

# Geotehnički uslovi izgradnje nadvožnjaka "Balajnac" na autoputu E-80 deonica: Niš - Merošina

Dragoslav Rakić, Nikola Božović



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

[ДР РГФ]

Geotehnički uslovi izgradnje nadvožnjaka "Balajnac" na autoputu E-80 deonica: Niš - Merošina | Dragoslav Rakić, Nikola Božović | Peti Srpski kongres o putevima, Beograd, 30-31.05.2024. | 2024 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0008684>

## **ЗБОРНИК РАДОВА**

5. српски конгрес о путевима, 30-31. мај 2024.

## **PROCEEDINGS**

5th Serbian Road Congress, May 30-31, 2024

Издавач

Српско друштво за путеве "Via-Vita"

Булевар Пека Дапчевића 45, 11000 Београд

За издавача

Душан Савковић, дипл. инж. грађ.

Уредници

проф.др Владан Тубић

Доц.др Сања Фриц, дипл.инж.грађ.

Графички дизајн и умножавање зборника

Омнибус, Београд

Тираж

300

ISBN 978-86-88541-18-3

CIP - Каталогизација у публикацији -  
Народна библиотека Србије, Београд

625.7/.8(082)(0.034.2)

### **СРПСКИ конгрес о путевима (5 ; 2024)**

Зборник радова [Електронски извор] / 5. српски конгрес о путевима, 30-31. мај 2024 = Proceedings / 5th Serbian Road Congress, May 30-31, 2024 ; [уредници Владан Тубић, Сања Фриц]. - Београд : Српско друштво за путеве "Via Vita", 2024 (Београд : Омнибус). - 1 USB флеш меморија ; 1 x 2 x 4 cm

Системски захтеви: Нису наведени. - Насл. са насловне стране документа.  
- Радови на срп. и енгл. језику. - Тираж 300. - Напомене и библиографске референце уз радове. - Библиографија уз сваки рад. - Abstracts.

ISBN 978-86-88541-18-3

а) Путеви -- Зборници

COBISS.SR-ID 145413385

# ЗБОРНИК РАДОВА

5. српски конгрес о путевима, 30-31. мај 2024.

# PROCEEDINGS

5th Serbian Road Congress, May 30-31, 2024



Српско друштво за путеве "Via-Vita"  
Београд, 2024. година



## GEOTEHNIČKI USLOVI IZGRADNJE NADVOŽNJAKA „BALAJNAC“ NA AUTOPUTU E-80 DEONCA: NIŠ - MEROŠINA

Dragoslav Rakić<sup>1</sup>, Nikola Božović<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet, Đušina 7, Beograd, [dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs](mailto:dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs)

<sup>2</sup> Institut za ispitivanja materijala – IMS, Beograd, [nikola.bozovic0@gmail.com](mailto:nikola.bozovic0@gmail.com)

**Rezime:** U sklopu prve deonice autoputa E-80 Niš – Merošina, izgrađen je nadvožnjak u zoni sela Balajnac koji je oslonjen na tri stubna mesta na međusobnom rastojanju od oko 26 m. Svaki stub je fundiran na šipovima i to sa predloženim rasporedom od 2 šipa u grupi na međusobnom rastojanju od 3.6 m. U radu su na osnovu izvršenih geotehničkih istraživanja terena, analizirani rezultati nosivosti vertikalno opterećenog šipa prečnika 1.2 m i dužine šipa od  $L = 23$  m. Analiza je izvršena primenom različitih metoda koristeći rezultate statičke i standardne penetracije, laboratorijskih ispitivanja tla kao i probnog opterećenja šipa.

**Ključne reči:** nadvožnjak „Balajnac“, šip, probno opterećenje šipa, projektni pristup, granična stanja.

## GEOTECHNICAL CONDITIONS FOR THE CONSTRUCTION OF "BALAJNAC" OVERBRIDGE ON THE HIGHWAY E-80 SECTION: NIŠ - MEROŠINA

Dragoslav Rakić<sup>1</sup>, Nikola Božović<sup>2</sup>

<sup>1</sup> University of Belgrade – Faculty of Mining and Geology, Djusin 7, Belgrade, [dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs](mailto:dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs)

<sup>2</sup> IMS Institute, Belgrade, [nikola.bozovic0@gmail.com](mailto:nikola.bozovic0@gmail.com)

**Abstract:** As part of the first section of the E-80 highway Niš - Merošina, an overbridge was built in the area of the village of Balajnac, which is supported by three piles at a distance of about 26 m. Each pillar is founded on piles with the proposed arrangement of 2 piles in a group at a distance of 3.6 m. Based on the geotechnical investigations of the terrain, the results of the bearing capacity of a vertically loaded pile with a diameter of 1.2 m and a pile length of  $L = 23$  m were analyzed in the paper. The analysis was performed by applying different methods using the results of static and standard penetration test, laboratory soil tests as well as pile load test.

**Keywords:** "Balajnac" overbridge, pile, pile load test, design approach, limit states.

### 1. UVOD

U Srbiji je počela izgradnja autoputa E-80 od Niša do Merdara, a prva deonica u dužini od 5.5 km je završena i puštena u saobraćaj krajem jula 2023. god. Ovaj autoput je od posebnog ekonomskog i društvenog interesa za R. Srbiju i Toplički kraj, jer će predstavljati saobraćajno čvorište zapadnog Balkana i biće deo glavne regionalne transportne mreže jugoistočne Evrope.



**Slika 1.** Izgled postojećeg nadvožnjaka pre i u fazi rušenja

Ukupna dužina autoputa je 77 km, i podeljena je na dva Sektora. Prvi Sektor kreće od isključenja sa autoputa E-75, a završava se blizu neolitskog naselja Pločnik tj. kod planirane petlje Beloljin, čija je dužina 32.65 km. Preostali deo trase pripada drugom Sektoru od petlje Beloljin do Merdara. Prva izgrađena deonica

<sup>1</sup> Dragoslav Rakić: [dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs](mailto:dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs)



u okviru Sektora 1 je dužine 5.5 km, i u okviru ove deonice izgrađeno je nekoliko objekata, a kao najznačajniji mogu se izdvojiti: petlja „Merošina 1“, dva kraća mosta dužine po 15 m i nadvožnjak u zoni sela Balajnac. Ovaj nadvožnjak je izgrađen na lokaciji starog – postojećeg nadvožnjaka na približnoj stacionaži od km: 1+713 i to na zaravnjenom terenu bez izraženih reljefnih oblika sa približnim kotama između 219 i 221 m (Slika 1). Na osnovu urađene inženjerskogeološke rejonizacije terena, lokacija nadvožnjaka pripada zoni A tj. terenima sa minimalnim ograničenjima, u kojima su prirodni uslovi povoljni i stabilni [8], [9].

