Obrada podataka refleksijskih seizmičkih istraživanja na području Gotalovca

Vicković, Stipe

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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:169:678952

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**



Repository / Repozitorij:

Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb







SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geološkog inženjerstva

OBRADA PODATAKA REFLEKSIJSKIH SEIZMIČKIH ISTRAŽIVANJA NA PODRUČJU GOTALOVCA

Diplomski rad

Stipe Vicković

GI 292

Zagreb, 2018.

Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet

Diplomski rad

OBRADA PODATAKA REFLEKSIJSKIH SEIZMIČKIH ISTRAŽIVANJA NA PODRUČJU GOTALOVCA

STIPE VICKOVIĆ

Diplomski rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za geofizička istraživanja i rudarska mjerenja
Pierottijeva 6, 10002 Zagreb

Sažetak

Obrađivani podaci dobiveni su u okviru hidrogeoloških istraživanja tijekom lipnja i srpnja 2006. godine na području naselja Gotalovec, Krapinsko-zagorska županija. Istraživanja su provedena radi detaljnog kartiranja prethodno izdvojene mikrolokacije, odnosno određivanja dubine zalijeganja karbonatnih vodonosnih naslaga, trijaskih dolomita i eventualno miocenskih litavaca, te položaje rasjednih zona, kako bi se, zajedno s drugim hidrogeološkim podacima, mogao odrediti optimalni položaj istraživačke bušotine. Korištena je metoda refleksijske seizmike visoke rezolucije (HRS-metoda, eng. High Resolution Seismic Method). Izvedena su dva profila ukupne duljine 647.5 m. Nad dobivenim podacima, pomoću softvera Reflexw, uspješno su provedeni svi standardni postupci obrade. Kao rezultat su dobivena dva refleksijska seizmička profila prikazana u vremenskom obliku sa zacrnjenim pozitivnim dijelom amplitude. Na dobivenim profilima se jasno ističu refleksi iz kojih je jednostavno izvesti strukturne odnose podzemlja.

Ključne riječi: refleksijska seizmička istraživanja, obrada releksijskih podataka, metoda refleksijske seizmike visoke rezolucije (HRS)

Diplomski rad sadrži: 35 stranica, 3 tablice, 25 slika i 19 referenci

Jezik izvornika: hrvatski

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

Voditelj: Dr. sc. Franjo Šumanovac, redoviti profesor, RGNF

Ocjenjivači: Dr. sc. Franjo Šumanovac, redoviti profesor, RGNF
Dr. sc. Jasna Orešković, docentica, RGNF
Dr. sc. Ivan Medved, docent, RGNF

Datum obrane: 28. rujna 2018.

University of Zagreb
Thesis
Faculty of Mining, Geology
and Petroleum Engineering

Graduate Engineer of Geology

DATA PROCESSING OF REFLECTION SEISMIC RESEARCHES IN THE AREA OF GOTALOVEC

STIPE VICKOVIĆ

Thesis completed in: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum engineering
Department of geophysical exploration and mine surveying,
Pierottijeva 6, 10 002 Zagreb

Abstract

The processed data were obtained in the framework of hydrogeological research during June and July, 2006 in the area of Gotalovec, Krapina-Zagorje County. The research was carried out for the detailed mapping of the predetermined microlocation, i.e. the determination of the depth of the carbonate aquifers, the Triassic dolomites and possibly the Miocene Lithothamnium limestone, as well as the location of fault zones, in order to determine the optimum location of the exploratory well with other hydrogeological data. The method of high resolution seismic reflection (HRS) has been used. Two profiles of total length of 647.5 m have been made. Reflexw software has successfully completed all standard processing procedures. As a result, two seismic reflection profiles were obtained that clearly represent the reflexes from which structural relationships of the subsurface are simply derived.

Keywords: reflection seismic, seismic data processing, ,high resolution reflection seismic (HRS)

Thesis contains: 35 pages, 3 tables, 25 pictures and 19 references.

Original in: Croatian

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

Supervisor: PhD Franjo Šumanovac, Full Professor, RGNF

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

Date of defense: September 28, 2018

SADRŽAJ

1. UVOD 1
2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA 2
2.1. Geografske i geomorfološke karakteristike 2
2.2. Geološke karakteristike 3
3. SEIZMIČKA ISTRAŽIVANJA 6
3.1. Opći principi 6
3.2. Instrumenti i oprema 9
3.3. Refleksijska seizmika 10
3.4. Obrada podataka 12
4. TERENSKA MJERENJA I GEOMETRIJA SNIMANJA 21
5. OBRADA REFLEKSIJSKIH PODATAKA 22
5.1. Uređivanje tragova i prigušivanje zvučnih i refraktiranih valova 22
5.2. Skaliranje i filtriranje 24
5.3. Analiza brzina i zbrajanje tragova 27
5.4. Rezultati obrade 30
6. ZAKLJUČAK 33
7. LITERATURA 34

POPIS SLIKA

Slika 2-1 Geografska položajna karta s pozicijom istraživane mikrolokacije (crveni krug) 2

Slika 2-2 Prikaz položaja dvaju profila na podlozi digitalne ortofoto karte u HTRS96/TM koordinatnom sustavu te mjerila 1:5000. (izvor: geoportal.dgu.hr) 3

Slika 2-3 Isječak iz osnovne geološke karte originalnog mjerila 1:100 000 list Varaždin (Šimunić i dr., 1982). Na karti su plavom linijom označeni mjereni profili P-1 i P-2. 4

Slika 3-1 Prostiranje glavnih (P i S valova) i površinskih (Rayleigh-ovih i Love-ovih) valova u funkciji pomicanja čestica (Braile, 2000)..... 7

Slika 3-2 Skica putanje lomljenih i odbijenih valova nastalih upadnim P-valom. Brzina u mediju 2 je veća od brzine u mediju 1. 7

Slika 3-3 Brzine primarnih valova za različite litologija. Graf za šejl, pješčenjak, vapnenac i dolomit prikazuje također i ovisnost o poroznosti (izražena u postocima). (Press 1966; Gardner i dr. 1974 i Lindseth 1972)..... 8

Slika 3-5 Digitalni 24- kanalni seizmograf Terraloc Mk 6 10

Slika 3-6 Primjer terenskih refleksijskih neobrađenih snimaka (seizmogram) dobivenih s dvadesetčetirikanalnim digitalnim seizmografom prema Miller-u i Steeples-u, 1991 (lijevo) i dobivenih mjerenjem na području Gotalovca (desno). 12

Slika 3-7 Statička korekcija. (a) Seizmogram na kojem se vidi vremenska razlika između refleksa na susjednim tragovima uzrokovana reljefnim nepravilnostima i trošnom zonom. (b) Isti seizmogram nakon nanošenja statičke korekcije s dobrim podudaranjem refleksa. (O'Brien, 1974) 13

Slika 3-8 Set tragova za istu CMP-točku NMO korigiran koristeći raspon brzina. Stekirajuća brzina je ona za koju zbrojeni trag ima najviši intenzitet, odnosno amplitudu. U danom primjeru V_2 predstavlja stekirajuću brzinu. (Taner i Koehler, 1969) 14

Slika 3-9 Putanje zraka odbijenih od zajedničke dubinske točke na horizontalnom reflektoru (a) i nepostojanje zajedničke dubinske točke u slučaju nagnute granice (b)..... 16

Slika 3-10 Seizmogram filtriran serijom pojasnih filtara različitog frekvencijskog raspona. Ovakav prikaz omogućava geofizičarima odrediti frekvencijskih raspon koji povećava omjer signal-šum (Hatton i dr., 1986)..... 17

Slika 3-11 Primjer različitih vrsta oštrih (a) i gradijentnih (b) filtara. 18

Slika 3-12 Konvolucijski model refleksijskog seizmičkog traga prikazanog kao konvoluirani produkt refleksijske funkcije i početnog impulsa te odnosa između geološkog modela i refleksijske funkcije. 19

Slika 3-13 Princip AGC pojačanja 20

Slika 4-1 Geometrija snimanja refleksijskom seizmikom. Razmaknuti asimetrični raspored. 21

Slika 5-1 prikaz neobrađene snimke pod brojem 192 s profila P-1..... 22

Slika 5-2 Dva linijska podatka, prikazana sa snimkama, pomoću kojih je izveden postupak prigušenja refraktiranih i zvučnih valova..... 23

Slika 5-3 Snimka 192 provedena kroz postupke uklanjanja mrtvih tragova te prigušenje refraktiranih i zvučnih valova. 24

Slika 5-4 Isječak zajedničke snimke profila P-1 prije skaliranja (gore) i nakon (dolje) 25

Slika 5-5 Isječak skalirane zajedničke snimke profila P-1 prije filtriranja (gore) i nakon (dolje). 26

Slika 5-6 Isječak filtriranog profila nakon provedenog automatskog podešavanja amplituda..... 27

Slika 5-7 Rezultati analize brzina provedene na skupu tragova CMP-točke 70 profila P-1: graf s prikazom vertikalne razdiobe brzine (lijevo), skup tragova CMP-točke s linijama brzina (sredina), prikaz spektra stekirajuće brzine (desno). 28

Slika 5-8 Rezultati analize brzina provedene na skupu tragova CMP-točke 70 profila P-2: graf s prikazom vertikalne razdiobe brzine (lijevo), skup tragova CMP-točke s linijama brzina (sredina), prikaz spektra stekirajuće brzine (desno). 29

Slika 5-9 Obrađeni refleksijski seizmički profil P-1 31

Slika 5-10 Obrađeni refleksijski seizmički profil P-2 32

POPIS TABLICA

Tablica 4-1 Najvažniji parametri snimanja 21

Tablica 5-1 Prikaz rezultata analize brzina za profil P-1 28

Tablica 5-2 Prikaz rezultata analize brzina za profil P-2 29

1. UVOD

Geofizička istraživanja na području Gotalovca provedena su u okviru hidrogeoloških istraživanja. Izvedena su radi detaljnog kartiranja na mikrolokaciji koja je izdvojena na temelju prijašnjih istraživanja. Osnovni cilj istraživanja je bio odrediti dubine zalijeganja karbonatnih vodonosnih naslaga, trijaskih dolomita i eventualno miocenskih litavaca, te položaje rasjednih zona, kako bi se zajedno s drugim hidrogeološkim podacima mogao odrediti optimalni položaj istraživačke bušotine.

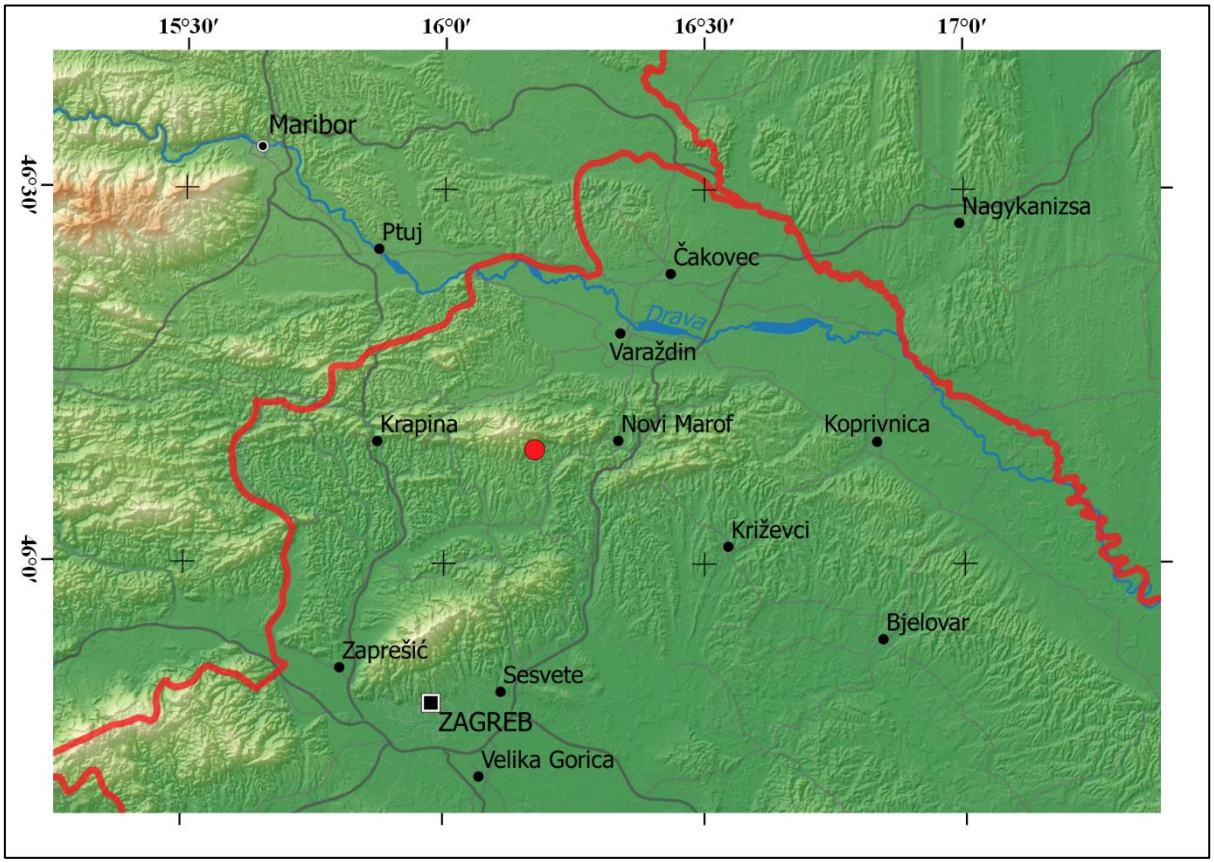
U svrhu istraživanja primijenjena je metoda refleksijske seizmike visoke rezolucije (HRS-metoda, eng. High Resolution Seismic Method) čime su preciznije kartirani strukturni odnosi na izdvojenoj mikrolokaciji. Izmjerena su dva profila refleksijske seizmike ukupne duljine 647.5 m. Terenska mjerenja izvedena su tijekom lipnja i srpnja 2006. godine.

Kao rezultat terenskih mjerenja dobiven je niz snimaka za svaku točku paljenja duž profila. Te snimke su pohranjene u digitalnom SEG formatu. Kako bi podaci bili upotrebljivi za interpretaciju potrebno ih je dodatno obraditi, odnosno provesti odgovarajuće popravke ili korekcije. Mjerenja su izvedena metodom višestrukog pokrivanja ili metodom zajedničke dubinske točke (eng. Common Depth Point – CDP) te je nad njim potrebno napraviti karakterističnu obradu. Najvažniji koraci u obradi su statička i dinamička korekcija, a osim njih potrebno je: urediti tragove, prigušiti refraktirane i zvučne valove, sortirati tragove (CDP-sortiranje), analizirati brzine, filtrirati, skalirati i zbrojiti tragove. Svi navedeni koraci provedeni su unutar softvera za obradu seizmičkih podataka Reflexw proizvođača Sandmeier geophysical research.

2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

2.1. Geografske i geomorfološke karakteristike

Istraživana mikrolokacija nalazi se na području naselja Gotalovec koji administrativno pripada općini Budinšćina, Krapinsko-zagorska županija. Naselje Gotalovec nalazi se 25 km istočno od grada Krapine te 10 km zapadno od grada Novi Marof, na 46°09′25″ sjeverne geografske širine i 16°13′05″ istočne geografske dužine (slika 2-1).



