

# Ispitivanje probnih pilota na gradilištu putničke luke Dubrovnik

Ivo Barbalić, Branimir Galjan, Matija Bandić, Krešo Ivandić

## Ključne riječi

putnička luka Dubrovnik,  
luka Gruž,  
probni piloti,  
stijenska masa,  
gradilište,  
nosivost pilota

## Key words

Dubrovnik passenger port,  
Gruž port,  
test piles,  
rock mass,  
construction site,  
pile capacity

## Mots clés

port passagers à  
Dubrovnik,  
port de Gruž,  
pieux d'essai,  
masse rocheuse,  
chantier de construction,  
capacité portante des pieux

## Ключевые слова

пассажирский порт  
Дубровник,  
порт Груж,  
пробные сваи,  
горная порода,  
стройка, несущая  
способность свай

## Schlüsselworte

Passagierhafen  
Dubrovnik,  
Hafen Gruž,  
Probepfähle,  
Gesteinsmassiv,  
Baustelle,  
Pfalhtragfähigkeit

I. Barbalić, B. Galjan, M. Bandić, K. Ivandić

Stručni rad

## Ispitivanje probnih pilota na gradilištu putničke luke Dubrovnik

Opisano je ispitivanje probnih pilota izvedenih na stijenskoj masi u luci Gruž. Istaknuto je da se ta ispitivanja zbog skupoće rijetko izvode. Prikazani su rezultati geoloških i geotehničkih istraživanja. Dan je pregled prethodnih ispitivanja i svih potrebnih čimbenika vezanih uz ocjenu kvalitete izvedenih pilota. Na temelju dobivenih rezultata dana je procjena nosivosti. Prikazani su i analizirani rezultati ispitivanja probnih pilota na zadano uzdužno i poprečno opterećenje.

I. Barbalić, B. Galjan, M. Bandić, K. Ivandić

Professional paper

## Pile testing at the Dubrovnik passenger port construction site

The pile testing was conducted for piles realized in the rock mass in the Port of Gruž. It is emphasized that these tests are realized quite seldom, principally due to the high cost of such testing. Geological and geotechnical survey results are presented. A survey of preliminary tests, with all factors relevant for estimating quality of realized piles, is presented. Results of this pile testing operation, which involved longitudinal and transverse loading of test piles, are presented and analyzed.

I. Barbalić, B. Galjan, M. Bandić, K. Ivandić

Ouvrage professionnel

## L'essai des pieux sur le chantier du port passagers à Dubrovnik

Les essais des pieux ont été conduits pour les pieux réalisés dans la masse rocheuse dans le port de Gruž. Il est souligné que ces essais sont réalisés très rarement à cause de prix très élevé de ces essais. Les résultats des analyses géologiques et géotechniques sont présentés. Un aperçu sommaire des essais préliminaires, avec tous les facteurs importants pour estimation de la qualité des pieux réalisés, est également présenté. Les résultats de cette campagne d'essais, au cours de laquelle la capacité portante longitudinale et transversale à été étudiée, sont présentés et analysés.

И. Барбалич, Б. Гальян, М. Бандич, К. Ивандич

Отраслевая работа

## Испытание пробных свай на стройке пассажирского порта Дубровник

В работе описано испытание пробных свай, возведённых на горной породе порта Груж. Подчёркнуто, что испытания такого типа, благодаря большой дороговизне, выполняются редко. Показаны результаты геологических и геотехнических испытаний. Дан обзор предварительных испытаний и всех необходимых факторов, связанных с оценкой качества выполненных свай. На основании полученных результатов дана оценка несущей способности. Показаны и анализированы результаты испытания пробных свай на заданную продольную и поперечную нагрузку.

I. Barbalić, B. Galjan, M. Bandić, K. Ivandić

Fachbericht

## Untersuchung der Probepfähle an der Baustelle des Passagierhafens Dubrovnik

Beschrieben ist die Untersuchung der Probepfähle die am Gesteinsmassiv im Hafen Gruž hergestellt sind. Es ist hervorgehoben dass solche Untersuchungen wegen der hohen Kosten selten ausgeführt werden. Dargestellt sind die Ergebnisse der geologischen und bodentechnischen Untersuchungen. Vorgelegt ist ein Überblick der vorherigen Untersuchungen und aller notwendigen Faktoren im Zusammenhang mit der Qualitätsbewertung der ausgeführten Pfähle. Auf Grund der erhaltenen Ergebnisse ergab sich die Abschätzung der Tragfähigkeit. Dargestellt und analysiert sind die Ergebnisse der Untersuchung der Probepfähle betreff der aufgegebenen Längs- und Querbelastung.

Autori: **Ivo Barbalić**, dipl. ing. građ., Institut građevinarstva Hrvatske, PC Split; **Branimir Galjan**, dipl. ing. građ.; **Matija Bandić**, dipl. ing. građ., Investinženjering d.o.o., Zagreb; dr. sc. **Krešo Ivandić**, dipl. ing. građ., Sveučilište u Zagreb, Geotehnički fakultet u Varaždinu

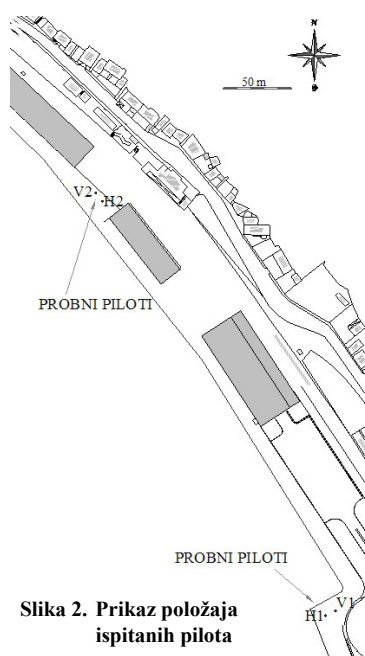
## 1 Uvod

Putnička luka u Dubrovniku smještena je na sjeverozapadnoj strani Gruškog zaljeva i ponajprije služi za prihvatanje putničkih brodova i lokalnoga trajektnog prometa (slika 1.). Studija o razvoju putničke luke u Dubrovniku dokazala je da postojeće dionice operativne obale više ne udovoljavaju sve većem prometu i razvojnim potrebama pa se nametnula potreba za rekonstrukcijom i dogradnjom operativne obale.



Slika 1. Situacija Gruške luke

Tehničko rješenje radova dogradnje dijela nove operativne obale (vezovi 10-15) u duljini od 635 m sastoji se od izgradnje nove obalne konstrukcije upete u stijenu preko armiranobetonskih bušenih pilota promjera 1500 mm, s proširenjem na 1800 mm u matičnoj stijeni (vapnenac i dolomit).



Slika 2. Prikaz položaja ispitanih pilota

U ponudbenoj projektnoj dokumentaciji propisano je obvezatno statičko testiranje probnih pilota na vertikalnu i horizontalnu silu prema normi DIN 1054. Na temelju toga u srpnju 2006. ispitana su po dva pilota na posebno odabranim mjestima na obali (slika 2.). Svrha je ispitivanja bila potvrda projektnih postavki ponašanja pilota na zadanu uzdužnu silu od 15 MN i poprečnu silu od 1,5 MN. Poprečno se opterećenje na

pilote inače očekuje u slučaju potresa i udara broda.

