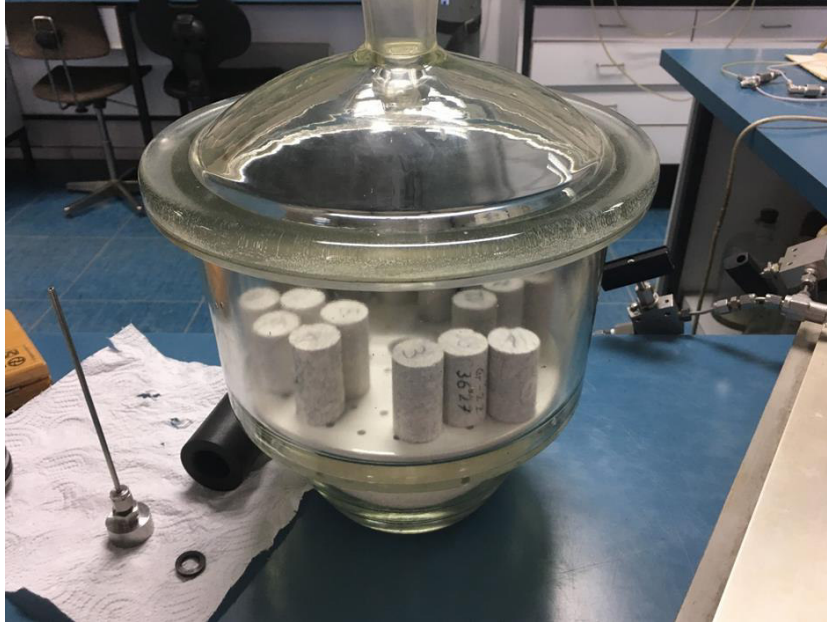
Prema Baechle et al. (2009) i Khazanehdari i Sothcott (2003) uzroci slabljenja modula smicanja su viskoznost, smanjenje energije slobodne površine na mineralnim zrnima i disperzija brzine zbog lokalnog toka.

No prema rezultatima Baechle et al. (2009) određeni uzorci imaju povećanje modula smicanja zasićenih uzoraka, tzv. efekt jačanja modula smicanja (engl. *shear strengthening*) te je zaključeno da uzorci s primarnom poroznošću imaju efekt slabljenja, a sa sekundarnom poroznošću efekt jačanja modula smicanja.

Baechle et al. (2009) nakon niza ponavljanja na laboratorijskim uzorcima koji pokazuju efekt slabljenja ili jačanja modula smicanja u zasićenom stanju te njihovog sušenja i ponavljanja laboratorijskih mjerenja zaključuje da efekt jačanja ili smanjenja modula smicanja nije trajan, tj. nakon sušenja uzorka vrijednosti su jednake početnim.

9.2 Priprema uzoraka i mjerenje poroznosti i propusnosti

Nakon ekstrakcije iz jezgre, valjčići su podvrgnuti postupku čišćenja, tj. ekstrakcije fluida i sušenja (Slika 9-3).



Slika 9-3 Dehidratorska komora

Poroznost (efektivna poroznost) je određena volumetrijskom metodom na plinskom porozimetru tvrtke Core Laboratories korištenjem dušika za popunjavanje povezanih pora. Mjerenje se zasniva na Boyleovom zakonu ekspanzije plina iz referentne ćelije poznatog obujma u ćeliju s uzorkom (Slika 9-4). Boyleov zakon kaže da pri konstantnoj temperaturi volumen date količine idealnog plina varira obrnuto tlaku kojem se plin podvrgava. Ako se temperatura održava konstantnom i pušta se volumen plina iz jedne ćelije u drugu, sljedeći odnos vrijedi za idealni plin:

$$P_1V_1 = P_2V_2 \quad (9-1)$$

(Klinkenberg, 1941) je otkrio da su mjerenja propusnosti provedena sa zrakom pokazala različite rezultate od mjerenja propusnosti provedenih s tekućinom. Propusnost zraka uvijek je veća od propusnosti dobivene primjenom tekućina kao radnog fluida. Na temelju laboratorijskih ispitivanja dokazano je da tekućina ima nultu brzinu na površini zrna, dok plinovi imaju određenu konačnu brzinu na istoj površini zrna (proklizavanje). Ovo proklizavanje dovodi do većeg protoka plina pri danom diferencijalnom tlaku.

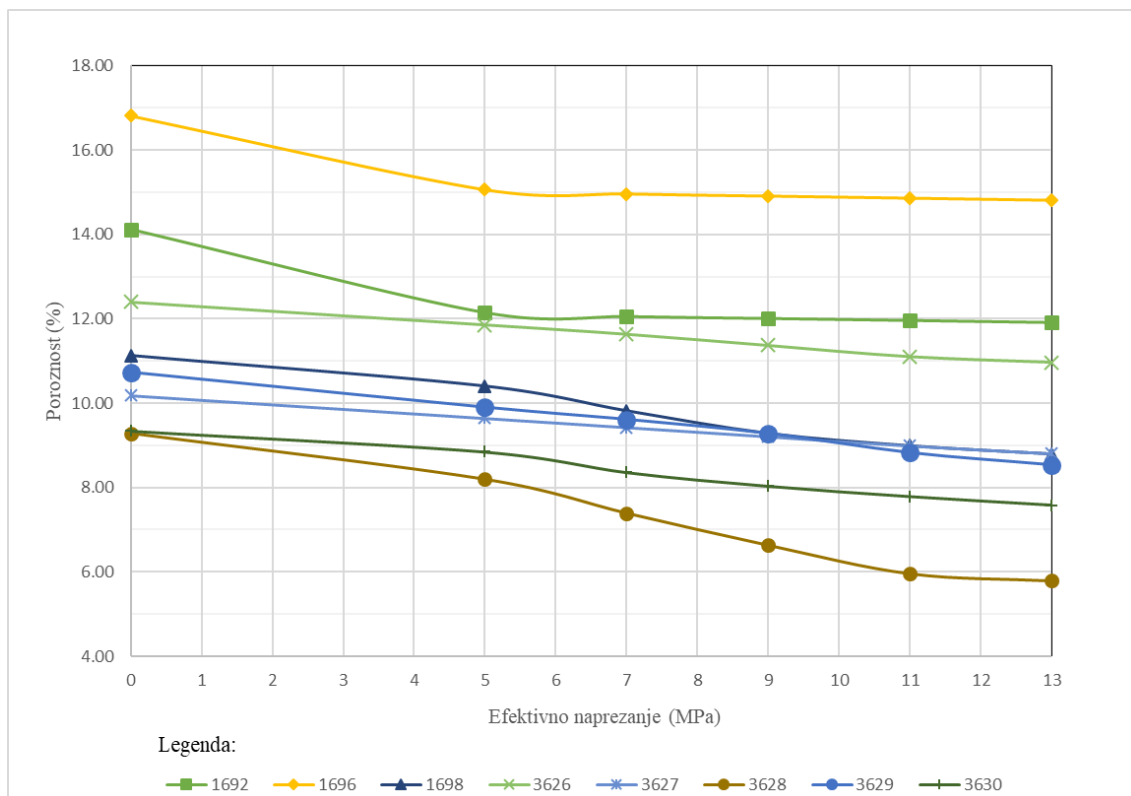
Potrebno je razlikovati vertikalnu (propusnost izmjerena na uzorku orijentiranom okomito na slojevitost formacije) od horizontalne propusnosti (propusnost izmjerena na uzorku orijentiranom paralelno slojevitosti formacije). Mjerenja poroznosti i propusnosti su izvršena pod opterećenjima uzoraka u intervalima 0, 5, 7, 9, 11 i 13 MPa. Intervali opterećenja uzorka su definirani na temelju vertikalnog efektivnog naprezanja u ležištu.



Slika 9-5 Odabrani uzorci Grubišnog Polja korišteni u laboratorijskim ispitivanjima

9.2.1 Rezultati mjerenja poroznosti i propusnosti

Iz rezultata mjerenja poroznosti pod različitim opterećenjem uzorka vidljivo je da su vrijednosti poroznosti odabranih valjčića bez efektivnog opterećenja u rasponu od 9 do 15% (Slika 9-6 i Tablica 9-2). S povećanjem vertikalnog opterećenja na uzorak smanjuje se poroznost, što je bilo očekivati s obzirom na konsolidaciju uzorka.

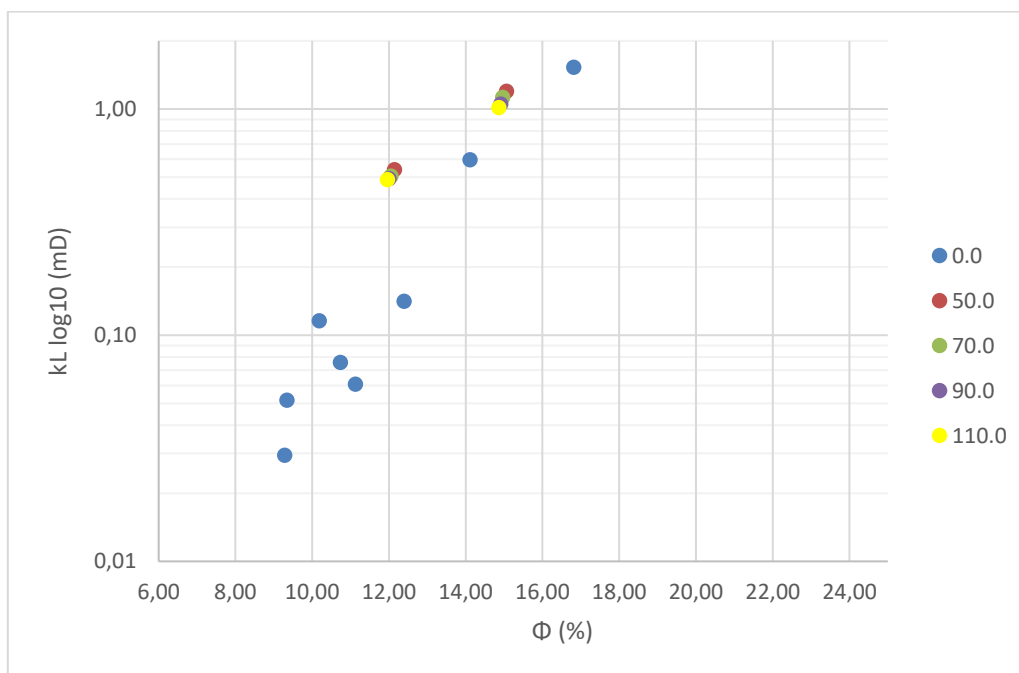


Slika 9-6 Odnos poroznosti i efektivnih naprezanja uzoraka

Tablica 9-2 Rezultati mjerenja poroznosti i propusnosti odabranih uzoraka

Broj uzorka	Litologija	Dubina (m)	Efektivno naprezanje (MPa)						
			0,0	5,0	7,0	9,0	11,0	13,0	
1692	Vapnenac	805,24	Φ (%)	14,11	12,14	12,05	12,00	11,96	11,91
			k_L (mD)	0,60	0,54	0,51	0,49	0,49	0,42
1696	Vapnenac	806,59	Φ (%)	16,81	15,06	14,96	14,91	14,86	14,81
			k_L (mD)	1,53	1,20	1,12	1,05	1,02	0,93
1698	Vapnenac	807,49	Φ (%)	11,13	10,40	9,82	9,28	8,98	8,79
			k_L (mD)	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3626	Vapnenac	808,52	Φ (%)	12,39	11,86	11,63	11,37	11,10	10,97
			k_L (mD)	0,14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3627	Vapnenac	972,05	Φ (%)	10,18	9,64	9,42	9,20	8,99	8,80
			k_L (mD)	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3628	Vapnenac	973,1	Φ (%)	9,28	8,19	7,39	6,63	5,95	5,79
			k_L (mD)	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3629	Vapnenac	973,73	Φ (%)	10,73	9,90	9,61	9,28	8,82	8,53
			k_L (mD)	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3630	Vapnenac	974,11	Φ (%)	9,34	8,85	8,36	8,03	7,79	7,58
			k_L (mD)	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Vrijednosti propusnosti za mjerenja bez opterećenja su u rasponu od 0,05 do 1,53 mD, dok vrijednosti propusnosti primjenom vertikalnog opterećenja drastično padaju za opterećenja veća od 70 bara (Slika 9-7). Iz rezultata je vidljivo da uzorci koji imaju vrijednosti propusnosti bez primjene vertikalnog opterećenja manju od 0,5 mD, primjenom najmanjeg opterećenja na uzorak postaju nepropusni.

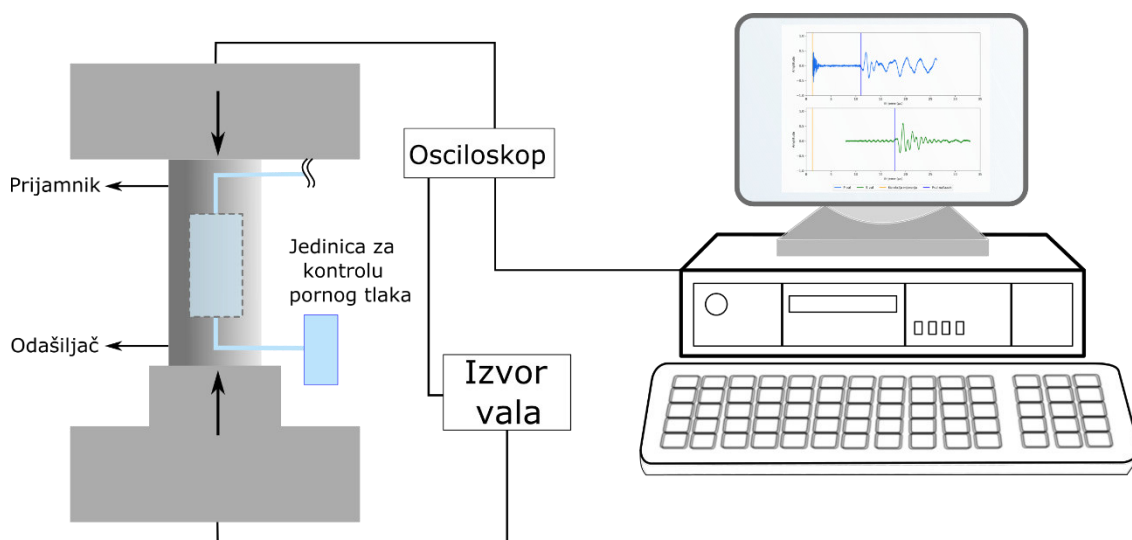


Slika 9-7 Odnos propusnosti i poroznosti

9.3 Ultrazvučno mjerenja brzina

Metoda mjerenja ultrazvučnih brzina temelji se na mjerenju vremena putovanja ultrazvučnog vala koji prolazi kroz uzorak. Tipični ultrazvučni mjerni sustav sastoji se od izvora vala, prijarnika i uređaja za snimanje i prikazivanje (Slika 9-8). Izvor vala proizvodi električni impuls visokog napona, piezoelektrični kristali se nalaze u prijarnicima na oba kraja uzorka.

Na jednom kraju uzorka stvaraju se visokofrekventni ultrazvučni valovi te se generirani val širi kroz uzorak, koji se detektira prijarnikom na drugoj strani uzorka. Val se pomoću transformatora pretvara u električni signal na suprotnom kraju uzorka i snima se digitalnim osciloskopom.

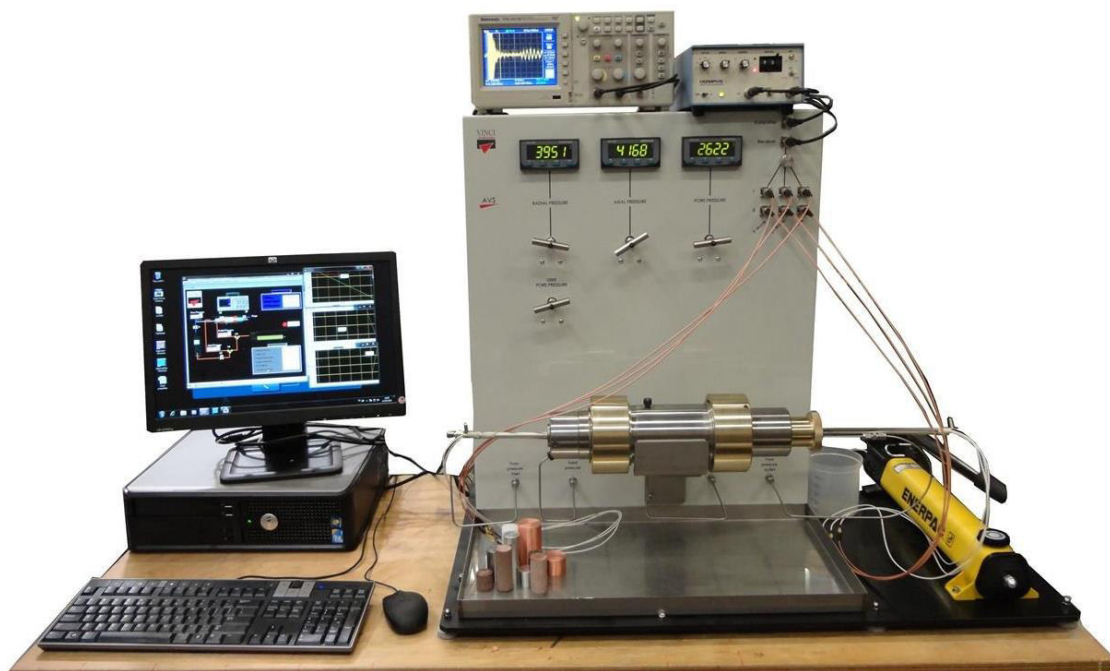


Slika 9-8 Skica uređaja za ultrazvučno mjerenje brzina

9.3.1 Metodologija i aparatura

Ultrazvučna mjerenja brzina na uzorcima provedena su uređajem Vinci Technologies'- AVS 700 koji omogućuje mjerenje brzina i određivanje dinamičkih elastičnih parametara uz jednoosno opterećenje uzoraka do 700 bara, tj. do 70 MPa. AVS 700 koristi dva piezoelektrična kristala s frekvencijom od 1 MHz koji generiraju primarne valove (P-valove) i polarizirane sekundarne valove (S-valove) (Slika 9-9).

Piezoelektrični prijamnik (PZP) je polarizirani materijal koji pretvara električni impuls u mehaničku vibraciju (na jednom kraju uzorka) i mehaničku vibraciju pretvara u električni signal (na drugom kraju uzorka). Način vibracije materijala određuje se polarizacijom PZP kristala. Aksijalna polarizacija izaziva kompresiju i stvara kompresijske valove (P-valove). Bočna polarizacija izaziva način vibracijskih smicanja i generira sekundarni val (S-valove). Debljina kristala definira frekvenciju vala, što je tanji, to je veća frekvencija.



Slika 9-9 Uređaj AVS 700 korišten za mjerenje ultrazvučnih valova koji omogućuje mjerenje brzina pod različitim vrijednostima efektivnih naprezanja i pornog tlaka (izvor: <https://vindum.com/>, 6. 12. 2021.)

Prije laboratorijskih ispitivanja uzoraka potrebno je definirati korekcijske parametre kalibracijom uređaja pomoću bakrenih valjčića duljine 1 i 3 inča i konstantnih brzina širenja P- i S-valova. Korekcijski parametri odgovaraju vremenu prolaska valova kroz prijamnike, koji se trebaju primijeniti pri točnom izračunu dinamičkih elastičnih parametara uzorka.

Uzorak se nalazi u komori koja omogućuje promjenu aksijalnog i radijalnog naprezanja te pornog tlaka. Svi uzorci su podvrgnuti mjerenju pod različitim napreznjima. Za potrebe istraživanja napravljena su dva seta mjerenja pri različitim koracima napreznja: mjerenje brzina na suhim uzorcima i mjerenje brzina na uzorcima zasićenim vodom saliniteta 10 g/l NaCl.

Za svaki uzorak, pri svakom koraku opterećenja mjeri se vrijeme prvog nailaska P- i S-vala (Slika 9-10 i Slika 9-11). Na temelju podataka o dimenzijama uzorka, masi i gustoći uzorka (Tablica 9-3) AVS uređaj automatski izračuna brzinu P- i S-vala, omjer V_p/V_s , Poissonov koeficijent, Youngov modul elastičnosti, volumni modul, modul smicanja, Lamé-ovu konstantu, Akustičnu impedanciju i modul P-vala.

Tablica 9-3 Vrijednosti volumetrijskih parametara uzoraka

Uzorak No.	Dubina	Duljina	Promjer	Masa uzorka	Gustoća uzorka	Porni fluid	Masa uzorka	Gustoća uzorka	Porni fluid
	(m)	mm	mm	g	(g/cm ³)		g	(g/cm ³)	
				Suhi uzorci			Zasićeni uzorci		
1692	805.24	41.34	25.46	50.21	2.386	-	52.74	2.506	H ₂ O (10 g/l NaCl)
1696	806.59	38.49	25.51	45.30	2.303	-	48.24	2.452	H ₂ O (10 g/l NaCl)
1698	807.49	39.89	25.46	49.71	2.448	-	51.69	2.545	H ₂ O (10 g/l NaCl)
3626	808.52	44.49	25.2	53.68	2.419	-	56.18	2.532	H ₂ O (10 g/l NaCl)
3627	972.05	45.33	25.2	56.12	2.482	-	58.22	2.575	H ₂ O (10 g/l NaCl)
3628	973.10	46.89	25.21	58.50	2.499	-	60.45	2.583	H ₂ O (10 g/l NaCl)
3629	973.73	47.59	25.23	58.47	2.457	-	60.75	2.553	H ₂ O (10 g/l NaCl)
3630	974.11	48.60	25.22	60.38	2.487	-	62.25	2.574	H ₂ O (10 g/l NaCl)

Brzina P- i S-vala se izračuna prema formuli:

$$V_P = \frac{L}{T_P - K_P} \quad (9-4)$$

$$V_S = \frac{L}{T_S - K_S} \quad (9-5)$$

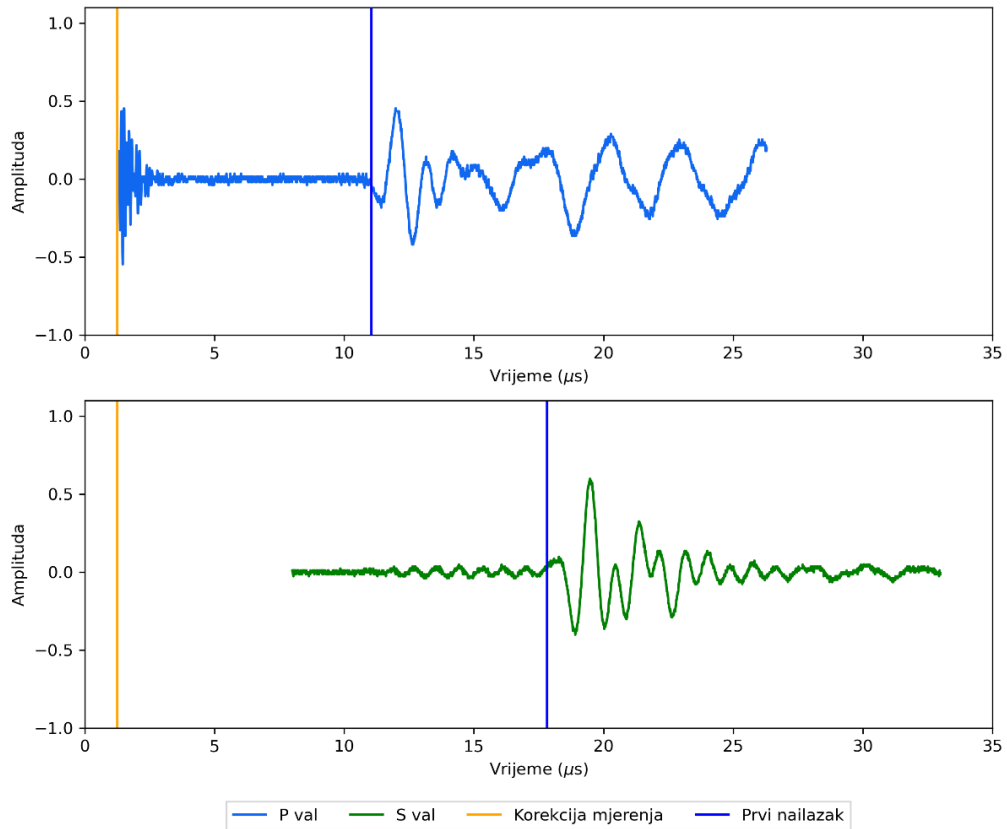
gdje je:

V_P/V_S - brzina P i S vala

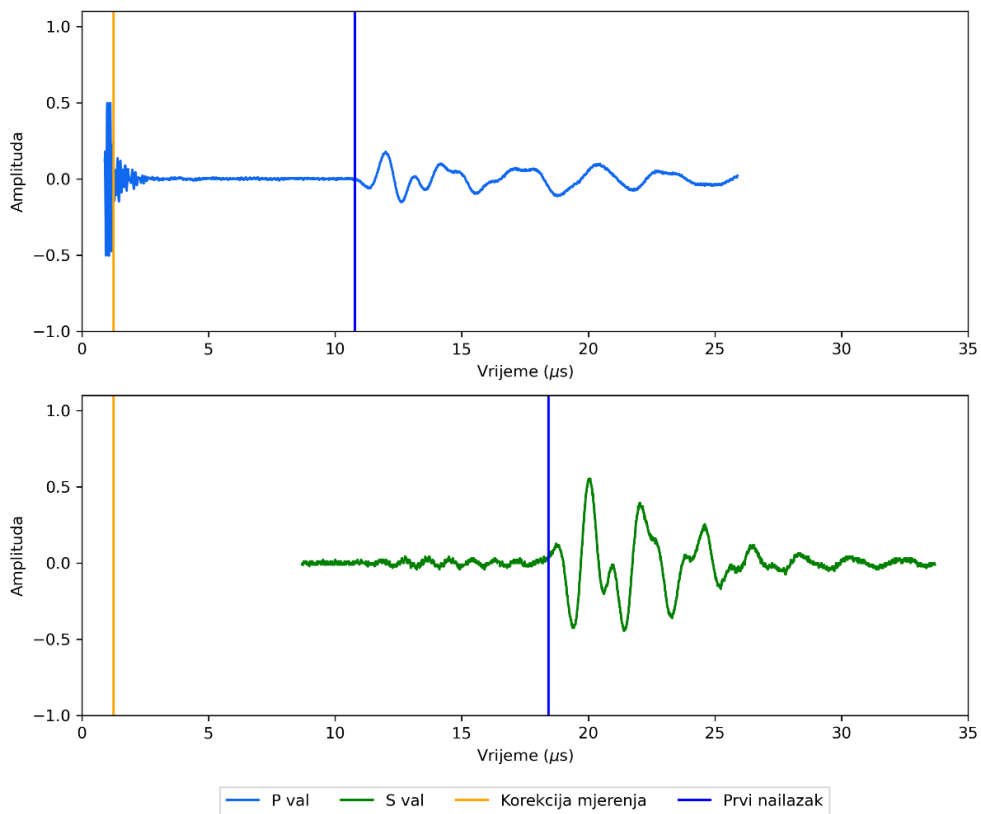
L – duljina uzorka

T_P/T_S – vrijeme prvog nailaska vala

K_P/K_S – korekcijski faktor



Slika 9-10 Signal P- i S-vala suhog uzorka 3628 pri efektivnom naprezanju od 9 MPa

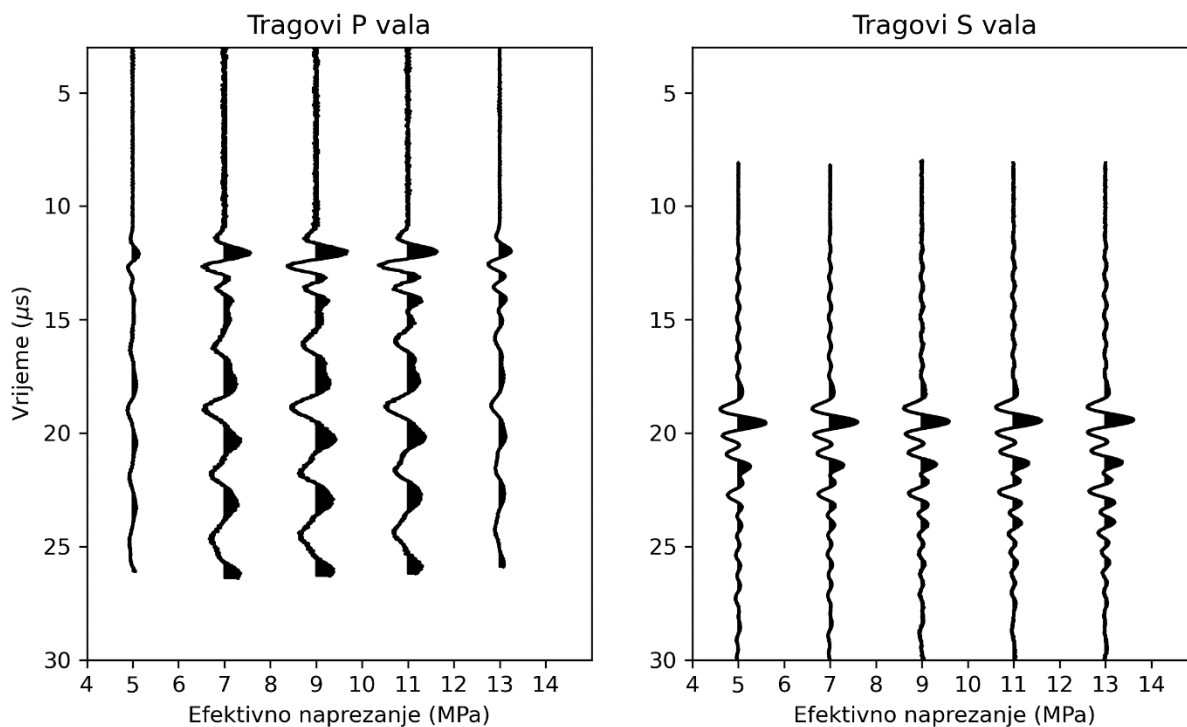


Slika 9-11 Signal P- i S-vala zasićenog uzorka 3628 pri efektivnom naprezanju od 9 MPa

9.3.2 Rezultati mjerenja na suhim uzorcima

Mjerenju ultrazvučnih brzina prethodilo je sušenje uzoraka u dehidratorskoj komori radi isušivanja preostalog pornog fluida. Uzorci su izvagani te im je prema izračunatom volumenu izračunata gustoća cjelokupnog uzorka.

Brzine, tj. snimanje ultrazvučnog vala koji prolazi kroz uzorak izveden je u koracima aksijalnog i radijalnog opterećenja od 5, 7, 9, 11 i 13 MPa +/- 2%.



Slika 9-12 Normalizirani tragovi P-vala i S-vala uzorka 3628 u suhom stanju pri različitim vrijednostima naprezanja

U tablici 9-4 prikazani su rezultati mjerenja ultrazvučnih brzina suhих uzoraka i vrijednosti izvedenih elastičnih parametra.

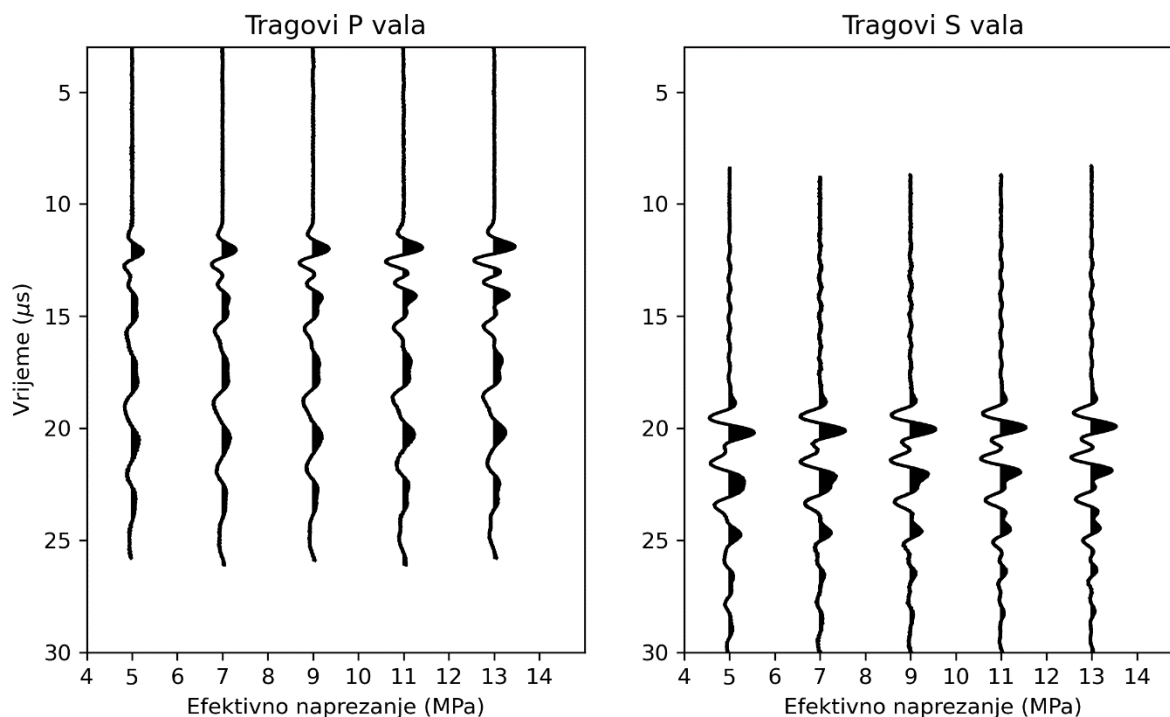
Tablica 9-4 Rezultati laboratorijskih mjerenja na vapnencima u suhom stanju

Uzorak No.	Tiak opterećenja (bar)	Fluid	V _p (m/s)	V _s (m/s)	T _p (μs)	T _s (μs)	Poissonov koeficijent (-)	Modul smicanja (Gpa)	Young-ov modul (Gpa)	V _p /V _s (-)	Volumni modul (Gpa)	Lame-ova konstanta	Akustična impedancija (m/s)/(g/cm ³)	Modul P. vala (Mpa)
Suhi uzorci														
1692	51.4		4423.3	2628.6	10.59	16.77	0.227	16.48	40.45	1.68	24.70	1.37E+10	1.06E+07	46.68
	71.0		4471.1	2635.3	10.49	16.73	0.234	16.57	40.88	1.70	25.60	1.46E+10	1.07E+07	47.69
	90.7	-	4554.9	2640.4	10.32	16.7	0.247	16.63	41.48	1.73	27.32	1.62E+10	1.09E+07	49.50
	110.7		4595.4	2642.0	10.24	16.69	0.253	16.65	41.74	1.74	28.18	1.71E+10	1.10E+07	50.38
1696	131.7		4610.8	2643.7	10.21	16.68	0.255	16.67	41.86	1.74	28.48	1.74E+10	1.10E+07	50.72
	51.0		3965.6	2419.7	10.95	16.95	0.203	13.48	32.45	1.64	18.24	9.25E+09	9.13E+06	36.21
	70.7		4118.3	2430.4	10.59	16.88	0.233	13.60	33.54	1.69	20.92	1.19E+10	9.48E+06	39.06
	90.7	-	4083.4	2442.7	10.67	16.8	0.221	13.74	33.56	1.67	20.08	1.09E+10	9.40E+06	38.40
1698	110.7		4140.5	2448.9	10.54	16.76	0.231	13.81	34.00	1.69	21.06	1.19E+10	9.53E+06	39.48
	131.7		4136.0	2458.3	10.55	16.7	0.227	13.92	34.15	1.68	20.84	1.16E+10	9.52E+06	39.39
	51.4		4429.3	2651.0	10.25	16.09	0.221	17.20	42.01	1.67	25.08	1.36E+10	1.08E+07	48.02
	71.4		4560.9	2667.0	9.99	16	0.240	17.41	43.19	1.71	27.71	1.61E+10	1.12E+07	50.92
3626	91.4	-	4509.4	2670.5	10.09	15.98	0.230	17.46	42.94	1.69	26.50	1.49E+10	1.10E+07	49.77
	110.7		4529.9	2668.8	10.05	15.99	0.234	17.43	43.03	1.70	26.98	1.54E+10	1.11E+07	50.23
	130.7		4560.9	2672.3	9.99	15.97	0.239	17.48	43.30	1.71	27.61	1.60E+10	1.12E+07	50.92
	51.0		4437.5	2605.3	11.27	18.12	0.237	16.42	40.62	1.70	25.74	1.48E+10	1.07E+07	47.64
3627	70.3		4419.8	2557.3	11.31	18.44	0.248	15.82	39.50	1.73	26.16	1.56E+10	1.07E+07	47.26
	90.7	-	4464.2	2567.7	11.21	18.37	0.253	15.95	39.96	1.74	26.95	1.63E+10	1.08E+07	48.21
	111.4		4411.1	2572.1	11.33	18.34	0.242	16.00	39.77	1.71	25.73	1.51E+10	1.07E+07	47.07
	131.4		4523.2	2585.6	11.08	18.25	0.257	16.17	40.67	1.75	27.93	1.71E+10	1.09E+07	49.49
3628	51.0		4627.4	2721.4	11.04	17.7	0.236	18.38	45.43	1.70	28.64	1.64E+10	1.15E+07	53.15
	70.7		4651.1	2726.3	10.99	17.67	0.238	18.45	45.69	1.71	29.10	1.68E+10	1.15E+07	53.70
	90.3	-	4689.6	2698.7	10.91	17.84	0.252	18.08	45.28	1.74	30.49	1.84E+10	1.16E+07	54.59
	110.7		4788.7	2692.3	10.71	17.88	0.269	17.99	45.66	1.78	32.93	2.09E+10	1.19E+07	56.92
3629	131.7		4670.3	2692.3	10.95	17.88	0.251	17.99	45.02	1.73	30.15	1.82E+10	1.16E+07	54.14
	51.4		4786.6	2791.6	11.04	17.84	0.242	19.48	48.39	1.71	31.30	1.83E+10	1.20E+07	57.27
	70.7		4772.0	2791.6	11.07	17.84	0.240	19.48	48.30	1.71	30.95	1.80E+10	1.19E+07	56.92
	91.4	-	4781.8	2793.2	11.05	17.83	0.241	19.50	48.40	1.71	31.15	1.81E+10	1.20E+07	57.15
3630	112.1		4796.4	2789.9	11.02	17.85	0.244	19.45	48.42	1.72	31.56	1.86E+10	1.20E+07	57.50
	132.1		4912.0	2784.9	10.79	17.88	0.263	19.39	48.97	1.76	34.46	2.15E+10	1.23E+07	60.31
	50.7		4355.7	2603.8	12.17	19.32	0.222	16.66	40.72	1.67	24.41	1.33E+10	1.07E+07	46.62
	71.4		4504.1	2622.5	11.81	19.19	0.244	16.90	42.04	1.72	27.32	1.61E+10	1.11E+07	49.85
3630	92.1	-	4516.9	2631.2	11.78	19.13	0.243	17.01	42.30	1.72	27.45	1.61E+10	1.11E+07	50.14
	111.7		4499.8	2638.5	11.82	19.08	0.238	17.11	42.36	1.71	26.95	1.55E+10	1.11E+07	49.76
	131.0		4685.9	2648.7	11.4	19.01	0.265	17.24	43.63	1.77	30.97	1.95E+10	1.15E+07	53.96
	51.0		4861.9	2746.2	11.24	18.74	0.266	18.76	47.48	1.77	33.78	2.13E+10	1.21E+07	58.79
3630	70.3		4771.3	2763.4	11.43	18.63	0.248	18.99	47.39	1.73	31.29	1.86E+10	1.19E+07	56.62
	90.7	-	4828.1	2772.9	11.31	18.57	0.254	19.12	47.95	1.74	32.48	1.97E+10	1.20E+07	57.97
	111.4		4837.7	2785.6	11.29	18.49	0.252	19.30	48.32	1.74	32.47	1.96E+10	1.20E+07	58.21
	131.0		4790.1	2795.2	11.39	18.43	0.242	19.43	48.26	1.71	31.16	1.82E+10	1.19E+07	57.06

9.3.3 Rezultati mjerenja na vodom zasićenim uzorcima

Mjerenju ultrazvučnih brzina prethodilo je zasićenje uzoraka vodom saliniteta 10 g/l koja odgovara slojnoj vodi ležišta. Zasićeni uzorci su izvagani te im je prema izračunatom volumenu izračunata gustoća cjelokupnog uzorka.

Brzine, tj. snimanje ultrazvučnog vala koji prolazi kroz uzorak izvedeno je u koracima aksijalnog i radijalnog opterećenja od 5, 7, 9, 11 i 13 MPa +/- 2%.



Slika 9-13 Normalizirani tragovi P-vala i S-vala uzorka 3628 u zasićenom stanju pri različitim vrijednostima naprezanja

U tablici 9-5 prikazani su rezultati mjerenja ultrazvučnih brzina u uzorcima zasićenim vodom i vrijednosti izvedenih elastičnih parametra.

