Seizmički diskontinuiteti i indeks kvalitete stijenske mase

Košić, Mijo

Master's thesis / Diplomski rad

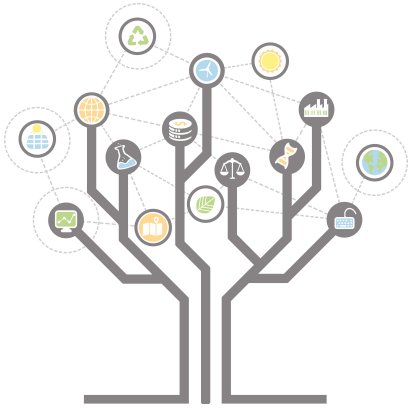
2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:646657

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**



Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Seizmički diskontinuiteti i indeks kvalitete stijenske mase

Košić, Mijo

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:646657

Rights / Prava: In copyright

Download date / Datum preuzimanja: **2020-11-04**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET VARAŽDIN



MIJO KOŠIĆ

SEIZMIČKI DISKONTINUITETI I INDEKS KVALITETE STIJENSKE MASE

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2017

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET VARAŽDIN

DIPLOMSKI RAD

SEIZMIČKI DISKONTINUITETI I INDEKS KVALITETE STIJENSKE MASE

KANDIDAT:

MIJO KOŠIĆ

MENTOR:

doc.dr.sc. MARIO GAZDEK

VARAŽDIN, 2017

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: MIJO KOŠIĆ

Matični broj: 127 - 2015./2016.

Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

SEIZMIČKI DISKONTINUITETI I INDEKS KVALITETE STIJENSKE MASE

Rad treba sadržati:
1. Uvod
2. Lokacija testiranja seizmičkog indeksa kvalitete – EP Belski dol
3. Prevladavajuća stijena na području istraživanja
4. Klasifikacija stijenske mase
5. Diskontinuiteti i seizmički diskontinuiteti
6. Opis istraživačkog profila
7. Seizmička refrakcija (refrakcijska tomografija) te WET i Eikonal analiza
8. Indeks seizmičke kvalitete stijena
9. Rezultat – Interpretacija profila tomografije indeksom seizmičke kvalitete na primjeru kosine kamenoloma u Beli
10. Zaključak
11. Literatura

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 14.04.2017. Rok predaje: 11.09.2017.

Mentor:
MGazdek
Doc.dr.sc. Mario Gazdek

REPUBLIKA HRVATSKA - GEOTEHNIČKI FAKULTET VARAŽDIN - SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

Predsjednik Odbora za nastavu:
Igor Pet
Doc.dr.sc. Igor Petrović

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je diplomski rad pod naslovom

SEIZMIČKI DISKONTINUITETI I INDEKS KVALITETE STIJENSKE MASE

(naslov diplomskog rada)

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izraden pod mentorstvom doc.dr.sc. Mario Gazdek.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 07.09.2017

MISO KLOŠIĆ
(Ime i prezime)

KLOŠIĆ
(Vlastoručni potpis)

Sažetak

U ovom radu je prikazano kako se kvaliteta stijenske mase može i kvantitativno procijeniti na temelju tomografske slike refrakcijskih brzina. Koncept kvalitete stijenske mase se općenito temelji na pojmovima homogenosti i monolitnosti. Kvaliteta se smanjuje s povećanjem broja fraktura, dakle s većom frekvencijom diskontinuiteta fizičko-mehanička svojstva stijenske mase slabe.

Ispitivanja i mjerenja svojstava stijenske mase su vrlo često složena, zahtjevna, dugotrajna i skupa, a ipak lokalizirana, ograničena i vrlo specifična. Provode se na uzorku ili u posebnim uvjetima na terenu. Zbog toga se u praksi razvio čitav niz inženjerskih veličina i metoda kojima se kvantitativno određuje kvaliteta stijenske mase. Seizmički indeks kvalitete je jedna od tih metoda u kojoj se koristi standardna seizmička refrakcija i tomografska analiza vrijednosti brzina u seizmičkom presjeku. Osnovno pitanje je bilo: Kako detektirati diskontinuitet na slici seizmičkih brzina? Odgovor je: SQi kojim se detektiraju seizmički diskontinuiteti. Takvi prekidi u polju brzina mogu ukazivati i na stvarne mehaničke promjene kao što su primjerice: pukotine, šupljine, zdrobljene zone, zone glinene ispune.

Ključne riječi: seizmički diskontinuitet, indeks kvalitete stijenske mase

Sadržaj

1. Uvod ... 1

2. Lokacija testiranja seizmičkog indeksa kvalitete – EP Belski dol ... 4

3. Prevladavajuća stijena na području istraživanja ... 6

4. Klasifikacija stijenske mase ... 8

4.1. RQD klasifikacija ... 10

5. Diskontinuiteti i seizmički diskontinuiteti ... 12

5.1. Klasifikacija diskontinuiteta ... 14

5.2. Seizmički diskontinuiteti ... 16

6. Opis istraživačkog profila ... 17

7. Seizmička refrakcija (refrakcijska tomografija) te WET i Eikonal analiza ... 19

7.1. Protokol za refrakcijsku seizmiku (oprema) ... 20

7.2. WET i Eikonal analiza ... 21

8. Indeks seizmičke kvalitete stijena ... 22

8.1. Uvod u SQi ... 22

8.2. Definicija indeksa seizmičke kvalitete (SQi) ... 23

8.3. Prednosti i nedostaci SQi ... 27

9. Rezultat - Interpretacija profila tomografije indeksom seizmičke kvalitete na primjeru kosine kamenoloma u Beli ... 30

10. Zaključak ... 46

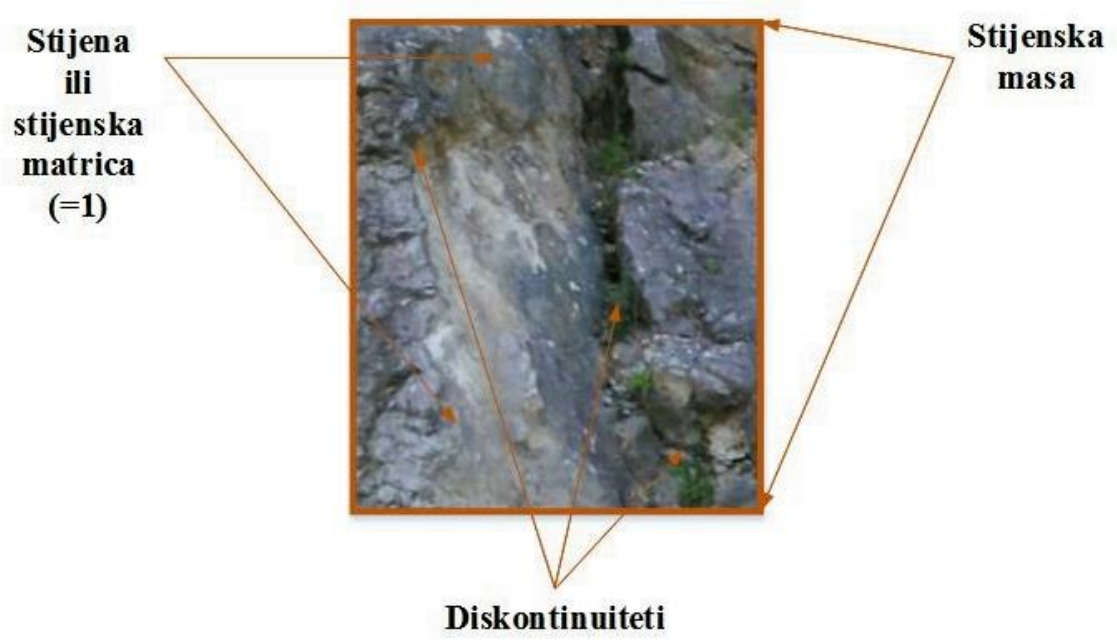
11. Literatura ... 47

1. Uvod

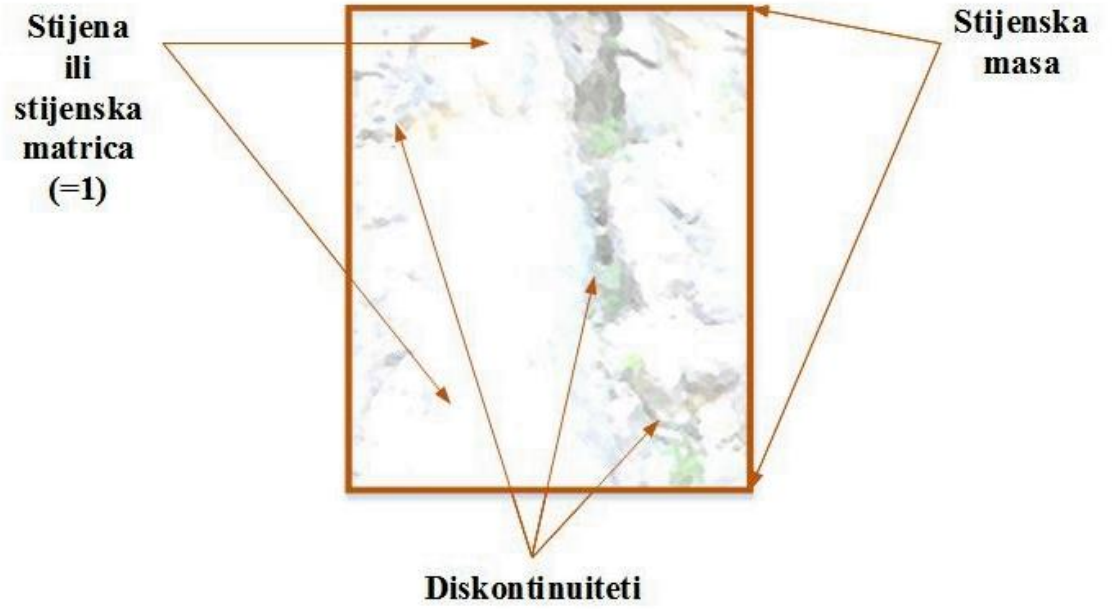
Diskontinuiranost je jedno od najvažnijih inženjerskih svojstava stijenske mase. Pokazatelji njene kvalitete se parametriziraju i opisuju zasebnim svojstvima diskontinuiteta. Diskontinuitet je bilo koji prekid geološkog kontinuuma u stijenskoj masi koji ima malu ili nikakvu vlačnu čvrstoću te kod kojeg dolazi do potpunog gubitka kohezije. Stijenska masa je definirana kao sustav koji se sastoji od intaktne stijene i diskontinuiteta (International Society for Rock Mechanics).

Ideja za analizu primjene SQi metode na stijenskim usjecima, zasjecima i kosinama, odnosno na otvorenim plohama stijenske mase je dobiti odgovor na sljedeća pitanja: mogu li se iz tomografskog presjeka seizmičkih brzina razlučiti seizmički diskontinuiteti kao očiti diskontinuiteti na slikama 1. i 2.? Kakvi su rezultati usporedbe refleksa svjetlosti s plohe (fotografija) i SQi analize u seizmičkom presjeku 2 do 3 m iza čela? Može li se ustanoviti kontinuitet prodora (položaj i pravac) diskontinuiteta u dubinu fotografije?

Mogu li se rezultati usporedbe iskoristiti inženjerski, primjerice za planiranje projekta sanacije nestabilnog stijenskog pokosa?

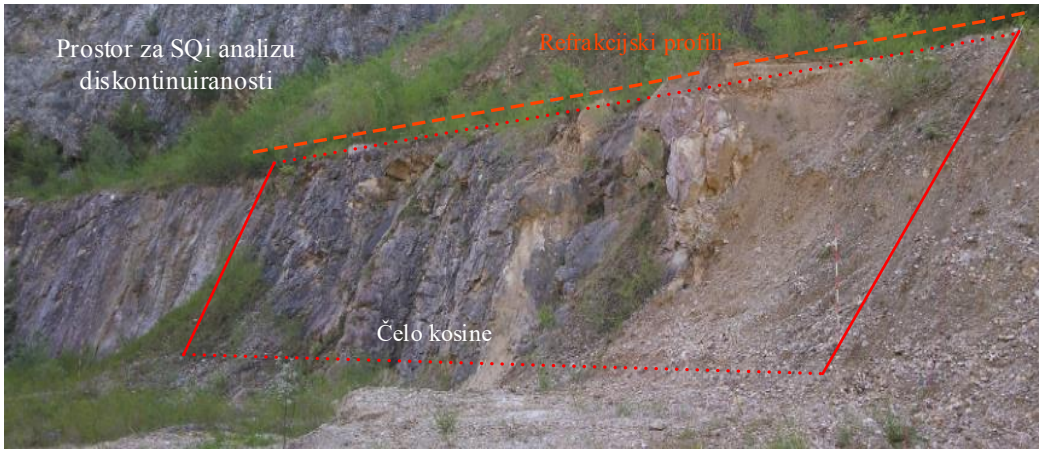


Slika 1. Prikaz stijenske mase i diskontinuiteta



Slika 2. Prikaz svjetlosnog otiska prethodne fotografije

Kako bi došli do odgovora na prethodno postavljena pitanja, istraživanja smo proveli na otvorenoj trasi kamenoloma u Beli (Slika 3.).