U glavnom je projektu [1] uzdužna nosivost pilota proračunana samo na trenje po plaštu i to na dijelu kroz sti-

jenu duljine 4,5 m. Nosivost stope pilota nije se uzimala u obzir.

U ovom su radu prikazana i prethodna ispitivanja na temelju kojih je izrađen projekt temeljenja, svi čimbenici koji su mogli utjecati na provedbu ispitivanja i sama ispitivanja, a prikazana je i kratka analiza dobivenih rezultata. Budući da se radi o ispitivanjima koja se vrlo rijetko provode, a rezultati mogu znatno utjecati na tijek projekta, smatrali smo da bi bilo dobro prikazati skupljene podatke koji se mogu iskoristiti u planiranju nekih sličnih projekata.

## 2 Geotehnički i geofizički istražni radovi

U okviru geomehaničkih istražnih radova izvedeno je 36 sondažnih bušotina na kopnu i moru ukupne duljine 500 m.

Bušenje na moru izvedeno je s plovila na koji je prethodno postavljena platforma za nesmetano obavljanje radova bušenja. Za bušotine izvedene na moru dubina mora na ušću bušotina bila je od 5,52 m do 14,05 m.

Istražne izvedene bušotine bile su promjenjivih dubina, od 4 m do 27,50 m. Sve su bušotine završavale, ovisno o kvaliteti vapnenačko-dolomitnih stijena, 3 m nakon ulaska u stijenu, a najmanje na 1,90 m. Izbušena je jezgra pregledana (identificirana) na licu mjesta i klasificirana terenskom AC (*airfield clasification*) i inženjersko-geološkom klasifikacijom.

Geofizička istraživanja, kao dio geotehničkih istraživanja, sastojala su se od refrakcijskih seizmičkih ispitivanja u moru, površinskih GPR (*ground penetrating radar*) mjerenja, gama i gama-gama mjerenja po dubini bušotine te *downhole* i *crosshole* mjerenja brzine *P* seizmičkog vala [2].

## 3 Geološke i geotehničke značajke lokacije

Prethodnim su geotehničkim istražnim radovima na lokaciji putničke luke utvrđena četiri osnovna sloja [2]. Sloj 1 klasificiran je kao nasip od kamene sitneži do komada stijena koji se rasprostire na dubinama u rasponu od 4,60 – 13,90 m. Taj sloj leži na recentnom morskom mulju (sloj 2) ili na karbonatnoj stijeni (sloj 4). Sloj 2 čini recentni morski mulj koji je promjenjiva sastava od pijeska do praha, sive do crne boje, žitkoga konzistentnog stanja. Sloj 3 je glina srednje do visoke plastičnosti, smeđe do crvenosmeđe boje, teško gnječivoga konzistentnog stanja, sa zabilježenim vrijednostima standardne penetracije od 6 – 19 udaraca. Sloj 4 čini karbonatna vapnenačka i dolomitna stijena, tektonski raspucala i okršena, mjestimično s pojavom širih pukotina i manjih kaverna te džepova zapunjenih glinom.

Geološkom determinacijom jezgre registrirane su vrijednosti raspucanosti stijene (RQD) u rasponu od 0 – 86 %.

Dobivene su sljedeće vrijednosti čvrstoće stijenske mase prema Hoek- Brownovu kriteriju u rastrošnijoj zoni: kut unutarnjeg trenja  $\varphi = 38^\circ$ , kohezija  $c = 21 \text{ kN/m}^2$  i brzina seizmičkog vala  $P = 2500 \div 3500 \text{ m/s}$ ; - u kompaktnijoj zoni stijenske mase:  $\varphi = 55^\circ$ ,  $c = 59 \text{ kN/m}^2$  i  $P = > 3500 \text{ m/s}$ . Laboratorijskim ispitivanjima uzoraka stijene dobivena je vrijednost jednoosne tlačne čvrstoće u raponu od 31-137, MPa dok je tangenti modul elastičnosti bio u rasponu od 52,87-60,9 GPa [1].

#### 4 Inženjersko-geološke karakteristike terena

Provedenim istražnim bušenjem potvrđena je stijenska podloga osnovnoga terena, izgrađena od karbonatnih naslaga gornjokrednog kata mastirhta, nad kojom je razvijen sediment predstavljen kvartarnim glinama i recentnim morskim muljem.

Bušenjem je ustanovljeno da razine pojave karbonatne stijene variraju. To potvrđuje razvedenost paleoreljeva odnosno slika o vrlo nepravilnoj gornjoj površini karbonatne podloge te o generalnom padu stijenske podloge u smjeru prema moru.

Vapnenci su gusti, mikroznate strukture, svijetlo sive do svijetlo smeđe boje. Dolomiti su zrnate strukture, tzv. "šećerasti" dolomiti, sivobijelo obojeni.

Stijena je tektonski raspucana i okršena, a mjestimice ima pojava širih pukotina i omanjih kaverna te džepova zapunjenih glinom. Jače raspucana stijenska masa registrirana je u zoni kontakta vapnenaca i dolomita.

Stanje raspucanosti stijenske mase izravno utječe na RQD (indeks kvalitete jezgre) stijenske mase, a koji se kreće u širokom rasponu od 0-30 % u razlomljenijim zonama, do mjestimice više od 75 % u kompaktnijim zonama stijene. Stijenke pukotina pretežno su korodiranih, hrapavih i glatkih površina, a prevučene su komponentom crvene boje od željeznog oksida.

Pukotine su različito položene i usmjerene u prostoru. Elemente njihova položaja vrlo se teško moglo ustanoviti na osnovi izbušene jezgre.

Nad stijenskom podlogom razvijen je nevezani pokrov, predstavljen kvartarnim ( $Q_2$ ) i novijim tvorevinama [1].

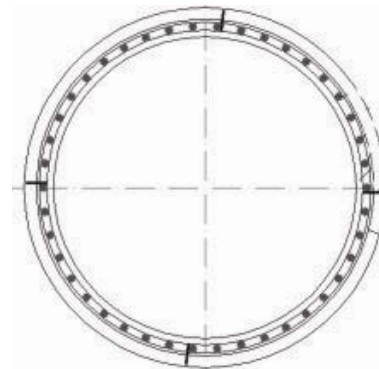
#### 5 Tehnologija izvedbe i geometrijski oblik pilota

Probni su piloti izvedeni garniturom tipa Bauer BG-36 koja je namijenjena rotacijskom bušenju uz upotrebu raznih tipova alata za vađenje materijala iz bušotine. Garnitura je opremljena i uređajem (lavirka) za rotaciju i potiskivanje radne kolone kroz koju se obavlja iskop. Radna je kolona vanjskog promjera  $\varnothing 1800 \text{ mm}$ , po obodu stope je nazubljena kako bi što lakše prodirala kroz tlo i u stijenu. Svaki je pilot projektiran da bude upet u stijeni u duljini od 4,5 m. Nakon završetka iskopa u bušotinu su ugrađivani armaturni koševi. Armaturni

koševi duljine 12 m izrađeni su na suhom, a tijekom ugradnje uzdužna se armatura nastavljala zavarima na preklap duljine 1,5 m. Nakon armaturnog koša postavljala se stalna zaštitna čelična kolona promjera 1514/1500 mm, koja služi kao oplata za beton, a ugrađena je do najmanje 0,50 m u matičnu stijenu. Potom se betoniralo od dna bušotine kontraktorskom cijevi, uz simultano izvlačenje radne kolone i skraćivanje kontraktorske cijevi. Naknadno su uklanjali nekvalitetni betoni u duljini od 0,6 do 1 m [3].

