

## SEIZMIČKA REFRAKCIJSKA TOMOGRAFIJA I ANALIZA SCHOLTE-OVIH VALOVA (MASW) U GEOTEHNIČKIM ISTRAŽIVANJIMA PLITKOG PODMORJA

BOŽO PADOVAN<sup>1</sup>, VALENTINO MEJRUŠIĆ<sup>1</sup>, OZREN SORIĆ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Terra Compacta d.o.o., Pšunjska 3, 10000 Zagreb, Hrvatska

<sup>2</sup>Contera d.o.o., Jaz 9a, 23000 Preko, Hrvatska

### Sažetak

U sklopu geotehničkih istražnih radova za potrebe proširenja obale u luci Krk izvedena su i geofizička istraživanja po postojećoj obali i po dnu moru. Osnovni cilj istraživanja je bio definirati debljinu marinskih sedimenata i dubinu do osnovne stijene. S obzirom na geološku građu terena, očekivale su se jake lateralne promjene stoga je primjena geofizičkih metoda trebala povezati rezultate istražnog bušenja i upotpuniti pouzdanost prostornog modela podzemlja. Primijenjene su dvije seizmičke metode, plitka seizmička refrakcija i višekanalna analiza površinskih valova, MASW. Rezultati istraživanja prikazani su u obliku modela promjene širenja brzina P i S-valova po dubini sukladno kojima su interpretirane debljine sedimenata i dubina do osnovne stijene.

### Ključne riječi

seizmička refrakcija, MASW, geofizička istraživanja pod morem, debljina marinskih sedimenata

## 1 Uvod

Primjenom geofizičkih metoda u sklopu geotehničkih istražnih radova upotpunjuje se njihova prostorna pouzdanost. Korelacijom geotehničkih istražnih bušotina kao 1D podataka i „in situ“ mjerenjima u njima s rezultatima geofizičkih metoda koji su predstavljeni 2D i 3D prikazima dobije se detaljan model podzemlja u istraživanom području. U sklopu geotehničkih istraživanja za potrebe izrade projektne dokumentacije proširenja obale u gradu Krku (Slika ), uz istražno bušenje izvedena su i geofizička istraživanja. Njihov cilj bio je doprinijeti što pouzdanijem određivanju debljine marinskih sedimenata i dubine do karbonatne podloge. Specifičnost lokacije je izrazita prostorna nehomogenost dubine do osnovne stijene, tj. debljine marinskih sedimenata. U ovom radu prikazani su rezultati geofizičkih istraživanja metodama seizmičke refrakcije pod morem i višekanalne analize površinskih valova na mikrolokaciji unutar koje su izvedene dvije bušotine. Specifičnost istražnih bušotina je što su, iako razmaknute samo tridesetak metara, zabilježile značajno različitu debljinu morskog sedimenta. Na prvoj bušotini, B-2, stijena se pojavljuje na dubini od oko četiri metra, a na B-3 na više od 15 m. Geofizički profili postavljeni su tako da jedan prelazi/spaja istražne bušotine, a drugi je okomit na njega i presijeca ga na sredini. Prvi profil je cijeli postavljen po dnu mora, a drugi je dijelom na kopnu, a dijelom u moru. Višekanalna analiza površinskih valova učinjena je na profilu postavljenom po dnu mora. Rezultati istraživanja metodom seizmičke refrakcije prikazani su u obliku 2D modela promjene brzine širenja P-valova kroz podzemlje, a MASW-a u obliku 1D modela promjene brzine širenja S-valova. Klasifikacija tla učinjena je sukladno dobivenim brzinama P-valova, prema teoretskim i