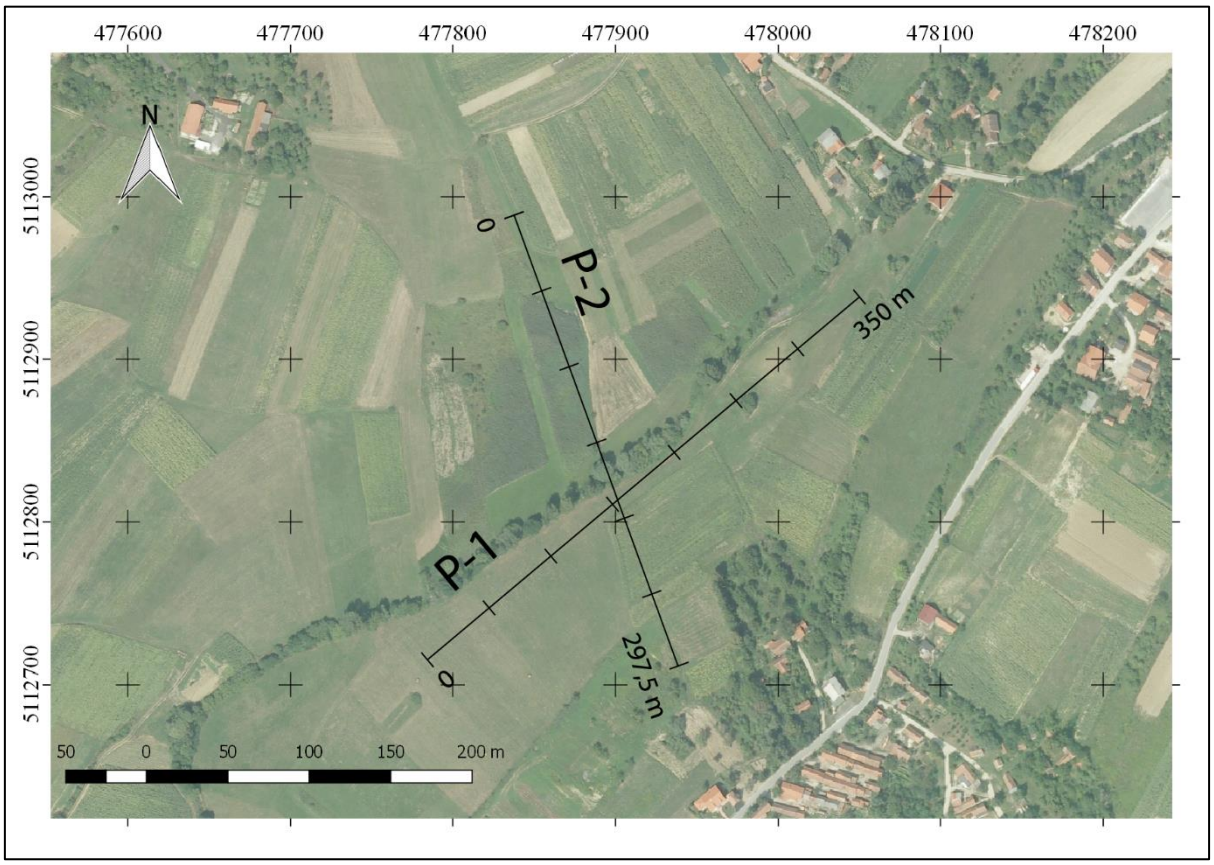
Slika 2-1 Geografska položajna karta s pozicijom istraživane mikrolokacije (crveni krug)

Na mikrolokaciji su izmjereni profili P-1 i P-2 koji se nalaze se unutar samog naselja na oranicama. S istočne strane mikrolokaciju omeđuje lokalna cesta 22023 koja naselje povezuje sa susjednim naseljem Krapinicom. Sa sjeverne strane nalazi se ulica koja vodi prema naselju Zajezda (slika 2-2).

Po pružanju paralelno, a po smjeru obrnuto od profila P-1 te na prosječnoj udaljenosti od 10 m nalazi se potok Topličica. Unutar radijusa od 500 m, uglavnom sa

sjeverne strane mikrolokacije, nalazi se nekoliko prirodnih izvora pitke i termalne vode (slika 3-2).

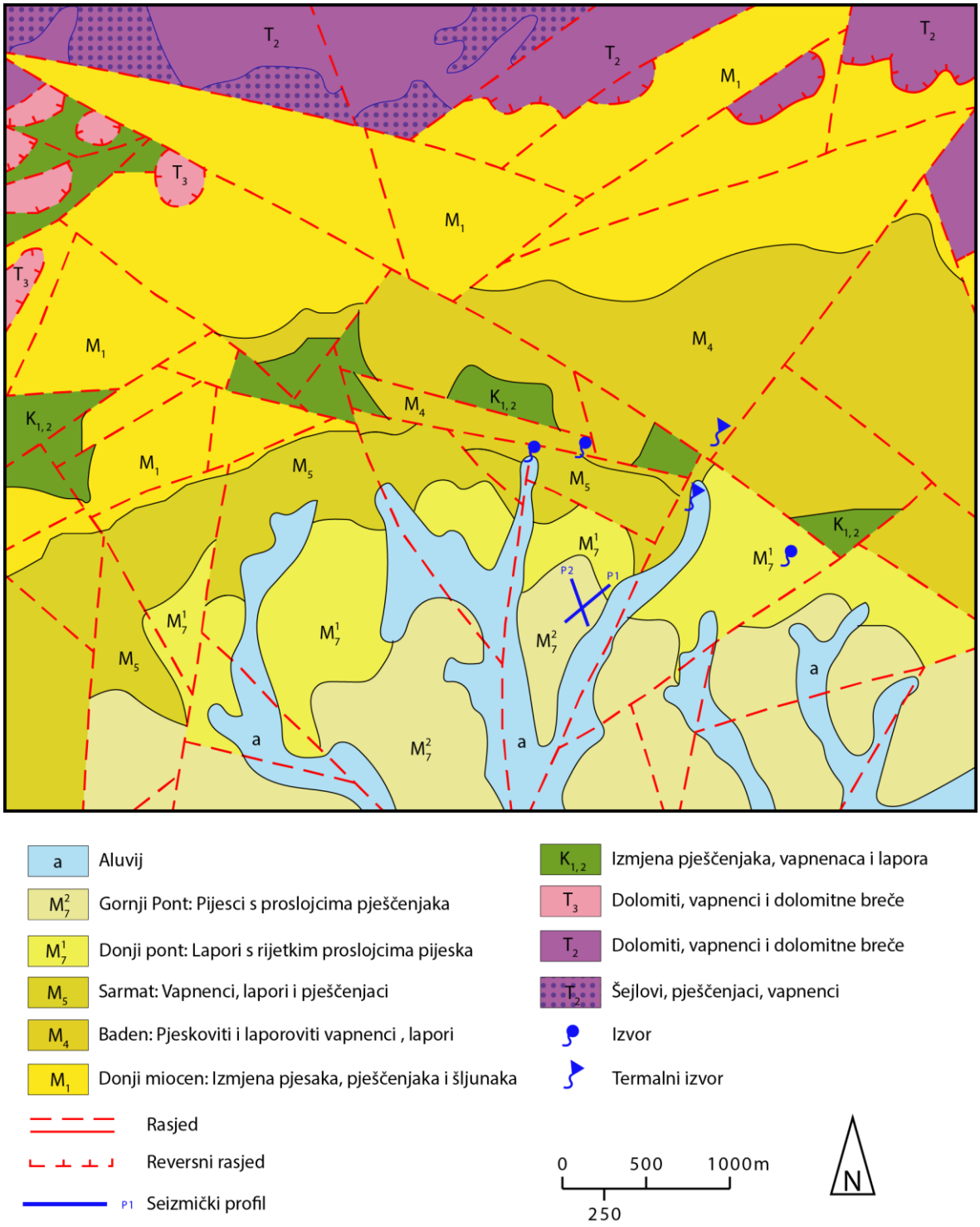
Azimut profila P-1 iznosi 50°, a profila P-2 160°. Početna točka profila P-1 nalazi se na visini od 201 m., a krajnja na visini od 210 m. Poznavajući ukupnu duljinu od 350 m dobivamo nagib terena od 2° u smjeru obrnutom od azimuta profila P-1. Početna i završna točka profila P-2 nalazi se na istoj nadmorskoj visini od 210 m, ali je presjek sa terenom konkavnog oblika i najniža točka profila je na visini od 205 m.



Slika 2-2 Prikaz položaja dvaju profila na podlozi digitalne ortofoto karte u HTRS96/TM koordinatnom sustavu te mjerila 1:5000. (izvor: geoportal.dgu.hr)

2.2. Geološke karakteristike

Istraživana mikrolokacija nalazi se unutar geološkog modela koji se sastoji od površinskih kvartarnih i neogenskih sedimenata (a, M), krednih vulkanogeno-sedimentnih stijena ($K_{1,2}$) koje se u diskordantnom odnosu nalaze na gornjotrijaskim i donjotrijaskim dolomitima (J_3,J_2), Šimunić i dr., 1982 (slika 2-3).



Slika 2-3 Isječak iz osnovne geološke karte originalnog mjerila 1:100 000 list Varaždin (Šimunić i dr., 1982). Na karti su plavom linijom označeni mjereni profili P-1 i P-2.

Dolomiti su tijekom geološke povijesti bili izloženi značajnim tektonskim utjecajima u nekoliko faza. Zbog toga takve stijene posjeduju sekundarnu, pukotinsku poroznost te one u navedenim geološkim uvjetima predstavljaju glavne vodonosnike. Stijene neogenske

starosti uglavnom su izgrađene od lapora, glina, šejlova i sitnozrnatih pješčenjaka te predstavljaju nepropusne slojeve. Unutar miocenskih naslaga na kontaktu s dolomitima trijaske starosti, ponegdje se mogu nalaziti slojevi litotamnijskog vapnenca. Formirali su se kao nepravilna tijela prilikom razvoja taložnih bazena i u kontaktu s dolomitima imaju funkciju vodonosnika. Donjotrijaski klastični sedimenti, koji su položeni su ispod trijaskih karbonatnih vodonosnika, smatraju se niskopropusnim ili nepropusnim naslagama. Zbog razlike u brzinama seizmičkih valova unutar klastičnih nepropusnih i karbonatnih propusnih naslaga, koristeći seizmičke metode, ovaj model podzemlja može se vrlo dobro istražiti (Šumanovac i Orešković, 2018).

Niskomineralizirana termalna voda iz izvora Topličica, u blizini istraživane mikrolokacije, prema ionskom sastavu pripada CaMg-HCO_3^- (kalcijsko magnezijski hidrogenkarbonati) mješovitom tipu (Borović i dr., 2016). Takav tip vode upućuje na vodonosnik izgrađen bedenskim vapnencima i trijaskim dolomitima. Trijaski dolomiti izdanjuju na planini Ivančici, a naliježu na nepropusne dolomite u podnožju planine te tako omogućuju napajanje vodonosnika. Dragičević i dr. (1998) procjenjuju sekundarnu poroznost vodonosnih naslaga u rasponu od 5 do 25% na temelju opažanja izdanaka u velikim obližnjim kamenolomima. Proučavanjem godišnje bilance vodonosnika utvrđena je njegova debljina od 200 do 1800 m.

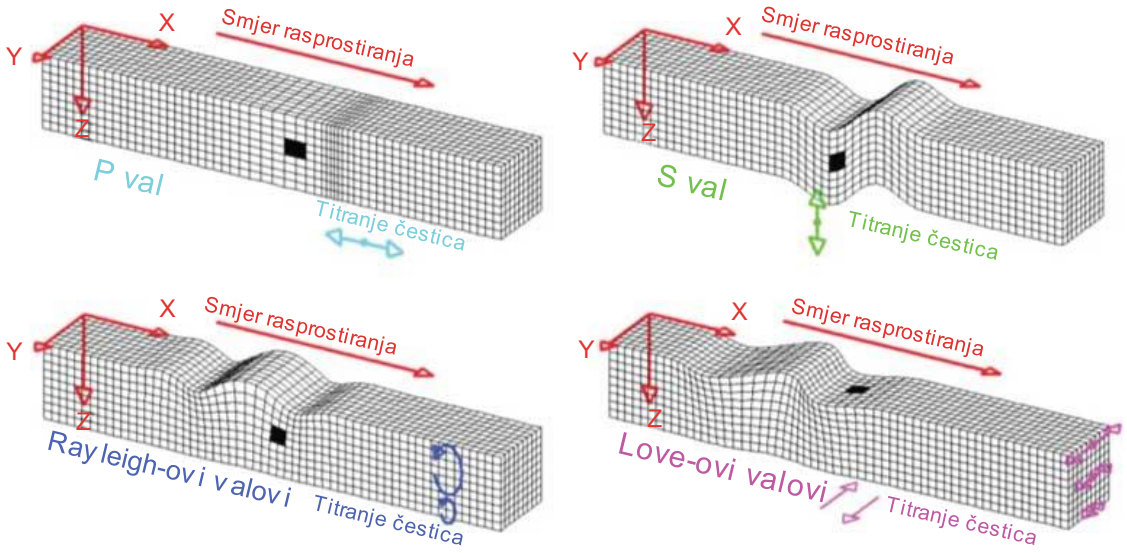
3. SEIZMIČKA ISTRAŽIVANJA

Seizmička metoda je geofizička metoda koja omogućuje detektiranje kako plitkih, tako i dubokih geoloških formacija. Jednostavno rečeno, seizmičke metode procjenjuju oblike i svojstava Zemljine geološke građe na temelju odziva zvučnih valova. Seizmičke metode koriste se od početka prošlog stoljeća za određivanje dubine oceana i mora, a od 1924. prvi put su korištene za pronalazak naftnog polja Texan (Milligan, 2004).

Ovisno o načinu putovanja zabilježenih valova (odbijanje ili lomljenje), razlikuju se refleksijska i refrakcijska seizmička istraživanja. Refrakcijske metode koriste u inženjeskogeološkim, hidrogeološkim i geotehničkim istraživanjima u rasponu dubina od nekoliko metara do nekoliko stotina metara. Refleksijska seizmička istraživanja se najčešće koriste za istraživanje ležišta ugljikovodika, a omogućuje dvodimenzionalnu ili trodimenzionalnu interpretaciju podzemlja. Zadnjih desetljeća metoda pod nazivom HRS-metoda (eng. High-Resolution Seismic) uspješno se primjenjuje u plićim istraživanjima, gdje je potrebna velika rezolucija (Šumanovac, 2012). Promjene gustoće i brzine među različitim stijenama reflektira seizmičke valove natrag prema površini. Brzina i jakost zabilježenih valova ukazuje na strukturu podzemlja.

