

Jednodimenzionalno seizmičko modeliranje i primjena seizmičkih istraživanja u naftnom rudarstvu

Perutina, Martina

Master's thesis / Diplomski rad

2020

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:169:934212>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-12-01**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij naftnog rudarstva

**JEDNODIMENZIONALNO SEIZMIČKO
MODELIRANJE I PRIMJENA SEIZMIČKIH
ISTRAŽIVANJA U NAFTNOM RUDARSTVU**

Diplomski rad

Martina Perutina
N-292

Zagreb, 2020.

JEDNODIMENZIONALNO SEIZMIČKO MODELIRANJE I PRIMJENA SEIZMIČKIH
ISTRAŽIVANJA U NAFTNOM RUDARSTVU

Martina Perutina

Rad je izrađen na : Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geofizička istraživanja i rudarska mjerenja
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Sintetski seizmogram predstavlja izračunati seizmički trag prema modelu određenog dijela podzemlja. On može biti trodimenzionalan, dvodimenzionalan, te jednodimenzionalan. Glavna pretpostavka pri izračunu sintetskog seizmograma jest da se geološki model podzemlja sastoji od slojeva različitog litološkog sastava, a time i različitih fizikalnih svojstava. Kao ulazni podaci za izračun sintetskog seizmograma koriste se podaci gustoće slojeva koje su dobivene karotažom gustoće te brzine širenja zvučnih valova kroz slojeve koje su dobivene iz zvučne karotaže. Umnoškom tih ulaznih vrijednosti dobiva se akustična impedancija iz koje proizlaze koeficijenti refleksije. Također, za potrebe proračuna podešava se frekvencija i polaritet ulaznog valića koji ostaje nepromijenjen tijekom širenja kroz slojeve. Konvolucijom valića s koeficijentima refleksije dobiva se sintetski seizmogram koji primarno služi za povezivanje bušotinskih podataka sa seizmičkim horizontima. U ovom je radu izračunati su jednodimenzionalni sintetski seizmogrami na primjerima polja u Jadranu (plinsko polje Katarina) i u Savskoj depresiji (naftno-plinsko polje Stružec). Proračun je rađen u računalnom programu *Petrel*. Ustanovljeno je da korištenje determinističkog valića u oba slučaja pruža preciznija rješenja od analitičkog valića. Usporedbom sintetskog seizmograma i bušotinskih podataka litološke granice su povezane s refleksima te je napravljeno praćenje horizonta PLQ-A plinskog polja Katarina te horizonta p1 naftno-plinskog polja Stružec. Također opisani su direktni indikatori ugljikovodika uz sistematizirana pojašnjenja koja olakšavaju interpretaciju ležišta u vidu određivanja ležišnih svojstava.

Ključne riječi: sintetski seizmogram, koeficijent refleksije, valić, *Petrel*, direktni indikatori ugljikovodika

Završni rad sadrži: 55 stranica, 2 tablica, 36 broj slika, 23 referenci

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentor: Izv. prof. dr. sc. Jasna Orešković, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Ocjenjivači: Izv. prof. dr. sc. Jasna Orešković, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Prof. dr. sc. Franjo Šumanovac, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu
Doc. dr. sc. Vladislav Brkić, RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu

Datum obrane: 14.02.2020. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

CALCULATION OF SYNTHETIC SEISMOGRAMS AND APPLICATION OF SEISMIC
METHODS IN PETROLEUM ENGINEERING
Martina Perutina

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Department of Geophysical Exploration and Mine Surveying
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

Synthetic seismogram presents calculated seismic response for a particular underground model. It can be three-, two-, or one-dimensional. The main premise during the calculation of a synthetic seismogram is that geological model is composed of layers of different mineral composition, and therefore, different physical properties. Density logs along with acoustic logs are used as input data for synthetic generation. Multiplying layer's densities with the sonic velocities produces acoustic impedance, and reflection coefficients are calculated. During the calculation of synthetic seismograms, frequency, polarity and phase of the wavelet are altered to see the impact on synthetics. Convolution of the wavelet with reflection coefficients, synthetic seismogram is obtained, which is primarily used for tying the well data to seismic horizons (Well Tie). In this thesis, 1-D synthetic is calculated in two wells for the gas field Katarina and two wells on the oil-gas field Stružec. The synthetic seismogram generation was performed using the Petrel software. It was determined that the use of deterministic wavelet provides more accurate results when compared to analytical wavelet. The correlation of the synthetic seismogram and well tops provided identification of events on seismic data. The tracking of two seismic horizons has been made: PLQ-A at the field Katarina and p1 at the field Stružec. Also, direct hydrocarbon indicators are described with systematized explanations which make reservoir identification and evaluation, in terms of reservoir properties, much easier.

Keywords: synthetic seismogram, reflection coefficient, wavelet, convolution, acoustic impedance, direct hydrocarbon indicator, hydrocarbon reservoir evaluation

Thesis contains: 55 pages, 2 tables, 36 figures, 23 references

Original: Croatian

Thesis deposited at: The Library of the Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Assoc. Prof. Jasna Orešković, PhD

Reviewers: Assoc. Prof. Jasna Orešković, PhD
Prof. Franjo Šumanovac, PhD
Assist. Prof. Vladislav Brkić, PhD

Date of defense: February 14, 2020 Faculty of Mining, Geology and Petroleum
Engineering, University of Zagreb

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	I
POPIS TABLICA	II
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA	III
1. UVOD	1
2. SEIZMIČKA MJERENJA	2
2.1. Seizmički valovi	2
2.1.1. Longitudinalni valovi (P-valovi)	2
2.1.2. Transverzalni valovi (S-valovi)	3
2.2. Seizmička refleksija	4
3. PRIMJENA SEIZMIČKIH ISTRAŽIVANJA U NAFTNOM RUDARSTVU	5
3.1. Identifikacija ležišta	5
3.1.1. Svijetle mrlje (eng. <i>Bright Spots</i>)	6
3.1.2. Tamne mrlje (eng. <i>Dim Spots</i>)	6
3.1.3. Anomalije - <i>Flat Spots</i>	7
3.2. Procjena ležišta ugljikovodika	10
4. SINTETSKI SEIZMOGRAM	14
4.1. Karotaža gustoće	16
4.2. Zvučna karotaža	17
4.3. Koeficijent refleksije i transmisije	19
4.4. Valić	21
4.4.1. Metode izračunavanja valića	22
4.5. Konvolucija	23
5. REZULTATI	25

5.1. Izračunavanje sintetskog seizmograma u programu <i>Petrel</i>	25
5.1.1. Mjerenje zakona brzina	26
5.1.2. Razlika brzina mjerenih zvučnom karotažom i srednjih brzina	26
5.1.3. Kalibracija zvučne karotaže.....	28
5.1.4. Izračunavanje sintetskog seizmograma	30
5.1.5. Integrirana kalibracije zvučne karotaže i izračunatog sintetskog seizmograma	30
5.2. Plinsko polje Katarina.....	31
5.2.1. Sintetski seizmogram za plinsko polje Katarina.....	32
5.2.2. Praćenje seizmičkog horizonta plinskog polja Katarina.....	38
5.3. Naftno-plinsko polje Stružec	42
5.3.1. Sintetski seizmogram za naftno-plinsko polje Stružec.....	43
5.3.2. Praćenje seizmičkog horizonta naftno-plinskog polja Stružec.....	50
6. ZAKLJUČAK.....	53
7. LITERATURA	54

POPIS SLIKA

Slika 2-1. Prikaz zakona refleksije i refrakcije	5
Slika 3-1. Karakteristike direktnih indikatora ugljikovodika	8
Slika 3-2. Razlika u brzinama širenja valova kroz pješčenjake zasićene različitim fluidima izražena u postocima	9
Slika 3-3. Prikaz promjene faze u pješčenjaku okarakterizirane ravnom linijom	10
Slika 3-4. Utjecaj promjene zasićenja ugljikovodicima na veličinu amplitude reflektiranog vala	12
Slika 3-5. Utjecaj promjene različitih ležišnih svojstava na akustičnu impedanciju i amplitudu	13
Slika 3-6. Tipični primjer ležišnih režima <i>Bright spot</i> i <i>Dim spot</i>	13
Slika 4-1. Koraci izrade sintetskog seizmograma	15
Slika 4-2. Sonda za karotažu gustoće	16
Slika 4-3. Sonda za zvučnu karotažu	17
Slika 4-4. Grafički prikaz koeficijenta transmisije	20
Slika 4-5. Valić nulte i minimalne faze	21
Slika 4-6. Serija koeficijenata refleksije za svaki reflektor	23
Slika 4-7. Slikoviti prikaz konvolucije	24
Slika 5-1. Proces izrade sintetskog seizmograma u računalnom programu <i>Petrel</i>	25
Slika 5-2. Prikaz drift-korekcije za zvučnu karotažu. Korekcija je pozitivna ako su vremena zvučne karotaže kraća, odnosno negativna ako su dulja u odnosu na stvarna vertikalna vremena putovanja vala iz zakona brzina	28
Slika 5-3. Prikaz kalibracije zvučne karotaže u <i>Petrel</i> -u. Korekcijska krivulja je u drugom stupcu, a krivulje u trećem stupcu su zvučna karotaža (crveno) i kalibrirana zvučna karotaža (plavo)	29
Slika 5-4. Položaj plinskog polja Katarina	32
Slika 5-5. Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina 1 (deterministički valić, <i>Extended White</i>)	34
Slika 5-6. Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina 1 (analitički valić, Rickerov, 37 Hz)	35
Slika 5-7. Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina 2 (deterministički valić, <i>Extended White</i>)	37

Slika 5-8. Uzdužni presjek 11325 za plinsko polje Katarina sa označenom krovinom PLQ-A (tirkizno i crno)	39
Slika 5-9. Poprečni presjek 1555 za plinsko polje Katarina sa označenom krovinom PLQ-A (tirkizno i crno)	40
Slika 5-10. 3D prikaz krovine PLQ-A plinskog polja Katarina	41
Slika 5-11. Vremenska karta krovine PLQ-A plinskog polja Katarina	41
Slika 5-12. Položaj Savske depresije unutar koje se nalazi polje Stružec (žuti pravokutnik)	42
Slika 5-13. Sintetski seizmogram za bušotinu O-137 (deterministički valić, <i>Extended White</i>)	44
Slika 5-14. Sintetski seizmogram za bušotinu O-137 (analitički valić, Ricker, 20 Hz)	45
Slika 5-15. Sintetski seizmogram za bušotinu 0-137 (analitički valić, Ricker, 28 Hz)	46
Slika 5-16. Sintetski seizmogram za bušotinu O-139 (deterministički valić, <i>Extended White</i>)	47
Slika 5-17. Sintetski seizmogram za bušotinu O-139 (analitički valić, Ricker, 20 Hz)	48
Slika 5-18. Sintetski seizmogram za bušotinu 0-139 (analitički valić, Ricker, 28Hz)	49
Slika 5-19. Uzdužni presjek 279 naftno-plinskog polja Stružec sa označenom krovinom p1 (zeleno i crno)	50
Slika 5-20. Poprečni presjek 3928 naftno-plinskog polja Stružec sa označenom krovinom p1 (zeleno i crno)	51
Slika 5-21. 3D prikaz krovine p1 naftno-plinskog polja Stružec	52
Slika 5-22. Vremenska karta krovine p1 naftno-plinskog polja Stružec	52

POPIS TABLICA

Tablica 3-1 Mogućnosti procjene ležišnih svojstava iz seizmičkih podataka	11
Tablica 3-2 Ležišna svojstva koja mogu utjecati na seizmičku amplitudu	11

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

V_p	- brzina longitudinalnog (P) vala [m/s],
κ	- volumni modul elastičnosti,
μ	- modul smicanja,
ρ	- gustoća sredstva [kg/m^3].
V_s	- brzina tranverzalnog (S) vala [m/s],
i	- upadni kut [$^\circ$],
V_1	- brzina rasprostiranja vala u prvom sredstvu [m/s]
θ	- kut refleksije ili kut loma [$^\circ$],
V_2	- brzina rasprostiranja vala u drugom sredstvu [m/s].
Z	-akustična impedancija,
V	-brzina širenja seizmičkih valova [m/s],
ρ	-gustoća sloja [kg/m^3].
RC	- koeficijent refleksije,
A_0, A_1	- amplituda upadnog, tj. reflektiranog vala,
V_1, V_2	- brzina P – vala u gornjem i donjem sloju [m/s],
ρ_1, ρ_2	- gustoća gornjeg, tj. donjeg sloja [kg/m^3].
T	-koeficijent transmisije,
A_2	-amplituda refraktiranog vala.
$y(t)$	- sintetski sezmogram,
$w(t)$	- inicijalni valić,
λ	- valna duljina [m]
f	- frekvencija [Hz]
t	- period [s]

1.UVOD

U svrhu definiranja modela ležišta ugljikovodika koriste se trodimenzionalni seizmički podaci koji omogućavaju interpretaciju geološke strukture, granica u podzemlju i rasjeda. Seizmički horizonti koji odgovaraju granicama određenim pomoću bušotinskih podataka mogu se pratiti u prostoru. No, potrebno je litološke granice povezati sa seizmičkim refleksima, odnosno odrediti kakav je seizmički odziv pojedine granice, a u tu svrhu se koristi seizmičko modeliranje.

Modeliranje je računalni proces za određivanje seizmičkog odziva pretpostavljenog geološkog modela i može biti jednodimenzionalno, dvodimenzionalno ili trodimenzionalno. Sintetski seizmogram je primjer jednodimenzionalnog seizmičkog modeliranja. Ulazni podaci pri izračunavanju sintetskog seizmograma proizlaze iz karotaže gustoće te zvučne karotaže, a osnovna namjena izračunavanja modeliranog seizmičkog traga je precizno povezivanje bušotinskih podataka sa stvarnim rezultatima seizmičkih mjerenja, odnosno određivanje seizmičkog karaktera granica slojeva.

U ovom su radu izračunati sintetski seizmogrami u računalnom programu *Petrel 2014*, tvrtke *Schlumberger*. Pored mjerenih karotažnih podataka važno je dobro definirati ulazni signal, valić, koji može biti poznatog oblika ili ekstrahiran iz mjerenih seizmičkih podataka. Cilj je bio testirati različite parametre i to na primjerima polja u Jadranu i Panonskom bazenu. Stoga su sintetski seizmogrami izračunati za dvije bušotine na plinskom polju Katarina kao i za dvije bušotine na naftno-plinskom polju Strušcu. Usporedbom sintetskog seizmograma i bušotinskih podataka litološke granice su povezane s refleksima te je učinjena interpretacija karakterističnih horizonata. Na polju Katarina interpretiran je horizont PLQ-A, a na naftno-plinskom polju Stružec horizont p1.

Nadalje, obrađen je i značaj geofizičkih, seizmičkih istraživanja u naftnom rudarstvu. Tako se na primjer, refleksijska seizmička mjerenja provode u svrhu identificiranja ležišta ugljikovodika i određivanja njegovih svojstava poput strukturnog oblika. Također, značaj rezultata interpretacije seizmičkih mjerenja nalazi se u gotovo svim fazama razrade ležišta: od istražne faze gdje je ležište potrebno identificirati i opisati uz određivanje lokacija istražnih bušotina, do kasne eksploatacijske faze razrade ležišta kada je potrebno odrediti lokacije novih razradnih bušotina radi postizanja optimalnog režima crpljenja ugljikovodika. Može se reći da je refleksijska seizmika trenutno najvažnija površinska metoda u istraživanju nafte i plina.

2. SEIZMIČKA MJERENJA

2.1. Seizmički valovi

U seizmičkim istraživanjima razmatraju se dvije osnovne vrste seizmičkih valova: površinski valovi te prostorni seizmički valovi. Površinski valovi rasprostiru se duž Zemljine površine i općenito imaju nižu frekvenciju nego prostorni valovi.

Prostorni valovi rasprostiru se kroz Zemljinu unutrašnjost te su općenito klasificirani u dvije kategorije: longitudinalni ili P-valovi te transversalni ili S-valovi. Prostorni valovi šire se iz izvora vala u svim smjerovima te su općenito viših frekvencija od površinskih valova i najčešće se koriste u seizmičkim istraživanjima.

2.1.1. Longitudinalni valovi (P-valovi)

Longitudinalni valovi se najčešće koriste u refleksijskim i refrakcijskim seizmičkim istraživanjima. P-valovi nastaju kada je seizmička energija primijenjena okomito na površinu sredstva kojim se rasprostire. Čestice sredstva kroz koje se val širi osciliraju u smjeru širenja vala. Kao rezultat takvog gibanja čestica sredstva, dolazi do kompresije i dilatacije sredstva kako se val širi. Longitudinalni valovi se upravo zbog navedenog šire brže od ostalih vrsta seizmičkih valova.

Poznavajući volumni modul elastičnosti (K) te gustoću (ρ), brzina P-vala može biti izračunata prema jednadžbi:

$$V_p = \sqrt{\frac{\kappa + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2-1)$$

gdje je : V_p - brzina longitudinalnog (P) vala [m/s],

κ - volumni modul elastičnosti [-],

μ - modul smicanja [-],

ρ - gustoća sredstva [kg/m^3].

Najznačajnije karakteristike P-valova:

- P-val je zvučni ili kompresijski val,
- P-val uvijek je prvonailezeći seizmički val,

- Ima najveću brzinu rasprostiranja uspoređujući sa svim ostalim vrstama seimičkih valova,
- Mogućnost rasprostiranja i kroz stijene i kroz fluide (nafta, plin i voda) uz smanjenje brzine kroz fluide ($\mu=0$).

2.1.2. Transverzalni valovi (S-valovi)

Transverzalni ili S-val druga je vrsta prostornog vala. Transverzalni val nastaje kada je seizmička energija primijenjena u smjeru paralelnom s površinom sredstva. Čestice sredstva kroz koje se val širi osciliraju okomito na pravac širenja vala.

Brzina širenja S-vala može se izraziti jednadžbom:

$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2-2)$$

gdje je: V_s - brzina transverzalnog (S) vala [m/s],
 μ - modul smicanja[-],
 ρ - gustoća sredstva [kg/m³].

Budući da tekućine i plinovi ne pružaju otpor posmičnoj deformaciji te je modul smicanja $\mu=0$ brzina S-valova u tekućinama i plinovima je također jednaka 0, odnosno transverzalni valovi ne mogu se širiti kroz tekućine i plinove.

Najznačajnije karakteristike S-valova su:

- S-valovi rasprostiru se sporije od P-valova,
- Ne dolazi do kompresije i ekspanzije prilikom širenja vala, te zbog toga ne dolazi do promjene tlaka.

Najznačajniji parametri vala koji se koriste prilikom seizmičkih istraživanja su: amplituda vala, period (t), frekvencija (f), valna duljina (λ), valni broj te faza vala.

- Amplituda vala predstavlja veličinu pomaka čestica, odnosno maksimalna udaljenost od ravnotežnog položaja,

- Period (t) je vrijeme, u sekundama, potrebno da val prođe udaljenost od jedne valne duljine,
- Frekvencija (f) je broj titraja vala u jednoj sekundi. Recipročna je periodu vala. Mjerna jedinica za frekvenciju je Hz pri čemu jedan Hz znači jedan u sekundi (1/s),
- Valna duljina (λ) predstavlja udaljenost između najbližih točaka jednakog stanja titranja (dva brijega ili dva dola vala). Mjeri se u metrima ili ft:

$$\text{valna duljina } (\lambda) = \frac{\text{brzina}(v)}{\text{frekvencija}(f)} . \quad (2-3)$$

- Valni broj je recipročan valnoj duljini:

$$\text{valni broj} = 1/\text{valna duljina} . \quad (2-4)$$

- Faza vala prikazuje početni položaj valnog oblika. Faza je kutna veličina mjerena u radijanima ili stupnjevima.

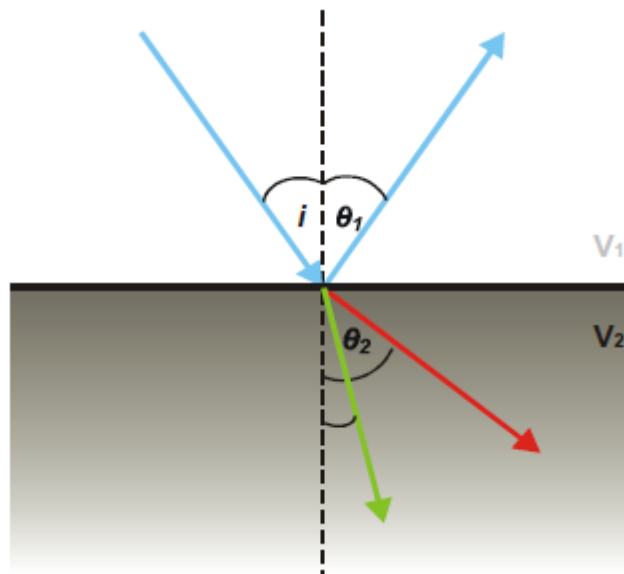
Postoji važna veza između frekvencije (f), valne duljine (λ) i brzine (v) za sve vrste valova. Prikazana jednadžbom glasi :

$$\text{brzina}(v) = \text{frekvencija}(f) \cdot \text{valna duljina}(\lambda) \quad (2-5)$$

2.2. Seizmička refleksija

Seizmička refleksija temelji se na činjenici da se akustična svojstva stijena mijenjaju. Akustična impedancija sloja je produkt gustoće tog sloja i brzine seizmičkog vala kroz taj sloj, a upravo iz omjera akustičnih impedancija proizlazi refleksija energije upadnog vala, odnosno koeficijent refleksije. Zapravo, akustična impedancija obično ovisi o litologiji, tako da se granice akustičnih impedancija te litološke granice najčešće podudaraju.

Prema zakonu refleksije (slika 2-1) upadni kut valne zrake (i) jednak je kutu refleksije (θ).