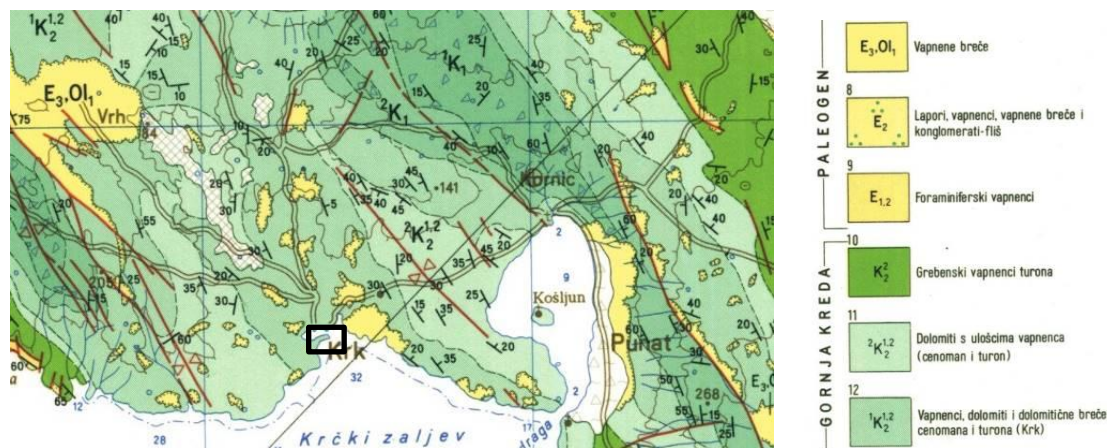
iskustvenim vrijednostima, uz korelaciju s determinacijom jezgri izbušenih bušotina B-2 i B-3 te rezultatima 1D MASW mjerenja. Specifičnost ovog istraživanja je primjena geofizičkih metoda pod morem zbog posebnih uvjeta samih terenskih mjerenja te načina obrade i interpretacije rezultata. Saturiranost sedimenata morem utječe na vrijednosti brzina P-valova što može dovesti do pogrešne klasifikacije vrste i stanja stijenske mase. Iz tog razloga učinjena je i MASW analiza, s obzirom da saturiranost ne utječe na vrijednosti brzina S-valova. Za razliku od kopnenih MASW istraživanja u kojima se prvenstveno primjenjuje analiza površinskih Rayleigh-ovih valova, pod morem se razmatraju tzv. Scholte-ovi valovi. Kod njih je iznad poluprostora more/voda za razliku od Rayleigh-ovih kod kojih je to zrak te o tome treba voditi računa pri obradi i interpretaciji rezultata.



Slika 1. Lokacija istraživanja u gradu Krku.

## 2 Osnovne geološke značajke istraživanog područja

Prema osnovnoj geološkoj karti RH list Crikvenica (Šušnjar et al., 1973) koja zahvaća dio područja istraživanja, širi dio terena izgrađuju naslage gornjokredne starosti – cenoman, turon (Slika ).

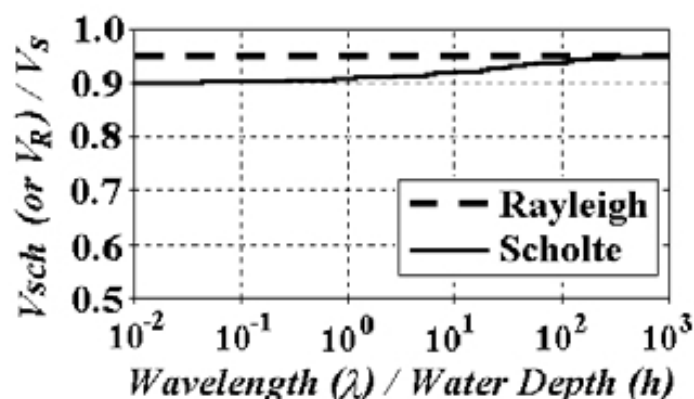


Slika 2. Isječak OGK lista Crikvenica (Šušnjar et al., 1973)

Starije naslage donje krede –  ${}^1K_1$  prisutne su sjeveroistočno i istočno te zapadno od istraživnog terena u izduženoj formi pružanja sjeveroistok-jugozapad. Te naslage su karakterizirane vapnenim brečama i vapnencima. Kao što je vidljivo iz Osnovne geološke karte, list Crikvenica, istraživni teren pripada starijoj gornjokrednoj seriji naslaga -  ${}^1K^{1,2}$ . Te naslage karakterizirane su vapnencima, dolomitima i dolomitičnim brečama cenomana i turona. Na istraživnom terenu prevladavaju dolomitične breče svijetlosive do sive boje (determinirano iz jezgri istraživnih bušotina) iznad kojih se u moru mogu očekivati deblji nanosi marinskih sedimenata. Slojevi su generalno nagnuti prema jugozapadu s kutom nagiba najčešće 20 do 30° te ponegdje prema sjeveroistoku s kutom nagiba najčešće 20 do 35°.