Slika 3. Kamenolom u Beli

2. Lokacija testiranja seizmičkog indeksa kvalitete – EP Belski dol

Područje na kojem se obavljalo istraživanje nalazi se u Varaždinskoj županiji, točnije uz cestu Bela Podrute, jedan i pol kilometar zračne udaljenosti od centra Bele (Slika 4. i 5.). Ovo eksploatacijsko polje je ležište tehničko – građevnog kamena koje se površinski prostire na šest kilometara te mu je službeni naziv „Belski dol – donji“. Ovlaštenik eksploatacijskog polja je rudarsko gospodarski subjekt Vodogradnja Varaždin d.d. iz Varaždina. Koncesija je dobivena za razdoblje od 2015. do 2027. godine. Međutim u kamenolomu je prekinuta eksploatacija zbog mogućih štetnih djelovanja na vodocrpilište koje se nalazi u neposrednoj blizini kamenoloma. Prema podacima iz 1999. godine, eksploatacijske rezerve iznose 54800 m^3. (Dedić i sur., 2015)



Slika 4. Satelitska snimka zračne udaljenosti naselja Bela i EP Belski Dol

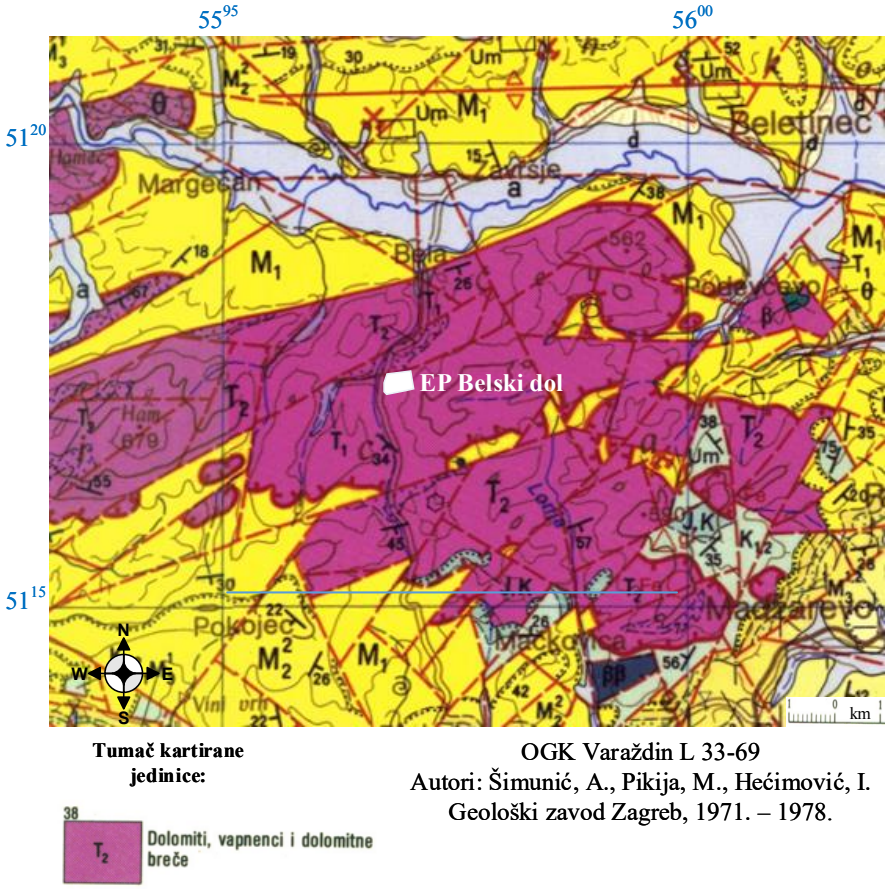


Slika 5. Satelitska snimka EP Belski Dol - donji, površine 6,0 ha

Ovo eksploatacijsko polje, ali i šire područje čine prema geološkoj građi terena trijaski sedimenti, uglavnom karbonatnog sustava. Mineralna sirovina koja se eksploatirala za vrijeme rada kamenoloma je debeloslojni do masivni dolomitični vapnenac srednjeg trijasa (Dedić i sur., 2015).

3. Prevladavajuća stijena na području istraživanja

Ovo istraživanje se provodilo na karbonatnim stijenama (vapnenci i dolomiti) jer prekrivaju najveći dio teritorija Hrvatske i to od sjeverozapada do jadranskog i dinarskog područja (Slika 6.) (Tišljar, 2001).



Slika 6. Geološka karta istraživanog područja (Izvor: Šimunić i sur., 1971.-1978.)

Karbonatnim stijenama se nazivaju one stijene koje sadrže više od 50% karbonatnih minerala, a u njih ubrajamo dolomite, dolomitične vapnence te vapnence koji prema postanku pripadaju kemijskim i biokemijskim sedimentnim stijenama. S obzirom na prevladavajući karbonatni sustav, ovdje također ubrajamo vapnenačke, dolomitne i vapnenačko dolomitne breče i konglomerate, vapnenačke pješčenjake, lapore i lapornjake (Tišljar, 2001).

Karbonatne stijene su specifične jer se pomoću seizmičke refrakcije može kartirati površinsko okršavanje ili trošne zone. Brzina širenja seizmičkih valova u vapnencima i dolomitima (Tablica 1.) je velika posebice ako se nalaze neposredno ispod pokrova stijene s manjom brzinom.

Tablica 1. Prosječne brzine P i S valova karbonatnih stijena u Hrvatskoj (Pollak, 2007)

VRSTA GEOMEDIJA	V_P [m/s]		V_S [m/s]		Broj podataka
	prosjek	st. dev.	prosjek	st. dev.	
Vapnenački klastiti	5702	453	2720	274	97
Dolomitne stijene	4224	1043	2160	440	120
Dolomitični vapnenci	5683	623	2508	399	14
Vapnenci	5877	521	2727	354	349

Iz tablice 1 se jasno vidi da najveće brzine P i S valova upravo imaju karbonatne stijene.

4. Klasifikacija stijenske mase

Klasifikacija stijenske mase je proces smještanja stijenske mase u klase i dodjeljivanja jedinstvenog opisa na temelju sličnih svojstava (Bieniawski, 1989). Općenito, sustavi klasifikacije služe za određivanje ponašanja stijenske mase kako bi se omogućilo što lakše projektiranje i izvođenje inženjerskih projekata. Ovi sustavi pružaju osnovu za razumijevanje karakterističnog ponašanja stijenske mase, a odnose se na pripremu i iskustvo kako bi se mogli korektno primijeniti.

U praksi, sustavi klasifikacije stijenske mase su velika pomoć pri projektiranju inženjerskih projekata, posebice podzemnih konstrukcija, tunela i rudarskih projekata (Hoek, 2004), a glavni sustavi za klasifikaciju stijenskih masa su prikazani u Tablici 2.

Potreba za klasificiranjem stijenske mase javila se 1879. godine kada je Ritter pokušao formirati empirijski pristup za projektiranja tunela i određivanja potrebne tunelske podgrade. Većina inženjerskih klasifikacija s više parametara razvijena su iz građevinskih potreba u kojima su uključene sve komponente inženjersko-geološkog karaktera stijenske mase (Wickham i sur. 1972).

Prema Bieniawskom (1993), ciljevi klasifikacije stijenske mase su:

- Identificirati najznačajnije parametre koji utječu na ponašanje stijenske mase;
- Podijeliti određenu formaciju stijenske mase u nekoliko klasa različitih kvaliteta;
- Pružiti osnovu za razumijevanje karakteristika svake stijenske mase;
- Izvući kvantitativne podatke za projektiranje;
- Preporučiti smjernice vezane za tunele i rudnike;
- Osigurati zajedničku osnovu za komunikaciju između inženjera i geologa;
- Iskustveno povezati uvjete koji su našli na jednom mjestu s uvjetima stečenima na drugom mjestu;

Osnovni uvjeti koji se moraju zadovoljiti za klasifikaciju stijenske mase:

1. Podjela određene stijenske mase u klase (grupe, kategorije) sa sličnim ponašanjem.
2. Osiguranje osnove za razumijevanje karakteristika i ponašanja svake grupe.

3. Davanje kvantitativnih podataka za inženjerski projekt.
4. Osiguranje zajedničke osnove za uspješnu suradnju svih sudionika u projektu.

Proces klasificiranja stijenske mase obuhvaća : identifikaciju stijenskih jedinica (prema svojstvima intaktne stijene, svojstvima stijenske mase i hidrogeološkim svojstvima), izbor parametara prema namjeni (stabilnost stijenske mase, kvaliteta konstrukcije, iskop, temeljenje, erozija, protok vode) i klasifikaciju prema parametru ili cilju, odnosno određivanje kategorije stijena.

Tablica 2. Glavni sustavi klasifikacije stijenske mase (Corsa, 2004)

Naziv	Autor, godina, zemlja	Primjena
RLT Rock Load Theory	Terzaghi, 1946, USA	Tuneli sa čeličnim podgradama
SUT Stand up time	Lauffer, 1958, Australija	Tunelogradnja
NATM New Austrian Tunneling Method	Pacher i sur., 1964, Austria	Tunelogradnja
RQD Rock Quality Designation	Deere i sur., 1967, USA	Jezgra bušotine Tunelogradnja
RSR Rock Structure Rating	Wickham i sur., 1972, USA	Tunelogradnja
RMR Rock Mass Rating	Bieniawski, 1973 i 1989, USA	Tunelogradnja, Rudarstvo, Temeljenje
M-RMR Modified Rock Mass Rating	Unal and Ozkan, 1990, Turska	Rudarstvo
Q Rock Mass Quality	Barton i sur., 1974 i 2002, Norveška	Tunelogradnja Podzemne prostorije
SBS Strenght-Block size	Franklin, 1975, Kanada	Tunelogradnja
BGD Basic Geotehnical Classification	ISRM, 1981	Opća namjena
RMS Rock mass Strenght	Stille i sur., 1982, Švedska	Metalno rudarstvo
URCS Unified Rock Mass Classification System	Williamson, 1984, USA	Međudjelovanje čestica tla i blokova stijena
WCS Communication Weakening Coefficient System	Singh, 1986, India	Ugljenokopi
RMi	Palmstrom, 1996, Švedska	Tunelogradnja

Rock Mass Index		
GSI Geological Strenght Index	Hoek and Brown, 1997, Kanada	Tunelogradnja Rudarstvo

U trenutno postojećim klasifikacijama stijenskih masa, brzina seizmičkih valova nije niti u jednoj glavni element za određivanje klase stijena, međutim u Q klasifikaciji se često uzima kao jedan od glavnih elemenata. Barton je u svoju klasifikaciju uveo korelaciju brzine V_P i indeksa Q, a taj su odnos koristili i drugi istraživači koji su slijedili skandinavski pristup u primjeni klasifikacija (Norwegian Rock Mechanics Group, 1985).

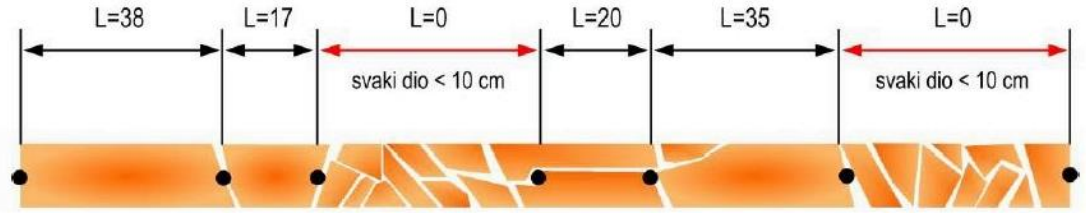
Uzimajući u obzir seizmičku brzinu kao svojstvo stijenske mase, sustavi klasifikacije koji se analiziraju trebaju zadovoljiti sljedeće uvjete:

- Klasifikacija je numeričkog tipa – omogućuje korelaciju brzina i indeksa klase.
- Parametri klasifikacije su veličine koje mogu značajno utjecati na seizmička svojstva i imaju numeričke vrijednosti.
- Primjena u stijenskim masama je pouzdana i može se potvrditi.

4.1. RQD klasifikacija

Ovo je prva inženjerska kvantitativna klasifikacija koju je u primjenu uveo Deere (1963, 1968). Kvaliteta stijenske mase se utvrđuje ma temelju rekonstrukcije jezgre istražne bušotine. RQD indeks je definiran kao postotak intaktne jezgre koja sadrži odlomke dužine 100 mm ili duže u ukupnoj dužini izbušene jezgre. Za određivanje vrijednosti RQD, ISRM određuje promjer jezgre 54.7 mm (Slika 7.). Deere je postupak mjerenja duljine dijelova jezgre i određivanje RQD definirao izrazom:

$$RQD = \frac{\Sigma\, duljina\ dijelova\ jezgre > 100\ mm}{ukupna\ duljina\ jezgre}$$



Slika 7. Postupak mjerenja duljine bušotinske jezgre za proračun RQD indeksa (izvor: Gazdek, 2009)

Prednost RQD leži u jednostavnosti i neovisnosti o veličinskom razmjeru, tj. o brzoj procjeni mehaničke kvalitete čak i kod problematičnih, trošnih te izrazito raspucanih i razlomljenih stijena. RQD se definira kao postotak kvalitete stijene u nekom intervalu bušotine (Tablica 3.).

Tablica 3. RQD postotak kvalitete stijene

RQD (%)	<25	25 - 50	50 - 75	75 - 90	90 - 100
Kvaliteta stijene	vrlo slaba	slaba	povoljna	dobra	odlična

U slučaju nedostatka podataka o stijenskoj masi dobivenih bušenjem, prema Palmström RQD indeks se može odrediti iz utvrđenog broja pukotina (diskontinuiteta) vidljivih na površini po jedinici volumena stijenske mase:

$$RQD = 115 - 3.3 \cdot J_v$$

Broj pukotina J_v predstavlja zbroj pukotina po jedinici duljine za skup diskontinuiteta u volumenu stijenske mase kod prirodnog stanja. Pri tome vrijedi pretpostavka da u diskontinuitetima nema glinene ispune.

Nedostaci RQD klasifikacije:

- samo RQD klasifikacija nije dovoljna za opis stijenske mase,
- glavni nedostaci su što ne uzima u obzir orijentaciju pukotina, širinu i materijal ispune, te posebno kut trenja i hrapavost zidova pukotina,

- problemi se javljaju i pri korištenju RQD indeksa za stijensku masu vrlo slabe kvalitete.

RQD indeks postao je temelj za razvoj geotehničkih klasifikacija stijenske mase posebice RMR i Q klasifikacije.