Tablica 9-5 Rezultati laboratorijskih mjerenja na vapnencima u zasićenom stanju

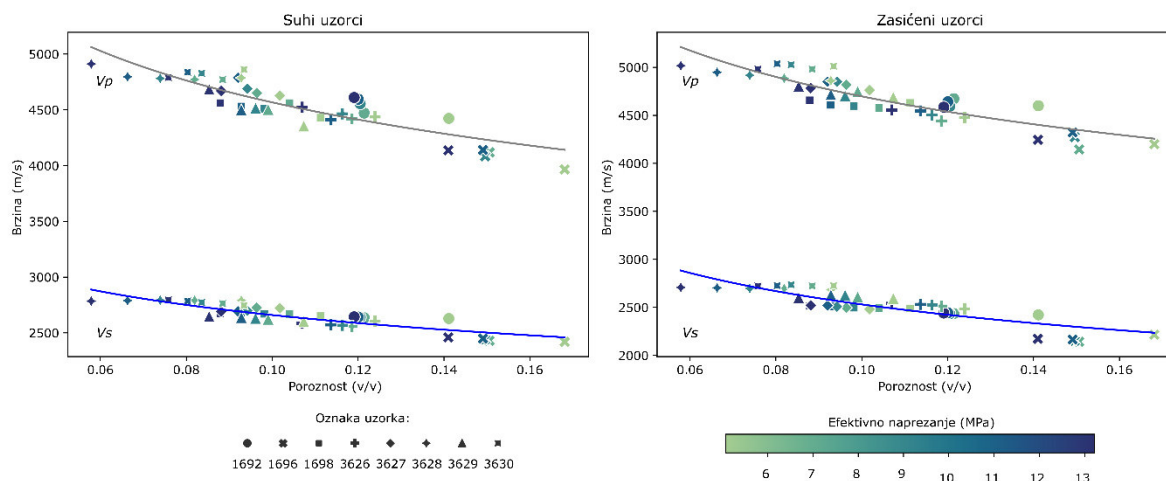
Uzorak No.	Tiak opterećenja (bar)	Fluid	V _p (m/s)	V _s (m/s)	Tp μs	Ts μs	Poissonov koeficijent (-)	Modul smicanja (Gpa)	Young-ov modul (Gpa)	Vp/Vs (-)	Volumni modul (Gpa)	Lame-ova konstanta	Akustična impedancija (m/s)/(g/cm ³)	Modul P vala (Mpa)
1692	51.0		4600.5	2422.2	10.23	18.11	0.308	14.70	38.47	1.90	33.43	2.36E+10	1.15E+07	53.04
	70.7	H2O (10 g/l)	4673.3	2435.1	10.09	18.02	0.314	14.86	39.04	1.92	34.92	2.50E+10	1.17E+07	54.73
	91.4	NaCl	4595.4	2433.6	10.24	18.03	0.305	14.84	38.74	1.89	33.13	2.32E+10	1.15E+07	52.92
	111.0		4641.8	2443.7	10.15	17.96	0.308	14.96	39.16	1.90	34.04	2.41E+10	1.16E+07	53.99
	132.1		4585.2	2440.8	10.26	17.98	0.302	14.93	38.88	1.88	32.78	2.28E+10	1.15E+07	52.68
1696	51.0		4199.2	2216.3	10.41	18.41	0.307	12.04	31.48	1.89	27.18	1.92E+10	1.03E+07	43.24
	70.7	H2O (10 g/l)	4144.9	2141.1	10.53	19.02	0.318	11.24	29.63	1.94	27.14	1.96E+10	1.02E+07	42.13
	91.0	NaCl	4273.8	2153.0	10.25	18.92	0.330	11.37	30.24	1.99	29.63	2.21E+10	1.05E+07	44.79
	111.7		4321.8	2165.2	10.15	18.82	0.332	11.50	30.63	2.00	30.47	2.28E+10	1.06E+07	45.80
	131.0		4245.5	2172.5	10.31	18.76	0.323	11.57	30.61	1.95	28.77	2.11E+10	1.04E+07	44.20
1698	51.0		4629.8	2488.9	9.86	17.07	0.297	15.77	40.89	1.86	33.53	2.30E+10	1.18E+07	54.56
	70.3	H2O (10 g/l)	4576.6	2493.6	9.96	17.04	0.289	15.83	40.80	1.84	32.21	2.17E+10	1.16E+07	53.31
	91.7	NaCl	4597.7	2496.7	9.92	17.02	0.291	15.87	40.96	1.84	32.65	2.21E+10	1.17E+07	53.81
	111.4		4608.4	2509.3	9.90	16.94	0.289	16.03	41.32	1.84	32.69	2.20E+10	1.17E+07	54.05
	131.4		4656.8	2515.6	9.81	16.90	0.294	16.11	41.68	1.85	33.72	2.30E+10	1.19E+07	55.20
3626	50.7		4477.7	2484.5	11.18	18.95	0.278	15.63	39.93	1.80	29.92	1.95E+10	1.13E+07	50.76
	71.4	H2O (10 g/l)	4441.9	2512.6	11.26	18.75	0.265	15.98	40.43	1.77	28.64	1.80E+10	1.12E+07	49.95
	90.3	NaCl	4504.9	2525.4	11.12	18.66	0.271	16.15	41.04	1.78	29.85	1.91E+10	1.14E+07	51.38
	111.0		4546.3	2531.1	11.03	18.62	0.275	16.22	41.37	1.80	30.70	1.99E+10	1.15E+07	52.33
	132.1		4555.6	2541.3	11.01	18.55	0.274	16.35	41.66	1.79	30.74	1.98E+10	1.15E+07	52.54
3627	50.7		4763.6	2480.2	10.76	19.32	0.314	15.84	41.63	1.92	37.31	2.68E+10	1.23E+07	58.43
	70.3	H2O (10 g/l)	4819.3	2495.2	10.65	19.21	0.317	16.03	42.23	1.93	38.43	2.77E+10	1.24E+07	59.81
	91.4	NaCl	4850.2	2507.6	10.59	19.12	0.318	16.19	42.67	1.93	38.99	2.82E+10	1.25E+07	60.58
	112.1		4850.2	2518.8	10.59	19.04	0.315	16.34	42.98	1.93	38.80	2.79E+10	1.25E+07	60.58
	131.0		4783.7	2521.6	10.72	19.02	0.308	16.37	42.82	1.90	37.10	2.62E+10	1.23E+07	58.93
3628	50.7		4861.1	2683.0	10.89	18.52	0.281	18.59	47.63	1.81	36.24	2.38E+10	1.26E+07	61.03
	71.0	H2O (10 g/l)	4886.4	2695.3	10.84	18.44	0.281	18.76	48.08	1.81	36.65	2.41E+10	1.26E+07	61.67
	90.7	NaCl	4917.2	2696.8	10.78	18.43	0.285	18.78	48.27	1.82	37.40	2.49E+10	1.27E+07	62.45
	111.4		4948.3	2703.1	10.72	18.39	0.287	18.87	48.59	1.83	38.08	2.55E+10	1.28E+07	63.24
	132.1		5017.1	2707.7	10.59	18.36	0.295	18.94	49.03	1.85	39.76	2.71E+10	1.30E+07	65.01
3629	51.4		4690.5	2593.9	11.39	19.39	0.280	17.18	43.97	1.81	33.27	2.18E+10	1.20E+07	56.18
	71.7	H2O (10 g/l)	4751.4	2611.0	11.26	19.27	0.284	17.41	44.69	1.82	34.43	2.28E+10	1.21E+07	57.64
	91.7	NaCl	4704.4	2628.3	11.36	19.15	0.273	17.64	44.91	1.79	32.99	2.12E+10	1.20E+07	56.51
	111.0		4718.4	2629.7	11.33	19.14	0.275	17.66	45.02	1.79	33.30	2.15E+10	1.20E+07	56.85
	130.7		4804.2	2602.4	11.15	19.33	0.292	17.29	44.70	1.85	35.87	2.43E+10	1.23E+07	58.93
3630	52.1		5012.4	2726.2	10.94	18.87	0.290	19.13	49.36	1.84	39.17	2.64E+10	1.29E+07	64.68
	71.0	H2O (10 g/l)	4981.5	2723.1	11.00	18.89	0.287	19.09	49.13	1.83	38.43	2.57E+10	1.28E+07	63.88
	91.7	NaCl	5027.9	2735.4	10.91	18.81	0.290	19.26	49.69	1.84	39.40	2.66E+10	1.29E+07	65.08
	111.0		5038.4	2726.2	10.89	18.87	0.293	19.13	49.48	1.85	39.84	2.71E+10	1.30E+07	65.35
	132.1		4981.5	2721.6	11.00	18.90	0.287	19.07	49.09	1.83	38.46	2.57E+10	1.28E+07	63.88

9.4 Analiza rezultata mjerenja brzina ultrazvučnih valova na uzorcima

Brzine P- i S-vala vapnenaca Bjelovarske depresije mjerene su kao funkcija efektivnog tlaka u uvjetima suhog i vodom zasićenog stanja. Na temelju raspoloživih podataka napravljena je analiza rezultata brzina u odnosu na zasićeno stanje, poroznost, pri raznim koracima efektivnog napreznja. Također su analizirani odnosi brzina u suhom i zasićenom stanju, odnosi P- i S-brzina te je napravljena analiza modula elastičnosti.

9.4.1 Odnos brzina i poroznosti

Analizom promjene brzina u odnosu na poroznosti vidljivo je da trend P- i S-brzina opada s povećanjem poroznosti bez obzira na efektivno napreznje (Slika 9-14). Iz dijagrama ovisnosti brzine suhih uzoraka o poroznosti vidljivo je da vrijednosti P-brzina opadaju s porastom poroznosti i imaju raspon vrijednosti od 3900 do 5000 m/s.



Slika 9-14 Ovisnost brzine o promjeni poroznosti suhih i zasićenih uzoraka

Vrijednosti S-brzina prate sličan trend kao i P-brzine s rasponom vrijednosti od 2200 do 2800 m/s. Prema laboratorijskim rezultatima odnos brzina i poroznosti suhih uzoraka može se definirati formulama:

$$V_p = -80,881 \Phi + 5369,5 \text{ [m/s]} \quad (9-6)$$

$$V_s = -40,907 \Phi + 3064,8 \text{ [m/s]} \quad (9-7)$$

Brzine zasićenih uzoraka također opadaju s porastom poroznosti. Vrijednosti P-brzina imaju povećane vrijednosti u odnosu na suhe uzorke te imaju raspon vrijednosti od 4000 do 5200 m/s. Vrijednosti S-brzina imaju vrijednosti od 2000 do 2800 m/s te su vrijednosti malo

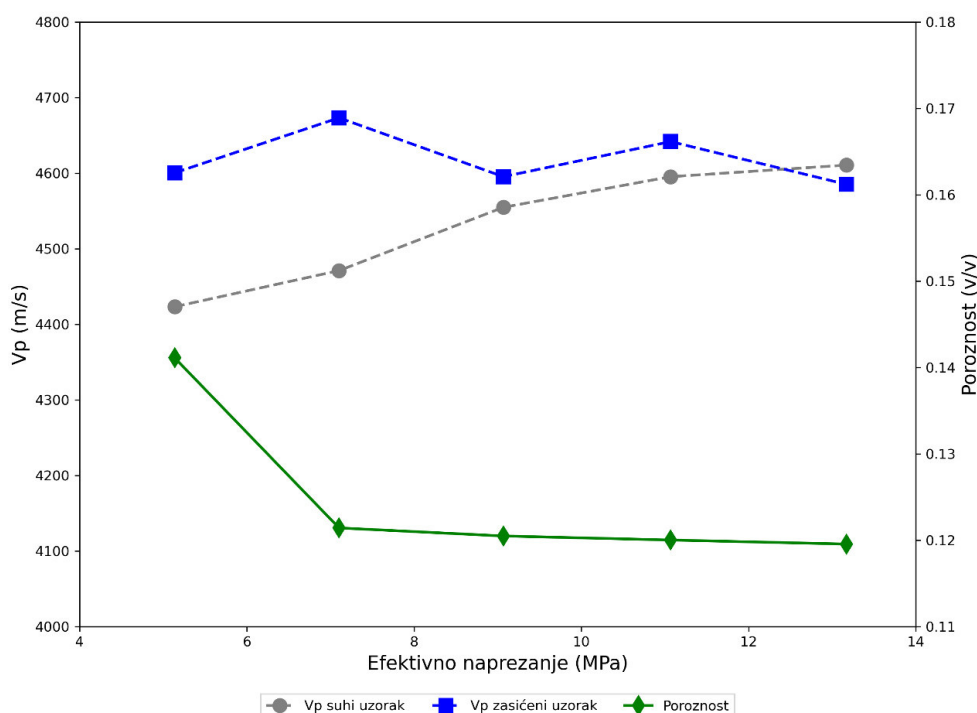
niže od brzina suhih uzoraka. Određena promjena S-brzina objašnjava se promjenom gustoće uzorka uslijed promjene pornog fluida.

Prema laboratorijskim rezultatima odnos brzina i poroznosti uzorka zasićenim vodom može se definirati formulama:

$$V_p = -85,07 \Phi + 5542,1 \text{ [m/s]} \quad (9-8)$$

$$V_s = -64,918 \Phi + 3177 \text{ [m/s]} \quad (9-9)$$

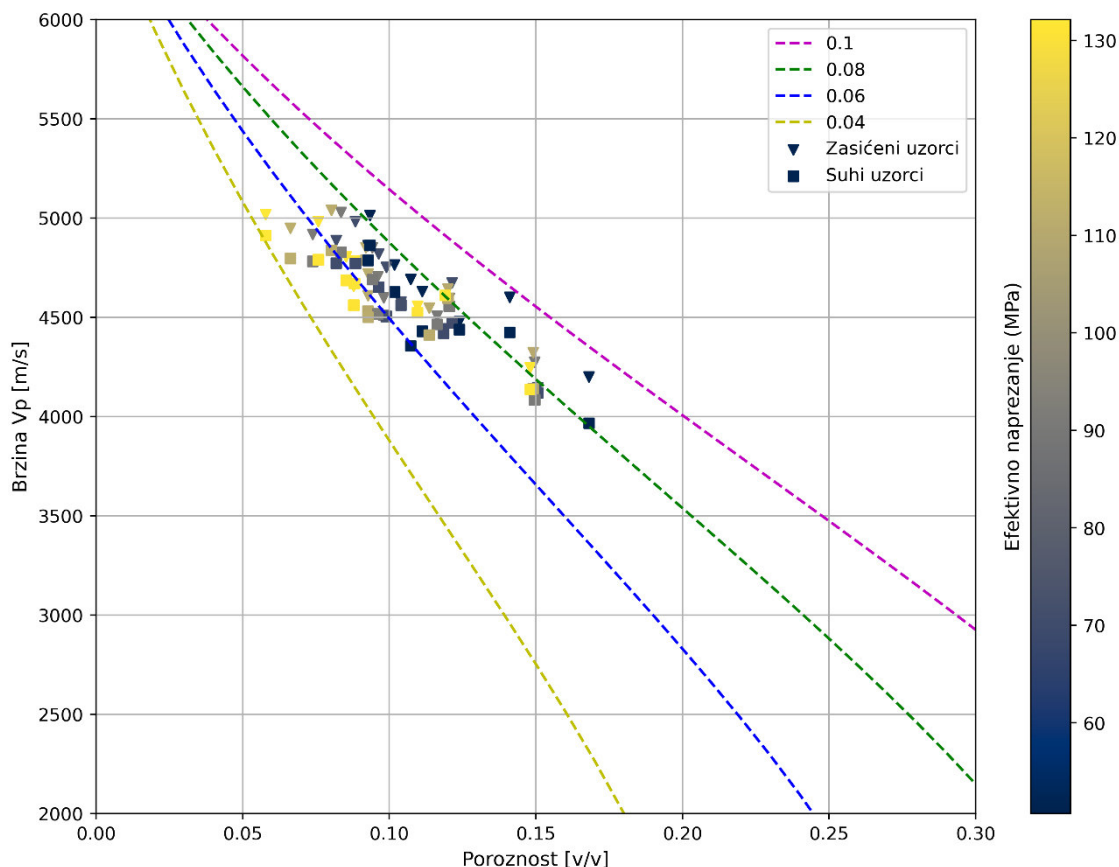
Iako se vrijednosti brzina u odnosu na poroznosti jednoliko mijenjaju bez obzira na efektivno naprezanje, vrijednosti brzina osciliraju pri povećanju efektivnog naprezanja (Slika 9-15). Razlog oscilacija je nagli pad poroznosti pri primjeni najmanjeg efektivnog naprezanja i aktiviranje definiranih pukotinskih sustava pri daljnjim povećanjem efektivnog naprezanja.



Slika 9-15 Dijagram ovisnosti P-brzina, poroznosti i efektivnog naprezanja uzorka 1692 u suhom i zasićenom stanju

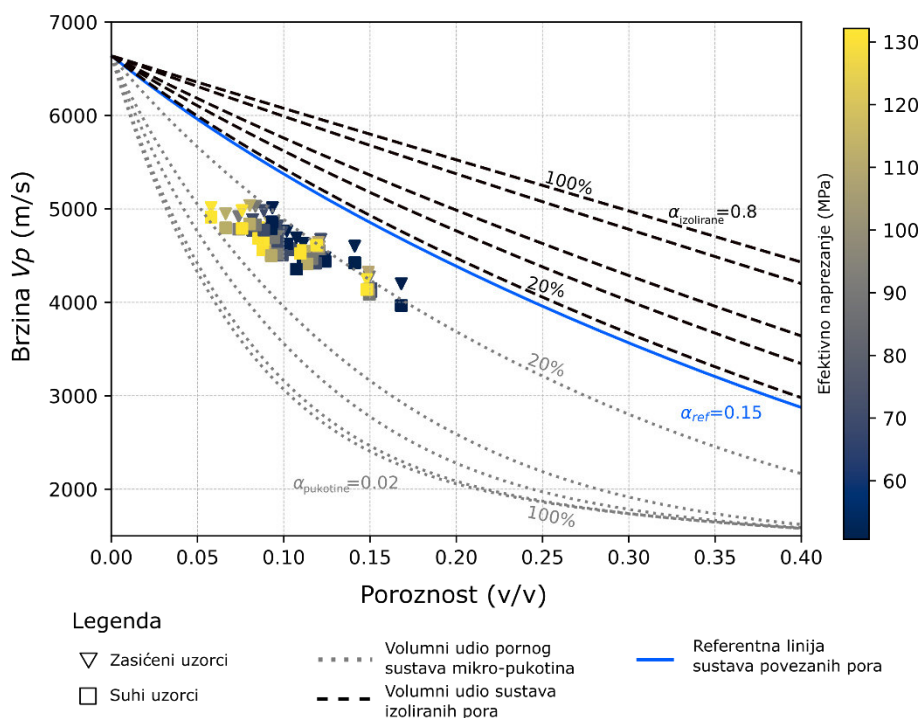
Laboratorijski rezultati također su interpretirani i provjereni pomoću dva teorijska modela: Kuster i Toksöz modela i modela Xu-Payne koji su opisani u poglavlju 7.2. Model Kuster i Toksöz pokazuje raspodjelu pora u obliku elipse s koeficijentima pora između 0,04 i 1 (Slika

9-16). Rezultati su uglavnom ograničeni između 0,06 i 0,08 vrijednosti koeficijenta pora. Slika 9-16 pokazuje da model Kuster i Toksöz ne mogu dovoljno dobro opisati podatke, jer nije moguće koristiti jedinstveni koeficijent pora za sve rezultate.



Slika 9-16 Dijagram brzina P-vala i poroznosti s definiranim modelom Kuster i Toksöz za eliptični oblik pora. Podaci su obojani vrijednostima efektivnih naprežanja. Ulazni elastični parametri: $K=76.8$ GPa, $\mu=32$ GPa; slojna voda $K = 2.1$ GPa

S druge strane, tumačenje rezultata istraživanja modelom Xu-Payne omogućuje definiciju pornog sustava vapnenaca. Dijagram (Slika 9-17) pokazuje dominaciju pornog sustava međusobno povezanih pora s udjelom mikro-pukotina, budući da svi podaci padaju ispod referentne crte. Većina rezultata mjerenja grupirana je ispod linije volumena pora mikro-pukotine 20% pa prema rezultatima interpretacije prema modelu Xu-Payne udio mikro-pukotina iznosi od 20% do 35% u ukupnom prostoru pora.



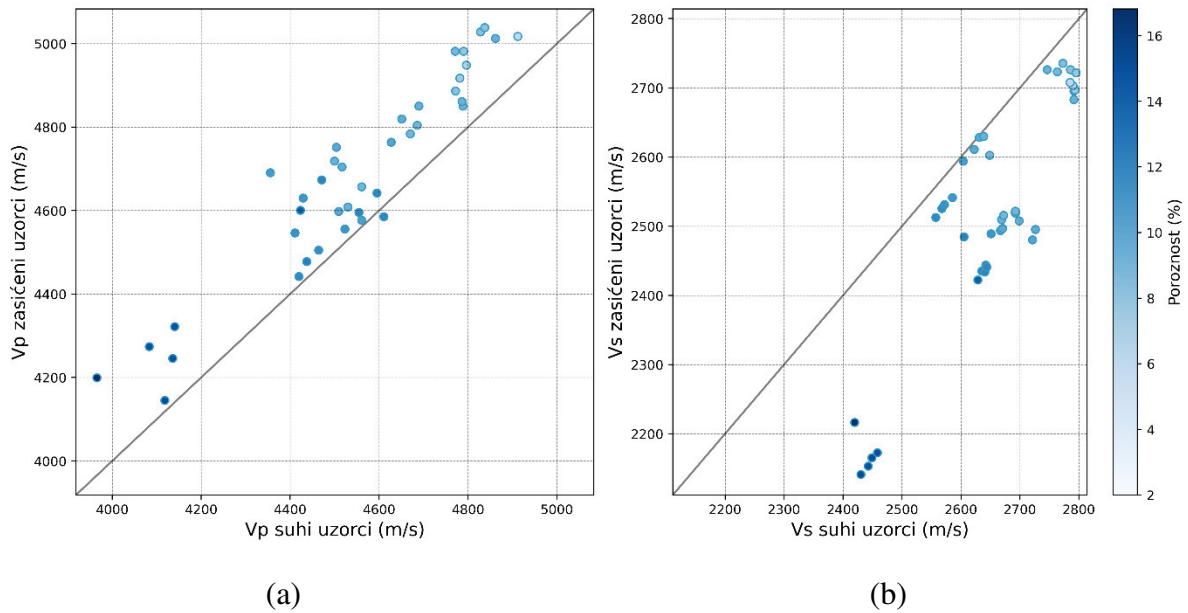
Slika 9-17 Dijagram brzina P-vala i poroznosti s definiranim modelom Xu Payne. Podaci su obojani vrijednostima efektivnih naprezanja. Ulazni elastični parametri: $K = 76.8$ GPa, $\mu = 32$ GPa; slojna voda $K = 2.1$ GPa

Interpretacija je u skladu s rezultatima brzine i poroznosti te podržava objašnjenje prisutnosti pukotina kao uzroka oscilacija brzine s povećanjem efektivnog naprezanja.

9.4.2 Odnos brzina rasprostiranja P- i S-vala

Analiza brzina obzirom na porni fluid pokazuje da su P-brzine suhih uzoraka veće u odnosu na P-brzine zasićenih uzoraka. Vidljivo da su vrijednosti promjena P-brzina suhih u odnosu na zasićene uzorke vapnenaca smanjene od 15 m/s do 330 m/s ili od 0,3% do 7,7% (Slika 9-18a i Slika 9-19).

Vrijednosti S-brzina suhih uzoraka su manje u odnosu na S-brzine zasićenih uzoraka, iako se teoretski S-brzine ne mijenjaju s promjenom fluida, promjene u vrijednostima brzina su posljedica promjene gustoće medija zamjenom pornog fluida, zraka u vodu s 10 g/l NaCl i efekta smanjenja ili jačanja modula smicanja. Rezultati S-brzina ukazuju da su brzine zasićenih uzoraka vapnenaca manje od 3 m/s do 290 m/s ili od 0,1% do 11,6% (Slika 9-18b).



Slika 9-18 Dijagram ovisnosti P-brzina i S-brzina suhih i zasićenih uzoraka

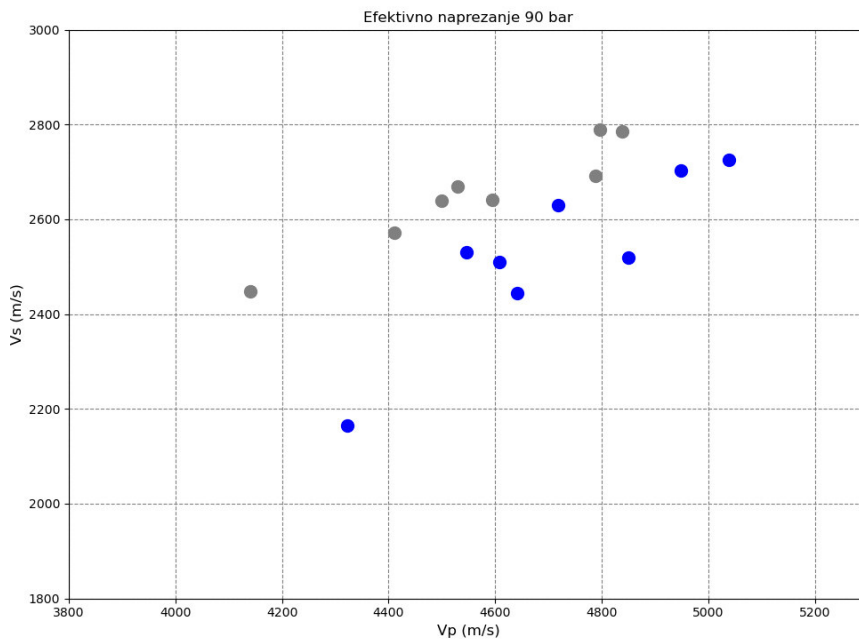
Odnosi P- i S-brzina su značajni za kvantitativnu interpretaciju i karakterizaciju ležišta i mnogi su autori definirali empirijske odnose V_p i V_s koji su navedeni u poglavlju 5. Na temelju dijagrama ovisnost brzine o promjeni poroznosti uzoraka vidljivo je da rezultati prate ujednačen trend bez obzira na efektivno naprezanje. Usporedbom dijagrama odnosa V_p – V_s pod efektivnim naprezanje od 9 MPa (Slika 9-19) i odnos brzina pod svim vrijednostima efektivnih naprezanja (Slika 9-20) vidljiv je sličan trend odnosa V_p i V_s brzina. Stoga je analiziran odnos V_p i V_s za sve vrijednosti efektivnog naprezanja.

Dijagram odnosa V_p i V_s (Slika 9-20) ima ujednačen trend za sve vrijednosti efektivnog naprezanja. Na temelju rezultata vrijednosti brzina odnos V_p i V_s brzina suhih vapnenaca može se definirati empirijskim izrazom:

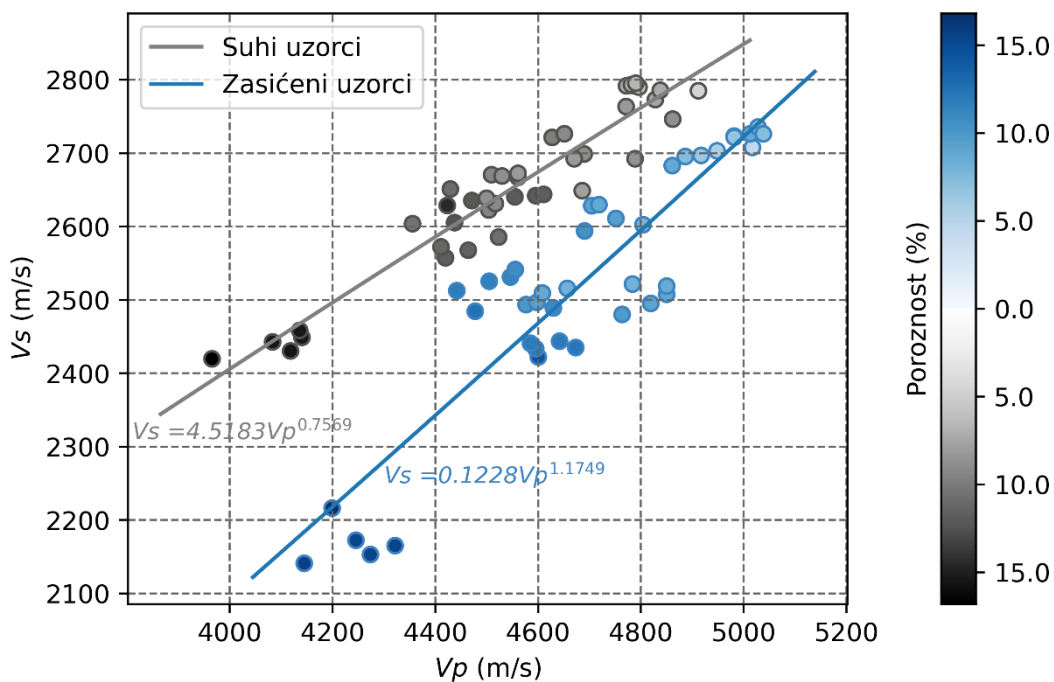
$$V_s = 4,51831V_p^{0,7569} [m/s] \quad (9-10)$$

Empirijski odnos za vodom zasićene vapnenice može se definirati izrazom:

$$V_s = 0,1228V_p^{1,1749} [m/s] \quad (9-11)$$



Slika 9-19 Dijagram ovisnosti P-brzina i S-brzina suhih (sivo) i zasićenih uzoraka (plavo) pri efektivnom napreznju od 9 MPa

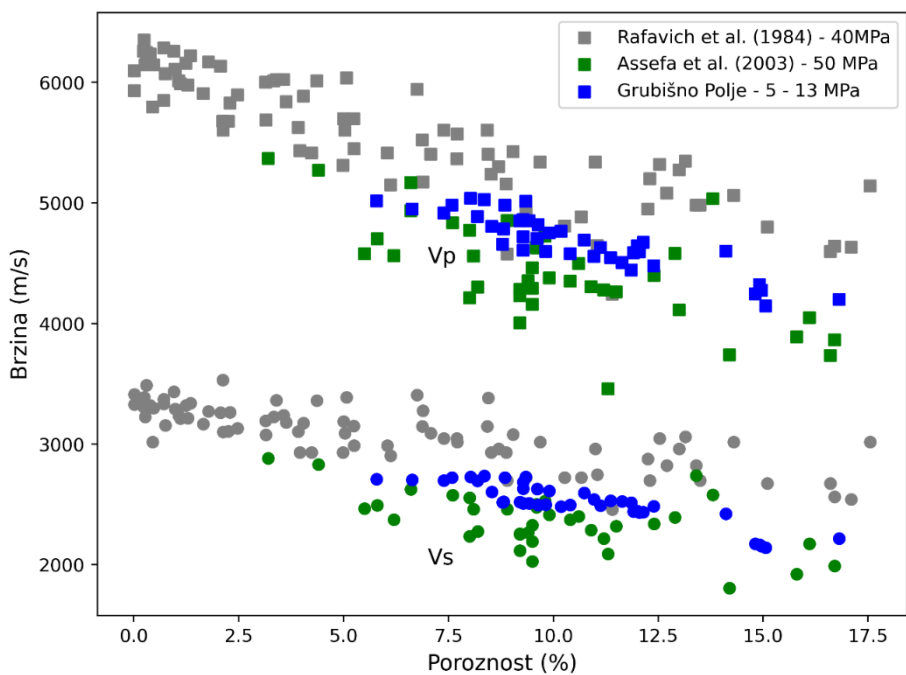


Slika 9-20 Dijagram ovisnosti P-brzina i S-brzina suhih (sivo) i zasićenih uzoraka (plavo) pri različitim efektivnim napreznjima

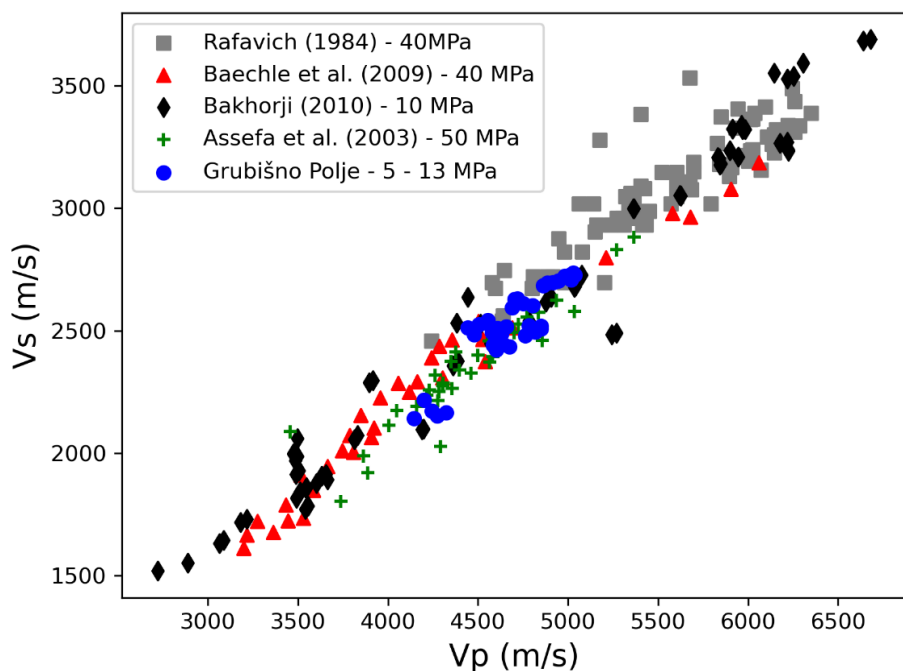
Rezultate odnosa $V_p - V_s$ brzina mogu se usporediti s objavljenim radovima i rezultatima. Do sad najdetaljniju analizu ultrazvučnih brzina karbonata objavili su Rafavich et al. (1984) prema laboratorijskoj analizi jezgara iz 4 bušotine i ukupno 93 uzorka. Ultrazvučne brzine su analizirane pod efektivnim naprežanjem od 6000 psi, tj. 40 MPa na uzorcima zasićenim vodom.

Usporedbom odnosa V_p i V_s brzina u odnosu na poroznost na temelju rezultata Rafavich et al. (1984) i rezultata ovog istraživanja vidljiv je jednak trend pada brzina s porastom poroznosti (Slika 9-21). Bitno je naglasiti da postoji razlika u laboratorijskim mjerenjima, naime Rafavich et al. (1984) rezultati su temeljeni na jezgrama s rasponom dubina od 1200 m do 3100 m od površine tla uz efektivno naprežanje od 40 MPa, tj. 400 bar, a prikazani rezultati ovog istraživanja su temeljeni na jezgrama s rasponom dubina od 800 m do 980m od površine tla uz efektivno naprežanje od 11 MPa, tj. 110 bara. Da su uzorci u ovom istraživanju analizirani uz efektivno naprežanje od 40 MPa rezultati bi imali veću brzinu i bolju korelaciju s podacima Rafavich et al. (1984).

Ova usporedba daje širi kontekst i veću vjerodostojnost rezultatima ovog istraživanja što je vidljivo i odnosom V_p i V_s na temelju rezultata Rafavich et al. (1984), Baechle et al. (2009), Bakhorji (2010) i Assefa et al. (2003) i bušotina Grubišno Polje (Slika 9-22).

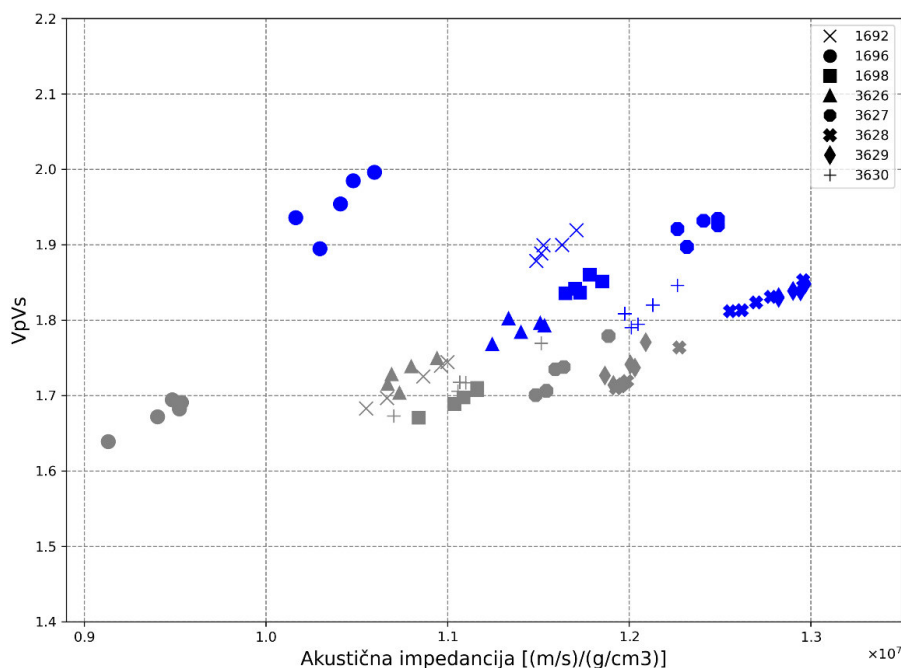


Slika 9-21 Odnos V_p , V_s brzina u odnosu na poroznost



Slika 9-22 Odnos V_p - V_s brzina Grubišnjog Polja uspoređen s rezultatima iz literature različitih vrijednosti efektivnog napreznja i dubina

Na Slika 9-23 prikazan je omjer V_p/V_s i akustičnih impedancija za uzorke zasićenih i suhих vapnenaca. Slika daje pregled izmjerenih podataka i odvaja suhe i zasićene uzorke. Zasićeni uzorci pokazuju veće vrijednosti V_p/V_s i nešto veću akustičnu impedanciju.



Slika 9-23 Dijagram ovisnosti V_p/V_s koeficijenta i akustičnih impedancija suhih (sivo) i zasićenih (plavo) uzoraka

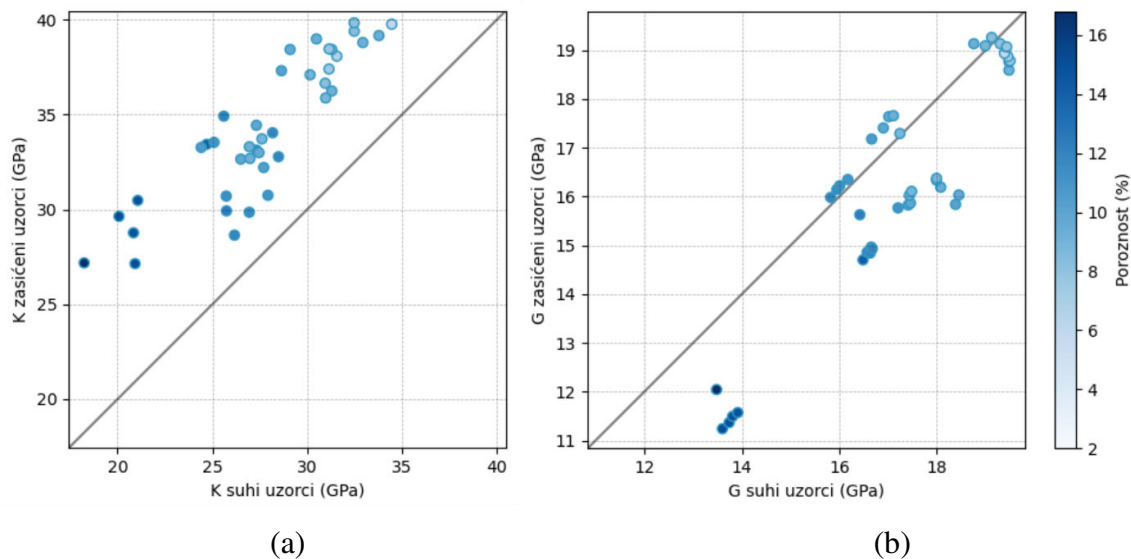
9.4.3 Elastični parametri

Kao što mnogi autori navode i svi analizirani uzorci Grubišnog Polja pokazuju porast volumnog modula nakon zasićenja vodom (Slika 9-24a). Maksimalno povećanje vrijednosti iznosi 32,9%, a minimalno iznosi 8,6%. Analizom rezultata može se zaključiti da povećanje vrijednosti volumnog modula opada s porastom efektivnog naprežanja.

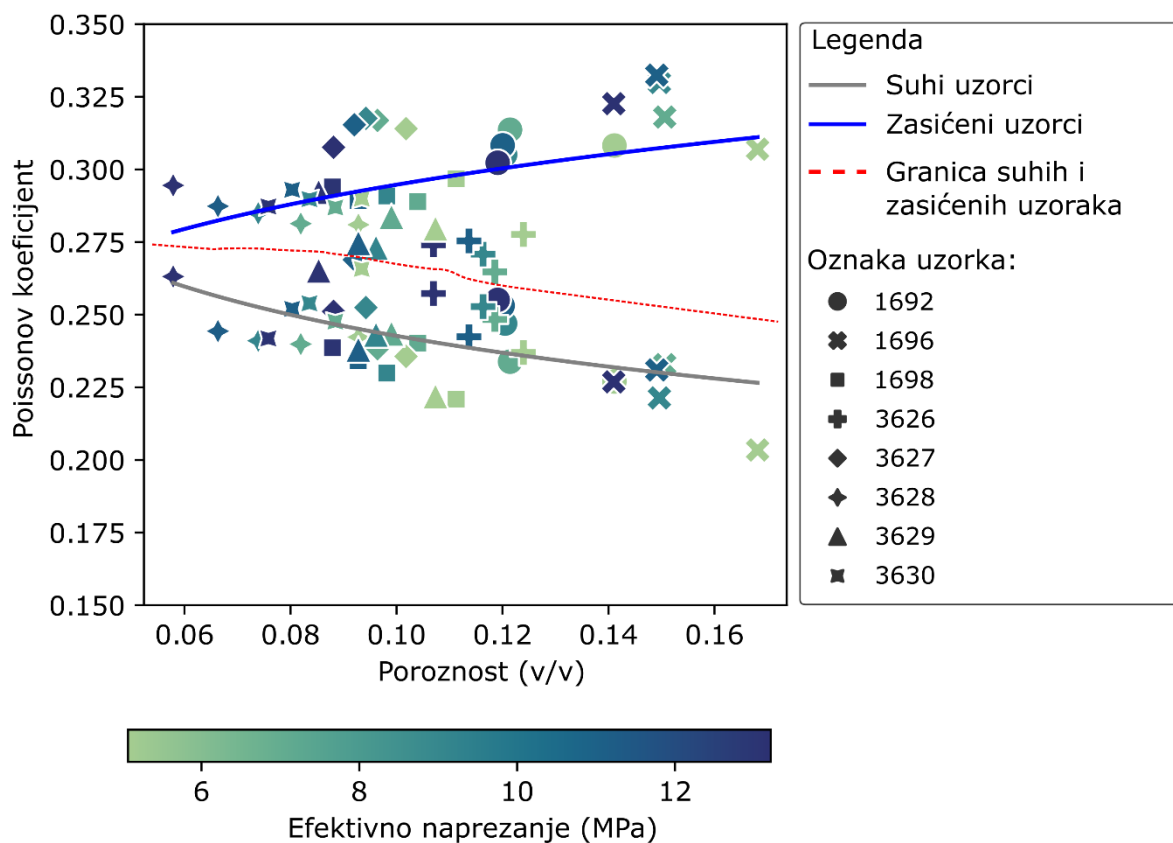
Kao što je spomenuto ranije, modul smicanja vode iznosi nula i teoretski modul smicanja zasićene stijene neće se promijeniti. No zbog promjene gustoće stijene ali i efekta slabljenja modula smicanja, tj. zbog utjecaja interakcije mikro-struktura stijene fluida, moduli smicanja suhih uzoraka su veći u odnosu na one zasićenih uzoraka.

Efekt slabljenja modula smicanja vidljiv je na uzorcima Grubišnog Polja (Slika 9-24b) gdje je najveća vrijednost slabljenja modula smicanja zasićenih uzoraka 19%. No neki uzorci kao što su 3626, 3629 i 3630 pokazuju gotovo linearan (teoretski) trend. Navedeni uzorci imaju blago povećanje modula smicanja zasićenih uzoraka u vrijednostima od 0,20 do 1,3%. Iako navedeni uzorci imaju male vrijednosti poroznosti od 8 do 10% ne postoji snažna povezanost između poroznosti i povećanja modula smicanja, jer drugi uzorci s istim vrijednostima poroznosti pokazuju efekt slabljenja modula smicanja. Tri uzorka imaju efekt jačanja modula

smicanja, s izraženom sekundarnom poroznošću što je u skladu sa zaključcima Baechle et al. (2009).