### 3 Primijenjene geofizičke metode

Na lokaciji istraživanja primijenjene su dvije geofizičke, seizmičke metode po dnu mora: seizmička refrakcija i višekanalna analiza površinskih valova, MASW (eng. Multichannel Analysis of Surface Waves). Metoda seizmičke refrakcije P-valova temelji se na očitavanju prvih nailazaka dolaska elastičnih valova na geofone ili hidrofone postavljene duž profila na površini terena, odnosno dnu mora. Iz poznatog geometrijskog rasporeda postavljenih prijemnika, točaka iniciranja vala i vremena nailazaka, metodama inverznog modeliranja izračunava se 2D model promjene brzine širenja P-valova u istraživnom podzemlju. MASW (eng. *Multichannel Analysis of Surface Waves*) je seizmička geofizička metoda razvijena na sveučilištu u Kansasu, na institutu Kansas Geological Survey (Park et al., 1998). Za razliku od klasičnih seizmičkih metoda (refleksija, refrakcija) koje analiziraju prostorne seizmičke valove, MASW-metoda analizira površinske valove. Površinski valovi su disperzivni – različite frekventne komponente se šire različitim faznim brzinama. MASW-metodom analizira se navedeno svojstvo površinskih valova kako bi se dobila promjena brzine transversalnih, S-valova s dubinom. Postoji više vrsta površinskih valova kao što su Rayleigh-ovi, Love-ovi, Scholte-ovi. MASW-metoda se uobičajeno primjenjuje na kopnu pri čemu je tlo poluprostor na kojem se vrši mjerenja, a iznad poluprostora je zrak. Pod pojmom površinski valovi podrazumijeva se analiza Rayleigh-ovih valova. Međutim, pri istraživanjima po dnu mora, iznad poluprostora je more te se ponašanje površinskih valova neznatno mijenja zbog interakcije tlo-voda. Ti površinski valovi nazivaju se Scholte-ovi ili generalizirani Rayleigh-ovi valovi. Njihova brzina razlikuje se od brzine Rayleigh-ovih valova na površini i ovisna je o vrijednosti površinske valne duljine ( $\lambda$ ) i dubine mora/vode ( $h$ ). Što je omjer ove dvije veličine manji, razlika je veća pa se može zaključiti da se razlika povećava s dubinom (Slika ).

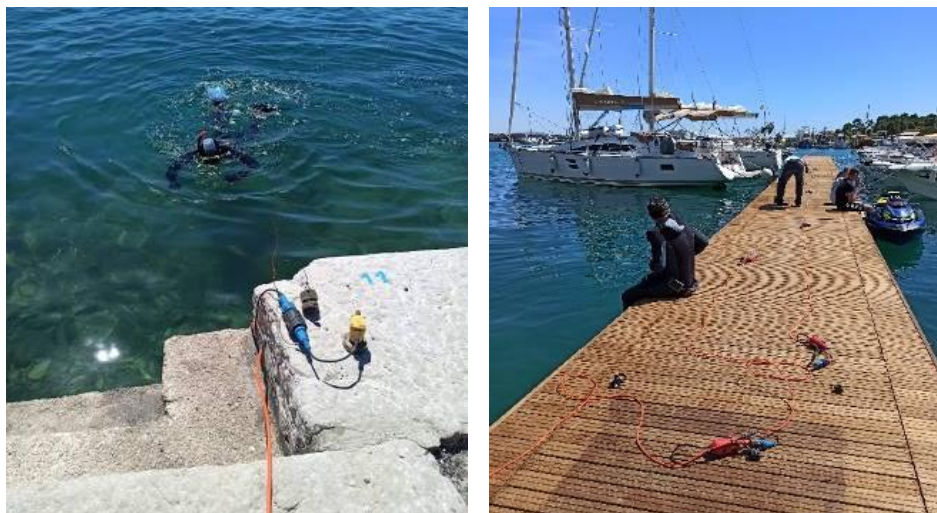


**Slika 3.** Odnos brzina Scholte-ovih (ili generaliziranih Rayleigh-ovih) valova i kopnenih Rayleigh-ovih valova u ovisnosti o omjeru valne duljine kopnenih Rayleigh-ovih valova i dubine morskog dna (Ivanov et al., 2000).