5. Diskontinuiteti i seizmički diskontinuiteti

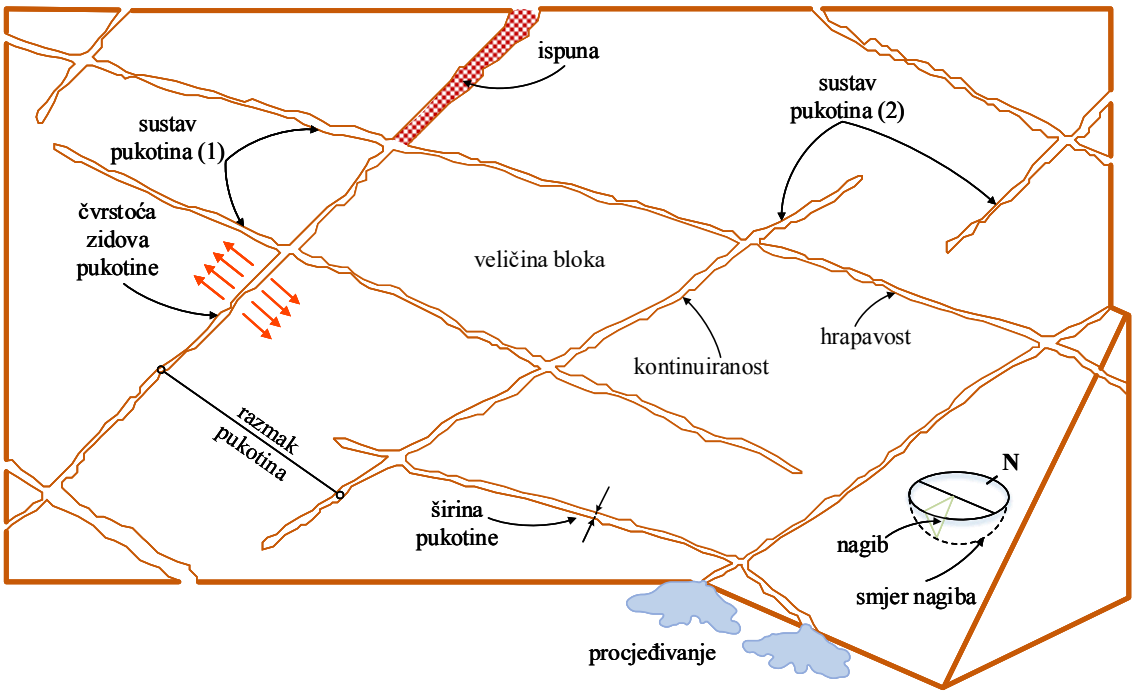
Prema ISRM (International Society for Rock Mechanics) diskontinuitet je opći pojam za mehanički prekid u stijenskoj masi koji ima malu ili nikakvu vlačnu čvrstoću okomito na smjer pružanja (Slika 8.). To je zajednički termin za većinu tipova pukotina, ploha slojevitosti, ploha škriljavosti te oslabljenih zona i rasjeda. Dijele se na endokinetičke (nastali tijekom promjene unutarnjih stijenskih procesa) i egzokinetičke (nastali djelovanjem vanjskih sila).



Slika 8. Prikaz diskontinuiteta u stijenskoj masi

Kod analize i projektiranja potrebno je strukturu stijenske mase opisati mjerljivim parametrima. Opis mora biti dovoljno detaljan jer se koristi kao baza za klasifikaciju stijenske mase. Prema tome, diskontinuiteti se opisuju (Slika 9.) pomoću deset parametara (International Society for Rock Mechanics):

- Orijentacija diskontinuiteta;
- Razmak diskontinuiteta;
- Postojanost diskontinuiteta;
- Hrapavost stijenki diskontinuiteta;
- Čvrstoća stijenki diskontinuiteta;
- Širina diskontinuiteta;
- Ispuna diskontinuiteta;
- Voda u diskontinuitetu;
- Broj sustava diskontinuiteta;
- Veličina i oblik blokova.



Slika 9. Prikaz parametara diskontinuiteta (prema: Hudson i Harrison 1997)

Orijentacija je položaj diskontinuiteta u prostoru, a izražava se pravcem pružanja, smjerom i kutom nagiba.

Prema ISRM (1978) **razmak diskontinuiteta** određuje se na intervalu najmanje deset puta većem od procijenjenog srednjeg razmaka.

Prema Vrkljanu (2003) **postojanost diskontinuiteta** opisuje se kao duljina diskontinuiteta na plohi promatranja te kao jedan od najvažnijih parametara u opisivanju diskontinuiteta koji je i ujedno najteže odrediti.

Hrapavost označava površinske neravnine u odnosu na srednju ravninu diskontinuiteta, a opisuje se kao valovitost i kao nejednakost malih dimenzija.

Čvrstoća diskontinuiteta opisuje se kroz smicanje i deformabilnost, posebice kod pukotina bez ispune gdje su stjenke u izravnom kontaktu.

Širina diskontinuiteta se opisuje kao razmak između otvorenog diskontinuiteta, a zijev je onaj dio prostora kojeg ne zauzima ispuna.

Ispuna diskontinuiteta je materijal koji se nalazi između stijenki otvorenog diskontinuiteta, a taj materijal je u pravilu slabiji te ima drugačiji sastav od stijene koja ga okružuje.

Za **tečenje vode u stijenskoj masi** uvelike su pogodni diskontinuiteti, a količina procjeđivanja ovisi o tome jesu li diskontinuiteti otvoreni ili zatvoreni te jesu li ispunjeni materijalom.

Broj sustava diskontinuiteta određuje veličinu deformacije stijenske mase, a da pritom ne dođe do sloma intaktne stijene.

Veličine blokova diskontinuiteta su određene razmakom, brojem sustava i postojanošću diskontinuiteta. Izuzetno važan indikator ponašanja stijenske mase.

5.1. Klasifikacija diskontinuiteta

Diskontinuiteti se klasificiraju na primarne i sekundarne diskontinuitete. Primarni diskontinuiteti (često se nazivaju i genetski) u stijenskoj masi nastaju za vrijeme nastanka stijene dok sekundarni nakon postanka stijene i to uglavnom zbog djelovanja tektonskih pokreta. U praksi se često nazivaju integralni (prisutna kohezija jer već imaju vlačnu čvrstoću) i mehanički diskontinuiteti (mala ili nikakva vlačna čvrstoća, ali imaju posmiču čvrstoću) (Price, 2009).

Primarni diskontinuiteti

Način njihovog postanka se razlikuje ovisno o tome o kojoj je vrsti stijene riječ. Diskontinuiteti kod sedimentnih stijena nastaju zbog taloženja sedimenata, kod magmatskih zbog brzog hlađenja magme, a kod metamorfnih zbog promjene temperature i/ili tlaka kojem je izložena primarna stijena iz koje nastaje magmatska te na taj način predstavlja sekundarne deformacije izvorne stijene. Glavni primjeri nastanka diskontinuiteta su (Tišljar, 1994, Price, 2009):

- Slojevitost – nastaje odmah ili za vrijeme taloženja te kompleksnim dijagenetskim procesima.
- Lučenje – nastaje u tijekom hlađenja i kristalizacije magme.
- Folijacije – ravnomjerno, paralelno i pravilno svrstani strukturni elementi u stijenama tijekom kojih nastaju glatki i skliski diskontinuiteti kod kojih su paralelno svrstani listićavi minerali.

Sekundarni diskontinuiteti

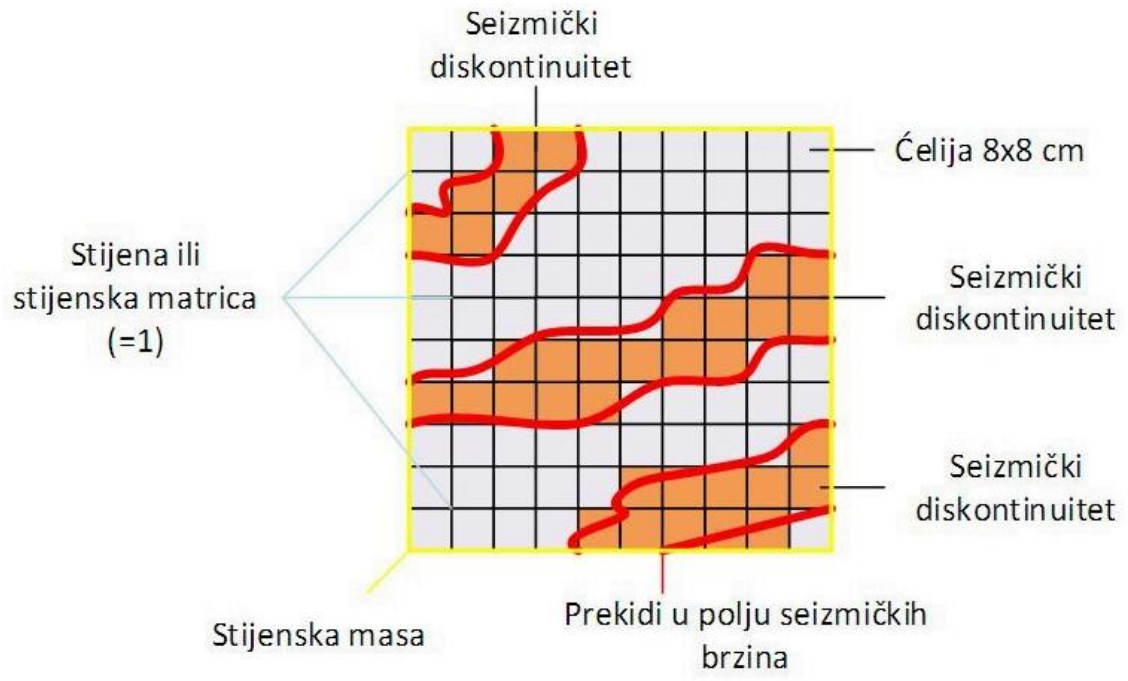
Vlačna naprezanja kod stijena koje su pod utjecajem tektonskih pokreta raspucale, deformirane i borane nastaju pukotinski diskontinuiteti dok se posmičnim naprezanjem formiraju rasjedi. Osnovni oblici sekundarnih diskontinuiteta (Tišljar , 1994, Price , 2009):

- Pukotine – deformacijske strukture koje nastaju zbog loma u stijenama (bitno se smanjuje kohezija), a dijele se na otvorene i zatvorene.
- Lomovi – slični pukotinama, međutim razlika je da lomovi ne moraju strogo pripadati nekom definiranom setu pukotina.
- Klivaž – nastaje kada unutar ili između pojedinih slojeva dolazi do međuslojnog kretanja kod metamorfiziranih stijena.
- Rasjed (zona smicanja) – posmične pukotine kod kojih je ostavljen vidljiv pomak stijenskih blokova.

Ovdje su nabrojani i opisani osnovni oblici sekundarnih diskontinuiteta, međutim u literaturi se često spominju i glavne familije sekundarnih diskontinuiteta, međuslojni klivaž (slojne pukotine), diskontinuiteti paralelni klivažu aksijalne ravnine borane strukture i diskontinuiteti okomiti na lokalnu strukturnu os bore.

5.2. Seizmički diskontinuiteti

Na početku ovog poglavlja objašnjeno je što su to diskontinuiteti, a pojam seizmičkih diskontinuiteta objašnjava i bazira se na interpretaciji geofizičkih istraživanja. Naime, seizmički diskontinuiteti se nalaze u polju seizmičkih brzina tamo gdje se događaju prekidi u polju brzina (Slika 10.). Pod tim pojmom opisane su pukotine, plohe slojevitosti, plohe škriljavosti te oslabljene zone i rasjedi. Kao takvi veoma su bitni jer je pomoću njih omogućeno lakše i sigurnije projektiranje građevinskih i geotehničkih konstrukcija, sigurnija zaštita površine koje je namijenjeno kao odlagalište otpada, velikoj važnosti doprinosi kod krških područja u svrhu istraživanja i pronalaska pitke vode, također veliku važnost imaju kod projektiranja i određivanja granica eksploatacijskog područja u kamenolomima, za sanaciju nestabilnog stijenskog pokosa te u mnoge druge korisne svrhe. Proces interpretacije geofizičkih podataka u svrhu otkrivanja seizmičkih diskontinuiteta objašnjen je u tekstu koji slijedi.



Slika 10. Prikaz seizmičkih diskontinuiteta

6. Opis istraživačkog profila

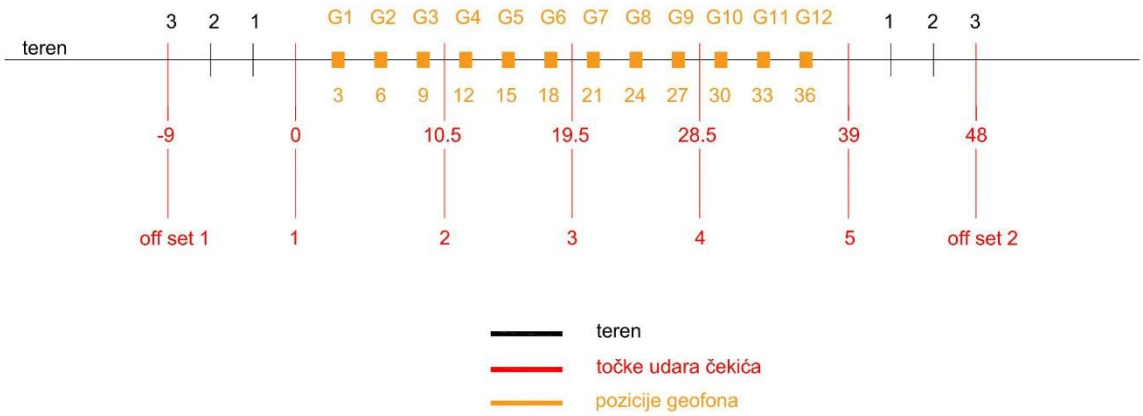
Istraživački profil smo postavili na duljini od 57 metara s time da se početna točka nalazila na -9 metara koja je ujedno i off set 1, a završna točka na 48 metara koja je ujedno i off set 2. Na profil smo postavili ukupno 12 geofona, svakog na razmaku od 3 metara na ukupno 36 metara. Udar čekićem o ploču izazivali smo na pet točaka ne računajući off set točke (Slika 11.).

Sa slike 12. je vidljivo da smo udar čekićem o ploču izazivali na off set točkama, tri metra prije prvog geofona, između trećeg i četvrtog geofona, između šestog i sedmog geofona, između devetog i desetog geofona i tri metra nakon zadnjeg geofona.

Dobivene seizmičke brzine smo pohranili na disketu zbog njihove potrebe u daljnjem tijeku obrade podataka iz kojih ćemo dobiti konačan rezultat (položaj seizmičkih diskontinuiteta).