## 2. GEOLOŠKA GRAĐA TERENA NA LOKACIJI NADVOŽNJAKA „BALAJNAC“

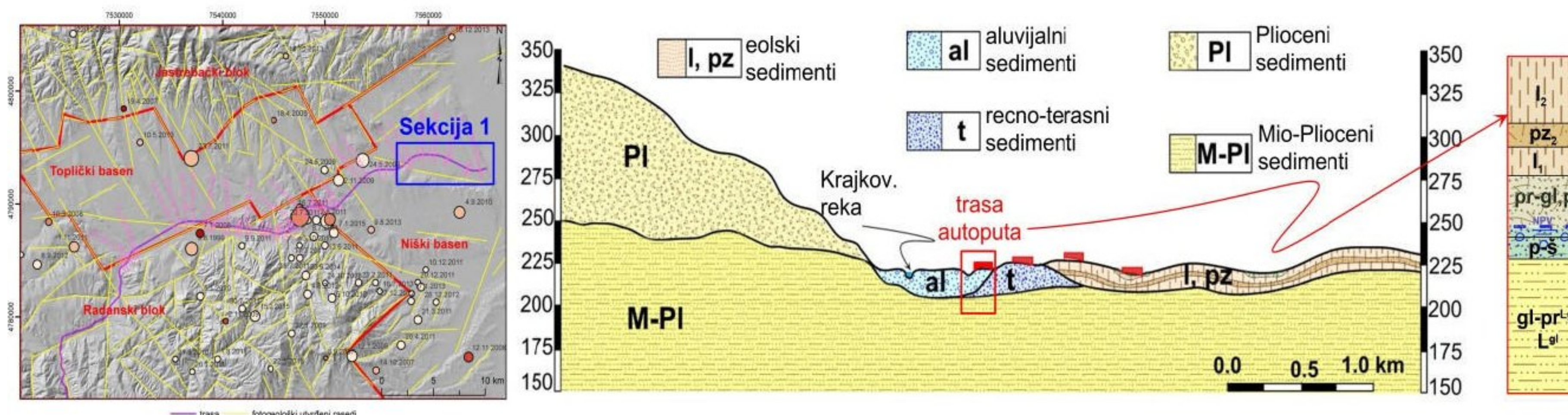
Za definisanje geološke građe i geotehničkih karakteristika terena na lokaciji nadvožnjaka „Balajnac“, izveden je zavidan obim terenskih i laboratorijskih istraživanja. Istraživanja su izvedena u tri faze. Prva faza urađena je za potrebe Idejnog projekta-IP, druga faza za potrebe Projekta za građevinsku dozvolu-PGD i treća faza obuhvatila je dopunska geotehnička istraživanja za potrebe izrade studije izvođenja-SI. Zbirni prikaz vrste i obima izvedenih geotehničkih istraživanja u zavisnosti od faze projektovanja nadvožnjaka, prikazan je u Tabli br. 1 [7], [10].

**Tabela 1.** Geotehnička istraživanja terena izvedena na lokaciji nadvožnjaka „Balajnac“

Geotehnički istražni radovi	I faza - Idejni projekat (2016-2017)	II faza - Proj. za građ. dozvolu (2020).	III faza - Studija izvođenja (2022)
Inženjerskogeološko kartiranje terena	inženjerskogeološka karta 1 : 2500	inženjerskogeološka karta 1 : 500	-
Istražno bušenje	2 istražne bušotine ukupne dužine 22.8 m (plitko fundiranje)	3 istražne bušotine ukupne dužine 58.6 m (duboko fundiranje)	1 istražna bušotina DB-1 dubine 28.2 m.
SPT opiti	5 opita	9 opita	-
CPT opiti	-	2 opit	-
Geofizička ispitivanja	definisane seizmičkog hazarda i određivanje projektnih parametara seizmičnosti	-	-
Laboratorijska geomehanička ispitivanja	5 uzoraka	17 uzoraka	6 uzorka
Probno opterećenje šipa	-	-	1 opit statičkog probnog opterećenja šipa

Od terenskih istraživanja, značajno je pomenuti i istraživanja koja se odnose na šire područje trase autoputa u fazi idejnog projekta, a koja su omogućila registrovanje krupnih – regionalnih struktura i dali ulazne podatke za ocenu seizmičke aktivnosti i njen uticaj na građenje nadvožnjaka (Slika 2).

Trasa autoputa uglavnom prolazi preko blago zatalasanog reljefa koji u široj zoni nadvožnjaka „Balajnac“ pretežno izgrađuju vezane sitnozrne sredine, gde dominiraju prašinski eolski sedimenti (Q<sub>1</sub>,pz – les i pogrebena zemlja) i sredine Neogenog kompleksa koje odgovaraju gornjem Miocenu i donjem Pliocenu (M-PI - laporovito-glinoviti i prašinsto-peskoviti sedimenti). Inženjerskogeološki presek terena, sa izraženim eolskim, aluvijalnim i rečno terasnim zaravnima, karakterističan za širu zonu nadvožnjaka „Balajnac“, prikazan je na Slici 2 [7].



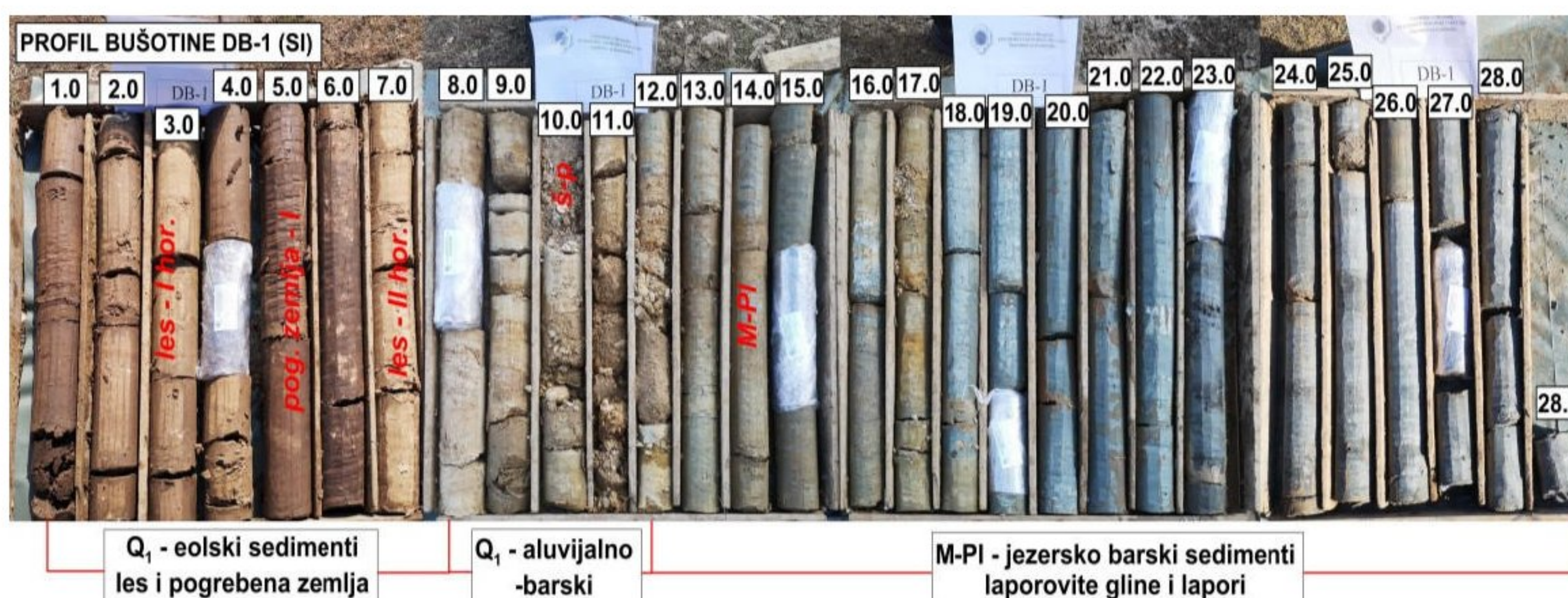
**Slika 2.** Karakterističan geološki presek terena u široj zoni nadvožnjaka „Balajnac“