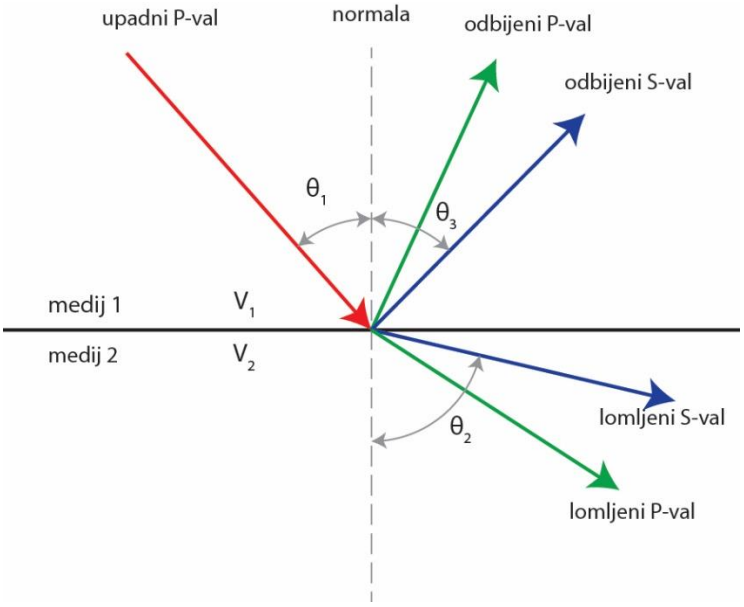
3.1. Opći principi

Izvor seizmičkih valova na površini proizvodi četiri tipa valova, dva glavna i dva površinska. Glavni tipovi su longitudinalni (P-val, primarni, prvi) i transverzalni (S-val, sekundarni). Kod površinskih razlikujemo Love-ove i Rayleigh-ove valove, koji se rasprostiru paralelno Zemljinoj površini te imaju ograničenu ulogu u seizmičkim istraživanjima (Braile 2000) (slika 3-1). Primarni i sekundarni valovi nazivaju se glavnima jer se rasprostiru u obliku polukuglastih formi kroz podzemlje i izrazito su važni za seizmička istraživanja. Primarni valovi kreću se brže od sekundarnih, a nazivaju se longitudinalnim jer se sila prenosi u smjeru kretanja vala. Sila potencira pokretanje čestica podzemlja koje je nestlačivo te se zbog toga energija prenosi velikom brzinom. Kod sekundarnih valova, prilikom kretanja vala, čestice titraju u smjeru okomitom na kretanja vala zbog čega se javljaju posmična naprezanja koja usporavaju val. Tekućine nemaju mogućnost preuzimanja posmičnih naprezanja te se u njima sekundarni valovi ne rasprostiru.



Slika 3-1 Prostiranje glavnih (P i S valova) i površinskih (Rayleigh-ovih i Love-ovih) valova u funkciji pomicanja čestica (Braile, 2000)

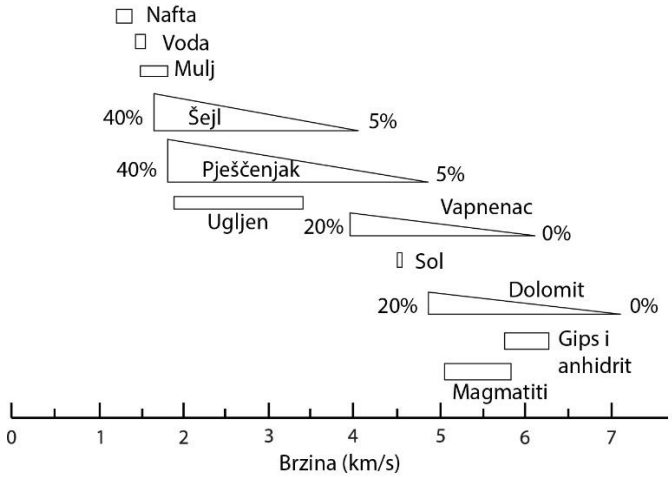
Osnovni princip seizmičkih istraživanja je izazivanje impulsa na seizmičkom izvoru pri Zemljinoj površini ili ispod nje te snimanje amplituda i vremena putovanja povratnih valova nakon što su reflektirani ili refraktirani od površine jednog ili više slojeva. Kada seizmički izvor izazove impuls koji se širi kroz sedimentne slojeve, valovi putuju slojevima različitim brzinama i lome se prema Snellovom zakonu. Ako seizmički val upada na granicu pod određenim kutom, na granici medija nastat će lomljeni i refraktirani primarni i sekundarni valovi.



Slika 3-2 Skica putanje lomljenih i odbijenih valova nastalih upadnim P-valom. Brzina u mediju 2 je veća od brzine u mediju 1.

Linija ili mreža geofona ili hidrofona, koja se još naziva seizmički prijemnik, snima odbijene i lomljene seizmičke valove. Refleksi od slojeva koji dospiju do površine mjere se na prijemnicima (vremenska mjerenja). Ako je brzina širenja u dvama medijima različita onda je i njihova gustoća različita i dio seizmičke energije neće biti lomljen, već odbijen. Koliko će energije biti odbijeno ovisi o razlici u impedanciji, koja je produkt brzina primarnih i sekundarnih valova te gustoće medija. Tako će svaki geološki kontakt s velikim kontrastom u impedanciji uzrokovati jake reflekse. Takvi mogući kontakti su različite litologije, poroznosti, porni fluidi, stupnjevi saturacije ili dijageneze. Primjećuje se da povećanjem razlike u gustoći i brzini dvaju slojeva raste i količina energije koja će biti odbijena. Pješčenjaci često imaju izrazito različitu impedanciju od šejlova, što će uzrokovati značajnom količinom energije koja će se odbiti od granice sloja pješčenjaka i sloja šejla. Karbonati obično imaju visoke brzine i gustoće. Rezultat je još značajniji kontrast u impedanciji između karbonata i šejlova. Kontrast na takvoj granici uvijek će ovisiti o poroznosti vapnenca iako čak i visoko porozni karbonati mogu imati velike brzine zbog visokog stupnja cementacije.

Iako je litologija najočitiji faktor koji utječe na brzinu prostiranja valova, rasponi brzina različitih vrsta stijena uvelike se preklapaju što onemogućava dobru bazu za njihovo razlikovanje (Sheriff i Geldart, 1995). Iz grafa na slici 3-3 vidljivo je kako povećanjem gustoće i smanjenjem poroznosti rastu brzine seizmičkih valova. Površinska trošna zona, koja se nalazi na mnogim terenima, odlikuje se malim i promjenjivim brzinama i promjenama debljine (eng. Low-velocity layer LVL) što će uzrokovati zakašnjenjem nailazaka seizmičkih valova (Šumanovac, 2012).



Slika 3-3 Brzine primarnih valova za različite litologije. Graf za šejl, pješčenjak, vapnenac i dolomit prikazuje također i ovisnost o poroznosti (izražena u postotcima). (Press, 1966; Gardner i dr., 1974 i Lindseth, 1972)

3.2. Instrumenti i oprema

Hidrofoni i geofoni koriste se za otkrivanje, prijem seizmičkog signala. Hidrofon je uređaj dizajniran za detektiranje seizmičke energije u obliku promjena tlaka vode za vrijeme seizmičkih marinskih mjerenja. Za kopnena seizmička mjerenja koriste se geofoni koji detektiraju ubrzanje tla uzrokovano seizmičkim valovima i pretvaraju ih u električne impulse. Geofoni, za razliku od hidrofona, otkrivaju pokret umjesto promjene tlaka. Sastoji se od zavojnice i magneta kruto veznih za kućište. Prilikom prijema seizmičkog vala magnet podrhtava, a zavojnica zbog inercije ostaje u mirujućem položaju. U takvim uvjetima dolazi do indukcije napona proporcionalnog brzini pokretanja tla. Geofoni se mogu podijelit na vertikalne i horizontalne ovisno želimo li snimati longitudinalne ili transverzalne seizmičke valove.

Informacija o jakosti seizmičke energije inducirana u geofonima prenosi se do seizmografa. Seizmograf je najčešće višekanalni instrument što znači da u isto vrijeme može primiti signal iz više geofona pa tako među ostalim razlikujemo 12-kanalne i 24-kanalne. Kako bi se istaknuli slabi dublji refleksi, koji stižu kasnije, potrebno je koristiti promjenjivo pojačanje Danas se najčešće koristi IFP-pojačalo (eng. Instantaneous Floating Point) s trenutnim automatskim pojačanjem signala prema ulaznom signalu. Osim jačine signala potrebno je uskladiti amplitude refleksa različite jakosti. To se izvodi pomoću automatskog regulatora amplituda (eng. Automatic Gain Control). Kod seizmografa je još važan dinamički raspon koji se opisuje kao omjer najvišeg i najnižeg očitanja, odnosno najjačeg i najslabijeg signala koji instrument može zabilježiti bez izobličenja. Na slici 3-5, zajedno s dodatnom opremom, prikazan je 24-kanalni digitalni seizmograf *Terraloc Mk 6* s dinamičkim rasponom od 126 dB, švedske tvrtke ABEM.

Najosnovniji seizmički izvor je teški čekić kojim je moguće direktno udarati u tlo ili češće udarati metalnu ploču postavljenu na tlo. Kako je ovakav izvor razmjerno slab potrebno je više udaraca koji se zbrajaju unutar seizmografa te se tako dobiva dostatna jačina signala.. Eksploziv osigurava najkompaktniji visoko-energijski izvor, ali on ima mnoge nedostatke kao što su: visoka cijena, trajanje i cijena izrade bušotine, potencijalna oštećenja na obližnjima objektima, crpilištima te ograničenost lokacija gdje bušotine mogu biti izbušene i eksploziv postavljen. U slučaju većih ciljanih brzina, te u geološkim modelima u kojima dolazi do velikom rasipanja energije, koristi se eksploziv u bušotini. Prednost je mogućnost određivanja jačine izvora mijenjanjem količine eksploziva. Količina eksploziva, u većini slučajeva je od 5 do 20 dag, najčešće se smješta u plitke

bušotine od oko 1 m, a paljenje se izvodi trenutnim upaljačima sa zakašnjenjem manjim od 2 ms (Sheriff i Geldart, 1982). Osim navedenih izvora koriste se još vibratori (eng. Vibroseis), *Dinoseis* sustavi te seizmičke puške u kopnenim te zračne puške u marinskim mjerenjima.



Slika 3-4 Digitalni 24 - kanalni seizmograf Terraloc Mk 6

3.3. Refleksijska seizmika

Metoda refleksijske seizmike je najraširenija i najpoznatija tehnika geofizičkih istraživanja. Trenutno stanje visoke sofisticiranosti uvelike je rezultat ogromnih ulaganja naftne industrije i razvoja napredne elektronike i računarstva. Ovom metodom moguće je otkriti detaljnu geološku strukturu u rasponu od nekoliko desetaka metara dubine do dubine litosfere. Razlog ovakvom uspjehu metode leži u činjenici da se podaci dobiveni mjerenjima obradom mogu pretvoriti u seizmičke profile kao prikaz geoloških struktura.

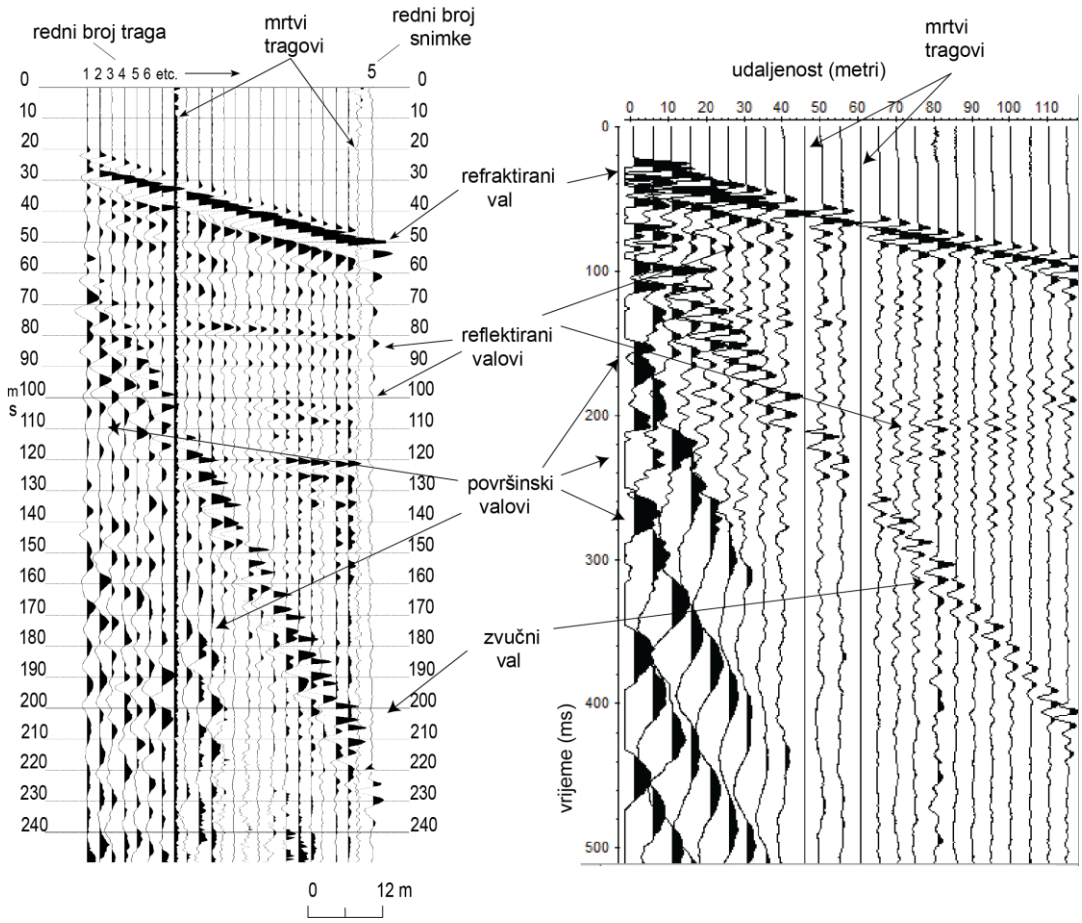
Mjerenja kod refleksijskih seizmičkih istraživanja najčešće se provode duž profila po kojima se uzastopno pomiču točke paljenja i geofoni čime se postiže pokrivanje cijelog profila. Geofoni i točke paljenja nalaze se na istom pravcu u asimetričnom, razmaknutom

asimetričnom, simetričkom ili razmaknutom simetričnom rasporedu. Ovisno o vrsti pokrivanja reflektora razlikujemo dvije metode: metodu kontinuiranog pokrivanja i metodu višestrukog pokrivanja. Metoda kontinuiranog pokrivanja (eng. Optimum-offset Method) koristi simetrični raspored koji točku paljenja smješta u sredinu rasporeda. Nakon paljenja pomiče se grupa geofona s kraja profila na čelo profila te točka paljenja u središte novonastalog rasporeda. Na taj način postiže se potpuno pokrivanje reflektirajuće granice (Hunter et al., 1984; Whiteley et al., 1998). Metoda višestrukog pokrivanja ili metoda zajedničke dubinske točke (eng. Common Depth Point – CDP) daje višestruki refleks od svake točke u podzemlju te se njihovim zbrajanjem poboljšava omjer signala-šum. Metoda se izvodi kotrljajućim načinom snimanja (eng. Roll-along Mode) u najčešće u asimetričnom rasporedu gdje se nakon svakog paljenja iskopča jedan geofon najbliži točki paljenja te prebaci na drugi kraj profila kada se izvodi novo paljenje. Broj tragova od iste dubinske točke određen je brojem geofona, odnosno geometrijom sustava mjerenja, a računa se prema izrazu:

$$f = \frac{nd}{2s} \tag{3.3}$$

gdje je f broj pokrivanja ili tragova koji pripadaju istoj točki, n broj kanala ili aktivnih geofona, d udaljenost geofona i s udaljenost točke paljenja. Prije početka samih mjerenja izvode se pokusna mjerenja radi određivanja najpogodnijeg izvora valova, kao i odgovarajuće geometrije snimanja, to jest rasporeda geofona i izvora valova. Na primjeru terenskih neobrađenih snimaka (seizmograma) prikazanih na slici 3-6 jasno se uočavaju refleksi, ali i svi ostali valovi karakteristični za plitka istraživanja: refrakcije-lomljeni valovi, zvučni valovi, površinski valovi i SV-valovi.

