

# GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA NA TVRĐAVI „MINČETA“, DUBROVNIK, HRVATSKA

## GEOTECHNICAL INVESTIGATIONS OF THE FORTRESS “MINČETA”, DUBROVNIK, CROATIA

Kristijan Grabar<sup>1\*</sup>, Željko Miklin<sup>2</sup>, Stjepan Strelec<sup>3</sup>

<sup>1</sup> SPP d.o.o. Trstenjakova 3, 42000 Varaždin, Hrvatska

<sup>2</sup> Hrvatski geološki institut, Sachsova 2, 10000 Zagreb, Hrvatska

<sup>3</sup> Geotehnički fakultet, Sveučilišta u Zagrebu, Hallerova aleja 7, 42000 Varaždin, Hrvatska

\*E-mail adresa osobe za kontakt / e-mail of corresponding author: kgrabar@gmail.com

**Sažetak:** Razna oštećenja tijekom stoljeća na tvrđavi „Minčeta“ prouzročena su, zbog djelomičnog temeljenja tvrđave na rasjedu, naknadnom izgradnjom usjeka Ulice Iza Grada, i seizmički vrlo aktivnom području. Nastala oštećenja potrebno je locirati i predložiti sanaciju kako bi se zidine sačuvale. Korišteno je nekoliko metoda istraživanja prije svega geološko kartiranje okoline i objekta, georadarsko profiliranje, električna tomografija i seizmička istraživanja višekanalnom analizom površinskih valova kao i posebna primjena "downhole" seizmičke metode mjerenjem na pokosu obloženog usjeka. Ovim metodama definirane su oslabljene zone koje su i geotehnički kategorizirane. Preporučeno je injektiranje oslabljenih zona kao zaštita od daljnje degradacije zidina.

**Ključne riječi:** inženjerskogeološko kartiranje, geofizička istraživanja, seizmička istraživanja

**Abstract:** Various damages of the fortress "Minčeta" during centuries had several causes. These are: partial foundation on the fault, additional construction works cutting the street "Iza grada" and seismic activity of the area. The resulting damage had to be located and the remediation measures were proposed to preserve the walls. Several methods of investigations were used. Geological mapping of the area was the base. Next was GPR profiling, electric and seismic investigation with multichannel analyses of surface waves and the special approach of downhole seismic measurements on the slope of the cut wall. Used methods defined the weak rock mass zones that were geotechnically categorized. Grouting of weak zones, as the protection from further degradation of walls, was proposed.

**Key words:** engineering geological mapping, geophysical surveys, seismic surveys

Received: 26.11.2016 / Accepted: 08.12.2016

Published online: 14.12.2016

Pregledni rad / Review paper

## 1. UVOD

### 1.1. Opće geološke značajke naslaga

U istraživanome području uz Tvrđavu Minčeta izdvojena je litostratigrafska jedinica gornje krede, kronostratigrafskog raspona od cenomana do mastrihta. Za izdvajanje litostratigrafskih jedinica korišteni su podaci dobiveni tijekom istraživanja susjednih lokaliteta, u prvome redu južnodalmatinskih otoka (Braća, Hvara, Mljet, Visa i dr.) te područja Biokova. Naravno, zbog nemogućnosti detaljnih istraživanja izdvojene su jedinice potpuno neformalne, a budući da se najvećim dijelom poklapaju s kronostratigrafskim jedinicama, zbog jednostavnijeg snalaženja prigodom primjene rezultata ovih istraživanja ravnopravno su navedeni i kronostratigrafski nazivi svake jedinice, Strelec et al. (2013).

Ove karbonatne naslage karakterizira izmjena, peloidno - skeletnih i rudistno – gastropodnih vapnenaca, tipa madston i pekston sa sporadičnim ulošcima dolomita i breča. Dobro su do debelo uslojeni (0.5-1.0m i > 1.0 m), a boja im je siva do svijetlosiva, do gotovo bijela. To su vapnenci u kojima se izmjenjuju madstoni, fenestralni madstoni, peloidno – skeletni pekstoni i intraklastični – rudisti. Stijene su pretežito vrlo svijetle, gotovo bijele boje, a sadrže bogatu mikrofosilnu zajednicu bentosnih foraminifera srednjega i mlađega cenomana. Naslage su obilježene

utjecajem otvorenijeg mora. Pretežito su to vapnenci gromadastoga habitusa, ali u izmjeni ima i proslojaka intraformacijskih karbonatnih breča. Pretežu izmjenjene padinskih bioklastičnih breča sa sitno razdrobljenim i/ili cijelim skeletima rudista i intraklastima, te rjeđim fragmentima korijala i gastropoda. U izmjeni ima mikritnih litotipova. Stijena izdvojene jedinice razlikuje se po okolišu taloženja, koji je znatno otvoreniji prema pučinskom utjecaju (padina intraplatformnoga korita), na površini pokazuje brečoliki habitus, a starost je od mlađega cenomana do gornjega turona/konijaka.

U tektonski jače poremećenim zonama duž tektonskih prslina i pukotina nastalih uslijed dijagenetskih procesa, stijene su dijagenetski promijenjene. Tako su stilolitizacijom i alokemijskim promjenama pretvorene u brečolike karbonate. Iako su takve stijene pretežito potpuno litificirane, mjestimično se zbog jačeg okršavanja mogu očekivati i kaverne.

Slijede debelo slojeviti do masivni madstoni s proslojima wekstoni i pekstoni kronostratigrafskog raspona od g. turona do santona. Ove su naslage u rasjednom kontaktu s prethodnima, rasjedni kontakt je dijagonalni u odnosu na smjer obilazne ulice (Ulica pod gradom), oko kule Minčeta. To su uglavnom debelo slojevite (slojevi debljine od 1,5 m do 3 m) do masivne naslage gromadastih izdanaka.

Pretežito su to mudstoni svijetlosmeđe boje, s rijetkim proslojcima wekstone i pekstona s peloidima, bentosnim foraminiferama i kršjem te cijelim ljušturama rudista. Tek mjestimice se nalaze slojevi s više eolisakusa i taumatoporela, koje su tipični fosili mlađega turona i starijega senona krških Dinarida, pa tako i glavno obilježje naslaga neformalne litostratigrafske jedinice Gornji Humac, kako je izvorno opisana na Braču.

Donja granica ove jedinice nije utvrđena na samome lokalitetu, a gornju granicu obilježava prijelaz u dobro slojevite wekstone i pekstone. Vapnenci ove jedinice su dobro slojeviti (pretežito 20-50 cm), pretežito zrnasti litotipovi s dosta peloida, intraklasta i kršja rudista. Boja im varira od svijetlosmeđe do tamnije smeđe, a u najmlađem dijelu ima i laminiranih i bituminoznih proslojaka u izmjeni. Pored mjestimice brojnih presjeka rudista, u ovim je naslagama utvrđena i bogata mikrofosilna zajednica bentosnih foraminifera, među kojima su stratigrafski najvažnije sitnije keramosferine koje prema klasičnoj stratigrafiji krških Dinarida ukazuju na mlađesantonsku starost (iako su prema najnovijim određivanjima apsolutne starosti te naslage vjerojatno ipak nešto starije, tj. konijačke starosti). Podinu ove jedinice predstavljaju pretežito muljevite naslage jedinice Gornji Humac. Gornja je granica ovih naslaga različita: u istočnim i zapadnim dijelovima istraživanoga terena neposredno na naslagama ove jedinice nalaze tragovi dugotrajne emerzije. Na ovim naslagama su paleogene naslage, a u središnjem se dijelu nalaze i ostaci paleogeografskoga udubljenja – manjega korita ispunjenoga vapnencima s pelagičkim utjecajem.