Slika 2-1. Prikaz zakona refleksije i refrakcije

3. PRIMJENA SEIZMIČKIH ISTRAŽIVANJA U NAFTNOM RUDARSTVU

3.1. Identifikacija ležišta

Jedna od najvažnijih primjena seizmičkih mjerenja u naftnom rudarstvu je identifikacija ležišta ugljikovodika. Amplitude seizmičke refleksije rezultat su kontrasta akustičnih impedancija kojega seizmički valovi prouzrokuju šireći se granicama slojeva u podzemlju. Sedimentne stijene mogu biti definirane svojim kemijskim sastavom, matriksom, šupljikavosti i pornim fluidom, od kojih svaki ima utjecaj na elastična svojstva. Plin je iznimno stlačiv fluid i kada je prisutan u pornom prostoru značajno smanjuje volumni modul elastičnosti, čineći takvu stijenu kompresibilnijom od stijene zasićene drugim fluidom. Ovo svojstvo koristi se kao indikator za detekciju plina (Brown, 2011). Obzirom da plinom zasićene stijene znatno smanjuju brzinu longitudinalnih (P) valova, uslijed povoljnih geoloških uvjeta, to će za posljedicu imati značajne seizmičke anomalije visokih amplituda u klastičnim ležištima. Budući da spomenute visoke amplitude naznačuju prisustvo ugljikovodika u klastičnim stijenama, nazvane su direktnim indikatorima ugljikovodika. Pod direktne indikatore ugljikovodika svrstavaju se i tzv. svijetle mrlje (engl. *bright spot*), tamne

mrlje (engl. *dim spot*) i ravne mrlje (engl. *flat spot*) (Nanda, 2016). Unatoč tome, valja istaknuti da sve anomalije iskazane visokom amplitudom ne označavaju nužno prisutnost ugljikovodika. Također, razmatraju se seizmički atributi kako bi se potvrdile direktne indikacije ugljikovodika.

3.1.1. Svijetle mrlje (eng. *Bright Spots*)

Svijetle mrlje (engl. *Bright spots*) predstavljaju snažne anomalije amplitude s negativnom vrijednošću koeficijenta refleksije, a najčešće su povezane s prisustvom plina u pješčenjačkim ležištima ograničenih šejlom. U geološkom smislu, u slučaju da vodom zasićene stijene imaju vrijednosti brzine i gustoće (oko 2300 m/s i 2,2 g/cm³) (Nanda, 2016) slične onima u pokrovnim šejlovima (oko 2100 m/s i 2,3 g/cm³) (Nanda, 2016), reflektirani val će pokazati male amplitude zbog male vrijednosti pozitivnog koeficijenta refleksije, odnosno omjera akustičnih impedancija. Međutim, kada je pješčenjak zasićen plinom, vrijednost brzine naglo pada (na oko 1600 m/s) uzrokujući značajan negativan kontrast akustičnih impedancija na granici slojeva. Kao rezultat navedenog, dolazi do nastanka jakih ("sjajnih") amplituda na vrhu plinom zasićenog sloja, pod nazivom *Bright spot*. Slijedeći spomenuto, u prisustvu kontakta plin-voda, granica između šejla i vodom zasićenog pješčenjaka koja se nalazi na rubnom dijelu geološke strukture ležišta bit će predstavljena slabom refleksijom s pozitivnim polaritetom. S druge strane, plinsko ležište u središnjem, odnosno čeonom dijelu geološke strukture, a iznad kontakta plin-voda, pokazivat će jaku refleksiju negativnog polariteta.

3.1.2. Tamne mrlje (eng. *Dim Spots*)

Tamne mrlje (engl. *Dim spots*) predstavljaju anomaliju male amplitude s pozitivnim koeficijentom refleksije, a najčešće se povezuju s prisustvom plina u karbonatnim ležištima. Vodom zasićeni vapnenci uglavnom su okarakterizirani visokim vrijednostima brzina (oko 3400 m/s) (Nanda, 2016), u odnosu na pokrovne šejlove (gdje su vrijednosti brzina oko 2600 m/s) (Nanda, 2016), te također imaju visoke vrijednosti pozitivnog koeficijenta refleksije. U slučaju zasićenja plinom brzina u karbonatnim ležištima se smanjuje (iznosi otprilike oko 2900 m/s) (Nanda, 2016) što uzrokuje smanjenje omjera akustičnih impedancija odnosno

koeficijenta refleksije. Međutim, on i dalje ima pozitivnu vrijednost. Ovakvo smanjenje koeficijenta refleksije, odnosno slabljenje amplitude uzrokuje tzv. *tamne mrlje*.

Osim u karbonatnim ležištima zasićenih plinom, pojavljivanje *dim spot*a primijećeno je i kod ležišta pješčenjaka. Pješčenjaci veće starosti s visokim impedancijama, odnosno brzinama (oko 3400 m/s), pokrivene šejlom (s nižim vrijednostima brzina, oko 2400 m/s) kada su zasićene plinom mogu uzrokovati pojavljivanje *dim spot*-ova.

3.1.3. Anomalije - *Flat Spots*

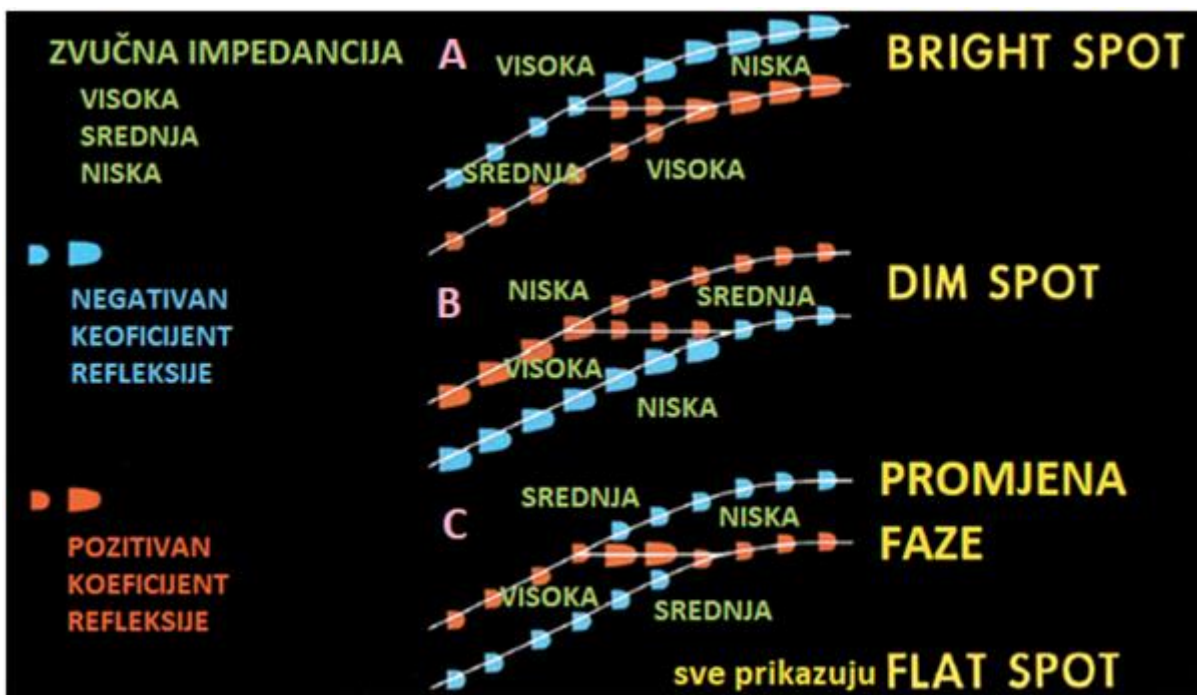
Anomalije *Flat spot* okarakterizirane su visokim amplitudama i horizontalnim refleksima te se povezuju s kontaktom plin-voda i pokazuju pozitivan koeficijent refleksije. Jedinstven su slučaj budući da refleks nije povezan s litologijom već kontaktom fluida te je kontrast akustičnih impedancija rezultat razlike gustoća fluida, plina i vode. Ipak, prostorno ograničeni, gotovo horizontalni, vodom zasićeni pješčenjaci mogu biti prikazani kao *flat spot*.

Navedeni direktni indikatori ugljikovodika prikazani su slikom 3-1. Plavi brijeg predstavlja smanjene u akustičnoj impedanciji odnosno negativan koeficijent refleksije, dok brijeg crvene boje označuje povećanje u akustičnoj impedanciji tj. pozitivan koeficijent refleksije.

Slika 3-1A prikazuje najčešću situaciju. Akustična impedancija vodom zasićenog pješčenjaka manja je od one pokrovnih stijena, a impedancija plinom zasićenog pješčenjaka je izrazito manja, te je za dio ležišta zasićenog plinom amplituda reflektiranih valova veća. To predstavlja tipičan primjer režima svijetle mrlje s visokim amplitudama reflektiranih valova krovine i podine ležišta (Brown, 2010). Ako je pješčenjak dovoljne efektivne debljine da se mogu raspoznati reflektirani signali krovine i podine ležišta, onda je ravna linija uočljiva te predstavlja granicu između plina i vode. Ravna linija bit će prikazana crvenom bojom zbog toga što mora postojati povećanje akustične impedancije budući da se plin uvijek nalazi iznad vode te ima manju akustičnu impedanciju.

Slika 3-1B prikazuje vodom zasićeni pješčenjak koji ima veću akustičnu impedanciju od pokrovnih stijena. Kako se zasićenje plinom u pješčenjaku povećava tako se smanjuje

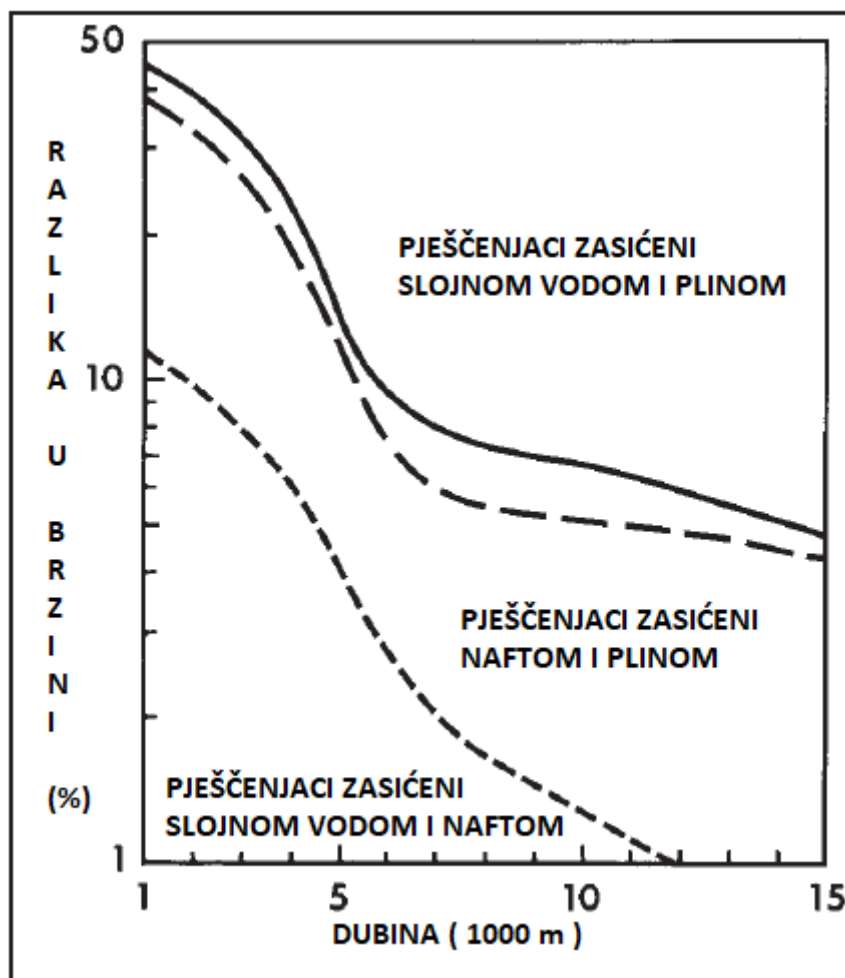
akustična impedancija kao i kontrast na krovini i podini ležišta. Takvo ležište spada u režim tamne mrlje.



Slika 3-1. Karakteristike direktnih indikatora ugljikovodika (preuređeno iz Brown, 2011)

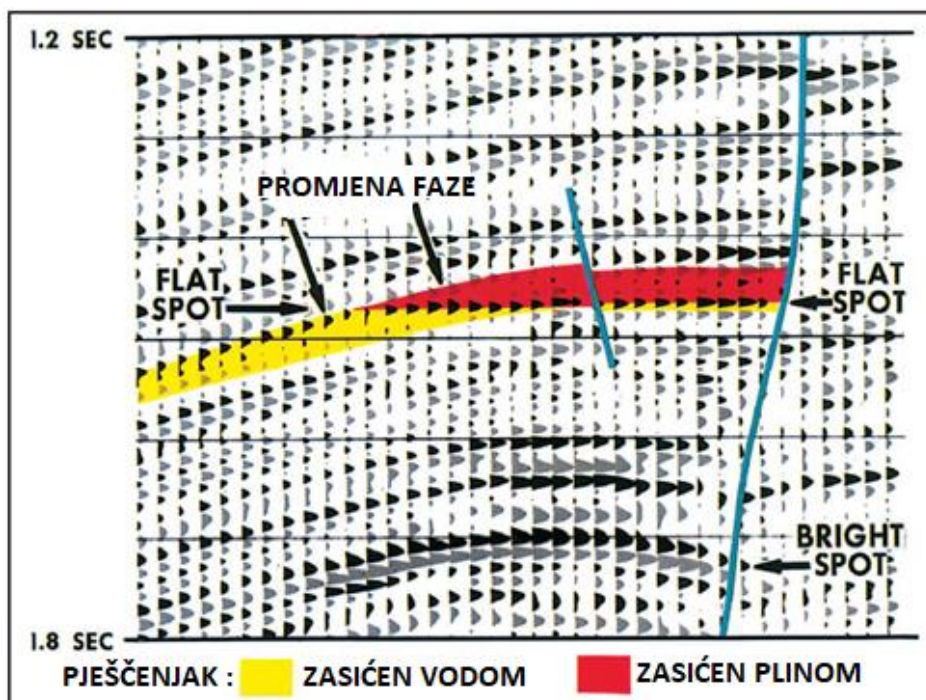
Slika 3-1C prikazuje smanjenje akustične impedancije pješčenjaka zbog povećanja zasićenja plinom. Zbog toga se vrijednost akustične impedancije promijeni od one veće od pokrovnih stijena na onu manju od pokrovnih stijena. Zbog toga dolazi do obrata u polaritetu u krovini i podini ležišta. U ovom slučaju amplituda ravne linije (*Flat Spot*) ima najveću vrijednost.

Većina izravnih indikacija ugljikovodika odnosi se na plin zato što je utjecaj plina u pornom prostoru na akustična svojstva višestruko veći nego onaj nafte. Na slici 3-2 prikazan je utjecaj nafte i plina u pornom prostoru na seizmičke brzine.



Slika 3-2. Razlika u brzinama širenja valova kroz pješčenjake zasićene različitim fluidima izražena u postocima (preuređeno iz Gardner i dr., 1974)

Prema slici 3-2 može se zaključiti da se s povećanjem dubine utjecaj na brzinu širenja seizmičkih valova smanjuje neovisno o kojoj fazi se radi (Gardner i dr., 1974). Backus i Chen (1975) analizirali su prednosti ravnih anomalija (*Flat Spot*) na seizmičkim podacima. Takva ravna linija može se vidjeti na slici 3-3 (vidljiva na 1,47 sekundi na y-osi). Ravna linija može se uočiti zbog neslaganja s pripadajućim refleksima zbog čega se ravna linija može smatrati dobrim indikatorom kontakta ugljikovodici/voda.



Slika 3-3. Prikaz promjene faze u pješčenjaku okarakterizirane ravnom linijom (*Flat Spot*; Brown, 2011)

Na slici 3-3 se također uviđa da amplituda reflektiranih valova krovine ležišta prelazi iz pozitivne vrijednosti u negativnu (obrat polariteta) na mjestu kontakta različitih faza. To ukazuje na izrazitu razliku u akustičnim svojstvima pješčenjaka zasićenog plinom i onog zasićenog vodom.

3.2. Procjena ležišta ugljikovodika

U tablici 3-1 su prikazana ležišna svojstva potrebna za učinkovitu razradu i eksploataciju ležišta ugljikovodika, te su prikazana s obzirom na mogućnost njihovog određivanja na temelju provedenih seizmičkih mjerenja. Osnovne informacije u seizmičkim podacima su:

1. vrijeme,
2. amplituda,
3. frekvencija.

Dakle, postoji puno manje mjerenih podataka (poznatih varijabli) nego što ima nepoznanica (ležišnih svojstava). Od osnovnih informacija dostupnih iz seizmičkih podataka, vrijeme putovanja vala se koristi pri određivanju strukture ležišta i ležišnih granica. Amplituda je

dobro shvaćena od strane struke i u širokoj je primjeni za razliku od frekvencije koja je izrazito podložna šumovima i poremećajima.

Tablica 3-1. Mogućnosti procjene ležišnih svojstava iz seizmičkih podataka

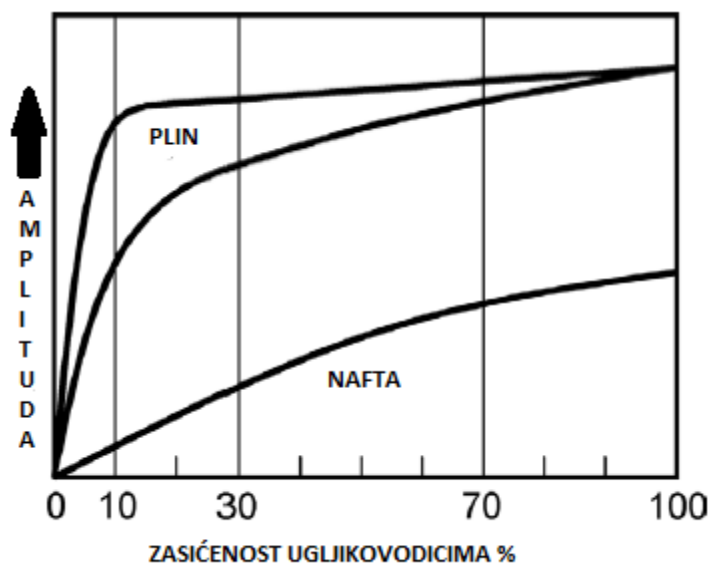
POTREBNA LEŽIŠNA SVOJSTVA	DOSTUPNOST IZ SEIZMIČKIH PODATAKA
Struktura	Uglavnom
Granice ležišta	Uglavnom
Količina fluida i kontakti fluida	Da, za mlađe stijene
Šupljikavost	Uglavnom
Zasićenje ugljikovodicima	Teško, ali moguće za mlađe stijene
Efektivna debljina	Uglavnom
Propusnost	Ne
Povezanost hidrodinamičkih cjelina	Ponekad
Ležišni režimi	Djelomično

Nadalje, u tablici 3-2 su sistematično prikazana ležišna svojstva koja mogu utjecati na seizmičku amplitudu te tako olakšavaju postupak interpretacije seizmičkih podataka i procjene samog ležišta.

Tablica 3-2. Ležišna svojstva koja mogu utjecati na seizmičku amplitudu

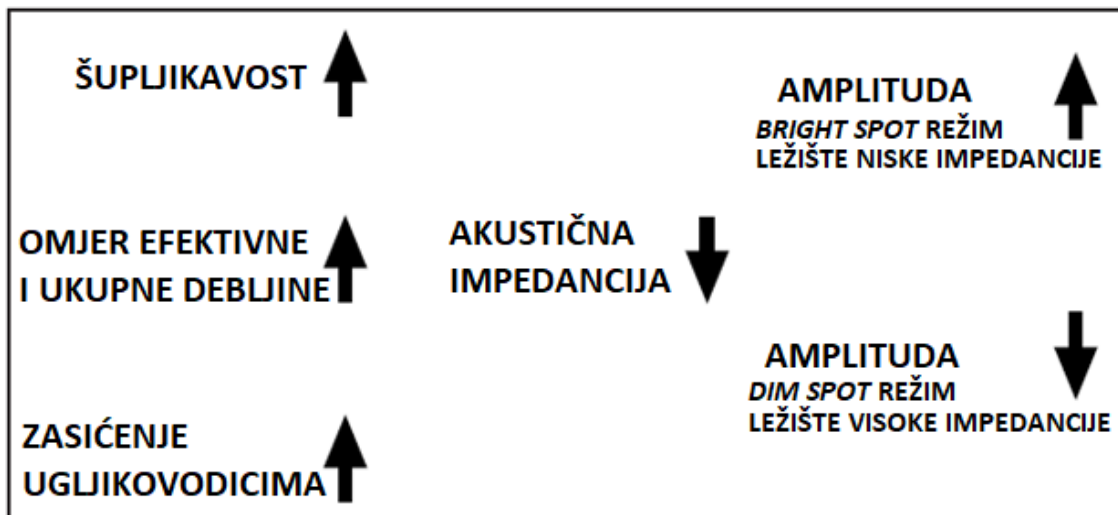
Skupina A	Skupina B
Vrsta fluida	Šupljikavost
Litologija	Efektivna debljina ili efektivna debljina/ukupna debljina
Tlak	Litološke značajke
Temperatura	Zasićenje ugljikovodicima

Ležišna svojstva iz skupine A odnose se na ležište u cjelini, tj. smatra se da se ta svojstva ne mijenjaju kroz cjelokupno ležište (Brown, 2011). Svojstva iz skupine B mogu se znatno mijenjati unutar pojedinih dijelova ležišta što može značajno utjecati na procjenjivanje količine fluida u ležištu. Stoga, cilj geofizičkih metoda je odrediti dijelove ležišta u kojima se osobito očituje promjena svojstava, a u svrhu lociranja bušotina te što preciznijeg procjenjivanja rezervi. Promjena bilo kojih od svojstava iz skupine B uzrokuje promjenu u amplitudi reflektiranih valova što se vrlo dobro može uočiti na primjeru promjene zasićenja ugljikovodicima (slika 3-4). Amplituda reflektiranog vala raste nelinearno s povećanjem zasićenja ugljikovodicima, a nelinearnost se osobito povećava s povećanjem zasićenja ležišta plinskom fazom.