Plitka refleksijska seizmika ili HRS-metoda pojavila se 80-ih godina prošlog stoljeća te su mnoge različite i vrlo uspješne metode objavljene u literaturi. U početku je metoda korištena mjerenjima metodom kontinuiranog pokrivanja, a poslije i metodom višestrukog pokrivanja u istraživanju naftnih ležišta. HRS-metoda, zbog relativno visoke rezolucije i mogućnosti istraživanja dubokih struktura, pogodna je za istraživanje hidrogeoloških uvjeta u uslojenom geološkom modelu (Šumanovac, 2006). Za metodu je karakteristična upotreba geofona koji registriraju valove visoke frekvencije odbijene od plitkih geoloških formacija.



Slika 3-5 Primjer neobrađenih terenskih refleksijskih snimaka (seizmograma) dobivenih s dvadesetičetiri-kanalnim digitalnim seizmografom prema Miller-u i Steeples-u, 1991 (lijevo) i dobivenih mjerenjem na području Gotalovca (desno).

3.4. Obrada podataka

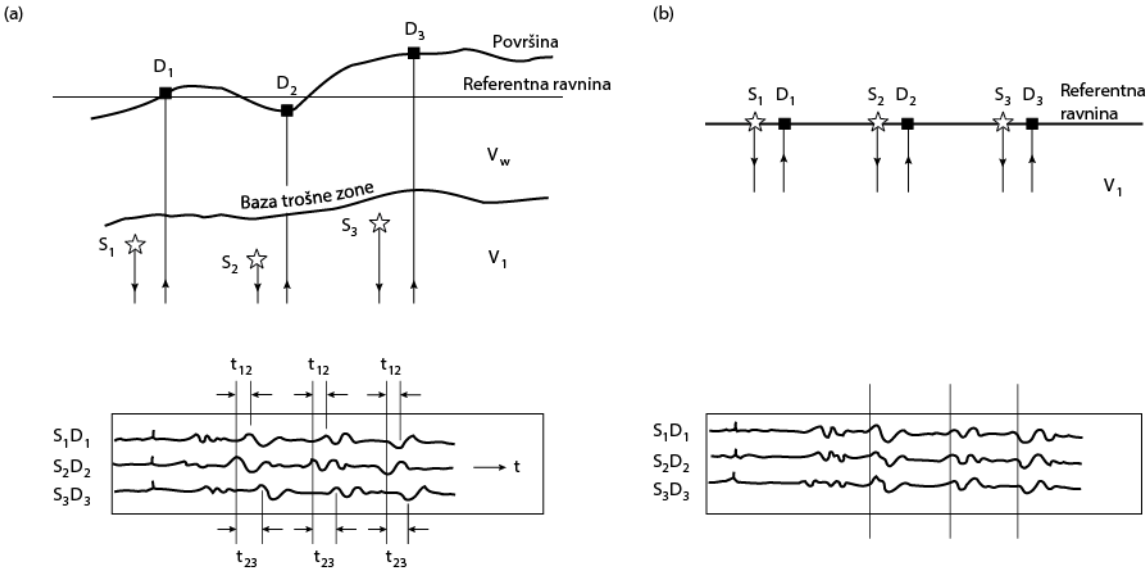
Potrebno je provesti dva osnovna tipa korekcija nad vremenima refleksije, odnosno individualnim seizmičkim tragovima kako bi rezultirajući seizmički profil pravilno reprezentirao geološku građu. To su statička i dinamička korekcija, nazvane prema načinu na koji se vremenski popravak nanosi na trag. Kod statičke korekcije trag se korigira za jednaki iznos po cijeloj dužini, a kod dinamičke ovisno o vremenu refleksije tj. dubini.

Nadmorske visine terena na profilu te plitke geološke strukture često su promjenjive, uglavnom zbog različitog trošenja stijena, raznovrsnih sedimenata i promjenjive visine vodnog lica. Vremena refleksije moraju biti korigirana za vremenske razlike uzrokovane plitkim nepravilnostima koji uzrokuju pomak refleksa od njihovih pravilnih vremenskih pozicija. Ako statička korekcija nije provedena precizno, tragovi se neće pravilno zbrojiti prema CMP- točki. Također zakašnjenje uzorkovano plitkim strukturama može smanjiti pouzdanost interpretacije dubokih struktura. Precizno određivanje statičke korekcije je

jedan od najvažnijih problema koji se mora savladati prilikom obrade seizmičkih podataka (Cox, 2001). Različite komponente statičke korekcije uzrokovane su plitkim strukturama ispod svake točke paljenja i svakog geofona za svaki trag. Korekcija za svaki instrument, bilo točku paljenja bilo geofon, čine dvije komponente:

a) visinska statička korekcija, koja popravlja trag za visinu točke paljenja i geofona iznad referentne ravnine,
b) statička korekcija trošne zone, koja popravlja trag za heterogeni plitki sloj, debljine od nekoliko metara do nekoliko desetaka metara, neobično niske seizmičke brzine.

Statička korekcija računa se s pretpostavkom da je reflektirana zraka vertikalna neposredno ispod točke paljenja ili geofona. Vrijeme putovanja zrake tada se korigira za vrijeme potrebno za prelazak vertikalnog puta između točke paljenja ili geofona do referentne ravnine (slika 3-7). Visinska statička korekcija obično se nanosi poznavanjem preciznih visina instrumenata dobivenih pomoću globalnog navigacijskog satelitskog sustava (GNSS). Za računanje statičke korekcije trošne zone potrebno je znanje o promjenama brzine i debljine trošne zone.



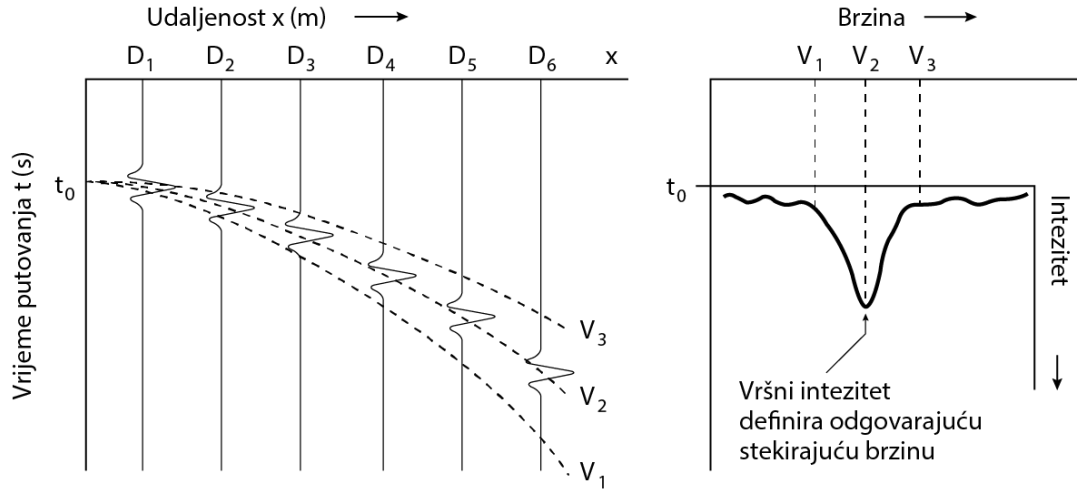
Slika 3-6 Statička korekcija. (a) Seizmogram na kojem se vidi vremenska razlika između refleksa na susjednim tragovima uzrokovana reljefnim nepravilnostima i trošnom zonom. (b) Isti seizmogram nakon nanošenja statičke korekcije s dobrim podudaranjem refleksa. (O'Brien, 1974)

Dinamičkom korekcijom popravljaju se tragovi kao bi se uklonile posljedice povećanja vremena putovanja vala duž geofonskog rasporeda, a korekcija je poznatija pod nazivom NMO (eng. Normal Move Out). Iznos korekcije ovisi o vremenu putovanja vala

za svaki pojedinačni refleks, brzini rasprostiranja valova i dubini reflektora. Posljedično, korekcija se računa posebno za svaki vremenski inkrement na seizmičkom tragu. Adekvatna NMO-korekcija ovisi o što ispravnijem odabiru brzina. Kod CMP-snimanja odgovarajuća brzina dobiva se računalnom analizom povećanja vremena u grupi tragova iste CMP-točke. Taj postupak naziva se analiza brzina i slijedi nakon statičke korekcije. Slika 3-8 prikazuje skup statički korigiranih tragova s refleksom za nulto vrijeme t_0. Dinamička korekcija računa se za raspon brzina te se dinamički korigirani tragovi zbrajaju (stekiraju). Stekirajuća brzina V_{st} definirana je kao brzina koja daje najveću amplitudu refleksa nakon zbrajanja tragova. Ovakva metoda uspješno uklanja posljedice NMO pojave. Stekirajuća brzina definirana je u jednadžbi:

$$t^2 = t_0^2 + \frac{x^2}{V_{st}^2}, \tag{3.4}$$

gdje je *t* vrijeme putovanja odbijenog vala duž geofonskog rasporeda *x*.



Slika 3-7 Skup tragova za istu CMP-točku koji će biti NMO korigirani koristeći raspon brzina. Stekirajuća brzina je ona za koju zbrojeni trag ima najveći intenzitet, odnosno amplitudu. U danom primjeru V_2 predstavlja stekirajuću brzinu. (Taner i Koehler, 1969)

Prije i nakon statičke i dinamičke korekcije potrebno je provesti niz drugih postupaka kako bi se dobili kvalitetno obrađeni seizmički profili. Obrada seizmičkih podataka danas se izvodi pomoću računala, odnosno softvera, postupcima koji uključuju:

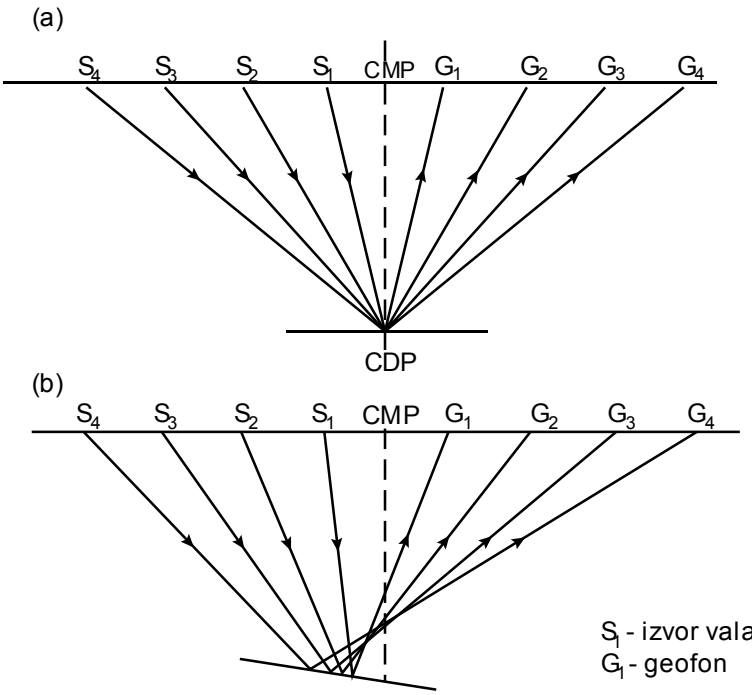
- uređivanje tragova,
- prigušenje refraktiranih valova,
- prigušenje zvučnih valova,
- sortiranje tragova (CDP-sortiranje),
- statičku korekciju,
- analizu brzina,

- dinamičku (NMO) korekciju,
- spektralnu analizu,
- dekonvoluciju,
- filtriranje,
- skaliranje i
- zbrajanje tragova.

Uređivanje tragova je postupak kojim se tragovi bez istaknutih refleksa, odnosno tragovi koji u daljnjoj obradi nisu potrebni, uklanjaju iz snimke. Tragovi s takvim karakteristikama mogu biti mrtvi tragovi ili tragovi s prevelikim šumom. Mrtvi tragovi pojavljuju se kao ravne linije ne seizmogramu. Tragovi s prevelikim šumom kao linije koje sadrže valove malih amplituda i visokih frekvencija. Navedene vrste tragova lako je uočiti i ukloniti čime se količina podataka za obradu smanjuje te sam proces ubrzava.

Refraktirani i zvučni valovi svojom brzinom, amplitudom i frekvencijom značajno se razlikuju od reflektiranih te se na seizmogramu mogu prigušiti vrlo jednostavno pomoću raznih softverskih alata za prigušivanje koji se često nazivaju *muting tools*. Refraktirani valovi su prvi nailasci i oni dominiraju vrhom seizmograma svojim pravilnim, simetričnim amplitudama te ih je vrlo jednostavno odstraniti od reflektiranih valova, najčešće prigušenjem ravnom linijom malog nagiba. Zvučni valovi nalaze se u pravcu s nagibom jednakim njihovoj inverznoj brzini te se pomoću pomno postavljenih parametara mogu prigušiti. Kako su zvučni valovi dominantnim spektrom frekvencija slični reflektiranim valovima treba paziti kako se prilikom prigušivanja zvučnih valova ne bi prigušili refleksi.

Ukoliko su snimanja izvedena metodom višestrukog pokrivanja, više puta je dobiven refleks od svake točke u podzemlju te je na temelju zadane geometrije snimanja prilikom obrade potrebno izdvojiti sve tragove koji pripadaju zajedničkoj dubinskoj točki. Ukoliko se u podzemlju nalaze horizontalni reflektori i brzine lateralno ne variraju, zajednička dubinska točka je jednaka zajedničkoj središnjoj točki (eng. Common mid-point - CMP) (Claerbout, 1985).



Slika 3-8 Putanje zraka odbijenih od zajedničke dubinske točke na horizontalnom reflektoru (a) i nepostojanje zajedničke dubinske točke u slučaju nagnute granice (b)

Nekoliko je digitalnih postupaka obrade seizmičkih podataka kojima se poboljšava kvaliteta seizmičkih profila. Generalno, cilj obrade seizmičkih podataka je poboljšati omjer signal-šum te povećati vertikalnu razlučivost za svaki seizmički trag. Ta dva cilja postižu se dvama različitim tehnikama, a to su: (frekvencijsko) filtriranje i dekonvolucija (inverzno filtriranje). Prije filtriranja provodi se spektralna analiza gdje se određuju dominantne frekvencije reflektiranih i ostalih valova koje smatramo šumom (lomljeni, zvučni i površinski valovi). U ovom postupku najčešće se koristi Fourierova analiza, koja je u kontekstu obrade seizmičkih podatak objašnjena u nizu znanstvenih radova i udžbenika (Sheriff i Geldart, 1995; Kearey i dr., 2002). Na temelju ove analize određuju se parametri koji se koriste u postupku filtriranja. Filtriranjem se može povećati omjer signal-šum, ali se ujedno može umanjiti vertikalna rezolucija. Dekonvolucijom se poboljšava vertikalna razlučivost, ali i smanjuje omjer signal-šum. Kako bi se postigao optimalni rezultat potrebno je kompromisno pristupiti obadi.