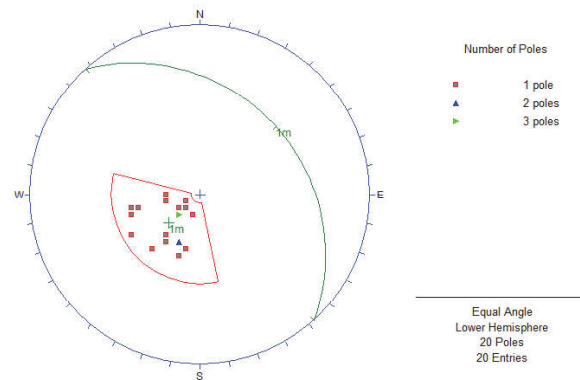
Kršje pomiješano sa zemljom nije izdvajano, no ono postoji u gotovo svim manjim ili većim vrtačama i depresijama. To je uglavnom pokriveno područje vegetacijom, uglavnom su to palme i olianderi. Te naslage sadrže gline i fragmente stijene podloge. Fragmenti osnovne stijene različite su veličine, blokovi mogu biti veličine 50x30 i 40x25 cm.

## 1.2. Uže tektonsko područje

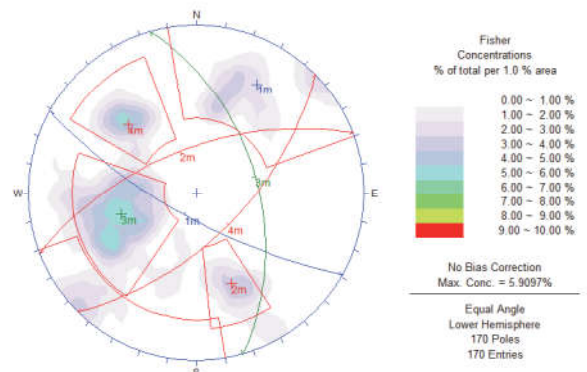
Područje Dubrovnika pripada strukturno-tektonskom dijelu para autohtona, izostaje područje Cukali zone koje je dijelom prekriveno navlakom Visokog krša i samom zonom Visokog krša koja je sjeveroistočno od područja istraživanja. Strukturno-tektonska jedinica koja izgrađuje područje kule Minčete pripada para autohtonu i možemo ju pratiti od juga do sjeveroistoka izvan našeg područja istraživanja. Naslage gornje krede karakterizira različitost litostratigrafskih jedinica. Litostratigrafske jedinice konkordantno u sukcesiji naliježu jedna na drugu od mlađih prema starijim. U predjelu kule prevladavaju diskontinuiteti pod kutom od 15 - 80°. Naslage se nalaze u južnom spušenom krilu sinklinale i u nastavku su u rasjednom kontaktu. Uslijed povijanja strukture zijeve pukotina postaje sve veći, tako da je ovdje zijeve u pravilu preko 5 mm. Ova strukturno-tektonska jedinica je monoklinalne građe, slojevi su isključivo smjera nagiba prema sjeveroistoku, što je i jasno vidljivo na dijagramu slojevitosti (sl. 1). Na dijagramu (sl. 2) gdje su prikazani svi pukotinski sustavi šireg prostora, vidljiva je šira zona rasjeda okomice na os „b“ (crvene linije) čija se vergenca može mijenjati od sjeverozapadne do jugoistočne.

U skladu sa slojevitošću te relativno mirnim i pravilnim slijedom naslaga, strukturni dijagram pukotina i rasjeda pokazuje „očekivanu“ sliku – diskontinuitete dinaridskog pravca pružanja (sjeverozapad-jugoistok) sjeveroistočne vergencije (plava boja) (sl. 2).

Važno obilježje strukturno-tektonskoj jedinici daje i rasjed dinaridskog pravca pružanja (sjeverozapad-jugoistok) koji prolazi ispod kule Minčeta na istočnom dijelu istraživanog terena. Na sjecištima tog rasjeda i usjeka ceste vidljive su mikro bore (sl. 3), zalijeganje slojeva i pukotina te rasjedna rastrošena zona. Dio te rasjedne zone je zaštićen (plombiran), Miklin et al. (2015).



Slika 1. Dijagram trasa ravnina strukturno-tektonске jedinice dubrovački para-autohton.



Slika 2. Dijagram trasa ravnina pukotina i rasjeda dubrovačke strukturno-tektonске jedinice, slojni diskontinuiteti - zeleno, osna ravnina - plavo, okomito na os „b“ crveno.

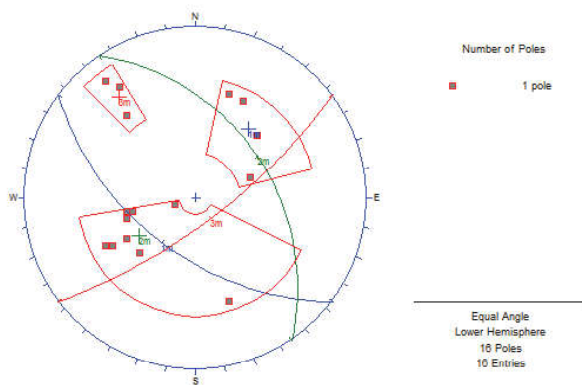
## 2. PROGRAM ISTRAŽIVANJA

Istražni radovi bazirali su se na inženjerskogeološkom kartiranju temelja tvrđave i zidina, a sva oštećenja su geodetski zabilježena i prikazana na karti mjerila M 1:250.

Nevidljiva oštećenja u temeljima i u zidu, kao i njihovo prostiranje, pokušalo se otkriti geofizičkim metodama, Šumanovac (2008). Od metoda istraživanja korišteno je georadarsko (GPR – ground penetrating radar) profiliranje, električna istraživanja primjenom geoelektrične tomografije (ERT - electrical resistivity tomography), a od seizmičkih istraživanja korištena je višekanalna analiza površinskih valova (MASW), kao i posebna prilagodba "downhole" seizmičkog mjerenja na pokosu obloženog usjeka.



Slika 3. Antiklinala u usjeku Ulice Iza Grada.



Slika 4. Kumulativni dijagram trasa ravnina pukotina i rasjeda mjereno u zoni Kule Minčeta jedinice, slojni diskontinuiteti - zeleno, osna ravnina - plavo, okomito na os „b“ crveno.

## 2.1. Inženjerskogeološko kartiranje

Osnovnu značajku stijenske mase baziramo na mjerenju parametara diskontinuiteta u stijeni, [ISRM \(1978\)](#). Mjerenja koja smo izvršili u kombinaciji s geofizičkim mjerenjima dostatna su za kvalitetno projektiranje sanacije objekta. Diskontinuiteti u stijinama nikad nisu ravnomjerno distribuirani u svim smjerovima, već se obično pojavljuju u setovima. Izdvojili smo tri osnovna seta diskontinuiteta, a na nekim mjestima mogli smo mjeriti još jedan ili najviše dva seta kao ostale diskontinuitete. Vrijednost linearne učestalosti ovisila je o smjeru linije kroz stijensku masu. Na otvorenim izdancima mjerili smo tlačne čvrstoće Schmidovim čekićem po preporuci internacionalnog društva za mehaniku stijena ([ISRM 1978](#)). Mjeren je RQD indeks, razmak diskontinuiteta, zijev, hrapavost i rastrošenost stijenki, ispunjena diskontinuiteta i to su bili ulazni podaci za klasifikaciju stijenske mase.

Temelji Tvrđave Minčeta većim dijelom su položeni na stijensku podlogu, dio zida temeljen je u rasjednoj zoni koja se sastoji od fragmenata osnovne stijene, većih i manjih blokova, prahovitog materijala i veoma malo gline. Podno tvrđave Minčeta iskopana je cesta (Ulica Iza Grada). Iskopom je došlo do relaksacije naprezanja u stijenskoj masi. Relaksacija se očituje otvaranjem zjapećih

pukotina ne samo u osnovnoj stijeni već i na zidovima Kule.