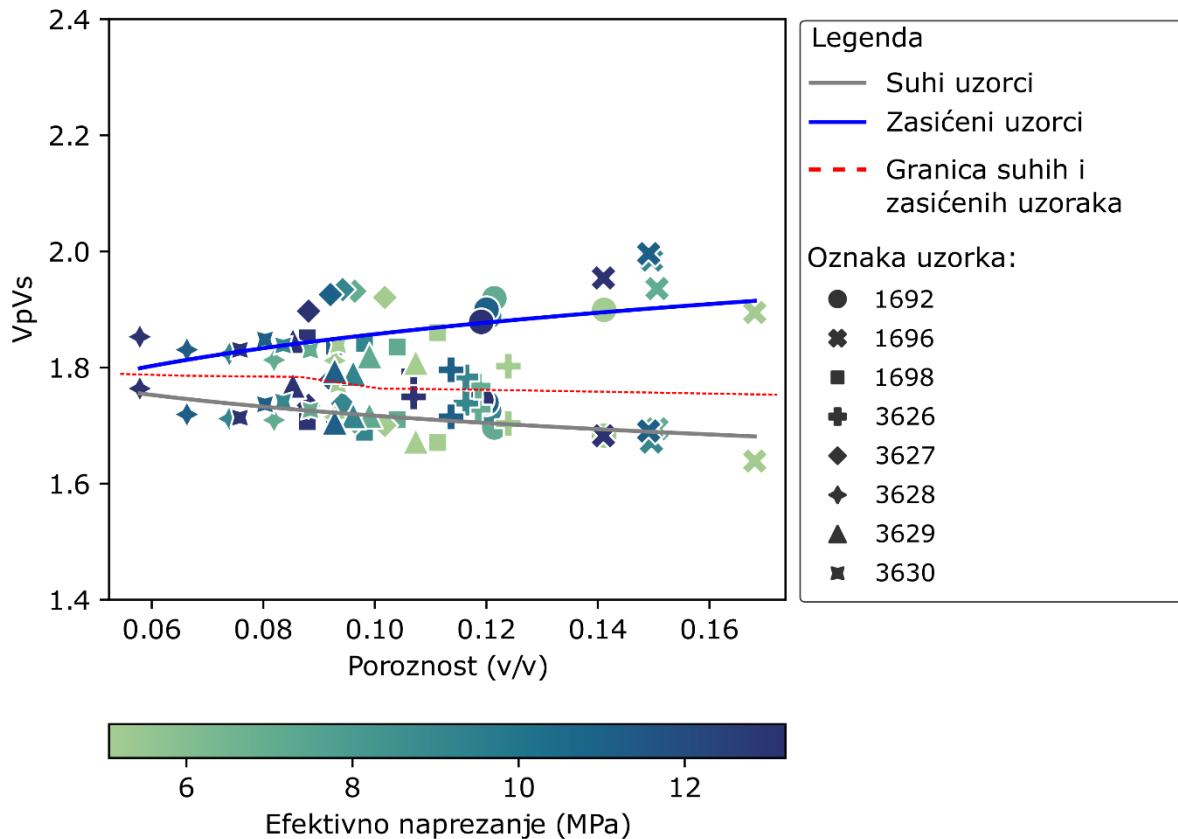


Slika 9-24 Dijagram ovisnosti volumnih i smičnih modula suhih i zasićenih uzoraka



Slika 9-25 Dijagram ovisnosti Poissonovog koeficijenta i poroznosti suhih i zasićenih uzoraka

Vrijednosti Poissonovog koeficijenta se mijenjaju s promjenom poroznosti i ovisi o stanju zasićenja (Slika 9-25). Disperzije vrijednosti obzirom na promjene efektivnog napreznja nisu značajne, jer Poissonov koeficijent ovisi o V_p/V_s vrijednostima (Slika 9-26) koji također ne pokazuju disperziju vrijednosti s promjenom efektivnog napreznja. Vrijednosti V_p/V_s suhih uzoraka blago opadaju, dok zasićenih blago rastu s porastom poroznosti. Srednja vrijednost V_p/V_s suhih uzoraka iznosi 1,72, a zasićenih 1,86.

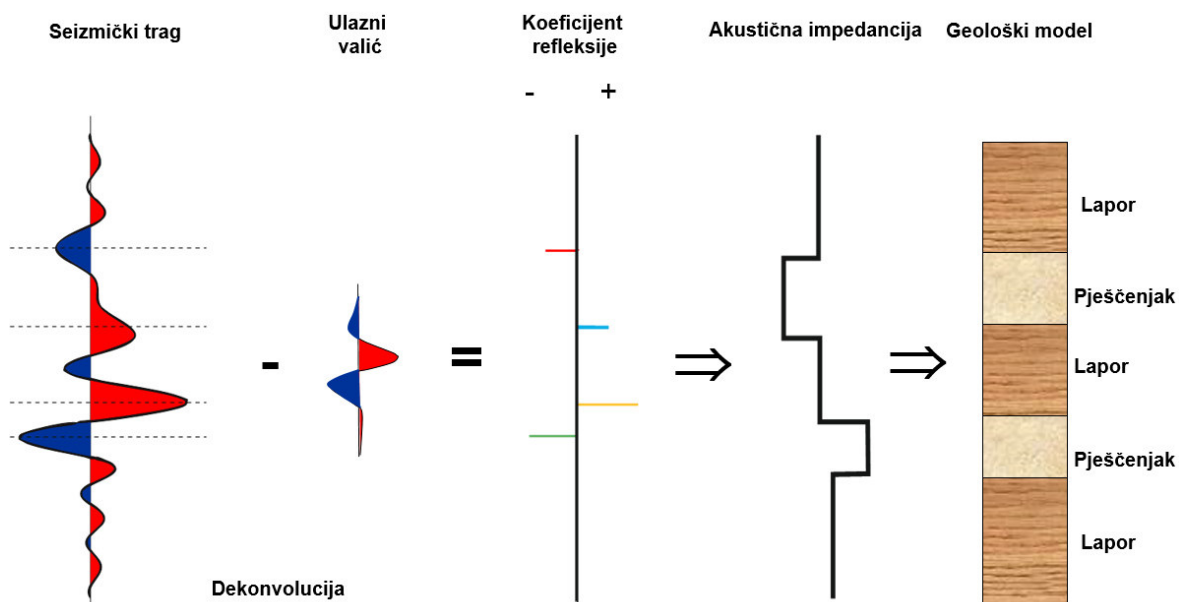


Slika 9-26 Dijagram ovisnosti V_p/V_s koeficijenta i poroznosti suhih i zasićenih uzoraka

10 Seizmička inverzija

Cilj seizmičke inverzije je rekonstrukcija geološke građe podzemlja na temelju seizmičkih mjerenja. Seizmičkom inverzijom nastoje se izdvojiti fizikalni parametri podzemlja koji se mogu povezati s geološkim značajkama. Seizmička inverzija predstavlja kvantitativno tumačenje seizmičkih podataka. U praksi, proces inverzije se pojednostavljuje linearnim jednadžbama gdje se konačno nelinearna rješenja dobivaju iterativnim postupkom rješavanja niza linearnih jednadžbi (Wang, 2017).

Impedancija, koja je umnožak brzine seizmičkih valova i gustoće stijena predstavlja osnovno fizikalno svojstvo stijena (Becquey et al., 1979). Impedancija se naziva P-impedancija ako se pri izračunu koriste brzine P-valova, a S-impedancija ako se koriste brzine S-valova. Postupkom inverzije se iz snimljenog seizmičkog traga izračunava krivulja akustične impedancije postupkom dekonvolucije, a koji su prvi objavili Lavergne, (1975); Lindseth, (1976); Lavergne i Willm, (1977) i Lindseth (1979). Transformacija seizmičkog koeficijenta refleksije u akustične impedancije je proces inverzan seizmičkom izravnom modeliranju (engl. *forward modeling*) gdje je geološki model konstruiran na temelju bušotinskih podataka. Za razliku od modeliranja, inverzija koristi seizmički odziv za izdvajanje geoloških informacija (Slika 10-1).



Slika 10-1 Postupak seizmičke inverzije: pretvorba snimljenog seizmičkog traga u krivulju akustične impedancije

Inverziju na temelju modeliranja (engl. *model based*) predstavili su Cooke i Schneider (1983) kao generalizirani pristup linearne inverzije gdje se geološki model može definirati kao najbolji model s najmanjom statističkom pogreškom. Pri tome se seizmičko modeliranje koristi za izračunavanje sintetskih seizmičkih tragova koji se kasnije uspoređuju sa stvarnim snimljenim seizmičkim podacima.

Općenito, postoje dvije vrste inverzije, deterministička i stohastička. Deterministička inverzija temelji se na minimiziranju razlike između modeliranog seizmičkog traga i traga snimljenih seizmičkih podataka. Takvim pristupom dobivamo jedno rješenje, tj. najbolju procjenu za zadane parametre. Deterministička inverzija se dijeli prema ulaznim seizmičkim podacima na *post-stack* i *pre-stack*.

Post-stack inverzija se temelji na volumenu seizmičkih podataka u kojem su tragovi zbrojeni za različite kutove upada seizmičkih zraka, a koji se inače koristi u svrhu strukturno-stratigrafske interpretacije podzemlja. Seizmički refleksi, odnosno seizmički tragovi su odraz interferencije između slojeva stijena različitog litološkog sastava i zasićenja fluidima, a time i različitih akustičnih impedancija. U postupku *pre-stack* inverzije koriste se nebrojeni seizmički tragovi (engl. *gather*). Time u procesu inverzije više tragova odgovara istoj zajedničkoj dubinskoj točki refleksije, što je osobito važno u slučaju tankih proslojaka čiji odziv se gubi zbrajanjem tragova.

Stohastička inverzija, zvana i geostatistička inverzija, rezultira višestrukim realizacijama impedancija, tj. daje višestruka rješenja akustičnih impedancija. Ova metoda koristi statističke parametre dobivene analizom variograma i veću rezoluciju modela (1 ms) što omogućuje bolju integraciju seizmičkih podataka u geološki model te omogućuje veću kontrolu pri karakterizaciji ležišta. Veća rezolucija modela omogućuje detaljniju interpretaciju vertikalnih i lateralnih geoloških promjena. Cilj analize variograma je osigurati da modeli odgovaraju očekivanim prostornim geološkim promjenama kao što su promjene facijesa i strukturno-tektonske promjene.

Razlike između determinističke i stohastičke inverzije objavili su Francis (2005) te Sams i Saussus (2010) pri čemu navode i razlike u histogramu impedancija, tj. rasponu vrijednosti impedancija determinističke inverzije i impedancija izračunatih na temelju bušotinskih podataka. Xu (2012) smatra da spomenuta razlika u histogramima postoji zbog integracije modela niskih frekvencija u determinističkoj inverziji, pri čemu je raspon frekvencija kontroliran samo rasponom frekvencija seizmičkih podataka.

Inverzija na temelju modeliranja (Russell i Hampson, 1991) zahtijeva početni model i definiranje seizmičkog valića iz seizmičkih podataka. Model se iterativno nadograđuje sve dok korelacija ne zadovolji unaprijed zadanu vrijednost. Stoga proces ovisi o interpretatoru i iskustveno postavljenim graničnim vrijednostima zadovoljavajuće korelacije, a koje su uvjetovane dostupnošću bušotinskih podataka, uglavnom karotaže gustoće i zvučne karotaže.

Nepouzdanost, višeznačnost inverzije smanjuje se korištenjem modela niskih frekvencija koji bolje odgovaraju bušotinskim podacima i osiguravaju realniju raspodjelu impedancija u modelu (Chopra i Castagna, 2014). Nepouzdanost interpretacije akustičnih impedancija zbog nedostatka modela niskih frekvencija diskutirali su i prikazali u svom radu Wagner et al. (2006).

Bitno je naglasiti da se u literaturi često spominju relativna i apsolutna akustična impedancija (Russell i Hampson, 1999; Francis i Syed, 2001). Relativna akustična impedancija je ograničena samo na frekvencijski spektar seizmičkih podataka. Seizmički signal ima uski frekvencijski spektar (npr. 15-80 Hz) zbog učinka filtriranja seizmičkog vala tijekom rasprostiranja kroz podzemlje, ograničenja opreme za snimanje i obrade seizmičkih podataka. Tijekom procesa obrade snimljenih seizmičkih podataka niske frekvencije uglavnom predstavljaju smetnje, koje se nastoje ukloniti radi poboljšanja kvalitete prikaza seizmičkih podataka. Uslijed ograničenja frekvencijskog spektra seizmičkih podataka ovakve impedancije ne mogu se usporediti s najvažnijim podatkom, tj. bušotinskim podatkom (Slika 10-2). S druge strane, impedancije izračunate iz bušotinskih podataka, tj. zvučne karotaže i karotaže gustoće, imaju širok frekvencijski spektar (npr. 0-1kHz). Filtriranjem navedenih impedancija na spektar niskih frekvencija (npr. 0-15 Hz) izdvajaju se bitne informacije koje relativne impedancije ne sadrže.

Stoga impedancije izračunate inverzijom samo iz seizmičkog frekvencijskog spektra ne sadrže detaljne informacije kao one izračunate iz bušotinskih podataka. No, ako se procesom inverzije konstruira jedinstveni model impedancija koji sadrži spektar niskih i visokih frekvencija takve se impedancije nazivaju apsolutne impedancije.

10.1 Deterministička *post-stack* inverzija

Post-stack inverzija spada u determinističke inverzije i temelji se na integriranom spektru niskih frekvencija i spektru frekvencija seizmičkih podataka. Niske frekvencije su potrebne za realniju interpretaciju akustičnih impedancija te omogućavaju usporedbu s petrofizikalnim podacima (Wagner et al., 2006). Uvođenje modela niskih frekvencija tijekom seizmičke inverzije povećava kvalitativne i kvantitativne mogućnosti interpretacije rezultata seizmičke inverzije.

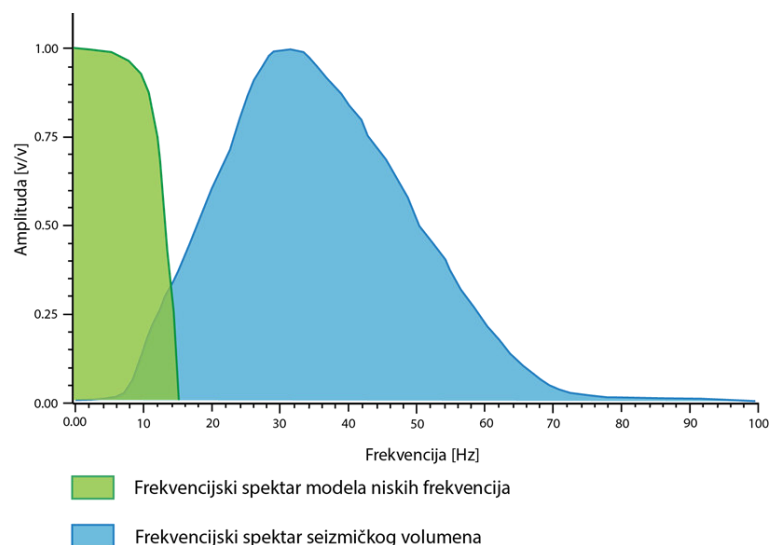
Podaci potrebni za izradu modela niskih frekvencija prvenstveno proizlaze iz petrofizikalnih mjerenja (karotaža gustoće i zvučna karotaža). Stoga, izradi modela niskih frekvencija prethodi pregled i analiza petrofizikalnih mjerenja na bušotinama. Na temelju krivulja karotaže gustoće i zvučne karotaže, tj. brzine, izračunate su krivulje akustičnih impedancija prema formuli:

$$Z = \rho \cdot V \quad (10-1)$$

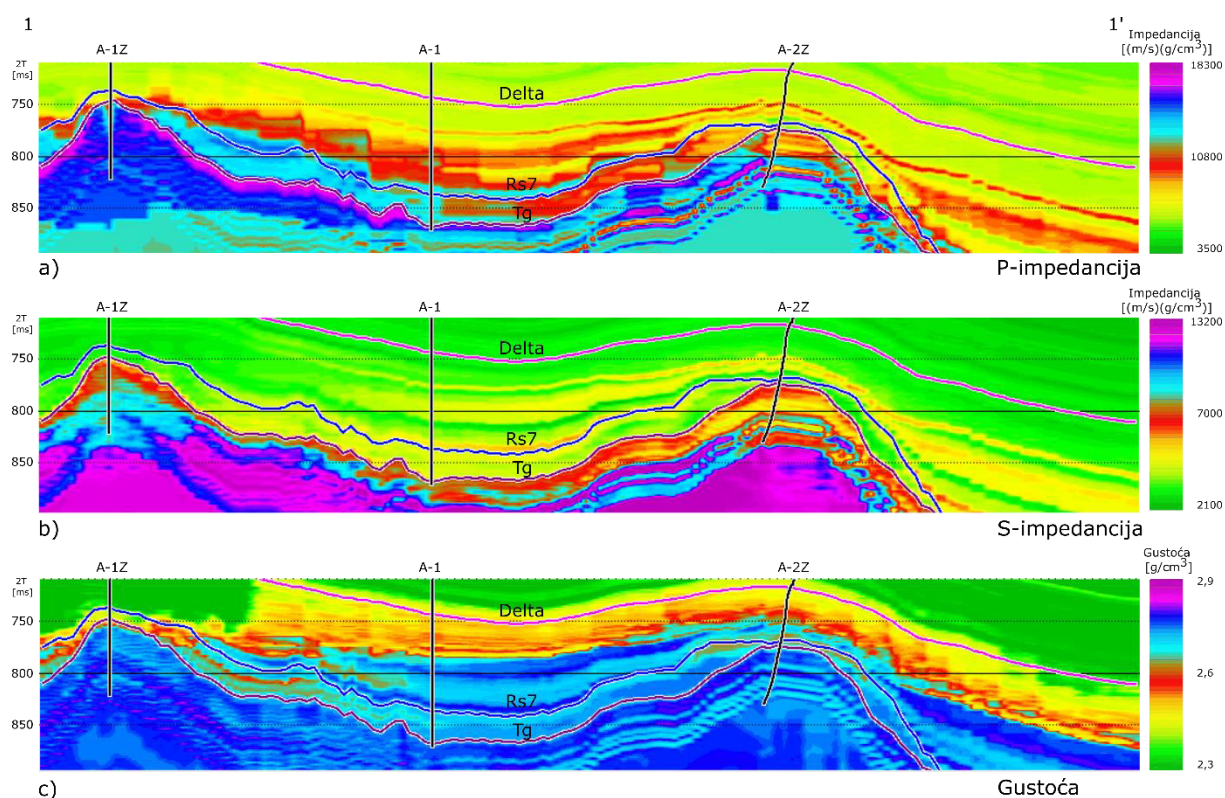
gdje je Z akustična impedancija, ρ gustoća, a V brzina.

Takve impedancije (Z) zbog širokog frekvencijskog spektra sadrže dodatne informacije koje seizmički podaci nemaju (Slika 10-2). Model niskih frekvencija predstavlja ograničeni frekvencijski spektar navedenih impedancija u rasponu od 0 do 15 Hz, kojim se nadopunjuje frekvencijski spektar seizmičkih podataka. Takvim pristupom model niskih frekvencija bolje odražava geološke promjene podzemlja.

Pouzdanost modela niskih frekvencija može imati značajan utjecaj na rezultate inverzije. Na eksploatacijskom polju s malim brojem bušotina, kao što je Grubišno Polje, vrijednosti brzina dobivene zvučnom karotažom distribuirane su primjenom neuronskih mrežama (engl. *Probabilistic Neural Network*) pomoću brzina dobivenih iz seizmičkih podataka kako bi se izbjegla statistički linearna raspodjela između dvije bušotine (Slika 10-3). Na eksploatacijskom polju Letičani, koje ima pravilan prostorni raspored bušotina, korišteni su samo bušotinski podaci.



Slika 10-2 Frekvencijski spektar modela niskih frekvencija i snimljenih 3D seizmičkih podataka

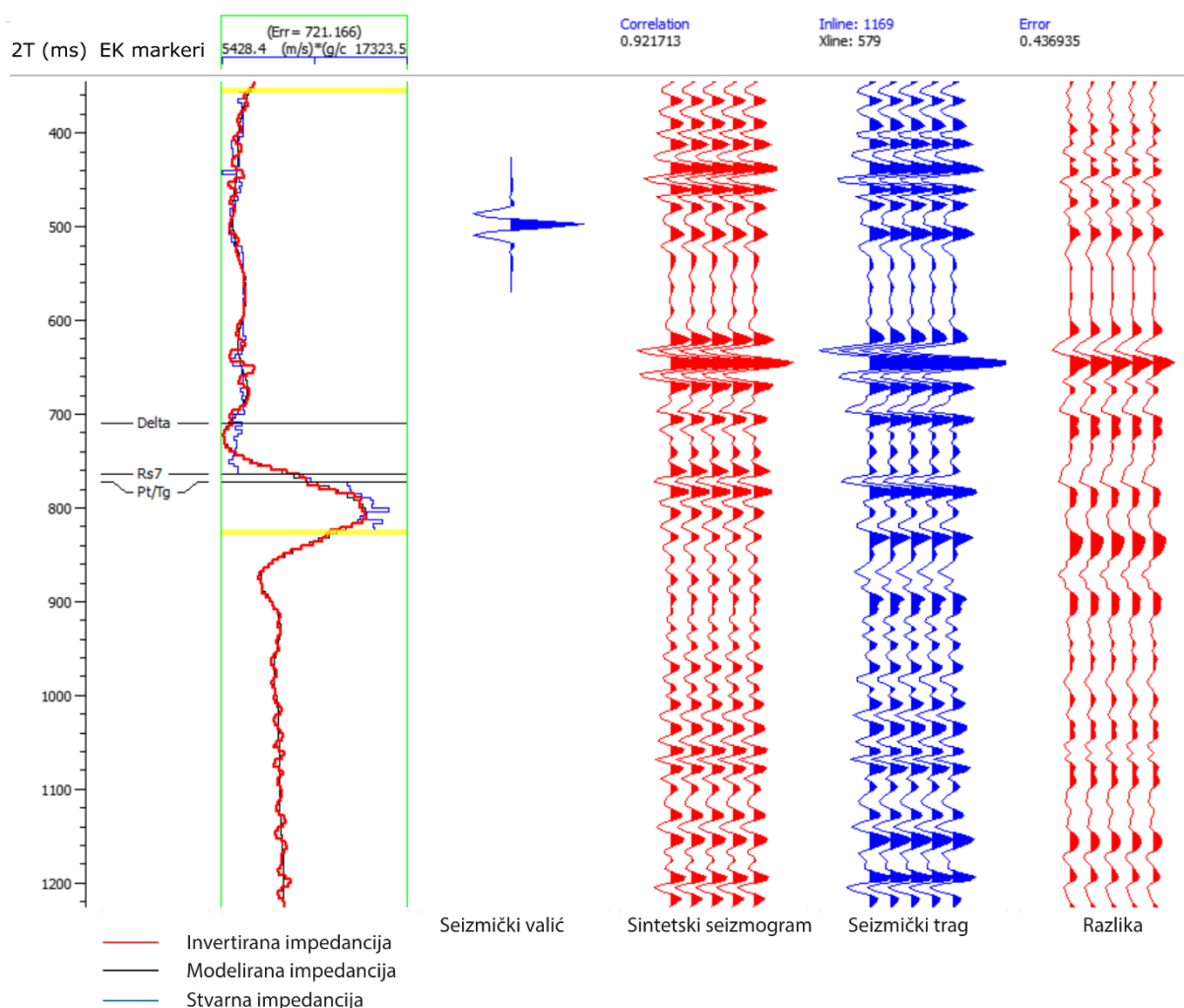


Slika 10-3 Profil 1-1'- model niskih frekvencija (a) P-impedancija, (b) S-impedancija i (c) gustoće Grubišnog Polja. Model niskih frekvencija dobiven je prostornom distribucijom bušotinskih podataka ograničenog frekvencijskog spektra od 0 do 15 Hz.

Tijekom procesa inverzije ulazni model niskih frekvencija modificira se generaliziranim linearnim inverznim algoritmom (engl. *Generalized linear inversion - GLI*) sve dok izračunati sintetski seizmogram ne odgovara seizmičkom tragu unutar zadovoljavajućih granica. Drugim

riječima, proces započinje ulaznim modelom dok se iterativnim postupkom pogreška između sintetskog seizmograma i stvarnog seizmičkog traga ne minimalizira (Slika 10-4).

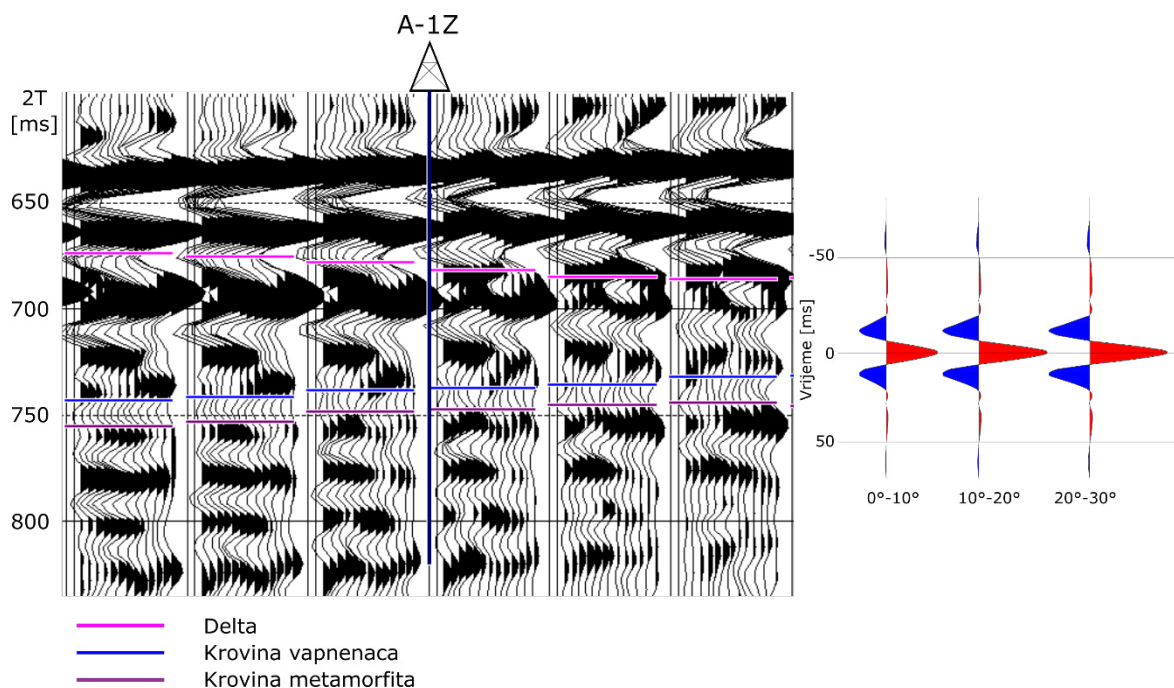
Za svaki seizmički trag, modelirani sintetski seizmogram izračunava se pomoću početne pretpostavljene impedancije i seizmičkog valića (Slika 10-4). Ta se impedancija naknadno mijenja, sve dok izračunati sintetski trag ne odgovara snimljenom seizmičkom tragu unutar neke granice tolerancije, što je izraženo razlikom i koeficijentom korelacije. Interpretator može kontrolirati maksimalnu i minimalnu promjenu impedancije u odnosu na početne vrijednosti.



Slika 10-4 Korelacija sintetskog seizmograma i snimljenog seizmičkog traga tijekom procesa inverzije za bušotinu A-1Z na Grubišnom Polju

10.2 Deterministička *pre-stack* inverzija

Za razliku od *post-stack* inverzije koja procjenu koeficijenta refleksije temelji na ulaznom modelu, *pre-stack* inverzija se temelji na algoritmima koji definiraju P- i S-impedanciju izravno iz seizmičkih tragova prije zbrajanja, odnosno stekiranja (Hampson et al., 2005; Russell et al., 2006). Cilj *pre-stack* inverzije je realnija procjena brzine P-valova, brzine S-valova i gustoće koje su temelj za daljnje analize zasićenja fluidima ili litoloških značajki ležišta. U postupku *pre-stack* inverzije korišteni su nebrojeni pregledani seizmički tragovi (engl. *gather*) i NMO-korekcijom (engl. *Normal Moveout*) ispravljani tragovi.



Slika 10-5 Seizmički profil nezbrojenih tragova (gathera) i izdvojeni seizmički valići za tri intervala kutova upada seizmičkih valova

Nebrojeni seizmički tragovi su definirani udaljenošću geofona od izvora seizmičkog vala (engl. *offset*) te je potrebno koristiti model brzina za konverziju u domenu kutova upada seizmičkog vala. Analizom tragova definira se raspon kutova za koji su vidljivi korisni refleksi, tj. uklanjaju se tzv. mrtvi tragovi i tragovi koji unatoč NMO-korekciji imaju rezidualne pomake. U ovom radu korišten je raspon upadnih kutova od 0° do 30° . Za proces dekonvolucije tijekom inverzije iz ulaznih seizmičkih podataka se definiraju tri valića ovisno o kutovima upada seizmičkih valova i to za interval od 0° - 10° , 10° - 20° i 20° - 30° (Slika 10-5).

Pre-stack inverzija temelji se na prilagodbi Zoeppritzeve jednadžbe (Zoeppritz, 1919), koju su izveli Fatti et al. (1994) izdvajanjem P- i S-impedancije te prilagođavanjem amplituda P-vala stvarnim amplitudama CMP-skupa tragova (engl. *CMP - Common Mid Point*):

$$R(\theta) = (1 + \tan^2 \theta) \frac{\Delta I_P}{2I_P} - 8 \left(\frac{V_S}{V_P} \right)^2 \sin^2 \theta \frac{\Delta I_S}{2I_S} \quad (10-2)$$

gdje je $R(\theta)$ koeficijent refleksije u ovisnosti o kutu upada θ seizmičkih valova, V_P i V_S su brzine P- i S-valova, I_P i I_S su P- i S-impedancije.

Hampson et al. (2005) su pojednostavili Fattieve jednadžbe (Simmons i Backus, 1994, Buland i Omre, 2003) i predstavili pojednostavljeni pristup koji definira P- i S-impedanciju i gustoću kao rezultat inverzije. Pojednostavljena Fattieva formula (10-3) je omogućila definiranje izravnog odnosa P- i S-impedancija te P-impedancija i gustoće iz seizmičkih podataka (10-4 i 10-5).

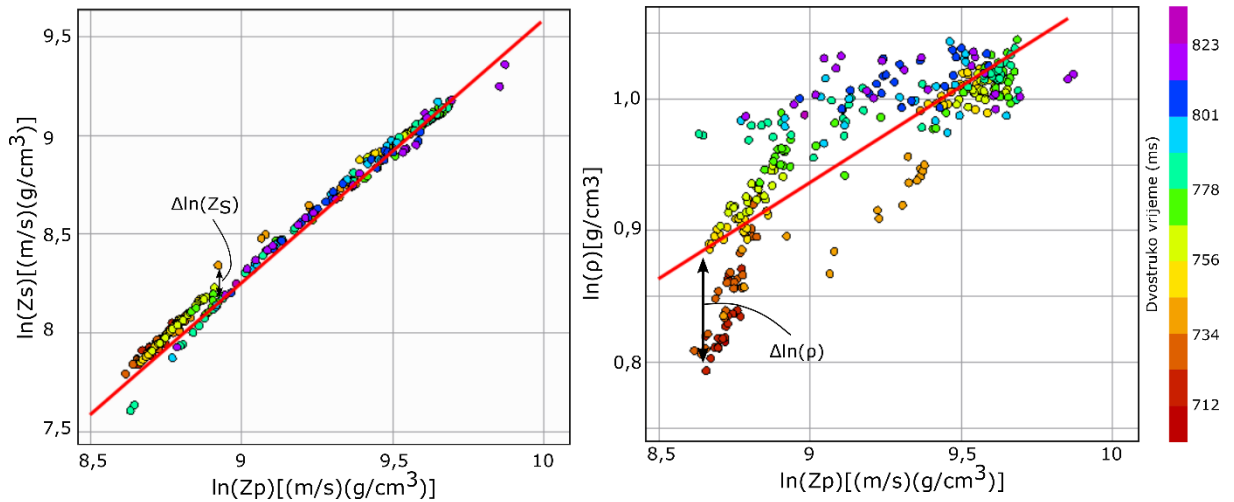
$$R_{PP}(\theta) = c_1 R_{P0} + c_2 R_{S0} + c_3 R_D \quad (10-3)$$

$$\ln(I_S) = k \ln(I_P) + k_C + \Delta \ln(I_S) \quad (10-4)$$

$$\ln(\rho) = m \ln(I_P) + m_C + \Delta \ln(\rho) \quad (10-5)$$

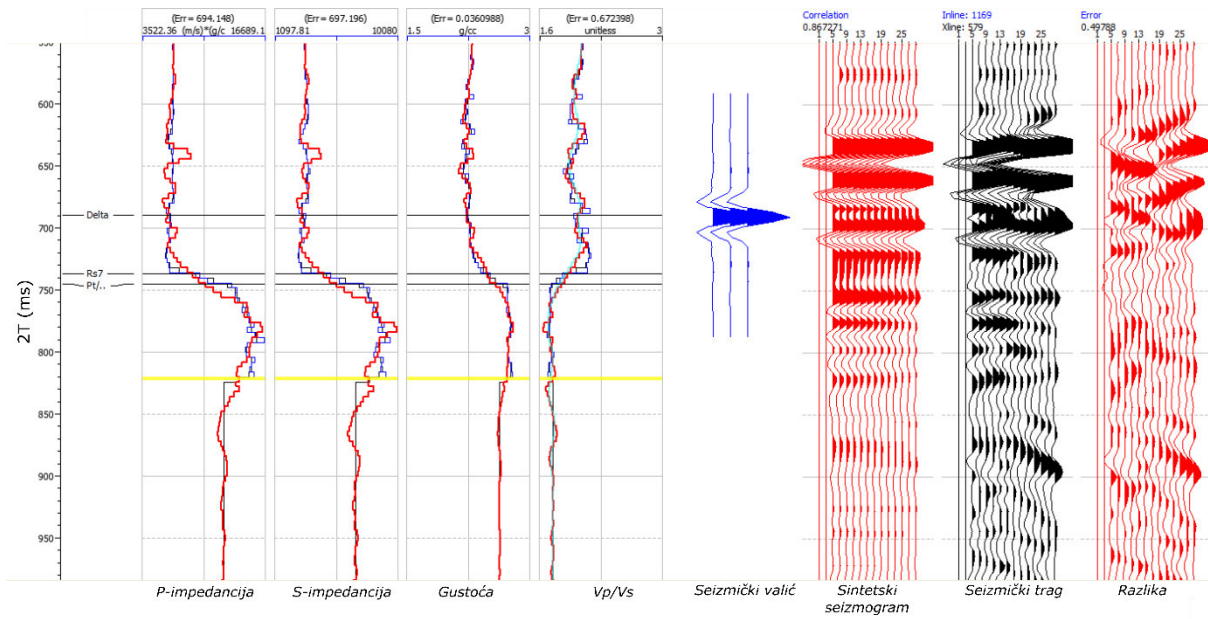
gdje je θ kut upada seizmičkih valova, R_{PP} koeficijent refleksije seizmičkog vala, R_{P0} , R_{S0} koeficijent refleksije P-, S- seizmičkog vala za okomiti upad, I_P P-impedancija, I_S S-impedancija, ρ gustoća, k , k_C , m , m_C , koeficijenti korelacije definirani na dijagramu (Slika 10-6), $\Delta \ln(I_S)$, $\Delta \ln(\rho)$ očekivani raspon S-impedancije i gustoće.

Pojednostavljeni matematički izraz (10-5) omogućuje da se S-impedancija i gustoća definiraju pomoću koeficijenata refleksije tj. na temelju P-impedancija. Dijagrami prirodnog logaritma P-impedancija i S-impedancija te gustoće omogućuju definiranje parametara korelacije i raspon vrijednosti S-impedancija ($\Delta \ln(I_S)$) i gustoće ($\Delta \ln(\rho)$) (Slika 10-6). Veći raspon vrijednosti S-impedancija ($\Delta \ln(I_S)$), tj. otklon od pravca korelacije izraženiji je kod plinskog zasićenja, osobito u pješčenjacima i definira se kao anomalije zasićenja (Russell et al. 2006). Na temelju dijagrama odnosa P-impedancije i S-impedancije te gustoće (Slika 10-6) dobiju se modelirane krivulje impedancija i gustoće potrebne za izračunavanje sintetskih seizmičkih tragova koji se uspoređuju s tragovima snimljenih seizmičkih podataka (Slika 10-7 i Slika 10-8).

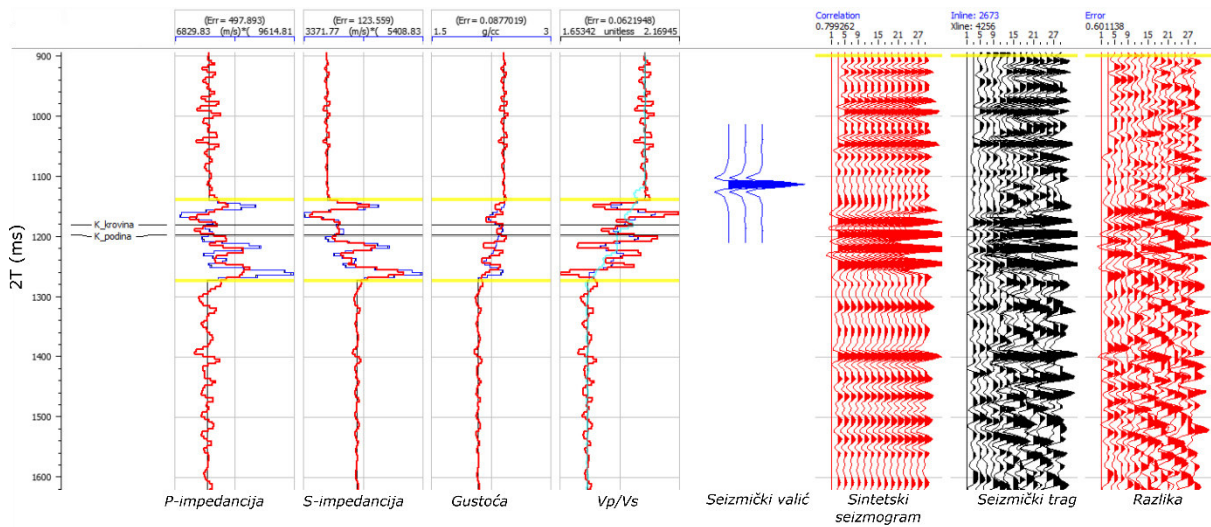


Slika 10-6 Dijagrami prirodnog logaritma P-impedancija i S-impedancija te gustoće za plinsko polje Grubišno Polje

Korelacija bušotinskih i seizmičkih podataka u procesu *pre-stack* inverzije je jako bitna zbog točne korelacije krovine ležišta i definiranja seizmičkih valića potrebnih za dekonvoluciju, što predstavlja temeljni korak za interpretaciju rezultata inverzije. Tijekom korelacije koriste se izdvojeni seizmički valići za tri intervala kutova upada seizmičkih valova (Slika 10-5). Valići moraju biti konzistentni za sve intervale kutova upada seizmičkih valova s malim promjenama u fazi i frekvencijskom spektru. Korelacija bušotinskih i seizmičkih podataka na polju Grubišno Polje i na polju Letičani prikazana je na primjeru bušotina A-1Z i B-5 (Slika 10-7 i Slika 10-8). Sintetski seizmički trag konstruiran iz invertiranih krivulja P-, S-impedancije i gustoće uspoređuje se sa seizmičkim tragom snimljenih podataka. Koeficijent korelacije definira se razlikom seizmičkog traga snimljenih podataka i sintetskog traga (Slika 10-7 i Slika 10-8).



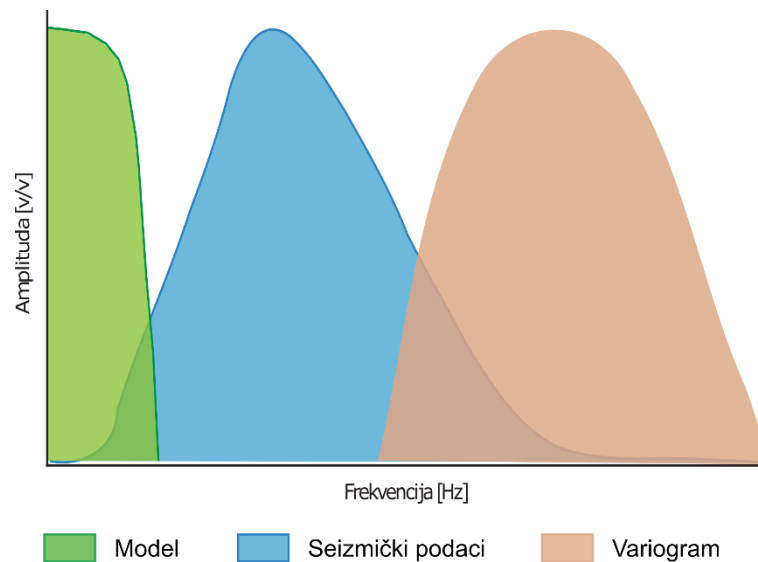
Slika 10-7 Korelacija sintetskog traga i snimljenog seizmičkog traga tijekom procesa *pre-stack* inverzije za Grubišno Polje



Slika 10-8 Korelacija sintetskog traga i snimljenog seizmičkog traga tijekom procesa *pre-stack* inverzije za polje Letičani

10.3 Stohastička inverzija

Stohastičku ili geostatističku inverziju predstavili su 1990-ih Bortoli et al. (1993) te Haas i Dubrule (1994) izradom modela elastičnih svojstava u koji su iterativnim postupkom implementirane frekvencije seizmičkog spektra i visoke frekvencije. Stohastička inverzija ima značajnije veću rezoluciju u odnosu na determinističku (npr. 1 ms) što povezivanjem s geološkim modelima omogućuje bolju kontrolu rezultata i definiranje nesigurnosti modela.