Frekvencijsko filtriranje najvažnije je filtriranje u digitalnoj obradi signala. Energija reflektiranih valova je obično prisutna u određenom frekvencijskom rasponu. Specifični izvori šumova i pozadinski šumovi često su prisutni u različitim frekvencijskim rasponima te je razdvajanje šuma i refleksa moguće. Digitalni frekvencijski filtar baziran je na postupku Fourier-ove transformacije. Fourier-ov teorem kaže da se svaki signal može

opisati pomoću sinus i kosinus funkcije. Fourier-ova transformacija transformira vremensku domenu (amplituda kao funkcija vremena) u frekvencijsku domenu (amplituda kao funkcija frekvencije), pomoću formula:

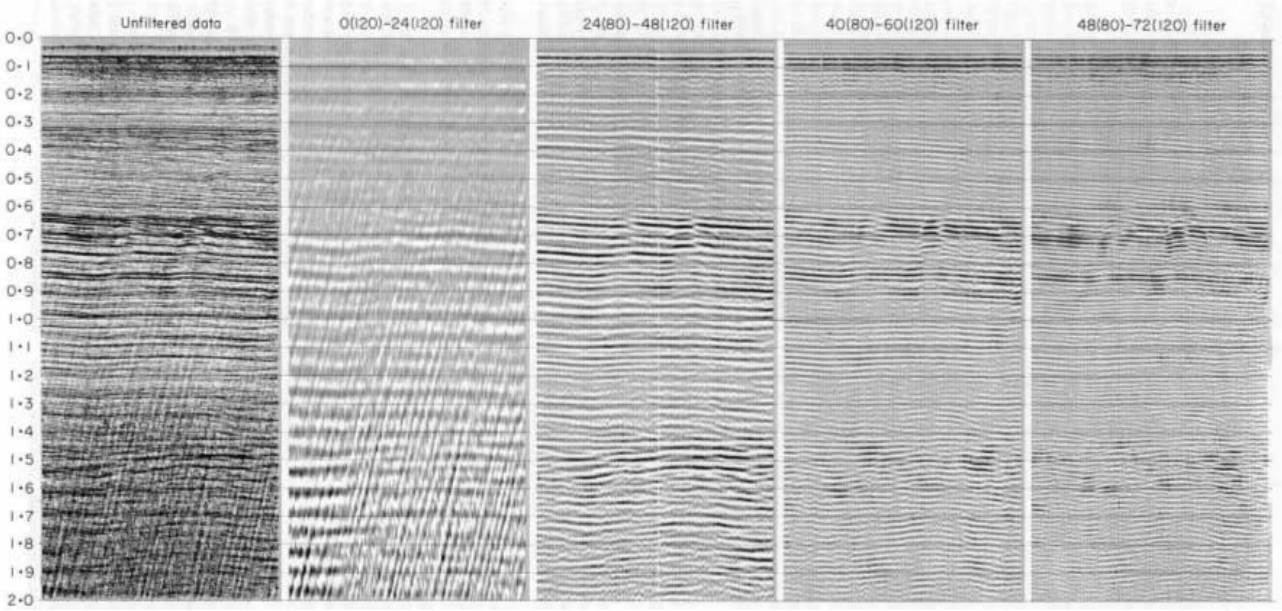
$$G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(t)e^{-i2\pi ft}dt \tag{3.5}$$

$$g(f) = \int_{-\infty}^{\infty} G(t)e^{i2\pi ft}dt \tag{3.6}$$

gdje je funkcija u frekvencijskoj domeni $G(f)$ predstavlja amplitudu fazne razlike između sinus i kosinus funkcija s frekvencijom f. Razlikujemo amplitudni spektar A(f) i fazni spektar Φ(f).

Kako se u frekvencijskoj domeni podaci sastoje od amplitude i faze (realnog i imaginarnog djela), često je vidljiv amplitudni spektar energije. Fourier-ovu transformaciju moguće je vrlo brzo provesti numerički pomoću brze fourierove transformacije (FFT – the Fast Fourier Transform).

U seizmičkim istraživanjima često je samo grubo poznata frekvencija refleksa i frekvencija izvora šumova. Kako bi saznali frekvenciju refleksa za daljnju obradu, podaci se moraju testirati s različitim filtrima te se rezultati moraju usporediti (slika 3-10).

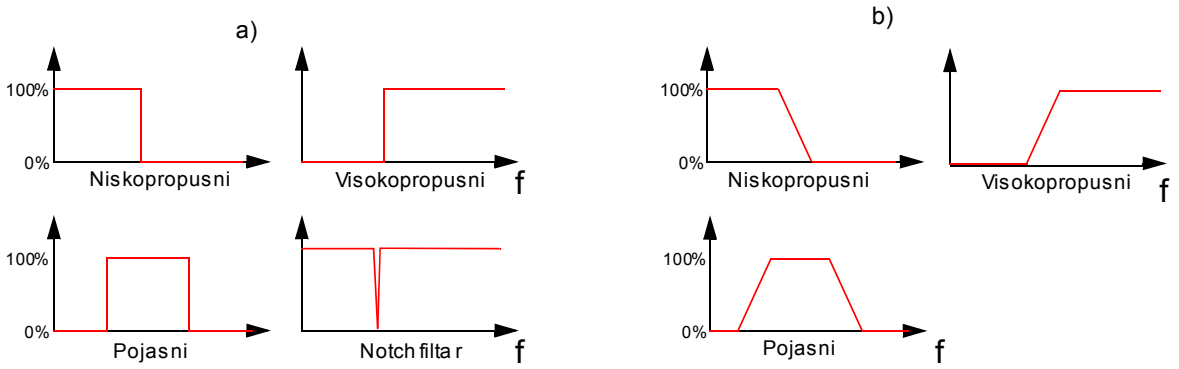


Slika 3-9 Seizmogram filtriran serijom pojasnih filtara različitog frekvencijskog raspona. Ovakav prikaz omogućava geofizičarima odrediti frekvencijskih raspon koji povećava omjer signal-šum (Hatton i dr., 1986)

Postoji nekoliko različitih vrsta filtara:

- niskopropusni
- visokopopusni
- pojasni
- *Notch* filar

Većina filtara primjenjuje se u frekvencijskoj domeni. Na primjer, koristeći niskopropusni filter amplitude svih frekvencija iznad određenje frekvencije svode se na nula. Analogno se podaci filtriraju i s visokopropusnim i pojasnim filterom. *Notch* filter koristi se za anuliranje specifične frekvencije, na primjer šuma frekvencije 50 Hz uzrokovanog električnim vodovima (slika 3-11a). Zbog selektivne apsorpcije visokih frekvencija dominantna se frekvencija reflektiranih valova smanjuje povećanjem duljine njezinog putovanja zbog čega se je potrebno mijenjati karakteristike pojasnih filtara ovisno o vremenu putovanja valova. Ukoliko se prilikom filtriranja ne postavlja oštra granica između frekvencija koje će biti prigušene i koje će ostati na tragu, tada govorimo o gradijentnim filtrima (slika 3-11b). Time je omogućeno da i frekvencije koje se nalaze u rubnom dijelu filtra , djelomično prigušene, ostanu na tragu.



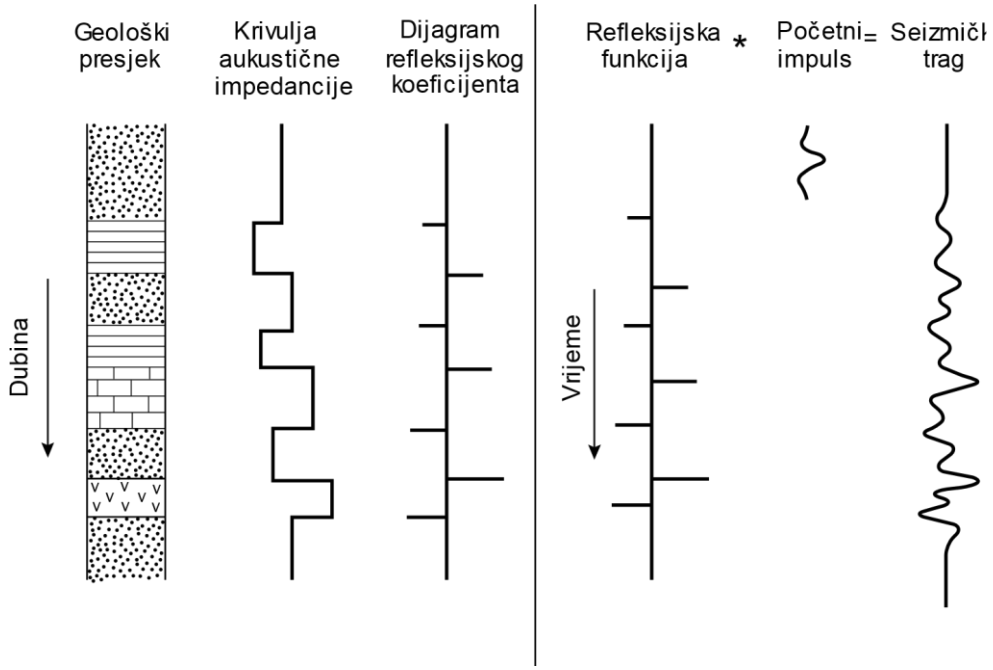
Slika 3-10 Primjer različitih vrsta oštrih (a) i gradijentnih (b) filtara.

Konvolucija je matematička operacija kojom se definira promjena oblika vala uzrokovana prolaskom kroz filtar:

$$y(t) = g(t) * f(t) \quad (3.7)$$

gdje je $y(t)$ izlazni signal, $g(t)$ ulazni signal, a $f(t)$ funkcija filtera. Asterisk $(*)$ unutar formule označava kovolucijski operator. U seizmičkim istraživanjima, dobivamo odziv određenog modela koji konvoluira početni impuls s refleksijskom funkcijom (slika

3-12). U stvarnosti zabilježeni signal se sastoji od konvolucije uzrokovane nekoliko faktora: impulsom izvora, efektom izvora, strukturom podzemlja te šumom.



Slika 3-11 Konvolucijski model refleksijskog seizmičkog traga prikazanog kao konvoluirani produkt refleksijske funkcije i početnog impulsa te odnosa između geološkog modela i refleksijske funkcije.

Dekonvolucija ili inverzno filtriranje (Kanasewich, 1981) je analitički proces koji uklanjanja efekata nekih prethodnih filtriranja signala, a cilj, u seizmičkim istraživanjima, je rekonstrukcija refleksijske funkcije. Inverzni filtri, koji se koriste prilikom dekonvolucije, dizajnirani su tako da uklone posljedice prethodnih filtriranja uzrokovanih prolaskom seizmičkih valova kroz uslojeno podzemlje ili sustav za prihvaćanje signala (geofona i seizmograf). Takvi utjecaji izdužuju početni impuls generiranjem novih valova i absorpcijom visokih frekvencija.

Nakon filtriranja i dekonvolucije izvodi se skaliranje, to jest podešavanje amplituda kako bi se jače istaknuli refleksi. Kako je već spomenuto, amplituda seizmičkog signala opada povećanjem vremena putovanja. Kako bi se ostvarila realistična slika ovo opadanje se mora kompenzirati i to se, zbog težine analitičkog opisivanja iste, radi pomoću aproksimacije. Najjednostavnija metoda je normalizacija tragova. Sve apsolutne vrijednosti tragova se sumiraju i uspoređuju s referentnom vrijednosti. Faktor skaliranja se određuje iz razlike između sumirane i referentne vrijednosti te se cijeli trag množi s njegovim iznosom. Druga metoda je automatsko podešavanje amplituda (eng. Automatic Gain Control - AGC) koja ne podešava trag po cijeloj duljini, već na određenim vremenskim intervalima. Prvo

se računa srednja apsolutna vrijednost amplituda traga unutar određenog vremenskog intervala. Iznos podešavanja dobiva se kao omjer željenog iznosa amplitude i prethodno izračunate srednje vrijednosti (slika 3-13).



Slika 3-12 Princip AGC pojačanja

Zbrajanje tragova (eng. Trace Stack) provodi se zbrajanjem NMO-korigiranih podataka. Rezultat je aproksimacija profila svedenog na vrijeme potrebno da se prevali okomiti put ispod CMP-točke. Postoji nekoliko metoda za zbrajanje različitih NMO-korigiranih tragova. Kod stekiranja srednjom vrijednošću svi tragovi se zbrajaju i dijele s brojem tragova. U određenim situacijama potrebno je težinski zbrojiti tragove kako tragovi s velikim šumom ne bi utjecali na završni prikaz.

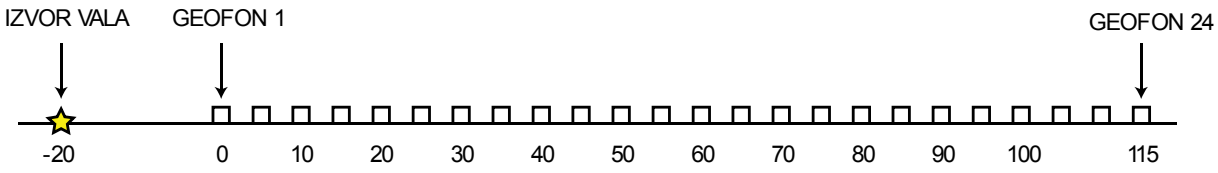
Svi navedeni postupci predstavljaju klasični način obrade refleksijskih podataka koji se provodi već pola stoljeća. Današnjim razvojem elektronske i računalne tehnologije dolazi do automatizacije i ubrzavanja obrade svih vrsta podataka pa tako i refleksijskih. Neke od navedenih postupaka, u suvremenim softverima, nije potrebno samostalno izvoditi, već su oni sastavni dio nekih drugih postupaka. Tako, na primjer, CDP–sortiranje postaje sastavni korak analize brzina. Neki od navedenih postupaka, u određenim geometrijama snimanja, konfiguracijama terena ili vrstama izvora, nije potrebno izvoditi. Ukoliko je površina terena na kojoj se izvode snimanja ravna te ne postoji plitka trošna zona, statički korekciju nije potrebno provoditi. Također je važno navesti da se spomenuti postupci ne moraju izvesti navedenim redoslijedom. U poglavlju 5. opisan je primjer obrade podataka na području Gotalovca unutar koje su postupci provedeni različitim redoslijedom, neki postupci višestruko, a neki, zbog konfiguracije terena ili strukture korištenog softvera, nisu ni provedeni.

4. TERENSKA MJERENJA I GEOMETRIJA SNIMANJA

Vertikalni geofoni visoke rezonantne frekvencije od 100 Hz korišteni su za prijem seizmičkih valova, kako bi se postigla viša rezolucija. Snimanja su izvedena 24-kanalnim digitalnim seizmografom *Terraloc Mk6* s dinamičkim rasponom od 126 dB, švedske tvrtke ABEM. Seizmograf ima mogućnost zbrajanja signala, a pojačanje signala se automatski i trenutno određuje prema ulaznom signalu, jer raspolaže s IFP-pojačalima Najvažniji parametri snimanja i njihove vrijednosti prikazani su u tablici 4-1.

Tablica 4-1 Najvažniji parametri snimanja

PARAMETRI	VRIJEDNOSTI
niskopropusni filtar	1000 Hz
vrijeme uzorkovanja	0,50 ms
duljina snimke	510 ms
eksplozivno punjenje	200 g



Slika 4-1 Geometrija snimanja refleksijskom seizmikom. Razmaknuti asimetrični raspored.