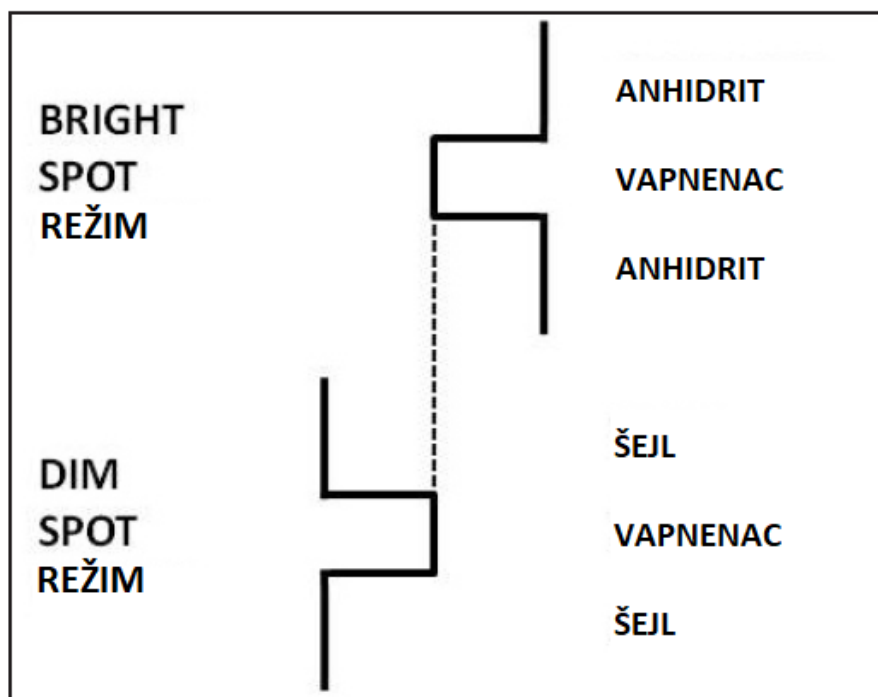
Slika 3-4. Utjecaj promjene zasićenja ugljikovodicima na veličinu amplitude reflektiranog vala (preuređeno iz Brown, 2011)

Nadalje, utjecaj svojstava iz skupine B na amplitudu seizmičkih valova može se objasniti slikom 3-5 (Brown, 2011). Povećanjem zasićenja ugljikovodicima, šupljikavosti i omjera efektivne i ukupne debljine ležišta dolazi do smanjenja akustične impedancije. To se događa zbog toga što porastom navedenih ležišnih svojstava dolazi do povećanja volumnog udjela fluida u ležišnim stijenama. Budući da je gustoća fluida uvijek manja od gustoće stijene, dolazi do smanjenja ukupne gustoće, a uzimajući u obzir proporcionalnost odnosa brzine širenja seizmičkih valova o gustoći, dolazi i do smanjenja brzine širenja seizmičkih valova. Iz prethodno objašnjenih ležišnih režima (svijetle mrlje i tamne mrlje) s geofizičkog stajališta slijedi da je amplituda seizmičke svijetle mrlje veća za ona područja gdje je veće zasićenje ugljikovodicima, šupljikavost i/ili odnos efektivne i ukupne debljine ležišta. Slijedi: što je izraženija svijetla mrlja izraženije su i promjene svojstava. Dakle, u režimu svijetle mrlje amplituda reflektiranih valova je veća. Za režim tamne mrlje logika je obrnuta. Ovdje ležište ima veću akustičnu impedanciju od stijena krovine i podine pa će smanjenje akustične impedancije uzrokovati smanjenje kontrasta između ležišta i okolnih stijena kao i smanjenje amplitude. Stoga, najvažnije seizmičko svojstvo ležišta odnosi se na ležišni režim (sjajna i prigušena mrlja).



Slika 3-5. Utjecaj promjene različitih ležišnih svojstava na akustičnu impedanciju i amplitudu (preuređeno iz Brown, 2011)

Spada li ležište u režim svijetle ili tamne mrlje ovisi o akustičnoj impedanciji ležišta, ali i o akustičnoj impedanciji stijena krovine i podine. Na slici 3-6 prikazano je karbonatno ležište (vapnenici) kojem su pokrovne stijene u prvom slučaju anhidrit, a u drugom slučaju šejl. Ležište omeđeno anhidritom spadat će u režim svijetle mrlje dok će ono ograničeno šejlom spadati u režim prigušene mrlje, zbog odnosa akustičnih impedancija.



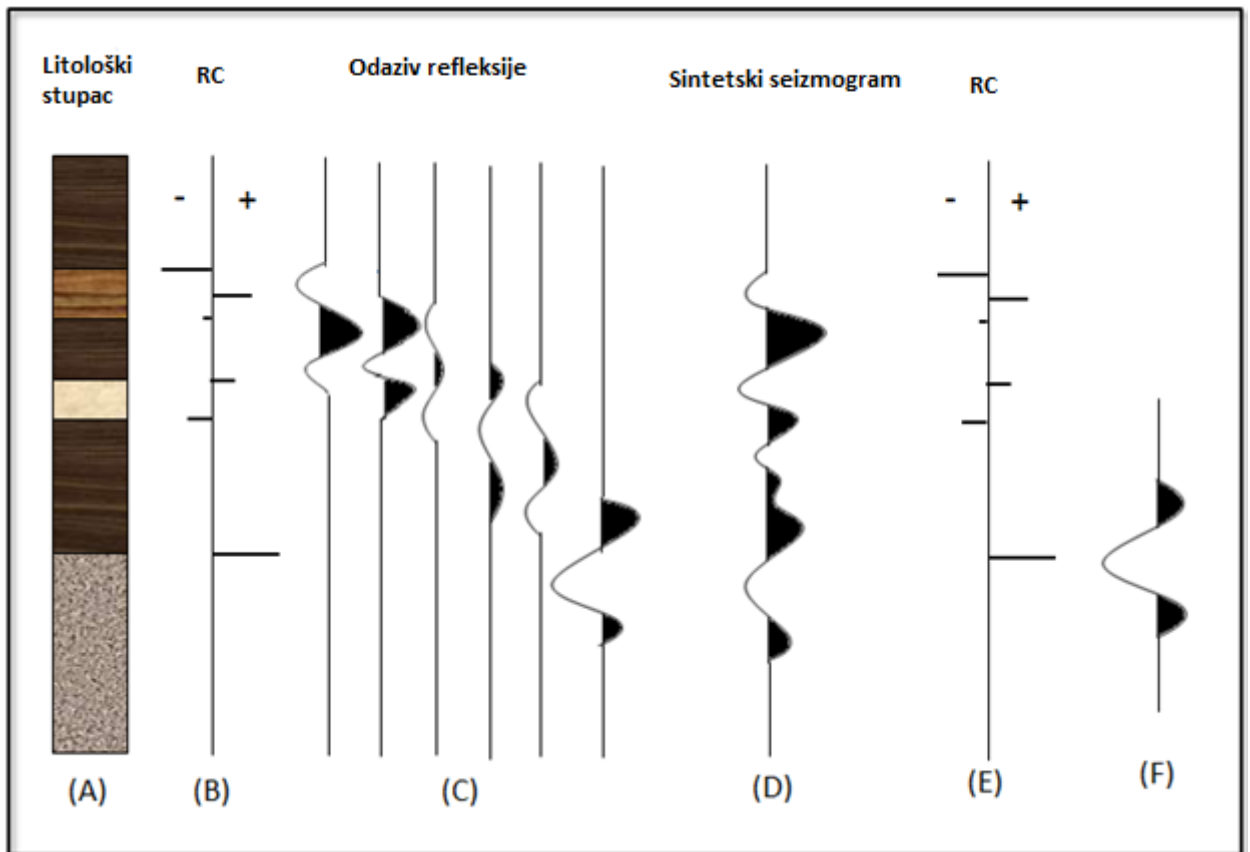
Slika 3-6. Tipični primjeri ležišnih režima *Bright Spot* i *Dim Spot*

Istraživanje nafte predstavlja visoko rizičan te vrlo skup pothvat koji zahtjeva što preciznije geološke podatke o podzemlju uz što manje nesigurnosti. Interpretacija seizmičkih podataka omogućuje definiranje ulaznih podataka za geološki model potreban u istraživanju ležišta ugljikovodika.

Nadalje, vrste seizmičkih interpretacija mogu varirati ovisno o željenim ciljevima interpretacije kao i o vrsti, opsegu i kvaliteti dostupnih podataka. Tako na primjer, aktivnosti u sektoru istraživanja i eksploatacije ugljikovodika uglavnom započinju analizom seizmičkih i ostalih geofizičkih podataka nakon koje slijedi prva faza izrade istražnih bušotina. U slučaju pozitivne bušotine, seizmička mjerenja se ponavljaju, ali u većoj rezoluciji kako bi se utvrdile najpovoljnije lokacije u podzemlju za izradu ocjenskih bušotina. Ovisno o ekonomskim pokazateljima, ciklus se završava izradom proizvodnih i utisnih bušotina za interpretirano ležište.

4. SINTETSKI SEIZMOGRAM

Sintetski seizmogrami predstavljaju poveznicu između geoloških informacija, odnosno bušotinskih podataka u dubinskom mjerilu te seizmičkih podataka u vremenskom mjerilu. Slikom 4-1 prikazani su koraci izračunavanja sintetskog seizmograma. Odaziv svake granice litološkog stupa (A) na seizmičku energiju predstavljenu valićem (F) generira reflektirani val (C) čiji su amplituda i polaritet određeni kontrastom akustičnih impedancija kroz promatrani interval. Akustična impedancija koja je umnožak gustoće i seizmičke brzine je svojstvo litologije. Mjera akustičnog kontrasta je koeficijent refleksije (RC). On predstavlja razliku između dvije akustične impedancije podijeljene s njihovom sumom. Reflektirana energija duž litološkog stupca (A) prikazana je serijom koeficijenata refleksije (B i E). Konačni sintetski seizmogram predstavlja sumu pojedinačnih reflektiranih impulsa od kojih je svaki rezultat valića i koeficijenta refleksije.



Slika 4-1. Koraci izrade sintetskog seizmograma

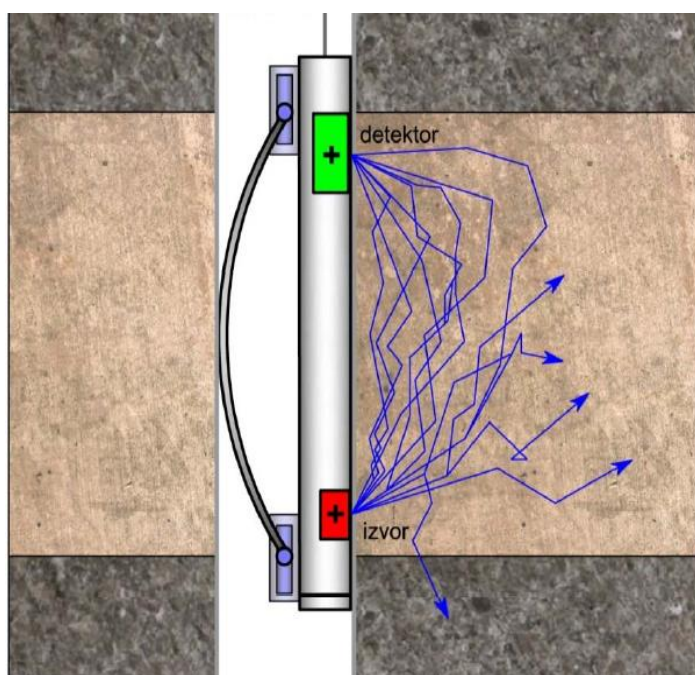
Izrada sintetskog seizmograma (*Petrel, 2014*) opisana u koracima glasi :

1. Uspostavljanja odnosa vrijeme-dubina.
2. Izračunavanje akustičnih impedancija i koeficijenata refleksije iz bušotinskih mjerenja, karotaže gustoće te zvučne karotaže,
3. Generiranje ili ekstrahiranje valića,
4. Izračunavanje sintetskog seizmograma na temelju ulaznih podataka koji proizlaze iz karotaže gustoće, zvučne karotaže i seizmičkog valića izračunavanjem akustične impedancije i koeficijenata refleksije koji su zatim konvoluirani korištenjem valića.

Osim što omogućuje povezivanje litoloških granica sa seizmičkim horizontima, sintetski seizmogram također služi za stvaranje precizne veze vrijeme-dubina, pomaže pri razumijevanju seizmičkog odaziva litologije i fluida na lokaciji bušotine te faznih karakteristika seizmičkih podataka. Zbog svega navedenoga, od iznimnog je značaja objasniti sve pojedine segmente u izradi sintetskog seizmograma.

4.1. Karotaža gustoće

Karotaža gustoće ili gama-gama karotaža, temelji se na emitiranju gama zračenja uz pomoć sonde (slika 4-2) koja se obično sastoji od izvora gama zračenja te jednog ili više detektora gama zraka. Kao izvor gama zraka najčešće se koriste kobalt-60 ili cezij-137. Nakon bombardiranja stijene gama fotonima iz izvora, energija se dalje u obliku gama zračenja širi kroz stijenu. Prilikom prolaska kroz stijenu dio gama fotona će biti apsorbiran, dio će zbog prevelike brzine biti emitiran dalje od detektora, dok će dio biti usporen i detektiran na brojaču na sondi.



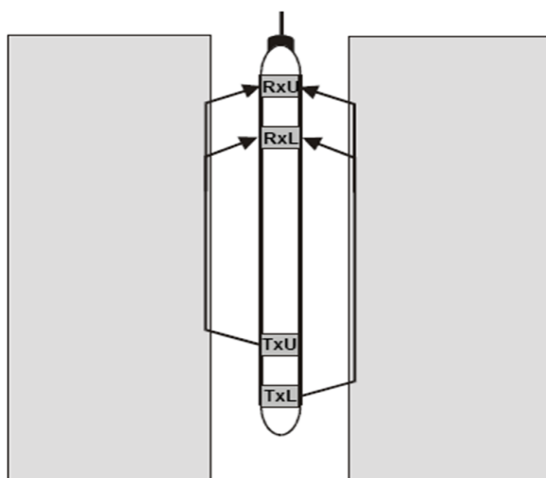
Slika 4-2. Sonda za karotažu gustoće

Gama zrake kroz stijenu gube dio vlastite energije, odnosno dolazi do prigušenja intenziteta gama zraka, budući da energija u stijeni međudjeluje s elektronskim oblacima u atomima na tri načina: Comptonovim raspršenjem, fotoelektričnim efektom kao i stvaranjem para elektron-pozitron. To za posljedicu ima smanjenje energije gama zračenja registriranog na detektoru. Smanjenje energije ovisi o elektronskoj gustoći stijene koja je proporcionalna s volumnom gustoćom stijene.

Karotažna krivulja volumne gustoće koristi se prilikom izrade sintetskog seizmograma, kao ulazni podatak pri izračunu akustične impedancije.

4.2. Zvučna karotaža

Podaci o brzini širenja zvučnog vala kroz podzemlje dobivaju se mjerenjem zvučnom karotažom. Određuje se zapravo vrijeme koje je potrebno elastičnom zvučnom valu da prijeđe udaljenost od odašiljača zvučnog vala do prijemnika smještenih na sondi (slika 4-3) u bušotini. Dvije su vrste prostornih seizmičkih valova čije se vrijeme putovanja kroz podzemlje može promatrati, longitudinalni ili P-valovi te transverzalni ili S-valovi. Sukladno prethodno navedenom navedenom poglavlju 2.1 upravo se longitudinalni ili P-valovi najčešće koriste prilikom refleksijskih kao i refrakcijskih seizmičkih istraživanja.



Slika 4-3. Sonda za zvučnu karotažu

Emitirana energija širi se iz odašiljača u obliku valova koji prvo prolaze kroz bušotinski fluid malom brzinom. Kada val stigne do stijenke bušotine dolazi do povećanja brzine kroz stijenu budući da je ušao u područje veće gustoće te do promjene pravca širenja vala (valna zraka se lomi). Cilj mjerenja zvučnom karotažom je određivanje svojstava stijene pa je bitno da je val koji prvi dolazi do prijemnika prošao upravo kroz stijenu. Stoga je od iznimnog značaja glavni val, odnosno val refraktiran pod kutom od 90° koji prolazi granicom dvaju sredstava. Upadni kut koji će uzrokovati refrakciju elastičnog vala pod kutom od 90° naziva se kritični kut, a najkraća udaljenost koja će omogućiti da glavni val stigne do prijemnika prije direktnog vala naziva se kritična udaljenost. Direktni val, za razliku od glavnog vala putuje izravno od odašiljača do prijemnika kroz isplaku manjom brzinom.

Kvalitetna bušotinska mjerenja su ključni element povezivanja bušotinskih i seizmičkih podataka. S druge strane, nekvalitetna bušotinska mjerenja mogu uzrokovati pogreške pri izračunavanju akustičnih impedancija što dovodi do negativnog utjecaja na intenzitet refleksije. Izrada sintetskih seizmograma zahtijeva kontinuirano i pouzdano mjerenje duž cijelog kanala bušotine. Nepouzdana mjerenja uzrokuju će pogreške prilikom konverzije vremena u dubinu ili u izračunatim odazivima samog sintetskog seizmograma. U većini slučajeva mjerene podatke je potrebno djelomično obraditi prije nego što će biti upotrijebljeni za izradu sintetskog seizmograma.

Najosjetljiviji ulazni podatak pri izradi sintetskog seizmograma je zvučna karotaža budući da problemi vezani uz nju značajno utječu na odnos vrijeme-dubina. Stoga je potrebno navesti najčešće uzročnike problema vezanih uz zvučnu karotažu:

1. Mala snaga izvora energije (odašiljač) - rezultira u odazivima niskih amplituda na prijemu što uzrokuje općenito lošu kvalitetu mjerenja.
2. Šumovi - tu spadaju šumovi visoke frekvencije nastali pomicanjem sonde po kanalu bušotine što rezultira nasumičnim promjenama amplitude (visokog intenziteta) koje se moraju ručno ukloniti.
3. Smanjena amplituda zvučnog vala zbog:
 - male seizmičke brzine kroz stijenu duž kanala bušotine: energija se konstantno refraktira nazad prema kanalu bušotine tijekom prolaska vala što uzrokuje dulje vrijeme putovanja vala,
 - velika šupljikavost: npr. na malim dubinama gdje je slaba međuzrnska povezanost energija se prenosi na fluid u porama kroz koji se val sporije širi,
 - sadržaj gline: mjerenjima u laboratorijima utvrđeno je smanjenje amplitude akustičnog vala pri širenju kroz slojeve s malim udjelom gline,
 - tanki slojevi: refleksija i refrakcija vala na granicama slojeva usporava val,
 - oštećenja pri bušotinske zone: bušaći fluidi mogu uzrokovati oštećenja pri bušotinske zone smanjujući brzinu širenja vala kroz sloj i uzrokujući refleksiju i refrakciju vala kako on prolazi kroz oštećenu zonu,
 - necentrirana sonda u kanalu bušotine: nepravilno postavljena sonda utječe značajno na odziv,

- pukotine: zvučni valovi nailaskom na fluidom ispunjene pukotine gube dio energije,
- ugljikovodici: plin u stijenama velike poroznosti uzrokuje značajno usporavanje zvučnog vala rezultirajući neobično velikim vremenima putovanja vala.

Iz svega navedenoga može se zaključiti da je od velikog značaja provesti kvalitetna i kontinuirana mjerenja zvučne karotaže čiji će rezultati predstavljati reprezentativne ulazne podatke pri izradi sintetskih seizmograma. Osim toga, važno je i dobro interpretirati mjerenja zvučne karotaže u smislu prepoznavanja anomalija i korigiranja, na način da se uklonjene anomalije zamjene podacima dobivenim interpolacijom između intervala pouzdanih mjerenih rezultata.

4.3. Koeficijent refleksije i transmisije

Koeficijent refleksije pokazuje koliki je dio ulazne energije reflektiran na granici sloja te se izračunava na svakoj granici slojeva. Svaki koeficijent refleksije definiran je amplitudom i predznakom, a vrijednosti se kreću u rasponu od -1 do 1. Preciznije, koeficijent refleksije predstavlja omjer amplituda reflektiranog i upadnog vala. Budući da se amplitude mogu iskazati pomoću akustičnih impedancija, može se reći da koeficijent refleksije ovisi o akustičnim impedancijama.

$$RC = \frac{A_1}{A_0} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{V_2 \rho_2 - V_1 \rho_1}{V_2 \rho_2 + V_1 \rho_1} \quad (4-1)$$

gdje je: RC - koeficijent refleksije,
 Z_1, Z_2 - akustična impedancija, gornji i donji sloj,
 A_0, A_1 - amplituda upadnog, tj. reflektiranog vala,
 V_1, V_2 - brzina P – vala u gornjem i donjem sloju [m/s],
 ρ_1, ρ_2 - gustoća gornjeg, tj. donjeg sloja [kg/m³].

Prolazeći kroz različite slojeve seizmički valovi se šire različitim brzinama zbog razlike u gustoći slojeva (stijenska masa i fluidi). Razlika u brzinama seizmičkih valova

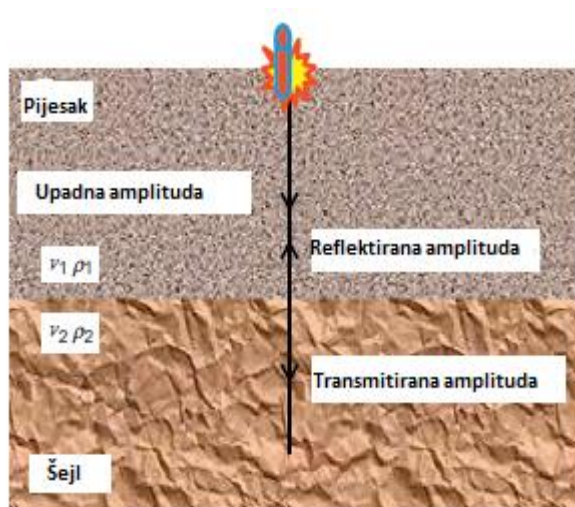
podrazumijeva i različite vrijednosti akustičnih impedancija. Ovaj kontrast akustičnih impedancija uzrokovat će refleksiju energije valne fronte seizmičkih valova koja će se očitovati kroz promjene unutar serije koeficijenata refleksije. U programskom paketu *Petrel* moguće je modeliranje koeficijenata refleksije na način da se uključivanjem/isključivanjem pojedinih koeficijenata refleksije izračunavaju novi, parcijalni sintetski seizmogrami.