Stratigrafski to su gornjo kredni vapnenci, a uz rasjed su tektonske breče, kao što je spomenuto u geološkom dijelu. U normalnom slijedu su mikritni do mikritno - zrnasti vapnenci sive do boje bijele kave, varijabilne debljine pojedinih slojeva su između 20 i 45 cm. Slojevi su nagnuti prema sjeveroistoku i istoku od 43-60°, a najučestaliji su im položaji 63/60 i 80/43.

Između temelja Kule i Ulice Iza Grada, registrirano je nekoliko područja koja su prekrivena prašinastom glinom kršjem ili odlomcima kršja te blokovima vapnenaca. Ovo je područje zasađeno olianderima i palmama.

Registrirani rasjed vidljiv je u usjeku prokopane ulice. Unutar vapnenačke serije, rasjed je dijagonalni na smjer osi ulice, a dijelom je i ispod Kule Minčete. Nestabilnosti u zoni rasjeda sanirane su kamenom oblogom (plombom). Kamena obloga – zid načinjen je tako da je omogućeno dreniranje podzemne vode u zaleđu obloge – zida (na zidu su vidljivi tragovi vode). Površinskih vodnih pojava nema. Ulazni podaci za GSI klasifikaciju stijenske podloge, odnosno značajke registriranih diskontinuiteta osnovnog strukturnog sklopa prikazane su u [tablici 1](#).

Inženjerskogeološkim kartiranjem dobivena je inženjerskogeološka karta ([sl. 5](#)), a kategorizacijom stijene utvrđene su 3 kategorije stijene:

**Trošna stijena podloge.** Zona širine do 2.5 m, vapnenci umjereni do jako trošni (MW – HW), širokog zijeva pukotina od 1-5 mm, bez ispune, okršeni, RQD do 70 %, a GSI u rasponu od 51-52.

**Stijena podloge.** Vapnenac je srednje trošna (MW), zijev pukotina 0.1 – 1.0 i 1.0 – 5.0 mm, ispunjena je glinovita, s kalcitom ili bez. Moguća je pojava kaverni u zoni rasjeda te povremeno procjeđivanje vode u rasjednoj zoni. RQD = 80 %, osim u rasjednoj zoni. GSI = 56-66.

**Rasjedna zona.** Zona je širine 4-5 m, sastoji se od kršja vapnenaca i vapnenaca, jako trošna zona (HW), više od pola materijala stijene je raspadnuto, zijev pukotina je > 5 mm. Pukotine su zaglinjene ili ispunjene sitnim fragmentima osnovne stijene, te bez ispune. Moguće su kaverne. Ova zona lako prihvaća (navlači), ali i otpušta vodu. RQD = 20 %, GSI = 37.

## 3. OPIS METODA

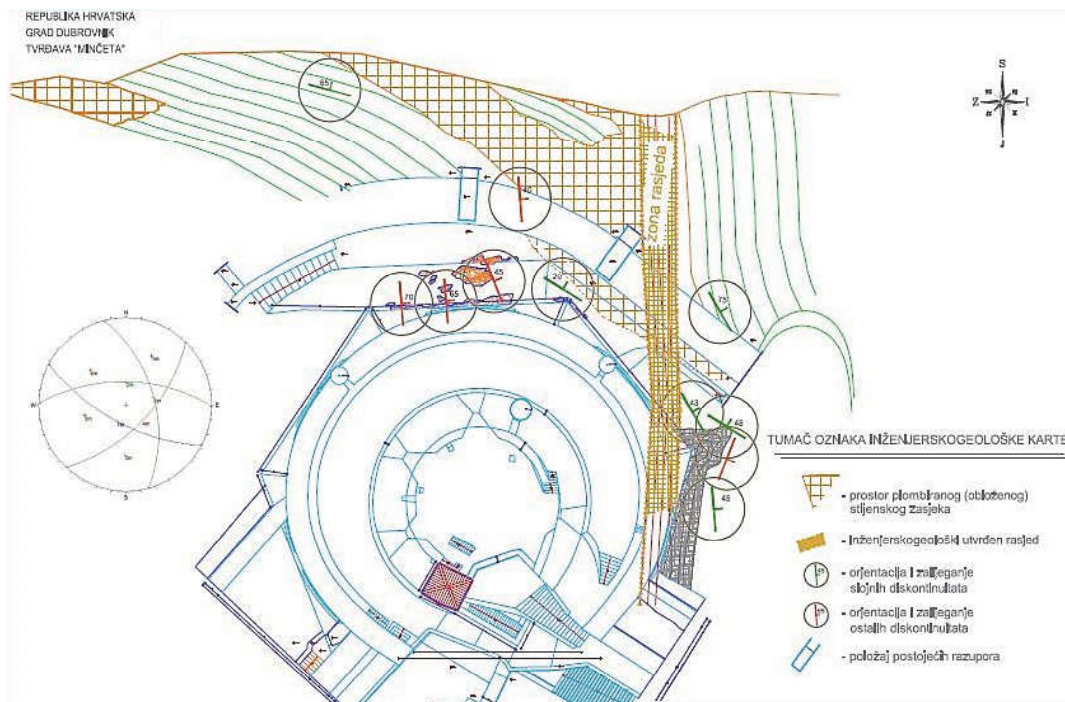
### 3.1. Geoelektrična tomografija (ERT - electrical resistivity tomography)

Po samom vrhu sjevernog i sjeveroistočnog zida kule Minčeta u Wennerovom mjernom rasporedu postavile su se 24 elektrode u ravnoj liniji profila ([sl. 6](#)). Preklopnik geoelektričnog uređaja za mjerenje automatizirano prebacuje raspored strujnih (AB) i potencijalnih (MN) elektroda. Mjeri se jakost struje između strujnih elektroda pa se iz razlike potencijala između potencijalnih elektroda, pomoću konstante geometrijskih odnosa elektroda (za Wenner PRF –  $K=2\pi CC/3$ ), određuje prividna otpornost. Interpretacijom se određuju debljine i specifični električni otpor pojedinih geoelektričnih sredina. Polovište elektroda A i B nalazi se na udaljenosti X od početka geoelektričnog profila. Pri mjerenju udaljenost elektroda iznosi trećinu udaljenosti AB.

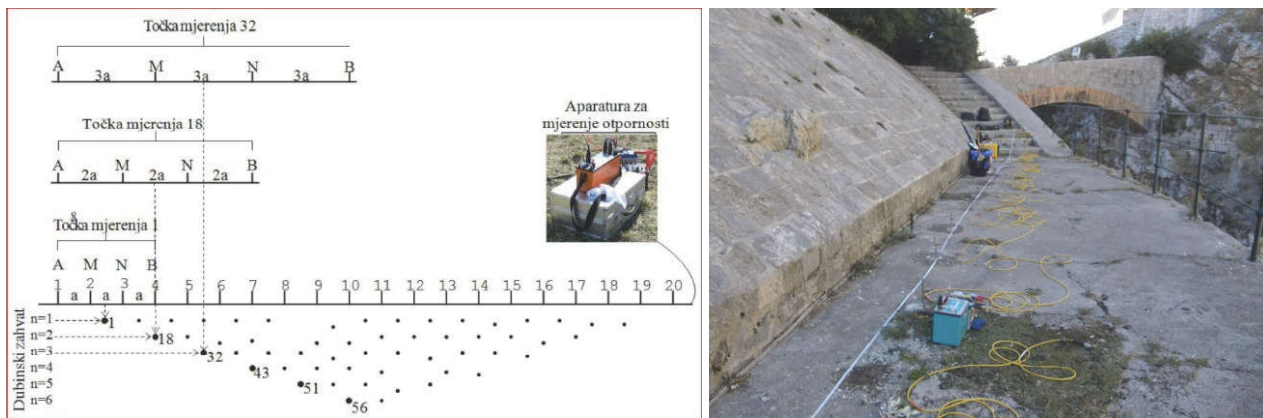


Tablica 1. Vrijednosti (bodovi) geološkog indeksa čvrstoće, GSI za stijenu podloge, trošnu stijenu podloge i za rasjednu zonu (izračunato prema Hoeku; GSI = RMR89 – 5).