Kako je maksimalno odstupanje  $V_{sch}$  od  $V_r$  obično manje od 5 %, u plitkom moru (ispod 10 m dubine) razlika u brzinama je manja od nesigurnosti mjerenja i obrade podataka. Iz tog razloga pri obradi podataka snimljenih u plitkom moru kao što je slučaj u ovom istraživanju (od jedan do pet metara dubine) korištena je ista metodologija obrade kao i za kopnena istraživanja, uz uvažavanje činjenice o postojanju disperzivnih vođenih valova koje je potrebno razlikovati od Scholte-ovih te ih izbaciti iz analize (Parke et al, 2005).

#### 4 Akvizicija i obrada seizmičkih podataka

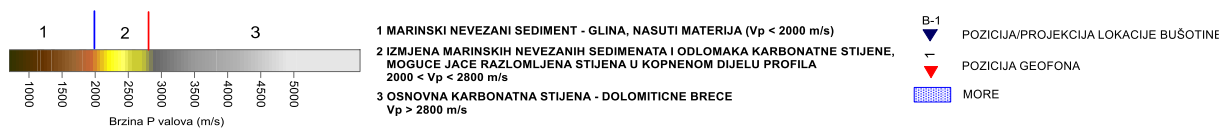
U području istraživanja u luci Krk izvedena su ukupno četiri profila seizmičke refrakcije te jedno mjerenje MASW-metodom. Tri profila refrakcije postavljena su dijelom na kopnu, a dijelom u moru, dok je jedan profil cijeli postavljen po dnu mora, paralelno s postojećom rivom (**Slika** ). Na tom profilu učinjeno je i mjerenje MASW-metodom. Za potrebe snimanja profila položenih i na kopnu i po dnu mora korišteni su geofoni rezonantne frekvencije 10 Hz, a profil po dnu mora je snimljen korištenjem hidrofona iste rezonantne frekvencije. Kao izvor elastičnih valova primijenjena je puška na lovački metak s piezoelektričnim triggerom. Svi profili su bili pojedinačne duljine po 55 m pri čemu je snimano na 12 aktivnih kanala, s pet metara razmaka među njima. Terenska mjerenja su izvođena uz upotrebu pomoćne brodice i uz asistenciju ronionca (**Slika** ).



**Slika 4.** Izvođenje terenskih radova.

Polozicije geofizičkih profila i istražnih bušotina prikazane su na **Slika** . Obrada rezultata seizmičkih refrakcijskih mjerenja učinjena je WET tomografijom (Rohdenwald, 2006), u programu Rayfract 3.33, pri čemu je za ulazni model korištena Delta-t-v metoda (Gebrand, H., 1985). Za prikaz rezultata korištena je Kriging metoda interpolacije. Rezultati obrade prikazani su u obliku interpretiranih dubinskih seizmičkih presjeka. Na interpretiranim 2-D profilima prikazana je promjena brzine P-vala po dubini. Klasifikacija stjenovite mase prema brzinama P-valova učinjena je sukladno očekivanim vrijednostima za vrstu i stanje stijene, činjenici da su sedimenti i stijena saturirani morskom vodom, korelacijom s determinacijom jezgri ranije izvedenih istražnih bušotina te usporedbom s rezultatima mjerenja MASW-metodom. S obzirom da su tri profila (RF-1 do RF-3) dijelom i na kopnu, kod klasifikacije je i to uzeto u obzir. Snimljeni površinski valovi analizirani su u programima ParkSeis i WinMASW . Učinjena je priprema snimaka (filtriranje u frekventnoj domeni i izdvajanje površinskih od prostornih valova), izrada disperzijske krivulje i njena inverzija te prikaz 1D modela promjene brzine S-valova po dubini.