Koeficijent transmisije (slika 4-4) opisuje amplitudu refraktiranog vala, a predstavljen je jednadžbom :

$$T = \frac{A_2}{A_0} = \frac{2V_1\rho_1}{V_2\rho_2 + V_1\rho_1} \quad (4-2)$$

gdje je :

- T -koeficijent transmisije,
- A_2 -amplituda refraktiranog vala,
- V_1, V_2 - brzina P – vala u gornjem i donjem sloju [m/s],
- ρ_1, ρ_2 - gustoća gornjeg, tj. donjeg sloja [kg/m³].



Slika 4-4. Grafički prikaz koeficijenta transmisije (preuređeno iz Onajite, 2014)

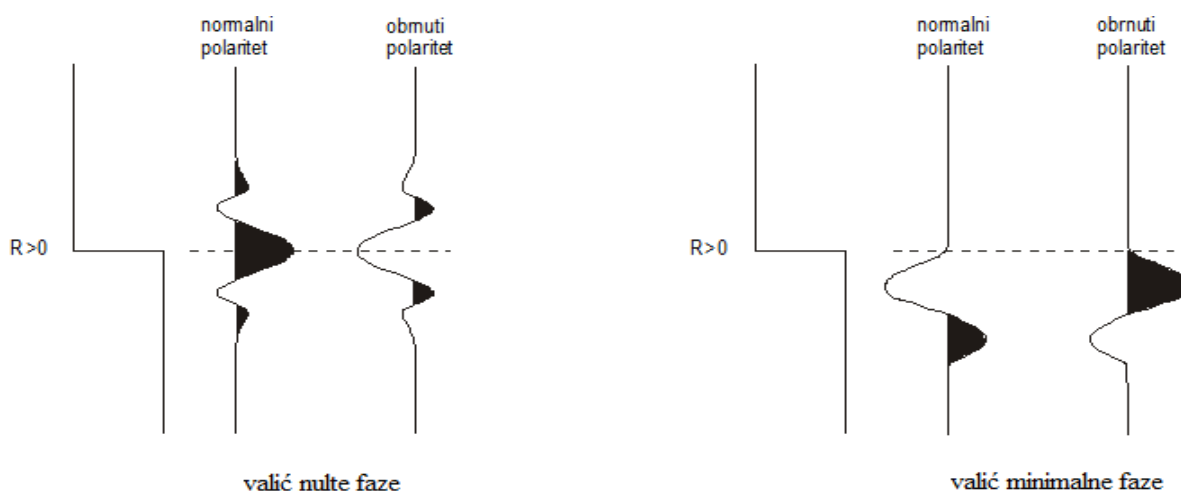
Koeficijent transmisije može se povezati s koeficijentom refleksije kao $1+RC$ (gdje je RC koeficijent refleksije), što znači da će pri prelasku u stijene veće čvrstoće (npr. iz pješčenjaka u šejl), amplituda refraktiranog vala koji je prošao dalje u podzemlje biti veća od amplitude upadnog vala. Tomu je tako jer se amplituda refraktiranog vala određuje u drugačijem sloju od upadnog i reflektiranog vala. Nadalje, pozitivan predznak u prethodnoj jednadžbi rezultat je smjera upadnog vala koji ide odozgo prema dolje, što znači da će koeficijent transmisije

za slučaj upadnog vala koji nailazi odozdo iznositi $1-RC$. Uzimajući u obzir prethodno navedene činjenice, izraz za koeficijent transmisije i dvostrukog vremena putovanja je:

$$(1 - RC) \cdot (1 + RC) = 1 - RC^2 \quad (4-3)$$

4.4. Valić

Valić je jednodimenzionalni impuls koji prikazuje oblik refleksa koji se dobije od jednog reflektora s pozitivnim koeficijentom refleksije, u slučaju okomitog upadnog vala. Dva se osnovna tipa ulaznih impulsa koriste u seizmičkim istraživanjima, valić nulte faze te valić minimalne faze (slika 4-5). Valić nulte faze (nema faznog pomaka) ima najveću vrijednost energije u nultom vremenu pa će stoga u toj točki i njegova amplituda biti maksimalna. Za razliku od valića nulte faze, valić minimalne faze svoju najveću energiju ima sadržanu u prvom dijelu valića te je za negativne vrijednosti vremena energija valića jednaka nuli. Sukladno SEG-konvenciji, za valić nulte faze u slučaju pozitivnog koeficijenta refleksije, standardni polaritet predstavljen je brijegom u točki simetrije. Standardni polaritet za valić minimalne faze predstavlja pomak vala prema dolje, odnosno negativnu vrijednost.



Slika 4-5. Valić nulte i minimalne faze (Sheriff i Geldart, 1995)

U računalnom paketu *Petrel*, modul *Wavelet Toolbox* nudi četiri metode za izradu valića: analitičku, determinističku, statističku te metodu usrednjavanja. Analitička kao i deterministička metoda sadrži i dodatne algoritme.

4.4.1. Metode izračunavanja valića

Valići dobiveni analitičkom metodom su jednostavni standardizirani modeli valića, kao što su valići *Ricker*, *Ormsby*, *Butterworth* ili *Klauder*. Najčešće korišten je *Ricker*-ov valić koji je također, među ostalima u analitičkoj metodi, izabran i pri izradi sintetskih seizmograma u ovom radu. *Ricker*-ov valić je simetričan valić nulte faze s maksimalnom amplitudom u nultom vremenu. Glavni ulazni podatak za valić je središnja frekvencija. Spektar frekvencija i faza su isključivo funkcije ulazne frekvencije. Najčešće je korišten valić u ovoj metodi-

Determinističke korekcije obično se primjenjuju za ispravljanje neusklađenosti faza između snimljenih seizmičkih podataka i sintetskog seizmograma izračunatog iz bušotinskih mjerenja. Dostupna su tri algoritma za determinističku metodu izrade valića: *Extended White*, *ISIS Frequency* te *ISIS time*. Pri izradi sintetskih seizmograma u ovom slučaju korištena je metoda *Extended White*. Konceptualno, ova metoda rastavlja problem povezivanja sintetskih podataka uz stvarne rezultate seizmičkih mjerenja na dvije komponente:

- utvrđivanje optimalnog vremenskog pomaka između reflektiranog vala izračunatog iz bušotinskih mjerenja i seizmičkih mjerenja,
- utvrđivanje dominantne faze.

Statistička metoda se može koristiti za procjenu valića iz samih seizmičkih podataka. Statistička metoda ekstrakcije pretpostavlja da valić može biti aproksimiran koristeći skraćenu autokorelaciju seizmičkog traga. Uzima se prosječna autokorelacija iz mnogo seizmičkih tragova kako bi se dobili reprezentativni rezultati. Također je moguće odrađivanje statističke korekcije iako u bušotini nije izmjerena zvučna karotaža. Seizmička metoda transformira autokorelaciju svih ulaznih seizmičkih tragova u frekvencijsku domenu, izračunavajući prosječni spektar, i onda inverzno transformira prosječni spektar u određenu fazu. Takvi valovi su po definiciji valovi nulte faze. Metoda je korisna kada je kvaliteta seizmičkih podataka visoka, dok je kvaliteta serije seizmičkih refleksa niska.

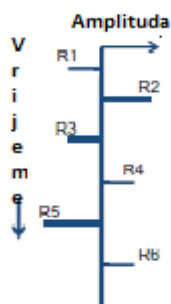
Metoda usrednjavanja računa srednji valić iz skupa valića koji su odabrani. Moguće je definirati duljinu (izlazna duljina usrednjenog valića automatski se uzima kao najveća duljina ulaznog valića) usrednjenog valića te također postoji dodatna mogućnost inverzije

polariteta krajnjeg valića. Algoritam usrednjavanja može se koristiti za analitičke, determinističke kao i statističke valiće.

4.5. Konvolucija

Iz bušotinskih mjerenja, karotaže gustoće i zvučne karotaže, mogu se konstruirati litološke promjene kao što je promjena iz pijeska u šejl. Produkt brzine i gustoće, dobivenih iz krivulja karotažnih mjerenja, daje akustičnu impedanciju. Seizmička refleksija javlja se kada postoji kontrast u akustičnim impedancijama duž granice sloja. Iz mjerenja akustičnih impedancija računa se koeficijent refleksije za svaki reflektirani sloj u podzemlju. Nadalje, koeficijenti refleksije formiraju serije refleksa koji se mogu prikazati u vremenskom ili dubinskom mjerilu.

Odziv podzemlja je skup impulsa s amplitudom proporcionalnom koeficijentu refleksije za svaki reflektor i vremenu pojavljivanja jednakom dvostrukom vremenu putovanja reflektiranog vala (slika 4-6).



Slika 4-6. Serija koeficijenata refleksije za svaki reflektor (Onajite 2014)

Prilikom seizmičkih mjerenja, površinski valić emitiran u podzemlje konvoluiru sa serijom refleksa iz podzemlja te se bilježi seizmički trag. Ovaj proces korišten za dobivanje seizmičkih tragova naziva se konvolucija.

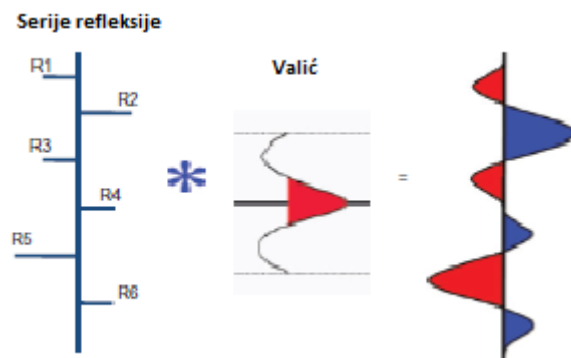
(4-4)

Matematički, konvolucija se može izraziti kao:

$$y(t) = w(t) * RC(t)$$

gdje je: $y(t)$ - *sintetski sezmogram*,
 $w(t)$ - *inicijalni valić*,
 $RC(t)$ - *koeficijent refleksije*.

Matematički postupak konvolucije označava se znakom zvjezdice (*), a on u pravilu znači da je dobivene seizmičke tragove koji odgovaraju jednakom vremenu, potrebno zbrojiti. Drugčije rečeno, konvolucija je operacija koja opisuje interakciju između ulaznog impulsa (površinski valić) i sustava (koeficijenti refleksije podzemlja) kako bi se dobio seizmički trag (slika 4-7).



Slika 4-7. Slikoviti prikaz konvolucije (preuređeno iz Onajite, 2014)

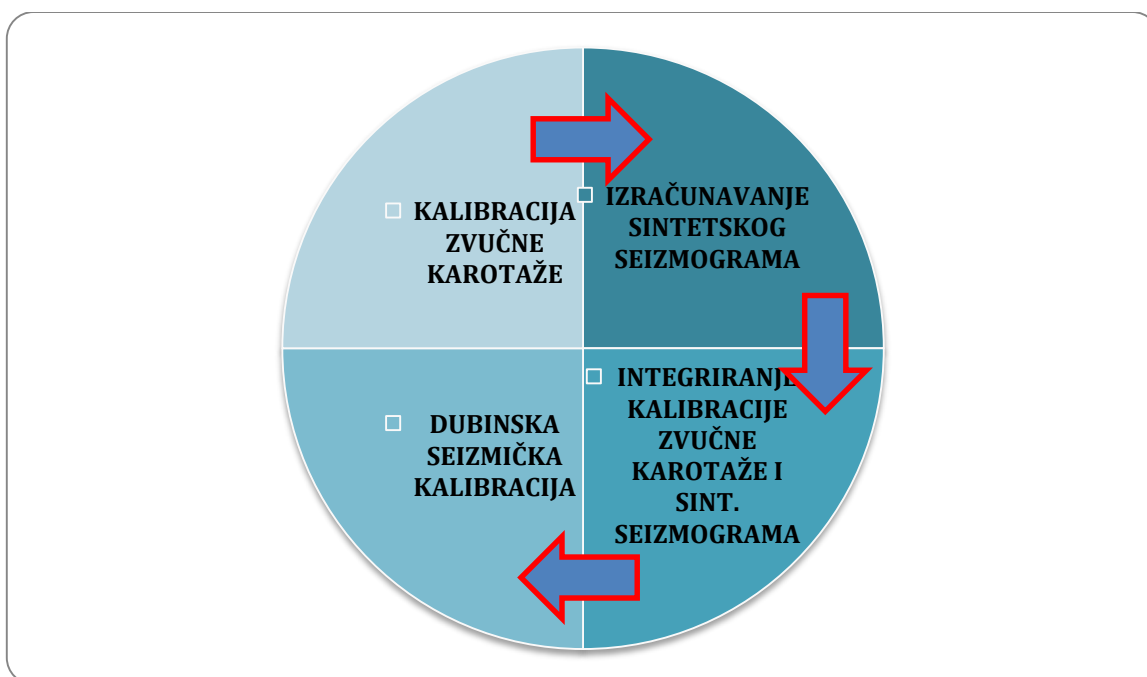
5. REZULTATI

5.1. Izračunavanje sintetskog seizmograma u programu *Petrel*

U računalnom programu *Petrel* izračunati su sintetski seizmogrami za plinsko polje Katarina te naftno-plinsko polje Stružec uz interpretaciju dvaju seizmičkih horizonata. Iako je u prethodnim poglavljima rada objašnjen tijekom izračunavanja sintetskog seizmograma, potrebno ga je dodatno pojasniti sa stajališta računalnog programa *Petrel*.

Proces izrade sintetskog seizmograma u računalnom programu *Petrel* sastoji se od četiri temeljna koraka (slika 5-1):

1. Kalibracija zvučne karotaže,
2. Izračunavanje sintetskog seizmograma
3. Integriranje kalibracije zvučne karotaže i sintetskog seizmograma
4. Dubinska seizmička kalibracija



Slika 5-1. Proces izrade sintetskog seizmograma u računalnom programu *Petrel*

Radi potpunog razumijevanja procesa kalibracije zvučne karotaže, nužno je objasniti mjerenje zakona brzina (eng. *Check Shot*).

5.1.1. Mjerenje zakona brzina

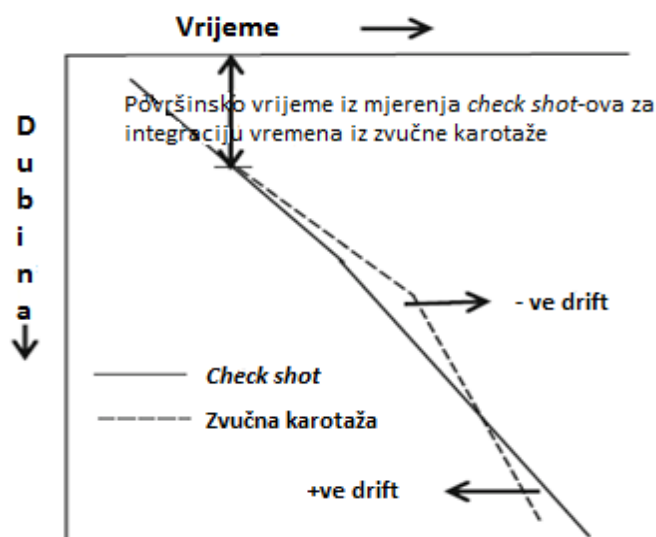
Zakon brzina pokazuje ovisnost brzine širenja elastičnog vala o dubini. Mjerenje zakona brzina (*Check Shot* u programu Petrel) se provodi kako bi se izmjerila stvarna prosječna brzina u ovisnosti o dubini, potrebna za pretvorbu snimljenih vremena nailazaka reflektiranih valova u dubinsko mjerilo, odnosno bušotinskih podataka u vremensko mjerilo. Izvor valova se nalazi na površini i bilježe se prvi nailasci valova na geofonima koji su raspoređeni duž bušotine. Izvor energije (valova) smješta se što je bliže moguće ušću bušotine (poželjno vertikalne) kako bi put valova bio vertikalno dolje, tj. izravno prema geofonima. Dubinski razmak između geofona/prijemnika odabire se na način da se postave u blizinu značajnih i izraženih litoloških granica kako bi mjereni podaci brzina bili što pouzdaniji. Uobičajeni razmak između geofona je od 75 do 150 metara (Brewer, 2002), ali ovisi o usuglašavanju dvaju međusobno kontradiktornih faktora: željenoj rezoluciji mjerenja na više dubinskih točaka te dodatnim troškovima zbog zastoja u radu bušačkog postrojenja. Podaci dobiveni mjerenjem, osim za pretvorbu vremena u dubinu, imaju ulogu pri korigiranju brzina mjerenih zvučnom karotažom koje se koriste za izradu sintetskih seizmograma. Korigirane brzine iz zvučne karotaže omogućuju preciznu procjenu intervalnih brzina čak i za tanke slojeve što nije izvedivo samim mjerenjem zakona brzina zbog vremenskih i financijskih ograničenja.

5.1.2. Razlika brzina mjerenih zvučnom karotažom i srednjih brzina

Mjerenjem zakona brzina (*Check Shot*) i zvučnom karotažom mjere se dvije temeljno različite brzine. Pri mjerenju zakona brzina mjeri se stvarna vertikalna (srednja) brzina u blizini bušotine dok se zvučnom karotažom mjere promjene u intervalnim brzinama stijena uz kanal bušotine. Općenito, mjerena srednja brzina razlikuje se od srednje brzine koja je izvedena iz zvučne karotaže, i to iz više razloga. Prvenstveno mjerenja značajno variraju u frekvencijama. Dok mjerenje seizmičkih brzina koristi frekvencije u rasponu od 5 do 125 Hz, pri izvođenju zvučne karotaže koriste se frekvencije izvora u rasponu od 2 do 20 kHz što je znatno više (Bulant i Klimes, 2008). Uzimajući u obzir da više frekvencije stvaraju veće brzine zbog efekta disperzije, zvučna karotaža rezultira većim brzinama nego seizmička mjerenja. Nadalje, princip širenja valova i volumeni zahvaćeni mjerenjem su vrlo različiti; volumen stijena kroz koji se šire seizmički valovi je znatno veći i može se rasprostirati kroz

različite facijese (Thomas, 1978; Stewart i dr., 1984) za razliku od malog volumena stijena koji je zahvaćen zvučnom karotažom. Treba uzeti u obzir i utjecaj anizotropije jer se seizmičke brzine mogu razlikovati 5-20 % u horizontalnom i vertikalnom smjeru (Helbig & Thomsen, 2005). Kada su seizmičke brzine usrednjene duž horizontalne udaljenosti kroz koju seizmička energija putuje te je uključena apsorpcija energije, rezultat će biti niže seizmičke brzine, jer se ovi utjecaji ne pojavljuju u zvučnim mjerenjima. No utjecaj anizotropije na zvučnu karotažu će se javiti u slučaju usmjerene bušotine. Također, pukotine prisutne u stijenama kroz koje se širi val uzrokuju niže seizmičke brzine s obzirom na smanjenje volumnog modula elastičnosti, dok brzine dobivene iz zvučne karotaže ostaju gotovo nepromijenjene budući da se valovi šire brže kroz matriks medija izbjegavajući tako šupljine. Iako se brzine dobivene iz zvučne karotaže uobičajeno smatraju većima od onih dobivenih iz seizmičkih mjerenja, ponekad mogu biti i manje kao što je u slučaju loših uvjeta u bušotini poput oštećenja pribušotinske zone, npr. zagađenje isplakom. Na kvalitetu zvučne karotaže mogu utjecati i pogreške pri mjerenju kao što je zaglava alata, zone ispiranja ili preskakanje ciklusa (Brewer, 2002). Preskakanje ciklusa je anomalija definirana izostankom prvog nailaska vala na jednom ili oba prijemnika. Ova anomalija često uzrokuje da dobivena brzina bude manja ili veća od stvarne.

Dakle, vrlo je važno izvesti usporedbu mjerenih seizmičkih brzina i onih izvedenih iz zvučne karotaže, odnosno kalibraciju zvučne karotaže. Razlika između vremena putovanja iz mjerenja zakona brzina (*Check Shot*) i integriranog vremena zvučne karotaže naziva se otklon (engl. *drift*). *Drift* je dinamičko svojstvo koje ima nelinearnu karakteristiku za zadani raspon dubina u bušotini (slika 5-2).



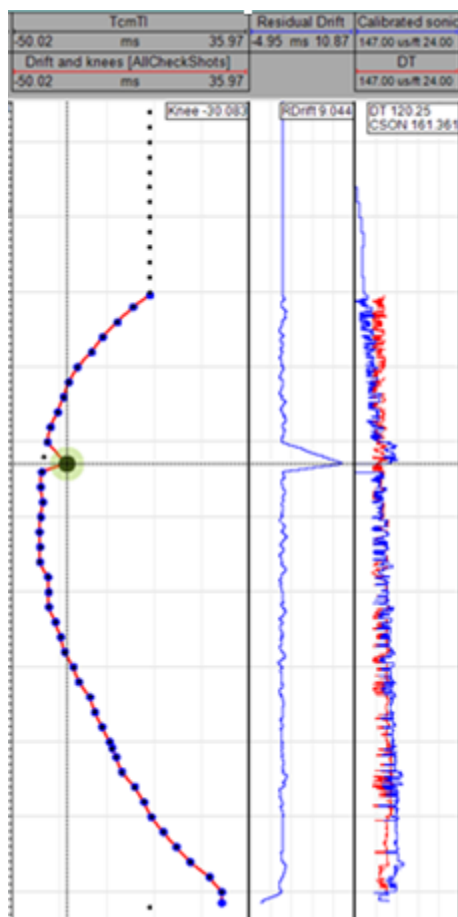
Slika 5-2. Prikaz drift-korekcije za zvučnu karotažu. Korekcija je pozitivna ako su vremena zvučne karotaže kraća, odnosno negativna ako su dulja u odnosu na stvarna vertikalna vremena putovanja vala iz zakona brzina (preuređeno iz Nanda, 2016)

Postojanje *drifta* iziskuje korekciju brzina dobivenih iz mjerenja zvučne karotaže prije nego što će se koristiti za izradu sintetskog seizmograma. Nadalje, zvučna karotaža ponekad se obavlja sa površine, zbog čega će na intervalno vrijeme razmatranog sloja biti nužno nadodati početno vrijeme potrebno da val stigne do referentne ravnine. Upravo iz mjerenja zakona brzina proizlazi informacija o vremenu kojeg treba nadodati kako bi se kalibrirala zvučna karotaža (Stewart i Disiena, 1989).