Probni piloti V-1 i H-1 izvedeni su ispod površine terena do dubine od 18,7 m, a piloti V-2 i H-2 do dubine 21,5 i 21,3 m.

Glavnu armaturu pilota čine 42 šipke rebraste armature promjera 32 mm jednoliko raspoređene po obodu pilota. Na svaka 2 m vertikalne duljine s unutrašnje strane pilota izvedeno je dodatno ukrućenje armaturom promjera 28 mm savinutom u kružnicu. Po obodu glavne armature izvedena je spiralna armatura na osnovu razmaku od 75 mm po cijeloj duljini pilota (slika 3).



Slika 3. Karakteristični poprečni presjek pilota s prikazom armature

#### 6 Svojstva betona za gradnju pilota

Projektirana marka betona za probne pilote bila je MB 45. Piloti su izgrađeni betonom sljedećeg sastava: cement CEM II/B-S 32.5R (Mađarska), aditivi Tecnos 95 (Italija) i Plastard 18 (Italija), agregat 0-16 mm (Ragusa-Dubac) i voda (gradski vodovod).

Obavljena su prethodna ispitivanja betona kojima je analizirana tlačna čvrstoća (od 50 MPa do 78,2 MPa), gustoća pri prirodnoj vlažnosti (od 2,3 do 2,4  $\text{kg/dm}^3$ ), modul elastičnosti (od 19,5 do 41 GPa), skupljanje betona (od 0,156 do 0,249 mm/m), ukupne deformacije uz ispitivanje puzanja (za uzorke stare 112 dana prosjek je 0,887 mm/m).

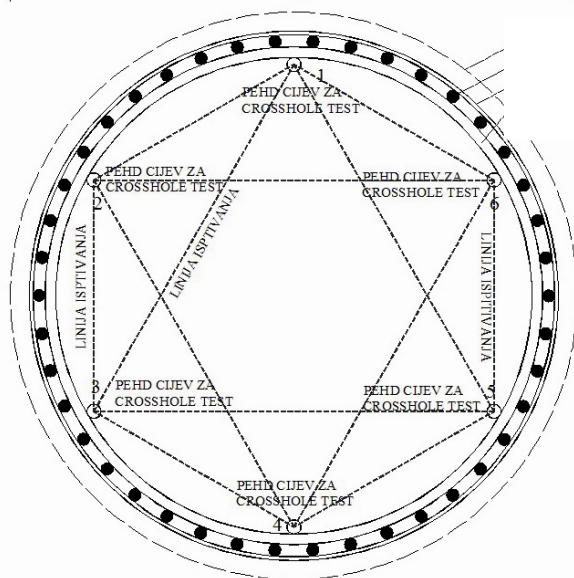
Nakon vertikalnih i horizontalnih statičkih opterećenja pilota, iz betonskog su tijela pilota izvađeni uzorci (valjci). Uzorci su se vadili do dubine -2 m od gornje ispitne plohe pilota. Iz tako dobivene jezgre betona uzeti su reprezentativni uzorci s raznih dubina. Na valjcima je

obavljeno ispitivanje tlačne čvrstoće betona. Ispitano je dvanaest uzoraka. Tlačne čvrstoće betona kretale su se od 50 MPa do 78,2 MPa, a objamska masa betona od 2,3 do 2,38 kg/dm<sup>3</sup> [4], [5].

## 7 Ispitivanja integriteta pilota

Integritet i homogenost pilota ispitani su metodom "Ultrasonic Crosshole", dok je integritet pilota ispitivan još i metodom "Low Strain Integrity" [6], [7] i [8].

*Crosshole test* ima za svrhu provjeriti homogenost i integritet dubokih temelja. Metoda se zasniva na određivanju vremena prolaska i relativne energije ultrazvučnog impulsa između paralelnih ispitnih cijevi (slika 4.) ugrađenih po duljini pilota i obično pričvršćenih na armaturni koš. Metoda nema za cilj odrediti vrstu i uzrok nepravilnosti u pilotu, već samo detektirati eventualno postojanje nepravilnosti. Limitiranost metode jest u tome da se rezultati ispitivanja odnose samo na prostor između cijevi s pomoću kojih se ispitivanje i provodi. Ta je metoda standardizirana i detaljno je opisana u literaturi [7].

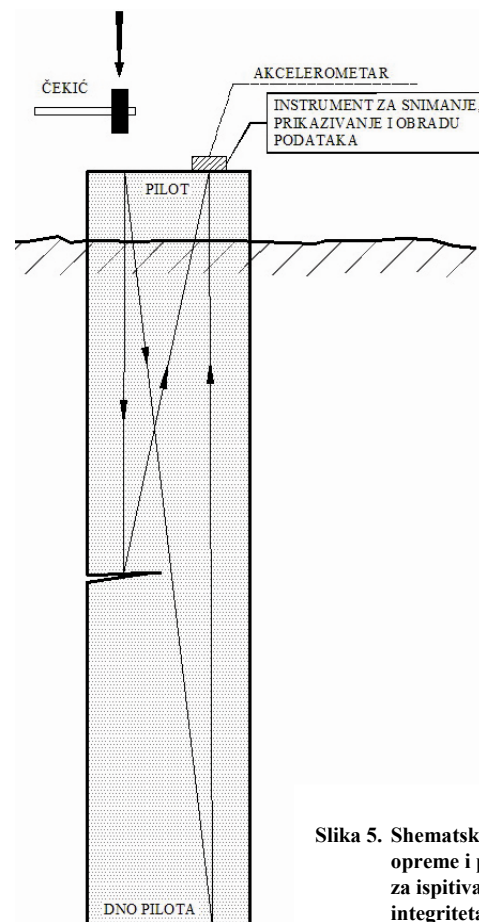


Slika 4. Tlocrtni prikaz smještaja ispitnih cijevi za ispitivanje integriteta u tijelu pilota

*Crosshole testom* ustanovljeno je da na probnim pilotima nema promjena koje bi bilo moguće definirati kao oštećenja ili prekid betoniranja. Pri betoniranju pilota H-1, koji se prvi izvodio, došlo je do drobljenja ispitnih cijevi koje su bile od PVC materijala, zbog čega se mjerenje integriteta u jednom profilu moglo provesti do najveće dubine od 14 m, a ostala su mjerenja obavljena znatno pliće, s najkraćim mjerenjem od 5 m. Poučeni tim iskustvom, u ostale su se probne pilote ugrađivale PEHD ispitne cijevi koje su se pokazale mnogo pouzdanije. Uočeno je da pilot V-1 ima manje lokalne promjene u

profilu 2-3 na dubini 16 -16,5 m, no da je homogen po preostaloj duljini. Uočena promjena u profilu 2-3 vjerojatno je posljedica lokalne promjene u kvaliteti ugrađenoga betona, a čini se da su položaj i veličina promjene u tijelu betona neznatni. Zaključeno je da su ispitani piloti kontinuirani, bez oštećenja i izvedeni od kvalitetnog betona.