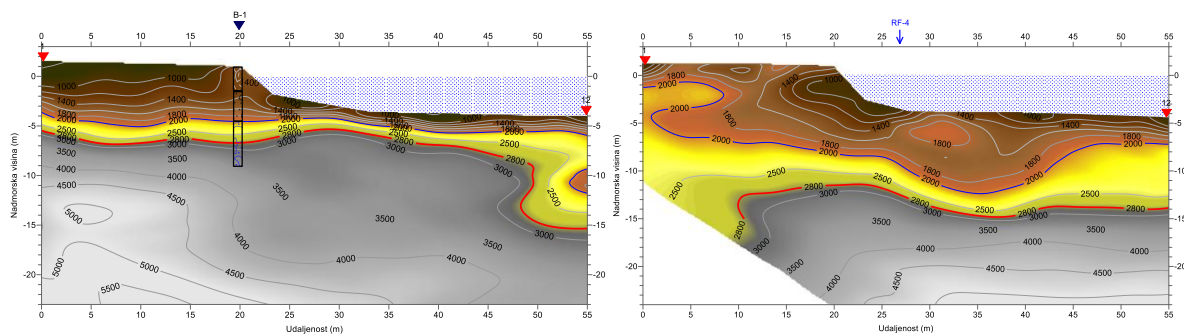
Slika 6. Legenda uz interpretirane seizmičke profile.

ISTRAŽNA BUŠOTINA B-1 (348202.941; 4989057.102)			ISTRAŽNA BUŠOTINA B-2 (348243.901; 4989061.876)		
Dubina bušotine (m)	Litološki opis	Simbol	Dubina bušotine (m)	Litološki opis	Simbol
0 - 2.40	NASIP Kameni odlomci od centimetarskih dimenzija do veličine preko 10 cm - nasip iza zida? sitnozrna frakcija vjerojatno isprana.	n	0 - 2.60	NASIP, prvo asfalt, pa veći komadi kršja, betona s prahom, iznad mora je vezano, a kad se uđe ispod mora iz jezgre je izvađeno kršje veličine do decimetarske veličine. Materijal nasipa je šljunak jednolično gradiuran GU rastresit (do srednje) zbijen.	n
2.40 - 4.90	MARINSKI SEDIMENT Sastoji od pijeska, praša i kršja: - od 2.40 do 4.10 m dominantno je kršje, oštrobridno veličine do 7 cm. Kršja ima više od 50% - zbog ispiranja jezgre tijekom bušenja teško je procijeniti udio pojedine frakcije - od 4.10 do 4.90 m ima više pijeska i nešto praša. Povremeno se pojavi komad kršja. Zbog dosta žitkog stanja ili meke plastične konzistencije i bušenja s vodom jezgra je raspadnuta i izmješana. Sve je sive boje.	GM/GC	2.60 - 7.40	MARINSKI SEDIMENT ŠLJUNAK pjeskovit do prahovit, tamno sive boje, vrlo rastresit do rastresit, povremeno ima slojeva ili zona gdje je veća zastupljenost pjeskovite ili prahovite frakcije, npr. 4.20 - 4.40 m, od 6.00 - 7.40 m. Šljunak je na početku intervala sličan onom iz nasipa. Kao da je pomiješan nasip i GS/GM. Od 3.80 m nema više šljunka iz nasipa. I sad je uglavnom obli, mada povremeno ima i oštrobridnog.	GS/GM
4.90 - 10.00	DOLOMITIČNA BREČA Svjetlo sive boje, raspucala, a s dubinom značajnije raspucala.	D	7.40 - 15.00	PRAH visoke plastičnosti, meko plastične konzistencije, sive i crvene boje. Početni dio 7.40 - 8.20 m sive boje. Na 8.20 m komad kršja s rupom od prstaca. Od 8.20m prelazi u smeđu boju do 9.0m. Od 9.0m opet sive boje i moguće CH, konzistencija raste s dubinom, a i udio glinovite frakcije	MH
			15.00 - 16.55	GLINA crvenica polučvrste do čvrste konzistencije.	CH
			16.55 - 20.00	OKRŠENA DOLOMITNA STIJENA, sivo plave boje	D