Slika 11. Prikaz istraživačkog profila

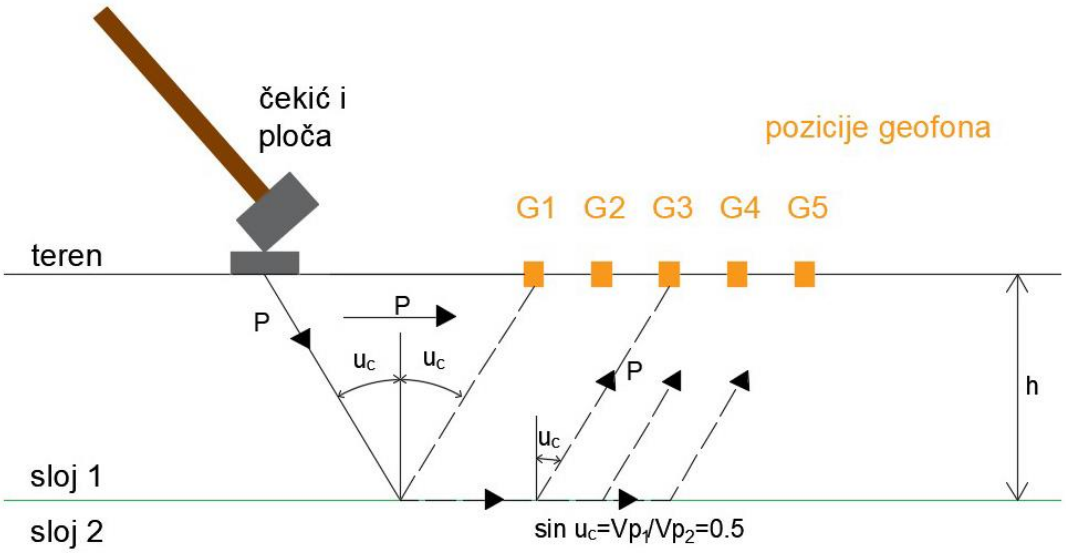


Slika 12. Shematski prikaz istraživačkog profila

7. Seizmička refrakcija (refrakcijska tomografija) te WET i Eikonal analiza

Prema R. Malletu (1848) ovo je najstarija seizmička metoda te se primjenjuje u podpovršinskim dubinama (do 50 m, rijetko do 100 m). Odnosi se na mjerenje i interpretaciju prvih nailazaka uzdužnih valova.

Ova metoda se temelji na vremenu koje je potrebno da se elastični magnetski valovi rašire od izvora do geofona kroz geološke strukture pod površinom (Slika 13.). Valovi se mogu reflektirati i lomiti, a sve ovisi o geološkoj strukturi. Valovi nastaju uslijed poremećaja koji je izazvan u blizini površine terena, a sastoje se od uzdužnih P valova i poprečnih S valova. Uzdužni P valovi kreću se većom brzinom pa stižu ranije do geofona te prekrivaju nailazak S valova koji dolaze naknadno. Detekcija dolaska prvih poremećaja na refrakcijskom profilu (niz postavljenih geofona) uvijek se odnosi na reflektirani val ili na direktan val.



Slika 13. Princip terenskog mjerenja brzina seizmičkih valova

Trenutno interpretacije seizmičkih brzina su još uvijek nepotpune u smislu opisivanja kvalitete stijenske mase. Naime, na većim dubinama javljaju se promjene vrijednosti

brzina zbog povećanja naprezanja, gustoće i diskontinuiteta, dok su valovi u podpovršinskim zonama nagli i brzi Zbog ovih činjenica, identifikacija stijenske mase na temelju jedne prosječne vrijednosti seizmičke brzine je znatno otežana i izložena pogreškama. Kod detekcije podzemnih voda treba obratiti pažnju na činjenicu da brzina P vala iznad i ispod razine podzemne vode ovisi o stupnju saturacije tla, dok to ne vrijedi za brzinu S vala.

Osim ovih nedostataka, postoje prednosti koje omogućuju istraživanje stijenske mase seizmičkom refrakcijom. Kad pukotinski sustavi i rasjedi, uključujući i trošne zone, zauzimaju podpovršinski prostor, poznato je da je takvo stanje relativno ograničeno. Iz toga slijedi da će se na određenoj dubini pojaviti zdrava temeljna stijena koja omogućuje primjenu seizmičke refrakcije po cijelom profilu.

7.1. Protokol za refrakcijsku seizmiku (oprema)

Oprema (Slika 14.) je relativno jednostavna, a osnovni cilj joj je snimanje seizmičkog vala s jasnim prvim nailascima na geofone. Koriste se geofoni s nižom rezonantnom frekvencijom, uobičajeno oko 10 Hz. Seizmograf ima višekanalno pojačalo, zbog mogućnosti pojedinačnog pojačanja kanala, i galvanometre pomoću kojih se dobiva zapis mjerenja. Obično se ugrađuje i filter kojim se odstranjuju neželjene frekvencije izvan korisnog signala.



Slika 14. Oprema za seizmičku refrakciju

Suvremeni instrumenti raspolažu s vlastitom ili vanjskom memorijom te se na ekranu mogu pratiti rezultati snimanja. Ovi instrumenti pružaju mogućnost zbrajanja signala, a to je uvelike od koristi u radu sa slabijim izvorima seizmičkih valova, kao što je čekić.

Oprema koja se koristi za izvor seizmičke energije uglavnom se bazira na udaranje čekića po metalnoj ploči postavljenog na tlo i na bacanje utega određene mase s visine od 2 do 3 m, a još se koristi i eksploziv u plitkim bušotinama.

7.2. WET i Eikonal analiza

Podaci mjerenja seizmičkom tomografijom interpretirani su Wavepath Eikonal Traveltime Inversion (WET) i Eikonal solverom (ES) iz paketa Rayfract 2.36. Ove metode se temelje na Two-Way-Travel-Time kalkulacije unutar regularne mreže brzina, pa ne postoje poznate restrikcije obzirom na kontraste seizmičkih brzina. Model se gradi sloj po sloj brzina zbog formiranja niza refraktora. Nakon toga se provodi mapiranje uzimajući u obzir svaki prepoznat i određen refraktor posebno (Schuster, Quintus-Bosz, 1993).

8. Indeks seizmičke kvalitete stijena

Indeks seizmičke kvalitete stijena SQi (Seismic Quality Index) definiran je kvantifikacijom tranzijenata seizmičke energije (TSE) kao mjera prijenosa energije mehaničkog poremećaja. Za svako polje seizmičkih brzina koje je realno može se definirati pokazatelj seizmičke kvalitete geomedija (Gazdek, 2009).

Indeks seizmičke kvalitete stijena nastao je iz trogodišnjeg istraživanja krških područja Hrvatske u kojem su trošnost i diskontinuiranost posebno važne zbog izuzetnog utjecaja na mehanička svojstva stijena.

Prema Gazdeku (2009) SQi se uvodi kao prateća metoda stanja kvalitete za bilo koji sustav kategorizacije. Ovo je ujedno i jedinstvena metoda jer ostale postojeće klasifikacije su manje ili manjkave obzirom na specifičnost pojedine lokacije, naročito u krškim uvjetima. Upravo zbog toga u klasifikacijama karbonatnih stijena krškog područja moguće je preciznije odrediti zoniranost i značaj diskontinuiranosti s obzirom na namjenu inženjerskog zahvata.

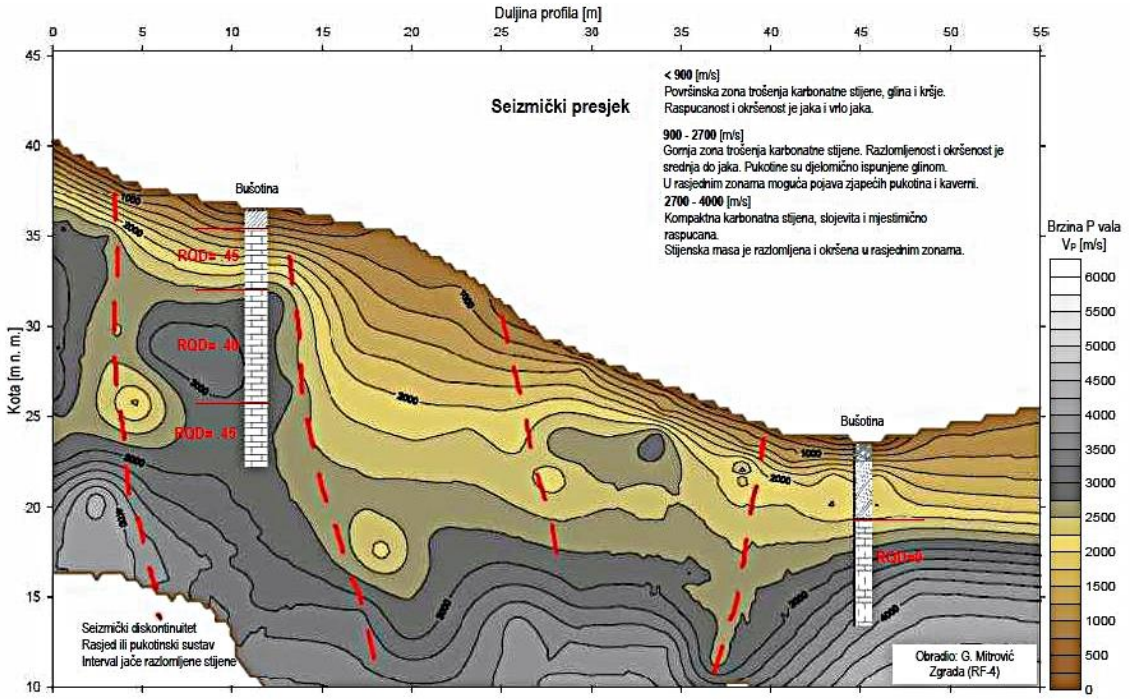
Po dubini i rezoluciji, SQi je jednak dometu seizmičkih istraživanja P valovima te se stoga uglavnom odnosi na stanje površinskih i pri-površinskih zona izvođenja većine geotehničkih konstrukcija do dubine 50 m.

8.1. Uvod u SQi

Iako danas postoje mnoga geofizička istraživanja koja su često opsežna, primjena iskustva, teorija ili modela u stvarnim inženjerskim uvjetima i dalje ostaje otvoren, tj. neriješen problem. Interpretacija brzina valova dobivenih geofizičkim istraživanjem leži u mogućnosti stratigrafskog profiliranja i određivanja stanja masivnog tla ili stijenske mase. Geofizičke metode (seizmička refleksija i seizmička refrakcija) koje se prvenstveno koriste, temelje se na stvaranju i analizi uzdužnih P valova.

Seizmička refrakcija se češće koristi i temelji na određivanju brzine umjetno stvorenih valova u podzemlju ili stijenskoj masi koji se nakon loma vraćaju na granice slojeva koje prikazuju različite brzine. Tumačenje dobivenih podataka osigurava brzinu raspodjele uzdužnih P valova duž profila. Konačni rezultat profiliranja je tomografski seizmički

profil koji predstavlja fizičko-statičku strukturu slike uzdužne valne brzine u podzemlju ili stijenskoj masi (Slika 15.) (Gazdek i sur., 2014).



Slika 15. Refrakcijski tomografski profil (Izvor: Gazdek, 2009)

8.2. Definicija indeksa seizmičke kvalitete (SQi)

Indeks seizmičke kvalitete SQi predstavlja sliku seizmičke kvalitete koja se generira iz polja vrijednosti brzina kompresijskih P valova. Sporost, seizmička impedancije i poroznost su mehanički principi pomoću kojih se određeni međusobni odnosi vrijednosti brzina. U Tablici 4. prikazane su osnovne oznake za definiranje SQi vrijednosti u ravnini yOz (lijevi koordinatni sustav u kojem os z ima smjer gravitacijskog polja) (Gazdek, 2009).

Tablica 4. Osnovne oznake za definiranje SQi vrijednosti u ravnini yOz

m	Oznaka za stijensku matricu ili čvrstu supstancu u ćeliji
n	Oznaka za stijensku ne-matricu (nema supstance u ćeliji)
y	Oznaka za modelsku veličinu u pravcu osi y
z	Oznaka za modelsku veličinu u pravcu osi z
Δt_y	Vremenski pomak (razlika) pri prolazu duž osi y
Δt_z	Vremenski pomak (razlika) pri prolazu duž osi z
v	Brzina prolaza vala kroz model ćelije
v	Brzina prolaza vala kroz supstancu i/ili u smjeru
I	Dimenzije modelskih ćelija supstanci
n	Koeficijent ili omjer impedancija supstanci
ρ	Gustoća mase supstanci u modelskoj ćeliji

Načelo sporosti

Načelo sporosti se koristi za analizu ukupnog vremena koje val mora proći kroz matričnu ćeliju polja uzdužnih P valova. Zbog različitih svojstava i raspodjele tvari u ćeliji modela, prilikom prolaska promatra se potencijalni nedostatak vremena Δt_y u različitim putevima i smjerovima. Model tvari u ćeliji je kombinacija Voigt-Reuss modela, dok defektne vrijednosti $\Delta t_{(y\ ili\ z)}$ kontroliraju geometrijski odnos, tj. dimenzije matrice Im i ne-matrice In. Matrica predstavlja stijensku masu koja pripada dominantnim svojstvima, dok ne-matrica definira preostali prazan prostor koji nije identificiran. Budući da su ćelije polja brzina uzdužnih valova jednake dimenzije, može se ispravno pretpostaviti da su dimenzije ćelija modela jednake u svakom smjeru, tj. $Iy = Iz = I$, dok u tom slučaju vrijeme pomaka Δt_y i Δt_z određene samo brzinama v_y i v_z. Sve to dovodi do formiranja dvije jednadžbe (1) i (2) koje pružaju ekspresiju brzina u pojedinim smjerovima, kao i dimenzije tvari u modelu ćelije (Gazdek i sur., 2014).

$$I_m \cdot \left(\frac{v_y}{v_m} - \frac{v_y}{v_n}\right) - I \cdot \left(1 - \frac{v_y}{v_n}\right) \pm \Delta t_y \cdot v_y = 0 \qquad (1)$$

$$I_m \cdot \left(\frac{v_z}{v_m} - \frac{v_z}{v_n}\right) - I \cdot \left(1 - \frac{v_z}{v_n}\right) \pm \Delta t_z \cdot v_z = 0 \qquad (2)$$

Načelo seizmičke impedancije

Načelo seizmičke impedancije služi u izražavanju odnosa međusobne brzine u određenom smjeru i brzine kroz određenu supstancu (matricu ili ne-matricu). Pretpostavka je da u ćeliji nema anizotropije gustoće te da su model i virtualna impedancija uvedene kao funkcije normalnog stresa i brzine vibracije tvari. Tako vrijedi (Gazdek i sur., 2014):

$$\frac{V_y}{V_m} = \mathrm{n_{my}} \cdot \frac{\rho_m}{\rho} = \mathrm{a_y}, \qquad (3)$$

$$\frac{V_z}{V_m} = \mathrm{n_{mz}} \cdot \frac{\rho_m}{\rho} = \mathrm{a_z}, \qquad (4)$$

$$\frac{V_y}{V_n} = \mathrm{n_{my}} \cdot \frac{\rho_n}{\rho} = \mathrm{b_y}, \qquad (5)$$

$$\frac{V_z}{V_n} = \mathrm{n_{nz}} \cdot \frac{\rho_n}{\rho} = \mathrm{b_{z.}} \qquad (6)$$