Kula Minčeta	Stijena podloge			Trošna podloga	Rasjedna zona
	SS1,2	OR	OB		
JEDNOOSNA TLAČNA ČVRSTOĆA	9	7-8	7-8	6	6
INDEKS KVALITETE JEZGRE (RQD)	16	14-16	15	14	5
RAZMAK DISKONTINUITETA	8-11	8-11	7-8	7-8	6
STANJE PODZEMNE VODE	15	15	15	15	15
UKUPNO STANJE STIJEJSKE MASE	48-51	44-50	44-46	42-43	32
STANJE DISKONTINUITETA					
DUŽINA DISKONTINUITETA	4	6	6	4	6
ZIJEV	0	1	1	0	0
HRAPAVOST	3	3	3	3	1
ISPUNA	6	6	4	4	2
RASTROŠENOST	3-5	3-5	3-5	3	1
UKUPNO STANJE DISKONTINUITETA	16-18	19-21	17-19	14	10
SVEUKUPNO	64-69	63-71	61-65	56-57	42
Za GSI	-5	-5	-5	-5	-5
GSI	59-64	58-66	56-60	51-52	37



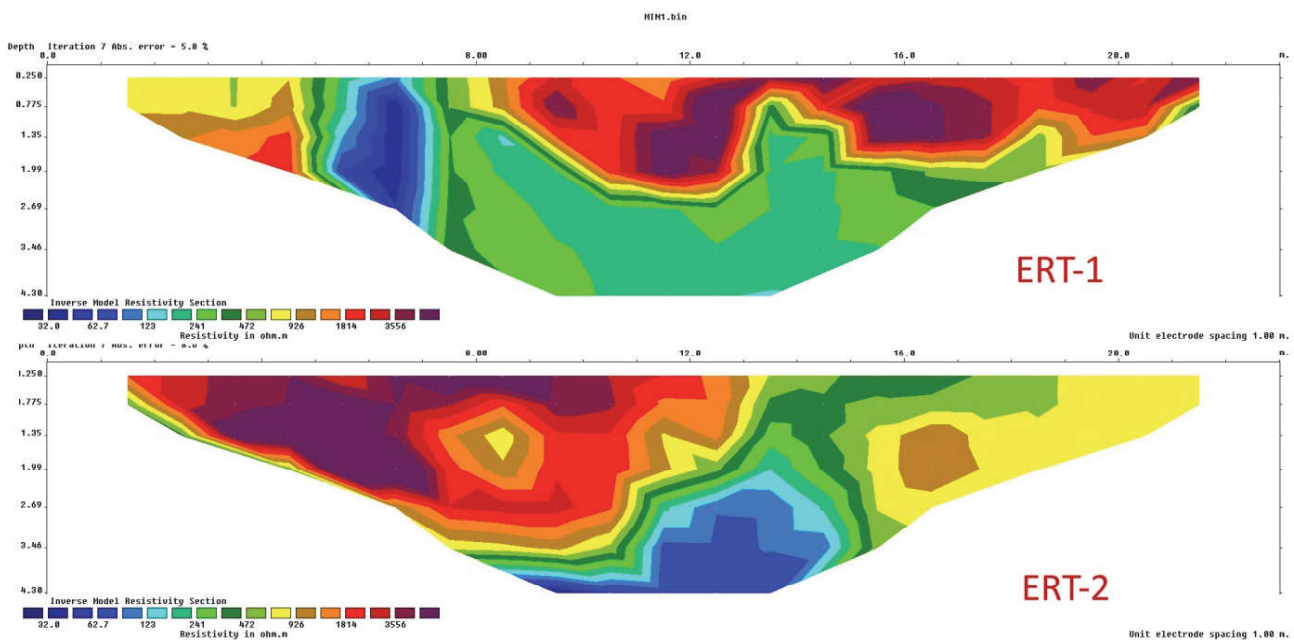
Slika 5. Inženjersko-geološka karta tvrđave „Minčeta“.



Slika 6. Profil geoelektrične tomografije - Wennerov mjerni raspored.

Tablica 2. Kategorije tla prema električnim otpornostima za Tvrđavu Minčeta, Dubrovnik.

ELEKTRIČNA OTPORNOST	KLASIFIKACIJA TLA		
< 150 $\Omega$ m	<u>zavodnjeni dio stijenske mase</u> ( <u>rasjedna zona</u> )		
250 - 1800 $\Omega$ m	<u>stijena podloge</u> (manja otpornost > veća trošnost)		
> 1800 $\Omega$ m	<u>dezintegrirana, okršena stijena podloge</u>		



**Slika 7. Rezultati geoelektrične tomografije u profilu ERT-1 i ERT-2.**  
Izmjerene otpornosti na profilu nalaze se u rasponu od 32  $\Omega$  do 10 000  $\Omega$ m.

Prednosti geoelektričnog profiliranja (geoelektrična tomografija):

- nije potrebno razmicanje elektroda sukladno položaju u profilu,
- mjerni raspored se u profilu pozicionira automatizirano.

Interpretirani rezultati prikazuju se kao grafički prikaz profila otpornosti po dubini. Profil se može prikazati u boji ili u crno-bijelome prikazu, gdje različite šrafure prema legendi prikazuju zone različitih otpornosti. Trapezni oblik grafičkog prikaza, jer se s udaljenošću od središta profila smanjuje dubina interpretacije, posljedica je postepenog smanjivanja mjernih podataka kako se razmak strujnih i potencijalnih elektroda povećava. Ako su potrebni i podaci s krajeva profila, kompletan profil se može preseliti duž linije istraživanja, te se grafički prikazi nastavljaju jedan na drugi. Geoelektrična tomografija sve se više koristi kao metoda za istraživanje zona sa složenom geologijom gdje metoda vertikalnog geoelektričnog sondiranja (VES), kao i druge geofizičke metode ne daju dovoljno kvalitetne rezultate.

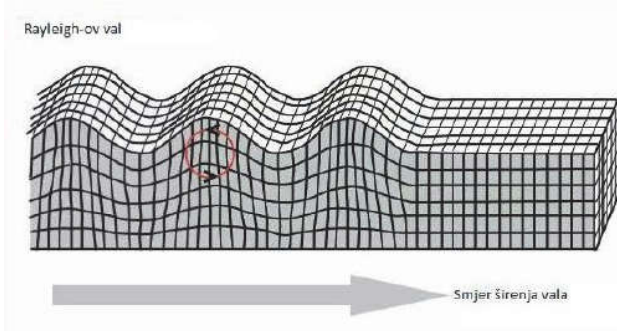
Inženjerskogeološke sredine interpretirane su na geoelektričnim profilima ERT-1 i ERT-2 (sl. 7). Koristila se geoelektrična tomografija u dvodimenzionalnom (2D) prostoru. Metoda daje dobre rezultate u krškim terenima, prema [Novoselu \(1980\)](#), klasificirana je karbonatna stijena.

### 3.2. Seizmička istraživanja

#### 3.2.1. Višekanalna analiza površinskih valova (MASW)

Višekanalna analiza površinskih valova (MASW - Multi-Channel Analysis of Surface Waves) omogućava određivanje brzine posmičnih valova podpovršinskih materijala. Pri utvrđivanju dinamičkih svojstava tla ( $V_s$ ,  $V_{s,30}$ ), korištena je MASW metoda. Seizmički valovi se u beskonačnom, homogenom i izotropnom mediju šire kao P i S prostorni valovi. S približavanjem granici polu-beskonačnog prostora ti se valovi transformiraju u površinske valove. Za generiranje seizmičkih valova na površini koristili smo vertikalni izvor - pad utega (drop-weight), koji

generiraju površinske Rayleighove (R) valove koji u najvećoj mjeri preuzimaju seizmičku energiju izvora (R valovi: 67%; S valovi: 26%; P valovi: 7%).