Širi prostor obuhvata i pritoke Krajovačke reke, gde su konstatovani aluvijalni i aluvijalno proluvijalni sedimenti heterogenog litološkog sastava, nastali difuznim spiranjem, transportom povremenih voda i gravitacijom. Tereni pobrđa su prekriveni eolskim, deluvijalnim, proluvijalnim i deluvijalno-proluvijalnim



sedimentima. Neogeni sedimenti zastupljeni su u podini kvartarnih sedimenata na čitavom istražnom prostoru. Razlikuju se dva horizonta: donji - u kome preovlađuju sedimenti fino-zrnog sastava i gornji – izgrađen pretežno od peskova sa retkim proslojcima peskovitih glina i sočivima šljunka. U zoni nadvožnjaka izdvojen je mlađi neogeni kompleks veoma heterogenog litološkog sastava sa čestim facijalnim promenama. Glavni litološki predstavnici su: laporovite gline i lapori.

Na lokaciji nadvožnjaka „Balajnac“ izdvojena su dva osnovna geološka kompleksa. Prvi, kvartarni kompleks izgrađuju prašinstva tla Pleistocene starosti koja u potpunosti po genetskom sastavu odgovaraju eolskim sedimentima (izdvojena su dva sloja padinskog lesa i sloj pogrebene zemlje, ukupne debljine oko 7.5 m, Slika 3). Ispod ovih eolskih sedimenata do dubine od 11.0-11.5 m utvrđen je glinovito-prašinstvo-peskoviti, sloj u čijoj podini se nalazi tanji peskovito-šljunkoviti sloj. Ispod ovih kvartarnih slojeva nalazi se Mio-Plioceni kompleks sa zonom površinskog raspadanja lapora (gl-pr<sup>L-9</sup>) u vidu laporovitih glina debljine oko 5.0-6.0 m i osnovnim slojem glinovitog lapora (L<sup>gl</sup>), gde će se formirati baze svih šipova.

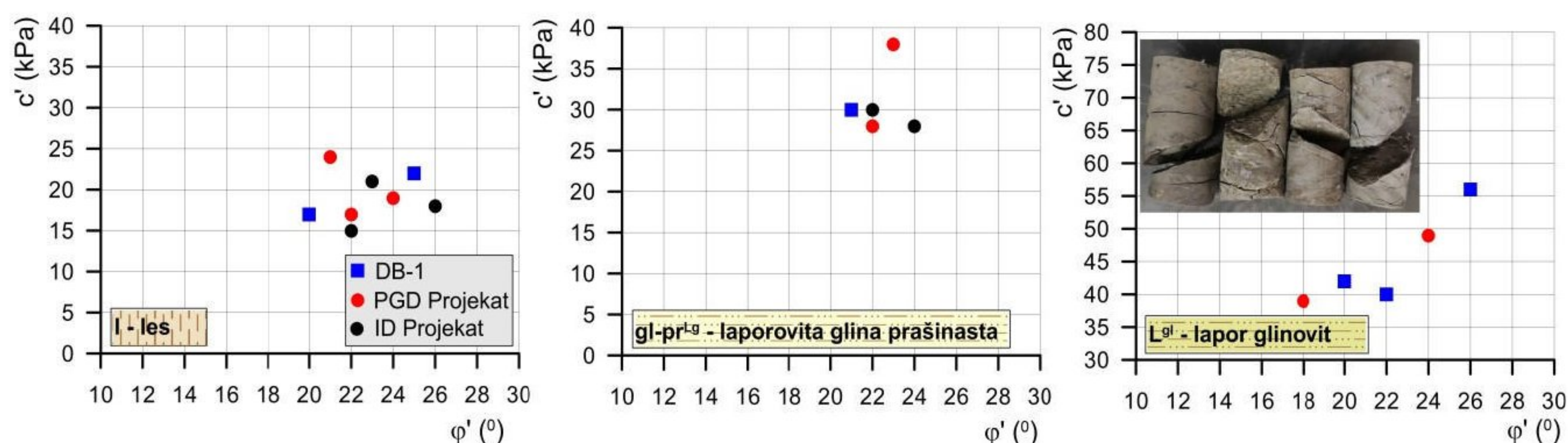


Slika 3. Fotografija jezgra dopunske bušotine DB-1

Izmereni nivo podzemne vode u istražnim bušotinama koje su izvedene za potrebe PGD, kretao se od 10.2 – 10.5 m, dok je u dopunskoj istražnoj bušotini DB-1, došlo do blagog spuštavanja nivoa koji je u trenutku istraživanja iznosio 11.0 m.

### 3. DEFINISANJE GEOTEHNIČKIH MODELA TERENA

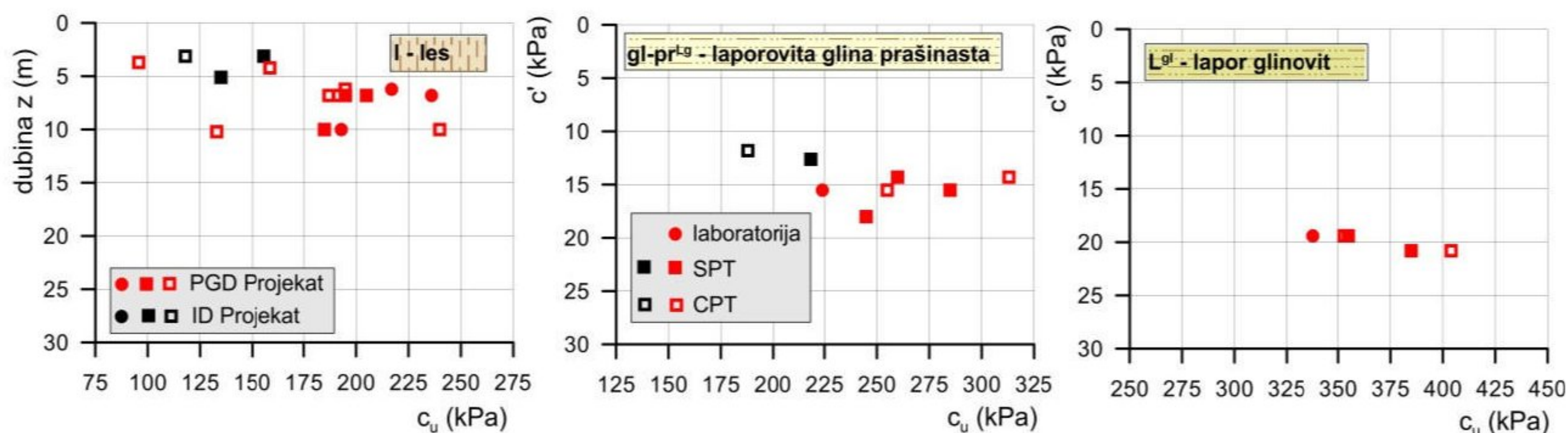
Laboratorijskim ispitivanjima uzoraka tla, određivani su identifikaciono-klasifikacioni pokazatelji kao i otporno deformabilne karakteristike. Rezultati parametara čvrstoće smicanja, tokom svih faza istraživanja za izdvojene sedimente na lokaciji nadvožnjaka, prikazani su na Slici 4. Najveći broj ispitivanja urađen je za potrebe izrade PGD, gde su pored opita direktnog smicanja, parametri čvrstoće smicanja određivani i na osnovu opita triaksijalne kompresije.