Ti definirani koeficijenti impedancije tvari očito kontroliraju odgovarajuće brzine i konačno određuju odnose pojedinih tvari u različitim smjerovima (odvajanje događaja):

$$n_{my} \cdot a_y = n_{mz} \cdot a_z, \qquad (7)$$

$$n_{ny} \cdot b_y = n_{nz} \cdot b_z, \qquad (8)$$

Načelo poroznosti

Princip poroznosti odnosi se na provedbu odnosa (9) koji se odnosi na gustoću tvari u stanici kako bi se odredila poroznost i brzina odnosa(Gazdek i sur., 2014).

$$I \cdot \rho = I_m \cdot \rho_m + I_n \cdot \rho_n, \qquad (9)$$

Taj odnos implicitno pretpostavlja izotropiju modela gustoće, pa se stoga mogu koristiti odnosi sa principom seizmičke impedancije. Ako se odnos prema poroznosti stanica izražava u smislu gustoće, onda se matrice i ne-matrične dimenzije mogu izraziti pomoću omjera seizmičke impedancije u pojedinim smjerovima:

$$I_m \cdot (n_{my} \cdot a_y - n_{ny} \cdot b_y) - I \cdot (1 - n_{ny} \cdot b_y) = 0, \qquad (10)$$

$$I_m \cdot (n_{mz} \cdot a_z - n_{nz} \cdot b_z) - I \cdot (1 - n_{nz} \cdot b_z) = 0, \qquad (11)$$

Sinteza sporosti - seizmička impedancija – poroznost

Spajanjem svih pretpostavki, uvjeta i odnosa može se definirati sustav jednadžbi koji bi pružio definiciju geometrijskog odnosa tvari iz pojedine stanice u polju brzine. Pokazatelji razina prijenosa ili prolaznosti za seizmičku energiju (TSE) kroz 2D stanicu, dimenzionirani iz polja brzine, sada bi zapravo bili rješenje za ovaj sustav. Prvo, potrebno je formirati sustav jednadžbi za sporost - poroznost. Formirani odnosi imaju oblik (Gazdek i sur., 2014):

$$I_m \cdot \left(a_{(y,z)} - b\right) - I \cdot (1 - b) \pm \Delta t_{(y,z)} \cdot v_{(y,z)} = 0 - sporost \qquad (12)$$

$$I_m \cdot \left(n_{(y,z)} \cdot a_{(y,z)} - n \cdot b\right) - I \cdot (1 - n \cdot b) = 0 \; - poroznost \qquad (13)$$

Konačno, sustav koji osigurava sintezu načela sporosti i poroznosti obuhvaća sljedeće dvije jednadžbe:

$$\left(a_y \cdot (1 - n_y) - a_z \cdot (1 - n_z)\right) + \frac{1}{I_m} \cdot \left(\Delta t_y \cdot v_y - \Delta t_z \cdot v_z\right) = 0 \qquad (14)$$

$$\left(a_y \cdot (1 - n_y) + a_z \cdot (1 - n_z)\right) + \frac{1}{I_m} \cdot \left(-\Delta t_y \cdot v_y + \Delta t_z \cdot v_z\right) = 0 \qquad (15)$$

Ovdje je moguće jasnije primijetiti broj i vrstu nepoznanica u odnosu sporosti - poroznosti. Sustav je definiran određivanjem četiri nepoznanice: $a_{(y,z)}$ i $n_{(y,z)}$. Budući da postoje još četiri nepoznanice: $\Delta t_{(y,z)}$ i $v_{(y,z)}$, definirane su još dvije moguće jednadžbe primjenom načela seizmičke impedancije u ćeliji:

$$n_y \cdot a_y - n_z \cdot a_z = 0 \qquad (16)$$

I činjenicu da je brzina unutar stanice vektorska konstanta $\left({v_y}^2 + {v_z}^2 = v^2\right)$:

$${a_y}^2 - {a_z}^2 - {v_c}^2 = 0 \qquad (17)$$

tj. brzinu glavnog refraktora na kojem se temelji seizmička tumačenja. Općenito govoreći, brzina v_m zamjenjuje brzinu na uzorku kada bi bilo moguće definirati isključivo u svakoj 2D stanici. Na taj način, numerička vrijednost eksplicitno izražava dva nepoznanica, tj. $v_{(y, z)} \rightarrow v_c$.

Jedina stvar koja ostaje neriješena je pitanje dvaju nepoznatih znakova $\Delta t_{(y, z)}$ koji se odnose na eventualne manjkave sporosti. U stvarnosti je potpuno beznačajno dali oni postoje ili ne, jer se zapravo namjerno nastoji u sliku brzina unijeti „nered“ da bi se „oživjela“ statička (zamrznuta) slika polja brzina koja je rezultat preuzete seizmičke interpretacije. Zbog kontinuiteta se i ovdje „defekt vremena“ pojedine ćelije prati u odnosu na brzinu Vc:

$$\Delta t_{(y,z)} = I_{(y,z)} \cdot \frac{v_c}{v_{(y,z)-1} - v_{(y,z)+1}} \qquad (18)$$

Takvo definirano polje prikazuje sliku lokalnih prijelaza seizmičke energije (TSE) čije vrijednosti ne prelaze 1. Ako se cijelo polje standardizira koristeći brzinu 1 / vc (ili sporost), onda rekonstruirana seizmička slika brzine predstavlja indeks seizmičke kvalitete (SQi). Ova slika sada jasno pokazuje vidljive seizmičke diskontinuitete koji ukazuju na područja izuzetne diskrepancije onih mehaničkih svojstava (impedancija i odsutnost matrica stijenske mase) koji su ugrađeni u matricu seizmičkih brzina (Gazdek i sur., 2014).

Navedene jednadžbe provode se u programskom paketu Wolfram Mathematica 5.0, koji služi za izradu programskog koda za određivanje polja SQi vrijednosti indeksa seizmičke kvalitete. Gazdek je dao programski kod za određivanje polja indeksa kvalitete seizmike iz refrakcijskog tomografskog profila (Gazdek i sur., 2014).

8.3. Prednosti i nedostaci SQi

Kao i svaka klasifikacija, tako i SQi ima svoje prednosti i mane (Gazdek, 2009).

Prednosti SQi:

- Neovisnost o izboru metode refrakcije (tomografske seizmičke interpretacije).
- Primjenjivost za bilo koje polje seizmičkih brzina P valova.

- Primjenjivost i za polje seizmičkih brzina S valova (ukoliko je potrebno analizirati seizmičku impedanciju posmičnih valova).
- Za određivanje numeričkih SQi stijenske mase je nužna samo matrica brzina promatranih seizmičkih valova.
- SQi razlučuje i lokalizira utjecaj maskiranih prividnih poboljšanja mehaničkih svojstava jer izravno prati međusobne odnose susjednih ćelija polja brzina.
- Vrijednost SQi je određena iz idealizacije poroznosti reprezentativnog volumena stijenske mase prihvaćene u inženjerskoj mehanici stijena.
- Formiranim poljem vrijednosti SQi je određen položaj i pružanje seizmičko dominantnih diskontinuiteta.
- SQi je relativna i lokalna veličina svojstvena promatranom presjeku stijenske mase.
- Lokalizacijom su izbjegnute znatne diskrepancije u procjeni stanja raspucanosti stijenske mase, s obzirom da se brzine relativiziraju maksimalnom interpretiranom in situ brzinom, a ne brzinama izmjerenim u uzorcima.
- SQi omogućava uspoređivanje geometrijski istog presjeka nakon nastalih ili izvedenih promjena mehaničkih svojstva stijenske mase.
- Jasnije od polja seizmičkih brzina SQi ukazuje na područja promjena stanja stijenske mase, što je izuzetno važno kada seizmička slika i inženjersko-geološki model ne korespondiraju zadovoljavajuće.
- SQi ima numeričku vrijednost. Za razliku od većine inženjerskih parametara dvodimenzionalan kao i seizmička slika.
- SQi predstavlja brzu matematičko-interpretacijsku rutinu koja se primjenjuje za vizualizaciju inženjerske kvalitete seizmičkog presjeka stijenske mase.
- SQi je razumljiv za stručnjake ne-geofizičkog profila.

Nedostaci SQi:

- Korektnost polja vrijednosti SQi izravno ovisi o korektnosti seizmičke interpretacije. Polje SQi ne korigira polje seizmičkih brzina jer ne predstavlja novu metodu geofizičke interpretacije, već novu metodu inženjerske vizualizacije mehaničkog stanja stijenske mase.

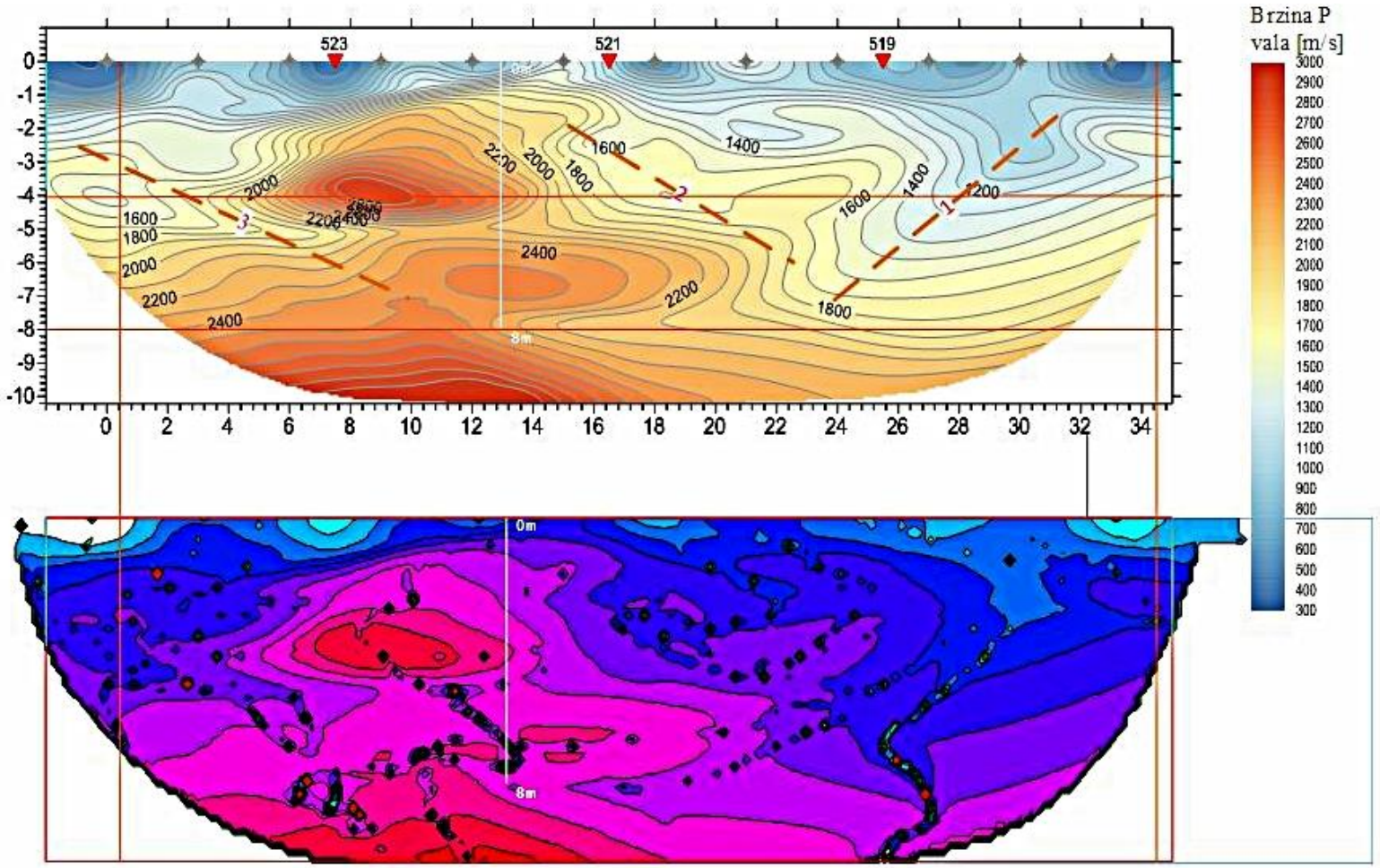
- Rezolucija polja SQi potpuno ovisi o parametrima seizmičkog profiliranja i metodama geofizičke obrade te analize mjerenja.
- Rezolucija SQi ne može biti veća od rezolucije interpretirane seizmičke slike.
- Zbog ograničene rezolucije nije moguće izraziti širinu diskontinuiteta u jedinicama manjim od dimenzije ćelije, međutim duljina dominantnih diskontinuiteta i doseg pružanja su znatno manje osjetljivi na točnost dimenzioniranja.
- SQi nije indiferentan prema anizotropiji seizmičkih brzina, ali je ne može eksplicitno izraziti budući da je inherentno integrira, lokalno u svaku ćeliju seizmičke brzine.
- SQi nije uvijek konzistentan, ali takve pojave ne-konzistencije uvijek ukazuju na područje stvarnih ili interpretativnih anomalija brzina.
- SQi utemeljen na brzini P valova ne analizira stijenske sustave ispod razine podzemne vode.

9. Rezultat - Interpretacija profila tomografije indeksom seizmičke kvalitete na primjeru kosine kamenoloma u Beli

Koncept modela SQi potvrđen je stvarnim presjecima tomografije dobivenim kao rezultat profiliranja loma. Na tim istim poprečnim presjecima su registrirani diskontinuiteti pomoću standardnih postupaka za geološko-geofizičku procjenu. Geološko-geofizički postupak temelji se na sposobnosti i iskustvu inženjera da povezuje geološke i seizmičke slike s mjesta gdje je provedeno istraživanje kod kojeg inženjer identificira geološku vrstu i stanje lokacije na temelju vrijednosti i raspodjele brzine uzdužnih valova. Ovim se postupkom daje naznaka na prisutnost diskontinuiteta u stijenskoj masi (Gazdek 2009, Gazdek i sur., 2014). U daljnjem tijeku procesa slijedi usporedba profila iz refrakcijske tomografije, dobivenog profila indeksa seizmičke kvalitete te otiska vidljive svijetlosti sa čela kosine.