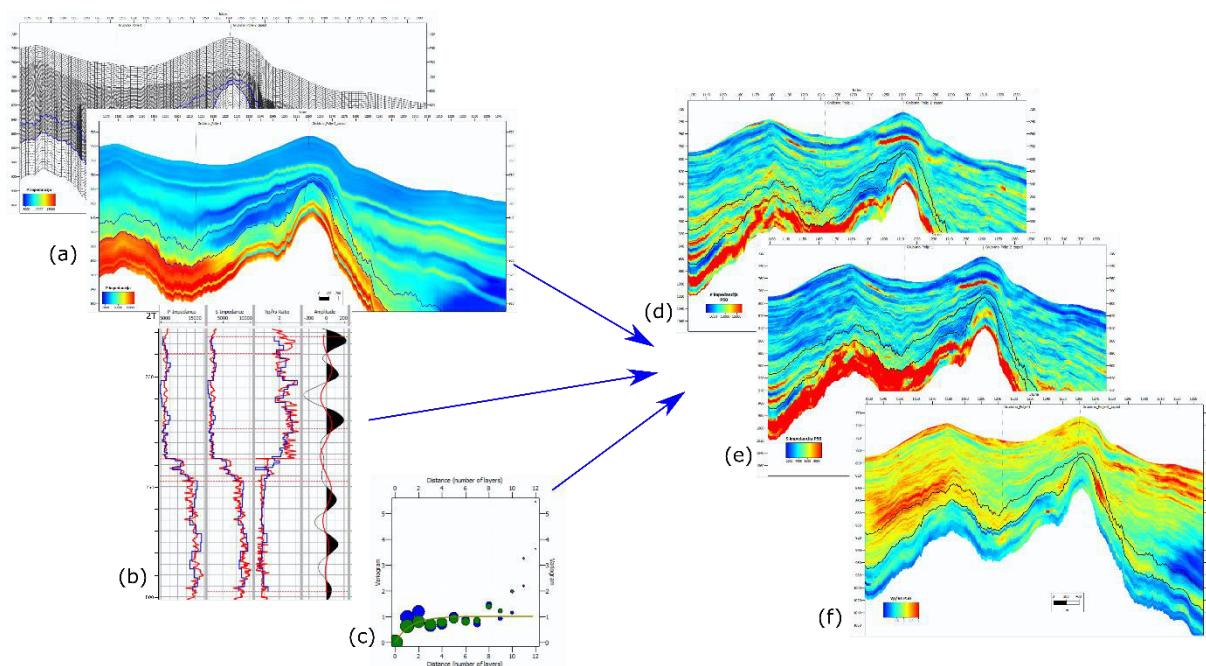
Slika 10-9 Frekvencijski spektri ulaznih podataka stohastičke inverzije

Francis (2006a i 2006b) je opisao bitne razlike determinističke i stohastičke inverzije. Deterministička inverzija ograničena je spektrom niskih frekvencija modela i spektrom frekvencija seizmičkih podataka, što za rubne vrijednosti frekvencijskog spektra rezultira šumom, tj. precijenjenim vrijednostima koeficijenta refleksije. Stoga deterministička inverzija predstavlja najbolju procjenu koja zadovoljava razlučivost i točnost inverzije i najčešće teži srednjim vrijednostima impedancija geoloških formacija.

Stohastičkom inverzijom izbjegavaju se srednje vrijednosti rezultata, no inverzija nije jednoznačan proces. Nesigurnost inverzije proizlazi iz ograničenog spektra frekvencija koji predstavlja ulazni model i seizmički spektar frekvencija. U procesu stohastičke inverzije koriste se parametri prostorne distribucije predstavljeni variogramom, koji nadoknađuju izgubljene visoke frekvencije (Slika 10-9). Variogram prikazuje strukturu slučajnog polja koji ovisi o udaljenosti između analiziranih podataka i razlici u vrijednosti podataka. Iz relativno malog broja podataka variogram opisuje strukturu slučajnog polja (Andričević et al., 2007). Temelji

se na bušotinskim podacima i prostornoj raspodjeli podataka te omogućuje definiranje prostorne korelacije između seizmičkih tragova na temelju poznatih podataka u bušotinama.

Prema Francis (2006a) stohastička inverzija mora zadovoljavati sljedeće: a) biti uvjetovana ulaznim podacima (bušotinskim podacima), b) rezultirati histogramom podataka, tj. dati višestruke rezultate i c) poštivati funkcije prostorne korelacije, tj. variogram. Stohastička inverzija kako je već navedeno nije jednoznačna pa postoji više realizacija (rezultata) koji zadovoljavaju navedene kriterije. Ovakav proces je dugotrajan i zahtjeva određeno vrijeme za inverziju stoga se u literaturi često raspravljalo o optimalnom broju realizacija. Mnogi autori navode optimalni raspon realizacija u odnosu na utrošeno vrijeme od 50 do 100 (Rowbotham et al., 2003; Xu, 2012) dok Torres-Verdín et al. (1999) i Varela et al. (2003) preporučuju minimalno 10 realizacija, Sams i Saussus (2010) minimalno 15, a Francis (2005) minimalno 100 realizacija.



Slika 10-10 Postupak stohastičke inverzije: (a) početni model vertikalne rezolucije 1 ms, (b) povezivanje bušotinskih i seizmičkih podataka, (c) prostorna analiza podataka (variogram), (d) P-impedancija, (e) S-impedancija i (f) omjer V_p/V_s

Stohastička inverzija također koristi početni model, koji ima značajno veću rezoluciju u odnosu na *post-stack* inverziju. U ovom radu korišten je početni model vertikalne rezolucije 1 ms.

Za procjenjivanje i definiranje najvjerojatnijeg rezultata potrebni su podaci koji će se statistički analizirati. Stoga se prilikom stohastičke inverzije za zadane uvjete impedancija, gustoće i omjera V_p/V_s za svaku realizaciju definira volumen litologije koristeći Monte Carlo metodu. Svaka realizacija impedancija poštujući ulazne petrofizikalne kriterije za litologije definira ukupni volumen definirane litologije. Time se dobije histogram razdiobe volumena na temelju kojeg se statistički definiraju (P10, P50 i P90) realizacije koje daju najpouzdanije rezultate.

Monte Carlo metoda je probabilistička statistička metoda koja za svaku vrijednost jedne ili više slučajnih varijabli predviđa sve moguće ishode i vjerojatnost pojavljivanja svakog ishoda (Crnjac Milić i Masle, 2013). Vrijednosti P10, P50 i P90 predstavljaju percentile pojavljivanja određenog ishoda. P10 označava da 10% svih ishoda ima veću vrijednost od vrijednosti rezultata P10, a P50 označava da 50% svih ishoda ima veću vrijednost od vrijednosti rezultata P50, itd.

10.4 Poissonova impedancija

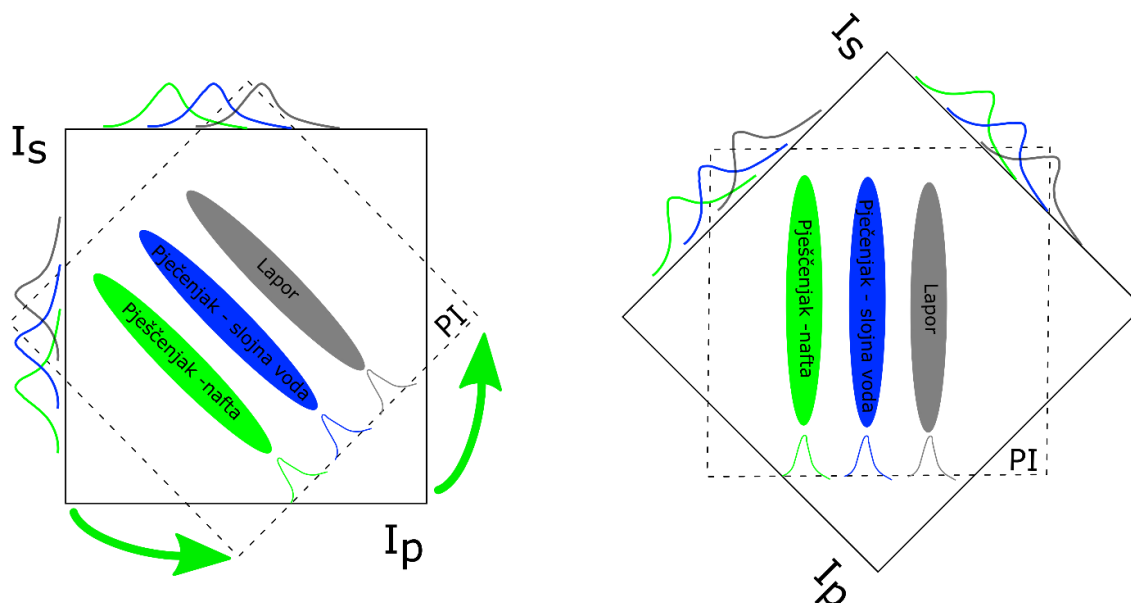
Prilikom karakterizacije ležišta bitno je definirati i razlikovati seizmički odziv litologija koje su potencijalna ležišta (npr. pješčenjak) od nepropusnih (npr. lapor). U klastičnim ležištima nekada je kontrast impedancija između pješčenjaka i lapora vrlo mali pa seizmički odziv nije jasan. U takvim slučajevima dodatnu informaciju donose vrijednosti Poissonovog koeficijenta.

Quakenbush et al. (2006) predstavili su seizmički atribut kojeg čine vrijednosti Poissonova koeficijenta i gustoće te su ga nazvali Poissonova impedancija (PI). Matematički PI se može izraziti u obliku:

$$PI = I_p - c \cdot I_s \quad (10-6)$$

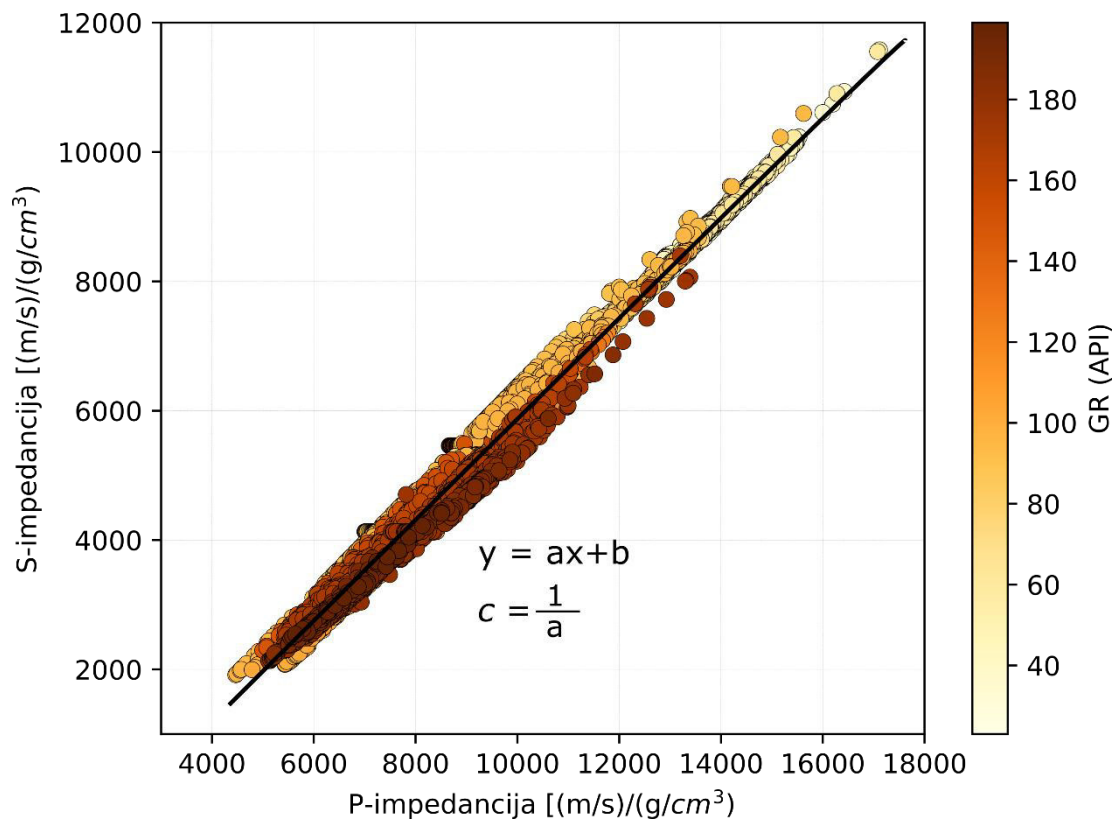
gdje je I_p P impedancija, I_s je S impedancija a c je koeficijent rotacije.

Poissonova impedancija zapravo definira rotaciju podataka P- i S-impedancija u svrhu razlikovanja litološkog sastava (Slika 10-11). Raspon vrijednosti impedancija stijena različitih litoloških sastava i zasićenja fluidima u dijagramu odnosa P- i S-impedancija se preklapaju (zeleni, plavi i sivi krivulje na slici 10-11), dok se rotacijom u dijagram Poissonove impedancije vrijednosti znatno razlikuju tj. histogrami su odvojeni.



Slika 10-11 Shematski prikaz dijagrama P- i S-impedancija s definiranim litologijama i zasićenjima. Krivulje raspodjele vrijednosti P- i S-impedancija za stijene različitog litološkog sastava i zasićenja se preklapaju, a rotacijom dijagrama za koeficijent c dobiju se vrijednosti Poissonove impedancije čije vrijednosti se ne preklapaju za različite litologije i zasićenja (prema Quakenbush et al., 2006)

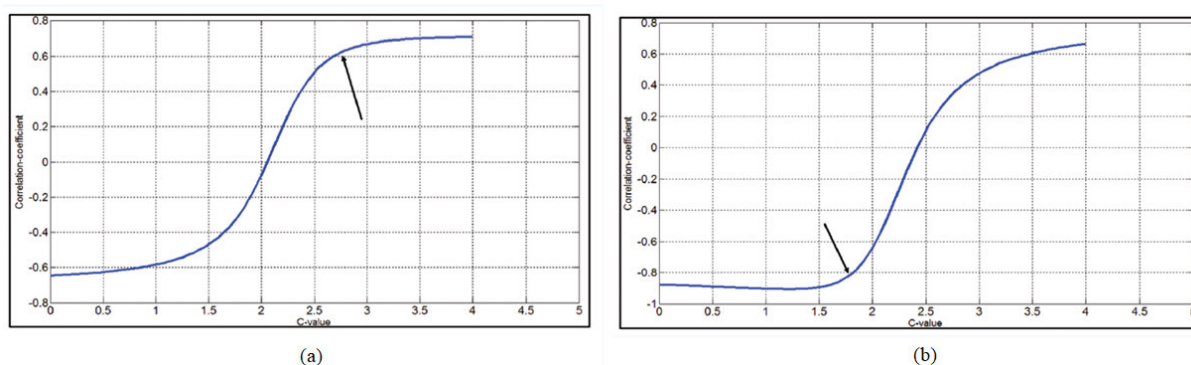
Vrijednost koeficijenta rotacije (c) potrebno je odrediti iz nagiba pravca dijagrama P- i S-impedancija u uvjetima potpunog zasićenja slojnom vodom (engl. *brine*). Koeficijent rotacije je obrnuto proporcionalan koeficijentu nagiba pravca korelacije (Slika 10-12).



Slika 10-12 Određivanje koeficijenta rotacije (c) pomoću linearne korelacije između P-impedancije i S-impedancije

Korelacijom Poissonove impedancije (PI) s vrijednostima krivulja prirodne radioaktivnosti (GR) može se definirati novi atribut – litološka impedancija (LI) koja naglašava litološke promjene. Korelacijom impedancije PI s vrijednostima krivulja koje definiraju zasićenje ili poroznost (SW, Por) može se također definirati atribut impedancija fluida (FI).

Tian et al. (2010) predložili su definiranje koeficijenta rotacije c za impedancije LI i FI prema TCCA metodi (engl. *Target Correlation Coefficient Analysis*) (Slika 10-13). Na dijagramu P- i S-impedancija definira se više pravaca korelacije (tj. različitih koeficijenata rotacije), što rezultira različitim krivuljama PI. Za svaku PI napravi se korelacija s krivuljama GR ili SW/Por te se odabire koeficijent rotacije čija PI ima najveću korelaciju sa spomenutim krivuljama.



Slika 10-13 Definiranje koeficijenta rotacije c za impedancije LI i FI prema TCCA metodi. Koeficijent rotacije za litološku impedanciju (a) iznosi 2,78 (korelacija 0,65), a za impedanciju fluida (b) 1,75 (korelacija -0,82) (Sharma i Chopra, 2013).

Rezultati Poissonove impedancije prikazani su samo za polje Letičani (poglavlje 10.5.2). Na Grubišnom Polju povećana prirodna radioaktivnost (GR) nije odraz prisutnosti organske tvari u vapnencima. Prirodna radioaktivnost, koja je odraz koncentracije radioaktivnih izotopa elemenata kalija ^{40}K , urana ^{238}U i torija ^{232}Th izmjerena je na jezgrama punog promjera (Matošević et al., 2017). Povećane vrijednosti ukupne radioaktivnosti i urana nisu odraz koncentracije organske tvari unutar netopivog ostatka u stiliolitskim šavovima u vapnencima, koji sadrže samo 0,11% organskog ugljika. Povećanje koncentracije urana u vapnencima Grubišnog Polja Matošević et al. (2017) povezuju s cirkulacijom hidrotermalnih otopina iz metamorfita koji su u tektonskom kontaktu s vapnencima. Šćavničar et al. (2007) utvrdili su prisutnost urana u metasedimentima i metamorfita Radlovačke serije na Papuku, a Vulama (2019) navodi primjere povećanja prirodne radioaktivnosti migracijom urana u hidrotermalnim otopinama kroz pukotinski sustav.

10.5 Rezultati seizmičkih inverzija

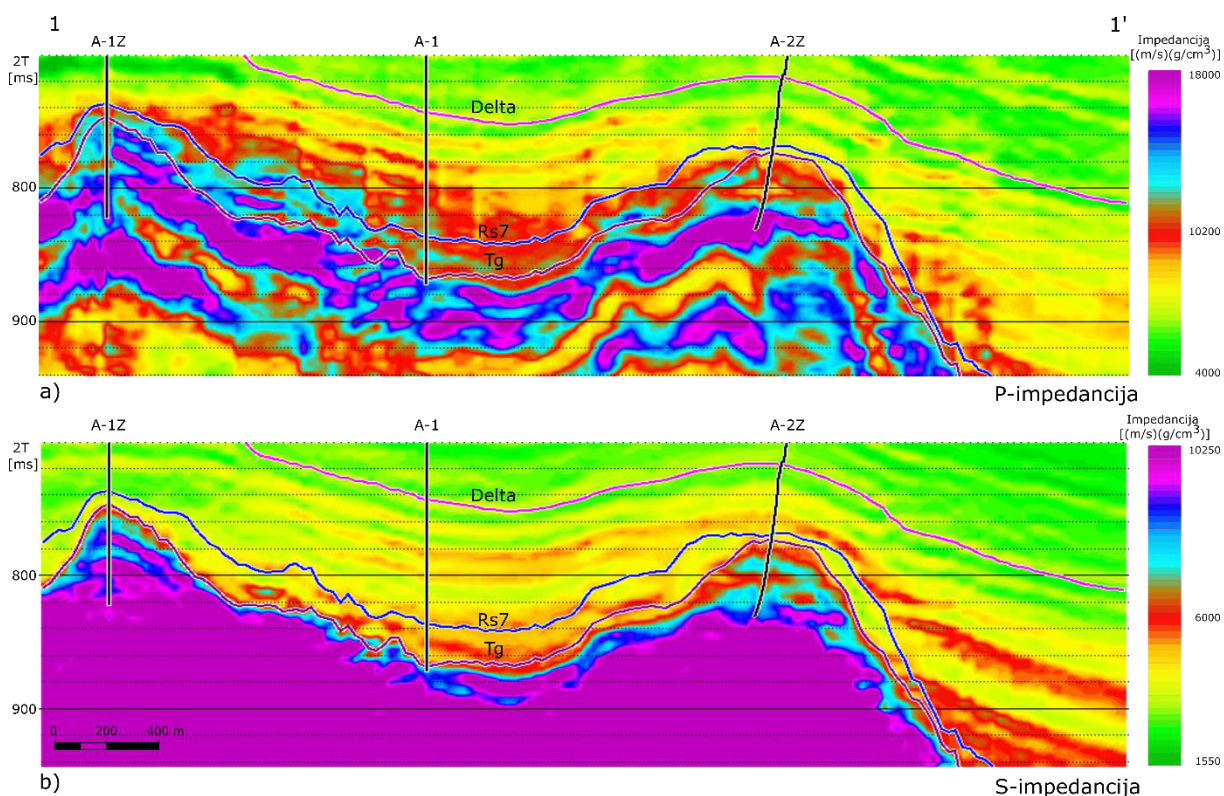
Prvi korak u seizmičkoj inverziji je provjera ulaznih seizmičkih podataka. Seizmički podaci imaju veliki utjecaj na rezultat seizmičke inverzije (Bosch et al., 2010), stoga su seizmički tragovi pregledani i izdvojeni su tragovi koji nisu pod utjecajem smetnji. Uzrok smetnji mogu biti geološki uvjeti u podzemlju kao što su promjene litološkog sastava, rasjedne zone ili površinski uvjeti tijekom snimanja seizmičkih podataka. U determinističkoj *post-stack* inverziji korišteni su seizmički podaci nastali zbrajanjem svih tragova (engl. *full stack*). U determinističkoj *pre-stack* i stohastičkoj inverziji korišteni su seizmički podaci s djelomično zbrojenim tragovima (engl. *partial stack*), tj. za određene raspone kutova upada seizmičkih zrâka opisanih u poglavlju 4.1 (Slika 4-3).

Zatim slijedi povezivanje bušotinskih i seizmičkih podataka. Iako je postupak povezivanja bušotinskih i seizmičkih podataka napravljen prije same seizmičke interpretacije (poglavlje 4.3) potrebno je detaljno ponoviti postupak za svaku bušotinu zbog izrade modela niskih frekvencija u sljedećem koraku. U ovom koraku se iz seizmičkih podataka izdvoji seizmički valić. Seizmički valić ili ulazni seizmički val definiran je kao teoretski seizmički impuls koji se sastoji od nekoliko ciklusa. Prema definiciji seizmički valić je vremenski refleks nastao od jednog reflektora (Sheriff, 2002), a potreban je za izradu sintetskih seizmičkih tragova iz modela niskih frekvencija. Stoga je izdvajanje seizmičkog valića važan korak u procesu seizmičke inverzije. White et al. (1998) i White i Simm (2003) detaljno su opisali postupak povezivanja bušotinskih i seizmičkih podataka i izdvajanje seizmičkog valića za potrebe seizmičke inverzije i AVO analize. Ovdje su seizmički valići izdvojeni samo za zonu ležišta kako bi rezultati bili pouzdaniji i odražavali geološku sliku istraživanih ležišta.

Sljedeći korak je izrada modela niskih frekvencija ograničenog frekvencijskog spektra u rasponu od 0 do 15 Hz. Tijekom analize determinističke inverzije model niskih frekvencija predstavlja početni model. Izdvojenim seizmičkim valićem se iz početnog modela izradi umjetni seizmički trag koji se uspoređuje s tragom snimljenih seizmičkih podataka.

10.5.1 Rezultati seizmičkih inverzija na plinskom polju Grubišno Polje

Rezultati inverzije su seizmički modeli koji pokazuju distribuciju elastičnih parametara u prostoru, a time i prostornu raspodjelu kvalitete ležišnih stijena. Niže vrijednosti impedancija ukazuju na veće vrijednosti poroznosti. Rezultati svih inverzija ukazuju na najbolja ležišna svojstva u vrhovima antiklinala koje su nabušene bušotinama A-1Z i A-2Z (Slika 10-14). Vrijednosti P-impedancija u vrhovima antiklinala su u rasponu od 9000 do 11000 (m/s)(g/cm³) (Slika 10-14a), dok su vrijednosti S-impedancija u vrhovima antiklinala u rasponu od 3500 do 7000 (m/s)(g/cm³) (Slika 10-14b).



Slika 10-14 Profil 1-1' s rezultatima *post-stack* inverzije: (a) P-impedancija i (b) S-impedancija

Rezultati *pre-stack* inverzije prikazani duž profila na Grubišnom Polju jasno ukazuju na promjenu litološkog sastava. Promjena litološkog sastava iz lapora u biogene vapnence vidljiva je porastom P- i S-impedancija i padom vrijednosti omjera V_p/V_s (Slika 10-15). Vrijednosti P-impedancija u biogenim vapnencima imaju raspon od 7300 do 9800 (m/s)(g/cm³) (Slika 10-15a), vrijednosti S-impedancija imaju raspon od 4000 do 5200 (m/s) (g/cm³) (Slika 10-15b), a vrijednosti omjera V_p/V_s od 1,8 do 1,92 (Slika 10-15c). Promjena litološkog sastava iz biogenih vapnenaca u metamorfite također je vidljiva porastom P- i S-impedancija i padom vrijednosti omjera V_p/V_s . Promjena litološkog sastava jasnija je na području oko bušotine A-

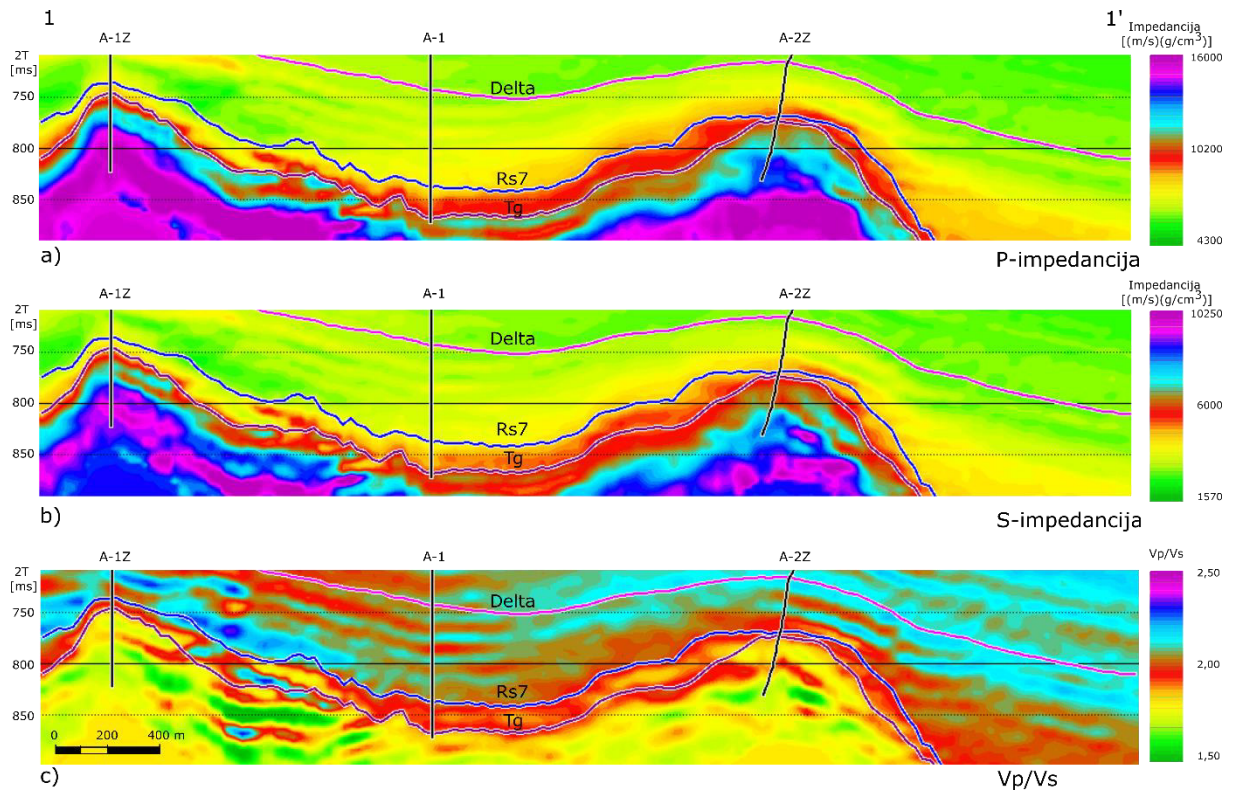
1Z zbog veće debljine vapnenaca u odnosu na prostor oko bušotine A-2Z. Uzrok tome je rezolucija seizmičkih podataka, pri čemu tanji slojevi vapnenaca nisu izraženi jasnom promjenom refleksa.

Rezultati stohastičke inverzije prikazani duž profila na Grubišnom Polju također jasno ukazuju na promjenu litološkog sastava (Slika 10-16). Rezultati stohastičke inverzije ukazuju na lateralne promjene u vapnencima.

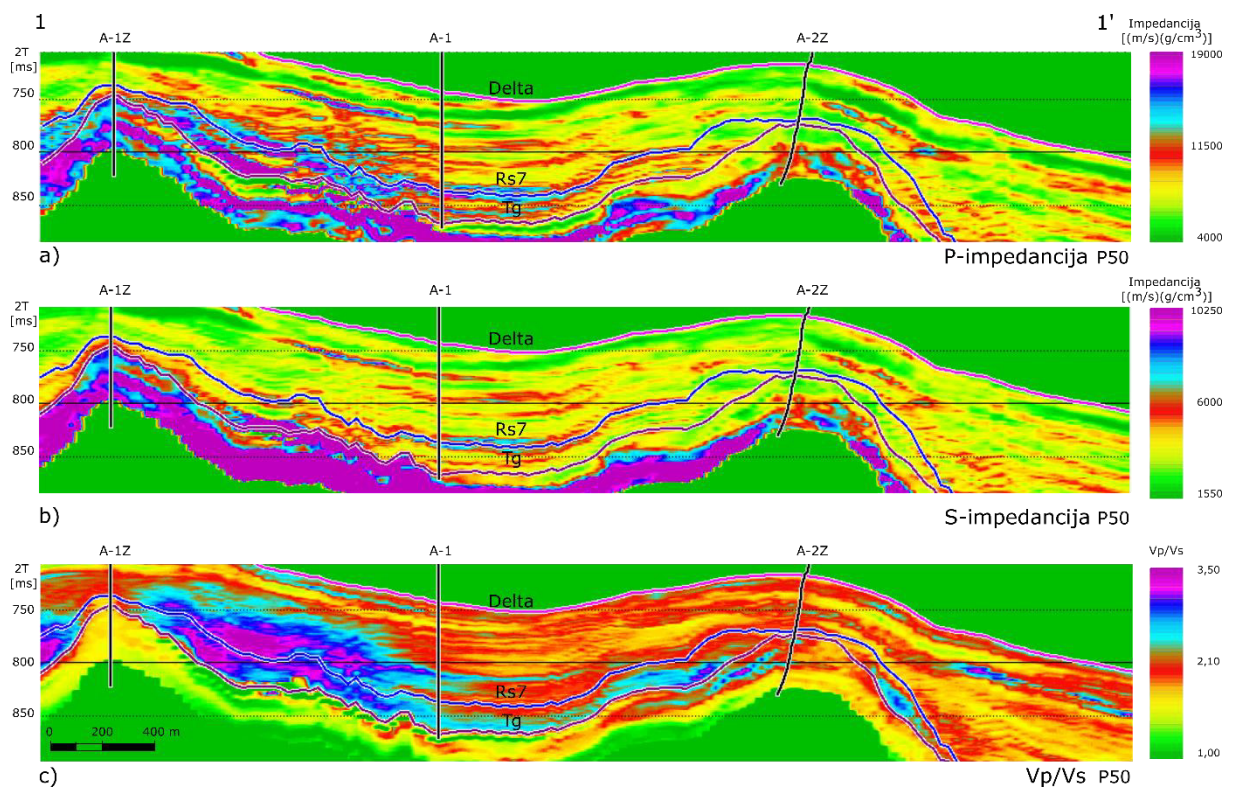
Vrijednosti P-impedancija vapnenaca u antiklinali nabušenoj bušotinom A-1Z imaju raspon od 7100 do 7600 (m/s)(g/cm³), a vrijednosti P-impedancija u metamorfitima od 13500 do 16000 (m/s)(g/cm³) (Slika 10-16a). Vrijednosti S-impedancija imaju raspon od 4400 do 5000 (m/s) (g/cm³) u vapnencima, a raspon od 8000 do 8200 (m/s) (g/cm³) u metamorfitima (Slika 10-16b). Vrijednosti omjera V_p/V_s su u rasponu od 1,75 do 1,83 (Slika 10-16c).

Vrijednosti P-impedancija vapnenaca u antiklinali nabušenoj bušotinom A-2Z imaju niže vrijednosti i nije vidljiva granica između vapnenaca i metamorfita. Vrijednosti P-impedancija u vapnencima imaju raspon od 5800 do 6500 (m/s)(g/cm³) (Slika 10-16a), vrijednosti S-impedancija imaju raspon od 2700 do 3000 (m/s) (g/cm³) (Slika 10-16b), a vrijednosti omjera V_p/V_s od 1,9 do 2,1 (Slika 10-16c). Uzrok razlika u vrijednosti impedancija i omjera V_p/V_s su veće debljine vapnenaca u antiklinali nabušenoj bušotinom A-1Z u odnosu na antiklinalu nabušenu bušotinom A-2Z.

Iz rezultata seizmičkih inverzija prikazanih na profilima (Slika 10-14, Slika 10-15, Slika 10-16) vidljivo je da rezultati *pre-stack* i stohastičke inverzije daju jasnu promjenu litološkog sastava. Rezultati stohastičke inverzije u odnosu na *pre-stack* rezultate prikazuju lateralne promjene unutar vapnenaca (Slika 10-16). Rezultati inverzija ukazuju da debljina ležišta utječe na definiranje promjene litološkog sastava.



Slika 10-15 Rezultati *pre-stack* inverzije duž seizmičkog profila 1-1': (a) P-impedancija, (b) S-impedancija i (c) omjer Vp/Vs



Slika 10-16 Profil 1-1' s rezultatima P50 stohastičke inverzije: (a) P-impedancija, (b) S-impedancija i (c) omjer Vp/Vs

Vrijednosti impedancija prikazane su na kartama krovine vapnenaca na polju Grubišno Polje (Prilog 1). Karte impedancija po krovini vapnenaca ukazuju na izrazito loša svojstva, iskazana visokim vrijednostima impedancija ležišta, za sve rezultate seizmičke inverzije SI od bušotine A-1Z (Prilog 1a, b i c). Antiklinala nabušena bušotinom A-2Z ima niže vrijednosti impedancija za sve rezultate seizmičke inverzije, a područje oko bušotine A-1 se nalazi na rubnom dijelu visokih vrijednosti impedancija (Prilog 1b, c). Područje oko bušotine A-2 za sve rezultate seizmičke inverzije ima visoke vrijednosti impedancija (Prilog 1a, b i c). Rezultati idu u prilog tvrdnji o lateralnoj promjeni vapnenaca.

Iako su prema kartama impedancija u širokom prostoru oko bušotina A-1Z i A-2Z ležišne stijene povoljnih kolektorskih svojstava, karta omjera V_p/V_s , dobivena stohastičkom inverzijom definira usku zonu oko bušotina zasićenu ugljikovodicima, koja je iskazana niskim vrijednostima omjera V_p/V_s (Prilog 2a). U prilog ovoj tvrdnji ide i karta Poissonovog koeficijenta koja također definira uske zone manjih vrijednosti oko bušotina koje ukazuju na zasićenje (Prilog 2b.).

10.5.2 Rezultati seizmičkih inverzija na naftnom polju Letičani

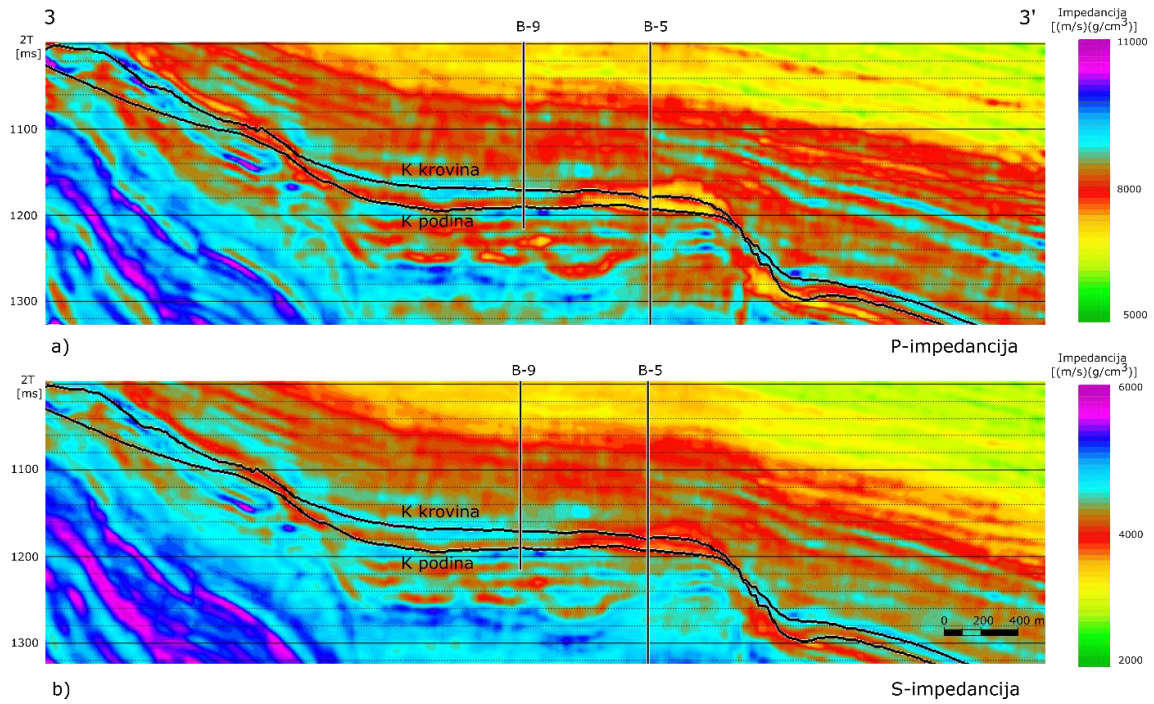
Na polju Letičani napravljena je *post-stack*, *pre-stack* i stohastička inverzija. Također napravljena je Poissonova impedancija i derivirane impedancije litologije i fluida. Rezultati su prikazani na profilima i kartama.

Rezultati *post-stack* inverzije na polju Letičani, prikazani duž profila 3-3' pokazuju da P- i S-impedancije imaju slične značajke te sugeriraju da dijelove ležišta s boljim kolektorskim svojstvima karakteriziraju niže vrijednosti impedancija, P-impedancija od 7100 do 7700 (m/s)(g/cm³) (Slika 10-17a), a S-impedancija od 3500 do 4200 (m/s)(g/cm³) (Slika 10-17b).

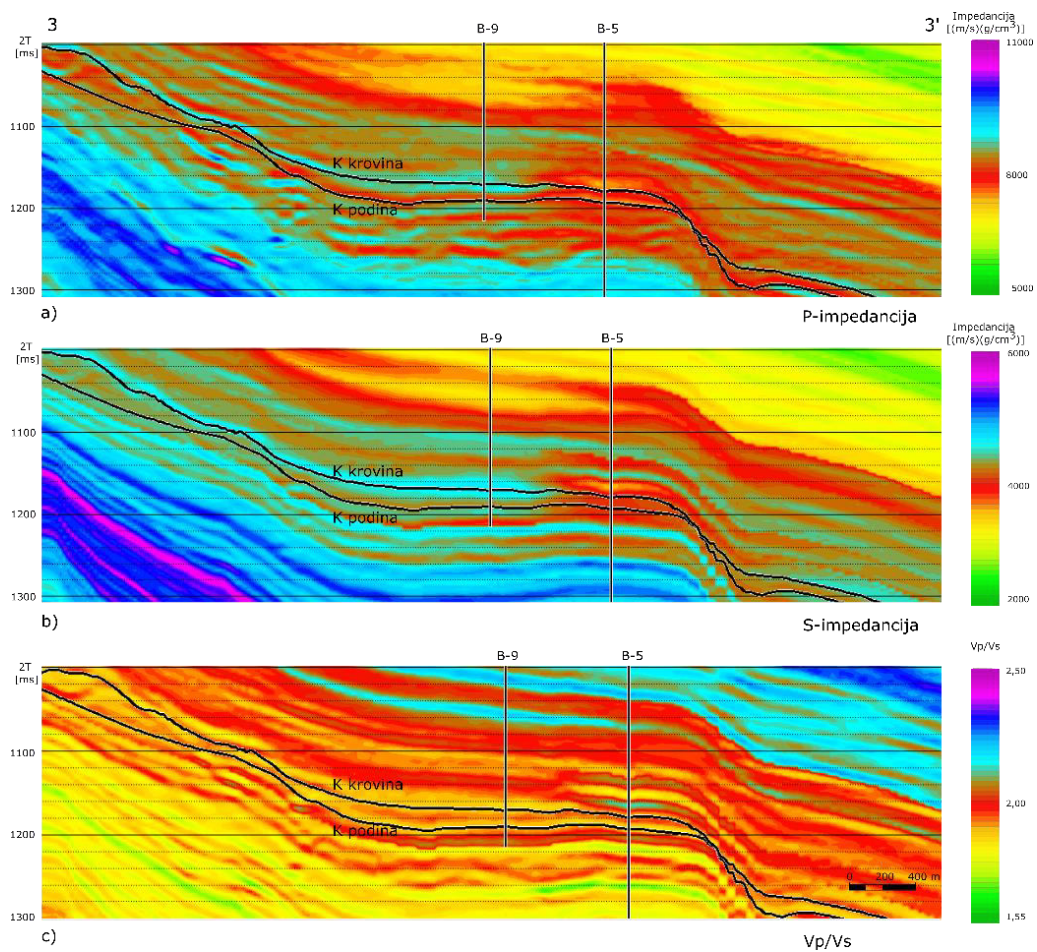
Rezultati *pre-stack* inverzije pokazuje sličnu prostornu raspodjelu impedancija kao i *post-stack* inverzija, gdje vrijednosti P-impedancija od 7500 do 8000 (m/s) (g/cm³) (Slika 10-18a) te vrijednosti S-impedancija od 3600 do 4200 (m/s) (g/cm³) (Slika 10-18b) definiraju bolja svojstva ležišta. Vrijednosti omjera V_p/V_s su u rasponu od 1,85 do 1,95 (Slika 10-18c).

Rezultati stohastičke inverzije imaju najbolju vertikalnu rezoluciju, vrijednosti P-impedancija su u rasponu od 7200 do 11000 (m/s) (g/cm³), a vrijednosti od 7200 do 8100 (m/s) (g/cm³) definiraju bolja svojstva ležišta (Slika 10-19a). Vrijednosti S-impedancija su u rasponu od 3500 do 4800 (m/s) (g/cm³) (Slika 10-19b), a vrijednosti omjera V_p/V_s od 1,89 do 2 (Slika 10-19c).