Slika 4. Zbirni prikaz efektivnih parametara čvrstoće smicanja

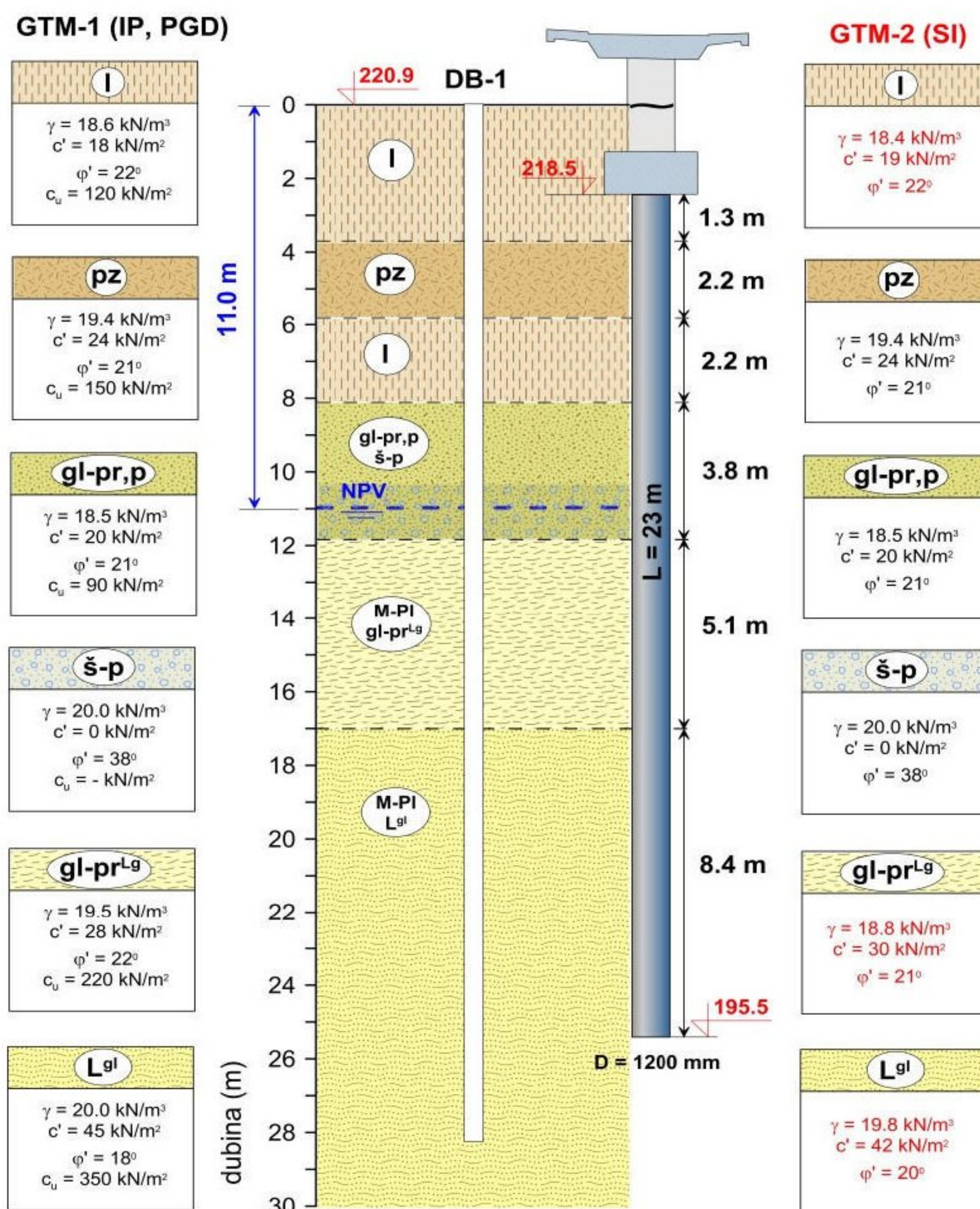
S obzirom na nivo podzemne vode, parametri čvrstoće smicanja su definisani i za nedrenirane uslove (Slika 5). U pitanju su sitnozrni materijali, tako da je određena nedrenirana kohezija i to na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja, kao i na osnovu rezultata statičke – CPT i standardne penetracije – SPT, primenom odgovarajućih korelacionih zavisnosti.





Slika 5. Zbirni prikaz nedrenirane čvrstoće smicanja

Dobijeni podaci omogućili su da se formiraju dva geotehnička modela terena na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja (Slika 6). Prvi geotehnički model-GTM1 formiran je na osnovu rezultata laboratorijskih i terenskih ispitivanja koja su izvedena u okviru I faze (idejni projekat) i II faze istraživanja (projekat za građevinsku dozvolu), dok su za definisanje drugog geotehničkog modela-GTM2, korišćeni samo rezultati iz III faze tj. rezultati laboratorijskih ispitivanja u okviru dopunskih istraživanja na uzorcima iz istražne bušotine koja je izvedena u zoni probnog šipa (u okviru dopunskih istraživanja nisu vršeni opiti za definisanje nedrenirane čvrstoće smicanja).