5.1.3. Kalibracija zvučne karotaže

Cilj kalibracije je definirati krivulju otklona (*drift*) koja će korigirati zvučnu karotažu na vrijednosti vremena putovanja vala izvedene iz podataka zakona brzina. Rezultat je tada kalibrirana zvučna karotaža. Postupak kalibracije u računalnom programu *Petrel* uključuje mogućnost interaktivne kalibracije zvučne karotaže i pregledavanja resultantne kalibrirane krivulje tijekom uređivanja (slika 5-3). Izbor tzv. "koljena" predstavlja korak u kojem se zvučna karotaža kalibrira prema kontrolnim točkama (*checkshot*). To je postignuto uklapanjem korekcijske krivulje s crnim točkama (koljena, engl. *knees*). Korekcijska krivulja (engl. *drift*), može se interaktivno mijenjati kako bi se optimizirala veza vrijeme-dubina ili kalibrirana krivulja zvučne karotaže. "Koljena" se mogu dodavati ili brisati te tako utjecati

na korekcijsku krivulju. Takve promijene odrazit će se i na krajnju kalibraciju zvučne karotaže.



Slika 5-3. Prikaz kalibracije zvučne karotaže u Petrelu. Korekcijska krivulja je u drugom stupcu, a krivulje u trećem stupcu su zvučna karotaža (crveno) i kalibrirana zvučna karotaža (plavo).

U procesu izrade kalibracijske krivulje zvučne karotaže bitno je postaviti referentnu ravninu (engl. *Datum*) za ulaznu datoteku, specificirajući za promatranu bušotinu da li je na kopnu ili na moru.

Prema konvenciji obrađeni seizmički podaci počinju u vremenu 0.0 sekundi. Ova referentna točka mora biti povezana s referentnom točkom nadmorske visine koja se zove seizmički referentni datum (SRD). U gotovo svim marinskim i mnogim mjerenjima na kopnu, SRD je postavljen kao konstantna vrijednost, odnosno ravna površina. U slučaju kada SRD nije ravna površina, tj. s različitim vrijednostima za svaki seizmički trag može se definirati dubina na kojoj zakon brzina (*checkshot*) prolazi kroz nulto vrijeme.

U slučaju marinskih mjerenja, nulto vrijeme je obično prilagođeno srednjoj razini mora (engl. *Mean Sea Level*), a seizmički referentni datum (SRD) je najčešće postavljen na nula metara iznad srednje razine mora. Kopneni slučajevi mogu biti znatno kompliciraniji zbog topografije terena i pojava u blizini površine koje nisu prisutne u slučaju marinske seizmike. U mnogim područjima, nepravilna debljina površinskih slojeva i nagla lateralna promjena brzina u njima, uzrokuju anomalije koje ne mogu biti adekvatno karakterizirane u modelu seizmičkih brzina.

5.1.4. Izračunavanje sintetskog seizmograma

Sintetski seizmogram nastaje kao krajnja suma individualnih reflektiranih impulsa, a svaki od kojih je produkt valića i koeficijenta refleksije, što je detaljnije objašnjeno u poglavlju Sintetski seizmogram (4).

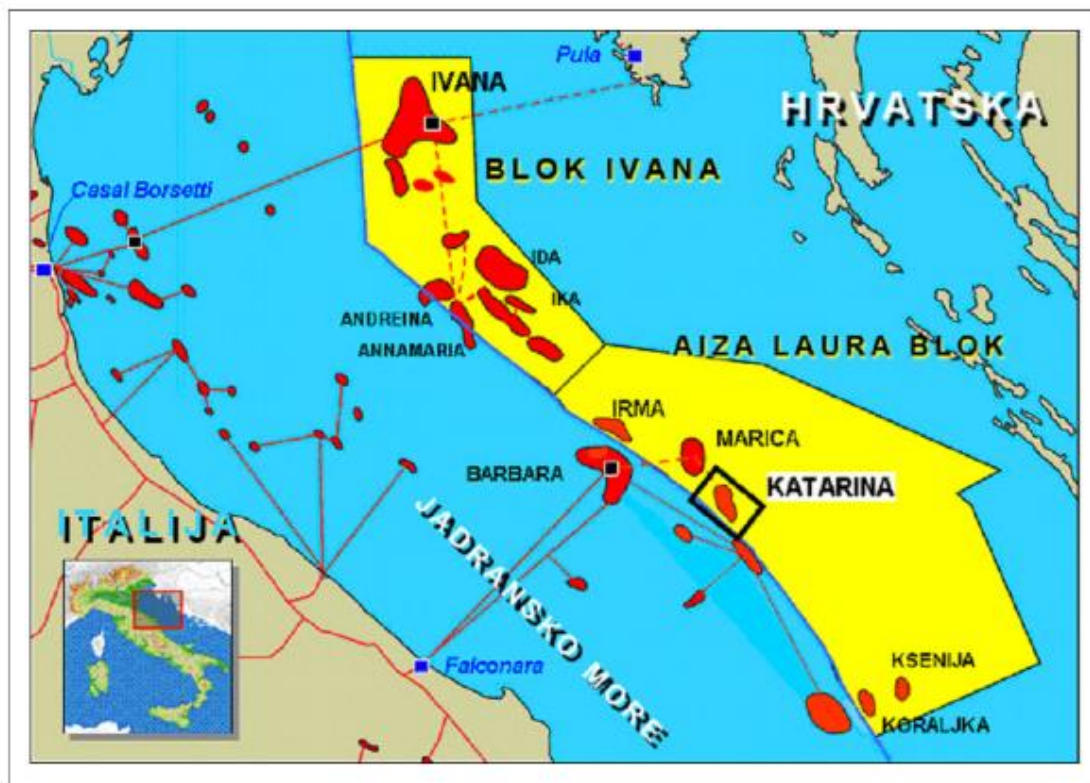
Ono što je važno spomenuti je tzv. alat korelacijske trake koji korisniku pruža programski paket *Petrel*. Korelacijska traka daje informacije kako poboljšati povezivanje sintetskih podataka uz stvarne rezultate seizmičkih mjerenja. Ovaj alat predstavljen je kao pomoć za poboljšanje rezultata računanjem unakrsne korelacije između sintetskih i seizmičkih podataka. Svaka traka na korelacijskoj krivulji predstavlja stupanj korelacije između sintetskog seizmograma i seizmičkih podataka.

5.1.5. Integrirana kalibracije zvučne karotaže i izračunatog sintetskog seizmograma

Integrirano povezivanje sintetskih podataka i snimljenih podataka seizmičkih mjerenja je proces u kojemu se može izvršiti kalibracija zvučne karotaže i generiranje sintetskog seizmograma koristeći isti prozor. Kao ulazni podaci koriste se kalibrirana krivulja zvučne karotaže te izračunati sintetski seizmogram. Bilo kakva promjena u kalibraciji zvučne karotaže, automatski će se odraziti i na sintetski seizmogram.

5.2. Plinsko polje Katarina

U središnjem dijelu jadranskog podmorja, točnije u bloku Aiza-Laura, nalazi se plinsko polje Katarina. Udaljeno 105 km od Zadra te 66 km od talijanske obale, plinsko polje Katarina skupa s plinskim poljem Marica čini eksploatacijsko polje Marica (slika 5-4). Istražno bušenje na polju Katarina započelo je 1989. godine. Na istom polju, prvotno izrađena bušotina Katarina 1, određena je negativnom bušotinom. Naime, pronađene količine ugljikovodika nisu bile ekonomski isplative. Godine 1997. hrvatska naftna kompanija INA te talijanska naftna kompanija AGIP udružile su se s ciljem zajedničkog istraživanja jadranskog podmorja. Iste godine obavljena su i prva seizmička snimanja. Ustanovljeno je postojanje potencijalnih komercijalno pridobivih količina ugljikovodika sjeveroistočno od bušotine Katarina 1. Posljedica toga bila je izrada nove bušotine nazvane Katarina 2. Njome je utvrđena prisutnost pet ležišta zasićenih plinom (Vidaček, 2005). Razradom ležišta utvrđen je optimalan broj bušotina te su prema tome izrađene tri bušotine (Vidaček, 2006): Katarina 1dir, Katarina 2dir te Katarina 3dir.



Slika 5-4. Položaj plinskog polja Katarina

5.2.1. Sintetski seizmogram za plinsko polje Katarina

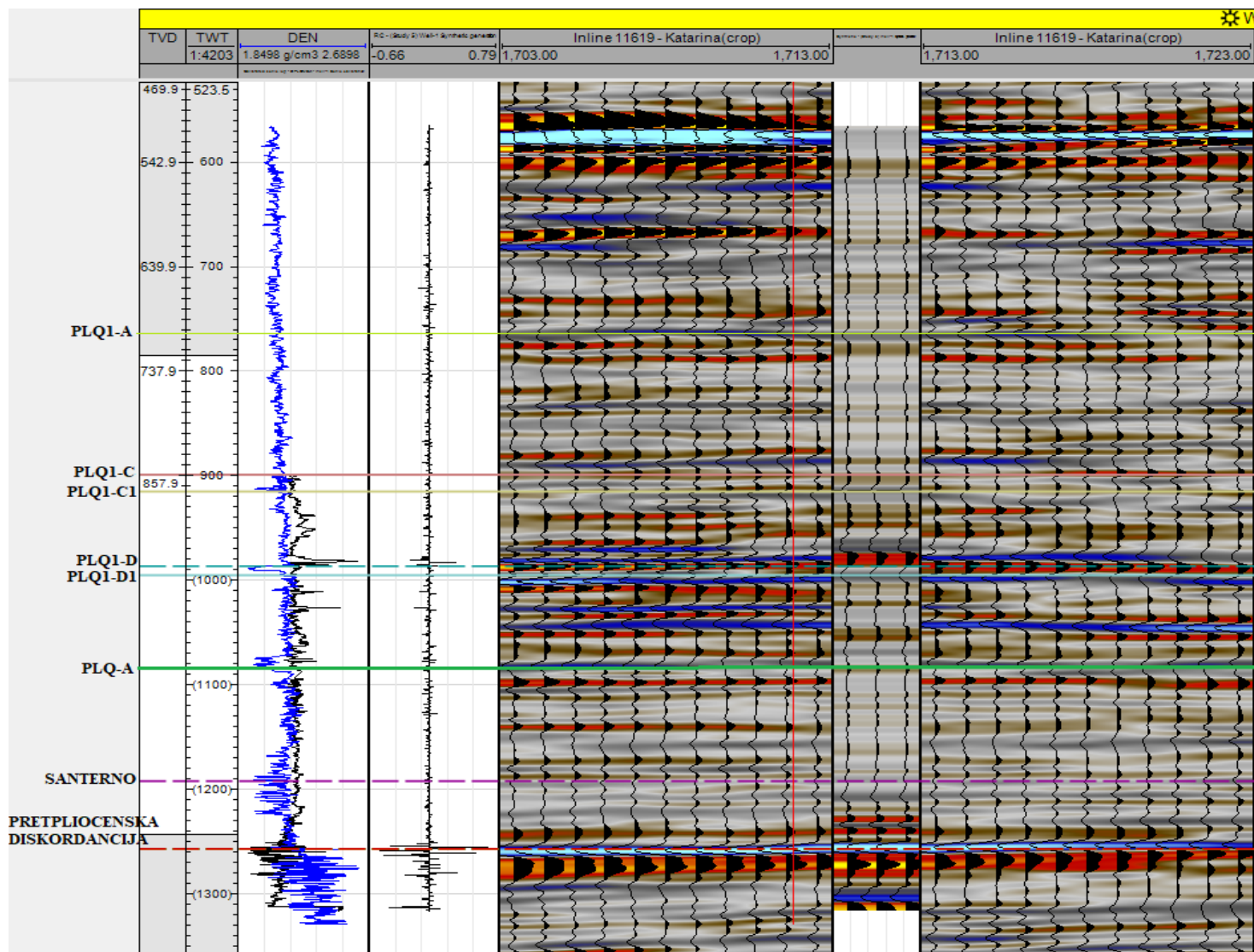
U bušotini Katarina 1 za izradu sintetskog seizmograma korištene su dvije vrste valića, kako bi se utvrdilo koji valić omogućava bolje poklapanje sintetskog seizmograma sa seizmičkim podacima:

1. *Extended White* valić (deterministički, slika 5-5),
2. Rickerov valić (analitički, slika 5-6).

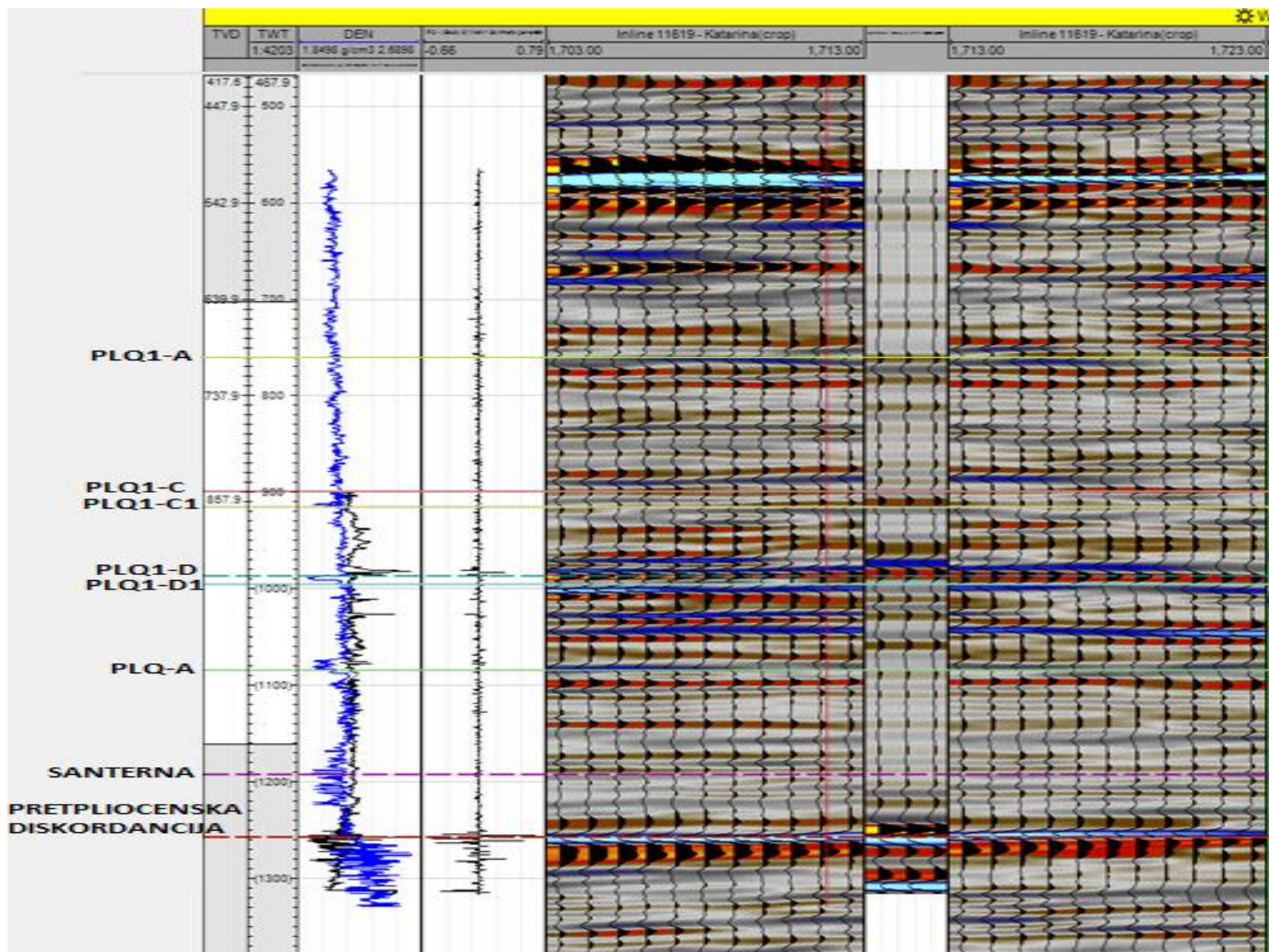
Izračunati sintetski seizmogram uspoređen je sa seizmičkim profilom preko bušotine za koju je izračunat sintetski seizmogram. Može se uočiti da je poklapanje izračunatog sintetskoga seizmograma sa seizmičkim podacima bolje pri upotrebi determinističkog, *Extended White* valića. To se očituje u sljedećim zaključcima:

Može se primijetiti odlično slaganje sa negativnim refleksom krovine PLQ1-A, što jednako vrijedi i za krovine PLQ1-C i PLQ1-C1 koje su predstavljene pozitivnim refleksima male amplitude. Za razliku od njih, krovina PLQ1-D predstavljena je jakim pozitivnim refleksom s kojim se sintetski seizmogram djelomično poklapa jer se na sintetskom seizmogramu nalazi 5-6 ms pliće. Dosta dobro poklapanje uočava se za krovinu PLQ1-D1 koja ja izražena

negativnim refleksom, ali je znatno manje izražena negativna amplituda. Jedino za krovinu PLQ-A nije uočeno poklapanje seizmičkih podataka sa sintetskim jer je na sintetskom seizmogramu iskazana blago pozitivnom amplitudom, dok je na seizmičkim podacima vidljiv blago negativan refleks. Prepliocenska diskordancije na otprilike 1260 ms odgovara jakom refleksu i u tom dijelu je postignuto vrlo dobro slaganje sa sintetskim seizmogramom.

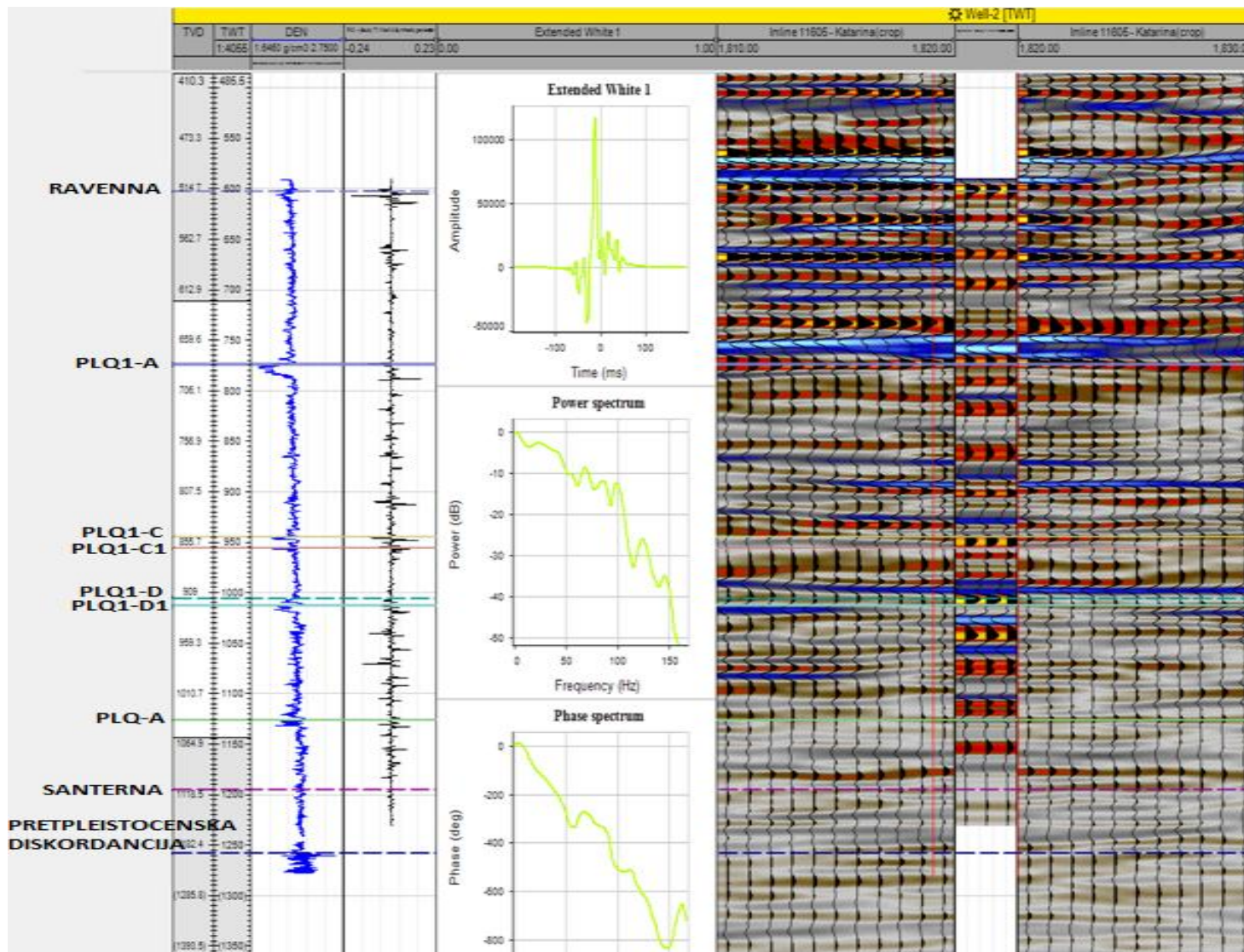


Slika 5-5. Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina 1 (deterministički valić, *Extended White*)



Slika 5-6. Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina 1 (analitički valić, Rickerov, 37 Hz)

Budući je za bušotinu Katarina 1, najbolje poklapanje postignuto upotrebom determinističkog, *Extended White* valića, isti je odabran i za izračunavanje sintetskog seizmograma za bušotinu Katarina-2 (slika 5-7). Vidljivo je dobro poklapanje sintetskog seizmograma za krovinu formacije Ravenna izraženu pozitivnim refleksom na 500 ms, a isto vrijedi i za krovinu ležišta PLQ1-A. Dobro je poklapanje pozitivnog refleksa krovine PLQ1-C sa sintetskim seizmogramom na 940 ms, a ispod koje je i krovina PLQ1-C1. Nadalje, djelomično poklapanje je dobiveno za krovinu PLQ1-D jer je ono predstavljeno refleksom slabe pozitivne amplitude, dok je na sintetskom seizmogramu amplituda izraženija. Krovina PLQ1-D1 poklapa se sa sintetskim seizmogramom budući da leži tik ispod vidljivih pozitivnih refleksa. S druge strane, krovinu Santerna nije moguće povezati sa sintetskim seizmogramom, dok prepliocenska diskordancija nije obuhvaćena sintetskim seizmogramom budući da nije nabušena bušotinom Katarina-2.