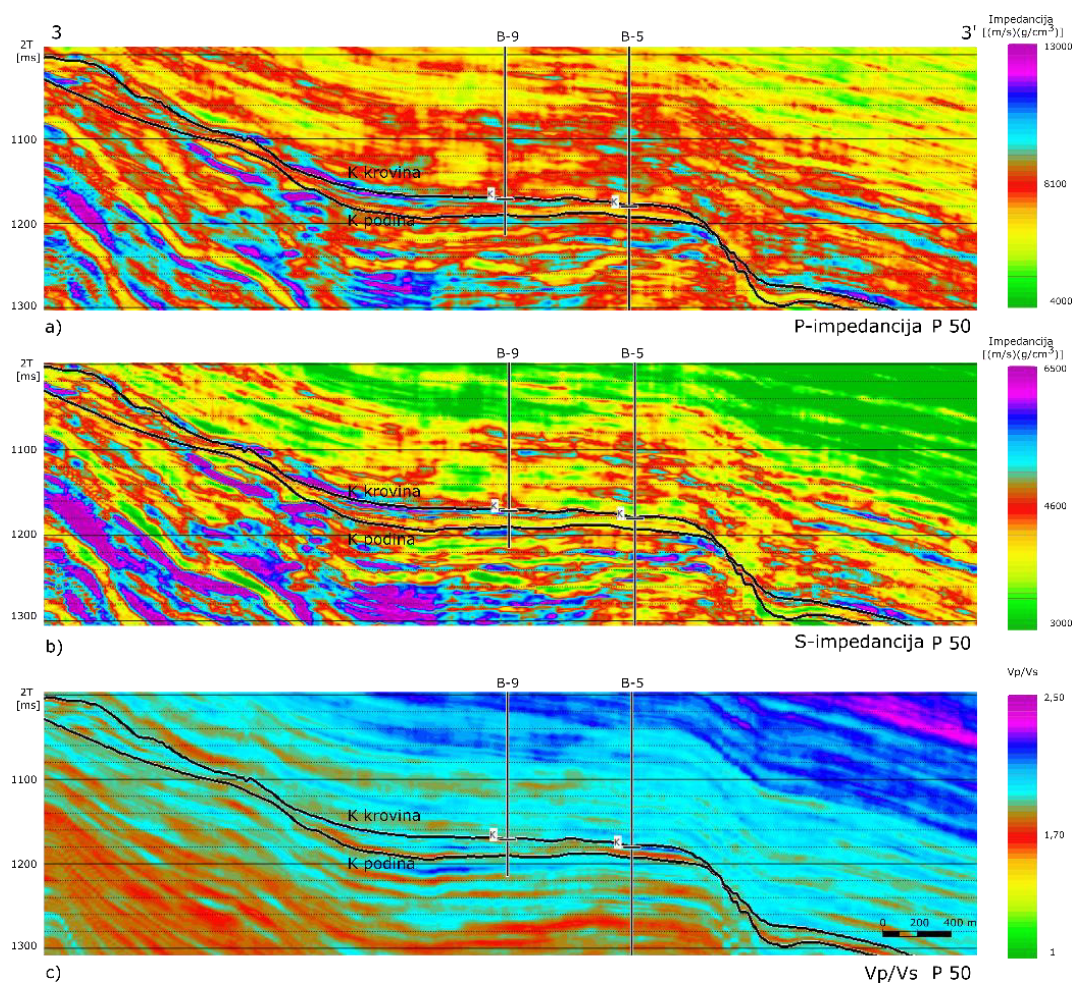
Rezultati seizmičke inverzije prikazani na profilu ukazuju da ležište ima bolja svojstva u dubljem intervalu ležišta, što je vidljivo u prostoru oko bušotine B-9. U prostoru oko bušotine B-5 rezultati svih seizmičkih inverzija ukazuju na bolja ležišna svojstva za cijeli interval ležišta. Zbog toga su karte rezultata seizmičkih inverzija prikazane za dva intervala: plići interval u vertikalnom rasponu 10 ms ispod krovine ležišta i dublji interval 10 ms konkordantno ispod krovine ležišta pa do podine ležišta.



Slika 10-17 Rezultati *post-stack* inverzije duž profila 3-3' na polju Letičani: (a) P-impedancija i (b) S-impedancija



Slika 10-18 Rezultati *pre-stack* inverzije duž profila 3-3' na polju Letičani: (a) P-impedancija, (b) S-impedancija i (c) omjer V_p/V_s polja Letičani



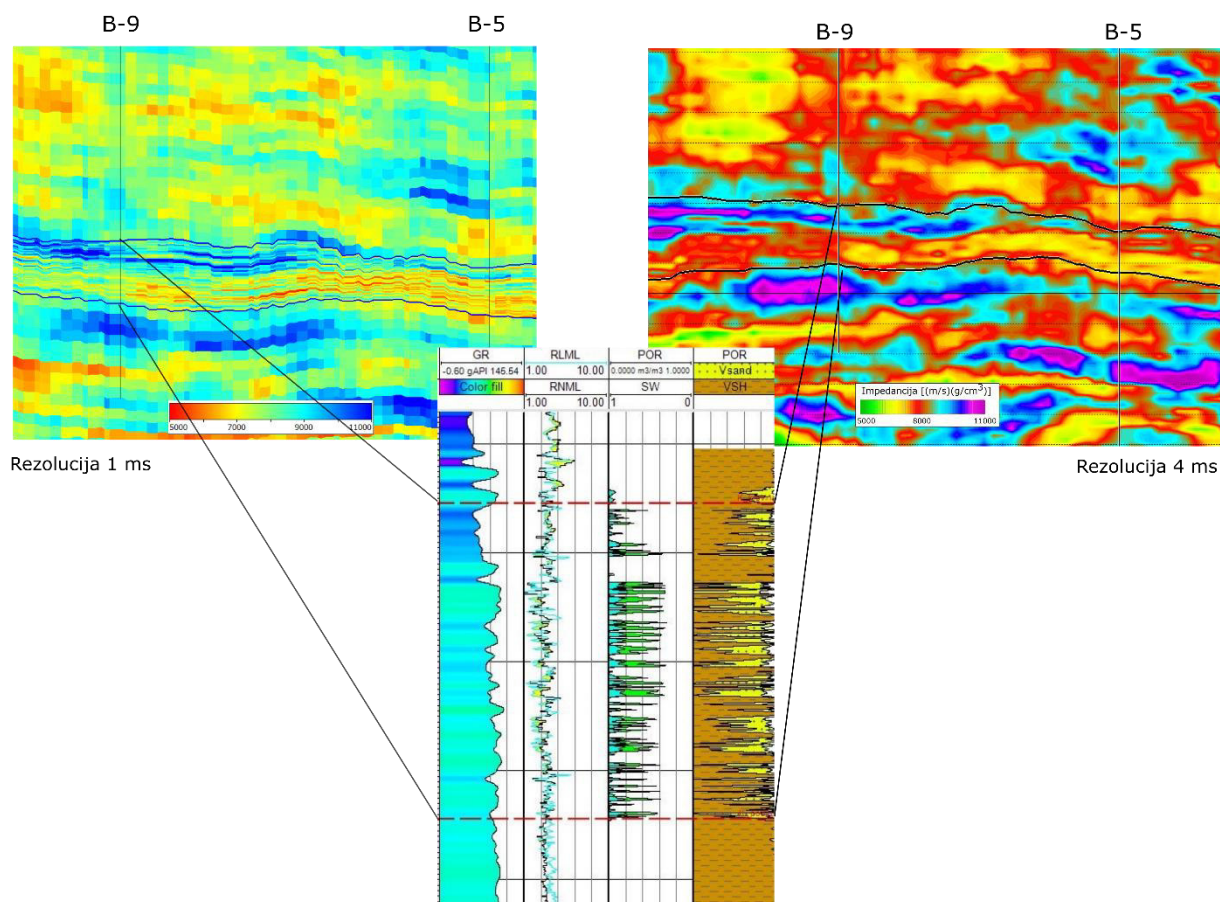
Slika 10-19 Rezultati stohastičke inverzije duž profila 3-3' na polju Letičani: (a) P-impedancija, (b) S-impedancija i (c) omjer V_p/V_s polja Letičani

Rezultati inverzija prikazani na kartama (Prilog 3) definiraju niže vrijednosti impedancija u cijelom intervalu ležišta u prostoru oko bušotine B-5 te u prostoru oko bušotine B-7 koje su još u eksploataciji. Atributne karte i profili svih inverzija ukazuju da su u prostoru oko bušotine B-9 u vertikalnoj zoni 10 ms ispod krovine definirane više vrijednosti impedancija (Prilog 3a, b i c - zona A), a time i lošija svojstva ležišta. Rezultati svih seizmičkih inverzija ukazuju da u prostoru oko bušotina B-3, B-6AL i B-9 niže vrijednosti impedancija su vidljive samo u dubljem dijelu ležišta (Prilog 3a, b i c - zona B).

Rezultati inverzija upućuju na zaključak o postojanju loših ležišnih svojstva sedimenata u prostoru oko bušotine B-9, no ako se analiziraju petrofizikalni podaci vidljiva je izražena heterogenost kao posljedica izmjene centimetarskih slojeva pješčenjaka i lapora (Slika 10-20). Rezultati stohastičke inverzije upućuju na heterogenost, što je osobito vidljivo na rezultatima stohastičke inverzije s vertikalnom rezolucijom 1 ms prije prilagođavanja rezoluciji seizmičkih podataka od 4 ms. Iz slike 10-20 vidljivo je da petrofizikalni podaci ukazuju na izrazitu

heterogenost ležišta, koja se na profilu stohastičke inverzije s rezolucijom 1 ms jasno vidi. Na profilu stohastičke inverzije s rezolucijom 4 ms heterogenost je i dalje vidljiva s manjom vertikalnom razlučivosti.

Navedeno znači da su više vrijednosti impedancija u prostoru oko bušotine B-9 odraz izrazite heterogenosti ležišta i smanjene rezolucije rezultata determinističkih inverzija, a to dovodi do zaključka da za izrazito heterogena ležišta najprihvatljivije rezultate daje stohastička inverzija.



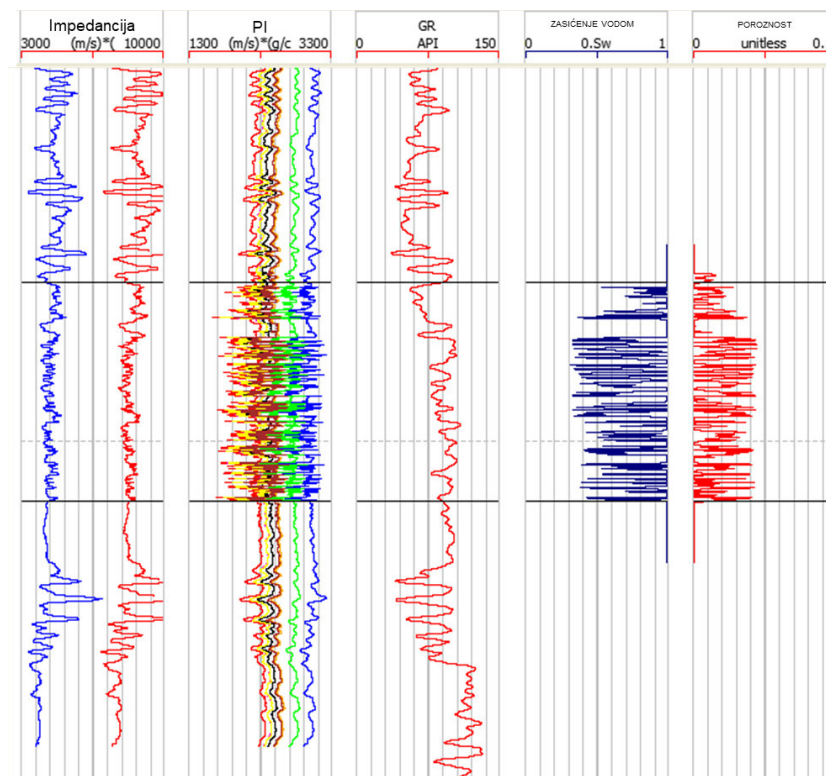
Slika 10-20 Usporedba profila stohastičke inverzije različitih rezolucija s petrofizikalnom interpretacijom bušotine B-9

Karte omjera V_p/V_s i Poissonovih koeficijenta kao rezultati stohastičke inverzije koje daju dodatnu sliku kvalitete ležišta, ali i zasićenja ugljikovodicima, prikazane su u dva intervala po 10 ms (Prilog 4), kao i karte impedancija. U plićem intervalu ležišta, u prostoru oko bušotine B-9 vrijednosti omjera V_p/V_s su više, no područje rasprostiranja viših vrijednosti omjera V_p/V_s je znatno više suženo nego na kartama impedancija (Prilog 4a – zona A). Dublji interval ležišta

ima niže vrijednosti omjera V_p/V_s u svim tektonskim blokovima u prostoru oko bušotina u eksploataciji (Prilog 4a - zona B).

Vrijednosti Poissonovih koeficijenata u ležištu su u rasponu od 0,28 do 0,34. Niže vrijednosti Poissonovih koeficijenata upućuju na bolja kolektorska svojstva i na zasićenja ugljikovodicima. Prema Das (2002) vrijednosti Poissonovih koeficijenata u glinovitim pješčenjacima su u rasponu od 0,20 do 0,40. Na lokacijama svih bušotina polja Letičani vrijednosti Poissonovih koeficijenata su u rasponu od 0,30 do 0,32, što predstavlja optimalne vrijednosti Poissonovih koeficijenata za ležište. U plićem intervalu ležišta određeni dijelovi ležišta imaju značajno niže vrijednosti Poissonovih koeficijenata (definirani tamnosivom bojom), pogotovo područja oko bušotina B-6AL, B-8AL i područje sjeverozapadno od bušotine B-9 (Prilog 4b - zona A). Prostor oko bušotina B-5 i B-9 u dubljem intervalu ležišta ima niže vrijednosti Poissonovih koeficijenata (Prilog 4b - zona B).

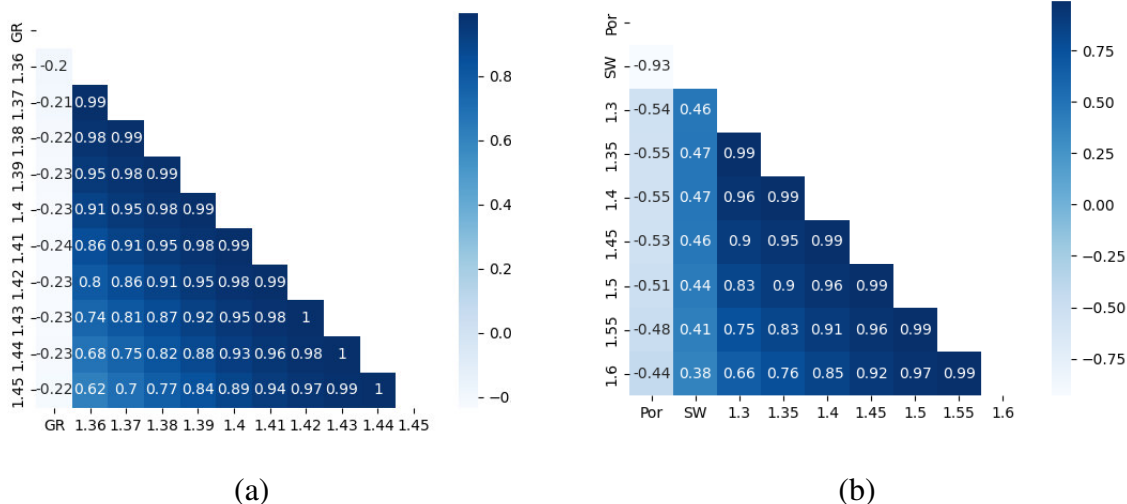
Rezultati stohastičke inverzije korišteni su za definiranje Poissonove impedancije. Korelacijom bušotinskih krivulja P- i S-impedancije, modeliranih za vodom zasićeno stanje, definiran je pravac korelacije, tj. raspon koeficijenata pravaca, a time i raspon vrijednosti koeficijenta rotacije c prema metodi TCCA (Slika 10-12). Za svaku vrijednost koeficijenta rotacije napravljena je krivulja Poissonove impedancije (PI) za sve bušotine prema formuli 10-6 (Slika 10-21).



Slika 10-21 Bušotinski profil s prikaznim krivuljama impedancija, Poissonovih impedancija s različitim vrijednostima koeficijenta c , mjerena prirodne radioaktivnosti, zasićenja vodom i poroznosti bušotine A-1Z

Litološka impedancija (LI) definirana je također formulom 10-6, no za definiranje koeficijenta rotacije napravljena je korelacija svih Poissonovih impedancija za različite vrijednosti koeficijenta c s krivuljom prirodne radioaktivnosti (GR) (Slika 10-22a). Na slici 10-22a vidljivo je da najveću korelaciju (-0,24) s krivuljom prirodne radioaktivnosti ima Poissonova impedancija definirana koeficijentom 1,41, stoga je litološka impedancija definirana izrazom: $LI = I_p - 1,41I_s$.

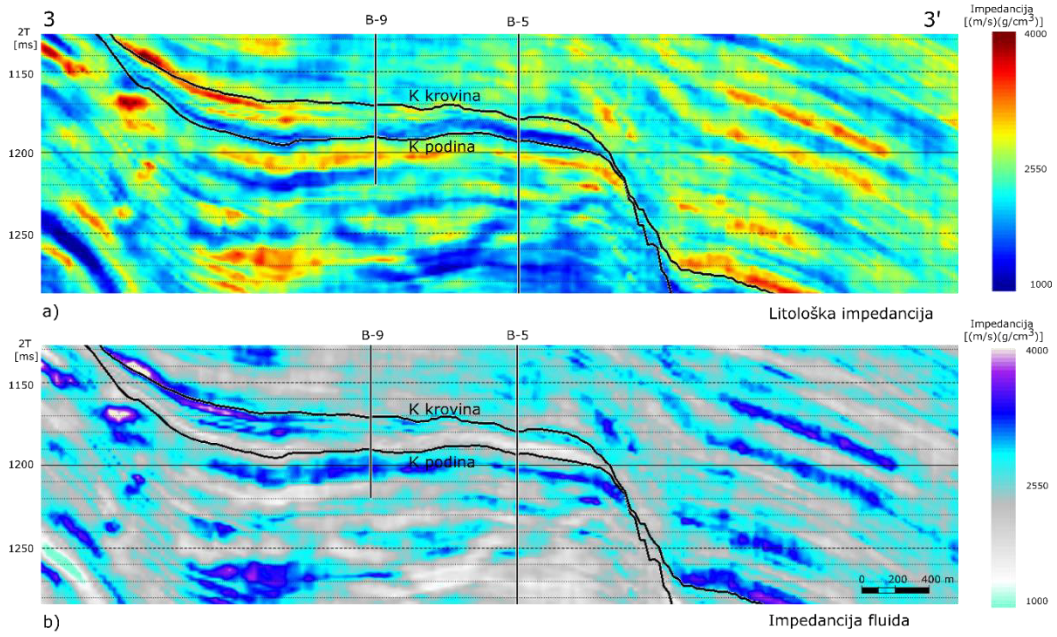
Impedancija fluida definirana je korelacijom svih Poissonovih impedancija za različite vrijednosti koeficijenta c s krivuljama poroznosti i zasićenja vodom (Slika 10-22b). Veću korelaciju krivulje Poissonovih impedancija imaju s krivuljama poroznosti nego s krivuljama zasićenja vodom. Poissonova impedancija definirana koeficijentom 1,4 i 1,35 ima najveću korelaciju s krivuljom poroznosti (-0,55) (Slika 10-22b), stoga je za koeficijent rotacije odabrana vrijednost 1,375 te je impedancija fluida definirana izrazom: $LI = I_p - 1,375I_s$.



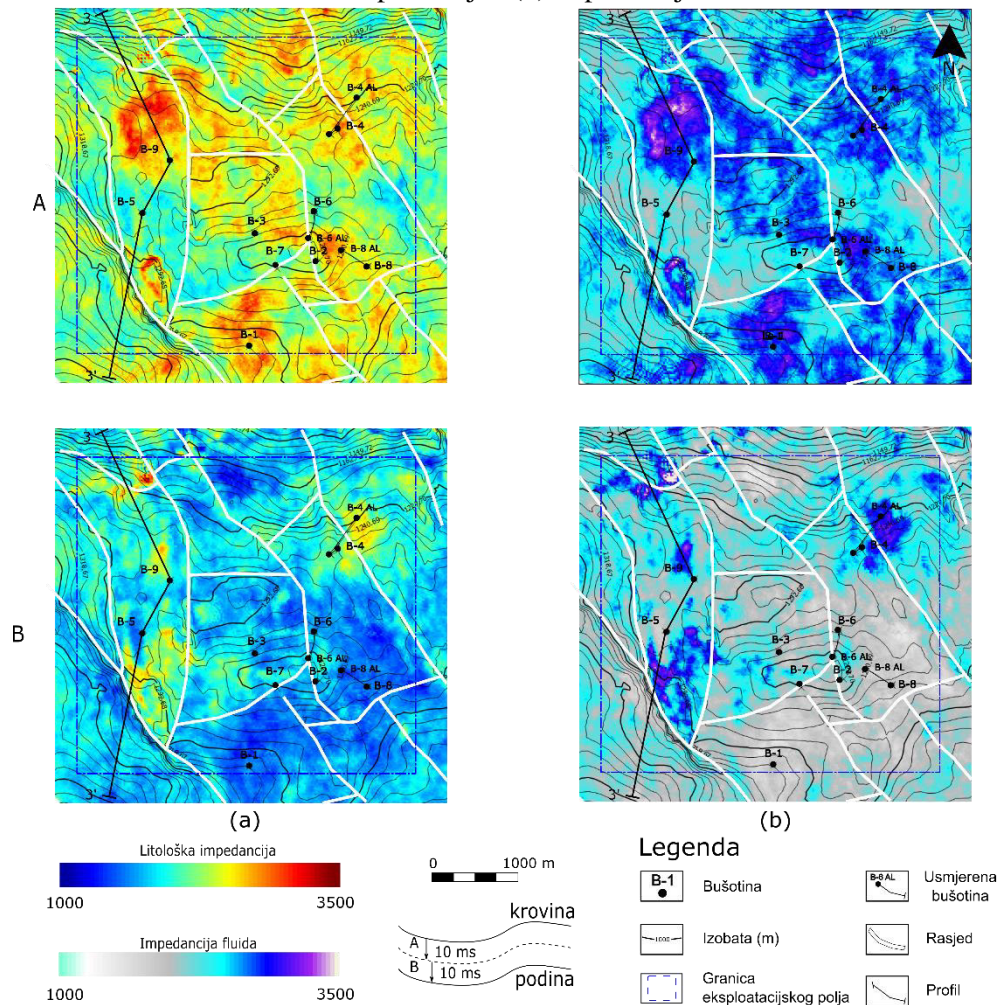
Slika 10-22 Definiranje koeficijenta rotacije (c) na temelju TCAA metode prikazana u obliku matrica korelacija: (a) korelacija Poissonove impedancije s prirodnom radioaktivnosti, (b) korelacija Poissonove impedancije s poroznošću i zasićenjem vode

Poissonova impedancija ima negativnu korelaciju s prirodnom radioaktivnošću i poroznosti stoga niže vrijednosti litološke impedancije i impedancije fluida ukazuju na pješčenjake i zasićenje fluidima. Može se reći da rezultati Poissonove impedancije, tj. litološke i impedancije fluida potvrđuju rezultate seizmičke inverzije (Slika 10-23). Također ukazuju da dublji intervali ležišta imaju bolja ležišna svojstva i veće zasićenje ugljikovodicima što je prikazano plavom bojom za litološku impedanciju (Slika 10-23a), odnosno sivom za impedanciju fluida duž profila 3-3' (Slika 10-23b).

Atributne karte litološke impedancije i impedancije fluida (Slika 10-24) ukazuju također na više vrijednosti impedancija u prostoru oko bušotine B-9, u vertikalnoj zoni 10 ms ispod krovine (zona A na slici 10-25). U dubljem intervalu ležišta na istom području definirane su niže vrijednosti impedancija (zona B na slici 10-25).



Slika 10-23 Rezultati Poissonove impedancije inverzije duž profila 3-3' na polju Letičani: (a) litološka impedancija i (b) impedancija fluida



Slika 10-24 Atributne karte rezultata Poissonove impedancije polja Letičani: (a) litološka impedancija i (b) impedancija fluida prikazane za dvije vertikalne zone po 10 ms (A i B)

11 Primjena seizmičke inverzije u karakterizaciji ležišta

Seizmičkom inverzijom dobivaju se podaci o elastičnim svojstvima koja se mogu povezati sa svojstvima ležišta, kao što su zasićenje fluidima i poroznost. Na taj način se modeliranjem mogu procijeniti ležišni parametri u slučajevima nedostatnih mjerenih podataka.

11.1 Seizmičko modeliranje dubine slojne vode

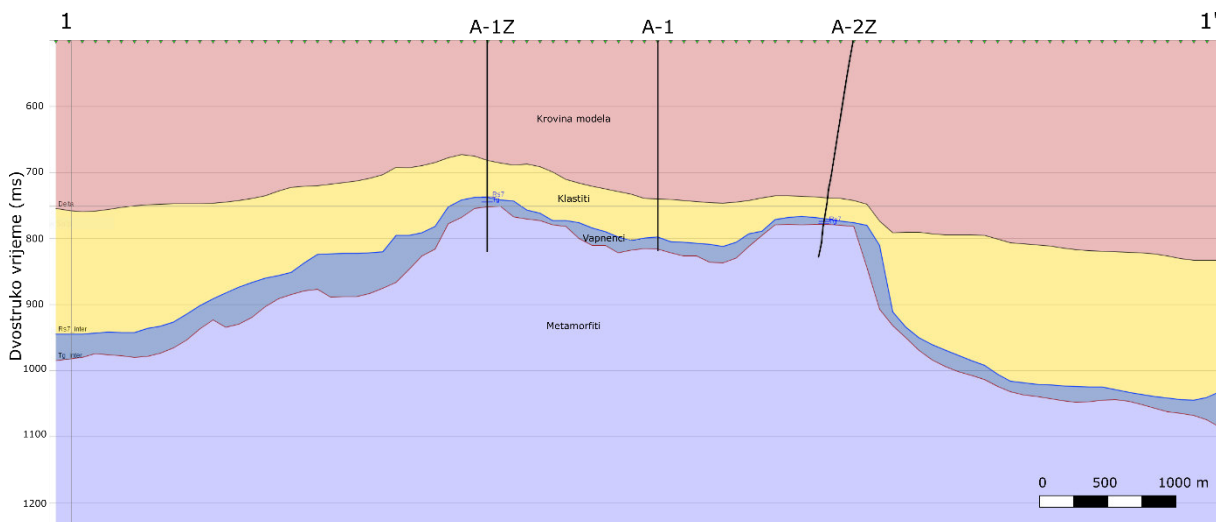
Definiranje volumena ležišta ima značajnu ulogu u krajnjem ekonomskom aspektu eksploatacije ugljikovodika. Dubina kontakta slojne vode i ugljikovodika je neophodna za izračun rezervi nekog ležišta. Dubina kontakta slojne vode određuje se hidrodinamičkim mjerenjima u ležištu ugljikovodika i u slojnoj vodi.

U plinskom ležištu Grubišnog Polja kontakt slojne vode i plina određen je, prema Vukadinović (1996), kao jedinstveni horizont, ali uvjetno na dubini od -737 m. Zbog nedovoljnog broja hidrodinamičkih mjerenja kojima se može točno definirati kontakt, određen grafičkom ekstrapolacijom dostupnih točaka mjerenja gradijenta tlaka plina i gradijenta tlaka slojne vode u bušotini A-1Z. U bušotini A-2Z nema hidrodinamičkih mjerenja te se za antiklinalu nabušenu tom bušotinom uzima kontakt iz bušotine A-1Z (Vukadinović, 1996).

No, promjena dubine slojne vode mijenja elastična svojstva stijena i brzine širenja elastičnih valova, a time i seizmički odraz. Budući da snimljeni seizmički podaci odražavaju elastična svojstva ležišnih stijena, oni neposredno sadrže i informaciju o zasićenju fluidima i dubini slojne vode u trenutku seizmičkih mjerenja. Ovdje je prikazan novi pristup definiranju kontakta slojne vode, koji može dati vrijedne podatke u slučaju nedostatka hidrodinamičkih mjerenja.

Uzimajući u obzir rezultate laboratorijskih mjerenja elastičnih svojstava i rezultate seizmičke inverzije, konstruiran je seizmički model (Slika 11-1). Seizmički model zapravo predstavlja strukturni model koji definiraju interpretirani horizonti te svaka zona dubinski i prostorno sadrži podatak o elastičnim svojstvima, kao što su impedancija, gustoća, brzina širenja seizmičkih valova. Seizmički model omogućuje modeliranje seizmičkog profila koji se uspoređuje sa snimljenim seizmičkim podacima. Promjenom dubine slojne vode u modelu mijenja se i seizmički odziv, a uspoređuje se amplitudni odraz po krovini vapnenaca i metamorfita s amplitudnim tragom snimljenih seizmičkih podataka. Dubine slojne vode u modelu definirane su na -800, -752, -737 i -710 m. Dubina kontakta plin-voda na -752 m

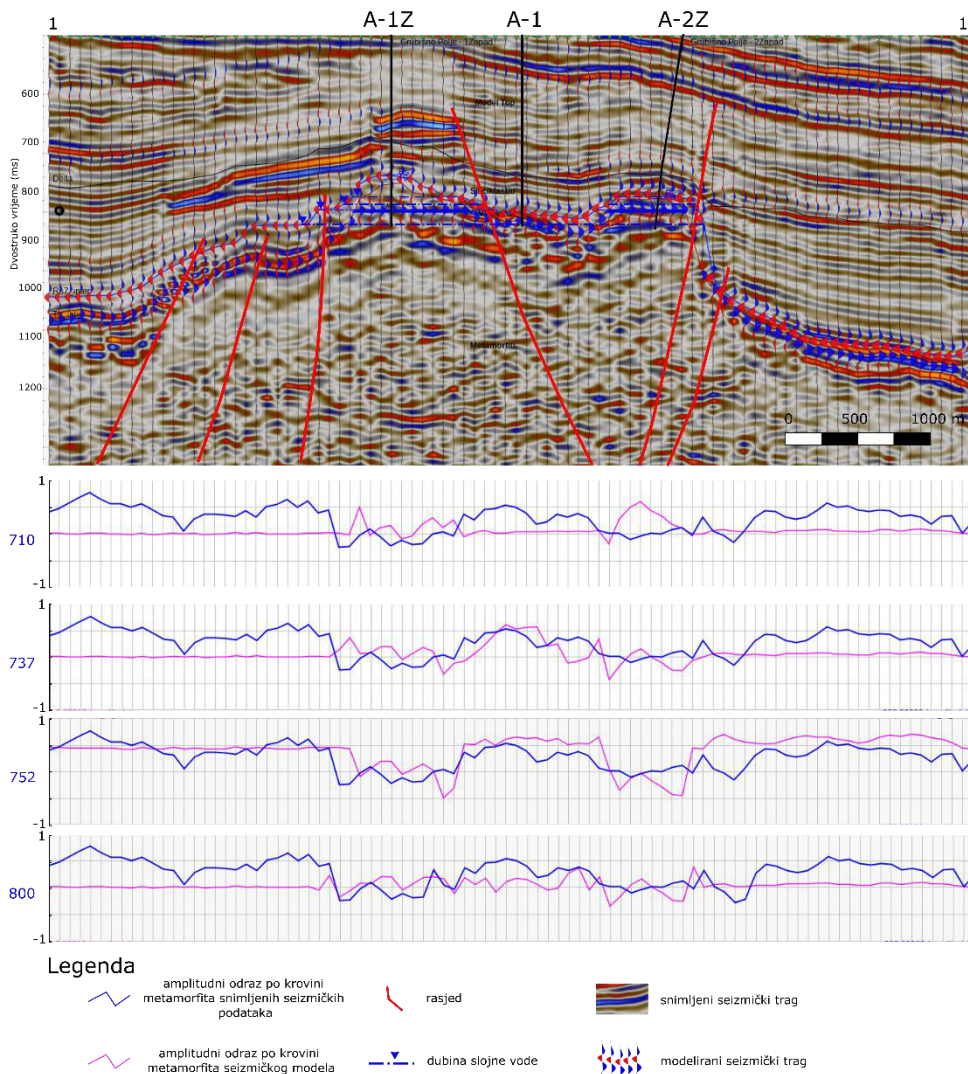
definiran je na temelju podataka iz bušotine A-2, u kojoj je na toj dubini nabušena krovina ležišta zasićenog vodom. Dubina kontakta -737 m definirana je na osnovi iznesene diskusije o nesigurnosti određivanja dubine kontakta prema Vukadinović (1996). Dubine kontakta od -800 m i -710 m definirane su kao najdublji i najplići kontakt zbog kontrole seizmičkog modela.



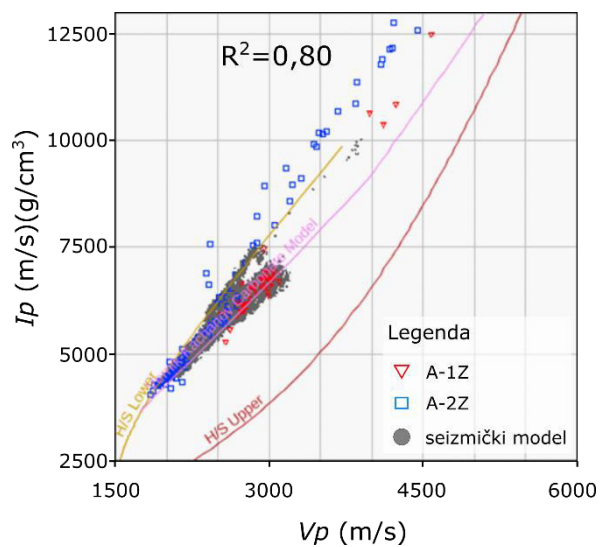
Slika 11-1 Seizmički model Grubišnog Polja konstruiran na temelju seizmičke interpretacije. Svaki sloj modela definiran je elastičnim parametrima dobiven laboratorijskim mjerenjima i na temelju rezultata seizmičke inverzije.

Analizom amplitudnih odraza mjerenih seizmičkih podataka po krovini metamorfita vidljivo je da u zonama promjene zasićenja dolazi do nagle promjene amplitude do određene vrijednosti, a zatim slijede konstantne vrijednosti amplituda (Slika 11-2). Amplitude modeliranih seizmičkih tragova ne mogu biti identične tragovima snimljenih seizmičkih podataka jer je nemoguće modelirati identične geološke uvjete kao u podzemlju. Kvalitativna analiza pokazuje da amplitudni odrazi za modelirane dubine kontakta plin-voda -710 i -737 m ne odgovaraju amplitudama snimljenih seizmičkih tragova (Slika 11-2). Amplitudni odraz za modeliranu dubinu kontakta plin-voda od -800 m ima približan odraz tragu snimljenih seizmičkih podataka u zoni oko bušotine A-1Z, dok se u ostalim dijelovima modela odrazi razlikuju. Jedino se amplitudni odraz za modeliranu dubinu slojne vode od -752 m podudara duž cijelog profila.

Pored toga, rezultati se mogu analizirati i kvantitativno usporedbom brzina i impedancija bušotinskih podataka i podataka dobivenih na temelju modela. I u ovom slučaju, dubina kontakta plin-voda na -752 m daje najbolju korelaciju ($R^2=0,80$) između snimljenih seizmičkih podataka i bušotinskih podataka.



Slika 11-2 Analiza amplituda snimljenih i modeliranih seizmičkih tragova, za četiri različite dubine kontakta plin-voda na Grubišnom Polju

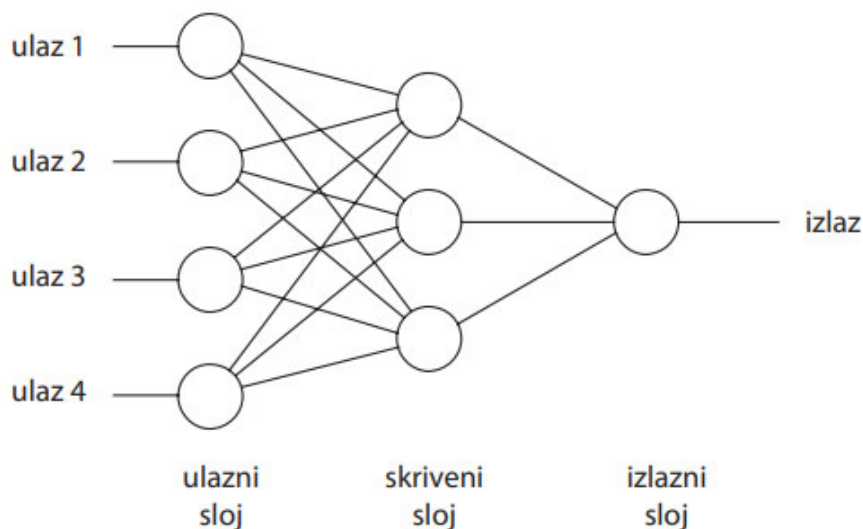


Slika 11-3 Dijagram odnosa brzina V_p i P-impedancija I_p seizmičkog modela za dubinu kontakta plin-voda od -752 m i bušotinskih podataka u bušotinama A-1Z i A-2Z.

11.2 Raspodjela poroznosti

Jedan od osnovnih rezultata geoloških istraživanja građe ležišta su karte poroznosti koja uz elastična svojstva ležišnih stijena bitno utječe na geološko-ekonomsku procjenu ležišta ugljikovodika. Točnost procjene elastičnih svojstava stijena pa tako i poroznosti ovisi o količini raspoloživih podataka, ponajviše o broju bušotina. Bušotinski podaci imaju veliku vertikalnu rezoluciju, no lateralna prostorna raspodjela karakteristika ležišnih stijena između bušotina je nepoznata. S druge strane 3D seizmički podaci imaju manju vertikalnu rezoluciju, no daju informaciju o prostornoj raspodjeli geoloških parametara.

Povezivanjem bušotinskih i seizmičkih podataka moguću je bolje definiranje karakteristika ležišnih stijena. Lateralna raspodjela poroznosti temelji se na korelaciji između petrofizikalnih, bušotinskih podataka i seizmičkih podataka (Hampson et al., 2001). Za definiranje korelacije između ulaznih podataka koriste se neuronske mreže, čija je glavna primjena definiranje ovisnosti između podataka koji nisu u isključivo linearnoj vezi (Malvić i Cvetković, 2009). Korištena je višeslojna neuronska mreža s 5 skrivenih slojeva (Slika 11-4).

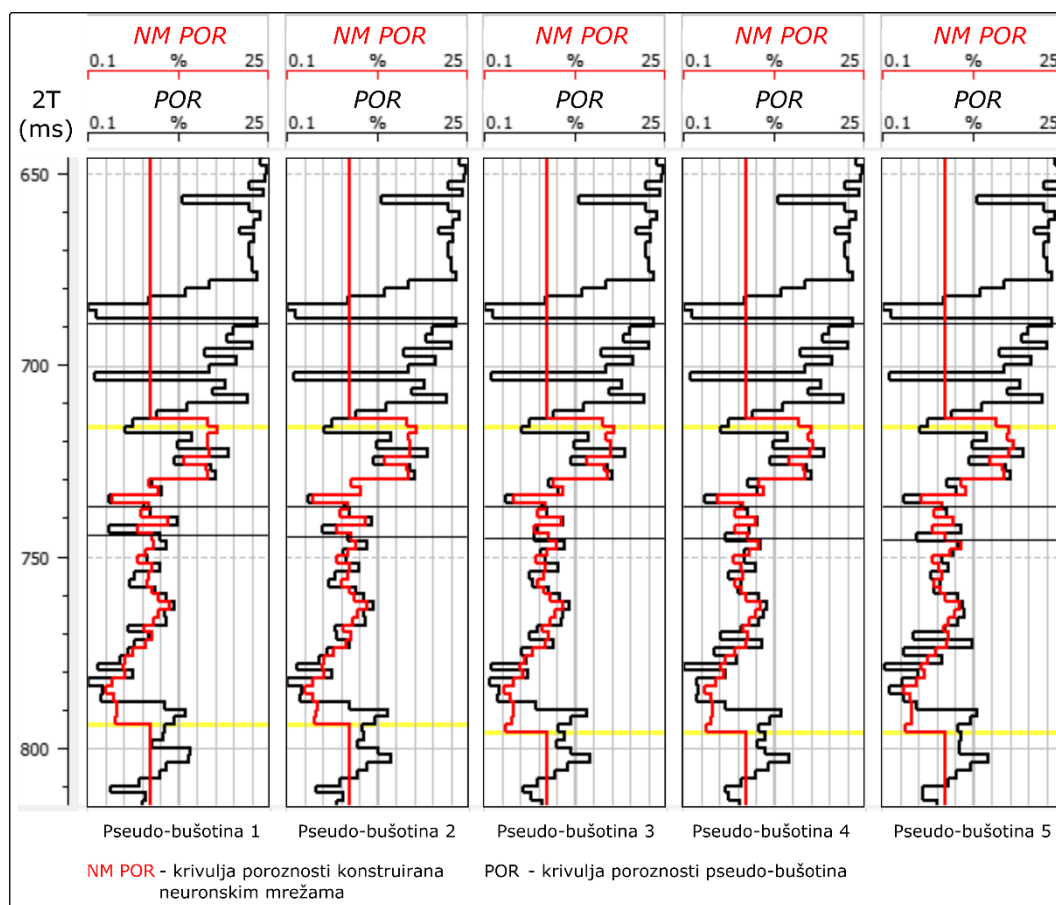


Slika 11-4 Shema organizacije neuronske mreže (prema Malvić i Cvetković, 2009)

Ulazne podatke predstavljaju bušotinski podaci, seizmički podaci te rezultati seizmičke inverzije. Na Grubišnom Polju su podaci o poroznosti dostupni samo u dvije bušotine, A-1Z i A-2Z. No, dvije bušotine nisu dovoljne za točnu procjenu poroznosti ležišta, stoga se pristupilo stvaranju baze pseudo-bušotina kreiranjem AVO (engl. *Amplitude versus offset*) seizmičkih

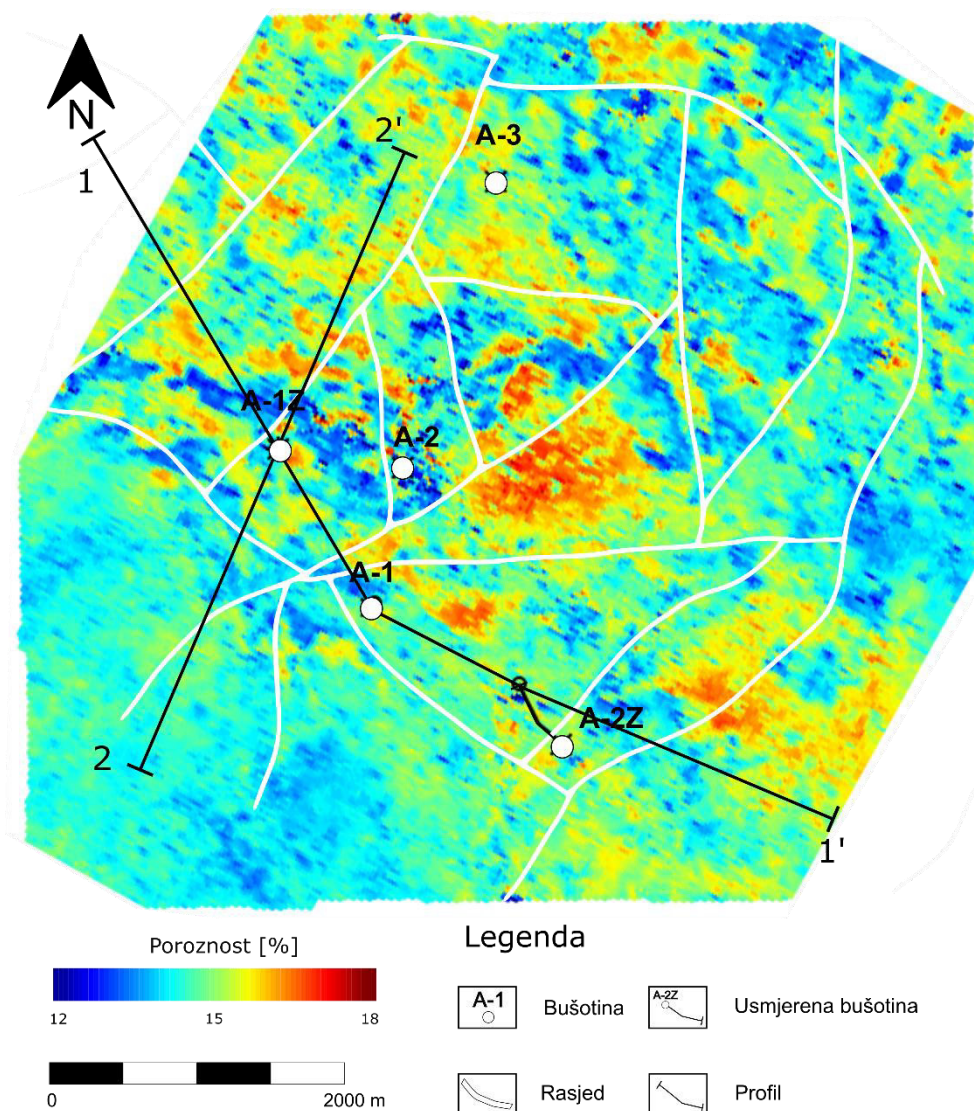
odraza za različite vrijednosti poroznosti i debljine ležišta koristeći metodologiju petrofizikalnog modeliranja.