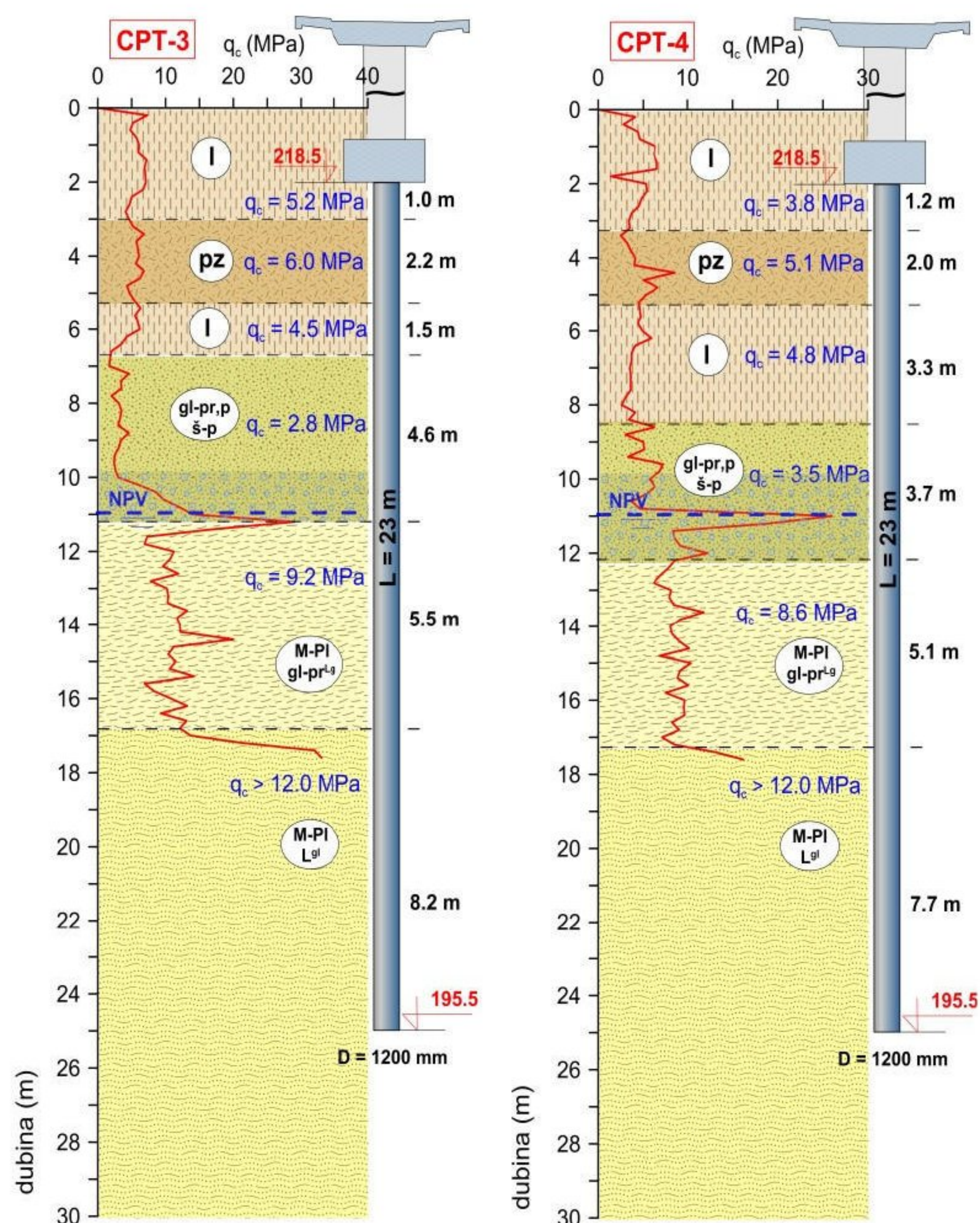


Slika 6. Usvojeni proračunski modeli tla na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja

U zoni nadvožnjaka izvedena su i 2 opita statičke penetracije (CPT-3 i CPT-4). S obzirom da je nadvožnjak oslonjen na 3 stuba, ovim opitima nisu obuhvaćene lokacije stubnih mesta, tj. CPT-3 opit je izveden duž ose nadvožnjaka dok je CPT-4 opit izveden u istoj geološkoj sredini, ali na udaljenosti od oko 250 m od nadvožnjaka. Kako su oba opita završena u glinovitim laporima ( $L^{gl}$ ), ali iznad fundiranja baze šipa, otpornost konusa na većim dubinama glinovitim laporima, definisana je na osnovu opita CPT-5 i CPT-6 koji su većim delom obuhvatili i sloj u kojem je izvedena baza šipa.



Za potrebe geotehničke analize, korišćena su dva modela i to jedan formiran prema CPT-3 opitu koji je izveden u neposredno uz probni šip, kao i novoformirani model na osnovu rezultata CPT-4, CPT-5 i CPT-6 opita, koji su izvedeni u sredinama istog geološkog sastava. Rezultati ovih opita sa interpretacijom za definisanje proračunskih modela šipa, prikazani su na Slici 7.



Slika 7. Proračunski geotehnički modeli šipa na osnovu CPT opita

#### 4. IZVOĐENJE OPITA PROBNOG OPTEREĆENJA ŠIPA

Probno opterećenje izvedeno je na armiranobetonskom bušenom šipu prečnika  $D = 1.2$  m i dužine  $L = 23.0$  m. Da bi se postigao kontrateret, izgrađena je specijalna čelična greda koja je debelim limovima zavarena za dva susedna šipa koji su fundirani na dovoljnom rastojanju od ose šipa (Slika 8).