Prije početka samih mjerenja izvedena su pokusna mjerenja radi određivanja odgovarajuće geometrije snimanja, odnosno rasporeda geofona i izvora valova. Geofoni su postavljeni na razmaku od 5 m, zbog dobivanja preciznijih podataka. Kako bi se zahvatile veće dubine i dobili kvalitetniji podaci, seizmički valovi su izazivani eksplozivom (punjenjem od 200 g) u plitkim bušotinama dubine oko 1 m. Miniranja je izvela tvrtka *Hidrologija, miniranje i građenje, d.o.o.*. Snimanja su izvedena asimetričnim razmaknutim rasporedom, a za optimalnu udaljenost izvora valova odabrana je udaljenost od 20 m, slika 4-1. Primijenjena geometrija daje dvanaesterostruko pokrivanje i razmak CDP-točaka 2,5 m. Mjerenja su izvedena na 2 seizmička refleksijska profila označena s P-1 i P-2. Duljina profila P-1 iznosi 350 m, a profila P-2 297,5 m. Njihovi položaji prikazani su na slici 2-2.

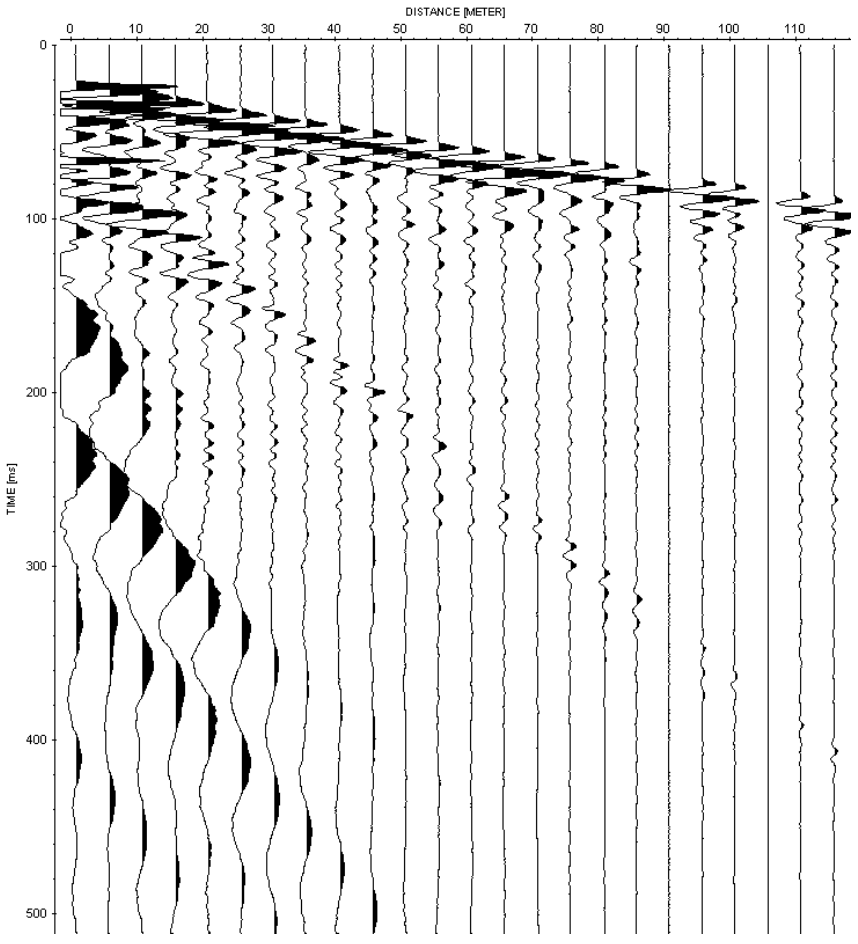
5. OBRADA REFLEKSIJSKIH PODATAKA

Obrada podataka izvedena je pomoću softvera Reflexw (Sendmeier geophysical research), a uključivala je postupke:

- uređivanje tragova,
- prigušivanje refraktiranih valova,
- prigušivanje zvučnih valova,
- filtriranje,
- skaliranje,
- analizu brzina,
- NMO-popravke (dinamičke popravke) i
- zbrajanje tragova

5.1. Uređivanje tragova i prigušivanje zvučnih i refraktiranih valova

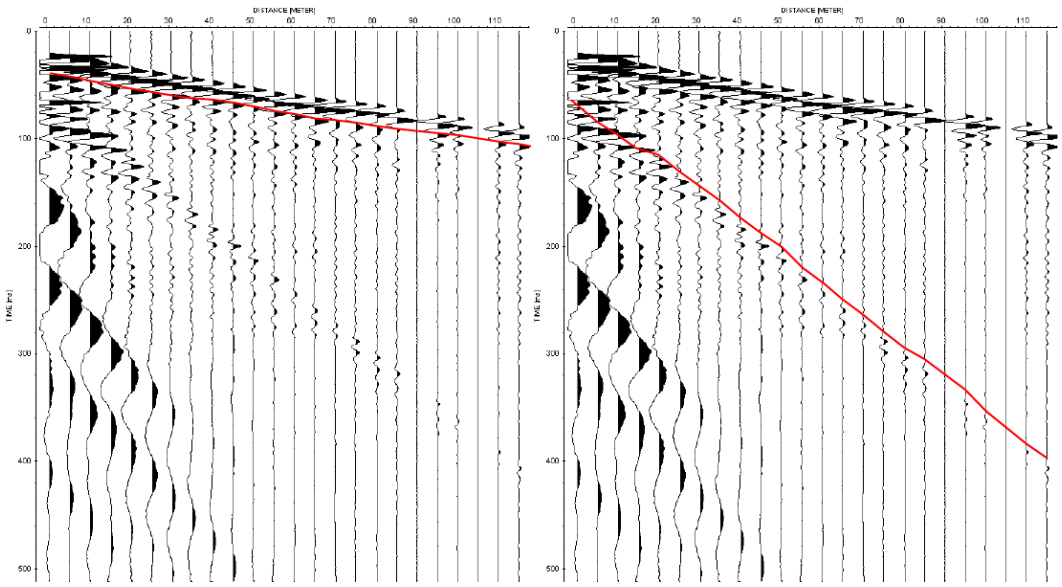
Kako bi se podrobnije objasnili ovi postupci koristit će se seizmogram snimke s oznakom 192 s profila P-1. Neobrađena snimka prikazana je na slici 5-1 te se na njoj mogu uočiti mrtvi tragovi, refraktirani i zvučni valovi koje je potrebno ukloniti.



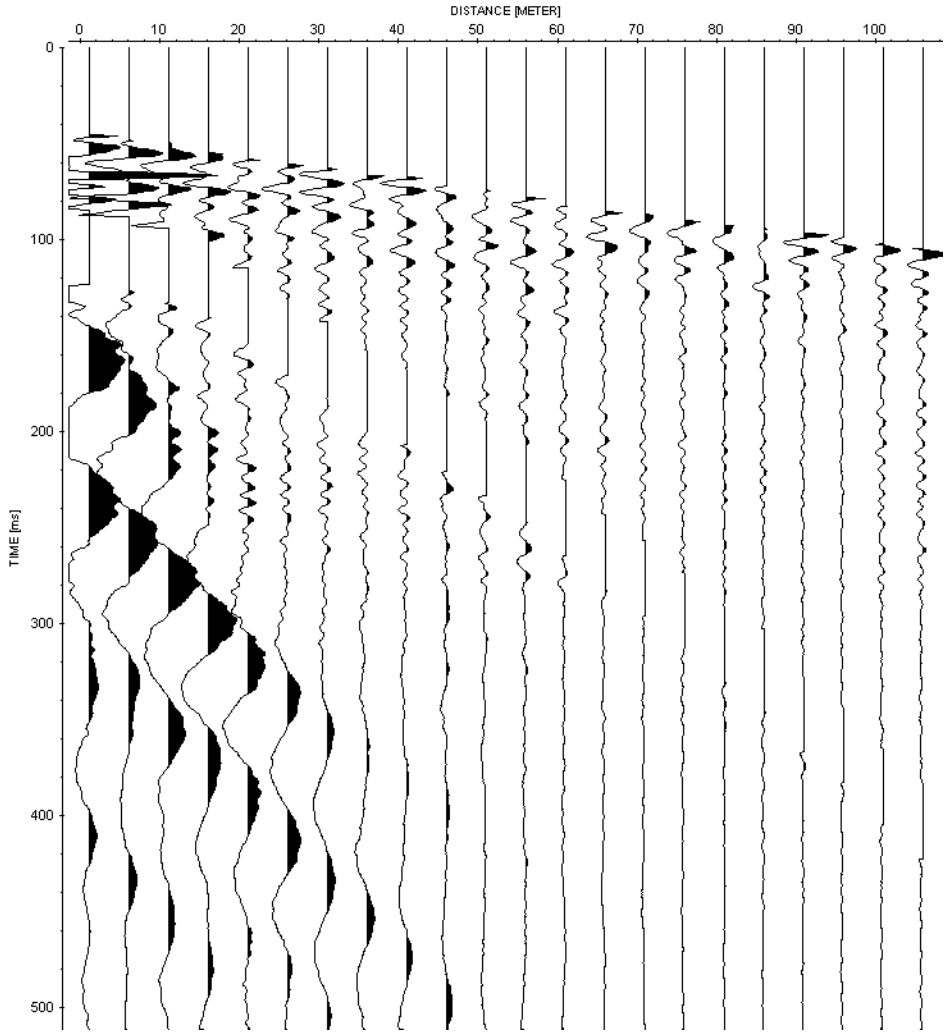
Slika 5-1 prikaz neobrađene snimke pod brojem 192 s profila P-1

Vrlo je jednostavno uočiti kako tragovi snimljeni na devetnaestom i dvadesetprvom geofonu, odnosno devedesetom i sto desetom metru, mrtvi tragovi. Njihov iznos uz manje šumove je jednak nuli cijelom duljinom snimanja te se takvi tragovi moraju ukloniti kako bi se poboljšala kvaliteta i smanjila količina podataka za obradu. Ovaj postupak je izveden pomoći alata *Edit traces* te naredbe *Remove.*

Na početnom tragu u dvostrukom vremenskom periodu od 20 do 40 ms, a na zadnjem od 80 do 100 ms nalaze se prvi nailasci, odnosno refraktirani valovi koji se prigušuju (eng. Trace Muting). Zvučni valovi na početnom tragu se nalaze u periodu od 80 do 120 ms, a na posljednjem od 400 do 420 ms. Neželjeni valovi uklonjeni su pomoću alata *Muting* te dvaju linijskih podataka konstruiranih unutar softvera. Linijski podaci konstruirani su tako da se unutar svakog traga nalaze u jednakom položaju u odnosu na amplitudu neželjenog vala. Tako se prvi linijski podatak nalazi odmah nakon nailaska refraktiranog vala, a drugi netom prije nailaska zvučnog. Prilikom prigušenja refraktiranog vala unutar alata *Muting* podešava se apsolutno brisanje iznad linijskog podatka s gradijentnim prijelazom (eng. Taper Window) od 10 ms Zvučni val prigušen je opcijom brisanja ispod linije u duljini od 50 ms te gradijentnim prijelazom od 5 ms (slika 5-2). Snimka koja je provedena kroz navedene postupke prikazana je na slici 5-3.



Slika 5-2 Dva linijska podatka prikazana na snimkama (crvene linije), pomoću kojih je izveden postupak prigušenja refraktiranih i zvučnih valova.



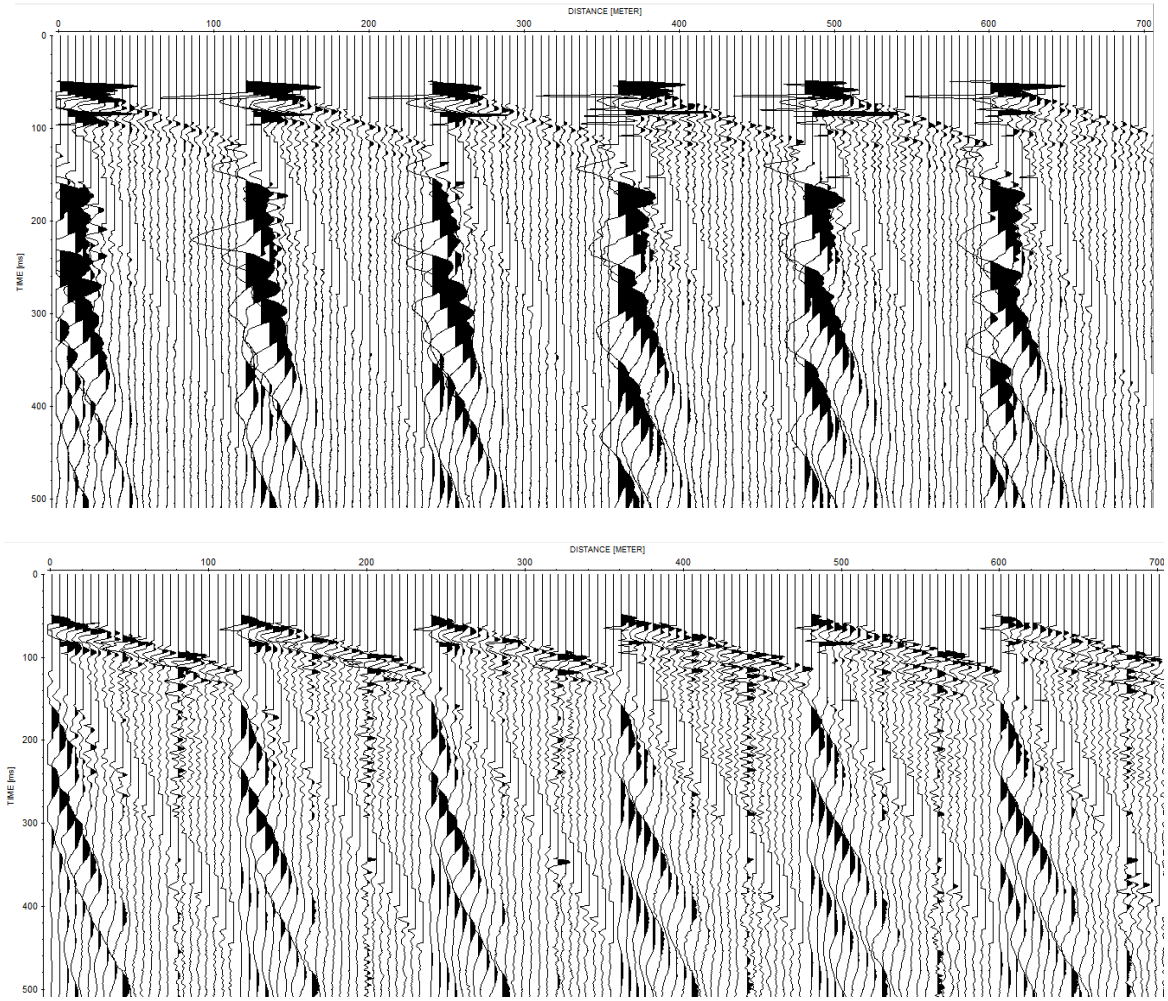
Slika 5-3 Snimka 192 provedena kroz postupke uklanjanja mrtvih tragova te prigušenje refraktiranih i zvučnih valova.

5.2. Skaliranje i filtriranje

Nakon što su sa svih pojedinačnih snimaka odstranjeni svi neželjeni tragovi i amplitude, snimke se povezuju u jednu tako da se njihovi seizmogrami kronološki pozicioniraju jedan do drugoga. Na takvoj snimci, prikazanoj na slici 5-4, vidljivo je kako snimkom dominiraju površinski te zaostali refraktirani i zvučni valovi skriveni među refleksima na geofonima najbližim točki paljenja.