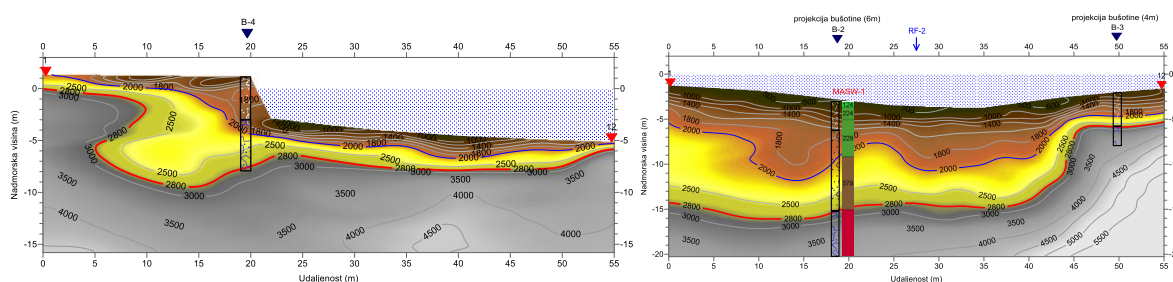
Slika 7. Determinacija istražnih bušotina B-1 i B-2.

ISTRAŽNA BUŠOTINA B-3 (348274.129; 4989052.411)			ISTRAŽNA BUŠOTINA B-4 (348309.792; 4989040.806)		
Dubina bušotine (m)	Litološki opis	Simbol	Dubina bušotine (m)	Litološki opis	Simbol
0 - 3.50	OBALNI ZID Izgrađen od kamenih klesanaca i lomljenog kamena, u reškama prisutno vezivo, teško je prepoznati kraj/dno zida.	/	0 - 3.50	NASIP Kršje stijensko i prahovito pjeskovita komponenta. Kršja ima sigurno preko 50%, veličine veće od 10cm, oštrobridno.	/
3.50 - 4.00	NASIP ILI ZID Ima komad opeke - kršje, oštrobridno sive boje. Na nekim komadima ima smeđe prevlake.	n	3.50 - 4.00	NASIP ILI ZID Kršje, oštrobridno sive boje s nešto pjeskovite frakcije.	n
4.00 - 9.00	DOLOMITIČNA BREČA Sivo plave boje, sljubljenih pukotina, ispunjenih crvenicom i prahom/glinom smeđe boje, raspucala.	D	4.00 - 9.00	DOLOMIT I DOLOMITIČNA BREČA Sivo plave boje, jako raspucala.	D

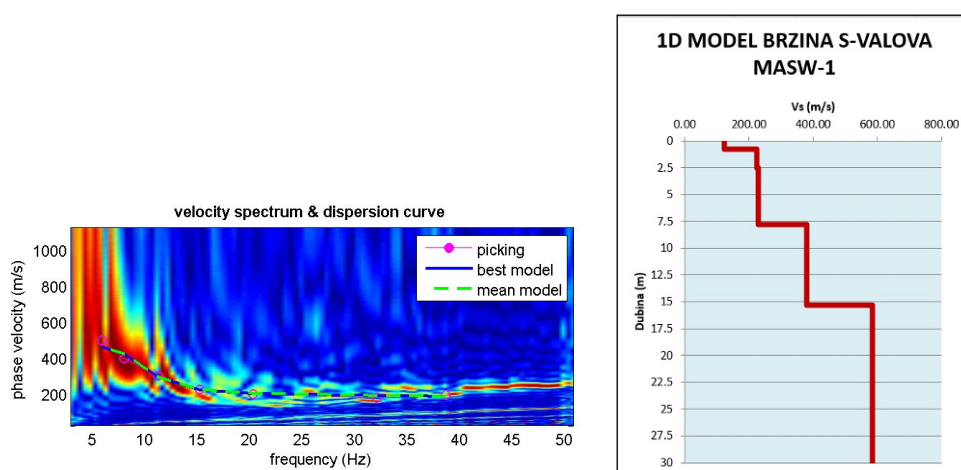
Slika 8. Determinacija istražnih bušotina B-3 i B-4.



Slika 9. Interpretirani seizmički profili RF-1 i RF-2 s ucrtanom pozicijom istražne bušotine B-1.



Slika 10. Interpretirani seizmički profili RF-3 i RF-4 s ucrtanim pozicijama istražnih bušotina B-2, B-3 i B-4 te 1D profilom MASW-1 s istaknutim granicama u promjeni brzine S-valova.



Slika 11. Krivulja disperzije površinskih valova i 1D model promjene brzine širenja S-valova po dubini.