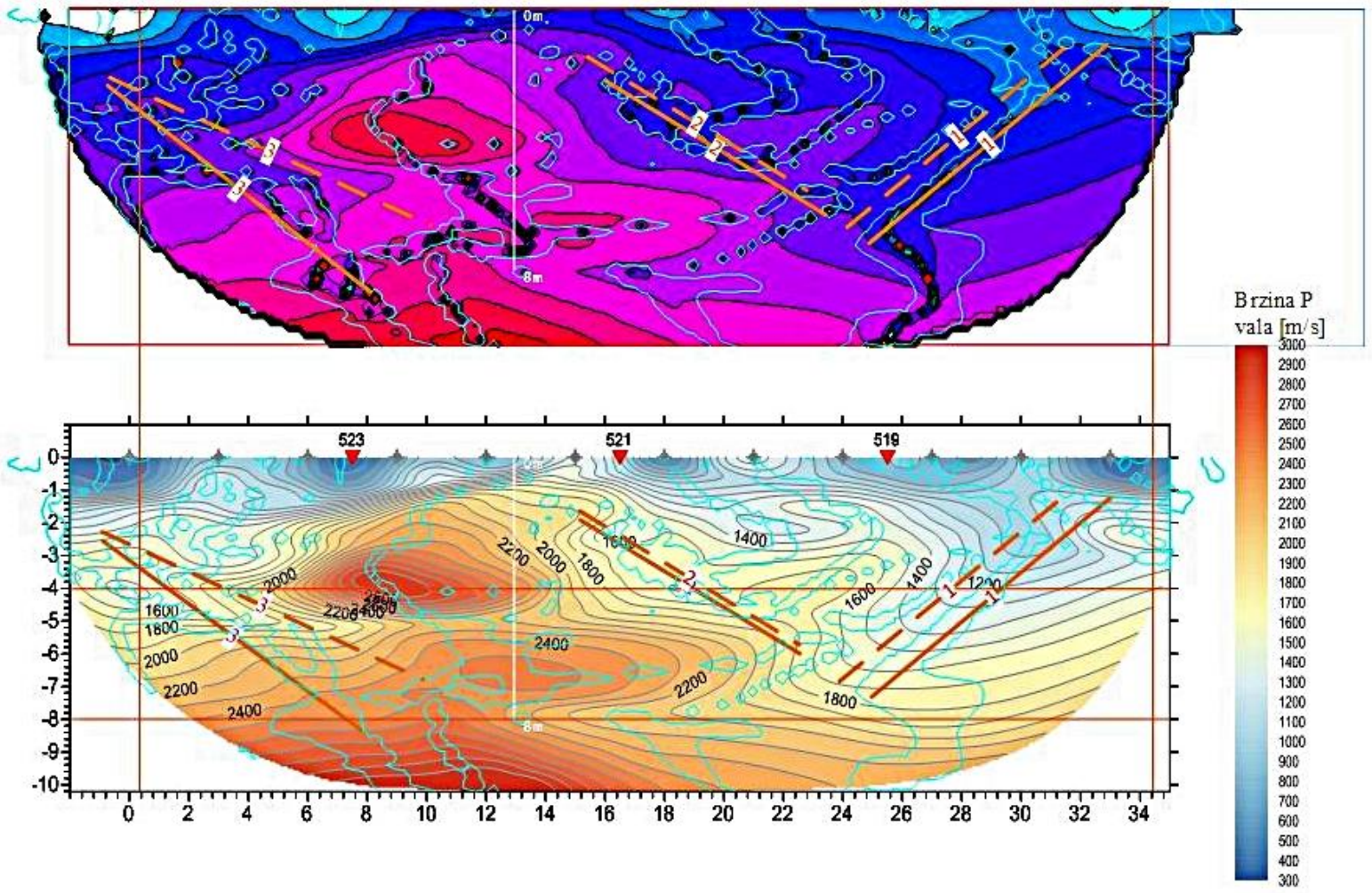
Slika 16. gore prikazuje profil refrakcijske tomografije s raspodjelom brzina uzdužnih P valova. Profil je dugačak 57 metara i dubok 10 metara. Zoniranje stijenske mase kao seizmičkog medija temelji se na procjeni lokalnih uvjeta gdje geofizičari i geolozi surađuju kako bi definirali brzine intervala. Na ovom primjeru stijenska masa je podijeljena u rasponu brzina od 300÷2800 m/s. Iz promatranja stanja stijenske mase na površini, označene su moguće lokacije i prisutnost diskontinuiteta. Stvarno stanje stijenske mase na površini te naglo savijanje konture P valova predstavlja jedinstveni indikator koji se može koristiti za određivanje diskontinuiteta. Tako su određena tri diskontinuiteta koja su označena isprekidanim linijama.

Na slici 16. dolje prikazana je rekonstrukcija seizmičke slike indeksa seizmičke kvalitete SQi. Konture za vrijednost SQI prate izotahe, a tamo gdje se nalaze značajne promjene seizmičke kvalitete tu se nalaze zone diskontinuiranosti. Najmanje nepravilnosti koje se mogu detektirati u ćelijama 8x8 cm su 4x4 cm, a označene su crnim mrljama na slici 16. dolje. Upravo te crne mrlje prekidaju kontinuitet vrijednosti SQi. Takvi prekidi detektiraju područje koje se može interpretirati kao diskontinuiteti, a u odnosu na tomografski profil (Slika 16. gore) postaju jasno vidljivi.



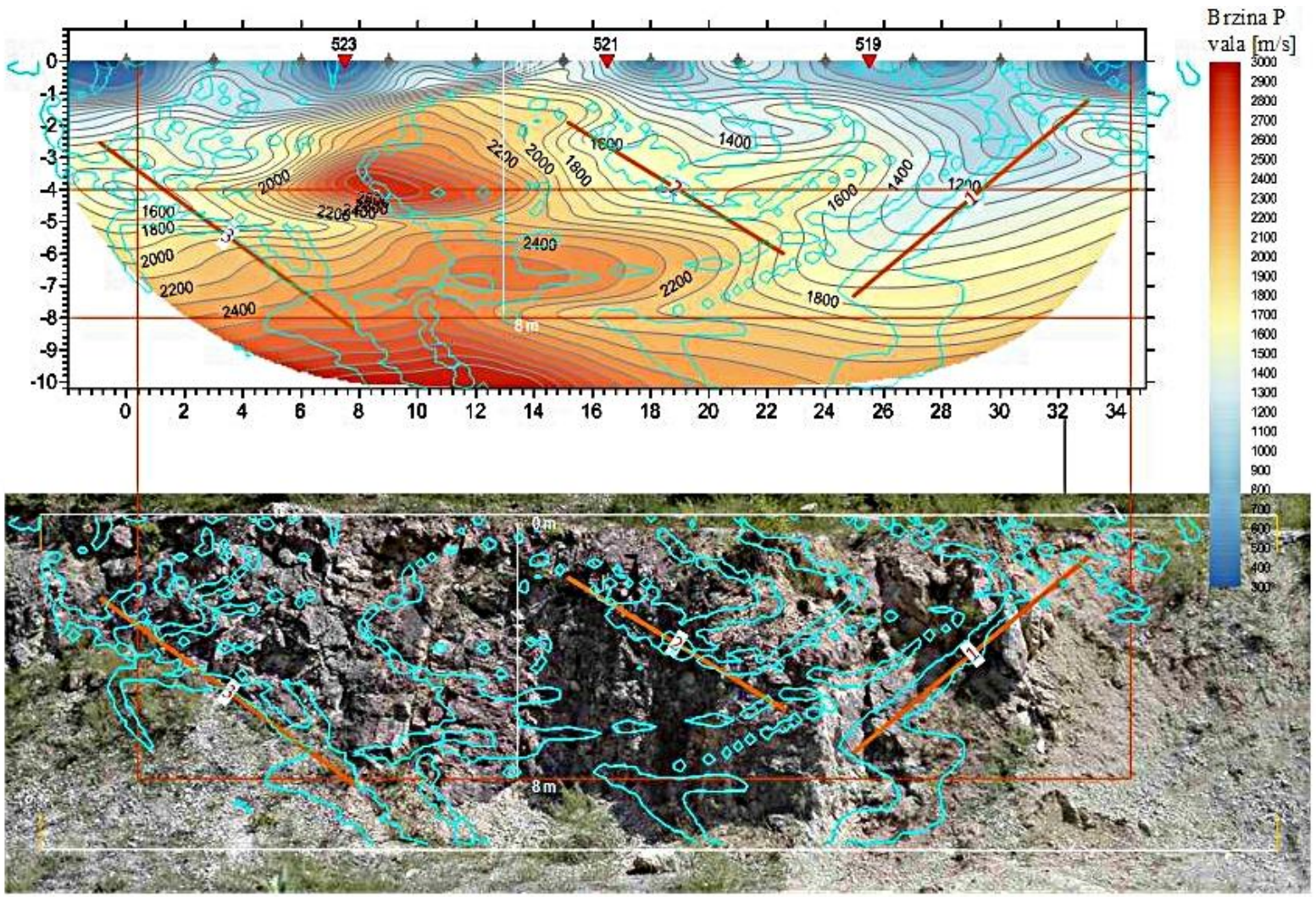
Slika 16. Gornji dio slike prikazuje profil refrakcijske tomografije s raspodjelom brzina uzdužnih P valova , a donji dio rekonstrukciju seizmičke slike indeksa seizmičke kvalitete SQi na kosini

Na slici rekonstrukcije seizmičke slike indeksa seizmičke kvalitete SQi (Slika 17. gore) prikazani su diskontinuiteti te su označeni punim linijama. Usporedimo li pretpostavljene diskontinuitete na profilu refrakcijske tomografije (označeni isprekidanim linijama) i diskontinuitete dobivene rekonstrukcijom seizmičke slike (označeni punim linijama) vidimo podudarnost te veliku vjerojatnost za postojanost diskontinuiteta na označenim mjestima. Jedina razlika se uočava kod diskontinuiteta pod brojem 3 kod kojeg odstupa podudarnost pretpostavljenog i dobivenog na temelju SQi.



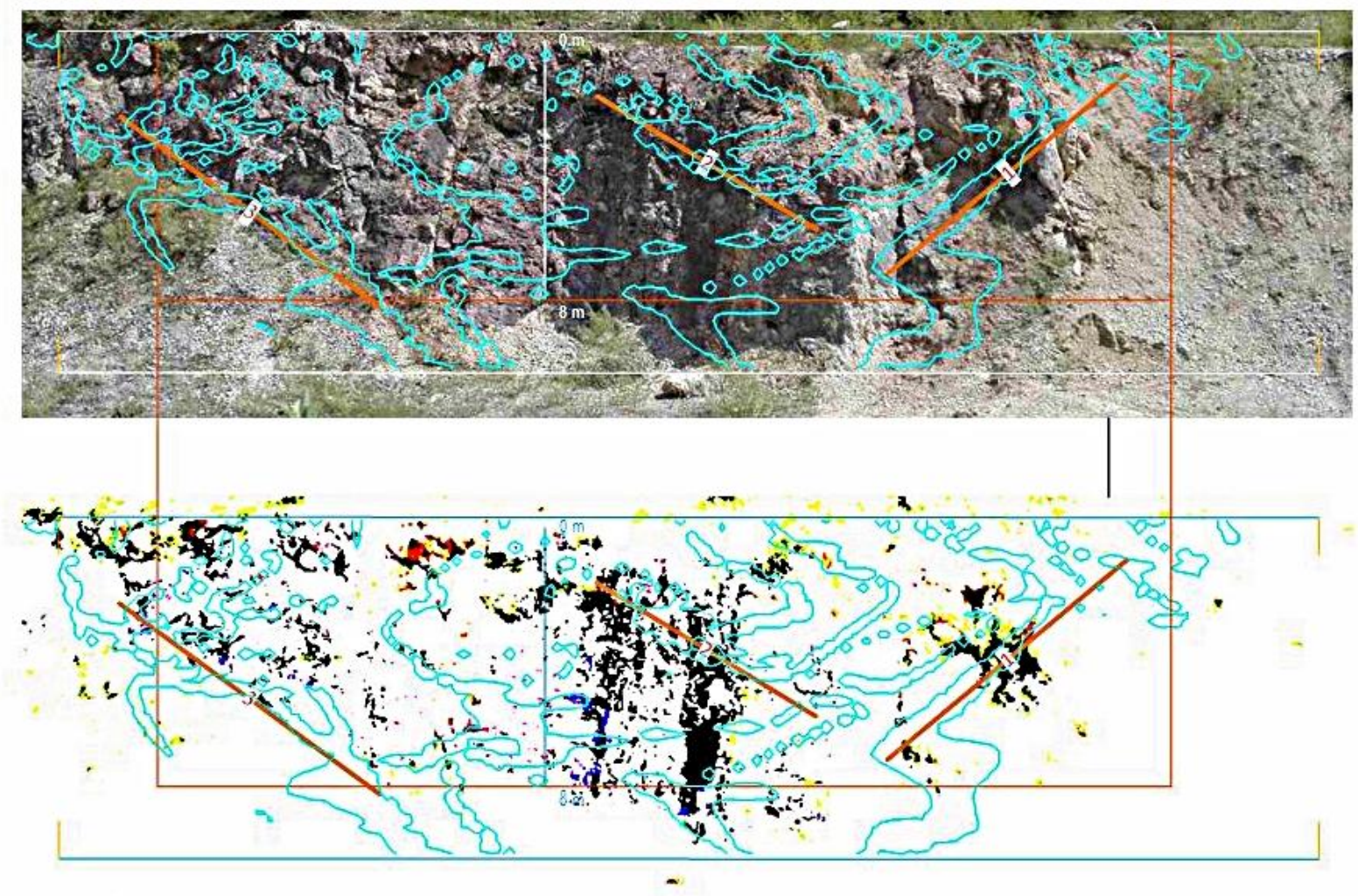
Slika 17. Na slici gore prikazana je rekonstrukcija seizmičke slike indeksa seizmičke kvalitete SQi na kosini, a na slici dolje profil refrakcijske tomografije s raspodjelom brzina uzdužnih P valova s pretpostavljenim diskontinuitetima

Rezultat istraživanja (na temelju P valova) je 2D slika seizmičkih diskontinuiteta prikazana na slici 18. Dobivena je tako što smo sa slike profila refrakcijske tomografije sve nepravilnosti te dobivene diskontinuitete prilijepili na sliku čela kosine. Sa slike se jasno vide velik broj, nepravilan raspored (vertikalni, horizontalni, kosi) te konture seizmičkih diskontinuiteta. Na slici čela kosine sa lakoćom uočavamo diskontinuitete koji su označeni brojevima 1 i 3, dok diskontinuitet pod brojem 2 je teško uočljiv, čak i iskusnim inženjer-geolozima. Međutim, diskontinuitet pod brojem 2 je jedinstvenim indikatorom određen tri metara dublje u stijeni, pa s obzirom da se ne vidi s čela kosine on zapravo postoji.