Stvaranjem umjetnih AVO seizmičkih odraza definiraju se svi mogući rasponi vrijednosti poroznosti i debljine ležišta te se za svaki scenarij konstruiraju pseudo-bušotine koje se koriste za „učenje“ neuronskih mreža. Raspon vrijednosti poroznosti definiran je od 0 do 20%, a debljina ležišta od 10 do 60 m, što je rezultiralo sa 132 pseudo-bušotine. AVO seizmički odrazi su zbrojeni (engl. *stacked*) te korišteni za seizmičku inverziju pod istim uvjetima kao i snimljeni seizmički podaci.



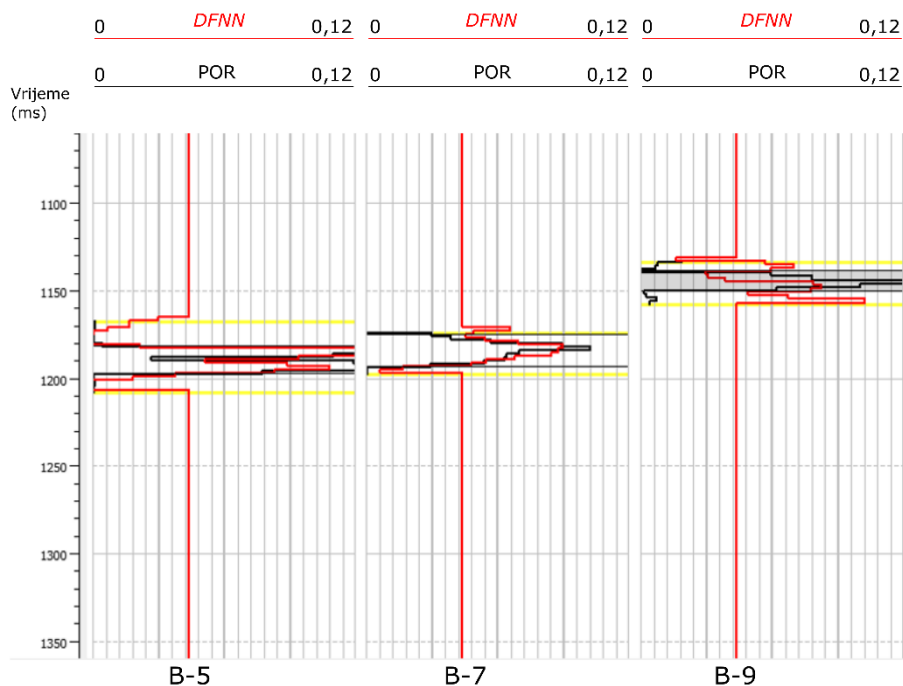
Slika 11-5 Modelirane ukupne poroznosti polja Grubišno Polje pomoću neuronske mreže (*DFNN*) (crvena linija) uspoređene s krivuljama poroznosti dobivenim u pseudo-bušotinama (crna linija)

Pseudo-bušotine su omogućile bolju korelaciju ulaznih podataka, a nakon završenog procesa učenja neuronskih mreža AVO seizmički podaci su zamijenjeni sa snimljenim seizmičkim podacima. Rezultat distribucije ukupnih poroznosti definira raspon poroznosti u ležištu od 12 do 18% (Slika 11-6).



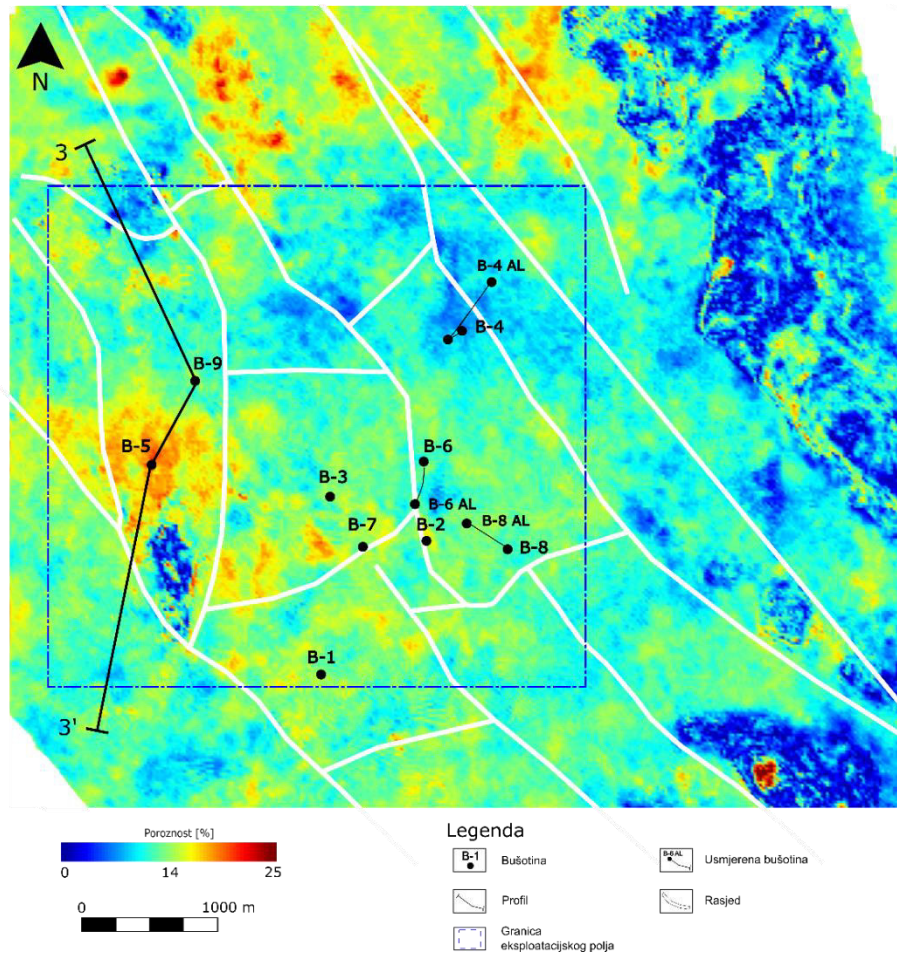
Slika 11-6 Karta poroznosti po krovini vapnenaca Grubišnog Polja

Polje Letičani ima dovoljan broj bušotina s dostupnim petrofizikalnim podacima pa se za to polje nisu koristile AVO pseudo-bušotine, već samo postojeće bušotine. Korelacijom petrofizikalnih vrijednosti poroznosti i rezultata seizmičke inverzije (Slika 11-7), korištenjem 4 dodatna atributa (trenutna frekvencija, trenutna amplituda, seizmički podaci niskog frekvencijskog spektra, impedancija) dobivena je korelacija od 77%. Rezultati korelacije su zadovoljavajući jer daju realan trend promjene poroznosti te daju dobar uvid u prostornu raspodjelu poroznosti u ležištu.

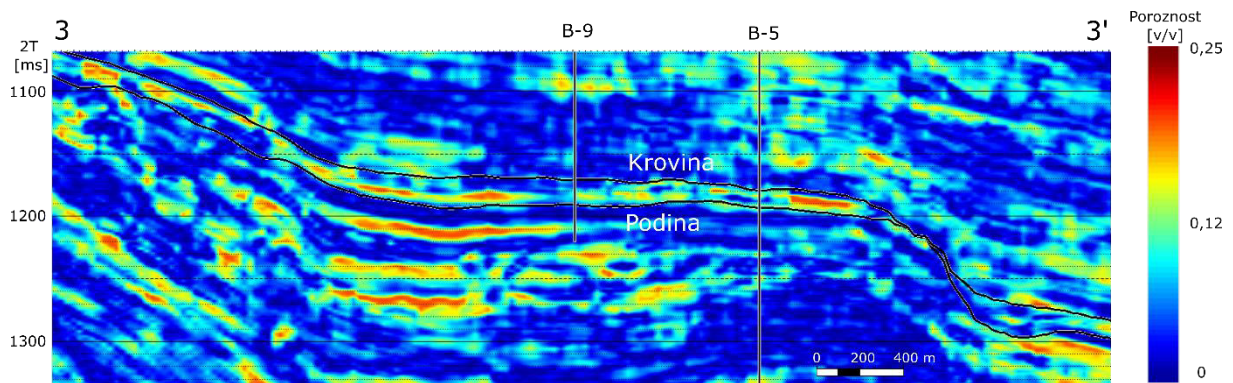


Slika 11-7 Modelirane ukupne poroznosti polja Letičani pomoću neuronske mreže (DFNN) (crvena linija) uspoređene s krivuljama poroznosti bušotina B-5, B-7 i B-9.

Prostorna raspodjela (Slika 11-8) ukazuje na povećane vrijednosti poroznosti u svim dijelovima ležišta, pogotovo u istočnom dijelu u području oko bušotine B-5 i sjeverozapadno od bušotine B-9. Na profilu 3-3' koji je povučen preko bušotina B-9 i B-5 vidljivo je da raspodjela poroznosti u vertikalnom slijedu prati rezultate seizmičke inverzije, tj. sedimenti veće poroznosti zastupljeni su u dubljim intervalima ležišta (Slika 11-9).



Slika 11-8 Karta poroznosti po krovini ležišta Koprivničkih pješčenjaka polja Letičani



Slika 11-9 Raspodjela poroznosti duž profila 3-3' koji se proteže zapadnim dijelom polja Letičani

12 Pregled metodološkog pristupa seizmičke interpretacije ležišta ugljikovodika

Seizmički podaci u istraživanju ugljikovodika koriste se desetljećima, a zadnjih 15 do 20 godina se ne svode samo na interpretaciju seizmičke amplitude i dubinsko kartiranje podzemlja. Seizmički podaci omogućuju izdvajanje informacija bitnih za karakterizaciju ležišta, razlikovanje litološkog sastava, distribuciju poroznosti i zasićenja.

Usavršavanjem metoda snimanja seizmičkih mjerenja i računalnih programa za obradu i interpretaciju podataka geofizičar, tj. seizmički interpretator mora biti sposoban primijeniti različite geofizičke metode, kao što su seizmička inverzija, modeliranje petrofizikalnih podataka (engl. *rock physics*), AVO analiza te integrirati petrofizikalne, geološke i laboratorijske rezultate. Uvijek treba imati na umu seizmičku višeznačnost te na temelju interpretacije i seizmičkih modela uz integraciju s drugim dostupnim podacima dati vjerodostojne rezultate.

Metodologija rada definira se na početku istraživanja i ovisi o dostupnosti ulaznih podataka, kvaliteti ulaznih podataka te o samom cilju istraživanja. Predstavljeni tijekom rada temeljen je na provedenim istraživanjima u doktorskom radu. Prikazane su metode kojima je glavni cilj definirati detaljne geološke i fizikalne parametre ležišnih stijena (Slika 12-1).

Bez obzira na cilj istraživanja potrebno je provesti detaljnu analizu i provjeru ulaznih podataka. Pregled dostupnih geoloških, laboratorijskih i petrofizikalnih podataka potreban je za kvalitetniju interpretaciju seizmičkih podataka. Geološki podaci podrazumijevaju sve dostupne podatke dobivene bušenjem te podatke laboratorijskih analiza jezgri i fluida. Seizmički podaci uključuju *pre-stack* i *post-stack* seizmičke podatke, odnosno prije i nakon zbrajanja tragova. Model brzina je bitan za analizu seizmičkih podataka, konstruiranje volumena seizmičkih podataka s definiranim intervalima kutova upada seizmičkih valova (engl. *angle-stack*) i interpretaciju seizmičkih podataka. Model se konstruira pomoću dostupnih bušotinskih podataka o mjeranim brzinama i brzinama korištenim prilikom obrade seizmičkih podataka, odnosno dinamičkih korekcija (stekirajuće brzine).

Rock physics povezuje podatke dobivene petrofizikalnim analizama i seizmičke podatke. Omogućuje konstruiranje sintetskih seizmičkih tragova i usporedbu s tragovima snimljenih seizmičkih podataka. Često se koristi za konstruiranje nedostupnih karotažnih krivulja, ili onih koje nisu mjerene, pomoću postojećih fizikalnih modela i empirijskih odnosa. Tijekom analize

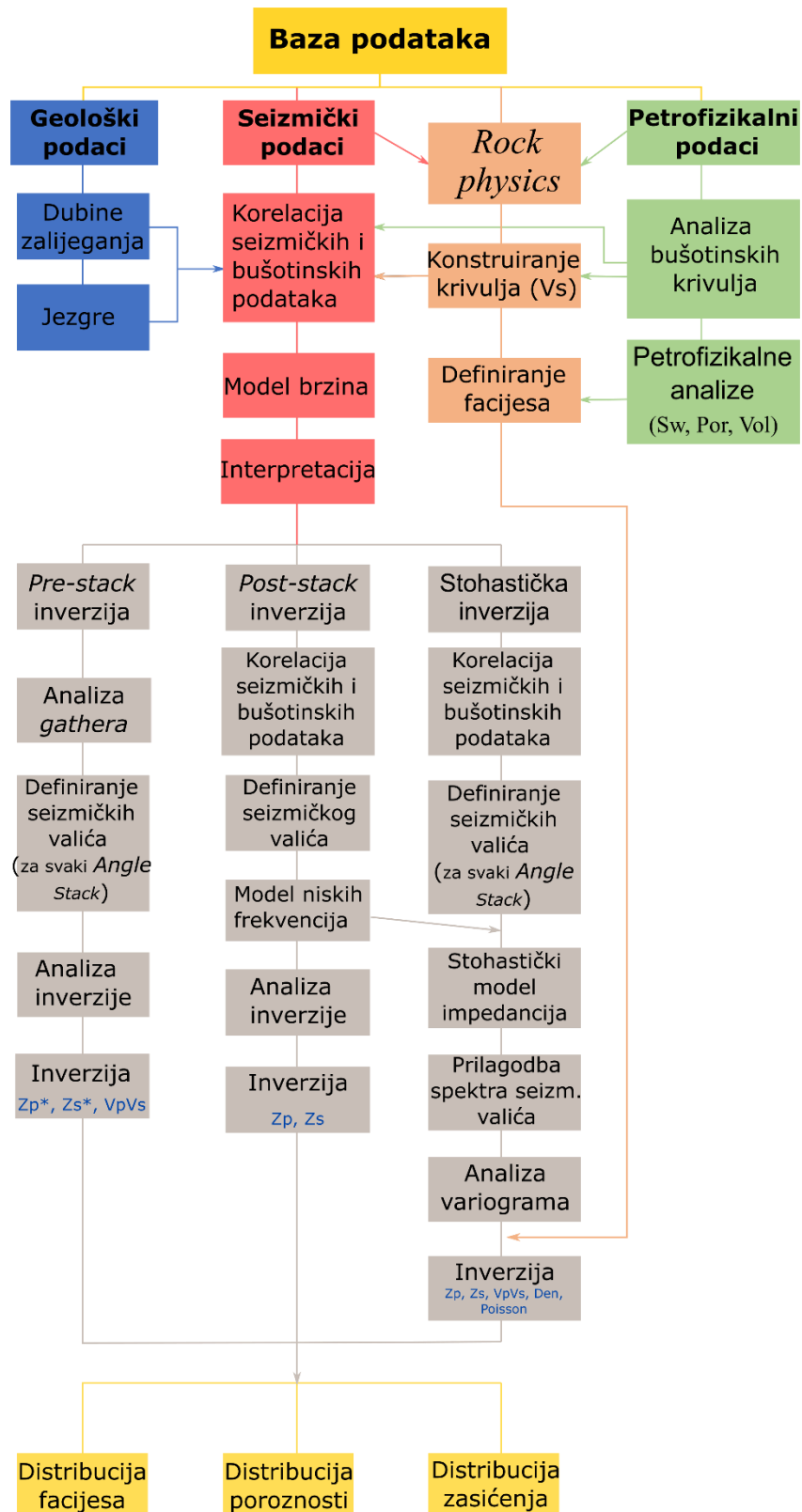
podataka potrebno je napraviti kalibraciju seizmičkih i bušotinskih podataka na temelju sintetskog seizmograma što daje pouzdano vertikalno povezivanje seizmičkih podataka u vremenskoj domeni i bušotinskih podataka u dubinskoj domeni. Korištenjem krivulja petrofizikalnih analiza moguće je definirati litološke klase, na temelju vrijednosti elastičnih parametara bušotinskih podataka. Litološke klase se zatim distribuiraju prostorno pomoću rezultata seizmičke inverzije.

Metoda *Pre-stack* inverzija temelji se na seizmičkim podacima nebrojenih tragova što omogućuje izravno konstruiranje impedancija iz seizmičkih podataka bez modela niskih frekvencija. *Pre-stack* seizmički podaci dopuštaju interpretatoru optimalno definiranje intervala kutova upada seizmičkih valova za područje istraživanja, tj. konstruira se nekoliko volumena seizmičkih podataka. U ovom procesu važno je definirati seizmičke valice za svaki definirani interval kuta upada seizmičkih valova.

Post-stack inverzija koristi seizmičke podatke dobivene zbrajanjem svih tragova, a također je važan postupak definiranja seizmičkog valića. U *post-stack* seizmičkoj inverziji koristi se model niskih frekvencija za uvođenje spektra niskih frekvencija. U ovom koraku važno je pregledati dostupne karotažne krivulje i izdvojiti spektar frekvencija koje nedostaju seizmičkim podacima.

Stohastička inverzija koristi kao i *pre-stack* inverzija seizmičke podatke s definiranim intervalima kutova upada seizmičkih valova (*angle stack*), no također koristi i model niskih frekvencija identičan modelu tijekom *post-stack* inverzije. Tijekom procesa stohastičke inverzija potrebno je definirati prostornu raspodjelu podataka pomoću variograma što znatno utječe na rezultate inverzije.

Dobiveni rezultati seizmičke inverzije koriste se za prostornu analizu i distribuciju litoloških klasa, poroznosti i zasićenja. Raspodjela ovisi o kvaliteti rezultata seizmičke inverzije pa je potrebno prije distribucije analizirati rezultate seizmičke inverzije.



*
 Zp- seizmički volumen P-impedancija
 Zs- seizmički volumen S-impedancija

Slika 12-1 Tijek rada metodološkog pristupa seizmičke interpretacije ležišta ugljikovodika

13 Diskusija

Ovaj rad definira postupke seizmičke interpretacije ležišta ugljikovodika primjenom inverzije seizmičkih brzina, kompresijskih i smičnih brzina. U Panonskom bazenu, a osobito u hrvatskom dijelu, u svega nekoliko bušotina snimljene su brzine S-valova, stoga je predviđanje brzina u bušotinama koje nemaju snimljene brzine S-valova veliki izazov i zahtijeva veliki angažman da se omogući pouzdan ulazni podatak za seizmičko modeliranje i seizmičku inverziju.

13.1 Modeliranje fizikalnih parametara

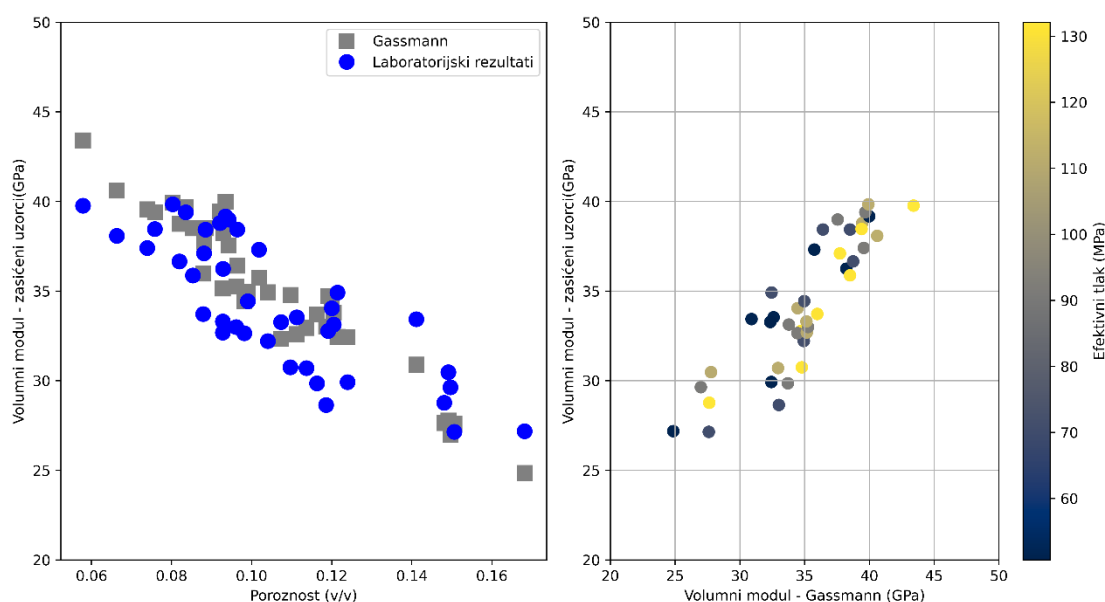
Modeliranje fizikalnih parametara stijena (engl. *rock physics*) nije novo istraživačko područje i postoji godinama u okviru laboratorijskih ispitivanja stijena. Posljednjih desetljeća metoda je prepoznata i uvedena u procese istraživanja ugljikovodika zbog dobrih rezultata u seizmičkoj inverziji, definiranju pornog sustava stijena, seizmičkom modeliranju koji pomažu smanjenju rizika u istraživanju i karakterizaciji ležišta. Disertacija prikazuje mali dio ovakvog istraživačkog pristupa i samo neke od mogućnosti, no postavlja temelj za razvijanje ovakvih istraživačkih metoda u Hrvatskoj i Panonskom bazenu općenito.

Prikazan je eksperimentalni pristup definiranju brzina smičnih valova te njihova upotreba za definiranje elastičnih parametara stijena potrebnih u postupku seizmičke inverzije. Elastični parametri su neophodni za definiranje seizmičkog odziva ležišnih stijena pri različitim uvjetima zasićenja. Rezultati mjerenja elastičnih svojstava vapnenaca su manje zastupljeni u objavljenim znanstvenim publikacijama od rezultata mjerenja klastičnih stijena, stoga ovaj rad daje i doprinos boljem razumijevanju elastičnih svojstava vapnenaca.

Definiranje brzina smičnih valova pomoću teorijskih modela, kao što su modeli Xu-Payne i Kuster-Töksoz zahtijevaju određene početne pretpostavke. Model Xu-Payne pretpostavlja dobro povezane makropore, a jedna od temeljnih pretpostavki Gassmannove teorije je niska frekvencija seizmičkih valova koja dopušta uravnoteženje pornog tlaka pora unutar pola ciklusa seizmičkog vala. Mnogi čimbenici mogu utjecati na početne pretpostavke, poput propusnosti, oblika pora, stišljivosti pora i heterogenosti (Xu i Payne, 2009). Složenost karbonatnog sustava pora u nekim slučajevima može dovesti do nemogućnosti primjene Gassmannove teorije. Tako je u slučaju pornog sustava stijena s izoliranim porama koje ne dopuštaju uravnoteženje tlaka pora unutar polu-ciklusa seizmičkog vala.

Uzimajući u obzir nedovoljna istraživanja fizikalnih i seizmičkih svojstava vapnenaca Panonskog bazena, ovi rezultati predstavljaju prvi korak boljem razumijevanju širenja seizmičkih valova kroz vapnence. Premda ovo istraživanje daje uvid u svojstva vapnenca, također daje priliku za daljnja istraživanja. Elastični parametri prikazani u ovom radu mogu se povezati sa statičkim parametrima elastičnosti izvedenim na istim uzorcima. Takvi rezultati bi omogućili definiranje korekcijskih faktora koji se mogu izravno primijeniti na bušotinske krivulje brzina i imali bi znanstveni i privredni doprinos.

Kako bi se razumjela i interpretirala elastična svojstva uzoraka, primijenjena je Gassmannova formula izravno koristeći rezultate elastičnih svojstava suhih stijena i uspoređena je s rezultatima zasićenih uzoraka (Slika 13-2). Gegenhuber (2015) je predstavila izravnu upotrebu laboratorijskih rezultata volumnog modula suhih uzoraka koji su korišteni izravno u Gassmannovoj jednadžbi. Ova metoda pretpostavlja ravnomjerni tlak u porama stijena.



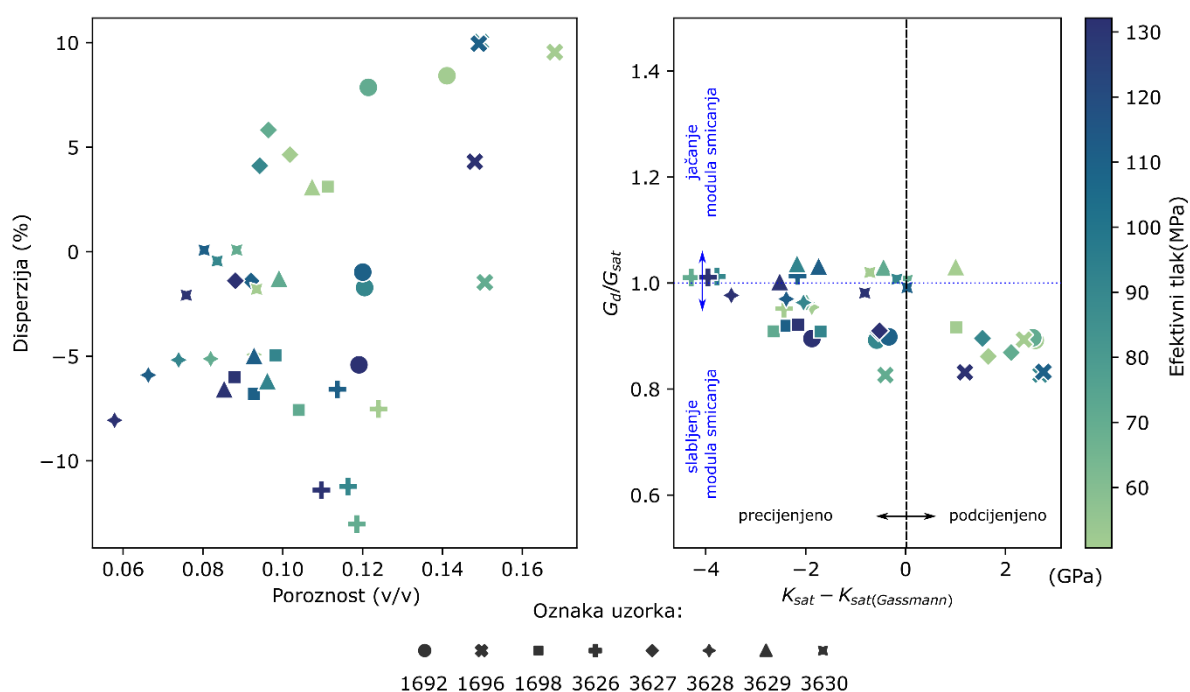
Slika 13-2 Odnos poroznosti i volumnog modula zasićenih uzoraka dobivenih laboratorijskim mjerenjima i izračunatih pomoću Gassmannove jednadžbe (lijevo) i odnos volumnog modula zasićenih uzoraka dobivenih laboratorijskim mjerenjima i izračunatih pomoću Gassmannove jednadžbe (desno). Ulazni parametri za kalcit: $K = 76.8$ GPa, voda $K = 2.1$ GPa

Rezultati Gassmannove jednadžbe imaju zadovoljavajuće slaganje s rezultatima mjerenja širenja ultrazvučnih valova na zasićenim uzorcima, iako Gassmannova jednadžba daje blago precijenjene vrijednosti volumnog modula. Time i brzina ima nešto veće vrijednosti, jer je proporcionalna volumnom modulu.

Disperzijska analiza volumnog modula napravljena u okviru analize disperzije brzine (Regnet et al., 2015) pokazala je da samo uzorci 1696 i 3626 imaju vrijednosti disperzije preko 10%.

$$\text{Disperzija} = \frac{K_{\text{sat}} - K_{\text{sat Gassmann}}}{K_{\text{sat Gassman}}} \quad (13-1)$$

Na slici 13-3 prikazane su detaljne vrijednosti razlika između modeliranog i izmjereno volumnog modula čime se želi analizirati pouzdanost Gassmannove formule za vapnence. Najveća precijenjena vrijednost iznosi 4 GPa.



Slika 13-3 Korelacija poroznosti i disperzije volumnog modula izračunatog Gassmannovom jednadžbom (lijevo) i dijagram promjene modula smicanja (G_d/G_{sat}) i razlike volumnog modula mjenog i izračunatog Gassmannovom formulom ($K_{sat} - K_{sat(Gassmann)}$).

Regnet et al. (2015) navode da korištenje disperzijske analize isključuje vanjski izvor, kao što su pukotine, uslijed mehaničkog zbivanja. Zhao et al. (2013) pretpostavljaju slučajnu orijentaciju pukotina što značajno utječe na seizmički val, osobito u prisutnosti pukotina s niskim omjerom širine i visine. Također, ako stijene imaju dva sustava pora, pukotine i krute pore, može doći do disperzije brzine kao posljedica elastične heterogenosti pora.

Disperzija utječe na odnos brzine i poroznosti, ali prema rezultatima ovog istraživanja odnos brzina-poroznost je ujednačen, čak i za uzorke s većim vrijednostima disperzije. Ipak, obzirom na definirani sustav s dvije vrste pora i prisutnost stilolita ispunjenih mineralima glina, ne može se isključiti utjecaj anizotropije na rezultate.

13.3 Seizmička inverzija

Postupak seizmičke inverzije, bilo determinističke ili stohastičke provodi se u definiranim koracima od ulaznih podataka do izrade konačnog seizmičkog modela impedancija (Slika 12-1). Seizmička inverzija ovisi o kvaliteti ulaznih seizmičkih podataka, stoga je potrebno prije seizmičke inverzije napraviti analizu kvalitete seizmičkih podataka. Uzroci smetnji u seizmičkim tragovima mogu biti geološki kao što su promjene litološkog sastava, rasjedne zone ili površinski uvjeti tijekom snimanja seizmičkih podataka. Predlaže se pregled seizmičkih tragova i u procesu zbrajanja seizmičkih tragova izdvajanje onih koji nisu pod utjecajem smetnji. Također, važno je tijekom procesa seizmičke inverzije što bolje povezati dubine bušotinskih i seizmičkih podataka. Zbog različitih mjerila, dubinskog za bušotinske podatke i vremenskog za seizmičke podatke korelacijom se osigurava točna integracija bušotinskih podataka u vremensko mjerilo.

Nepouzdanost i višeznačnost inverzije smanjuje se korištenjem modela niskih frekvencija koji bolje odgovaraju bušotinskim podacima i osiguravaju realniju raspodjelu impedancija u modelu. Zbog toga je potrebno obratiti pažnju na korelaciju bušotinskih i seizmičkih podataka. Točnost modela niskih frekvencija može imati značajan utjecaj na rezultate inverzije. Radi bolje prostorne distribucije brzina tijekom izrade modela niskih frekvencija zajedno s petrofizikalnim podacima integrirane su brzine seizmičkih valova (Chopra i Castagna, 2014).

Deterministička inverzija ograničena je spektrom niskih frekvencija modela i spektrom frekvencija seizmičkih podataka, što za rubne vrijednosti frekvencijskog spektra rezultira šumom, tj. precijenjenim vrijednostima koeficijenta refleksije. Stoga deterministička inverzija predstavlja najbolju procjenu koja zadovoljava razlučivost i točnost inverzije i najčešće teži srednjim vrijednostima impedancija geoloških formacija. Stohastičkom inverzijom izbjegavaju se srednje vrijednosti rezultata, no inverzija nije jednoznačan proces. Stohastička ili geostatistička inverzija predstavlja višestruke realizacije elastičnih svojstava integracijom spektra niskih, seizmičkih i visokih frekvencija. Odabir metode seizmičke inverzije ovisi o cilju istraživanja, raspoloživom vremenu za istraživanje i potrebnoj rezoluciji rezultata inverzije.

Rezultati seizmičkih inverzija na polju Letičani ukazuju na zaključak da su loša ležišna svojstva sedimenata u prostoru oko bušotine B-9 (Prilog 3a, b i c). No, ako se analiziraju petrofizikalni podaci vidljiva je izražena heterogenost kao posljedica izmjene centimetarskih slojeva pješčenjaka i lapora. Rezultati stohastičke inverzije upućuju na heterogenost, što je osobito vidljivo na rezultatima stohastičke inverzije s vertikalnom rezolucijom 1 ms (Slika 10-20) prije prilagođavanja rezoluciji seizmičkih podataka od 4 ms. Prema tome, interpretaciju rezultata seizmičke inverzije treba uvijek provjeriti i usporediti s petrofizikalnim podacima i analizama.

14 Zaključak

Ovim istraživanjem razvijen je metodološki pristup interpretacije ležišta ugljikovodika na temelju metoda obrade i interpretacije geofizičkih podataka. Pri tome su korišteni dostupni mjereni podaci: volumeni seizmičkih podataka, podaci vertikalnog seizmičkog profiliranja, karotažna mjerenja i eksploatacijski podaci na području plinskoga polja Grubišno Polje i naftnoga polja Letičani.

Kao preduvjet prikazanoj metodologiji konstruirane su strukturne karte krovine vapnenaca i krovine metamorfita na Grubišnom Polju te strukturne karte krovine ležišta Koprivnički pješčenjaci na polju Letičani. Strukturna interpretacija i analiza seizmičkih atributa na Grubišnom Polju i polju Letičani potvrđuje složene tektonske odnose.

Nova metodologija predložena je s ciljem dobivanja što pouzdanijeg modela ležišta ugljikovodika na temelju seizmičke inverzije brzina P- i S-valova. Modeli Kuster-Toksöz i Xu-Payne korišteni su za određivanje smičnih brzina za plinsko ležište na Grubišnom Polju zbog nedostatka snimljenih brzina smičnih valova u bušotinama. U postupku modeliranja korišteni su dostupni petrofizikalni, seizmički i VSP podaci te petrografske mikroskopske analize i snimke skenirajućim elektronskim mikroskopom. SEM i petrografske mikroskopske analize korištene su za početno definiranje pornog prostora vapnenaca, tj. oblika pora. Promjenom koeficijenta pora, razlika u brzini kompresijskih valova snimljenih u bušotini i modeliranih vrijednosti brzina pri svakom koraku iteracije se smanjuje. Dobiveni rezultati pokazuju da model Kuster-Toksöz s koeficijentom pora 0,1 i 0,13 ima dobru povezanost s podacima iz bušotine, osim u zoni ležišta s povećanjem volumena lapora, tj. s povećanjem volumena izoliranih pora. Primjenom modela Xu-Payne dobivena je bolja povezanost u zoni ležišta s povećanim volumenom lapora u odnosu na rezultate Kuster-Toksöz modela. Rezultati u zoni ležišta s povećanjem volumena lapora naglašavaju problem definiranja koeficijenta pora koji nije konstantan za određenu poroznost ležišne stijene. Unatoč početnim pretpostavkama, u nedostatku stvarnih podataka, kontrolirano modeliranje fizikalnih parametara bušotinskim podacima i intervalnim smičnim brzinama dobivenim vertikalnim seizmičkim profiliranjem, daje valjane i pouzdane rezultate koji su potrebni za proces seizmičke karakterizacije ležišta.

S ciljem definiranja elastičnih svojstava vapnenca u Panonskom bazenskom sustavu u ovom su radu prikazani rezultati laboratorijskih ultrazvučnih mjerenja brzine, mjerenja

poroznosti i određivanja dinamičkih elastičnih svojstava na osam uzoraka jezgre vapnenca iz dvije bušotine Grubišnog Polja u suhom i vodom zasićenom stanju. Mjerenja su izvedena s različitim vrijednostima efektivnog naprezanja za oba slučaja zasićenja. Laboratorijskim mjerenjima je utvrđen trend smanjenja brzina P- i S-valova s porastom poroznosti bez obzira na efektivno naprezanje i to u suhom i zasićenom stanju. Iako se brzine ravnomjerno smanjuju s povećanjem poroznosti, neki uzorci su pokazali raspršenje brzine s povećanjem efektivnog naprezanja. Razlog za takve oscilacije je naglo smanjenje poroznosti tijekom primjene najmanjeg efektivnog naprezanja i aktiviranje postojećeg sustava pukotina s daljnjim povećanjem efektivnog naprezanja.

Brzine P-valova suhих uzoraka su za 0,3% do 7,7% manje od brzina zasićenih uzoraka, dok su brzine S-valova zasićenih uzoraka vapnenca 0,1% do 11,6% manje od brzina suhих uzoraka. Rezultati ukazuju na ujednačen trend V_p i V_s za sve vrijednosti ograničavajućeg tlaka te su u skladu s rezultatima objavljenim radovima koji se odnose na druga područja istraživanja. Na temelju analize elastičnih svojstava vapnenaca Grubišnog Polja definiran je empirijski odnos brzina V_p i V_s , za suhe vapnenice i vapnenice zasićene slojnom vodom.

Seizmičkom inverzijom je definirana raspodjela elastičnih parametara i kvaliteta ležišnih stijena u prostoru. Rezultati svih inverzija, *pre-stack*, *post-stack* i stohastičke, omogućili su prostorno definiranje dijelova ležišta s najboljim svojstvima na poljima Grubišno Polje i Letičani.

Rezultati inverzija jasno ukazuju na složeni litološki sastav na Grubišnom Polju. Promjena litološkog sastava iz lapora u biogene vapnenice vidljiva je porastom P- i S-impedancija i padom vrijednosti omjera V_p/V_s . Karte impedancija po krovini vapnenaca ukazuju na bolja kolektorska svojstva ležišnih stijena samo u vrhovima antiklinala u prostoru oko bušotina A-1Z i A-2Z. Pored toga, karta omjera V_p/V_s , dobivena stohastičkom inverzijom, definira usku zonu oko bušotina A-1Z i A-2Z zasićenu ugljikovodicima, a koja je iskazana niskim vrijednostima omjera V_p/V_s .

Rezultati seizmičkih inverzija na polju Letičani pokazuju niže vrijednosti impedancija u dubljem dijelu ležišta, osim u prostoru oko bušotine B-5 te u prostoru oko bušotine B-7 koje su još u eksploataciji. Stohastička inverzija u prostoru oko bušotine B-9 upućuju na heterogenost kao posljedicu izmjene centimetarskih slojeva pješčenjaka i lapora.

Karte omjera V_p/V_s i Poissonovih koeficijenata kao rezultati stohastičke inverzije daju dodatnu sliku kvalitete ležišnih stijena, ali i zasićenja ugljikovodicima. Vrijednosti Poissonovih

koeficijenta u ležištu vapnenaca su u rasponu od 0,25 do 0,40, dok su u Koprivničkim pješčenjacima u rasponu od 0,28 do 0,34. Niže vrijednosti Poissonovih koeficijenta upućuju na bolja kolektorska svojstva i na zasićenje ugljikovodicima. Poissonove litološke i impedancije fluida na polju Letičani potvrđuju rezultate seizmičke inverzije. Također ukazuju da dublji intervali ležišta imaju bolja ležišna svojstva i veće zasićenje ugljikovodicima.

Novi pristup interpretaciji seizmičkih podataka na temelju seizmičkog modeliranja omogućio je određivanje kontakta plin-voda. Kontakt je određen usporedbom amplituda seizmičkog modela s amplitudama snimljenih seizmičkih podataka za različite pretpostavljene dubine.

Istraživanje je pokazalo da se seizmičkom inverzijom brzina P- i S-valova mogu odrediti fizikalni parametri ležišta koji daju geološko značenje, a potrebni su za izradu modela ležišta visoke rezolucije. Također, zbog šireg spektra frekvencija seizmičkih podataka, korištenjem modela niskih frekvencija tijekom seizmičke inverzije povećane su kvalitativne i kvantitativne mogućnosti interpretacije. Time su potvrđene postavljene hipoteze istraživanja.

Nadalje, istraživanjem je uspostavljen metodološki postupak seizmičke interpretacije ležišta ugljikovodika koji se temelji na seizmičkoj inverziji pomoću P- i S-valova. Pri tome je uspješno izvedeno modeliranje brzina S-valova na primjeru plinskog i naftnog ležišta.

Buduća istraživanja treba usmjeriti prema dodatnim laboratorijskim analizama elastičnih parametara na drugim ležištima istog litološkog sastava. Također, bušenje novih bušotina i snimanje novih bušotinskih podataka omogućilo bi revidiranje postojećih modela seizmičke inverzije i procjenu točnosti rezultata seizmičke inverzije ovog istraživanja.