Slika 8. Širenje Rayleighovog vala.

Složeni oblik Rayleighovih valova sastoji se od longitudinalnog i transverzalnog gibanja s međusobnim pomakom u fazi. Materijalna čestica prelazi eliptičku putanju kojoj je velika poluos vertikalna kada je val blizu površine. R valovi često se nazivaju i valjanje tla (eng. ground roll, sl. 8.). Najvažnije svojstvo R valova je frekventna disperzija. Valovi niže frekvencije, pa prema tome veće valne duljine, šire se dublje u medij nego valovi visoke frekvencije, odnosno male valne duljine. Brzina širenja vala pri pojedinoj frekvenciji naziva se fazna brzina, a krivulja koja prikazuje faznu brzinu u ovisnosti o frekvenciji naziva se krivulja fazne brzine ili disperzijska krivulja. Prostorni P i S valovi nemaju disperzivno svojstvo. Pojava više faznih brzina na određenoj frekvenciji naziva se višesmodalna disperzija. U ovom slučaju najsporiji mod naziva se osnovni (M0), a sljedeći s većom brzinom prvi viši mod (M1), itd. Fazna brzina širenja Rayleighovih valova ( $V_r$ ) prvenstveno ovisi o brzini posmičnih valova ( $V_s$ ). Izraz koji pokazuje

odnos između brzine posmičnih valova ( $V_s$ ) i brzine Rayleighovih valova ( $V_r$ ) je sljedeći:

$$V_s = P V_r,$$

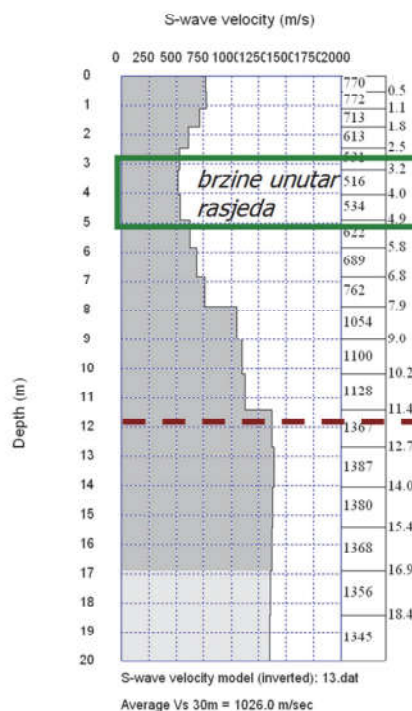
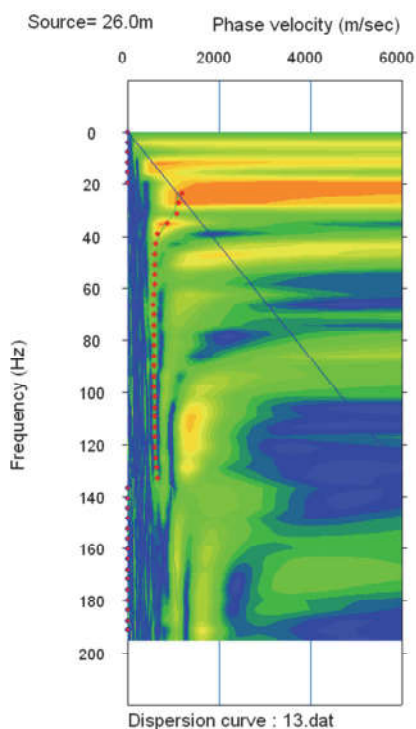
gdje je P konstanta ovisna o Poissonovom koeficijentu ( $\nu$ ) (primjerice  $P = 1.09$  za  $\nu = 0.25$ ).

### 3.2.2. "Downhole" seizmičko mjerenje na pokosu obloženog usjeka.

"Downhole" je tehnika kod koje se izvor vala nalazi na površini, a osjetilo oscilacija (geofon) u bušotini.

Cilj je precizno izmjeriti vrijeme potrebno da valovi P ili S prijeđu put od izvora na površini do geofona, a brzina se potom dobije kao kvocijent poznatog puta s izmjerenim vremenom. Mjerenja se uobičajeno izvode intervalnim pomicanjem geofona od dna prema ušću bušotine.

Ova metoda je za potrebe istraživanja modificirana tako da smo pokos zidina (zapravo obloženi usjek) tretirali kao bušotinu, a geofon smo pomicali po rubu pokosa do dna usjeka. Prilikom mjerenja na ovaj način geofon mora biti čvrsto priljubljen uz stjenku zida pokosa. Kako bi prilagodili sustav za mjerenje načinjene su „sanjke“ koje su klizile po pokosu, dodatno su bile opterećene vrećama pijeska da bi se postiglo što bolje prljanjanje uz stjenku pokosa. Prednost ove metode je u mogućnosti dobivanja intervalnih brzina u relativno tankim proslojcima u odnosu na refrakcijsku seizmiku (sl. 11. i sl. 12.). Druga prednost je što se može uočiti inverzni raspored seizmičkih brzina s dubinom ( $V_1 > V_2$ ). Programiranjem intervala ispitivanja mogu se direktno utvrditi tzv. slijepe zone, a posredno se može provjeriti i rezultate refrakcijskih istraživanja.



Rasip seizmičkih brzina posmičnih valova u širokim je granicama na prostoru temeljne stijene usjeka.