Metoda *Low strain integrity test* služi za određivanje cjelovitosti pojedinačnoga vertikalnog ili kosog pilota mjerenjem i analizom brzine refleksije elastičnog vala uzrokovanog udarcem alata (čekića ili slične opreme) koji se zadaje duž osi pilota i okomito na glavu pilota (slika 8.). Udarac u glavu pilota stvara udarni tlačni val koji prolazi tijelom pilota i reflektira se od dna i vraća nazad prema glavi kao vlačni val. Oba se vala mogu registrirati na mjernome mjestu s pomoću akcelerometra i u normalnim se okolnostima mogu jasno prepoznati. Elastični se val reflektira od diskontinuiteta u pilotu, odnosno granica materijala različitih elastičnih svojstava. Refleksije elastičnih valova obično se javljaju na kontaktu stope pilota i temeljnog tla, na mjestu prekida kontinuiteta u tijelu pilota, promjene poprečnog presjeka te kod svake promjene u kvaliteti betona. Ova je metoda također standardizirana i opisana [6].

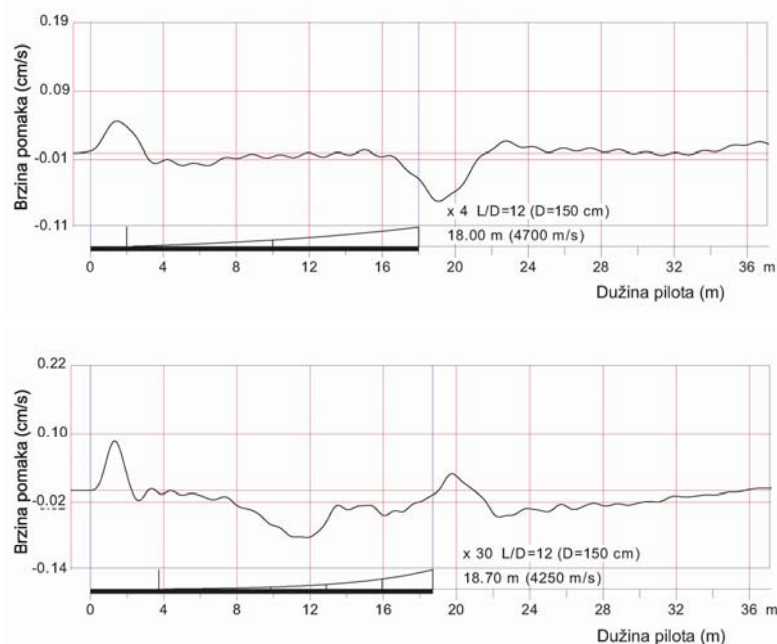


Slika 5. Shematski prikaz opreme i postupka za ispitivanje integriteta

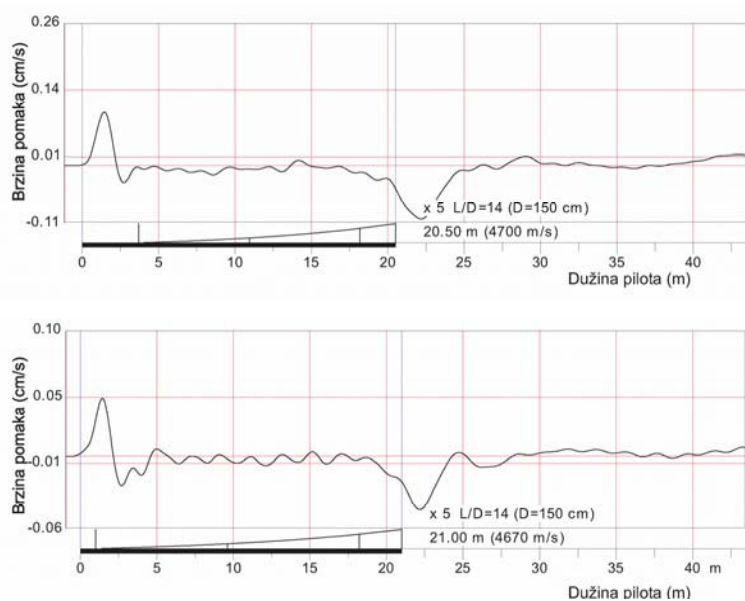


Podaci dobiveni tim ispitivanjem pomažu u procjeni integriteta pilota i geometrijskih dimenzija (površina poprečnog presjeka i duljina), kontinuiteta i konzistencije materijala pilota.

Metodom *Low Strain integrity* ne može se identificirati sve defekte u tijelu pilota, no može biti korisna u identificiranju značajnih defekata unutar duljine plota [8]. Na slikama 6. i 7. prikazani su rezultati ispitivanja.



Slika 6. Prikaz rezultata ispitivanja integriteta za pilote V-1 (gore) i H-1 (dolje)



Slika 7. Prikaz rezultata ispitivanja integriteta za pilote V-2 (gore) i H-2 (dolje)

Analizom rezultata utvrđeno je da je impuls reflektiran od dna pilota jasno vidljiv te da nema refleksa koji bi upućivali na diskontinuitete (pukotine) unutar pilota. Iz oblika akcelorograma zaključeno je da se dno pilota H-1 nalazi u mekšem tlu jer je reflektirani impuls istog polariteta kao i prvi impuls (slike 6. i 7.), dok su ostali piloti u izravnom kontaktu sa stijenom koja ima, sudeći po obliku akcelorograma, veći modul elastičnosti od betona. Isto tako, kod pilota H-1 uočeno je proširenje poprečnog presjeka na dubini od 11 m. Kod tog je pilota registriran najveći gubitak betonske smjese koja je tijekom betoniranja istjecala na mjestu između unutrašnje i vanjske kolone, te je tijekom vađenja vanjske kolone zabilježeno spuštanje razine svježega betona unutar pilota. Dakle, zbog razlike u tlaku svježega betona unutar i izvan pilota, dogodilo se istjecanje smjese te je vađenjem kolone svježa smjesa prodrila u najmekši sloj okolnog tla (mulj je registriran na dubini 10 – 11,5 m) i tu se stvorilo proširenje u profilu pilota. Kod pilota V-1 nije uočena lokalna promjena u kvaliteti betona kao što je uočeno *crosshole testom*. Konačna je ocjena da ni na jednom pilotu nisu prisutna znatna oštećenja, tj. da su svi piloti cjeloviti.

**8 Procjena nosivosti pilota na uzdužno opterećenje**

Iako se tlačna čvrstoća betona ispitivala na kockama dimenzija  $15 \times 15 \times 15$  cm i jednoosna tlačna čvrstoća intaktne stijene na valjcima s približnim odnosom promjera i duljine  $D/L = 50/125$  mm, pa se zbog razlike u dimenzijama i oblika uzoraka ne mogu izravno uspoređivati, postoji velika vjerojatnost da dobar dio volumena stijenske mase u koju se pilot temelji ima veću čvrstoću od tijela betona. Stoga teorijski je moguće da se pri opterećenju slom prije dogodi u tijelu pilota nego li u stijeni.

## 8 Procjena nosivosti pilota na uzdužno opterećenje

Kadšto je nemoguće zbog ograničenog kapaciteta opreme za ispitivanje pilota odrediti graničnu silu sloma po plaštu i po stopi pilota [9].

Za procjenu nosivosti pilota nije bitno samo dobro poznavati karakteristike intaktne stijene kao što su jednoosna čvrstoća i modul elastičnosti, već je potrebno i dobro poznavati svojstva diskontinuiteta kako bi se procijenila stišljivost i čvrstoća stijenske mase.