## 5 Zaključak

Primjenom geofizičkih metoda u sklopu geotehničkih istraživanja za potrebe izrade projektne dokumentacije proširenja obale u luci Krk postignut je cilj pouzdanijeg i jasnijeg prostornog definiranja debljine marinskih sedimenata i dubine do osnovne stijene. Kako je u zoni istraživanja bilo moguće očekivati izražene lateralne promjene karakteristične za krš, što je utvrđeno i istražnim bušenjem, geofizičke metode su upotpunile konačan model podzemlja. Primijenjene su dvije metode, seizmička refrakcija po kopnu i po dnu mora i višekanalna analiza površinskih valova, MASW, po dnu mora. Odabirom ove dvije metode, kao rezultat su dobiveni modeli promjene brzine širenja P i S-valova. Uvažavajući distribuciju dobivenih brzina te rezultate prethodnog istražnog bušenja, učinjena je klasifikacija tla prema seizmičkim brzinama. Utvrđeno je da pojava osnovne stijene (dolomitičnih breča) korelira s povećanjem brzine P-valova iznad 2800 m/s i S-valova iznad 580 m/s. Pri brzinama P-valova u rasponu 2000 do 2800 m/s i S-brzinama 380 do 580 m/s, očekuje se pojava marinskih sedimenata i odlomaka stijene, a u kopnenom dijelu profila i jako razlomljene stijene. Brine P-valova niže od 2000 m/s i S-valova od 380 m/s ukazuju na pojavu marinskih sedimenata. Na prikazanim profilima (slike Slika Slika Slika ) vidi se da se pojava osnovne stijene očekuje na dubinama od pet do 15 metara ispod razine mora. Primjena MASW-metode kao druge metode istraživanja pokazala se izuzetno korisnom jer je umanjila moguću nepouzdanost određivanja granice između morskih sedimenata i osnovne stijene. S obzirom na činjenicu da su zbog saturiranosti morem, brzine P-valova uvećane u odnosu na iste materijale na kopnu, a S-valova nisu, interpretacija granica samo prema brzinama P-valova može uzrokovati pogrešne zaključke. Zone u kojima se pojavljuju marinski sedimenti veće debljine kao u ovom istraživanju (preko 10 metara) mogu samo prema brzinama P-valova biti pogrešno protumačene

kao trošna stijena. Usporednom analizom brzina P i S-valova umanjuje se takva mogućnost. Kako bi se dobio optimalno pouzdani rezultat istraživanja preporučuje se kombinirati podatke istražnog bušenja, seizmičke refrakcije P-valova te višekanalne analize površinskih valova, MASW-a.

## Literatura

Gebrande, H.; Miller, H. Refraktionsseismik (in German). In *Angewandte Geowissenschaften II*; Ferdinand, E., Bender, F., Eds.; Enke: Stuttgart, Germany, 1985; pp. 226–260.

Ivanov, J., Park, C.B., Miller, R.D., Xia, J., Hunter J.A., Good, R.L, Burns, R.A. (2000).: Joint analysis of surface-wave and refraction events from river-bottom sediments, SEG 2000 Expanded Abstracts

Park C.B., Miller R.D., Xia, J, Ivanov, J.,; Underwater MASW to evaluate stiffness of water-bottom sediments, The Leading Edge, July 2005

Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1998).: Imaging dispersion curves of surface waves on multi-channel record. 68th Annual International Meeting of Society of Exploration Geophysicists, Expanded Abstracts.

Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (1999).: Multichannel analysis of surface waves. *Geophysics*, 64(3), 800 - 808.

Park, C. B., Miller, R. D., & Xia, J. (2001).: Offset and resolution of dispersion curve in multichannel analysis of surface waves (MASW). *Proceedings of the SAGEEP*. Denver, Colorado.

Rohdenwald, S.R.C. (2006).: Rayfract Tutorial, Intelligent Resources

Šušnjar, M., Bukovac, J., Nikler, L., Crnolatac, I., Milan, A. i Sikić, D. (1973). Crikvenica [geološka karta]. 1:100 000. Osnovna geološka karta SFRJ, list L 33-102. Beograd: Savezni geološki zavod.

Witeley, B. (2002).: Integrating Geophysical and Geotechnical Technologies for Improved Site Assessment of Ports and Harbours, PIANC 2002, 30th international navigation congress S8D3 P127 Sydney, 2002.