15 Literatura

- Adam, L., Batzle, M., Brevik, I., 2006. Gassmann's fluid substitution and shear modulus variability in carbonates at laboratory seismic and ultrasonic frequencies. *Geophysics* 71, F173–F183. <https://doi.org/10.1190/1.2358494>
- Andričević, R., Gotovac, H., Ljubenkov, I., 2007. *Geostatistika: umijeće prostorne analize*. Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet.
- Anselmetti, F.S., Eberli, G.P., 1993. Controls on sonic velocity in carbonates. *pure Appl. Geophys.* 141, 287–323. <https://doi.org/10.1007/BF00998333>
- Anselmetti, F.S., Von Salis, G.A., Cunningham, K.J., Eberli, G.P., 1997. Acoustic properties of Neogene carbonates and siliciclastics from the subsurface of the Florida Keys: implications for seismic reflectivity. *Mar. Geol.* 144.
- Assefa, S., McCann, C., Sothcott, J., 2003. Velocities of compressional and shear waves in limestones. *Geophys. Prospect.* 51, 1–13. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.2003.00349.x>
- Avseth, P., Dvorkin, J., Mavko, G., Rykkje, J., 2000. Rock physics diagnostic of North Sea sands: Link between microstructure and seismic properties. *Geophys. Res. Lett.* 27, 2761–2764. <https://doi.org/10.1029/1999GL008468>
- Avseth, P., Mukerji, T., Mavko, G., Dvorkin, J., 2010. Rock-physics diagnostics of depositional texture, diagenetic alterations, and reservoir heterogeneity in high-porosity siliciclastic sediments and rocks — A review of selected models and suggested work flows. *Geophysics* 75, 75A31-75A47. <https://doi.org/10.1190/1.3483770>
- Bada, G., Horvath, F., Dovenyi, P., Szafian, P., Windhoffer, G., Cloetingh, S., 2007. Present-day stress field and tectonic inversion in the Pannonian basin. *Glob. Planet. Change* 58, 165–180. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.01.007>
- Baechle, G.T., Eberli, G.P., Weger, R.J., Massaferro, J.L., 2009. Changes in dynamic shear moduli of carbonate rocks with fluid substitution. *Geophysics* 74, E135–E147. <https://doi.org/10.1190/1.3111063>

- Bakhorji, A.M., 2010. Laboratory Measurements of Static and Dynamic Elastic Properties in Carbonate. Univ. Alberta. University of Alberta.
- Balázs, A., Matenco, L., Magyar, I., Horváth, F., Cloetingh, S., 2016. The link between tectonics and sedimentation in back-arc basins: New genetic constraints from the analysis of the Pannonian Basin. *Tectonics* 35, 1526–1559. <https://doi.org/10.1002/2015TC004109>
- Batzle, M., Wang, Z., 1992. Seismic properties of pore fluids. *Geophysics* 57, 1396–1408. <https://doi.org/10.1190/1.1443207>
- Becquey, M., Lavergne, M., Willm, C. 1979. Acoustic impedance logs computed from seismic traces, *GEOPHYSICS* 44: 1485-1501. <https://doi.org/10.1190/1.1441020>
- Berryman, J.G., 1980. Long-wavelength propagation in composite elastic media I. Spherical inclusions. *Journal of the Acoustical Society of America* 68, 1809–1819. <https://doi.org/10.1121/1.385171>
- Berryman, J.G., 1995. Mixture theories for rock properties, in: Ahrens, T.J. (Ed.), *Rock Physics and Phase Relations: A Handbook of Physical Constants*. American Geophysical Union (AGU), pp. 205–228. <https://doi.org/10.1029/RF003p0205>
- Biot, M.A., 1956. Theory of propagation of elastic waves in a fluid saturated porous solid. I: Low frequency range, and II: Higher frequency range. *J. Acoust. Soc. Am.* 28, 168–191.
- Bortoli, L.-J., Alabert, F., Haas, A., Journel, A., 1993. Constraining stochastic images to seismic data, in: *International Geostatistics Congress, Troia, Soares A. (Ed.), Kluwer Publications, Dordrecht, The Netherlands*. Springer, pp. 325–337.
- Bosch, M., Mukerji, T., Gonzalez, E.F., 2010. Seismic inversion for reservoir properties combining statistical rock physics and geostatistics: A review. *Geophysics* 75, 75A165-75A176. <https://doi.org/10.1190/1.3478209>
- Budiansky, B., O'connell, R.J., 1976. Elastic moduli of a cracked solid. *International Journal of Solids and Structures* 12, 81–97. [https://doi.org/10.1016/0020-7683\(76\)90044-5](https://doi.org/10.1016/0020-7683(76)90044-5)
- Buland, A., Omre, H., 2003. Bayesian linearized AVO inversion. *Geophysics* 68, 185–198. <https://doi.org/10.1190/1.1543206>

- Castagna, J.P., 1993. AVO analysis-tutorial and review. In *Offset Dependent Reflectivity – Theory and Practice of AVO Analysis*. ed. J.P. Castagna and M. Backus. Investigations in Geophysics, No. 8, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, pp. 3–36.
- Chopra, S., Castagna, J.P., 2014. *AVO*. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma, U.S.A.
- Cooke, D.A., Schneider, W.A., 1983. Generalized linear inversion of reflection seismic data. *Geophysics* 48, 665–676. <https://doi.org/10.1190/1.1441497>
- Crnjac Milić, D. i Masle, D., 2013. The Possibility of Using Monte Carlo Method in the Case of Decision-Making under Conditions of Risk Concerning an Agricultural Economics Issue. *Ekonomski vjesnik*, XXVI (1), 314-314.
- Csontos, L., Benkovics, I., Bergerat, F., Mansy, J.-L., Wórum, G., 2002. Tertiary deformation history from seismic section study and fault analysis in a former European Tethyan margin (the Mecsek-Villány area, SW Hungary). *Tectonophysics* 367, 51–71.
- Čorić, S., Pavelić, D., Roegl, F., Mandić, O., Vrabac, S., Avanic, R., Jerković, L., Vranjković, A., 2009. Revised Middle Miocene datum for initial marine flooding of North Croatian Basins (Pannonian Basin System, Central Paratethys). *Geol. Croat.* 62, 31–43.
- Das, B., M., 2002. *Advanced Soil Mechanics*, 3. izdanje. ed. Taylor & Francis.
- Dragičević, N., 1974. *Geološki izvještaj duboke istražne bušotine Letičani-1 (Le-1)*, Fond stručne dokumentacije, INA, Zagreb
- Dvorkin, J.P., Nur, A.M., 1996. Elasticity of high-porosity sandstones: Theory for two North Sea datasets. *SEG Annu. Meet.* 61, 890–893. <https://doi.org/10.1190/1.1444059>
- Ellis, D. V., & Singer, J. M., 2007. *Well Logging for Earth Scientists* (2nd ed.). Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4602-5>
- Fodor, L., Bada, G., Csillag, G., Horvath, E., Ruzkiczay-Rudiger, Z., Palotas, K., Sikhegyi, F., Timar, G., Cloetingh, S., Horvath, F., 2005. An outline of neotectonic structures and morphotectonics of the western and central Pannonian Basin. *Tectonophysics* 410, 15–41. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2005.06.008>
- Francis, A., 2006a. Understanding stochastic inversion: Part 1. *First Break* 24, 69–77.

- Francis, A., 2005. Limitations of deterministic and advantages of stochastic seismic inversion. CSEG Rec. 30, 5–11.
- Francis, A., 2006b. Understanding Stochastic Seismic Inversion: part 2. First Break 24. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2006028>
- Francis, A., Syed, H. 2001. Application of Relative Acoustic Impedance Inversion to Constrain Extent of E and Reservoir on Kadanwari Field. SPE & PAPG Annual Technical Conference, Islamabad, Pakistan.
- Futivić, I., Vican, K., Perić, M., Škrnjug, M., 2006. Elaborat o rezervama prirodnog plina istražnog prostora "Drava"; Plinsko polje Grubišno Polje, Fond stručne dokumentacije, INA, Zagreb
- Galović, I. i Marković, S., 1979. Osnovna geološka karta SFRJ, list Virovitica
- Gassmann, F., 1951. Elastic waves through a packing of spheres. Geophysics 16, 673–685.
- Gegenhuber, N. 2015., Application of Gassmann's equation for laboratory data from carbonates from Austria. Austrian, J. Earth Sci. 108, 239–244, <https://doi.org/10.17738/AJES.2015.0024>.
- Gegenhuber, N., Pupos, J., 2015. Rock physics template from laboratory data for carbonates. J. Appl. Geophys. 114, 12–18. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2015.01.005>
- Greenberg, M.L. and Castagna, J.P., 1992. Shear-wave velocity estimation in porous rocks: theoretical formulation, preliminary verification and applications. Geophys. Prospect., 40, 195–209.
- Gupta, H. K., 2011. Encyclopedia of Solid Earth Geophysics (H. K. Gupta (ed.); 1st ed.). Springer Netherlands. <http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-8702-7>
- Haas, A., Dubrule, O., 1994. Geostatistical inversion - a sequential method of stochastic reservoir modelling constrained by seismic data. First Break 12, 561–569.
- Hampson, D., Russell, B., Bankhead, B., 2005. Simultaneous inversion of pre-stack seismic data. Soc. Explor. Geophys. - 75th SEG Int. Expo. Annu. Meet. SEG 2005 1633–1637. <https://doi.org/10.1190/1.2148008>

- Hampson, D., Schuelke, J., Quirein, J., 2001. Use of multiattribute transforms to predict log properties from seismic data. *Geophysics* 66, 220–236. <https://doi.org/10.1190/1.1444899>
- Hampson, D.P., Russell, B.H., Bankhead, B., 2005. Simultaneous inversion of pre-stack seismic data, in: *Society of Exploration Geophysicists - 75th SEG International Exposition and Annual Meeting, SEG 2005*. pp. 1633–1637.
- Havidić, J., 2018. Final report of 3D seismic data processing Letičani-Bilogora-Šandrovac 3D, Fond stručne dokumentacije, INA, Zagreb.
- Hećimović, I., 1986. Osnovna geološka karta SFRJ, list Đurđevac
- Hill, R., 1952. The elastic behaviour of a crystalline aggregate. *Proceedings of the Physical Society of London*, A65, 349-354. <https://doi.org/10.1088/0370-1298/65/5/307>
- Horváth, F., 1993. Towards a mechanical model for the formation of the Pannonian basin. *Tectonophysics* 226, 333–357. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90126-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90126-5)
- Horváth, F., 1995. Phases of compression during the evolution of the Pannonian Basin and its bearing on hydrocarbon exploration. *Mar. Pet. Geol.* 12, 837–844. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(95\)98851-U](https://doi.org/10.1016/0264-8172(95)98851-U)
- Horváth, F., Bada, G., Szafián, P., Tari, G., Ádám, A., Cloetingh, S., 2006. Formation and deformation of the Pannonian Basin: constraints from observational data. *Geol. Soc. London, Mem.* 32, 191 LP – 206. <https://doi.org/10.1144/GSL.MEM.2006.032.01.11>
- Horvath, F., Cloetingh, S., 1996. Stress-induced late-stage subsidence anomalies in the Pannonian basin. *TECTONOPHYSICS* 266, 287–300. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(96\)00194-1](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(96)00194-1)
- Horváth, F., Dulić, I., Vranković, A., Koroknai, B., Tóth, T., Wórum, G., & Kovács, G., 2018. Overview of geologic evolution and hydrocarbon generation of the Pannonian Basin. *Interpretation*, 6(1), SB111–SB122. doi:10.1190/int-2017-0100.1
- Hudson, J.A., 1981. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 64, 133–150. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1981.tb02662.x>

- INA, Odjel za ispitivanje stijena 1981. Završni geološki izvještaj istražne bušotine Letičani-5, Fond stručne dokumentacije, INA, Zagreb
- Jamičić, D. i Brkić, M. 1987. Osnovna geološka karta SFRJ, list Orahovica.
- Jović, G., Budanović, Z., 2018. Završni izvještaj o reobradi 3D seizmičkih podataka na polju Grubišno Polje, Fond stručne dokumentacije, INA, Zagreb.
- Khazanehdari, J., Sothcott, J., 2003. Variation in dynamic elastic shear modulus of sandstone upon fluid saturation and substitution. *Geophysics* 68, 472–481. <https://doi.org/10.1190/1.1567213>
- King, M. S., 2005. Rock-physics developments in seismic exploration: A personal 50-year perspective. *Geophysics*, 70(6), 3–8. <https://doi.org/10.1190/1.2107947>
- Klinkenberg, L. J.: 1941. The permeability of porous media to liquids and gases, *Drilling and Production Practice*, American Petroleum Inst., 200–213.
- Korolija, B. i Crnko, J. 1985. Osnovna geološka karta SFRJ, list Bjelovar
- Kováč, M., Andreyeva-Grigorovich, A., Bajraktarevic, Z., Brzobohaty, R., Filipescu, S., Fodor, L., Harzhauser, M., Nagymarosy, A., Oszczytko, N., Pavelić, D., Roegl, F., Saftić, B., Sliva, L., Studencka, B., 2007. Badenian evolution of the Central Paratethys Sea: paleogeography, climate and eustatic sea-level changes. *Geol. Carpathica* 58, 579–606.
- Krpan, B., Pleić, M., Bigunac, D., Matković, M., Krizmanić, K., Mavar, A., Sulaiman, W., Perica, R., Mišur, A., 2018. Regionalna studija za istražni prostor DR-02, Fond stručne dokumentacije, INA, Zagreb
- Kuster, G.T., Toksöz, M.N., 1974. Velocity and attenuation of seismic waves in two-phase media - 1, 2. *Geophysics* 39, 587–618. <https://doi.org/10.1190/1.1440450>
- Lavergne, M., 1975. Pseudo-diagraphies de Vitesse en off- shore profond. *Geophys. Prospect.* 23, 695–711.
- Lavergne, M.; Willm, C., 1977. Inversion of Seismograms and Pseudo Velocity Logs. *Geophys. Prospect.* 25, 231–250. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1977.tb01165.x>
- Lindseth, R.O., 1976. Seislog process uses seismic reflection traces. *Oil Gas J.* 74, 67–71.

- Lindseth, R.O., 1979. Approximation of acoustic logs from seismic traces: *J. Can. Well logging Soc.*, 5, 13–26. *J. Can. Well logging Soc. Abstract Web of Science Google Scholar*, pp.3-26.
- Malvić, T. 2003. Naftnogeološki odnosi i vjerojatnost pronalaska novih zaliha ugljikovodika u bjelovarskoj uleknini, doktorska disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
- Malvić, T. i Cvetković, M. 2013. Lithostratigraphic units in the Drava Depression (Croatian and Hungarian parts) – a correlation. *Nafta*, 64 (1), 27-33. Preuzeto s <https://hrcak.srce.hr/107156>, 26.10.2021.
- Malvić, T., Cvetković, M., 2009. Neuronski alati u geologiji ležišta ugljikovodika. Hrvatsko geološko društvo (Geomat. odsjek), Sveučilište u Zagrebu.
- Mandić, O., Kurečić, T., Neubauer, T.A., Harzhauser, M., 2015. Stratigraphic and palaeogeographic significance of lacustrine molluscs from the Pliocene *Viviparus* beds in central Croatia. *Geol. Croat.* 68, 179–207. <https://doi.org/10.4154/gc.2015.15>
- Marković, S. 1985. Osnovna geološka karta SFRJ, list Podravska Slatina.
- Marton, E., Pavelić, D., Tomljenović, B., Avanić, R., Pamić, J., & Marton, P. 2002. In the wake of a counterclockwise rotating Adriatic microplate: Neogene paleomagnetic results from northern Croatia. *International Journal Of Earth Sciences*, 91(3), 514–523. <https://doi.org/10.1007/s00531-001-0249-4>
- Matoš, B., 2014. Neotectonic and recently active faults in bilogora mountain area and assessment of their seismogenic potential. University of Zagreb.
- Matoš, B., Pérez-Peña, J.V., Tomljenović, B., 2016. Landscape response to recent tectonic deformation in the SW Pannonian Basin: Evidence from DEM-based morphometric analysis of the Bilogora Mt. area, NE Croatia. *Geomorphology* 263, 132–155. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.03.020>
- Matošević, M., Krizmanić, K., Španić, D., Perković, A., 2017. Petrofizikalne, mineraloško-petrografske, sedimentološke, SEM i geokemijske analize odabranih jezgara iz bušotina Grubišno Polje-1 Zapad (GR-1Z) i Grubišno Polje-2 Zapada (GR-2Z). Fond stručne dokumentacije, INA, Zagreb

- Mavko, Gary, Mukerji, T., Dvorkin, J., 2009. References, 2nd ed, The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic Analysis of Porous Media. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626753>
- Nur, A., Marion, D., Yin, H., 1991. Wave velocities in sediments. *Shear Waves Mar. Sediments* 131–140.
- Ødegaard, E., Avseth, P., 2004. Well log and seismic data analysis using rock physics templates. *First Break* 22, 37–43. <https://doi.org/10.3997/1365-2397.2004017>
- Pavelić, D., 2001. Tectonostratigraphic model for the North Croatian and North Bosnian sector of the Miocene Pannonian Basin System. *Basin Res.* 13, 359–376. <https://doi.org/10.1046/j.0950-091x.2001.00155.x>
- Pavelić, D., Kovačić, M., 2018. Sedimentology and stratigraphy of the Neogene rift-type North Croatian Basin (Pannonian Basin System, Croatia): A review. *Mar. Pet. Geol.* 91, 455–469. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.01.026>
- Pavelić, D., Kovačić, M., Banak, A., Jimenez-Moreno, G., Marković, F., Pikelj, K., Vranjkovic, A., Premuzak, L., Tibljaš, D., Belak, M., 2016. Early Miocene European loess: A new record of aridity in southern Europe. *Geol. Soc. Am. Bull.* 128, 110–121. <https://doi.org/10.1130/B31280.1>
- Pikija, M., 1987. Osnovna geološka karta SFRJ, list Sisak
- Prelogović, E., Saftić, B., Kuk, V., Velić, J., Dragaš, M., Lučić, D., 1998. Tectonic activity in the Croatian part of the Pannonian basin. *Tectonophysics* 297, 283–293. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00173-5](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00173-5)
- Prskalo, S., 2005. Istraživanje ugljikovodika seizmičkim metodama, II. dio, INA – Industrija nafte d.d., Zagreb
- Quakenbush, M., Shang, B., Tuttle, C., 2006. Poisson impedance. *Leading Edge* 25, 128–138. <https://doi.org/10.1190/1.2172301>
- Rafavich, F., Kendall, C.H.S.C., Todd, T.P., 1984. The relationship between acoustic properties and the petrographic character of carbonate rocks. *Geophysics* 49, 1622–1636. <https://doi.org/10.1190/1.1441570>

- Ratschbacher, L., Frisch, W., Linzer, H.-G., Merl, O., 1991. Lateral extrusion in the eastern alps, Part 2: Structural analysis. *Tectonic* 10, 257–271.
- Regnet, J.B.; Robion, P.; David, C.; Fortin, J.; Brigaud, B.; Yven, B. 2015. Acoustic and reservoir properties of microporous carbonate rocks: Implication of micrite particle size and morphology. *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 120, 790–811, doi:10.1002/2014JB011313.
- Reuss, A., 1929. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift Für Angewandte Mathematik Und Mechanik*, 9(1), 49–58. <https://doi.org/10.1002/zamm.19290090104>
- Rowbotham, P.S., Marion, D., Lamy, P., Insalaco, E., Swaby, P.A., Boisseau, Y., 2003. Multidisciplinary stochastic impedance inversion: Integrating geological understanding and capturing reservoir uncertainty. *Pet. Geosci.* 9, 287–294. <https://doi.org/10.1144/1354-079302-490>
- Royden, L. H. 1993. Evolution of retreating subduction boundaries formed during continental collision, *Tectonics*, 12(3), 629– 638, doi:10.1029/92TC02641.
- Royden, L., Burchfiel, B.C., 1989. Are Systematic Variations In Thrust Belt Style Related To Plate Boundary Processes? (The Western Alps Versus The Carpathians). *Tectonic* 8, 51–61.
- Royden, L., Horváth, F., Nagymarosy, A., 1983b. Evolution of the Pannonian Basin System 2. Subsidence and Thermal History. *Tectonics* 2, 91–137. <https://doi.org/10.1029/TC002i001p00091>
- Royden, L., Horváth, F., Rumpler, J., 1983a. Evolution of Pannonian Basin System 1. *Tectonics*. *Tectonics* 2, 63–90. <https://doi.org/10.1029/TC002i001p00063>
- Royden, L.H., Horváth, F., 1988. The Pannonian Basin. A study in basin evolution, AAPG Memoir. American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/M45474>
- Russell, B., Hampson, D., 1991. Comparison of poststack seismic inversion methods, in: 1991 SEG Annual Meeting. pp. 876–878.
- Russell, B., Hampson, D., Bankhead, B., 2006. An inversion primer. *CSEG Rec.* 31, 96–103.

- Saftić, B., Velić, J., Sztanó, O., Juhász, G., Ivković, Ž., 2003. Tertiary subsurface facies, source rocks and hydrocarbon reservoirs in the SW part of the Pannonian Basin (Northern Croatia and south-western Hungary). *Geol. Croat.* 56, 101–122. <https://doi.org/10.4154/232>
- Sams, M., Saussus, D., 2010. Comparison of lithology and net pay uncertainty between deterministic and geostatistical inversion workflows. *First Break* 28.
- Sayers, C.M., 2008. The elastic properties of carbonates. *Lead. Edge (Tulsa, OK)* 27, 1020–1024. <https://doi.org/10.1190/1.2967555>
- Schmid, S.M., Bernoulli, D., Fügenschuh, B., Matenco, L., Schefer, S., Schuster, R., Tischler, M., Ustaszewski, K., 2008. The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: Correlation and evolution of tectonic units. *Swiss J. Geosci.* 101, 139–183. <https://doi.org/10.1007/s00015-008-1247-3>
- Schmid, S.M., Fügenschuh, B., Kissling, E., Schuster, R., 2004. Tectonic map and overall architecture of the Alpine orogen. *Eclogae Geol. Helv.* 97, 93–117. <https://doi.org/10.1007/s00015-004-1113-x>
- Schön, J., 2015. *Physical Properties of Rocks*, Volume 65, 2nd Edition, Elsevier, 512 str
- Sebe, K., Kovačić, M., Magyar, I., Krizmanić, K., Špelić, M., Bigunac, D., Sütő-Szentai, M., Kovács, Szüromi-Korecz, A., Bakrač, K., Hajek-Tadesse, V., Troškot-Čorbić, T., Sztanó, O., 2020. Correlation of upper miocene-pliocene lake pannon deposits across the Drava basin, Croatia and Hungary. *Geol. Croat.* 73, 177–195. <https://doi.org/10.4154/gc.2020.12>
- Sharma, R. K., Chopra, S., 2013. Poisson impedance inversion for characterization of sandstone reservoirs. *CSEG Rec.* 32. <https://doi.org/10.1190/segam2013-0181.1>
- Sheriff, R. E., 2002. *Encyclopedic dictionary of applied geophysics*. Geophysical references series 13 (4th ed.). SEG - Society of Exploration Geophysicist, ISBN 978-1-56080-118-4.
- Simmons, J.L., Backus, M.M., 1994. AVO modeling and the locally converted shear wave. *Geophysics* 59, 1237–1248.

- Šćavničar, S., Bermanec, V., Kniewald, G., Barišić, D., & Oreščanin, V. 2007. Uranium minerals in the radlovac series metasediments at Mt. Papuk, Croatia. *Geologia Croatica*, 60(2), 165–171. <https://doi.org/10.4154/GC.2007.05>
- Šimon, J. 1973. O nekim rezultatima regionalne korelacije litostratigrafskih jedinica u jugozapadnom području Panonskog bazna. *Nafta*. (12), 623–630.
- Šimunić, A., Hećimović, I. i Avanić, R., 1994. Osnovna geološka karta SFRJ, list Koprivnica
- Šumanovac, F., Dudjak, D., 2016. Descending lithosphere slab beneath the Northwest Dinarides from teleseismic tomography. *J. Geodyn.* 102, 171–184. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2016.09.007>
- Šumanovac, F., Markušić, S., Engelsfeld, T., Jurković, K., Orešković, J., 2017. Shallow and deep lithosphere slabs beneath the Dinarides from teleseismic tomography as the result of the Adriatic lithosphere downwelling. *Tectonophysics* 712, 523–541. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.06.018>
- Taner, M. T., Koehler, F., & Sheriff, R. E., 1979. Complex seismic trace analysis. *Geophysics*, 44(6), 1041–1063. <https://doi.org/10.1190/1.1440994>
- Tari, G., Dövényi, P., Dunkl, I., Horváth, F., Lenkey, L., Stefanescu, M., Szafián, P., Tóth, T., 1999. Lithospheric structure of the Pannonian basin derived from seismic, gravity and geothermal data. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 156, 215–250. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.156.01.12>
- Tari, G., Horváth, F., Rumpler, J., 1992. Styles of extension in the Pannonian Basin. *Tectonophysics* 208, 203–219. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(92\)90345-7](https://doi.org/10.1016/0040-1951(92)90345-7)
- Tari, V., Pamić, J., 1998. Geodynamic evolution of the northern Dinarides and the southern part of the Pannonian basin. *Tectonophysics* 297, 269–281. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(98\)00172-3](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(98)00172-3)
- Tian, L., Zhou, D., Lin, G., Jiang, L., 2010. Reservoir prediction using poisson impedance in Qinhuangdao, Bohai Sea, in: Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 80th Annual Meeting 2010, SEG 2010. Society of Exploration Geophysicists - SEG, pp. 2261–2264. <https://doi.org/10.1190/1.3513300>

- 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 Sci.* 90, 560–578. <https://doi.org/10.1007/s005310000176>
- Torres-Verdín, C., Victoria, M., Merletti, G., Pendrel, J., 1999. Trace-based and geostatistical inversion of 3-D seismic data for thin-sand delineation: an application in San Jorge Basin, Argentina. *Lead. Edge (Tulsa, OK)* 18, 1070–1077. <https://doi.org/10.1190/1.1438434>
- Troglić, S., 1994. Rezultati geološkog praćenja istražne bušotine Grubišno Polje-1 Zapad (Gr-1 Z). Fond stručne dokumentacije, INA, Zagreb.
- Ustaszewski, K., Herak, M., Tomljenović, B., Herak, D., Matej, S., 2014. Neotectonics of the Dinarides–Pannonian Basin transition and possible earthquake sources in the Banja Luka epicentral area. *J. Geodyn.* 82, 52–68. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2014.04.006>
- Ustaszewski, K., Kounov, A., Schmid, S.M., Schaltegger, U., Krenn, E., Frank, W., Fuegenschuh, B., 2010. Evolution of the Adria-Europe plate boundary in the northern Dinarides: From continent-continent collision to back-arc extension. *Tectonics* 29. <https://doi.org/10.1029/2010TC002668>
- van Bemmelen, P. i Pepper, R. E. F., 2000. Seismic signal processing method and apparatus for generating a cube of variance values, U.S. Patent Number 6151555
- Varela, O. J., Torres-Verdin, C., Sen, M.K., 2003. Joint stochastic inversion of pre-stack seismic data and well logs for high-resolution reservoir delineation and improved production forecast, in: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2003*. Society of Exploration Geophysicists, pp. 1509–1512.
- Vedriš, D. & Havičić, J., 2018. Završni izvještaj vertikalno seizmičko profiliranje Letičani-9 (Le-9) Fond stručne dokumentacije, INA, Zagreb.
- Vedriš, D., 2012. Modeliranje vertikalnog seizmičkog profiliranja (VSP) na Grubišnom Polju. Fond stručne dokumentacije, INA, Zagreb.
- Velić, J., Tišljarić, J., Dragičević, I., & Blašković, I., 2000. Shoreline cross-bedded biocalcarenes (Middle Miocene) in the Podvrško-Šnjegavić Area, Mt Psunj, and their petroleum significance (Požega Subdepression - Eastern Croatia). *Geologia Croatica*, 53(2), 281–293. <https://doi.org/10.4154/GC.2000.05>
- Voigt, W., 1928. *Lehrbuch der Kristallphysik*. BG Teubner Leipzig und Berlin.

- Vrbanac, B., 1990. Osnove teorijske i praktične spoznaje vezane za otkrivanje ugljikovodika u toku bušenja. Fond stručne dokumentacije, INA, Zagreb.
- Vrbanac, B., Velić, J., Malvić, T., 2010. Sedimentation of deep-water turbidites in the SW part of the Pannonian Basin. *Geol. Carpathica* 61, 55–69. <https://doi.org/10.2478/v10096-010-0001-8>
- Vrsaljko, D., 1999. The Pannonian Palaeoecology and Biostratigraphy of Molluscs from Kostanjek - Medvednica Mt., Croatia. *Geol. Croat.* 52/1, 9–27.
- Vrsaljko, D., Pavelić, D., Bajraktarević, Z., 2005. Stratigraphy and Palaeogeography of Miocene Deposits from the Marginal Area of Zumberak Mt. and the Samoborsko Gorje Mts. (Northwestern Croatia). *Geol. Croat.* 58/2, 133–150.
- Vrsaljko, D., Sremac, J., 1999. New Congerian Species and Their Similarity with *Congerina banatica* from the Pannonian Sediments in Northern Croatia. *Geol. Croat.* 52/2, 99–108.
- Vukadin, D., Vulama, I., Kovačević, S., Kranjčević, I., Dudaš, N., 2021. Ležišna studija Polja Letičani. Fond stručne dokumentacije, INA, Zagreb.
- Vukadinović, M., 1996. Završni geološki izvještaj za istražnu bušotinu Grubišno Polje-1 Zapad (Gr-1Z). Fond stručne dokumentacije, INA, Zagreb.
- Vulama, I. 2019. Analiza ukupnog organskog ugljika i volumena gline u in situ sistemima Panonskog bazena i Jadrana primjenom suvremenih petrofizikalno-karotažnih programa. *Nafta i Plin*, 39(157), 34–60. <https://doi.org/https://hrcak.srce.hr/218690>
- Wagner, S.R., Pennington, W.D., MacBeth, C., 2006. Gas saturation prediction and effect of low frequencies on acoustic impedance images at Foinaven Field. *Geophys. Prospect.* 54, 75–87. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.2006.00517.x>
- Wang, Z., 1997. Seismic properties of carbonate rocks, in: Palaz, I., Marfurt, K.J. (Eds.), *Carbonate Seismology*. Society of Exploration Geophysicists, pp. 29–52.
- Wei, X., Jiang, X., Booth, D., Liu, Y., 2006 The inversion of seismic velocity using a partial-offset stack with well-log constraints. *Journal of Geophysics And Engineering* 3 (2006) 50-58.
- White, R. i Simm, R., 2003. Tutorial: Good practice in well ties. *First Break*, 21(10), 75–83.

- White, R., Simm, R., i Xu, S., 1998. Well tie, fluid substitution and AVO modelling: a North Sea example. *Geophysical Prospecting*, 46(3), 323–346. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2478.1998.00094.x>
- Wood, A.B., 1955. *A textbook of sound: being an account of the physics of vibrations with special reference to recent theoretical and technical developments [3rd rev. ed.]*, 3rd ed. The Macmillan company[1st ed.]; G. Bell [3rd ed.], New York.
- Woodward, M. J., Nichols, D., Zdraveva, O., Whitfield, P., i Johns, T. 2008. A decade of tomography. *Geophysics*, 73(5). <https://doi.org/10.1190/1.2969907>
- Wyllie, M. R. J., Gardner, G. H. F., and Gregory, A.R., 1963. Studies of elastic wave attenuation in porous media. *Geophys.*, 27, 569–589.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A.R., and Gardner, G. H. F., 1958. An experimental investigation of factors affecting elastic wave velocities in porous media. *Geophys.*, 23, 459–493.
- Wyllie, M. R. J., Gregory, A.R., and Gardner, L.W., 1956. Elastic wave velocities in heterogeneous and porous media. *Geophys.*, 21, 41–70.
- Xu, S., Payne, M.A., 2009. Modeling elastic properties in carbonate rocks. *Lead. Edge* 28, 98–108. <https://doi.org/10.1190/1.3064148>
- Xu, S., White, R.E., 1995. A new velocity model for clay-sand mixtures. *Geophys. Prospect.* 43, 91–118. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1995.tb00126.x>
- Xu, Y., 2012. *Rock physics and seismic methods for characterizing the heterogeneity of oil sands reservoirs in the Western Canadian Sedimentary Basin*. University of Calgary.
- Yang, Y., Yin, X., Gao, G., Gui, Z., Zhao, B., 2019 Shear-wave velocity estimation for calciferous sandy shale formation. *J. Geophys. Eng.* 16, 105–115. <https://doi.org/10.1093/jge/gxy009>
- Zabihi Naeini, E., Gunning, J., White, R., 2017 Well tie for broadband seismic data. *Geophysical Prospecting* 65, 503–522.
- Zhao, L.; Nasser, M.; Han, D. H. 2013, Quantitative geophysical pore-type characterization and its geological implication in carbonate reservoirs. *Geophys. Prospect.* 61, 827–841, <https://doi.org/10.1111/1365-2478.12043>.

Zoeppritz, K., 1919. Über Reflexion und Durchgang seismischer Wellen durch Unstetigkeitsflächen [On the reflection and transmission of seismic waves at surfaces of discontinuity]. Gottinger Nachrichten 1, 66–84.

Životopis

Domagoj Vukadin rođen je 10. kolovoza 1989. godine u Livnu, Bosna i Hercegovina. Osnovnu i srednju školu pohađao je u Livnu, a maturirao je u Gimnaziji Livno 2008. godine. Iste godine upisao je studij geologije na Rudarsko-geološko-naftnom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

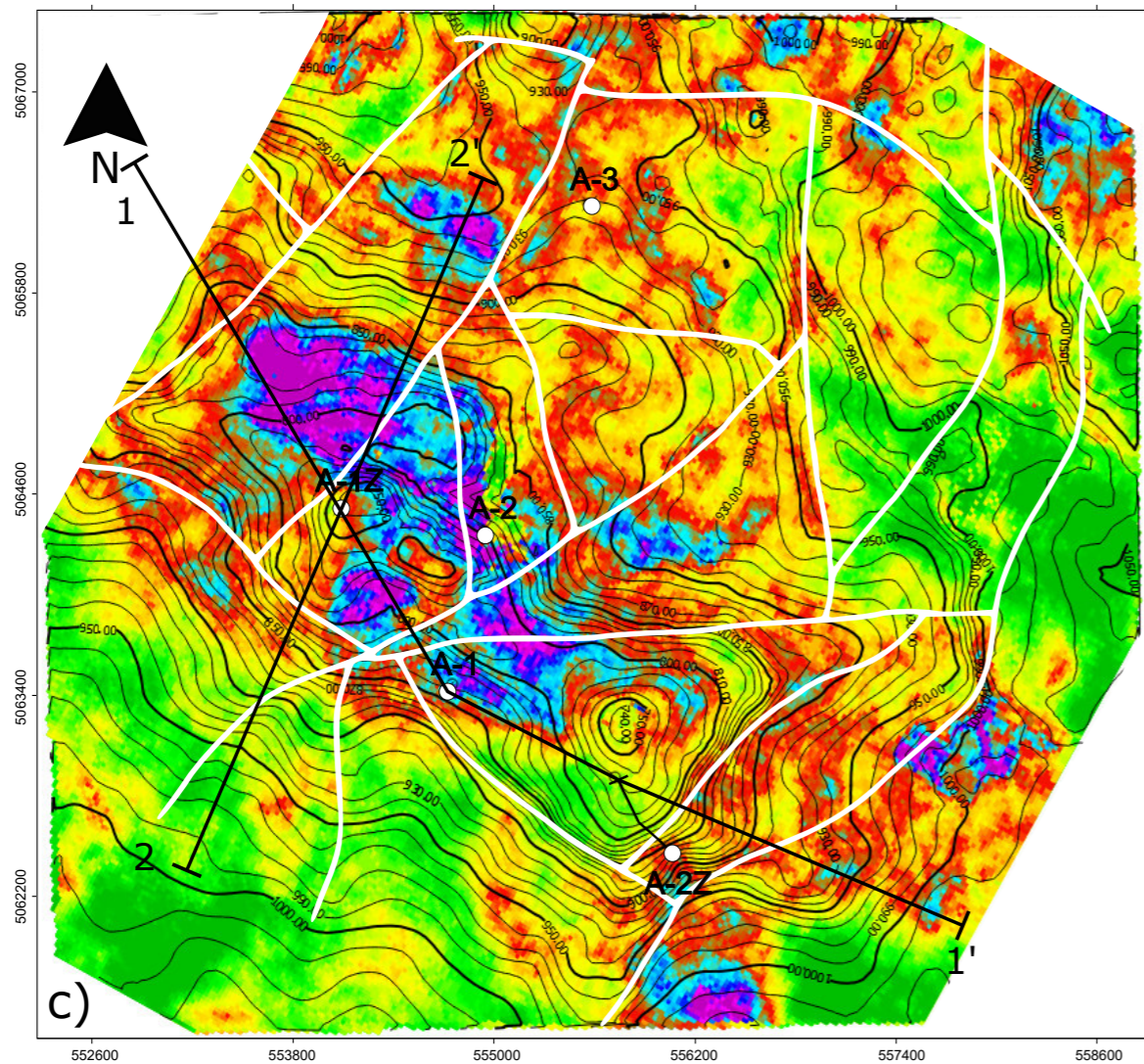
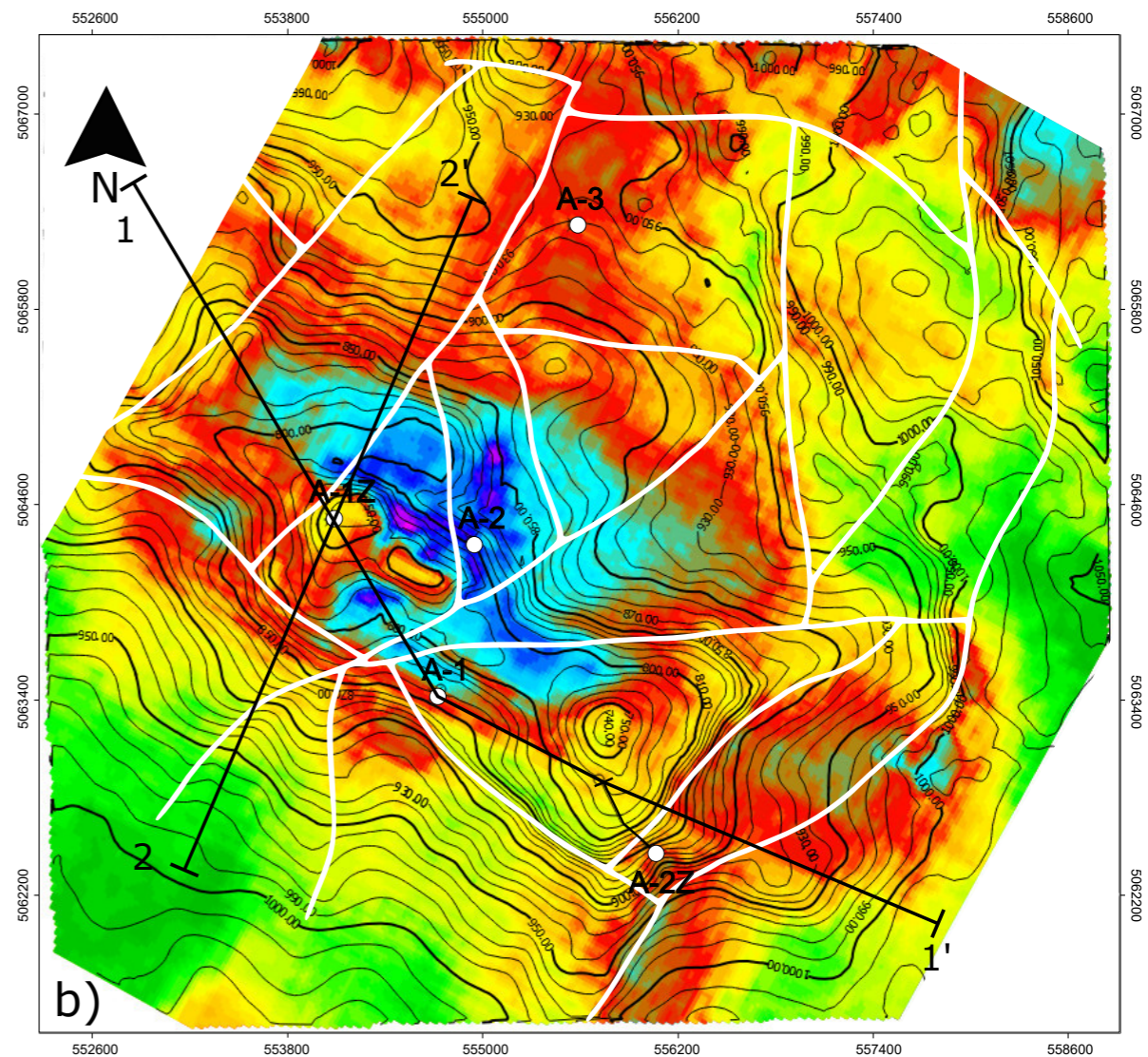
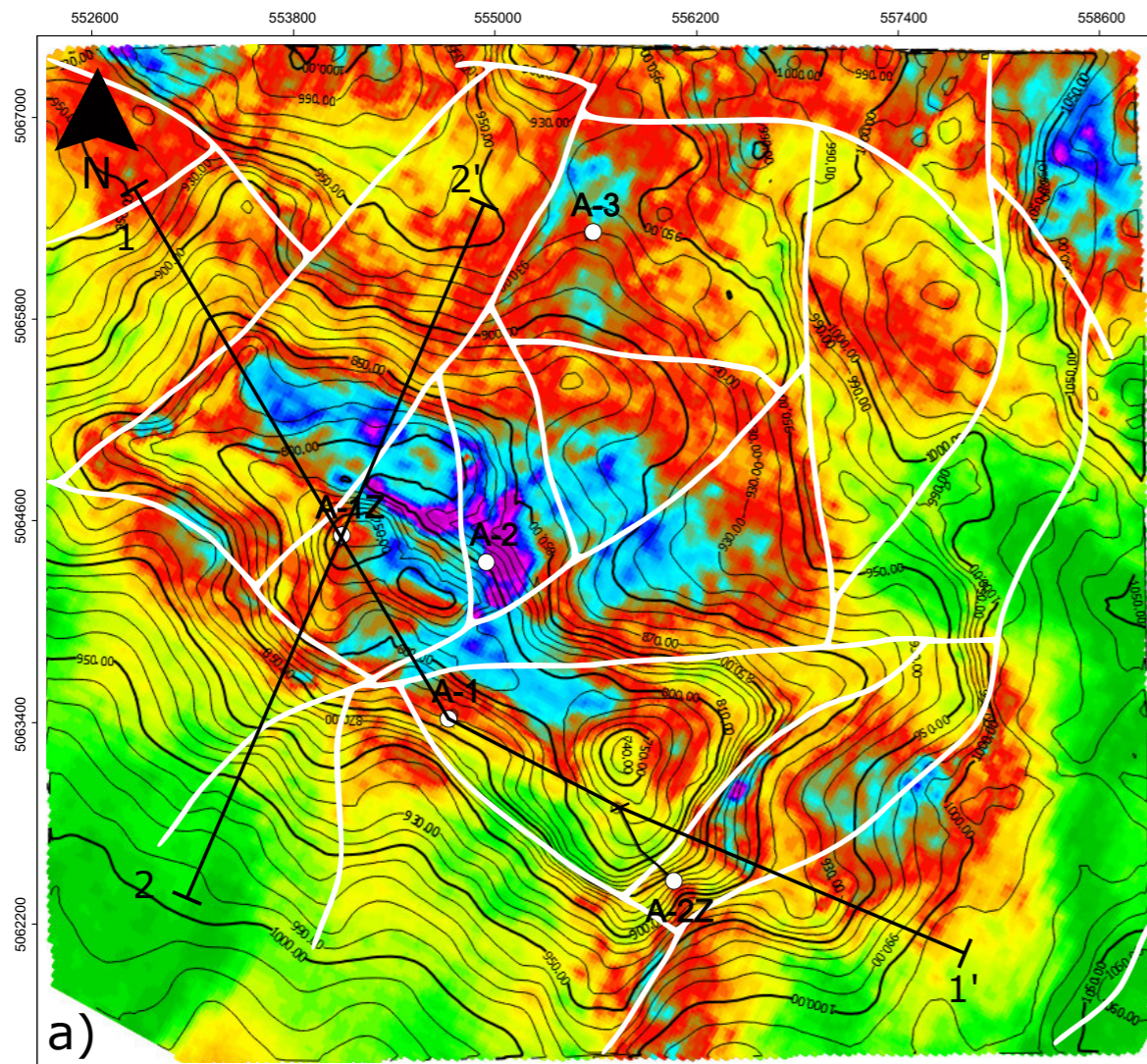
Preddiplomski studij geologije završio je 2011. godine s temom završnog rada „Strukturna interpretacija seizmičkih podataka središnjeg dijela Dravske depresije“ pod mentorstvom prof. dr. sc. Brune Tomljenovića. Diplomirao je Geološko inženjerstvo, smjer Hidrogeologija i inženjerska geologija 2013. godine s temom diplomskog rada „Strukturna analiza neotektonske aktivnosti u zapadnom dijelu Savske depresije“ pod mentorstvom prof. dr. sc. Brune Tomljenovića. Tijekom studija nagrađen je s pet Dekanovih nagrada za uspješne studente i dobitnik je stipendije Sveučilišta u Zagrebu za uspješne studente za ak. god. 2011./2012. i 2012./2013.