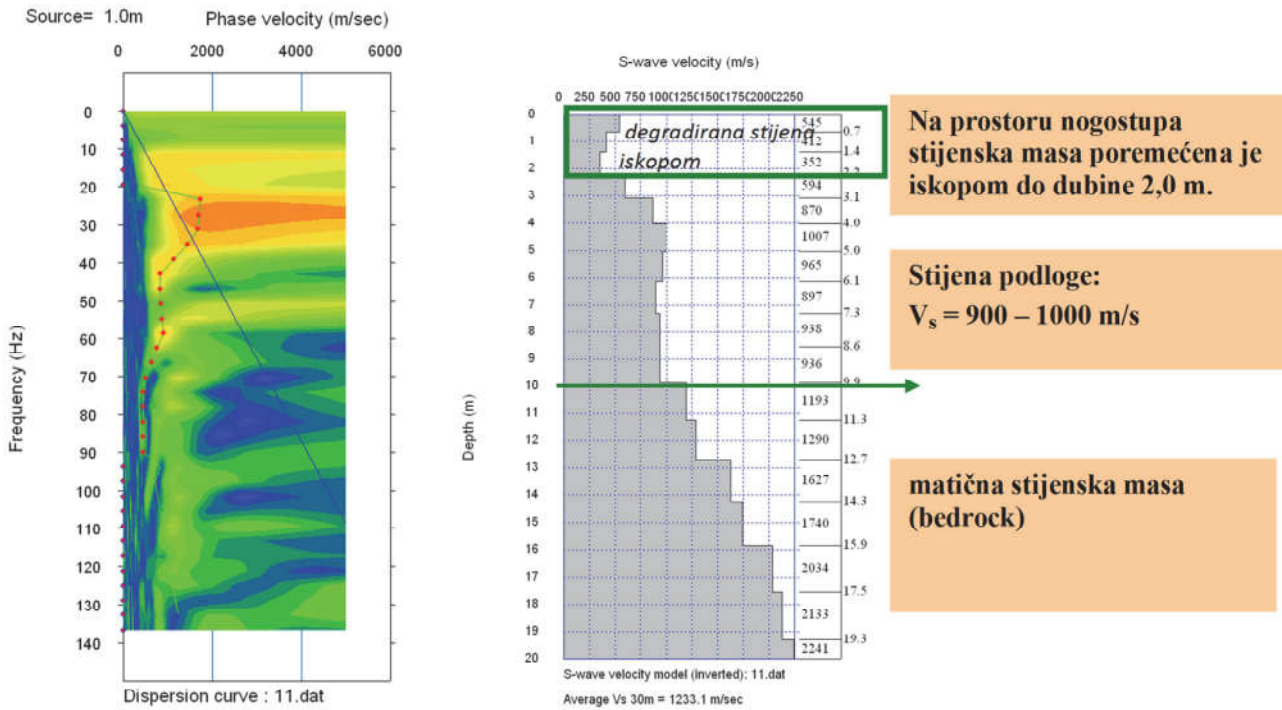
$V_s = 500 - 1100$  m/s

- na dispozitivu profila utvrđeno je rasjedanje stjenke mase

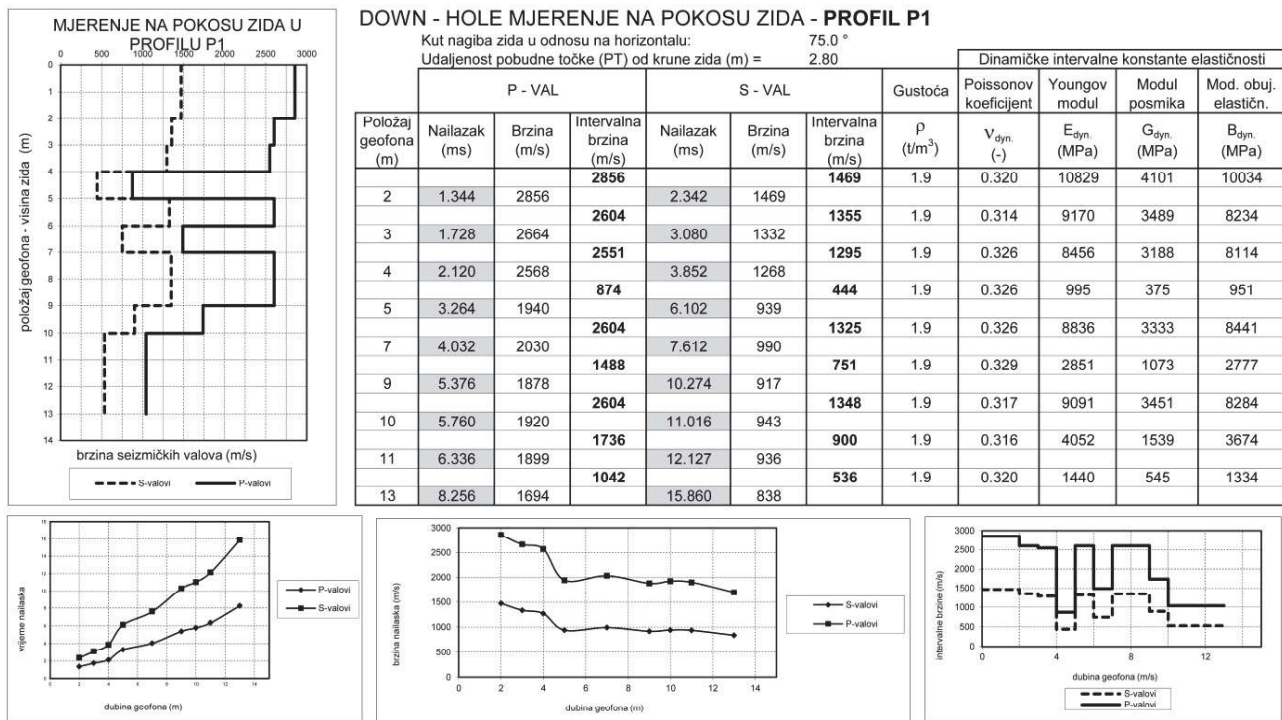
dubina usjeka  $h = 12,0$  m (stijenska masa dublje od kote usijecanja ujednačenih je karakteristika)

Slika 9. MASW – 2, interpretacija snimljenih seizmičkih profila.