Slika 5-7. Sintetski seizmogram za bušotinu Katarina 2 (deterministički valić, *Extended White*)

5.2.2. Praćenje seizmičkog horizonta plinskog polja Katarina

Na temelju refleksijskih seizmičkih mjerenja na plinskom polju Katarina obavljena je interpretacija, tj. praćenje horizonta PLQ-A. Kako bi se pristupilo praćenju horizontata koriste se sljedeći ulazni podaci:

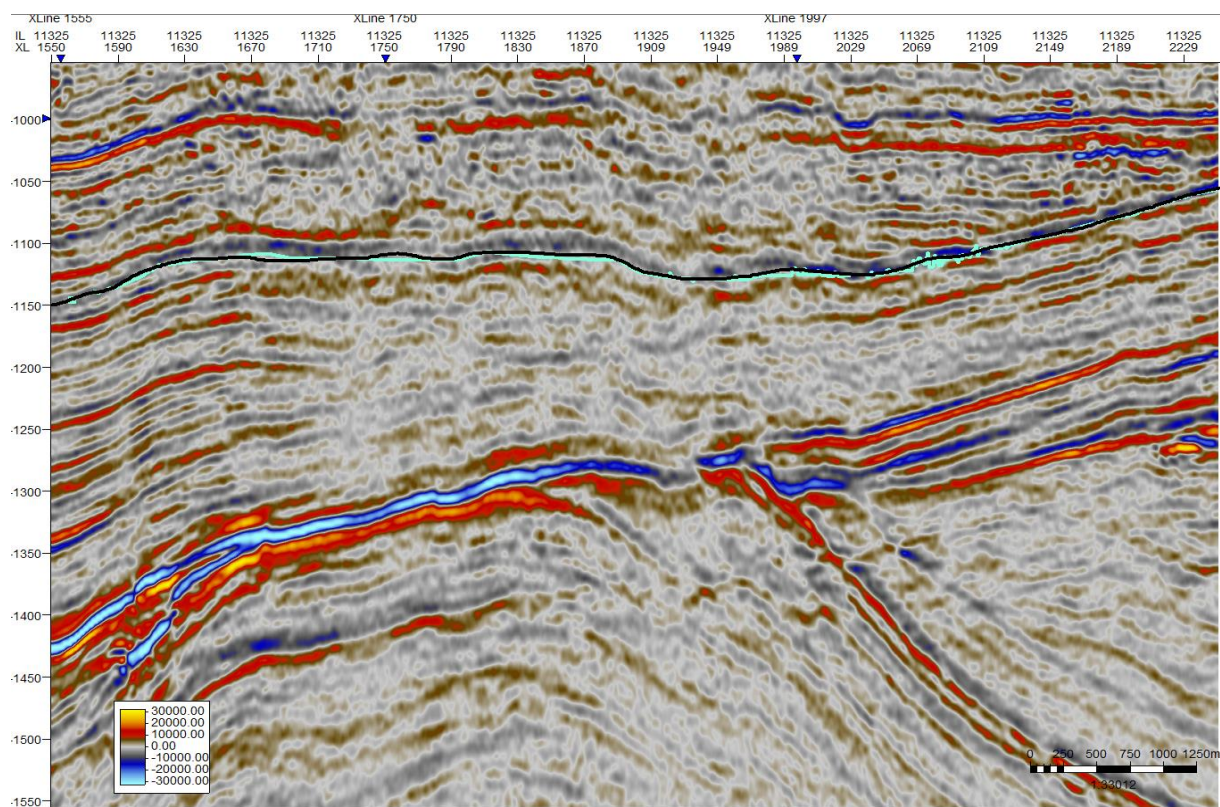
1. seizmički podaci (3D refleksijska mjerenja u formatu SEG-Y)
2. bušotinski podaci (dubine litoloških granica u bušotini, engl. *Well Tops*)

Zbog potrebe pretvorbe dubinskog mjerila litoloških granica u bušotini u vremensko mjerilo jer se seizmički podaci nalaze u vremenskom mjerilu nužan je zakon brzina, tj. zakon prema kojem se brzine seizmičkih valova mijenjaju s promjenom dubine. Zakon brzina zapravo predstavlja skup intervalnih brzina, odnosno brzina koje su proizašle iz različitih vremena nailaska do geofona na različitim dubinama.

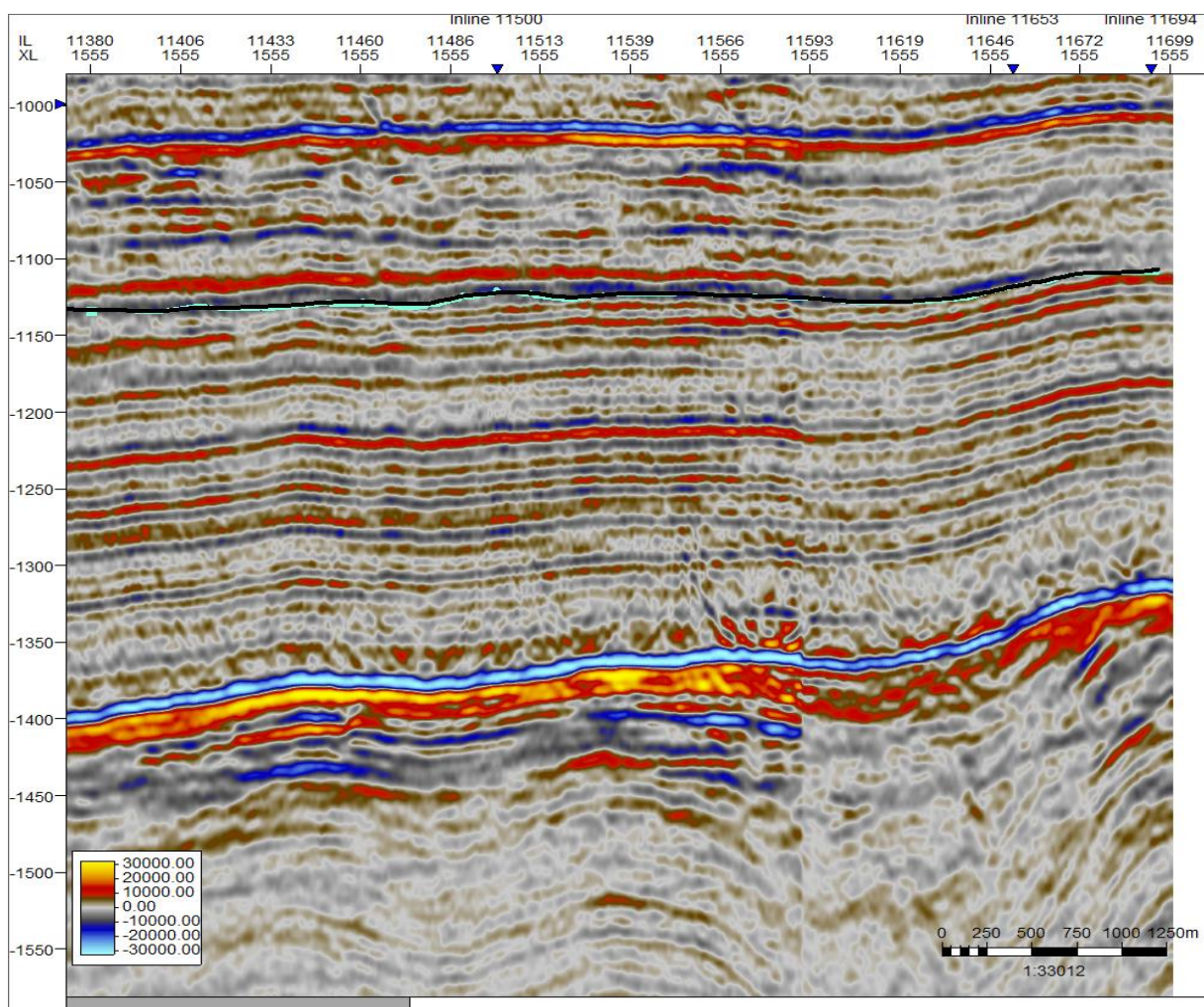
U računalnom programu *Petrel*, seizmički se podaci mogu prikazati na više načina:

1. Dvodimenzionalno (2D) gdje su tlocrtno prikazani uzdužni (*inline*) i poprečni (*crossline*) profili seizmičkih mjerenja
2. Trodimenzionalno (3D) gdje je Z os izražena u mili-sekundama, a označava dvostruko vrijeme putovanja vala, dok X i Y os predstavljaju geografsku širinu odnosno dužinu u metrima

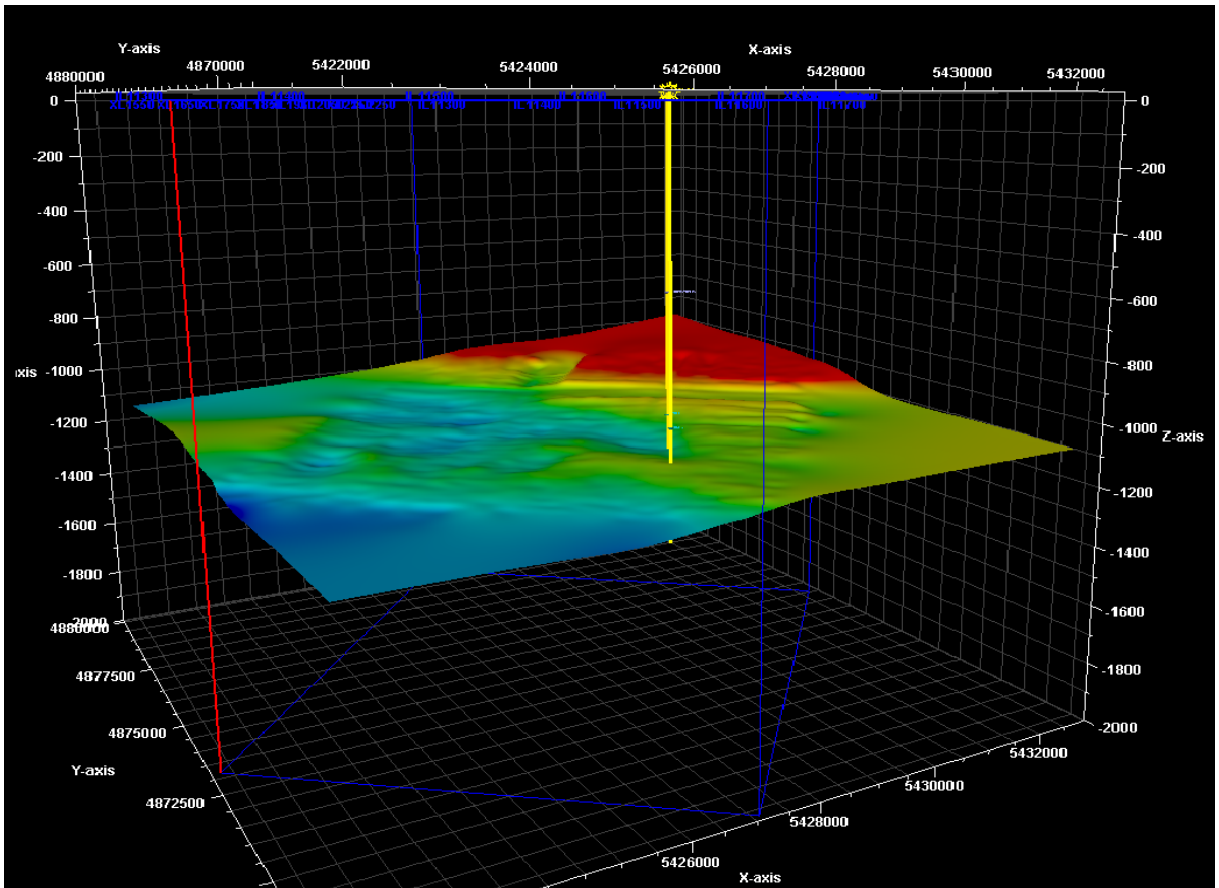
Postupak praćenja horizonta započinje identifikacijom istog tog horizonta na uzdužnom ili poprečnom presjeku unutar kojeg se nalazi i bušotina budući da imamo točne podatke o litološkim granicama u bušotini. Sintetski seizmogram omogućava povezivanje seizmičkih refleksa s litološkim granicama (horizontima). Za slučaj plinskog polja Katarina, identificiran je horizont PLQ-A te je napravljena interpretacija što podrazumijeva promatranje istog refleksa za različite presjeke. Uzdužni i poprečni presjeci sa tirkiznom bojom označenom krovinom PLQ-A prikazani su slikama 5-8 i 5-9. Dakle, tirkizna boja predstavlja ručno interpretirani horizont. Kada se praćenje horizonta napravi za što je više moguće uzdužnih i poprečnih presjeka, potrebno je dotične linije pretvoriti u plohu. Kako bi se to ostvarilo, nužno je linije konvertirati u točke, od kojih će računalni program *Petrel* primjenom algoritma, interpolacijom kreirati plohu (slika 5-10). Novonastala ploha će biti vidljiva na svim uzdužnim i poprečnim presjecima kao crna linija (slike 5-8 i 5-9). Ta karakteristika je iznimno korisna jer pokazuje razliku između ručne (tirkizna boja) i računalne interpretacije (crna boja). Na temelju 3D prikaza plohe, dobije se strukturna vremenska karta (slika 5-11) , na kojoj se može podešavati željeni razmak između izobata, tj. linija koje povezuju točke istog vremena.



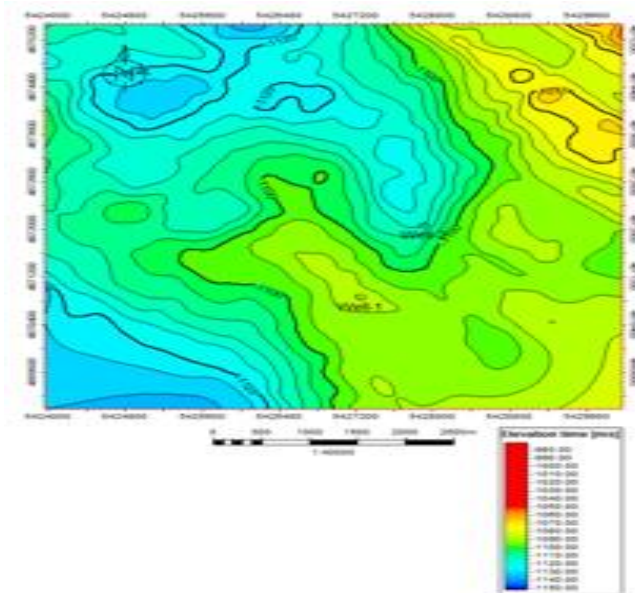
Slika 5-8. Uzdužni presjek 11325 za plinsko polje Katarina sa označenom krovinom PLQ-A (tirkizno i crno)



Slika 5-9. Poprečni presjek 1555 za plinsko polje Katarina sa označenom krovinom PLQ-A (tirkizno i crno)



Slika 5-10. 3D prikaz krovine PLQ-A plinskog polja Katarina

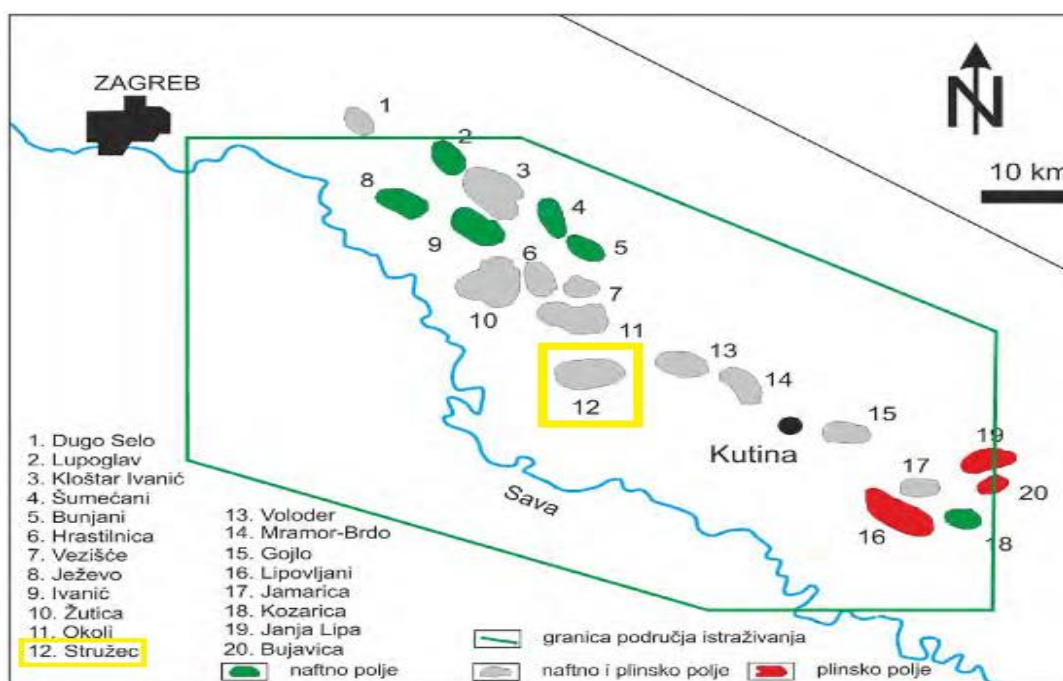


Slika 5-11. Vremenska karta krovine PLQ-A plinskog polja Katarina

5.3. Naftno-plinsko polje Stružec

Najveće moslavačko naftno-plinsko polje, ali i jedno od najvećih u Hrvatskoj, Stružec, nalazi se u Savskoj depresiji (slika 5-12) i to 55 kilometara jugoistočno od Zagreba. Većina polja u Savskoj depresiji otkrivena je nakon Drugog svjetskog rata odnosno 1950.-tih godina kada dolazi i do naglog razvoja naftne industrije. Najveća proizvodnja na području Savske depresije ostvarena je krajem 1970.-tih i početkom 1980.-tih godina kada se proizvodilo oko 3 milijuna tona nafte godišnje. Početkom 1990.-tih proizvodnja je znatno smanjena zbog iscrpljenja zaliha nafte no većina sadašnjih polja moći će se eksploatirati narednih 20-ak godina (Lončar, 2007). Tektonski, polje pripada dubljem zapadnom dijelu Savske depresije. Prva geofizička istraživanja započela su 1940. godine, no pouzdano se ne zna da li su tada vršena seizmička istraživanja. Gravimetrijska istraživanja ukazuju na antiklinalu, uzdignutu strukturu.

Opsežna seizmička istraživanja na području Savske depresije učinjena su 1956. i 1957. godine. Na temelju 2D-refleksijskih seizmičkih mjerenja izrađena strukturna karta definirala je strukturnu cjelinu (DEVIĆ dr., 1978).