Slika 18. 2D prikaz seizmičkih diskontinuiteta na kosini

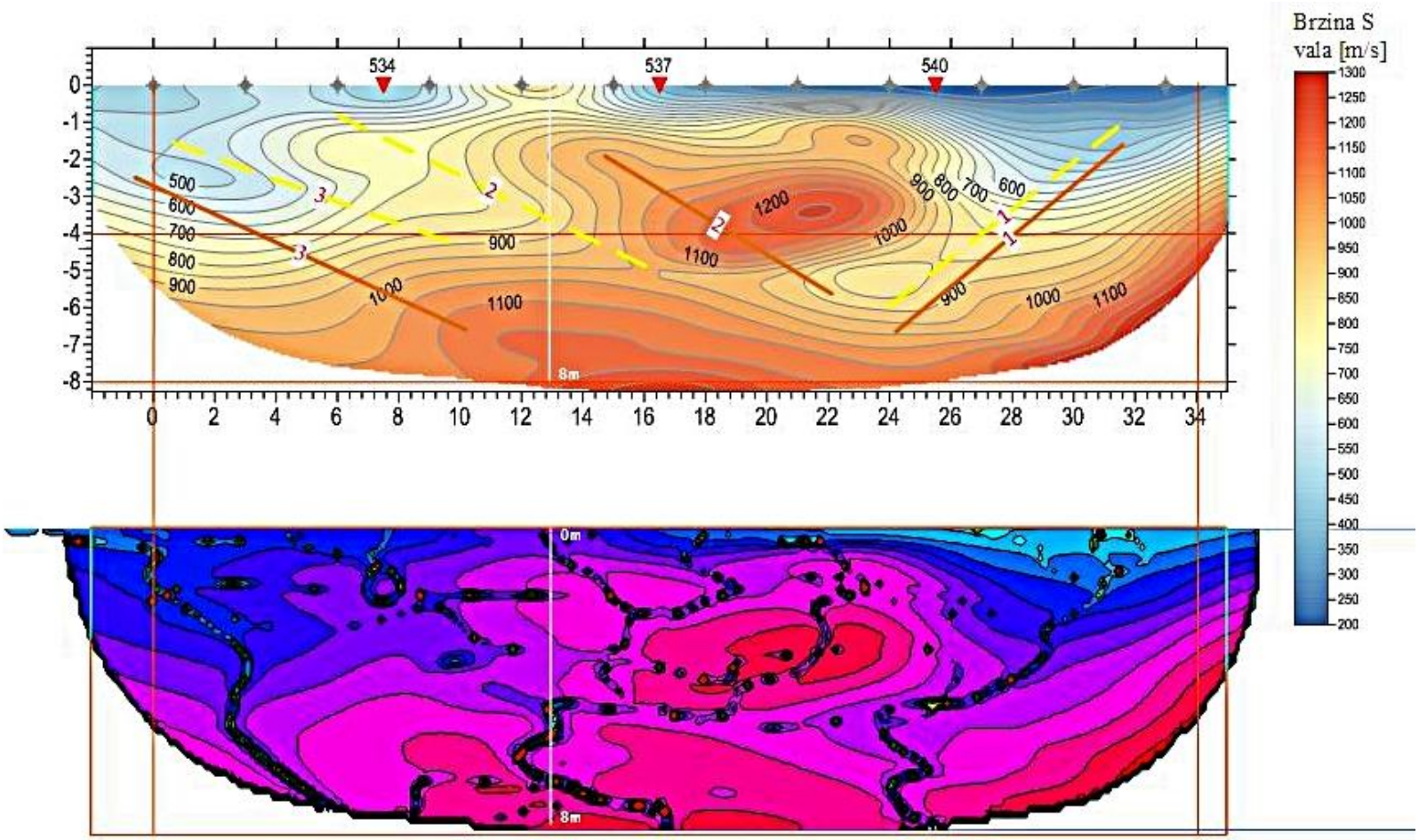
Nadalje na slici 19. dana je usporedba između slike čela kosine sa nepravilnostima i diskontinuitetima te slike svjetlosnog otiska čela (refleksa svijetlosti). Slika svjetlosnog otiska čela je napravljena u svrhu lakšeg otkrivanja diskontinuiteta na površini. Međutim, osim sjene diskontinuiteta, na slici 19. dolje vidljive su i sjene izbočine, pa otkrivanje diskontinuiteta na taj način moramo uzeti s velikim oprezom. S obzirom na to, iz slike refleksa svijetlosti vidi se podudarnost diskontinuiteta pod brojevima 1 i 3.



Slika 19. Usporedba slike čela kosine sa nepravilnostima i diskontinuitetima te slike svjetlosnog otiska čela (refleksa svijetlosti)

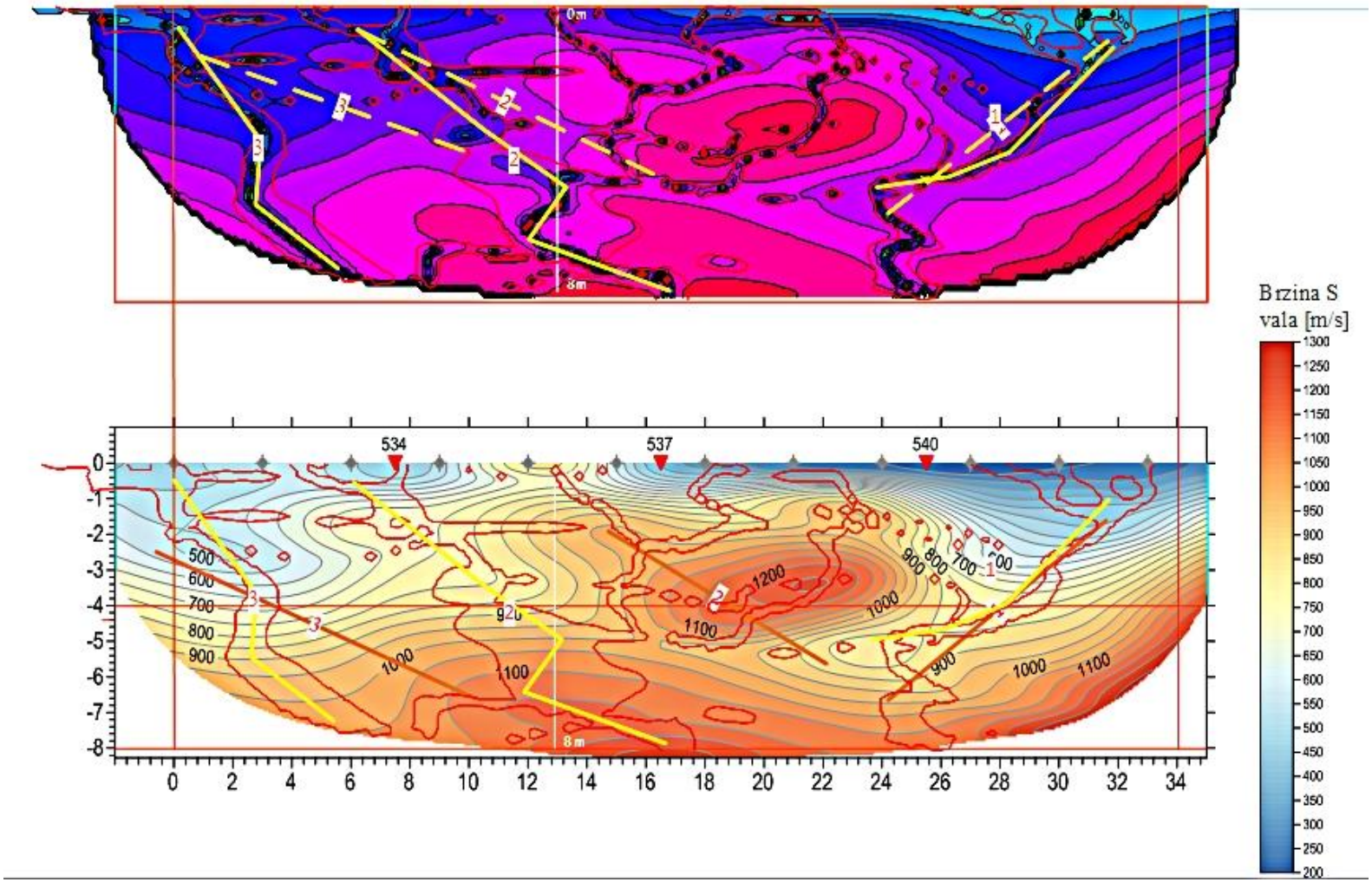
Slika 20. gore prikazuje profil refrakcijske tomografije s raspodjelom brzina poprečnih S valova. Profil je također kao i kod uzdužnih P valova dugačak 57 metara i dubok 10 metara. Na ovom primjeru stijenska masa je podijeljena u rasponu brzina od 250÷1300 m/s. Iz promatranja stanja stijenske mase na površini, označene su moguće lokacije i prisutnost diskontinuiteta. Stvarno stanje stijenske mase na površini te naglo savijanje konture S valova predstavlja jedinstveni indikator koji se može koristiti za određivanje diskontinuiteta. Tako su određena tri diskontinuiteta koja su označena žutim isprekidanim linijama. Na slici su još prikazani diskontinuiteti dobiveni iz prethodne rekonstrukcije seizmičke slike indeksa seizmičke kvalitete SQi uzdužnih P valova. Sličnost koju vidimo je orijentacija diskontinuiteta .

Slika 20. dolje prikazuje rekonstrukcija seizmičke slike indeksa seizmičke kvalitete SQi. Konture za vrijednost SQI prate izotahe, a tamo gdje se nalaze značajne promjene seizmičke kvalitete tu se nalaze zone diskontinuiranosti. Crnim mrljama označene su nepravilnosti, najmanje nepravilnosti koje se mogu detektirati u ćelijama 8x8 cm su nepravilnosti dimenzija 4x4 cm. Upravo te crne mrlje prekidaju kontinuitet vrijednosti SQi. Takvi prekidi detektiraju područje koje se može interpretirati kao diskontinuiteti, a u odnosu na tomografski profil (Slika 20. gore) njihov položaj postaje jasno vidljiv.



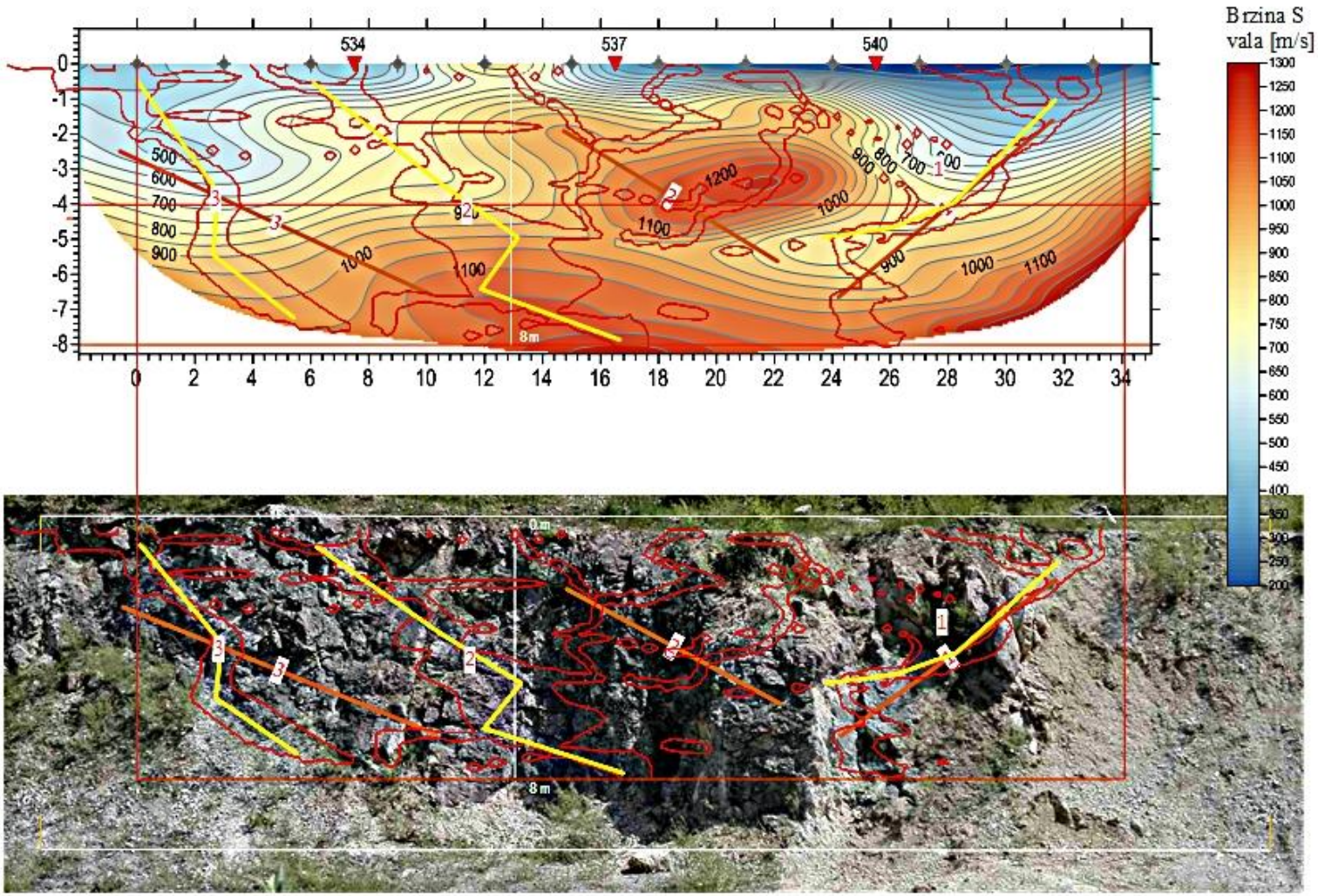
Slika 20. Gornji dio slike prikazuje profil refrakcijske tomografije s raspodjelom brzina poprečnih S valova , a donji dio rekonstrukciju seizmičke slike indeksa seizmičke kvalitete SQi na kosini

Na slici rekonstrukcije seizmičke slike indeksa seizmičke kvalitete SQi (Slika 21. gore) prikazani su diskontinuiteti te su označeni žutim linijama. Ovdje smo si dali slobodu pa smo svaki diskontinuitet prikazali u tri točke. Usporedimo li diskontinuitete dobivene na temelju P valova (označeni narančastom linijom) i diskontinuitete dobivene na temelju S valova vidimo podudarnost te veliku vjerojatnost za postojanost diskontinuiteta na označenim mjestima (Slika 16. dolje). Jedina razlika se uočava kod diskontinuiteta broj 2 kod kojeg odstupa podudarnost.