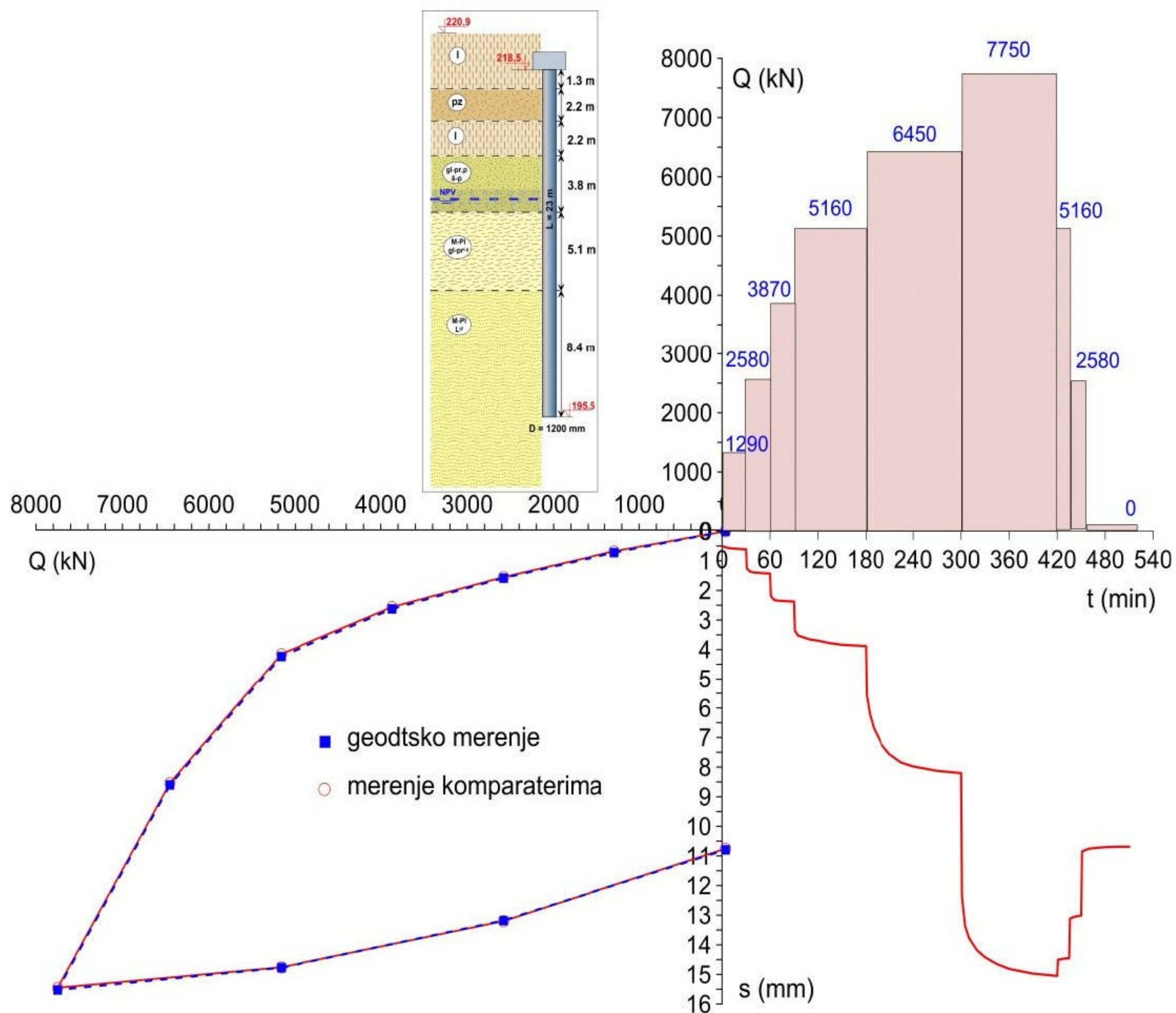


Slika 8. Konstrukcija sistema za opit probnog opterećenja šipa



Za ostvarivanje vertikalne pritiskajuće sile na šip korišćene su dve hidrauličke prese, pojedinačnog kapaciteta od približno 6000 kN, koje su centrično postavljene na glavu šipa. Prese su preko creva sa visokim pritiskom, povezane sa hidrauličkom pumpom. Između hidrauličkih presa i grede koja povezuje ankerne (pomoćne) šipove, kao i između prese i glave šipa, postavljen je podmetač od čelične ploče dovoljno otporan da ravnomerno prenese silu na gornju konstrukciju, odnosno na šip [10].

Za merenje pomeranja glave šipa, korišćena su četiri digitalna komparatera koji su vezani za referentne čelične grede pod uglom od 90°. Ovaj sistem referentnih greda predstavlja međusobno kruto povezan skelet, koji se preko četiri oslonca oslanja na tlo. Uporedo sa merenjem vertikalnog pomeranja šipa komparaterima, vršeno je i geodetsko merenje vertikalnog pomeranja preko dve tačke na naspramnim stranama glave šipa. Ispitivanje šipa izvršeno je u jednom ciklusu do maksimalne sile koja je iznosila  $Q_{max} = 7750$  kN. Rezultati opita probnog opterećenja šipa prikazani su na Slici 9.



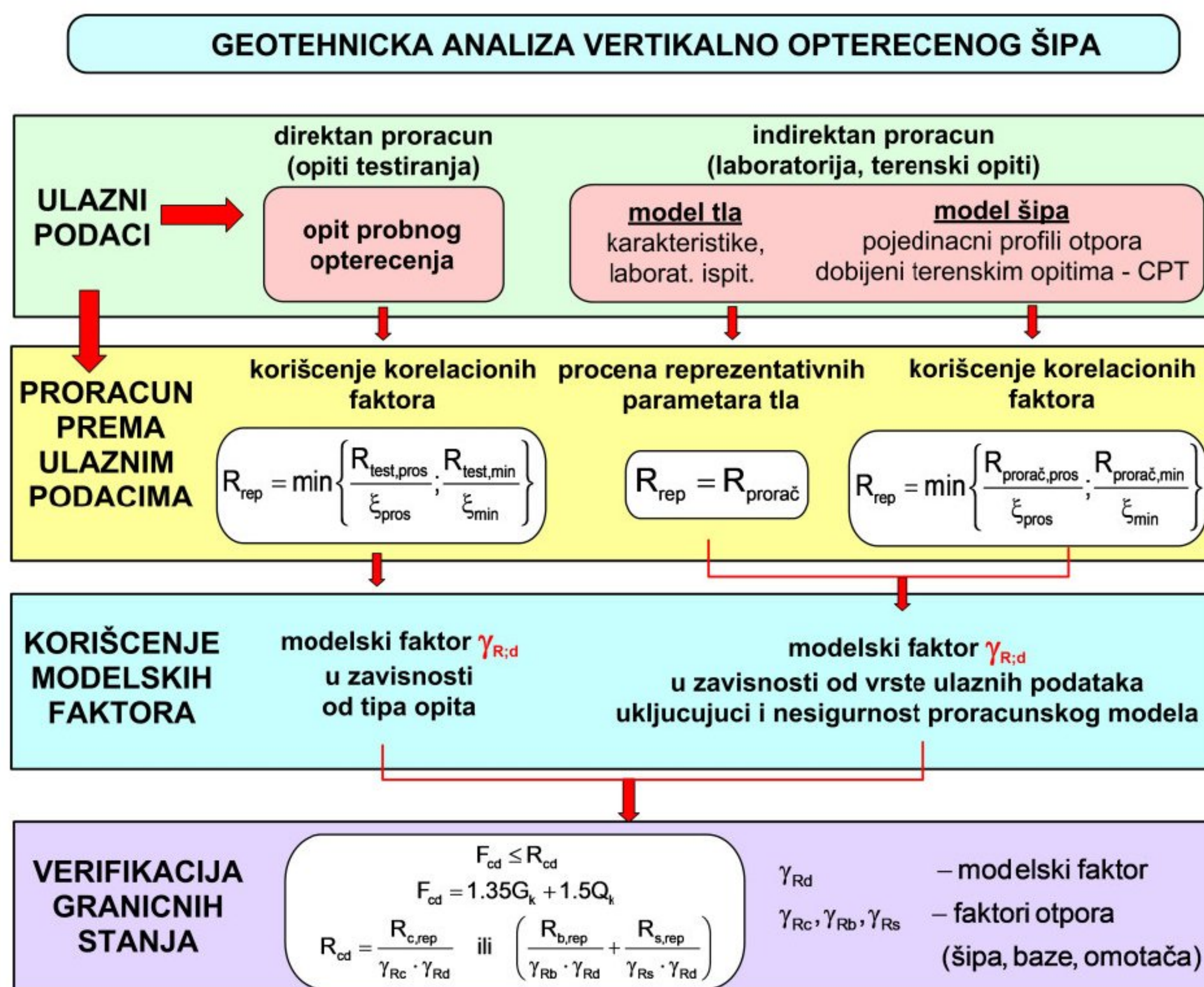
**Slika 9.** Prikaz rezultata probnog opterećenja šipa

Pri opterećenju vrednost svakog inkrementa aplicirane sile održavana je na konstantnoj vrednosti uz postizanje uslova brzine konsolidacije od 0.25mm/h. Pri svakom stupnju opterećenja, aplicirane sile su održavane na konstantnim vrednostima u vremenskim intervalima od 30 min. do 120 min, dok su vremenski intervali za dva stupnja rasterećenja održavani po 15 min, a za potpuno rasterećenje primenjen je vremenski period od 60 min.