Bez obzira na opsežnost laboratorijskih i terenskih ispitivanja stijene, u literaturi se navodi [9], [10], [11] da su dosad ponuđene proračunske metode pilota u stijeni samo aproksimativne i da bi se projektiranje trebalo zasnivati na stručnim studijama koja uključuju probne pilote.

Kulhawy [9] predložio je pristup proračunu nosivosti pilota u stijeni na temelju njenog proračuna slijeganja. Ako rezultat toga njenog proračuna daje slijeganje pilota manje od 1 cm tada se usvaja pretpostavka da pilot nosi samo po plaštu, a ako slijeganje bude veće od 1cm tada se usvaja pretpostavka da pilot nosi samo po stopi. Predloženi pristup je konzervativan jer ne predviđa mogućnost da se nosivost po stopi i plaštu mogu pojaviti istodobno.

U nastavku je dan njen proračun slijeganja u koji su uključene komponente od jednodimenzijuskog skraćanja tijela pilota oslonjenog na krutu podlogu i komponente slijeganja podloge na kojoj sjedi pilot. Skraćenje tijela pilota dano je izrazom poznatim iz elementarne mehanike:

$$\rho_c = \frac{Q_{ST}L}{AE_c} \quad (1)$$

gdje je:

$Q_{ST}$  - uzdužna sila na dio pilota koji se nalazi u stijeni ( $Q_{ST} = 15$  MN)

$L$  - duljina pilota koja se nalazi u stijeni ( $L = 4,5$  m)

$A$  - ploština poprečnog presjeka pilota ( $A = 2,54$  m<sup>2</sup>)

$E_c$  - modul elastičnosti betona uglavljenog u stijenu ( $E_c = 19,5-41$  GPa).

Slijeganje stope se računa uz pretpostavku da nema bočnog trenja po plaštu te da se stijena ponaša elastično prema sljedećem izrazu:

$$w = \frac{Q_{ST}I_P}{B_bE_m} \quad (2)$$

gdje je:

$w$  - slijeganje stope

$I_P$  - utjecajni faktor koji ovisi o odnosu  $E_c/E_m$  i o odnosu  $L/B$  (u ovom slučaju  $I_P = 0,45-0,49$ ),

$B_b$  - promjer izbušene stijene ( $B_b = 1,8$  m),

$E_m$  - modul elastičnosti stijenske mase koji ovisi o RQD-u stijene i o  $E_R$  – modulu elastičnosti intaktne stijene ( $E_m = 3.1 -13.7$  GPa).

Vrijednosti  $E_m$  i  $I_P$  mogu se dobiti iz dijagrama objavljenih u literaturi [9].

Iz njenog proračuna dobiveno je slijeganje u rasponu od 0,9 – 2,7 mm, prema čemu se usvaja pretpostavka da pilot nosi samo po stopi.

Horvath i Kenney [9] proveli su opsežna ispitivanja nosivosti po obodnom plaštu pilota izvedenih u stijeni. Izraz za nosivost dobiven je metodom najmanjih kvadrata s prihvatljivim odstupanjima od izmjerenih vrijednosti:

$$f_s(\text{psi}) = 2.5\sqrt{q_u(\text{psi})} \quad (3)$$

gdje je:

$f_s$  - granično naprezanje po plaštu kod kojeg dolazi do sloma izraženo u jedinicama lb/in<sup>2</sup>, i

$q_u$  - manja vrijednost od iznosa jednoosne tlačna čvrstoće stijena/beton u lb/in<sup>2</sup> (1lb/in<sup>2</sup> = 6,89 kN/m<sup>2</sup>).

Prema navedenom izrazu i podacima dobivenim laboratorijskim ispitivanjima,  $f_s$  bi se trebao kretati u rasponu od 1,16 - 2,43 MN/m<sup>2</sup> te bi prema tome nosivost po plaštu trebala iznositi 29,4 – 61,8 MN, što odgovara masi od 3000 – 6300 t.

Prema (3) postoji velika rezerva u nosivosti po plaštu. Stoga ostaje pitanje je li se mogao smanjiti promjer projektiranih pilota na temelju tako grubog proračuna.

Držimo ipak da se probno ispitivanje ipak moglo provesti s manjim promjerom pilota koji bi trebao biti opremljen instrumentima za određivanje raspodjelu sile po plaštu pilota po dubini i sila koje preuzima stopa [12], [13], [14].

## 9 Ispitivanje pilota na uzdužno opterećenje

Projektom je bilo predviđeno da se provedu dva statička testa nosivosti na uzdužnu (vertikalnu) silu do 15 MN na pilotima V-1 i V-2. Za ta ispitivanja projektiran je sustav za nanošenje opterećenja koji se sastoji od čelične montažne "kape" usidrene s 12 privremenih sidara (slika 8.) i tri hidraulične preše za nanošenje opterećenja.



Slika 8. Geotehnička sidra u fazi injektiranja sidrišne dionice

U pilot je bila ugrađena cijev 108/16 mm za centriranje i osiguranje "kape". Piloti su se svojom većom duljinom (V-1) 14,2 m i (V-2) 17 m (promjera 1500 mm) nalazili

Tablica 1. Podaci o sondažnim profilima pilota V-1 i V-2

Pilot V1			Pilot V2		
Dubina od površine		Materijal	Dubina od površine		Materijal
od	do	Kratki opis	od	do	Kratki opis
[m]		[-]	[m]		[-]
0,00	10,00	Nasip	0,00	11,00	Nasip
10,00	11,50	Mulj	11,00	15,50	Mulj
11,50	14,20	Polučvrsta do kruta glina	15,50	17,00	Polučvrsta do kruta glina
14,20	18,70	Vapnenac	17,00	21,50	Vapnenac
Razina mora; -1,40 m			Razina mora; -1,50 m		

u nestjenovitom tlu te su na duljini od 4,5 m bili u stjenovitom tlu i prošireni na promjer od 1800 mm. Svako sidro bilo je sastavljeno od 8 čeličnih strukova promjera