Slika 21. Na slici gore prikazana je rekonstrukcija seizmičke slike indeksa seizmičke kvalitete SQi na kosini, a na slici dolje profil refrakcijske tomografije s raspodjelom brzina uzdužnih P valova s pretpostavljenim diskontinuitetima

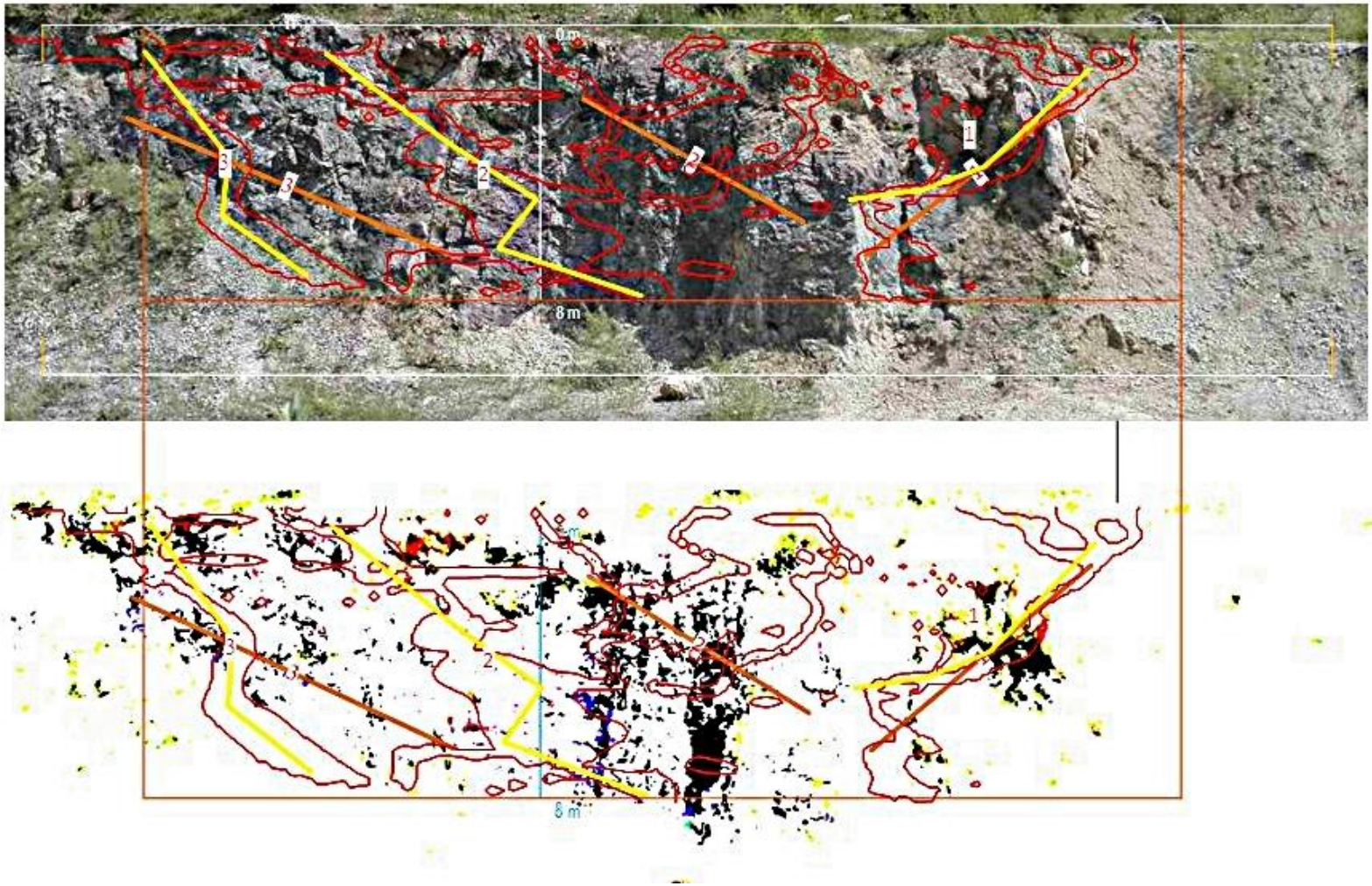
Rezultat istraživanja (na temelju S valova) je 2D slika seizmičkih diskontinuiteta prikazana na slici 22. Dobivena je tako što smo sa slike profila refrakcijske tomografije sve nepravilnosti i diskontinuitete prilijepili na sliku čela kosine. Sa slike se jasno vide velik broj, nepravilan raspored (vertikalni, horizontalni, kosi) te konture seizmičkih diskontinuiteta. Na slici čela kosine sa lakoćom uočavamo diskontinuitete (broj 1 i 2 označeni žutim linijama) kao što smo ih i uočili na temelju ispitivanja s P (broj 1 i 2 označeni narančastim linijama). Diskontinuitet broj 2 (žutom linijom) veoma je teško detektirati na čelu kosine isto kao i diskontinuitet broj 2 (narančastom linijom) dobiven na temelju P valova. Kao što smo već prethodno rekli, ti diskontinuiteti sa sigurnošću postoje iza čela kosine. Sa slike 22. dolje očitavamo da rep diskontinuiteta broj 2 (žuta linija) bi bio nastavak diskontinuiteta broj 3 (narančasta linija). To nam dokazuje da je na tome području prisutna izuzetno velika diskontinuiranost stijenske mase.



Slika 22. 2D prikaz seizmičkih diskontinuiteta na kosini

Na slici 23.. slijedi usporedba između slike čela kosine sa nepravilnostima i diskontinuitetima te slike svjetlosnog otiska čela (refleksa svijetlosti). Slika refleksa svijetlosti čela je napravljena u svrhu lakšeg otkrivanja diskontinuiteta na površini. Osim sjene diskontinuiteta, na slici se vide i sjene izbočine koje često zbunjuju pri otkrivanju diskontinuiteta, pa diskontinuitete otkrivene na takav način moramo uvijek uzimati s oprezom. Kao i kod P valova tako se i kod S valova vidi podudarnost na mjestima diskontinuiteta pod brojevima 1. i 3.

.



Slika 23. Usporedba slike čela kosine sa nepravilnostima i diskontinuitetima te slike svjetlosnog otiska čela (refleksa svijetlosti)

10. Zaključak

Na kraju ovog rada dobili smo odgovore na pitanja koja smo uvodno postavili. Moguće diskontinuitete u stijenskoj masi iz tomografskog presjeka seizmičkih brzina može razlučiti tek vrlo iskusni inženjer-geolog. Mi smo ih razlučili na tri mjesta, međutim, kao što smo mogli vidjeti u rezultatima, rekonstrukcijom seizmičke slike indeksa seizmičke kvalitete SQi dobili smo podudarnost seizmičkih diskontinuiteta na dva mjesta dok se na jednom mjestu razlikuju. To znači da smo relativno dobro pretpostavili mjesta na kojima se nalaze diskontinuiteti.

Otkrivanje diskontinuiteta na temelju slike svjetlosnog otiska čela (refleksa svjetlosti) veoma je nezahvalno. Razlog tome je sjena, ali ne ona koja je vidljiva zbog diskontinuiteta, već ona koja je vidljiva zbog izbočina.

Kontinuitet prodora je tri metara u dubinu fotografije, a položaj i pravac diskontinuiteta se može ustanoviti iz podudarnosti dobivenih rezultata na temelju P i S valova rekonstrukcijom seizmičkih slika indeksa seizmičke kvalitete SQi (više uspoređenih rezultata = veća preciznost položaja i orijentacije diskontinuiteta). Pokazali smo kako je moguće relativno brzo i točno prikazati položaj seizmičkih diskontinuiteta na kosini kamenoloma.

Ovo geofizičko istraživanje uvelike pomaže kod planiranja granica kamenoloma, sanaciji nestabilnog stijenskog pokosa, položaja minskih bušotina te količini eksploziva potrebnoj za miniranje. Prikazuje potencijalna ležišta kvalitetnog eksploatacijskog materijala te područja koja se ne isplati minirati jer nemaju dovoljan sadržaj eksploatacijskog materijala.

Ovakva istraživanja pomažu i postaju neophodan dio u planiranju i projektiranju geotehničkih i hidrotehničkih građevina jer upravo takva istraživanja nam prikazuju stanje podpovršinske zone. Ističe se važnost suradnje geofizičara i geologa u kartiranju i mapiranju podpovršinskih zona jer uz geofizička istraživanja i iskusnog inženjer-geologa moguće je precizno odrediti seizmičku diskontinuiranost.

11. Literatura

(1) Barton, N. (2002): *Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design*. Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 39, No. 2, pp. 185-216.

(2) Barton, N. Lien, R. and Lunde J. (1974): *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics, Vol. 6, No, 4, pp. 189-236.

(3) Bieniawski, Z.T. (1993): *Classification of rock masses for engineering: The RMR system and future trends*. In a J. A. Hudson (Ed). Comprehensive Rock Mechanics, Oxford, Vol. 3, pp. 353-573.

(4) Concrete Association, Fagernes, Norway, pp. 46-66.

(5) Dedić Ž., Kruk B., Kruk Lj., Kovačević-Galović E. (2015*): Rudarsko-geološka studija Varaždinske županije*. Hrvatski geološki institut – Zavod za mineralne sirovine, Zagreb.

(6) Deere, D.U. (1963). Technical description of rock cores for engineering purposes. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, Vol. 1, pp. 16-22.

(7) Dugonjić J.S. (2007): *Inženjerska mehanika stijena*. Skripta. Rijeka: Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet.

(8) Gazdek M., Bačić M., Kovačević M. S. (2014): *Seismic Quality indeks (SQi) of Rock Mass*. Technical Gazette 21, pp. 79-86.

(9) Gazdek, M. (2009): *Utjecaj sezmičkih brzina na klasificiranje stijenskih masa*, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb.

(10) Hoek E., (2004): *Rock mass classification. Hoek's Corner*, www. rocscience.com; accessed December 2004.

(11) Hrvatski Geološki Institut (HGI): *Geološka karta Republike Hrvatske 1:300.000 na Internetu.* Dostupno: http://www.hgi-cgs.hr/geoloska_karta_Hrvatske_1-300_000.htm. Datum pristupa: 27.06.2017.

(12) International Society for Rock Mechanics (ISRM), Commission on standardization of laboratory and field tests, (1978*): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, No. 6, pp. 319-368.

(13) Palmstrom A., Broch E., (2006): *Use and Misuse of Rock Mass Classification Systems with Particular Reference to the Q-System*, Pub. in Tunnels and Underground Space Technology, vol. 21, pp. 575-593.

(14) Pollak, D. (2007). *Utjecaj trošenja stijenskih masa na njihova inženjerskogeološla svojstva*. Disertacija. Sveučilište u Zagrebu, RGN fakultet Zagreb.

(15) Price, D.G. (2009): Principels of Engineering Geology. Springer, Berlin.

(16) Schuster G. T., Quintus-Bosz A., (1993): *Wavepath eikonal traveltime inversion: Theory*, Pub. in geophysics, vol. 58, no. 9, pp. 1314-1323.

(17) Tišljar J. (1994): *Sedimentne stijene*. Školska knjiga, Zagreb.

(18) Tišljar, J. (2001): *Sedimentologija karbonata i evaporita*, Institut za geološka istraživanja, Zagreb.

(19) Vrkljan, Ivan (2003): *Inženjerska mehanika stijena*. Građevinski fakultet, Sveučilište u Rijeci, Institut građevinarstva Hrvatske d.d. Zagreb.

Popis slika

Slika 1. Prikaz stijenske mase i diskontinuiteta 2
Slika 2. Prikaz svjetlosnog otiska prethodne fotografije 2
Slika 3. Kamenolom u Beli 3
Slika 4. Satelitska snimka zračne udaljenosti naselja Bela i EP Belski Dol 4
Slika 5. Satelitska snimka EP Belski Dol - donji, površine 6,0 ha 5
Slika 6. Geološka karta istraživanog područja (Izvor: Šimunić i sur., 1971.-1978.) 6
Slika 7. Postupak mjerenja duljine bušotinske jezgre za proračun RQD indeksa (izvor: Gazdek, 2009) 11
Slika 8. Prikaz diskontinuiteta u stijenskoj masi 12
Slika 9. Prikaz parametara diskontinuiteta (prema: Gazdek, 2009) 13
Slika 10. Prikaz seizmičkih diskontinuiteta 16
Slika 11. Prikaz istraživačkog profila 17
Slika 12. Shematski prikaz istraživačkog profila 18
Slika 13. Princip terenskog mjerenja brzina seizmičkih valova 19
Slika 14. Oprema za seizmičku refrakciju 21
Slika 15. Refrakcijski tomografski profil (Izvor: Gazdek, 2009) 23
Slika 16. Gornji dio slike prikazuje profil refrakcijske tomografije s raspodjelom brzina uzdužnih P valova , a donji dio rekonstrukciju seizmičke slike indeksa seizmičke kvalitete SQi na kosini 31
Slika 18. 2D prikaz seizmičkih diskontinuiteta na kosini 35
Slika 20. Gornji dio slike prikazuje profil refrakcijske tomografije s raspodjelom brzina poprečnih S valova , a donji dio rekonstrukciju seizmičke slike indeksa seizmičke kvalitete SQi na kosini 39
Slika 21. Na slici gore prikazana je rekonstrukcija seizmičke slike indeksa seizmičke kvalitete SQi na kosini, a na slici dolje profil refrakcijske tomografije s raspodjelom brzina uzdužnih P valova s pretpostavljenim diskontinuitetima 41
Slika 22. 2D prikaz seizmičkih diskontinuiteta na kosini 43
Slika 23. Usporedba slike čela kosine sa nepravilnostima i diskontinuitetima te slike svjetlosnog otiska čela (refleksa svijetlosti) 45

Popis tablica

Tablica 1. Prosječne brzine P i S valova karbonatnih stijena u Hrvatskoj (Pollak, 2007) 7
Tablica 2. Glavni sustavi klasifikacije stijenske mase (Corsa, 2004) 9
Tablica 3. RQD postotak kvalitete stijene 11
Tablica 4. Osnovne oznake za definiranje SQi vrijednosti u ravnini yOz 24