## 5. GEOTEHNIČKA ANALIZA VERTIKALNO OPTEREĆENOG ŠIPA

Prilikom analize vertikalno opterećenog šipa, korišćeni su rezultati opita testiranja (opit probnog opterećenja šipa) kao i opšte prihvaćene indirektno zasnovane na modelima tla (laboratorijski određenim parametrima čvrstoće smicanja) i modelima šipa (korišćenjem rezultata CPT opita). Opšta primenjena metodologija proračuna prikazana je na Slici 10.





Geotehnička analiza urađena je u skladu sa standardom SRPS EN 1997-1, uzimajući u obzir nacionalni prilog koji podrazumeva korišćenje projektnog pristupa DA-2, sa sledećom kombinacijom skupova parcijalnih koeficijenata [3], [11]:

$$"A1" + "M1" + "R2" \quad (1)$$

Za potrebe proračuna neophodno je poznavanje vrednosti parcijalnih koeficijenata za dejstva ( $\gamma_F$ ) i uticaje dejstva ( $\gamma_E$ ), za parametre tla ( $\gamma_M$ ) i za koeficijente otpora ( $\gamma_R$ ). Vrednosti ovih koeficijenata prikazane su u Tabeli 2, dok je predložena vrednost modelskog faktora prema nacionalnom prilogu SRPS EN 1997-1/NA,  $\gamma_{Rd} = 1.5$  [11].

**Tabela 2. Vrednosti parcijalnih koeficijenata prema nacionalnom prilogu SRPS EN 1997-1/NA**

Dejstva „A1“		Parametri tla „M1“				Otpori za šipove „R2“		
stalno	povremeno	zap. tež.	ugao unutrašnjeg trenja	kohezija	nedr. kohezija	šip	baza	omotač
( $\gamma_G$ )	( $\gamma_Q$ )	( $\gamma_\gamma$ )	( $\gamma_\phi'$ )	( $\gamma_c'$ )	( $\gamma_{cu}$ )	( $\gamma_t$ )	( $\gamma_b$ )	( $\gamma_s$ )
1.35	1.5	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1

### 5.1. Analiza rezultata probnog opterećenja šipa

Kada se analiza vrši na osnovu rezultata probnog opterećenja šipa, dobijene vrednosti se redukuju u zavisnosti od broja izvedenih opita probnog opterećenja, preko korelacionih faktora  $\xi_1$  i  $\xi_2$  čije se vrednosti kreću od min.  $\xi_1 = \xi_2 = 1.0$  do max.  $\xi_1 = \xi_2 = 1.4$  (EN 1997 -1:2004 Tabela A.9.) i to prema sledećim jednačinama

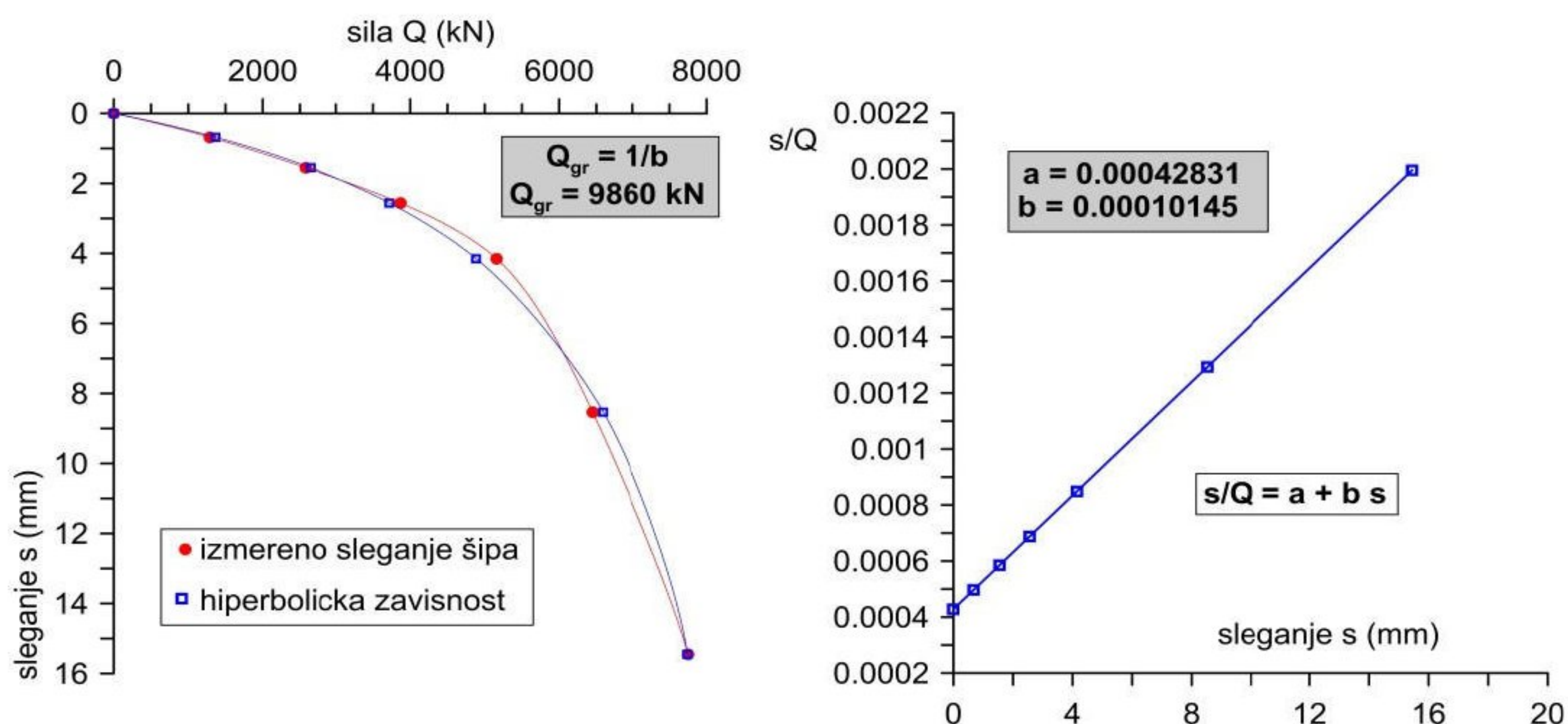
$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t}; \quad R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,m})_{sred}}{\xi_1}, \frac{(R_{c,m})_{min}}{\xi_2} \right\} \quad (2)$$

gde je:  $(R_{c,m})_{sred}$  – srednja vrednost graničnih nosivosti šipa u odnosu na broj opita probnog opterećenja, a  $(R_{c,m})_{min}$  – dobijena minimalna vrednost granične nosivosti šipa iz izvedenih opita probnog opterećenja.