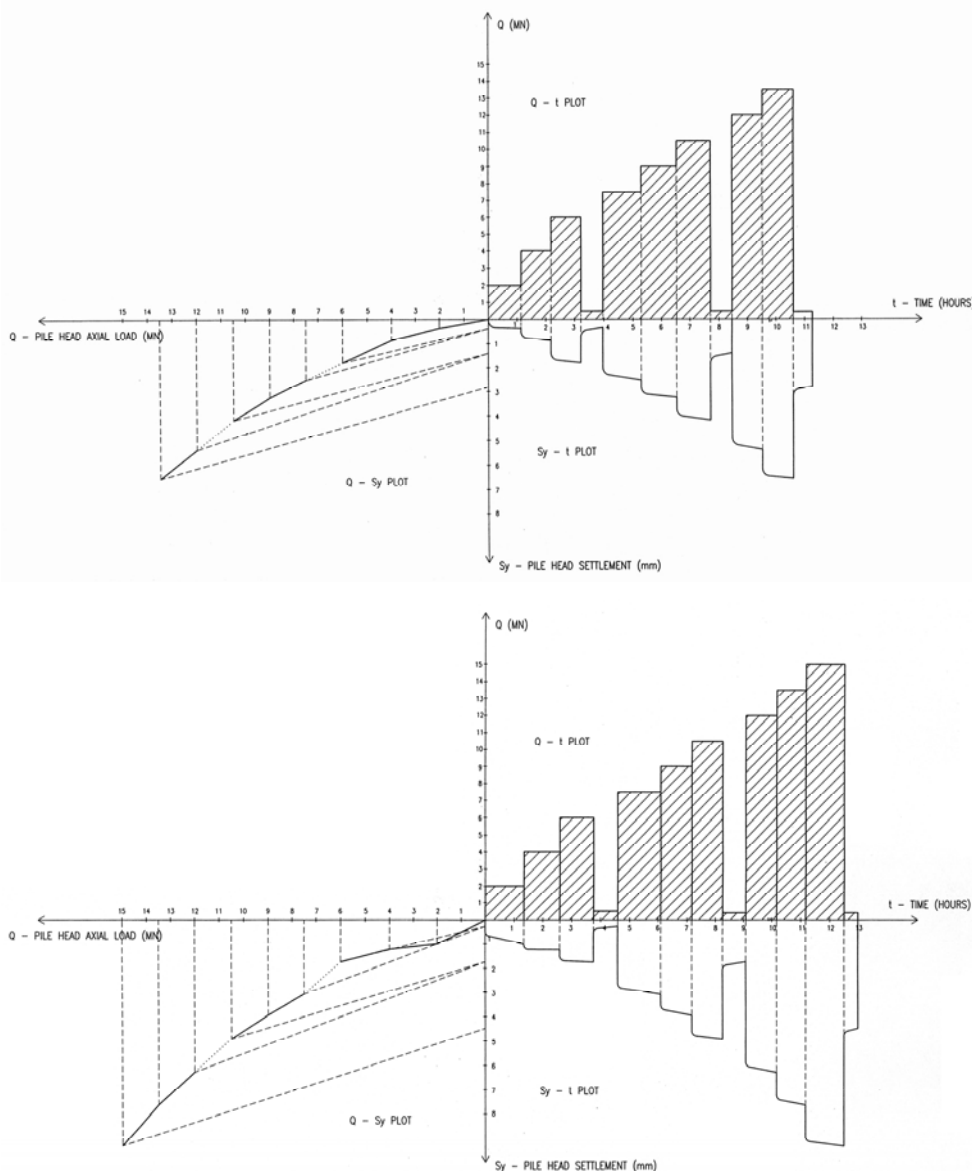
a 3 hidraulične preše kojima se nanosilo opterećenje imale su ukupni kapacitet od 18 MN. Elektroničko praćenje slijeganja provodilo se s 4 instrumenta za praćenje

pomaka na glavi pilota. s točnošću od 0,1 mm. Instrumenti su bili postavljeni na nepomičnu konstrukciju. Sva oprema za mjerenje i kontrolu sile i slijeganja bila je spojena na računalo (tablica 1.).

Slijed opterećenja i rastećenja tekao je prema planu ispitivanja. Deformacije su se stabilizirale vrlo brzo. Ispitivanjem pilota V-1 kod sile od 13,5 MN došlo je do popuštanja jednog sidra te je daljnje ispitivanje tog pilota iz sigurnosnih razloga obustavljeno (slika 9. gore). Pilot V-2 je ispitivan do krajnje sile od 15 MN (slika 9. dolje).

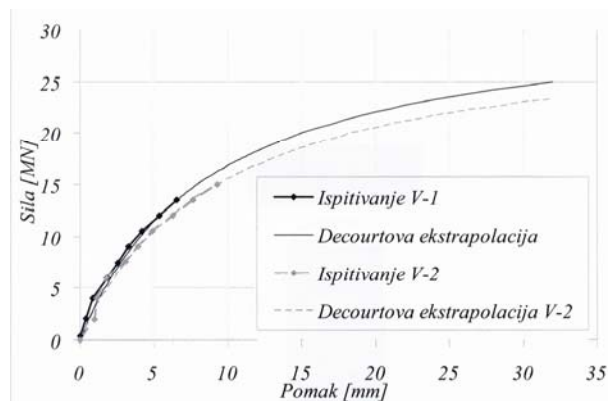
Ukupno vertikalno deformiranje pri sili od 13,5 MN na pilotu V-1 je bilo 6,55 mm, od čega je elastični dio iznosio 3,73 mm (57%), pa je nakon uklanjanja opterećenja ostalo trajno deformiranje od 2,82 mm (43%).

Ukupno vertikalno deformiranje pri sili od 15 MN na pilotu V-2 je bila 9,32 mm, od čega je elastični dio iznosio 4,84 mm (52%), pa je nakon uklanjanja opterećenja ostalo trajno de-

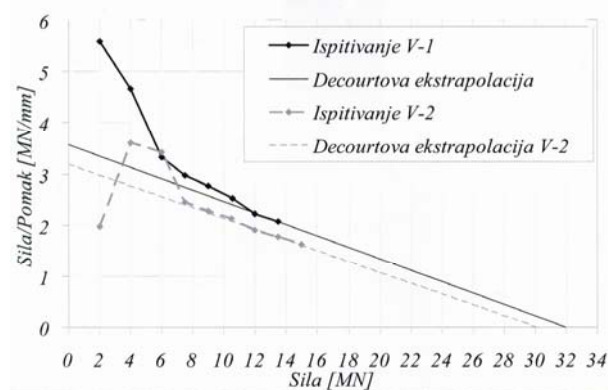


Slika 9. Prikaz rezultata ispitivanja i tijekom nanošenja sile probnih pilota V-1 (gore) i V-2 (dolje)

formiranje od 4,48 mm (48 %). Jednostavnim proračunom uzdužnog elastičnog deformiranja pilota (za odabrani  $E_c = 30$  GPa) pri opterećenju najvećom silom, na duljini od površine terena do pojave stijene, dobivena je vrijednosti od 3,6 mm za pilot V-1 i 4,8 mm za pilot V-2. Iz toga se može zaključiti da stijena preuzima gotovo cijeli iznos opterećenja, dok gornji slojevi gotovo da i ne sudjeluju u uzdužnoj nosivosti.



Slika 10 Prikaz izmjerenih veličina i ekstrapoliranih krivulja sila/pomak za pilote V-1 i V-2



Slika 11. Decourtov postupak određivanja vrijednosti granične sile nosivosti

Iz provedenih se ispitivanja može zaključiti da su piloti pokazali izvrsno ponašanje pri vertikalnom opterećenju i da takav pilot može preuzeti znatno veću vrijednost

Tablica 2. Podaci o sondažnim profilima za pilote H-1 i H-2

Pilot H1			Pilot H2		
Dubina od površine		Materijal	Dubina od površine		Materijal
od	do	Kratki opis	od	do	Kratki opis
[m]	[m]	[-]	[m]	[m]	[-]
0,00	10,00	Nasip	0,00	12,50	Nasip
10,00	11,50	Mulj	12,50	15,50	Mulj
11,50	14,00	Polučvrsta do kruta glina	15,50	16,50	Polučvrsta do kruta glina
14,00	18,70	Vapnenac	16,50	21,30	Vapnenac
Razina mora; -1,50 m					

uzdužne sile. Granične vrijednosti nosivosti pilota nisu dosegnute tim ispitivanjima. Pokušali smo odrediti vrijednost granične sile nosivosti s pomoću Decourtove ekstrapolacije [15] što je prikazano na slikama 10. i 11.