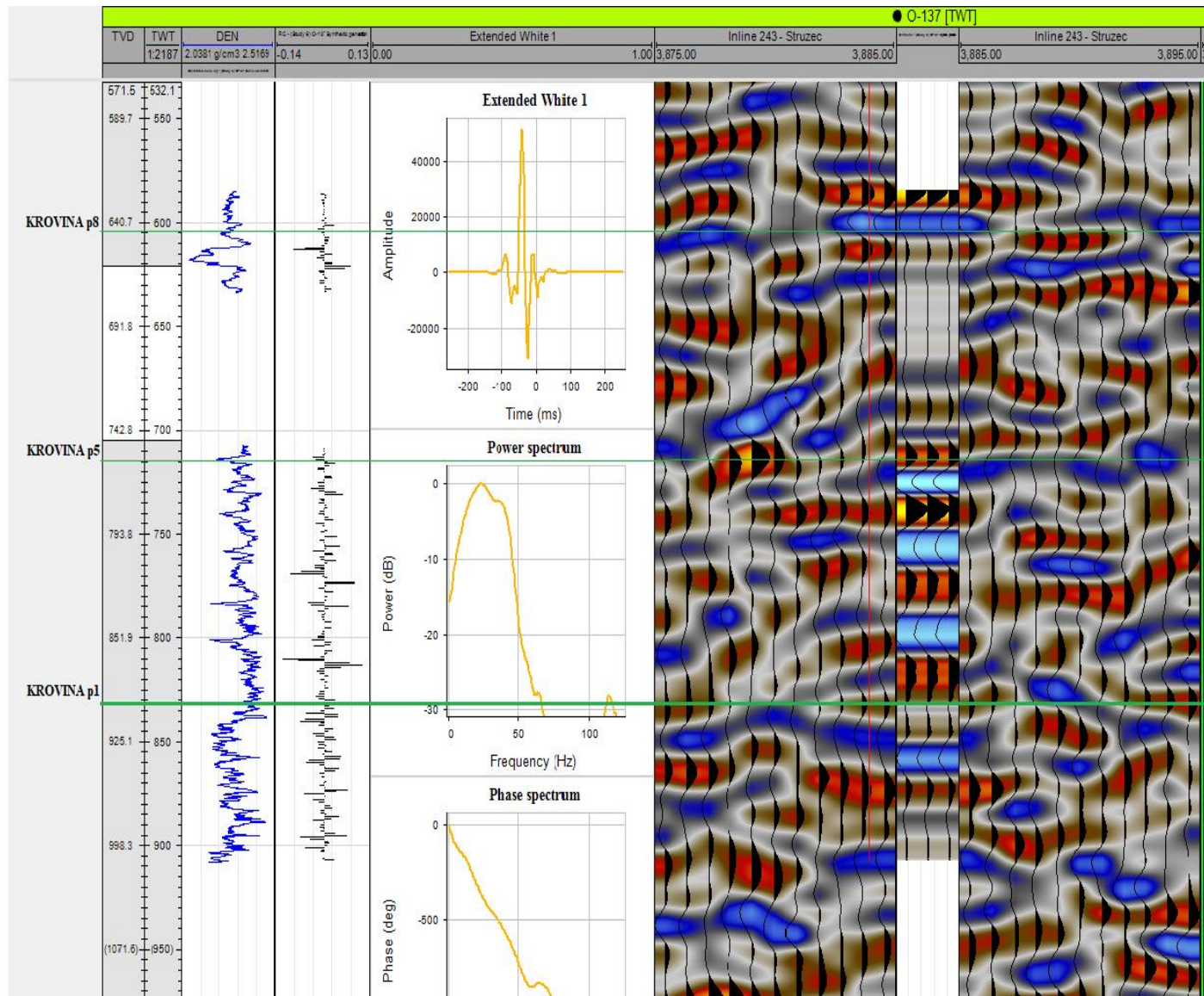
Slika 5-12. Položaj Savske depresije unutar koje se nalazi polje Stružec (žuti pravokutnik) (preuređeno iz Cvetković, 2013)

5.3.1. Sintetski seizmogram za naftno-plinsko polje Stružec

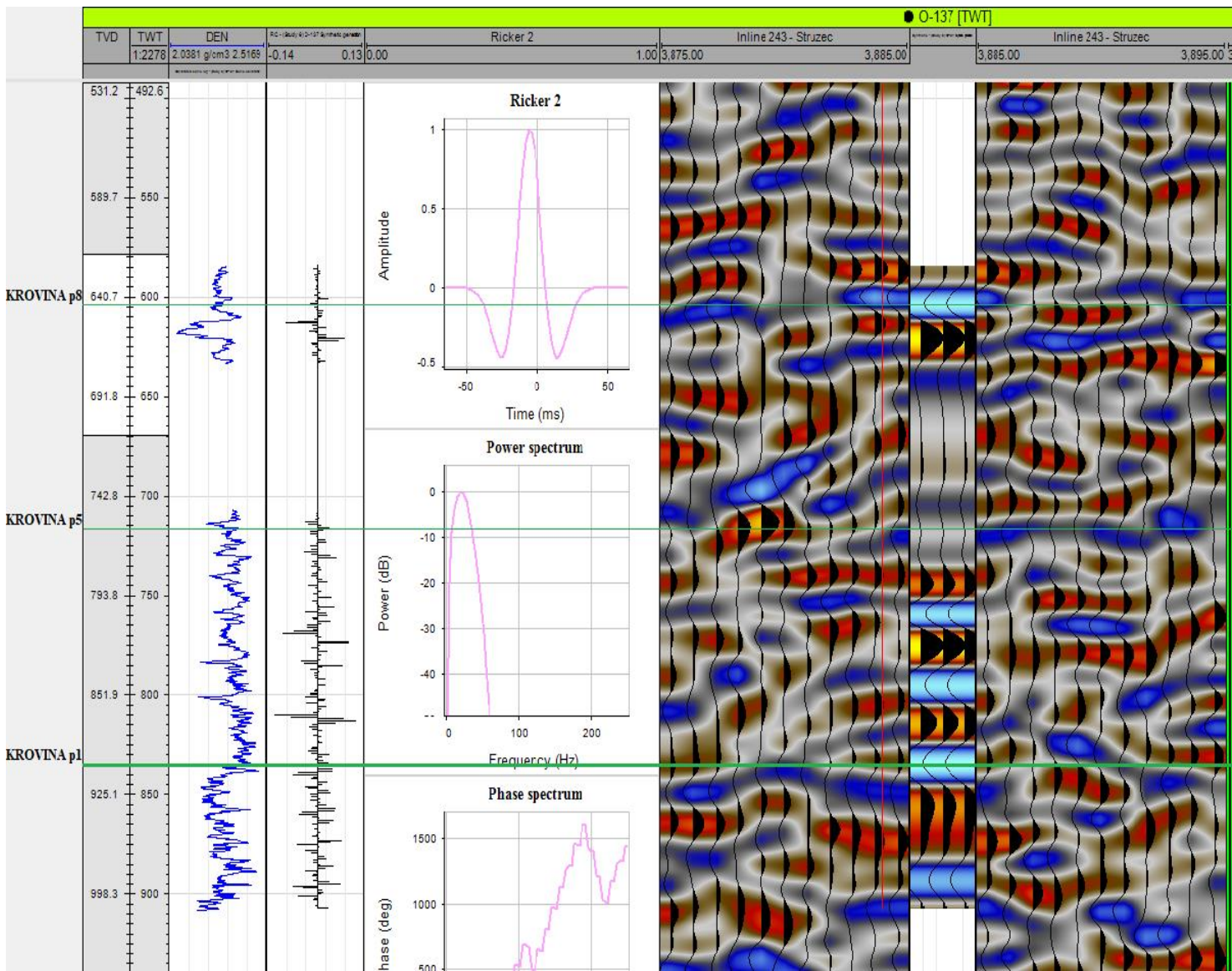
Sintetski seizmogrami su izračunati u dvije bušotine u kojima je mjerena zvučna karotaža. Pri izračunavanju sintetskih seizmograma za bušotinu O-137 korišteni su deterministički, *Extended White* valić (slika 5-13) te Rickerovi valići frekvencija 20 Hz (slika 5-14) i 28 Hz (slika 5-15). Uočljivo je da je korelacija između sintetskog seizmograma i seizmičkih podataka vrlo dobra, primarno u slučaju korištenja determinističkog valića. To je i logično budući da se deterministički valić izvodi iz seizmičkih podataka, dok je Rickerov valić analitički i nije karakterističan za svaki skup seizmičkih mjerenja, iako mu se mogu mijenjati osnovne karakteristike kako bi se dobilo bolje poklapanje sa seizmičkim podacima. Stoga su i korištena dva Rickerova valića od 20 i 28 Hz, a primijećeno je da se vremenski raspon seizmičkog traga na sintetskom seizmogramu smanjuje s povećanjem frekvencije valića jer su period valića i frekvencija u obrnuto proporcionalnom odnosu.

Na slici 5-13 može se vidjeti dobro poklapanje sintetikog seizmograma i mjerenih podataka. Krovina p8 odlično korelira s izraženom negativnom amplitudom sintetskog seizmograma na oko 605 ms baš kao i blago pozitivan refleks krovine p1. Pozitivno izražen refleks krovine p5 u djelomičnom je slaganju sa sintetskim seizmogramom (u vidu amplitude sintetskog seizmograma).

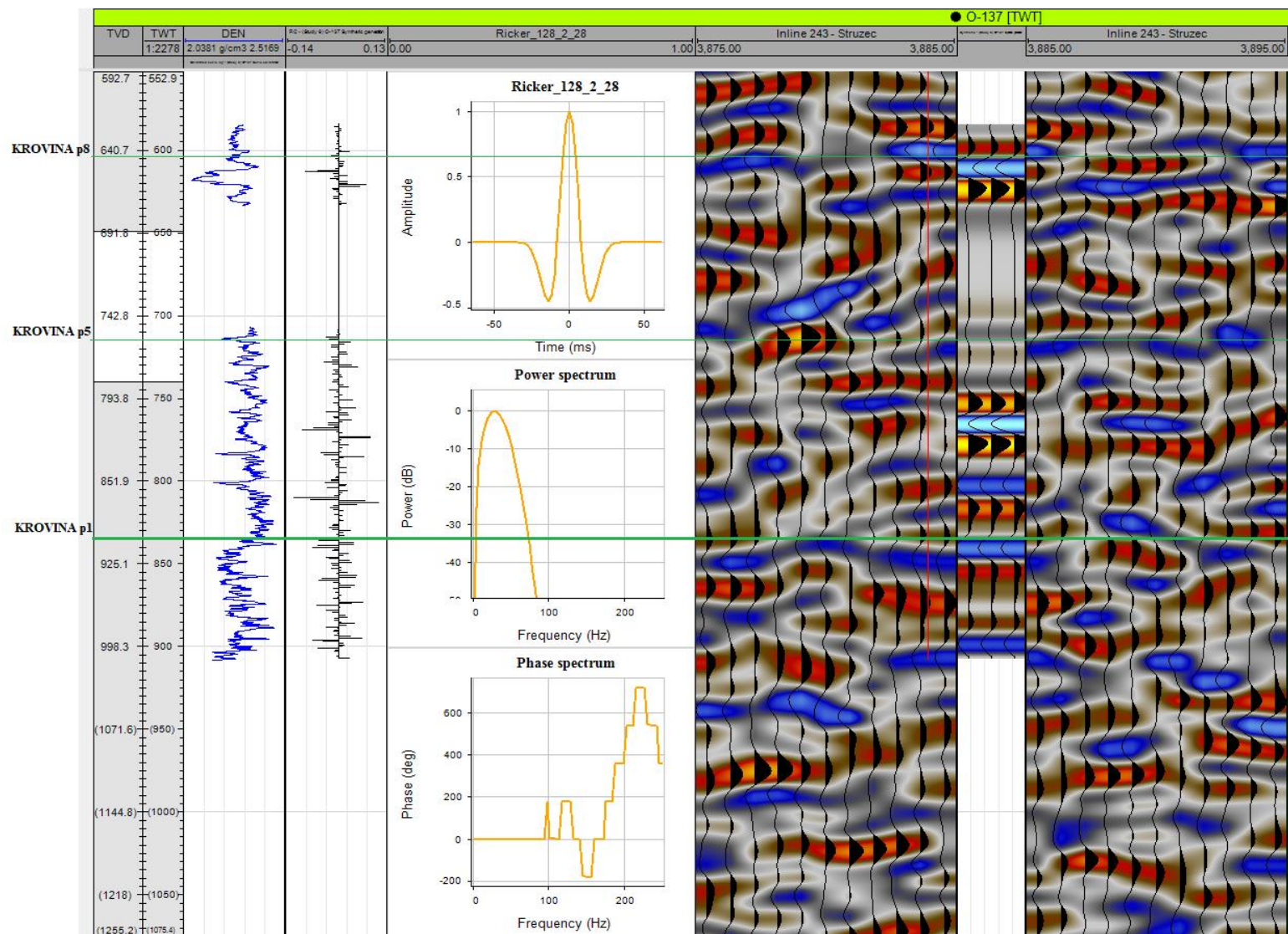
S druge strane bušotina O-139 je likvidirana te ne postoje podaci o dubinskom položaju krovina naftno-plinskog ležišta Stružec. Upotrebom Rickerovog valića nije postignuto dobro podudaranje sintetskog seizmograma sa seizmičkim podacima. Korištenjem determinističkog valića, neslaganje sa seizmičkim podacima uviđa se u intervalu od 500-600 ms. Ipak, u preostalom intervalu sintetskog seizmograma (600-1250 ms) dobiva se puno bolje podudaranje sintetskih i seizmičkih podataka.



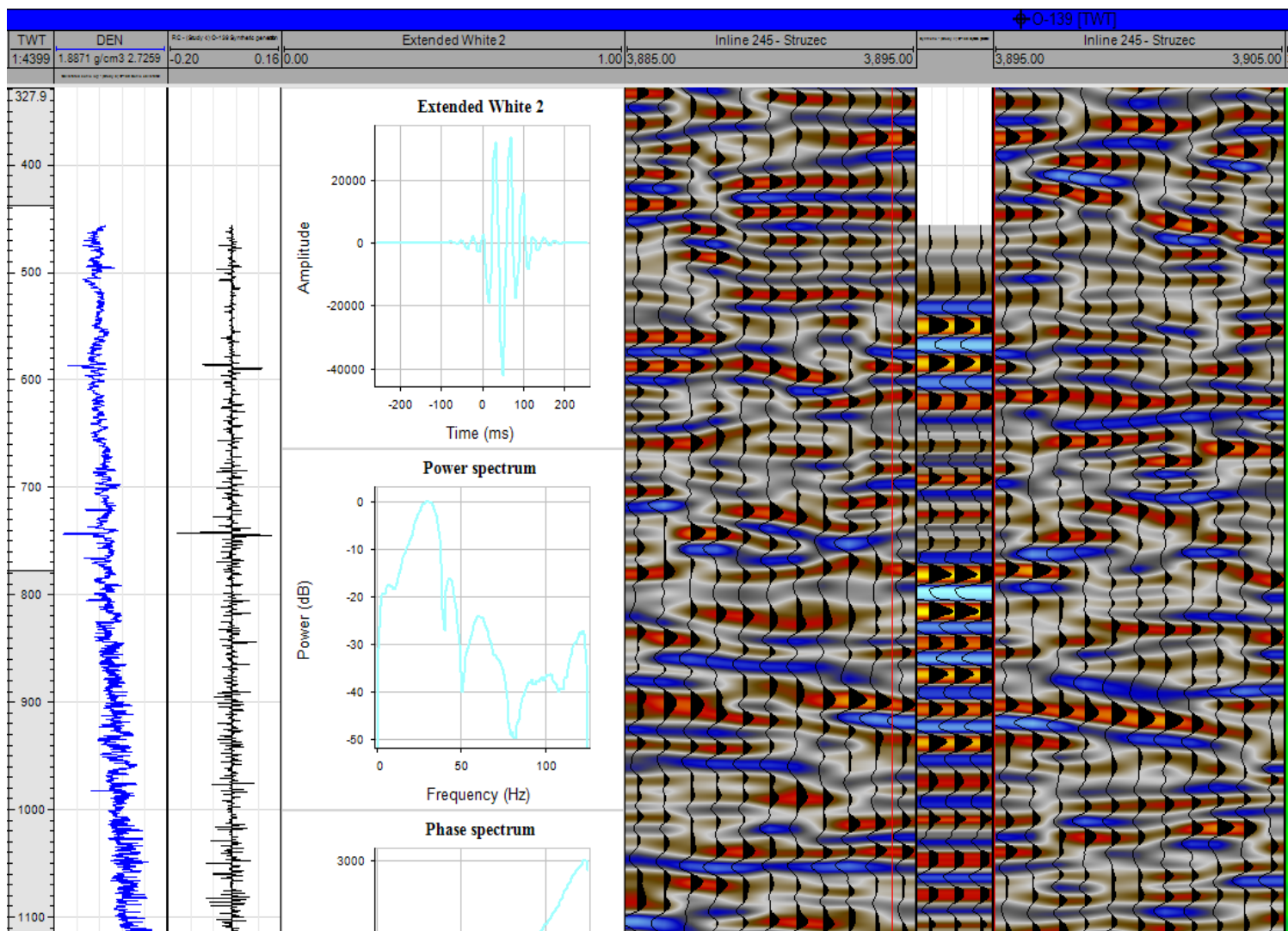
Slika 5-13. Sintetski seizmogram za bušotinu O-137 (deterministički valić, *Extended White*)



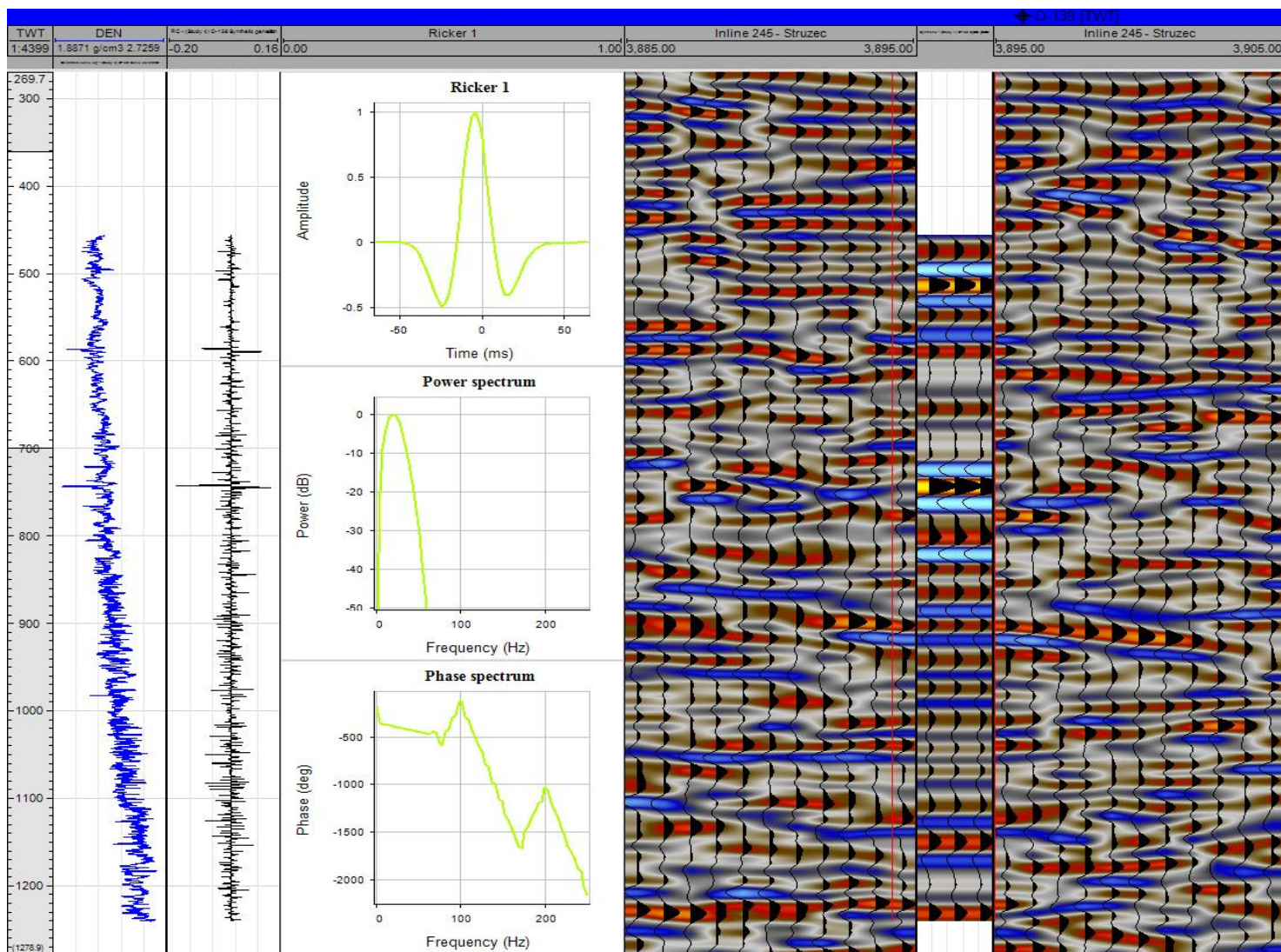
Slika 5-14. Sintetski seizmogram za bušotinu O-137 (Analitički valić, Rickerov, 20 Hz)



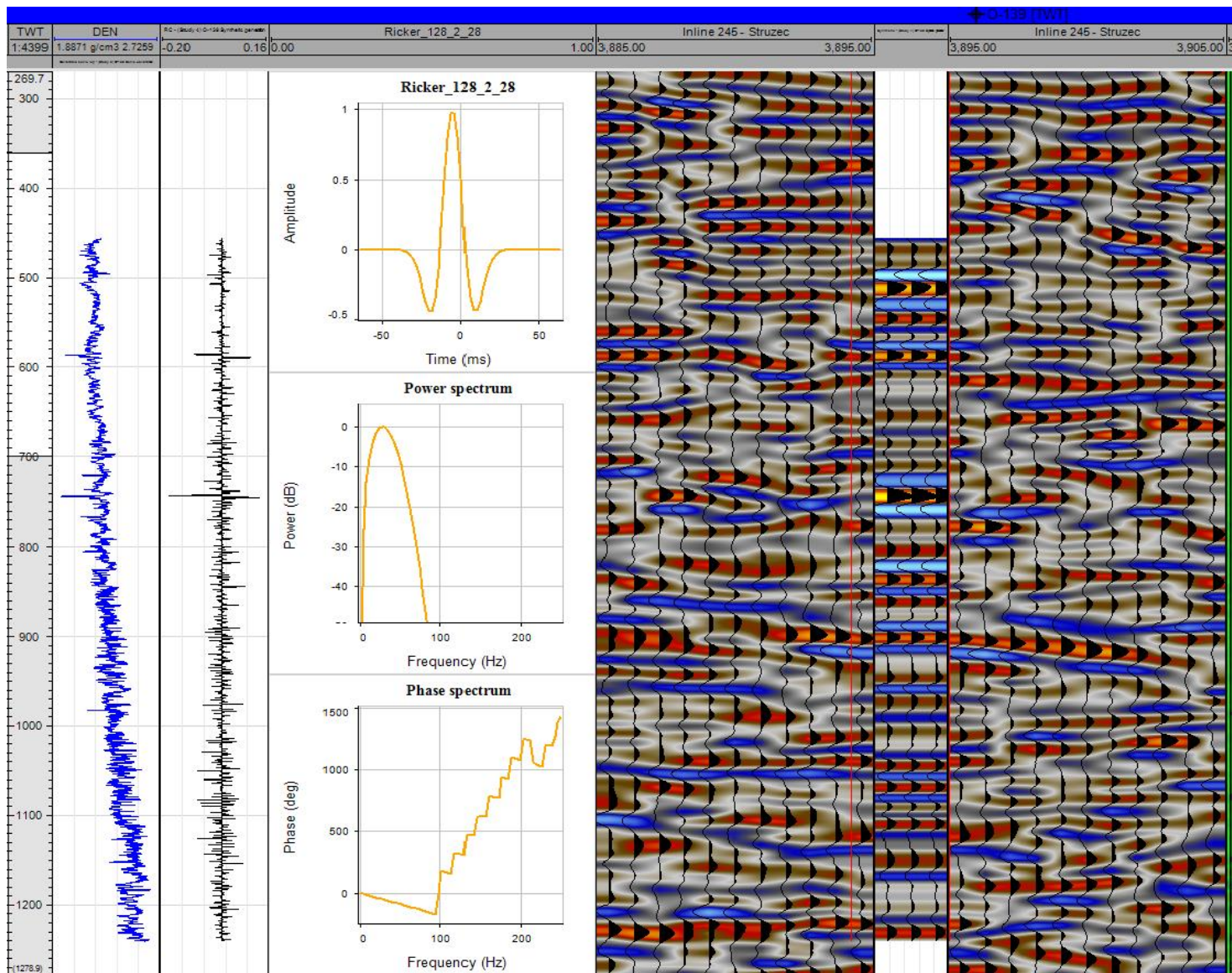
Slika 5-15. Sintetski seizmogram za bušotinu O-137 (analitički valić, Ricker, 28 Hz)