Od 2013. godine zaposlen je u INA d.d., Razradi polja i podzemlja. Bavi se seizmičkom interpretacijom, strukturno-tektonskim analizama i geofizičkim modeliranjem. Sudjelovao je u više desetaka projekata i stručnih studija na eksploatacijskim poljima u Panonskom bazenu i na Jadranu. Izlagao je na domaćim i međunarodnim stručnim i znanstvenim kongresima te se usavršavao na specijalističkim tečajevima iz područja geofizike i strukturne geologije. Član je Hrvatskog geološkog društva (HGD), Američkog udruženja naftnih geologa (AAPG) i Europskog udruženja geoznanstvenika i inženjera (EAGE).

Popis objavljenih radova

- Vukadin, Domagoj; Orešković, Jasna; Kutasi, Csaba. 2021. Elastic Properties of Pannonian Basin Limestone under Different Saturation Conditions; *Energies* 14, no. 21: 7291. <https://doi.org/10.3390/en14217291>
- Vukadin, Domagoj; Babić Puntarec, Tamara; Marić Đureković, Željka; Jakupec, Ema; Čikeš, Kristina. 2019. Integrated petrophysical and seismic analysis in the facies modeling - case study; 81st EAGE Annual Conference & Exhibition, London, UK (Znanstveni skupovi i radionice, Usmeno)
- Vukadin, Domagoj; Čikeš, Kristina. 2017. Using seismic inversion and seismic stratigraphy as a combined tool for understanding a small scale turbidite systems: Gola field, Pannonian basin, Croatia; AAPG / SEG 2017 International Conference & Exhibition, London (Znanstveni skupovi i radionice, Poster)
- Vukadin, Domagoj; Brnada, Stipica. 2015. Acoustic impedance inversion analysis: Croatia offshore and onshore case studies; SPE Conference – Hungarian Section, Visegrád, Hungary (Tehnički skupovi i radionice, Usmeno)

Prilozi



Legenda

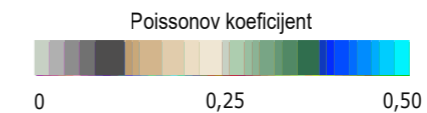
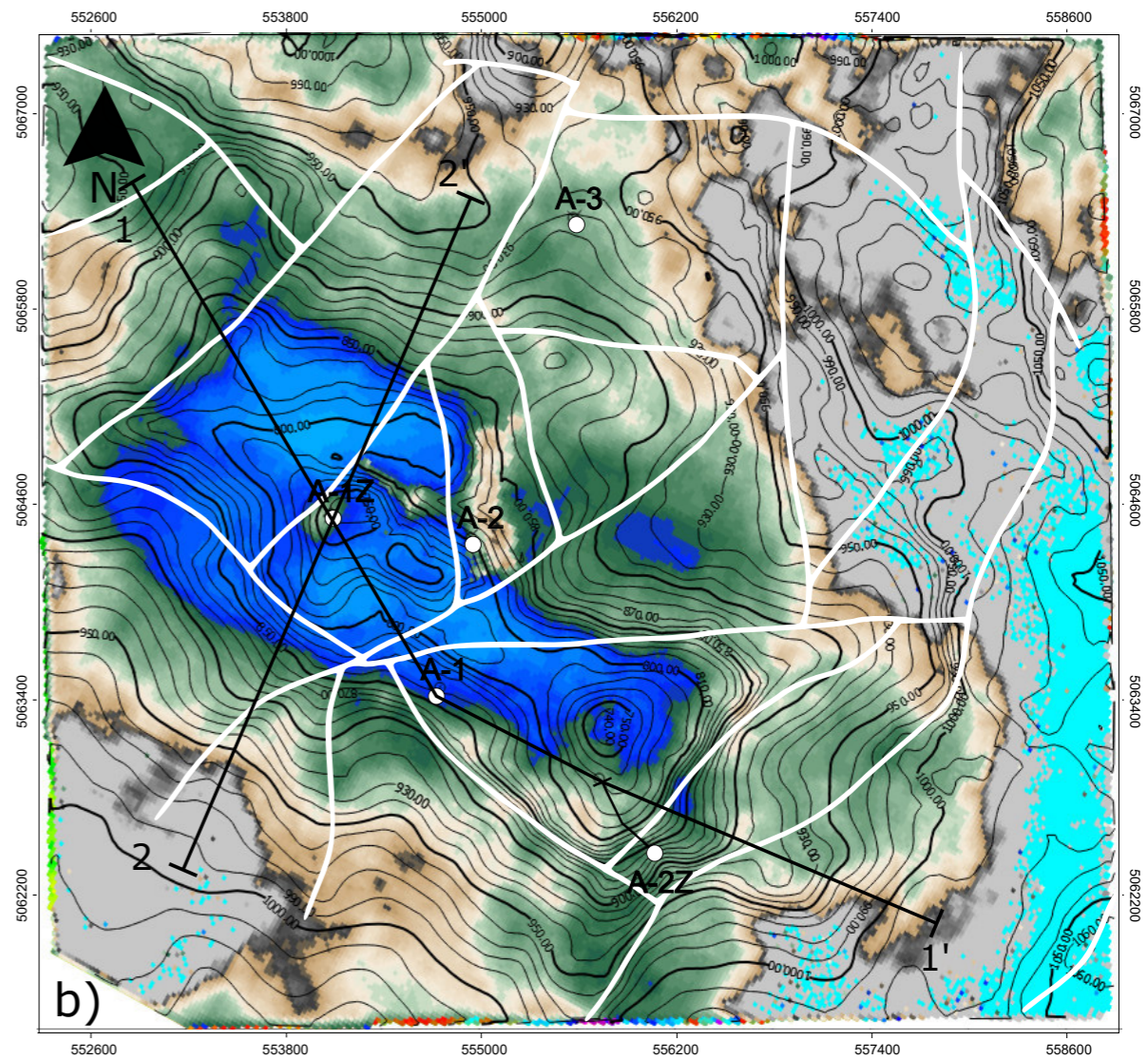
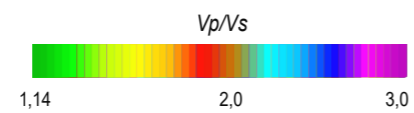
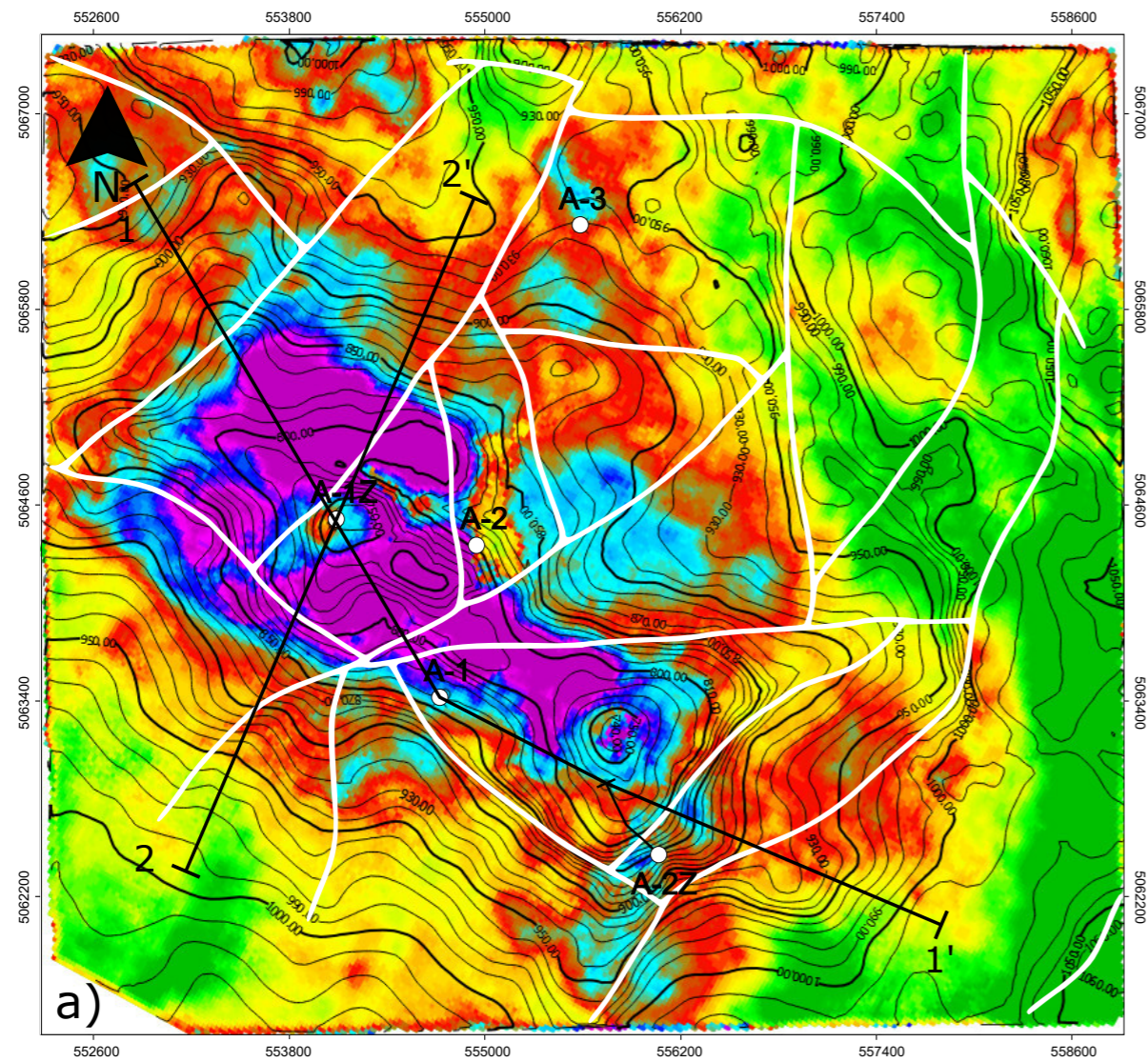
- A-1 Bušotina
- A-2Z Usmjerena bušotina
- Izobata (m)
- Rasjed
- Profil








Sveučilište u Zagrebu
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Prilog 1: Karta rezultata P-impedancija seizmičkih inverzija krovine vapnenaca Grubišnog Polja: (a) *post-stack*, (b) *pre-stack* i (c) stohastička inverzija P50

Doktorski rad: **Razvoj postupka seizmičke interpretacije ležišta ugljikovodika Bjelovarske depresije na temelju inverzije seizmičkih brzina**
 Autor: Domagoj Vukadin, mag. ing. geol.



Legenda

-  Bušotina
-  Usmjereni bušotina
-  Izobata (m)
-  Rasjed
-  Profil



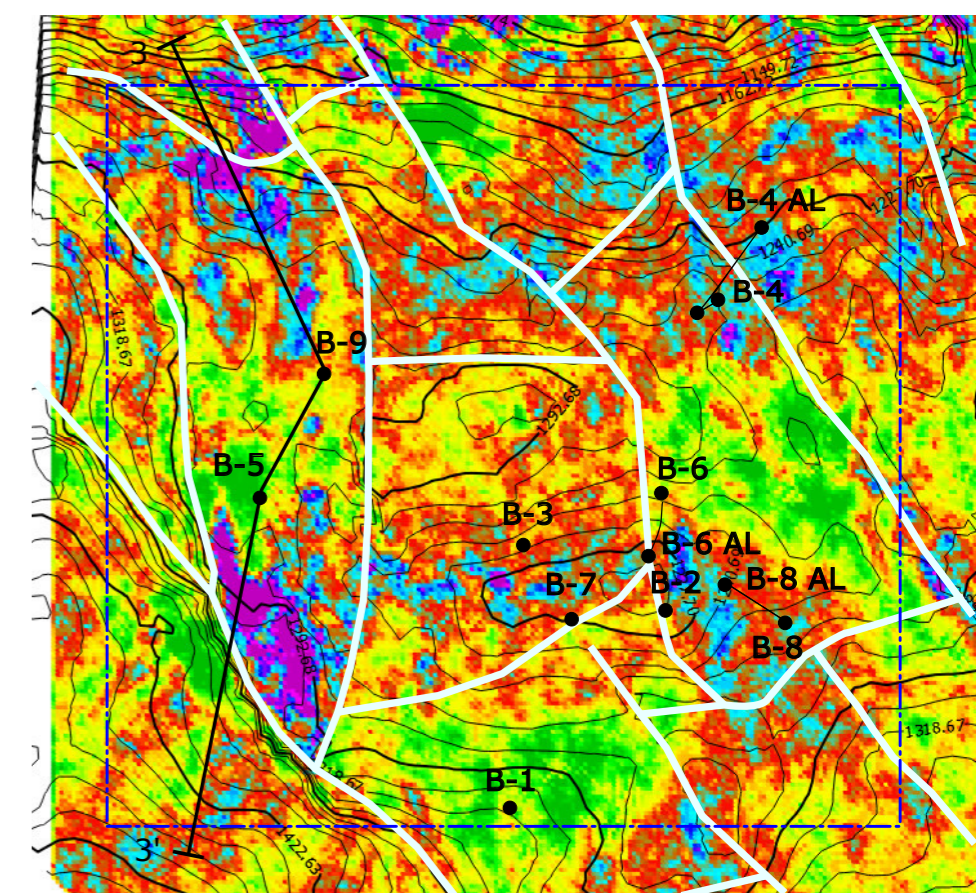
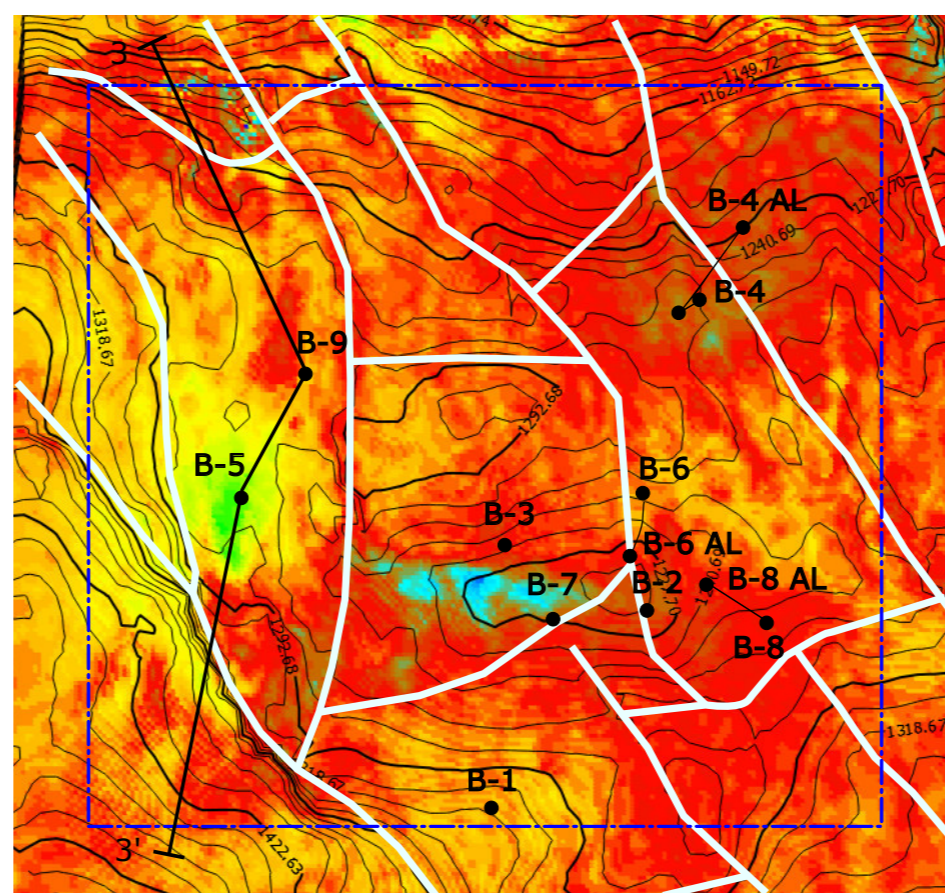
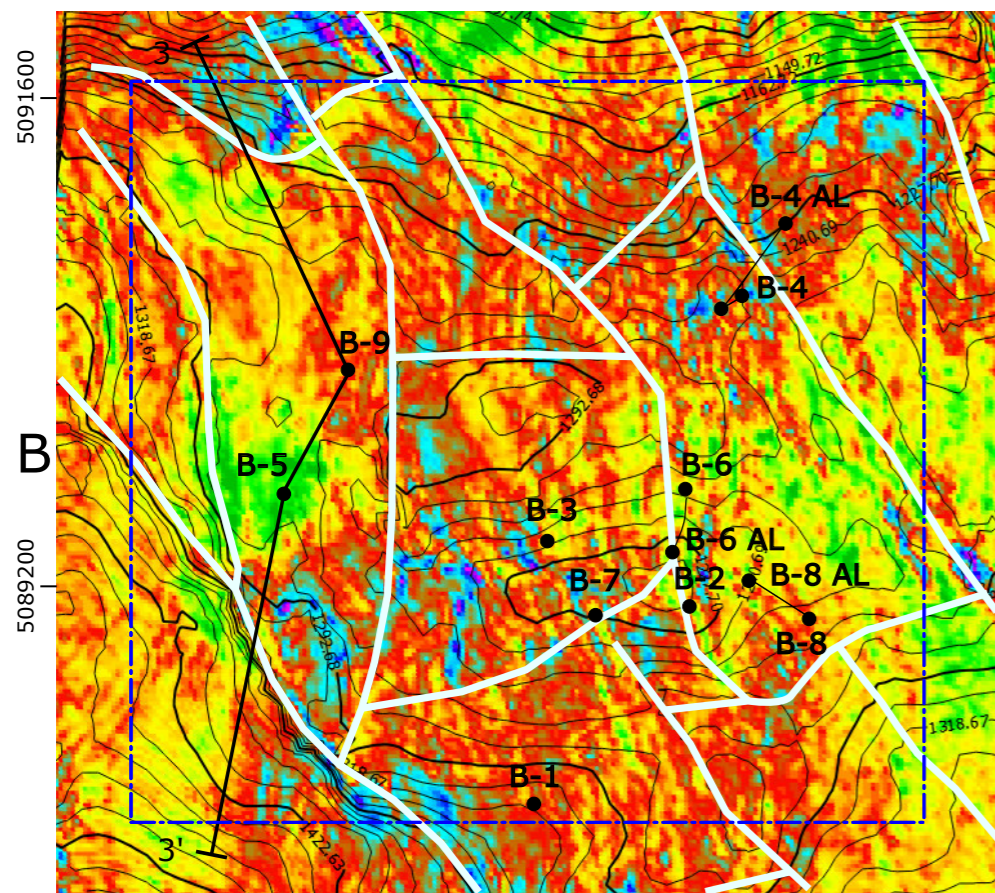
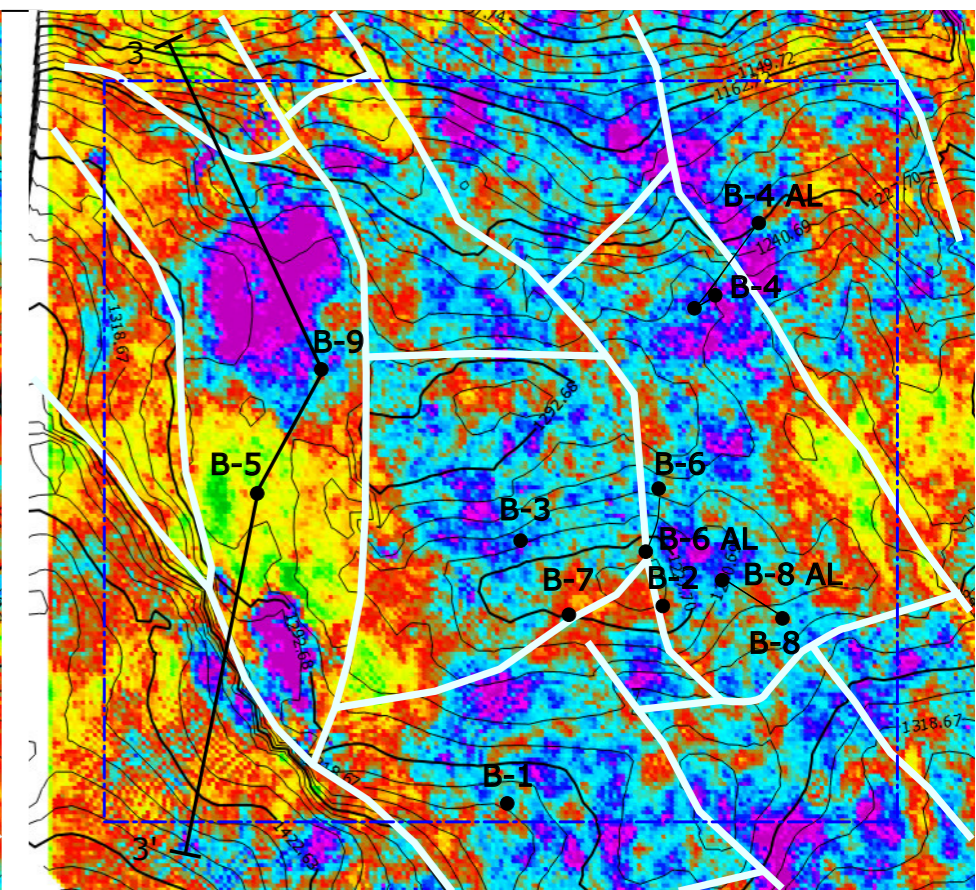
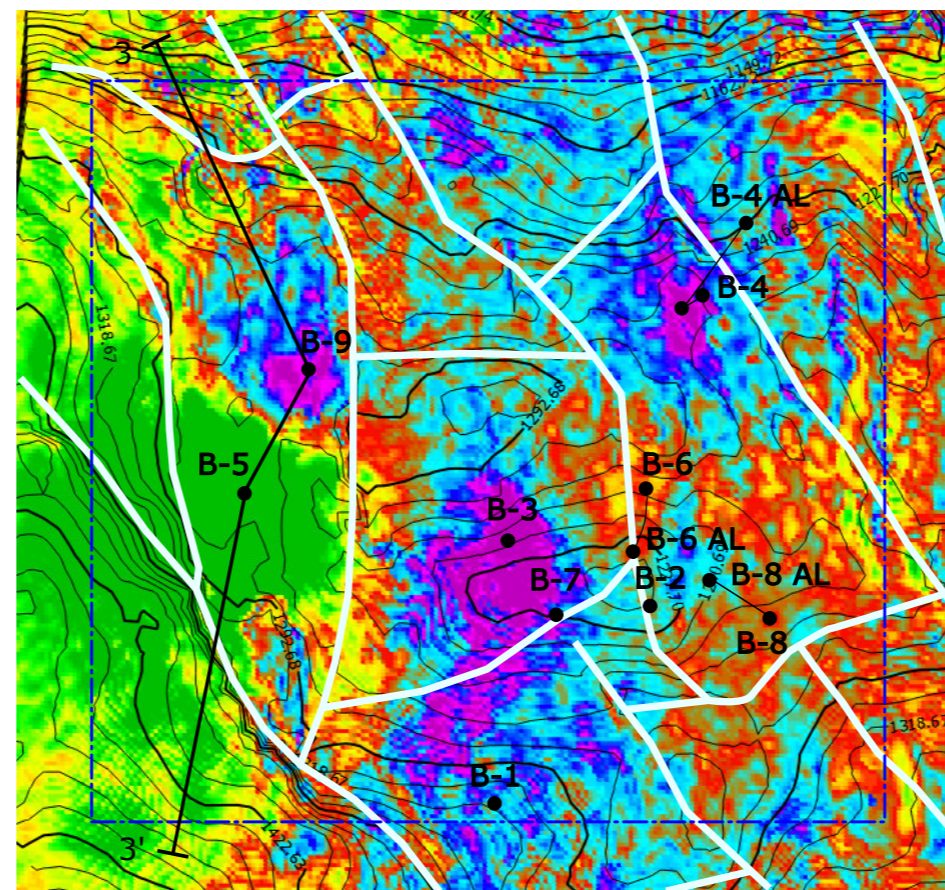
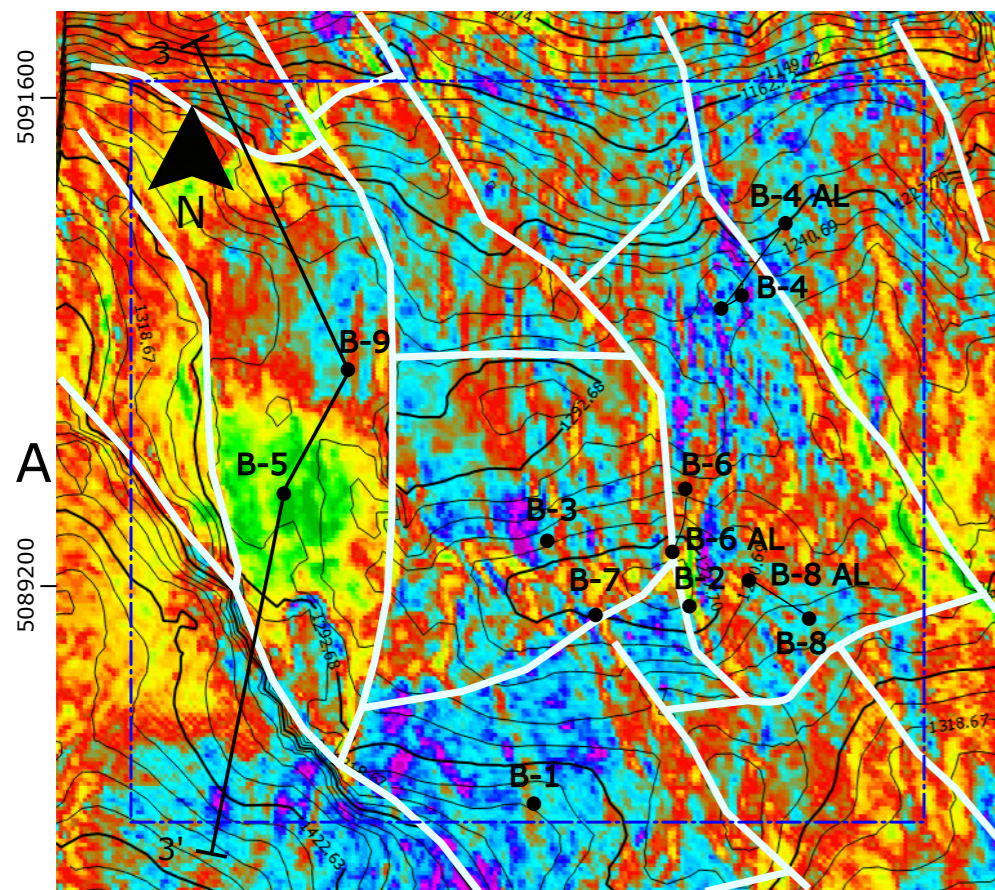
Sveučilište u Zagrebu

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Prilog 2: Karte rezultata stohastičke seizmičke inverzije krovine vapnenaca Grubišnog Polja: (a) omjera V_p/V_s i (b) Poissonovog koeficijenta

Doktorski rad: **Razvoj postupka seizmičke interpretacije ležišta ugljikovodika Bjelovarske depresije na temelju inverzije seizmičkih brzina**

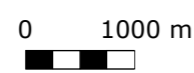
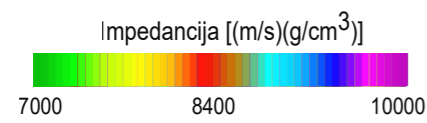
Autor: Domagoj Vukadin, mag. ing. geol.




(a)


(b)


(c)




Legenda

 Bušotina

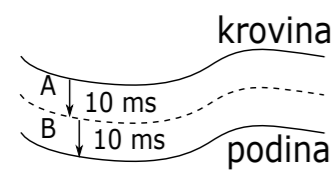
 Usmjerena bušotina

 Izobata (m)

 Rasjed

 Granica eksploatacijskog polja

 Profil



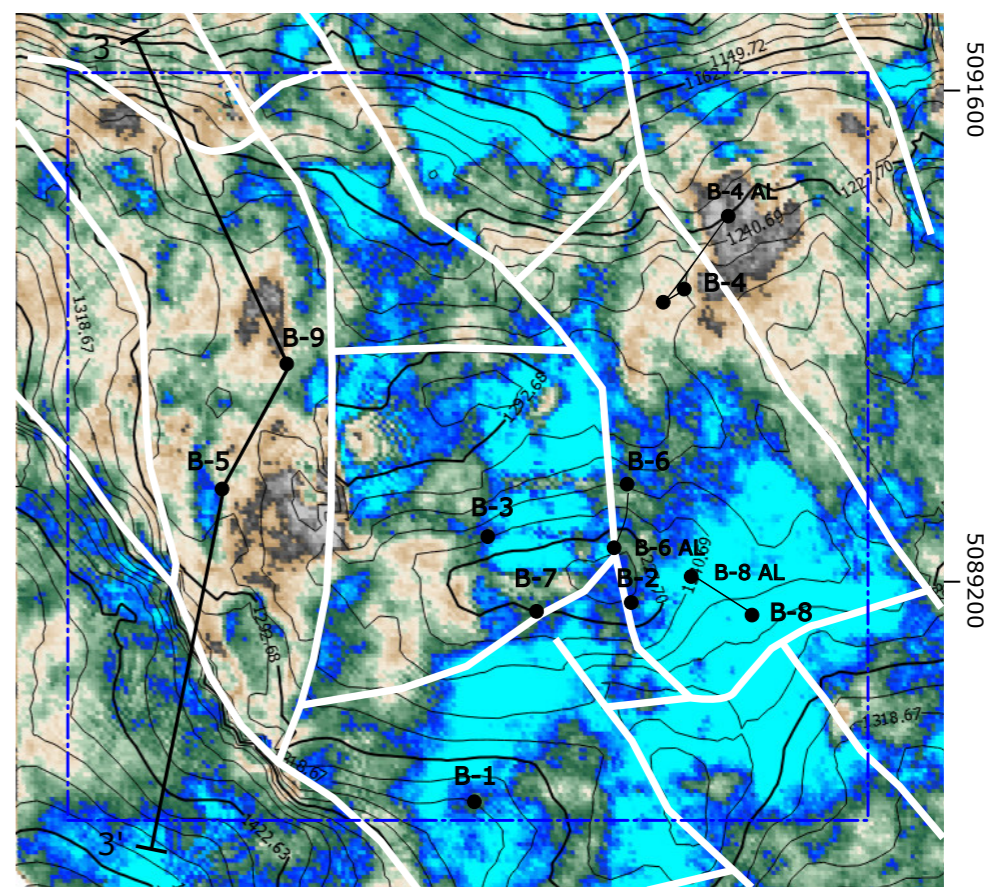
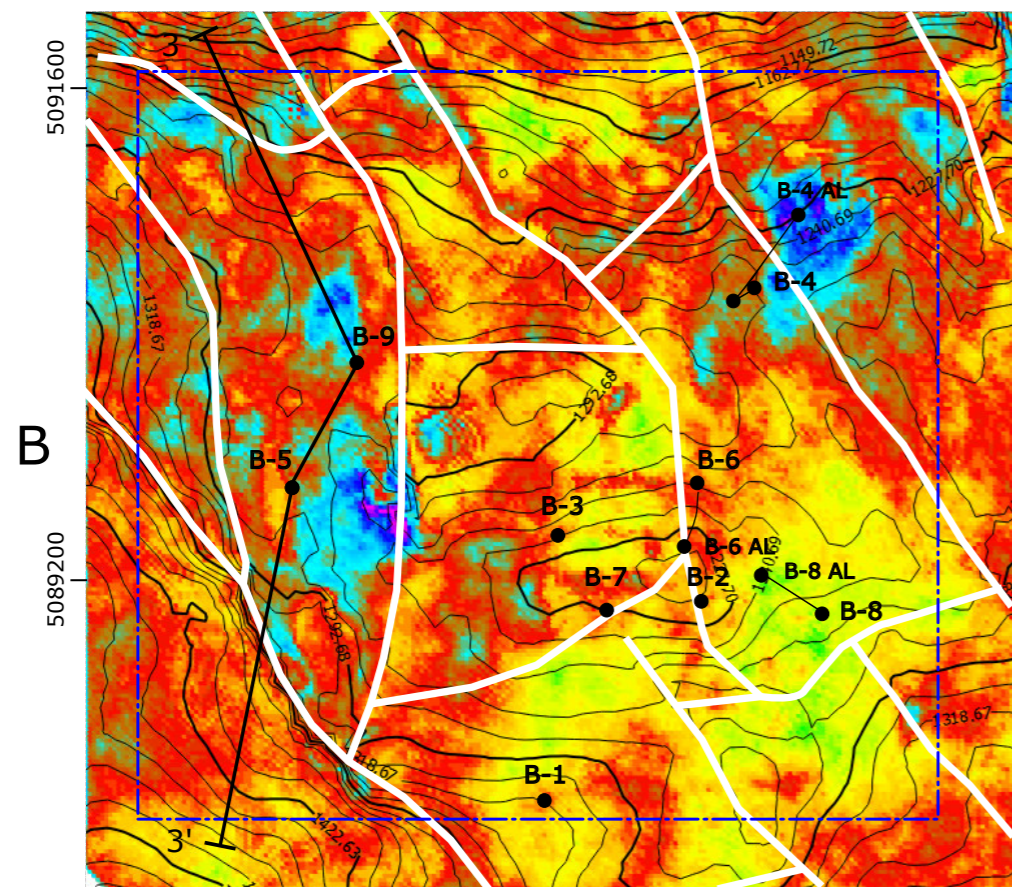
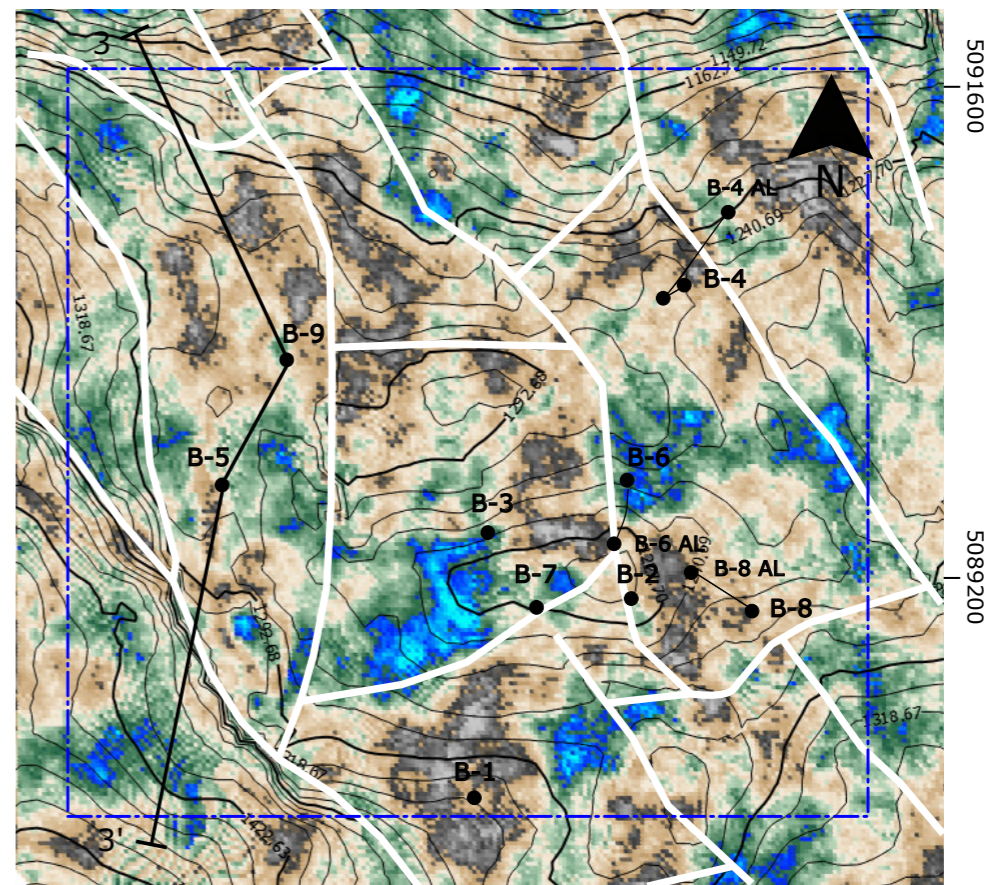
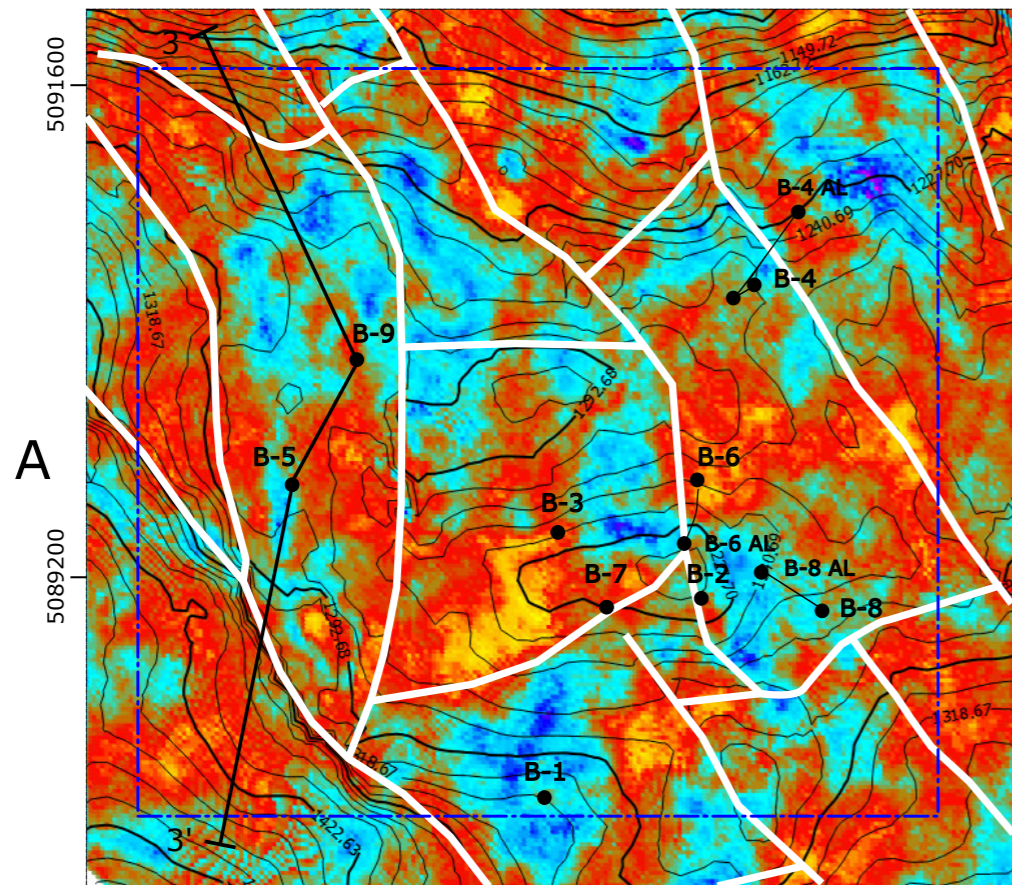
Sveučilište u Zagrebu

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Prilog 3: Karta rezultata P-impedancija seizmičkih inverzija Koprivničkih pješčenjaka na polju Letičani: (a) *post-stack*, (b) *pre-stack* i (c) stohastička inverzija P50

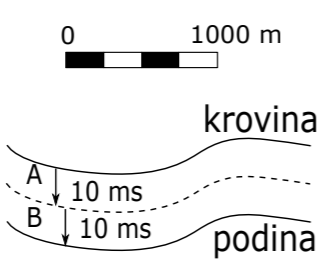
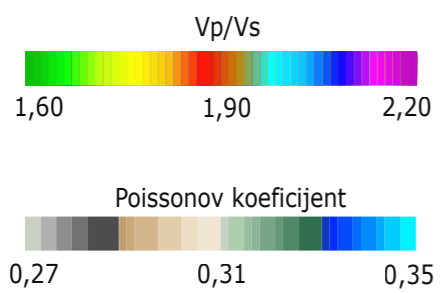
Doktorski rad: **Razvoj postupka seizmičke interpretacije ležišta ugljikovodika Bjelovarske depresije na temelju inverzije seizmičkih brzina**

Autor: Domagoj Vukadin, mag. ing. geol.




(a)

(b)



- Legenda**
- B-1 Bušotina
 - Izobata (m)
 - Granica eksploatacijskog polja

- B-8 AL Usmjerena bušotina
- Rasjed
- Profil



Sveučilište u Zagrebu
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Prilog 4: Karta rezultata stohastičke seizmičke inverzije Koprivničkih pješčenjaka na polju Letičani: (a) omjera V_p/V_s , (b) Poissonovog koeficijenta

Doktorski rad: **Razvoj postupka seizmičke interpretacije ležišta ugljikovodika Bjelovarske depresije na temelju inverzije seizmičkih brzina**
Autor: Domagoj Vukadin, mag. ing. geol.