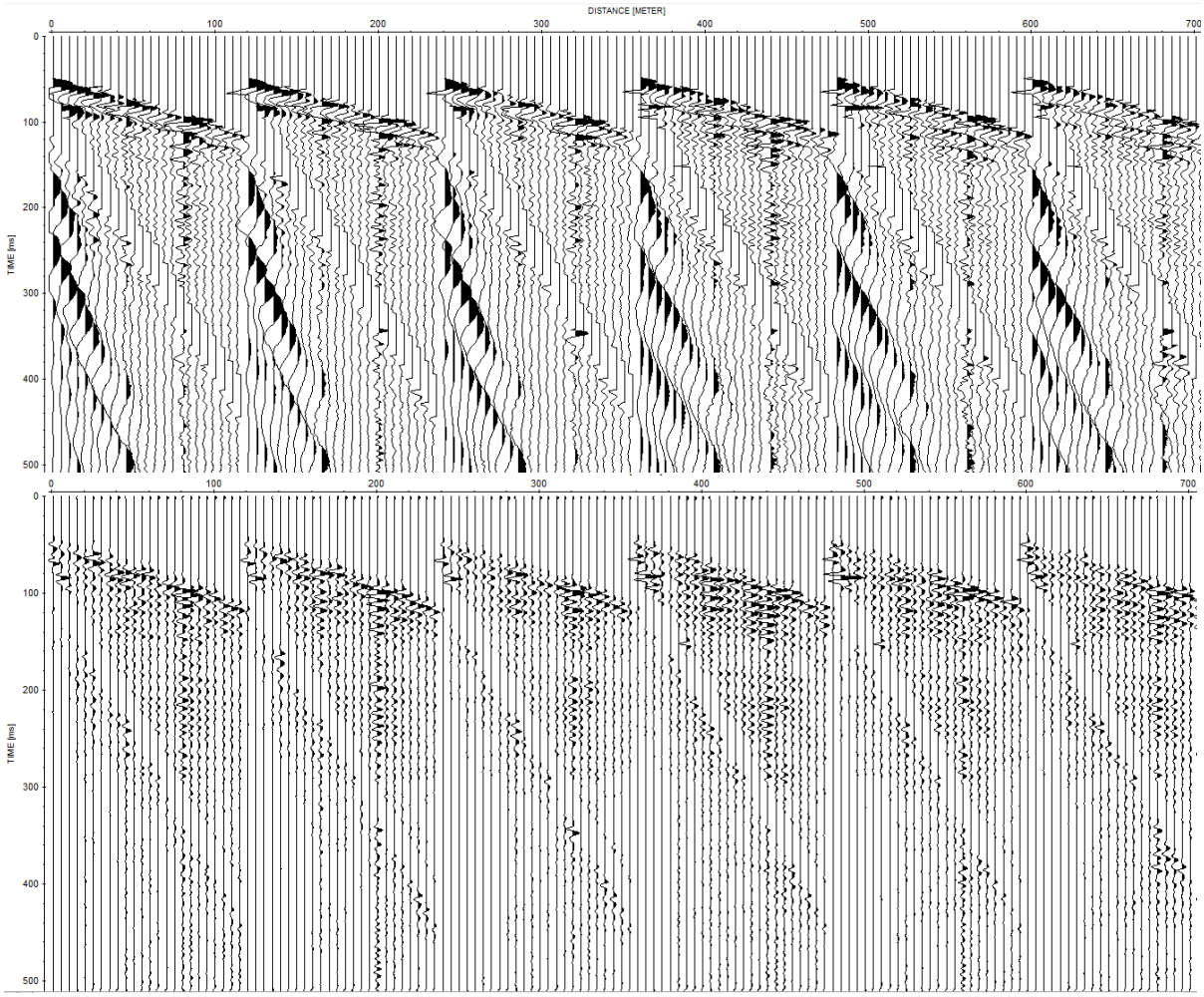
Kako bi istaknuli reflekse na snimci potrebno je provesti normiranje energije, odnosno skaliranje. Skaliranje snimke provodi se pomoću skalirajućeg raspona (eng. Scaled Windowgain) te je potrebno postaviti veličinu raspona na način koji omogućuje kvalitetno normiranje energije. Kao početna vrijednost uzima se nula milisekundi, a završna vrijednost je povratno vrijeme do glavnog reflektora na geofonu najudaljenijem od

točke paljenja. Za obrađivani profil najbolji rezultati dobiveni su pri rasponu od 0 do 300 ms (slika 5-4).



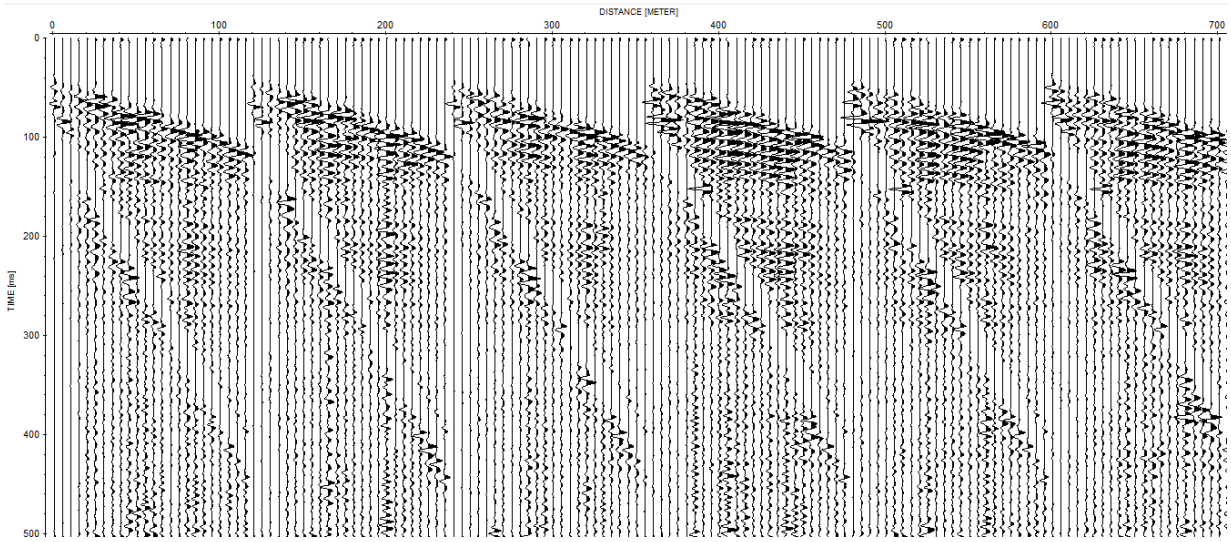
Slika 5-4 Isječak zajedničke snimke profila P-1 prije skaliranja (gore) i nakon (dolje)

Snimkom još uvijek dominiraju površinski valovi koje je moguće ukloniti jedino filtriranjem. Površinski se valovi od refleksa razlikuju u dva značajna parametra: frekvenciji i brzini. Vrijednosti ovih parametara kod površinskih valova značajno su manji, nego što je to kod refleksa. Na obrađivanom profilu primijenjen je filtar u frekvencijskom području koji propušta pojas frekvencija (eng. Band-pass Frequency), a ostale prigušuje. Najbolje rezultate daje s parametrom gradijentnog ulaza od 50 do 100 Hz i gradijentnog izlaza od 200 do 250 Hz (slika 5-5).



Slika 5-5 Isječak skalirane zajedničke snimke profila P-1 prije filtriranja (gore) i nakon (dolje).

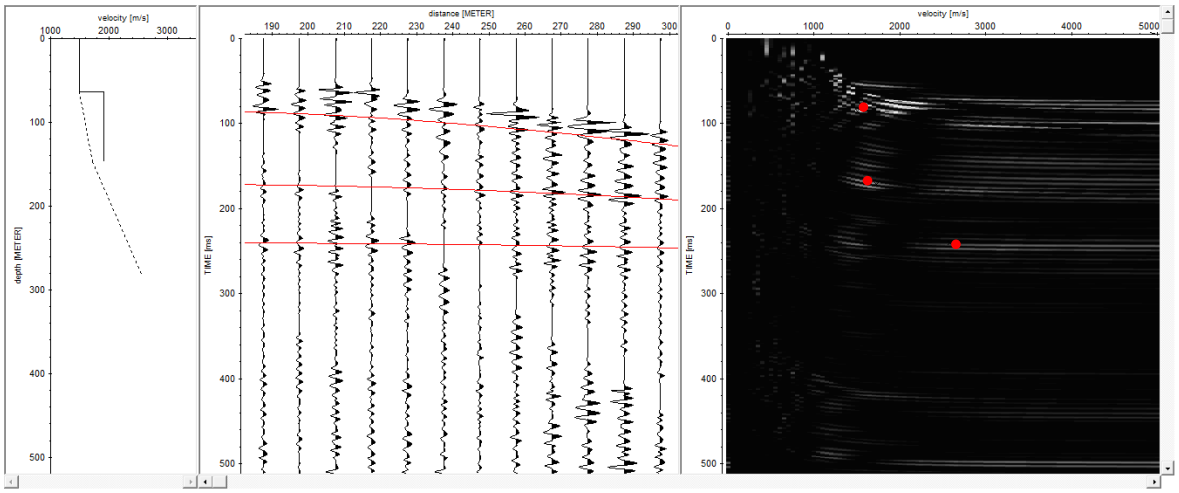
I nakon provedenih postupaka potrebno je još jednom, zbog prigušenih dubokih refleksa, provesti skaliranje. Ovaj put se skaliranje provodi pomoću automatskog podešavanja amplituda. Kao vremenski raspon za koji se računa srednja apsolutna amplituda postavlja se na 300 ms te se za tu vrijednost dobivaju najbolji rezultati (slika 5-6).



Slika 5-6 Isječak filtriranog profila nakon provedenog automatskog podešavanja amplituda.

5.3. Analiza brzina i zbrajanje tragova

Kako bi se provela NMO-korekcija potrebno je poznavati brzine reflektiranih valova što saznajemo pomoću analize brzina. Unutar korištenog softvera prije same analize automatski se provodi CMP-sortiranje te korisnik samostalno odabire CMP-snimke pogodne za analizu. Na temelju geometrije snimanja profila P-1 izdvojeno je 140 CMP-točaka. Na slici 5-7 prikazan je skup tragova CMP-točke 70 na kojima je provedena analiza. Analiza se provodi pomoću prikaza spektra stekirajućih brzina prikazan u desnom dijelu slike 5-7. Spektar se računa u rasponu od 0 do 5000 m/s s inkrementom brzina od 50 m/s. Na horizontalnoj osi prikaza nanesene su brzine, a na vertikalnom povratna vremena. Model brzina se konstruira tako da se odabiru najsvjetlija polja unutar prikaza, odnosno najviše stekirane amplitude. Promjena odabranih brzina po dubini prikazana je na grafu u lijevom dijelu slike 5-7. Proces se ponavlja za skup tragova CMP-točki 10, 40, 50, 70, 90, 120 i 130. U tablici 5-1 prikazane su vrijednosti brzina dobivene analizom za profil P-1.

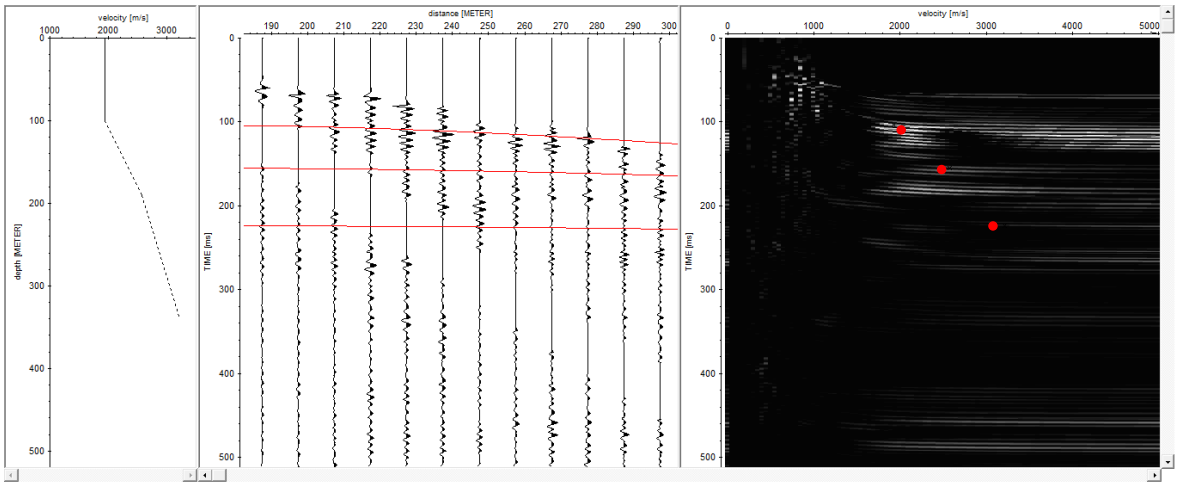


Slika 5-7 Rezultati analize brzina provedene na skupu tragova CMP-točke 70 profila P-1: graf s prikazom vertikalne razdiobe brzine (lijevo), skup tragova CMP-točke s linijama brzina (sredina), prikaz spektra stekirajuće brzine (desno).

Tablica 5-1 Prikaz rezultata analize brzina za profil P-1

	1. rezultat		2. rezultat		3. rezultat	
CMP-točka	Povratno vrijeme (ms)	Brzina (m/s)	Povratno vrijeme (ms)	Brzina (m/s)	Povratno vrijeme (ms)	Brzina (m/s)
10	90	1526	165	1650	240	2450
40	85	1278	100	1790	200	2576
50	100	1389	130	1950	240	2650
70	85	1493	174	1687	250	2862
90	110	1560	180	2058	240	2524
120	105	1489	172	1950	210	2485
130	100	1780	200	2580	200	2555

Na temelju geometrije snimanja profila P-2 izdvojeno je 119 CMP-točaka. Na slici 5-8 prikazan je skup tragova CMP-točke 70 na kojima je provedena analiza. Spektar stekirajućih brzina izračunat jednakim parametrima kao i za profil P-1. Proces je ponovljen za skup tragova CMP-točki 10, 40, 50, 70, 90, 120 i 130. U tablici 5-2 prikazane su vrijednosti brzina dobivene analizom za profil P-2.



Slika 5-8 Rezultati analize brzina provedene na skupu tragova CMP-točke 70 profila P-2: graf s prikazom vertikalne razdiobe brzine (lijevo), skup tragova CMP-točke s linijama brzina (sredina), prikaz spektra stekirajuće brzine (desno).