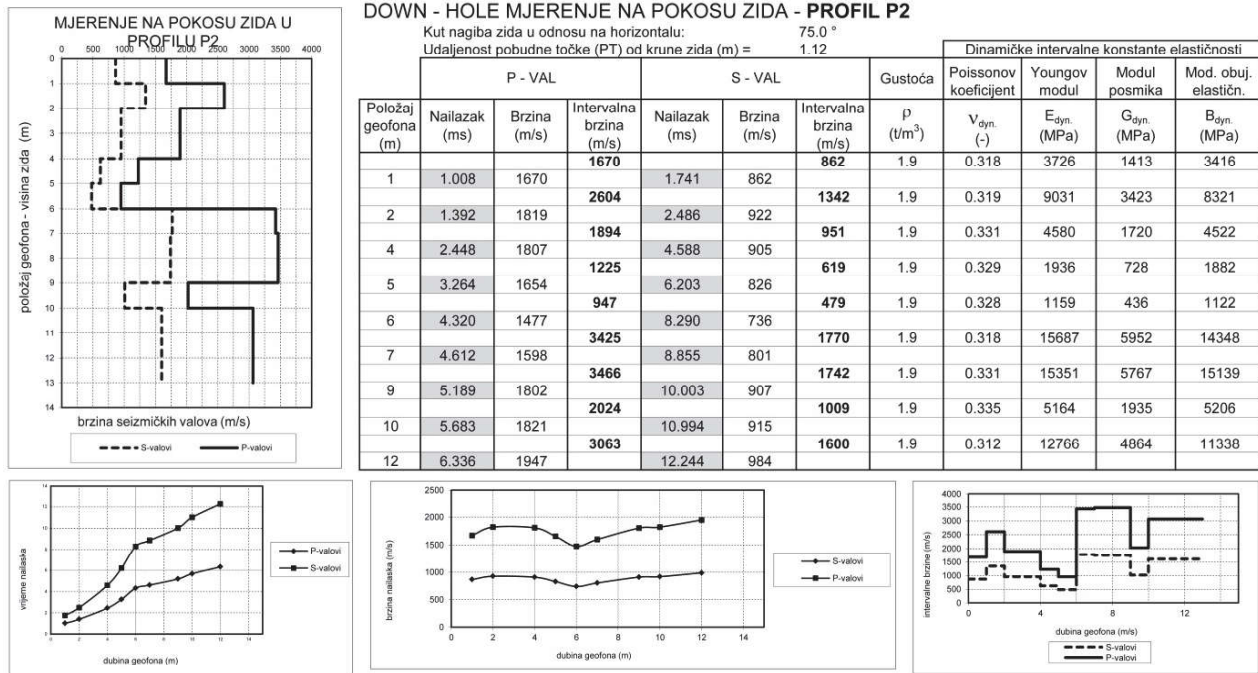




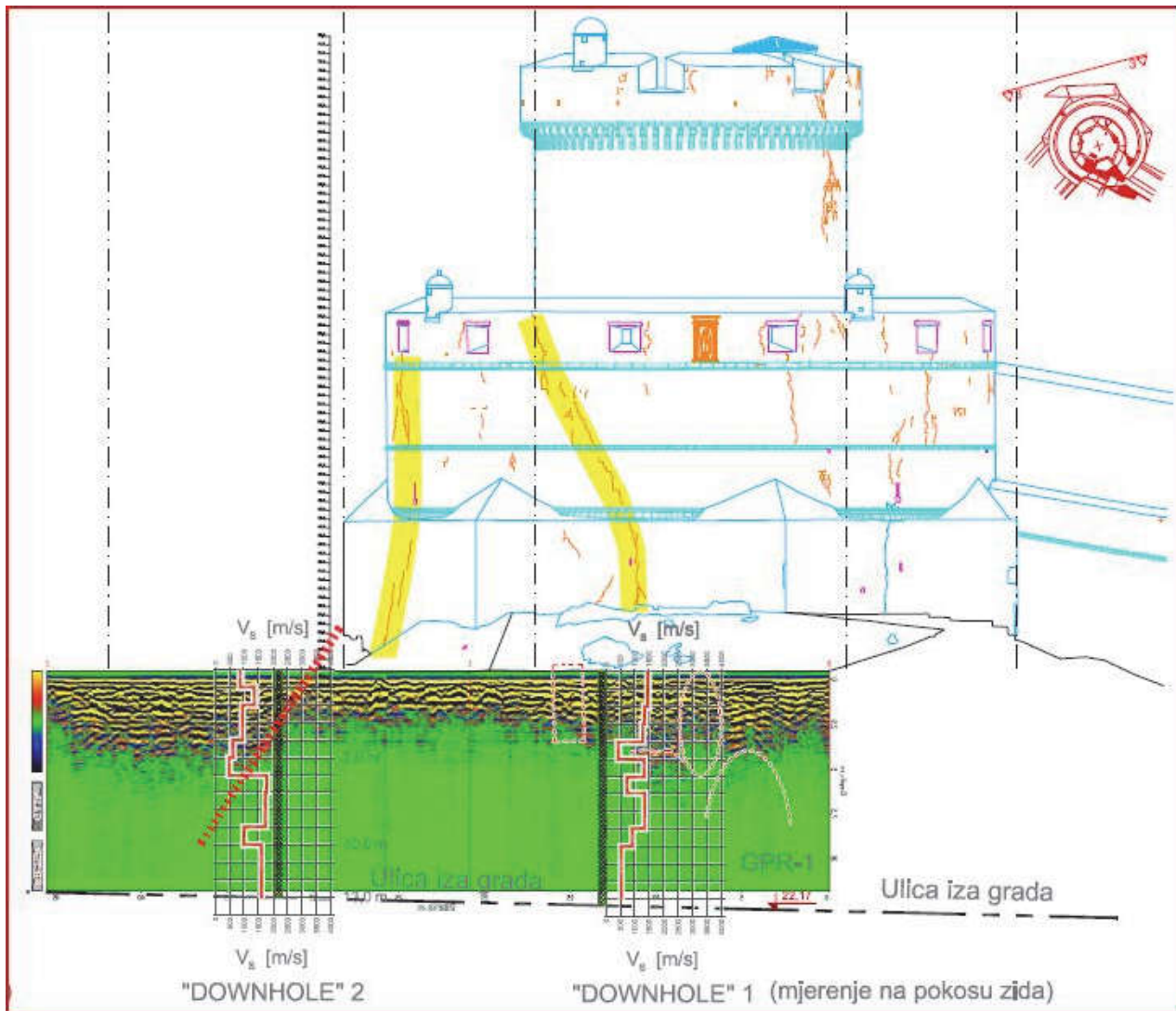
Slika 10. MASW - 3 Interpretacija snimljenih seizmičkih profila.



Slika 11. Rezultati brzina  $V_P$  i  $V_S$  seizmičkih valova iz "downhole" snimaka na pokosu usjeka-profil P1.



Slika 12. Rezultati brzina  $V_P$  i  $V_S$  seizmičkih valova iz "downhole" snimaka na pokosu usjeka-profil P2.



Slika 13. Prikaz geofizičkih profila Downhole 1 i Downhole 2 preko GPR radiograma.



#### 4. ZAKLJUČAK

Provedena je geotehnička karakterizacija temeljne stijenske mase na kojoj se temelji Tvrđava Minčeta. Osnovna stijena je inženjerskogeološki kartirana, a fizikalno-mehanička svojstva izdvojenih jedinica određena su geofizičkim istraživanjima. Rezultati geofizičkih istraživanja preklapljeni su na kompozitnim geofizičkim profilima radi detaljne interpretacije utvrđenih anomalija temeljne stijene.

Raspored istraživanja ostvaren je postavljanjem geofizičkih profila na dostupnim platoima neposredno uz temelje kule (kota +35,44), seizmičkim mjerenjima na zidu usjeka uz ulicu „Iza Grada“ te konačno u razini same ulice na koti +22,80.

Rezultati geofizičkih istraživanja ukazali su na dvije zone s identificiranim anomalijama. Prva zona poklapa se sa inženjerskogeološki determiniranom rasjednom zonom, dok druga zona otkriva značajnije pukotine i kavernozone forme na prostoru prve razupore. Za izrađene kompozitne geofizičke profile vidljiva je dosljednost geofizičkih rezultata različitih metoda u identifikaciji anomalija, koje se poklapaju s inženjerskogeološkim elementima. Na navedenim profilima (sl. 13), posebno su istaknuta oštećenja u formi grupe pukotina prethodno geodetski snimljenih na samoj tvrđavi. Smjer pukotina položajno odgovara prostorima utvrđenih anomalija u temeljnom tlu.

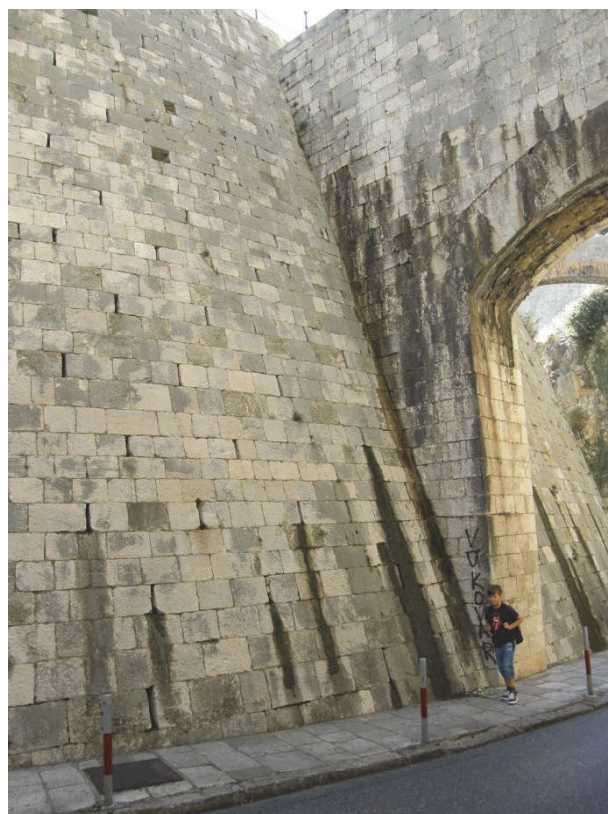
Kvaliteta stijenske mase unutar rasjeda bitno je lošijih mehaničkih karakteristika u odnosu na neoštećenu stijenu podloge. U gornjoj zoni trošenja prisutno je jače okršavanje te se mogu očekivati i široke pukotine i kavernozone forme. Najjače dezintegrirana stijenska masa je uz rasjedni kontakt, koji je dijagonalni na smjer obilazne ulice (Ulica pod gradom), oko kule Minčeta.

Iskopom usjeka za potrebe izgradnje ulice „Iza Grada“ došlo je do preraspodjele prirodnih naprezanja u stijenskoj masi koja su prouzročila pomake na geološki najslabijem elementu, prisutnom rasjedu u sklopu utvrđene sinklinale. Ostvareni pomaci dovoljnih su iznosa da prouzroče oštećenja na građevini. Graditelji tog vremena uvidjeli su posljedice, te su problem rješavali izgradnjom razupora. Problem predisponiranih stijenskih diskontinuiteta je i vremensko trošenje unutar rasjeda uzrokovano radom vode. Na obje geofizički utvrđene anomalije zabilježena je prisutnost vode (plave nijanse boje na električnim profilima), također vizualno utvrđena na pokosu zida.

Rasjedna zona saturirana je vodom, u toj zoni postoji trošenje i ispiranje, a navedeni proces dovoljno je progresivan tako da za niz godina dolazi do mehaničke destabilizacije, te se pojavljuju pukotine na objektu, a postojeće se proširuju.