Slika 5-16. Sintetski seizmogram za bušotinu O-139 (Deterministički valić, Extended White)



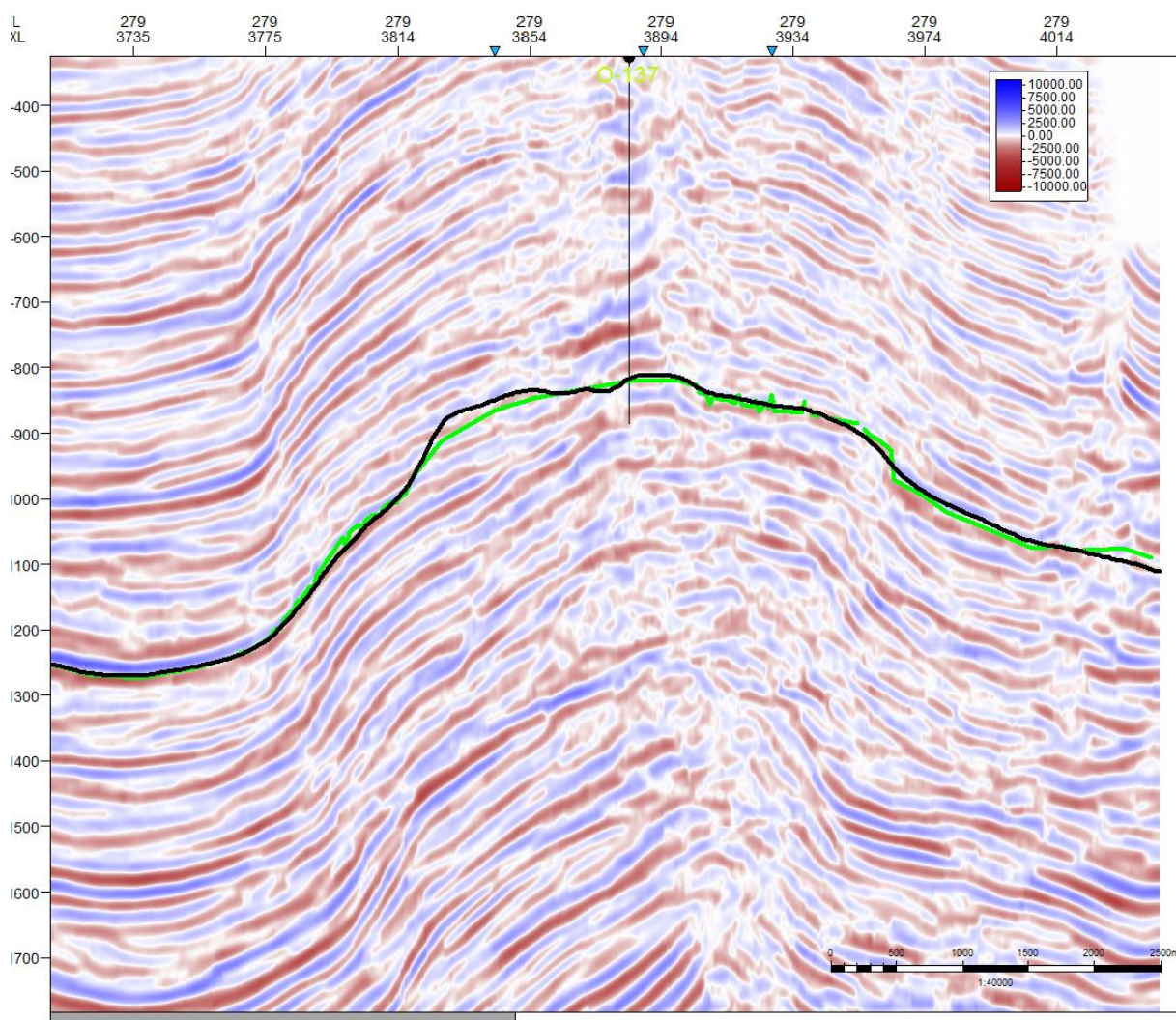
Slika 5-17. Sintetski seizmogram za bušotinu O-139 (Analitički valić, Ricker, 20 Hz)



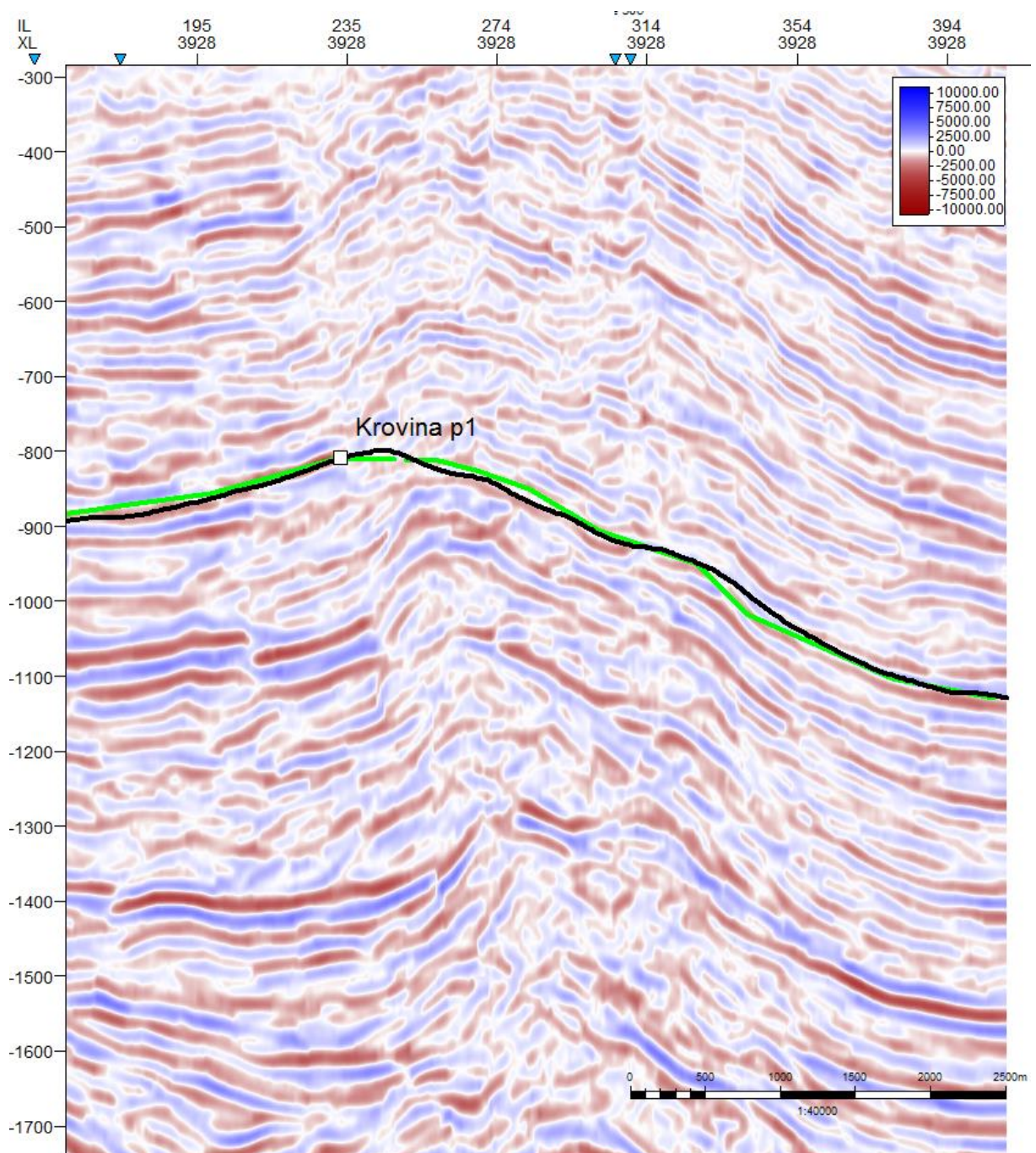
Slika 5-18. Sintetski seizmogram za bušotinu 0-139 (Analitički valić, Rickerov, 28 Hz)

5.3.2. Praćenje seizmičkog horizonta naftno-plinskog polja Stručec

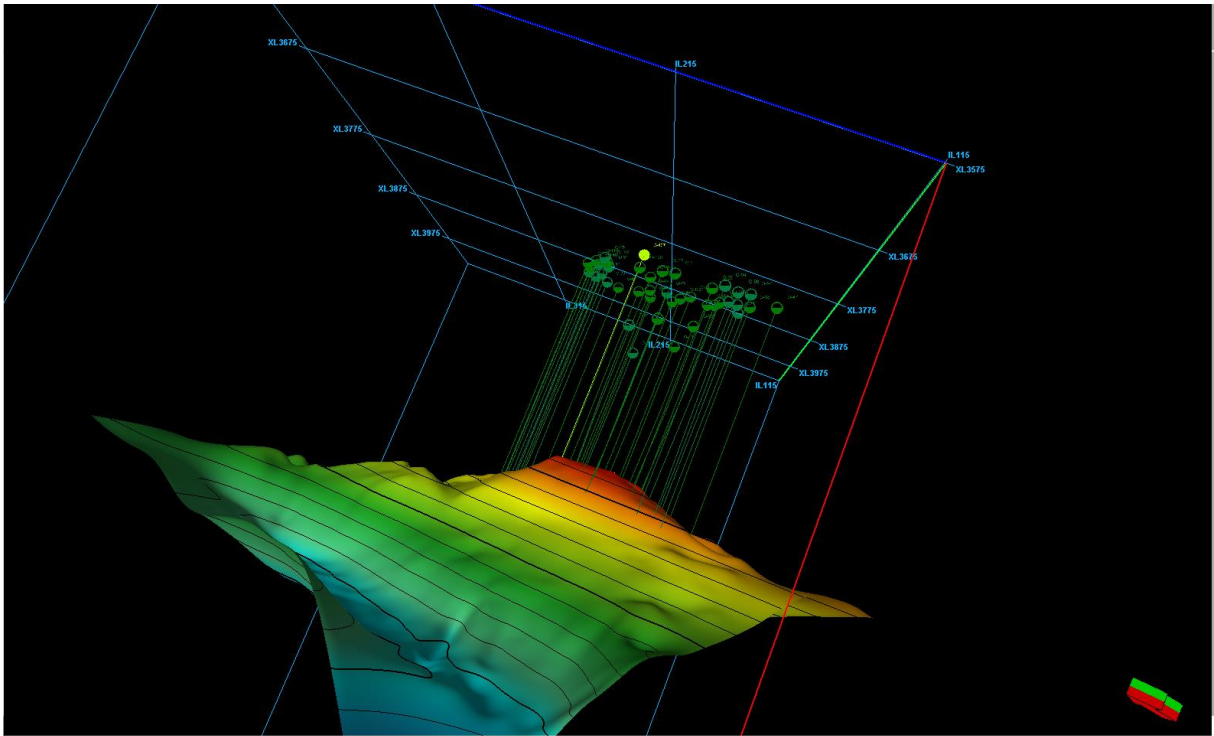
Postupak praćenja horizonta naveden je u prethodnom poglavlju. Jedina razlika za naftno-plinsko polje Stručec jest ta da za polje Stručec nije snimljen zakon brzina već je preuzet sa susjednog polja Okoli (bušotina Ok-3) što može djelomično utjecati na neslaganje mjerenih i stvarnih dubina litoloških granica. Horizont odabran za praćenje je krovina p1, sa naglaskom na zelenu boju koja predstavlja ručnu interpretaciju, dok crna predstavlja računalnu interpretaciju. Slikama 5-19 i 5-20 prikazani su uzdužni odnosno poprečni presjeci sa označanom krovinom p1, dok je 3D prikaz krovine označen slikom 5-21 te vremenska karta iste slikom 5-22.



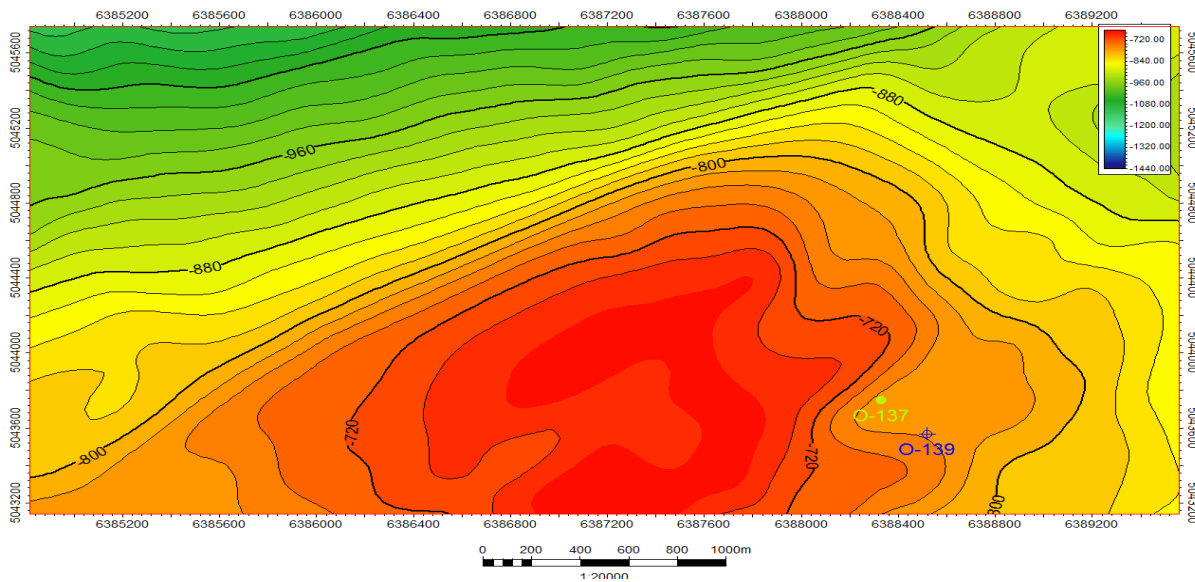
Slika 5-19. Uzdužni presjek 279 naftno-plinskog polja Stručec sa označanom krovinom p1 (zeleno i crno)



Slika 5-20. Poprečni presjek 3928 naftno-plinskog polja Stružec sa označenom krovinom p1 (zeleno i crno)



Slika 5-21. 3D prikaz krovine p1 naftno-plinskog polja Stružec



Slika 5-22. Vremenska karta krovine p1 naftno-plinskog polja Stružec

6. ZAKLJUČAK

Seizmičko modeliranje je računalni proces kojim se izračunava seizmički odziv određenog geološkog modela. Širenje seizmičkih valova od izvora do litoloških granica u podzemlju, te njihovo reflektiranje natrag do prijemnika je simulirano kako bi se dobio seizmički profil. Najosnovniji i najčešći primjer modeliranja je računanje sintetskog seizmograma, što je modeliranje jednodimenzionalnog seizmičkog odziva podzemlja. Sintetski seizmogram u osnovi je trag izračunatih refleksa iz serije točaka poravnatih vertikalno po dubini. Nastaje kao rezultat niza refleksa sa granica slojeva definiranih pomoću karotažnih krivulja u bušotini. Pojedinačni refleksi dobiveni su konvolucijom s odgovarajućim valićem. Cilj je dobiti što bolje poklapanje s mjerenim seizmičkim tragom.

U računalnom programu Petrel izračunati su sintetski seizmogrami za dvije bušotine na plinskom polju Katarina (Katarina 1 i Katarina 2) te za dvije bušotine na naftno-plinskom polju Stružec (O-137 te O-139). U tim bušotinama su izmjerene zvučna karotaža i karotaža gustoće, koje su ulazni podaci za izračun sintetskog seizmograma. Konvolucija je izvedena pomoću nekoliko teoretskih (analitičkih) valića te izdvojenih iz mjerenih seizmičkih podataka (determinističkih). Uporabom determinističkog valića *Extended White* uočeno je bolje podudaranje sintetskog seizmograma sa seizmičkim podacima u odnosu na analitički, Rickerov valić. Tomu je tako zbog toga što je deterministički valić izveden iz mjerenih seizmičkih podataka pa je time prikladniji za precizno izračunavanje sintetskog seizmograma.

Na temelju izračunatih sintetskih seizmograma određeni su seizmički odzivi granica definiranih u bušotinama, te je izvedena trodimenzionalna seizmička interpretacija horizonta PLQ-A na polju Katarina i horizonta p1 na polju Stružec. Također su izrađene i vremenske karte horizontata. Iz praćenja horizontata proizlazi zaključak da je interpretacija uvelike ovisna o iskustvu i vještini interpretatora, što poglavito dolazi do izražaja u kompleksnim geološkim strukturama.

Nadalje, valja spomenuti veliki značaj geofizičkih metoda u naftnom rudarstvu. Na temelju geofizičkih mjerenja određuju se lokacije istražnih, ocjenskih te naposljetku proizvodno-utisnih bušotina. Sistematiziranjem geofizičkih saznanja u vidu 3D refleksijskih mjerenja moguće je odrediti dimenzije i strukturu ležišta.

7. LITERATURA

1. BACKUS, M., M., CHEN, R., L., 1975., *Flat spot exploration: Geophysical Prospecting*, v.23, p. 533–577.
2. BREWER, J., R., 2002. *VSP data in comparison to check shot survey*. Search Discov Article #40059, 1–5
3. BROWN, A., R., 2011. *Interpretation of three dimensional seismic data-7th edition*, Tulsa, Oklahoma, USA: The American Association of Petroleum Geologists and the Society of Exploration Geophysicists
4. BULANT, P., KLIMES, L., 2008. *Comparison of VSP and sonic-log data in non-vertical wells in a heterogeneous structure*. *Geophysics* 73:19–25
5. CVETKOVIĆ, M., 2013. Naftnogeološki potencijal i litostratigrafska razradba trećega neogensko-kvartarnoga megaciklusa u Savskoj depresiji : doktorski rad. Disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2013.
6. DEVIĆ, P., SEČEN, J., THALLER, J., 1976. Stružec - Ležišta nafte i plina p1, P1, P2 i A. Elaborat o rezervama nafte i plina. Fond struč. dok. INA-Naftaplina, Zagreb.
7. DEVIĆ, P., PERIĆ, M., BAUK, A., THALLER, J., 1978. Polje Stružec (ležišta serije „a“ i „b“). Elaborat o rezervama nafte i plina. Fond struč. dok. INA-Naftaplina, Zagreb.
8. GARDNER, G. H. F., GARDNER, L. W., GREGORY, A. R., 1974. *Formation velocity and density – The diagnostic basics for stratigraphic for stratigraphic traps*. *Geophysics*, 39, 770-780.
9. HELBIG, K., THOMSEN, L., 2005. 75-plus years of anisotropy in exploration and reservoir seismics: A historical review of concepts and methods: *Geophysics*, 70 (6), 9-23.
10. LONČAR, J., 2007. Istraživanje, eksploatacija i proizvodnja nafte i plina u Moslavini; *Geografski Horizont-Broj 1-2/2007*, 27-36
11. NANDA, N., C., 2016., *Seismic data interpretation and evaluation for hydrocarbon exploration and production*, Switzerland: Springer International Publishing Switzerland
12. ONAJITE, E., 2014. *Seismic data analysis techniques in hydrocarbon exploration, USA, UK, Netherlands*: Elsevier
13. OREŠKOVIĆ, J., 2018. Primjenjena geofizika, prezentacija: Seizmička istraživanja
14. PETREL, 2014., *User manual*, Schlumberger:
<https://www.software.slb.com/products/petrel>
15. SHERIF, R.E., GELDART, L.P., 1995. *Exploration Seismology*. Second edition, Cambridge Univ. Press, Cambridge

16. STEWART, R., R., DiSiena, J., P., 1989. *The values of VSP in interpretation*. Lead Edge 8:16–23
17. STEWART, R., R., HUDDLESTON P., D., KAN, T., K., 1984. *Seismic versus sonic velocities: a vertical seismic profiling study*. Geophysics 49:1153–1168
18. THOMAS, D., H., 1978. *Seismic applications of sonic logs*. Log Anal 19:23–32
19. TOSENBERGER, A., TODOROVIĆ, B., 2000: Nafta i plin u Hrvatskoj, Geografski horizont, XLVI br. 1-2, 66-77
20. VIDAČEK, R. & VIDAČEK, O., 2006. *Post well appraisal of Katarina 1hor, Katarina 2dir, Katarina 3dir*. Fond struč. dok. INAGIP, Zagreb.
21. VIDAČEK, R., 2005. *Elaborat o rezervama prirodnog plina eksploatacijskog polja Marica, Plinsko polje Katarina*. Fond struč. dok. INA-Naftaplina.
22. ZAGORAC, Ž., 1975. Interpretacija gravimetrijskog reziduala i njena primjena u području Savske i Dravske potoline. Disertacija, Rud.-geol. Fakultet, Sveučilišta u Beogradu
23. ŽUŽUL, V., SMONTARA, N., ŠUŠNJAR, I., 2011. Elaborat o rezervama ugljikovodika eksploatacijskog polja Stružec. Fond struč. dok. INA-Naftaplina, Zagreb.