Horizontalni odsječak na osi apcise (slika 11.) predstavlja ekstrapoliranu vrijednost granične uzdužne sile nosivosti. Ekstrapolacijom je dobiveno da piloti V-1 ima graničnu nosivost od 31,9 MN, a pilot V-2 nosivost 30,2 MN. Iako vrijednosti dobivene ekstrapolacijom nisu pouzdane, mogu poslužiti za ocjenu rezerve u nosivosti ispitano pilota [12], [13], [14].

### 10 Ispitivanje pilota na poprečno (horizontalno) opterećenje

Provedena su dva ispitivanja poprečne nosivosti, a svako je ispitivanje obuhvatilo dva pilota koja su međusobno razupirana V-1 : H-1 i V-2 : H-2. Ispitivanja poprečne nosivosti provedena su nakon ispitivanja uzdužne nosivosti na pilotima V-1 i V-2.



Slika 12. Detalj montaže čelične cijevi za razupiranje

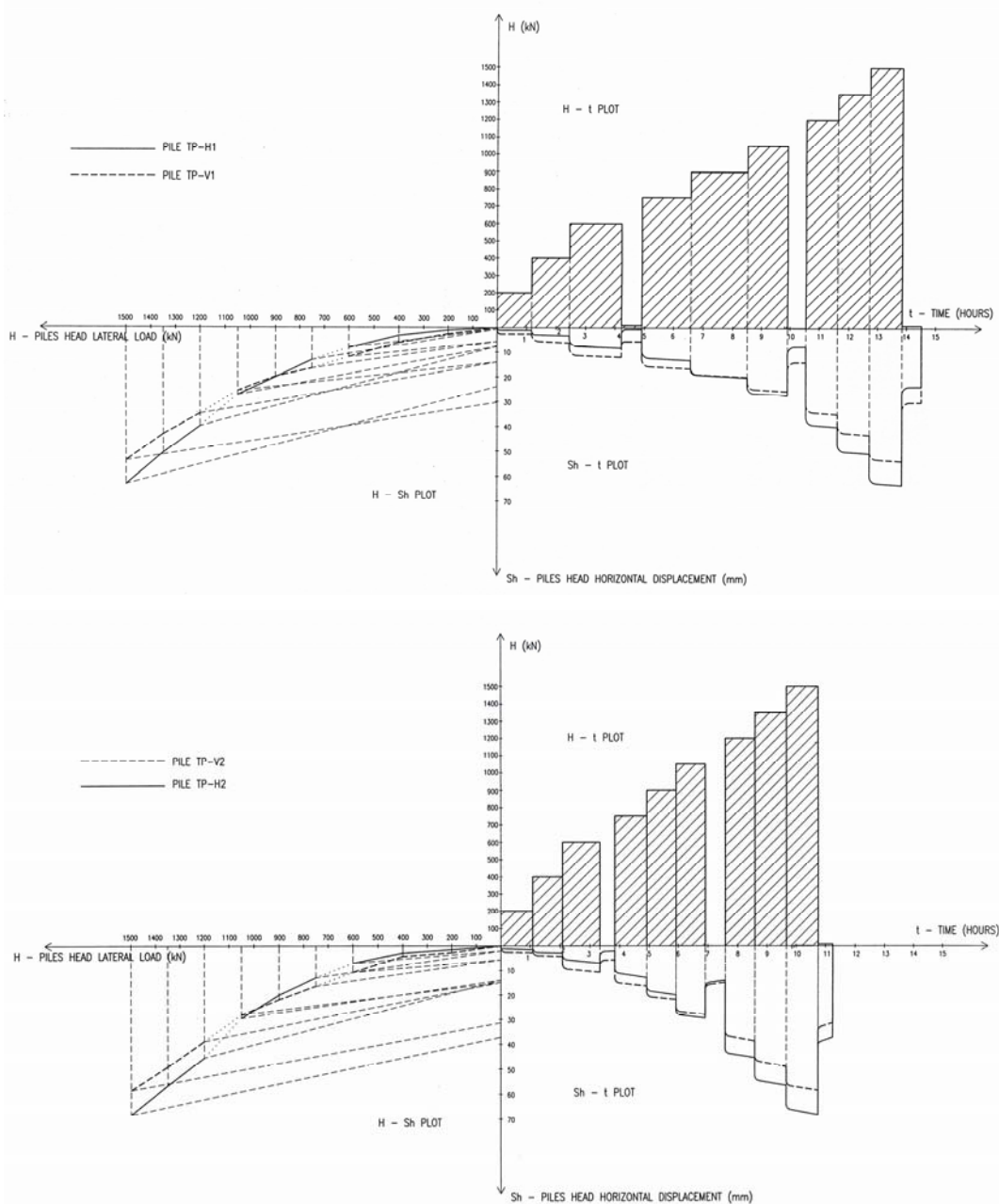
Udaljenost između osi pilota iznosila je 8 m, a na bokove su postavljene ploče za prijenos opterećenja. Razupiranje se obavljalo s pomoću hidrauličke preše i čelične cijevi koja je s jedne strane bila oslonjena na prešu, a s druge se strane upirala u ploču spojenu na vrh pilota (slika 12). Hidraulična je preša kapaciteta 2 MN sa zglobnim spojem bila s jedne strane spojena s čeličnom pločom, a s druge strane s cijevi. Horizontalni pomaci su se pratili s pomoću konstrukcije koja je bila na dovoljnoj udaljenosti pričvršćena na tlo. Mjerenje pomaka obavljeno je u 2 točke na glavi svakog pilo-



ta s točnošću od 0,1 mm. Sva oprema za mjerenje i kontrolu sile i pomaka bila je spojena na računalo. Rezultati su navedeni u tablici 2.

Slijed opterećenja i rasterećenja tekao je prema planu

deformacija od 31,44 mm (54 %) i 37,29 mm (55 %). Iako su tijekom ispitivanja ostvareni relativno veliki horizontalni pomaci i do 7 cm, nije došlo do otkazivanja nosivosti. Pokušali smo stoga odrediti vrijednost granič-

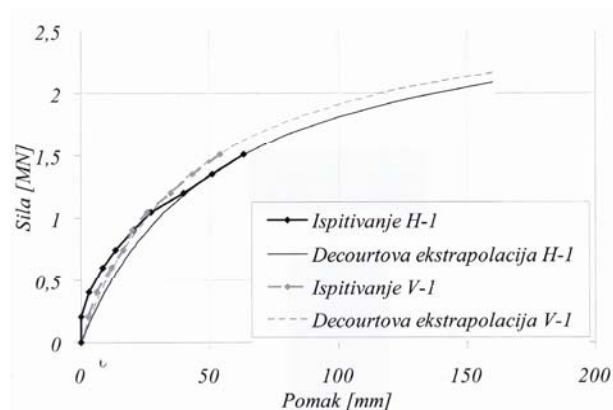


Slika 13. Rezultati ispitivanja na horizontalnu silu i tijeka nanošenja sile na pilote V-1 i H-1 te V-2 i H-2

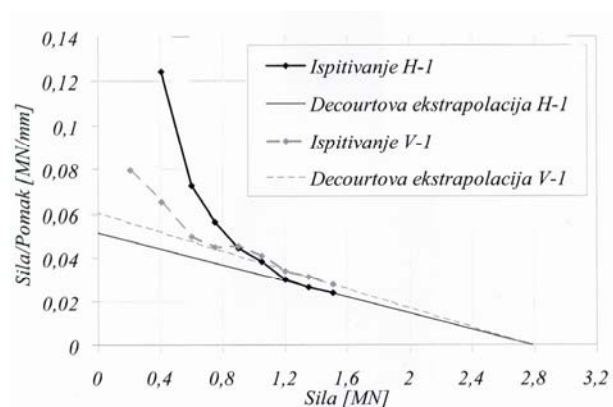
ispitivanja do najveće horizontalne sile od 1,5 MN. Pri najvećoj horizontalnoj sili od 1,5 MN, piloti V-1 i H-1 su ostvarili pomake od 54 i 63,4 mm, pri čemu je nakon rasterećenja zabilježen trajni pomak od 30,36 mm (56 %) i 23,85 mm (38 %). Piloti V-2 i H-2 su pri najvećoj horizontalnoj sili ostvarili pomake od 58,48 mm i 68,25 mm, pri čemu je nakon rasterećenja zabilježena trajna

ne sile nosivosti uz pomoć Decourtove ekstrapolacije, što je prikazano na slikama 14. i 15.