Važno obilježje daje rasjed pružanja (sjever-jug) koji prolazi ispod kule Minčeta na istočnom dijelu kule. Na sjecištima tog rasjeda i usjeka ceste vidljive su mikro bore, zalijeganje slojeva i pukotina, te rasjedna rastrošena zona. Dio rasjedne zone na zidu usjeka je zaštićen (plombiran) i sam kontakt nije vidljiv. Temeljem dobivenih ulaznih parametara (GSI klasifikacija) za trošnu stijenu, stijenu podloge i rasjednu zonu može se zaključiti da dvije kategorije pripadaju povoljnoj stijenskoj masi, a stijena u rasjednoj zoni pripada slaboj kategoriji.

Na temelju prikupljenih i statistički obrađenih podataka može se zaključiti da globalna stabilnost temelja Kule Minčeta može biti upitna u slučaju djelovanja potresa, što treba računski provjeriti, Novosel et al. (1980). Naime, potrebno je provjeriti stabilnost temeljene stijene za slučaj potresa, uz moguću pojavu klizne plohe koja se pruža od ruba ceste do unutrašnjeg hodnika u najdonjoj etaži tvrđave. Postojeća rasjedna zona u širini od 4-5 m već je prilikom građenja kule bila okarakterizirana kao slaba, jer je posebno ograđena i zaštićena kamenim blokovima, a statički je poduprta kontraforima koji su razuprli usjek (Ulica Iza Grada). Upitno je da li su ove razupore dovoljne za preuzimanje sila od bočnog potiska stijenske mase ispod temelja tvrđave u slučaju potresa. Tvrđnju je potrebno računski provjeriti. Područje rasjedne zone s vremenom prihvaća vodu s površine i otpušta vodu duž rasjeda, što je vidljivo i na slikama – procjeđivanje vode u usjeku ulice (sl. 14). Voda ispire glinovitu ispunu i sitnije fragmente uz rasjed, te s vremenom dolazi do slijeganja terena što se reflektira i na zid tvrđave.

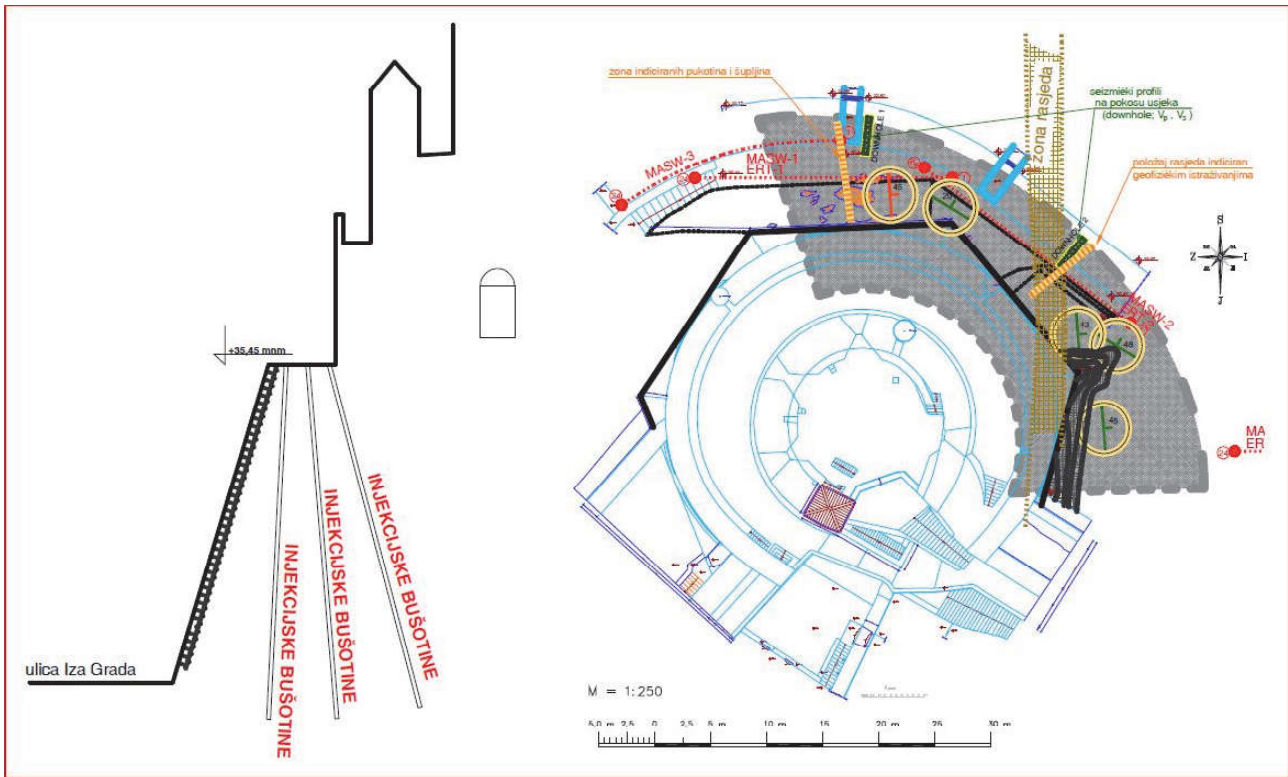


Slika 14. Procjeđivanje vode po pokosu zidina kule Minčeta.

#### 4.1. Preporuke za sanaciju

Preporučuje se injektiranje rasjedne zone kako bi se zaštitila građevina tvrđave od daljnje degradacije. Za sanaciju preporučuje se višeredno injektiranje u "cik-cak" rasporedu. Položaj injekcijske zavjese trebao bi biti okomit na smjer rasjeda (uz sam zid kule) dubine barem 1 m ispod kote Ulice Iza Grada (+22,00). Injektiranje treba provesti vertikalno s platoa +35,44 uz same zidove tvrđave, s bušotinama u tri reda te inklinacijama (sl. 15). Područje koje je potrebno sanirati osjenčano je na situacijskom planu

(sl. 15). Predložena sanacijska mjera odnosi se prvenstveno na sprječavanje daljnje degradacije stijenske mase zbog utjecaja atmosferilija. Problematika stabilnosti i sigurnosti stijenske mase pri djelovanju potresa nije predmet ovog istraživanja.



Slika 15. Profil Tvrđave Minčeta i prijedlog inklinacije injeckijskih bušotina i položajna skica s područjem nestabilnog dijela temelja (sivo).

## 5. Literatura

ISRM (1978): Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Commission on standardization of laboratory and field tests. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., vol 15, 319-368. Pergamon Press Ltd. London.

MIKLIN, Ž., S., STRELEC, K., GRABAR, T., NOVOSEL, (2015): Sanacija tvrđave „Minčeta“ Rehabilitation of the fortress “Minčeta”. 5. hrvatski geološki kongres s međunarodnim sudjelovanjem. Knjiga sažetaka – Abstract Book. 175-176. Osijek 23-25. rujna 2015. Hrvatska

NOVOSEL, T., TUŠAR, Z., MULABDIĆ M., GARAŠIĆ, M., KORAŽOJA, S. (1980): Ocjena stabilnosti kosina u zasjecima (usjecima) građenih od karbonatnih stijena. Saopćenja 5. simpozija Jugoslavenskog društva za mehaniku stijena i podzemne radove, Split, Knjiga 1, (185-192).

STRELEC, S., MIKLIN, Ž., GRABAR, K., ŠPIRANEC, M., PAŽUR, I. (2013): Izvješće o provedenim geotehničkim i geofizičkim istraživanjima temeljnog tla tvrđave "Minčeta" u Dubrovniku. 29 str., 8 priloga, 19 slika, 7 tablica. SPP d.o.o. Trstenjakova 3, Varaždin.

F. ŠUMANOVAC (2008): Geofizička istraživanja podzemnih voda. Sveučilišni udžbenik. Zagreb 2007.