Tablica 5-2 Prikaz rezultata analize brzina za profil P-2

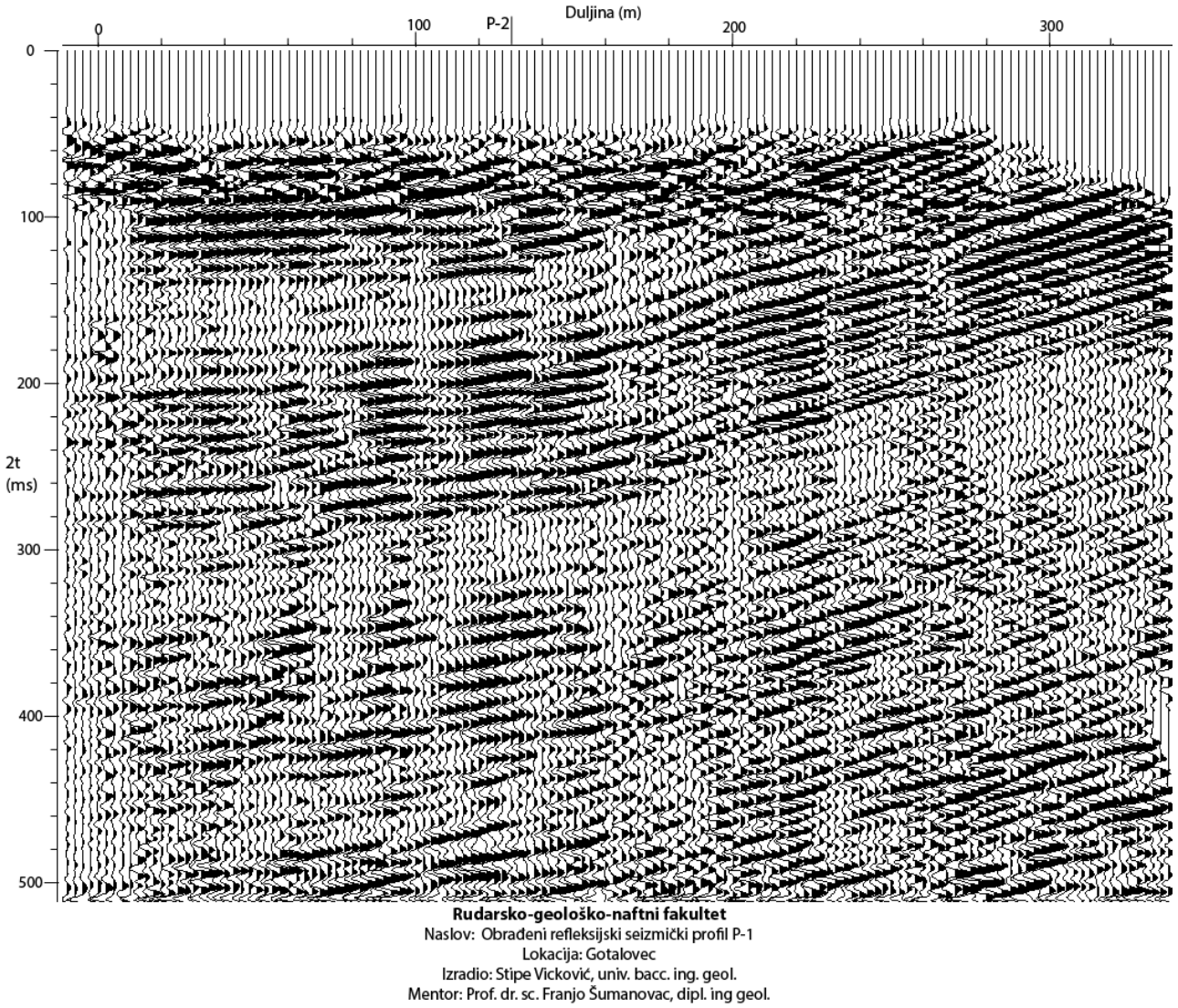
	1. rezultat		2. rezultat		3. rezultat	
CMP-točka	Povratno vrijeme (ms)	Brzina (m/s)	Povratno vrijeme (ms)	Brzina (m/s)	Povratno vrijeme (ms)	Brzina (m/s)
10	86	1756	170	2250	240	2580
30	85	1789	105	2350	190	2656
50	100	1958	140	2256	240	2650
70	101	1986	152	2450	245	2842
88	110	2010	180	2220	240	2580
90	105	2017	172	2487	220	2690

Nakon što je određen model brzina u podzemlju može se pristupiti provođenju NMO-korekcija. Korišteni softver postupke NMO-korigiranja i zbrajanja tragova objedinjuje u jedan, što znači da se prije samog zbrajanja, na temelju dobivenog modela brzina, vremena refleksa svode na njihovo nulto vrijeme.

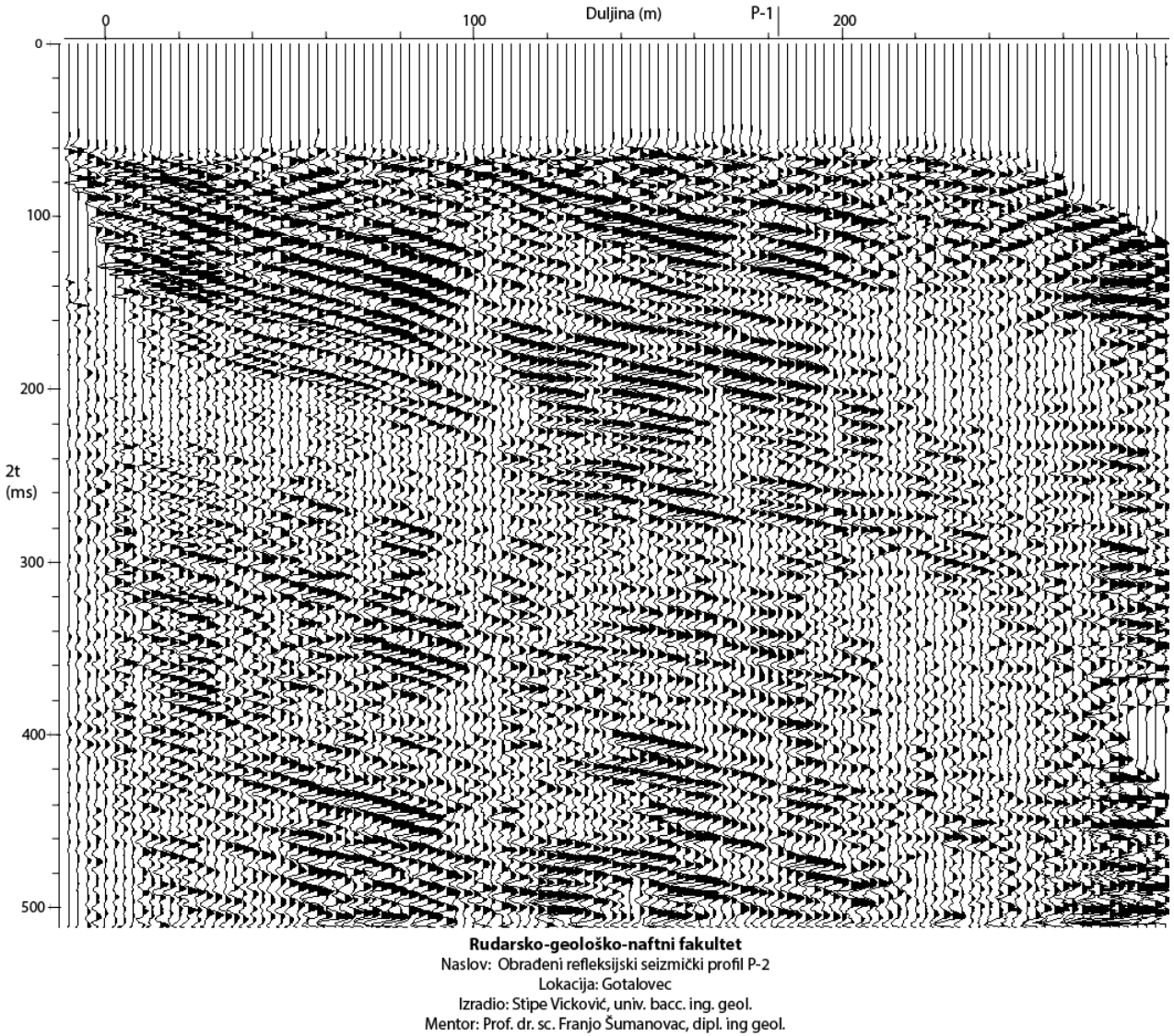
5.4. Rezultati obrade

Zbrajanje tragova je posljednji korak u obradi podataka te se njime dobiva konačni prikaz seizmičkog profila (slika 5-9 i slika 5-10). Seizmički profili su prikazani kao vremenski što znači da su na vertikalnu os nanesena vremena nailazaka reflektiranih valova svedena dinamičkim korekcijama na vrijednost kada se točka paljenja i geofon nalaze u istoj točki, vrijeme za okomiti put zrake koji se naziva dvostrukim vremenom putovanja vala i označava s *2t*. Na horizontalnu os nanesena je duljina profila u metrima. Udaljenost između tragova iznosi 2,5 m. Kako bi se lakše pratili refleksi, pozitivni dio amplitude zacrni se te se jasnije uočavaju litološke granice i drugi diskontinuiteti.

Refleksijskim seizmičkim istraživanjima dobiveni su izuzetno kvalitetni podaci koji kvalitetnom obradom i prikazom predstavljaju rezultat ovog rada. Na profilima se vidi cijeli niz vrlo oštrih refleksa raspoređenih u nekoliko setova pa je uz pomoć podataka iz istraživačke bušotine moguće izvesti i seizmostratigrafsku interpretaciju. U prvoj polovici profila P-1 refleksi se vrlo blago uzdižu prema središtu, dok se u njegovoj drugoj polovici uočava razmjerno jako uzdizanje prema kraju. Na profilu P-2 nalazi se kontinuirani, razmjerno strmi pad refleksa prema kraju profila. Na temelju prekida refleksa i naglih promjena nagiba mogu se odrediti položaji rasjeda. Tako se mogu izdvojiti četiri najizraženija položaja. Na profilu P-1, na položaju 165 m uočava se nagla promjena nagiba i prekidi refleksa, a na položaju 175 m vide se prekidi refleksa. Na položaju 102 m na profilu P-2 vide se prekidi refleksa, a na položaju 250 m se, uz prekide, uočava i nagla promjena nagiba refleksa, od strmo nagnutih prema horizontalnim ili blago nagnutim. Na profilu P-1 po vertikali se uočavaju tri seta jakih, uglavnom kontinuiranih, refleksa između kojih se nalaze zone sa slabim i diskontinuiranim refleksima. Prvi set se nalazi do dvostrukog vremena putovanja od 140 ms, drugi u intervalu od 179 do 285 ms, a treći od 336 do 444 ms. Na profilu P-2 se nalaze setovi koji nisu toliko jaki i kontinuirani, ali je moguće izdvojiti tri karakteristična. Prvi se na kraju profila nalazi do dvostrukog vremena od 160 ms, drugi u intervalu od 222 do 360 ms, a treći od 420 ms.



Slika 5-9 Obrađeni refleksijski seizmički profil P-1



Slika 5-10 Obrađeni refleksijski seizmički profil P-2

6. ZAKLJUČAK

Na području naselja Gotalovec izvedena su geofizička istraživanja u okviru hidrogeoloških istraživanja u svrhu detaljnog kartiranja na mikrolokaciji. Primijenjena je metoda refleksijske seizmike visoke rezolucije kako bi se preciznije kartirali strukturni odnosi na izdvojenoj lokaciji.

Refleksijskim seizmičkim mjerenjem na profilima P-1 i P-2, kao mjereni podatak, dobiveno je 109 datoteka koje sadržavaju informacije o odzivu seizmičkih valova za svaki seizmogram za svako snimanje. Svako snimanje je bilo potrebno pregledati te ukloniti mrtve tragove, refraktirane i zvučne valove što je uz pomoć softvera Reflexw i automatizacije koja je u njemu omogućena, učinjeno vrlo brzo i jednostavno. Nakon toga su snimke spojene u zajedničku snimku profila te se pristupilo postupcima kojima se na snimkama nastoje istaknuti refleksi, a prigušiti neželjeni površinski te zaostali refraktirani i zvučni valovi. Iskustvo pri izradi ovog rada kazuje kako je nekad potrebno više puta i različitom redoslijedom provesti ove korake kako bi se dobio optimalni rezultat. Prije provođenja NMO-korekcije i zbrajanja tragova potrebno je provesti CMP sortiranje i analizu brzina. Softver Reflexw omogućava automatsko sortiranje CMP-tragova te jednostavnu analizu i kreiranje modela brzina što dovodi do optimalnih rezultata. Zbog izrazito ravnog terena te homogenih brzina u površinskom dijelu, provođenje statičkih korekcija nije bilo potrebno.

Zbog kvalitete mjerenih podataka, njihove kvalitetne obrade i prikaza na profilima se vidi niz vrlo jasnih refleksa raspoređenih u nekoliko setova, pa će se uz pomoć podataka iz istraživačke bušotine moći izvesti i seizmostratigrafska interpretacija. Na temelju prekida refleksa i naglih promjena mogu se odrediti položaji rasjeda. Tako se mogu izdvojiti četiri položaja: 165 i 175 m na profilu P-1 te 102 i 250 m na profilu P-2.

7. LITERATURA

BOROVIĆ, S., MARKOVIĆ, T., LARVA, O., BRKIĆ, Ž., MRAZ, V., 2016. Mineral and thermal waters in the Croatian part of the Pannonian basin. Mineral and Thermal Waters of Southeastern Europe, Environmental Earth Sciences

BRAILE, L.W. 2000. Seismic Waves and the Slinky: A Guide for Teachers. http://www.gg.uwyo.edu/geol2005a/lectures/seismics/WaveDemo.pdf

CLAERBOUT, J.F., 1985. Fundamentals of Geophysical Dana Processing. McGraw Hill, New York

COX, M., 2001. Static Corrections for Seismic Reflection Surveys. Society of Exploration Geophysicist, 39, str. 292-301.

DRAGIČEVIĆ, I., BLAŠKOVIĆ, I., MAYER, D., TOMLJENOVIĆ, B., 1998. Mountain aquifers of the northern Croatia. XIXth Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, Osijek, Paper No. 3.28.

GARDNER, G.H.F., GARDNER, L.W., GREGORY, A.R., 1974. Formation velocity and density – the diagnostic basics for stratigraphic traps. Geophysics, 39, str. 770-780.

HATTON, L., WORTHINGTON, M.H., MAKIN, J., 1986. Seismic Dana Processing. Black well Scientific Publications, Oxford.

KANASEWICH, E.R., 1981. Time Sequence Analysis in Geophysics (3rd edn). University of Alberta.

MILLER, R.D., 1991. Seismic-reflection processing demonstration using EAVESDROPPER. Kansas Geological Survey

MILLIGAN, M., 2004. What are seismic surveys and how much shaking do they create? Survey Notes, Utah Geological Survey, 36(3), str. 10–11.

O'BRIEN, P.N.S., 1974. Aspects seismic research in the oil industry. Geoexploration, 12, str. 75-96.

PRESS, F. , 1966. Seismic velocities. Handbook of Physical Constants. Geological Society of America, 97, str. 195-218.

SHERIFF, R.E., GELDART, L.P., 1995. Exploration Seismology. Second Edition, Cambridge Univ. Press, Cambridge.

ŠIMUNIĆ, A., PIKIJA, M., HEĆIMOVIĆ, I., 1982. Osnovna geološka karta SFRJ, List Varaždin, L33-69. Geološki zavod – OOUR za geologiju i paleontologiju Zagreb, 1971-1978. Savezni geološki zavod, Beograd.

ŠUMANOVAC, F., 2006. Mapping of thin sandy aquifers by using high resolution reflection seismics and 2-D electrical tomography. Journal of Applied Geophysics, 58, str. 144-157.

ŠUMANOVAC, F., 2007. Geofizička istraživanja podzemnih voda. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

ŠUMANOVAC, F., 2012. Osnove geofizičkih istraživanja. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu

ŠUMANOVAC, F., OREŠKOVIĆ, J., 2018. Exploration of buried carbonate aquifers by the inverse and forward modelling of the Controlled Source Audio-Magnetotelluric data. Journal of Applied Geophysics, 153, str. 47-63.

TANER, M.T., KOEHLER, F, 1996. Velocity spectra – digital computer derivation and applications of velocity functions. Geophysics, 34, str. 859-881.