Ekstrapolacijom je dobiveno da piloti V-1 i H-1 imaju graničnu nosivost na poprečnu silu od 2,79 MN i 2,78 MN, a piloti V-2 i H-2 nosivost od 3,7 MN i 3,3 MN [12], [13], [14].



Slika 14. Rezultat ispitivanja na horizontalnu silu pilota V-1 i H-1. Crtkana krivulja predstavlja ekstrapoliranu idealiziranu krivulju



Slika 15. Decourtov postupak određivanja vrijednosti granične sile nosivosti poprečno opterećenih pilota V-1 i H-1

## 11 Zaključak

Smatramo da je ispitivanje probnih pilota vrlo bitan segment u procesu projektiranja temeljenja. Vrlo je važno projektne postavke odrediti nakon provedbe geotehničkih istražnih radova i statičkih pokusa opterećenja pilota, kao što to navodi Eurocode 7. Ovdje opisana probna ispitivanja provedena su kako bi se ocijenilo ponašanje reprezentativnih pilota na zadano opterećenje.

Ono što europske norme ističu jest da bi se probna ispitivanja morala provoditi u slučajevima kada ne postoje podaci o takvim ispitivanjima u sličnim tlima i u slučajevima kada ni teorijske ni iskustvene spoznaje nisu dovoljno pouzdane pri projektiranju. S obzirom na to da su takva ispitivanja u stijeni rijetka, a proračunske metode nepouzdanost, smatramo da su stvarno opravdana njihova provođenja.

Kod geotehničkih istražnih radova najveću pozornost treba posvetiti određivanju karakteristika stijene (diskontinuiteti, čvrstoća, modul elastičnosti i sl.) budući da se na osnovi njezinih parametara provode preliminarni proračuni nosivosti i slijeganja.

Svi su probni piloti dobro izvedeni, što je dokazano ispitivanjima integriteta. Ispitivanja nosivosti pilota provedena su korektno i do zadane sile (osim uzdužno opterećenog pilota V-1), pa se dobivena mjerenja mogu upotrijebiti pri proračunu graničnog stanja uporabivosti. Niti jednim ispitivanjem nije dosegnuto granično stanje. Metode ekstrapolacije, iako nepouzdanost, mogu upućivati na iznos sile graničnog stanja otkazivanja nosivosti [14].

Eurocode 7 [3] daje vrlo korisne opće smjernice i preporuke za provedbu probnog opterećenja pilota. Jedna je od smjernica da se ispitivanje provodi sile sloma, no pitanje jest je li to stvarno potrebno ako se pilot temelji u stijeni. Probni piloti koji se temelje u stijeni trebali bi imati ugrađene instrumente kojima se može odrediti otpor na plaštu i otpor u podnožju pilota. Na temelju tih podataka projektant može bolje ocijeniti nosivost s obzirom na nepouzdanost ponuđenih metoda proračuna. Ispitivanja nosivosti u stijeni lakše je provoditi s pilotima manjeg promjera.

Iskustva iz ovih ispitivanja mogla bi biti korisna i za neke buduće projekte, a pri planiranju velikih projekata opravdano je probno ispitivanje provoditi u ranim fazama projektiranja, osobito radi postizanja racionalnijih tehničko-ekonomskih efekata.

### Zahvala

Autori se zahvaljuju na suradnji i pomoći kolegama iz sljedećih tvrtki: *Geotehnički studio* d.o.o iz Zagreba; IGH d.d. Zagreb, *Zavod za geotehniku*; IGH d.d. PC Split, *Odjel za materijale i tehnologiju*; *Zakladani staveb* a.s. iz Praga i *Geokod* d.o.o. iz Zagreba koji su nam stavili na raspolaganje dokumentaciju potrebnu za izradu ovog članka.

## LITERATURA

- [1] *Glavni projekt Putničke luke Dubrovnik – Knjiga 1*, Institut građevinarstva Hrvatske d.d., PC Split; Split; 2004.
- [2] *Završni izvještaj o geotehničkim istražnim radovima na lokaciji rekonstrukcije i dogradnje obale u putničkoj luci Gruž-Dubrovnik*, Geotehnički studio d.o.o., Zagreb; 2003.
- [3] *Geotechnical design*, ENV\_1997-1, EUROCODE 7: Part 1.
- [4] *Izveštaj o prethodnim ispitivanjima betona za luku Gruž – testni piloti*, Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Poslovni centar Split, Odjel za materijale i tehnologiju Split, 2006.

- [5] *Izveštaj o ocjeni sukladnosti s propisanim uvjetima kakvoće betona za luku Gruž – testni piloti*, Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Poslovni centar Split, Odjel za materijale i tehnologiju Split, 2006.
- [6] *Standard Test Method for Low Strain Integrity Testing of Piles* ASTM International, ASTM Volume 04.09, Soil and Rock (II), 2006.
- [7] *Test Method for Integrity Testing of Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Crosshole Testing*, ASTM International, ASTM Volume 04.09, Soil and Rock (II) 2006.
- [8] *Izveštaj o ispitivanju cjelovitosti testnih pilota (PIT) u luci Gruž – Dubrovnik*, Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Zavod za geotehniku; Zagreb, 2006.
- [9] Reese, L. C.; Isenhower, W. M.; Wang, S. T: *Analysis and design of shallow and deep foundations*, John Wiley & Sons, Austin, 2006.
- [10] Smolczyk, U. i sur. *Geotechnical Engineering Handbook*, Ernst & Sohn, Berlin, 2003.
- [11] Poulos, H. G.; Davis, E. H.: *Pile foundation analysis and design*, John Wiley and Sons, Sydney, 1980.
- [12] *Izveštaj o mjerenju homogenosti betona testnih pilota (CHA – Cross Hole Analyser) u luci Gruž – Dubrovnik*, Institut građevinarstva Hrvatske d.d., Zavod za geotehniku; Zagreb, 2006.
- [13] *Statičke probe pilota u Dubrovniku – preliminarno izvješće*, Zakladany Staveb, Prag, 2006.
- [14] *Luka Gruž – Dubrovnik, komentar rezultata provedenih ispitivanja*, Geokod d.o.o. Zagreb, kolovoz 2006.
- [15] Fellenius, B.: What capacity value to choose from the results of static loading test, article from Deep Foundation Institute, Fulcrum, 2001.