Sa Slike 9 se može videti da šip tokom probnog opterećenja nije dostigao granično opterećenje. Pojedine definicije loma za granično opterećenje šipa proglašavaju silu koja utisne šip za veličinu koja je jednaka nekom procentu prečnika šipa (EC7 predlaže 10 %) [5]. U ovom radu, interpretacija je izvršena korišćenjem



hiperboličkog odnosa između sile  $Q$  i sleganja šipa (Chin-Kondner, 1970), kao i na osnovu metode Decourta (1999) pomoću linije koja je dobijena linearnom regresijom para tačka u sistemu  $(Q/s; Q)$ . Rezultati sprovedene analize primenom hiperboličkog odnosa, prikazani su na Slici 11, gde sračunate vrednosti  $a$  i  $b$  predstavljaju parametre prave transformisane hiperbole, koji su dobijeni iz merenih veličina sleganja, pomoću metode najmanjih kvadrata [5], [6].

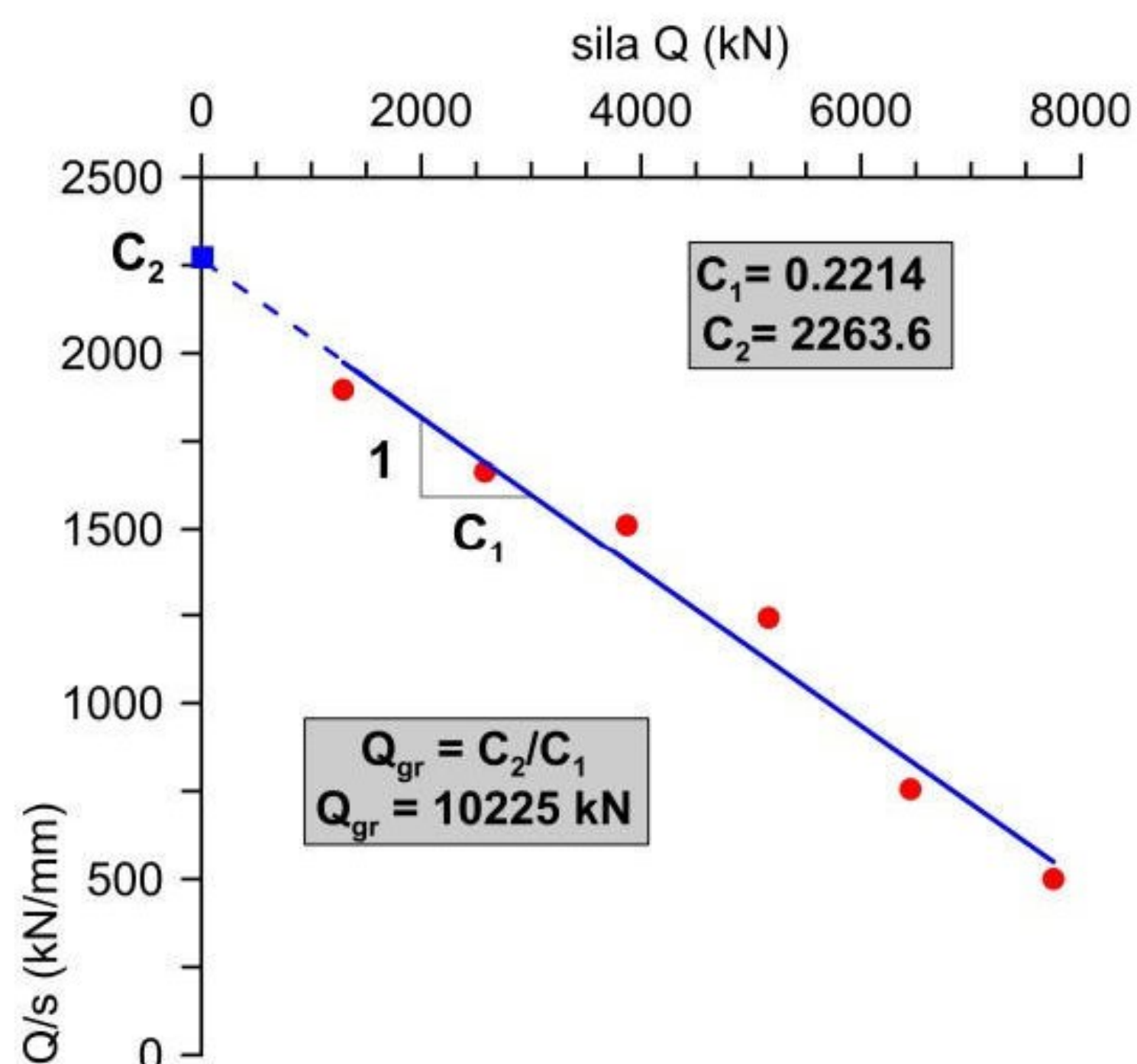


Slika 11. Prikaz definisanja graničnog opterećenja šipa na osnovu hiperboličke zavisnosti

Kako je na lokaciji nadvožnjaka izveden samo jedan opit probnog opterećenja šipa, to su vrednosti  $(R_{c,m})_{sred}$  i  $(R_{c,m})_{min}$  identične, kao i vrednosti korelacionih faktora  $\xi_1 = \xi_2 = 1.4$ . Prema projektom pristupu „DA2“, ovako dobijene vrednosti se koriguju i parcijalnim faktorom otpornosti  $\gamma_t = 1.1$ , pa je proračunska nosivost šipa:

$$R_{c;k} = \min \left\{ \frac{9860}{1.4} \right\} = 7045 \text{ kN}; \quad R_{c;d} = \frac{7045}{1.1} = 6405 \text{ kN} \quad (3)$$

Rezultati sprovedene analize primenom metode Decourta [3], prikazani su na Slici 12, gde odnos sračunatih vrednosti koeficijenta  $C_1$  i  $C_2$  predstavlja graničnu nosivost šipa ( $Q_u = C_2/C_1$ ).



Slika 12. Prikaz definisanja graničnog opterećenja šipa korišćenjem Decourtove metode

$$R_{c;k} = \min \left\{ \frac{10225}{1.4} \right\} = 7300 \text{ kN}; \quad R_{c;d} = \frac{7300}{1.1} = 6635 \text{ kN} \quad (4)$$

## 5.2. Analiza šipa zasnovana na modelima tla – laboratorijska ispitivanja

Šipovi prenose opterećenje na tlo preko površine baze šipa i površine po omotaču šipa, pa se njihova nosivost računa na sledeći način:



$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t}; \quad R_{c,d} = \frac{R_{b,k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s,k}}{\gamma_s} \quad (5)$$

gde je:  $R_{b,k}$  - granična nosivost baze šipa,  $R_{s,k}$  – granična nosivost omotača šipa, a  $\gamma_t$ ,  $\gamma_b$ ,  $\gamma_s$ , su parcijalni faktori otpornosti za ukupnu nosivost odnosno pojedinačnu nosivost baze i omotača. Kada se za proračun koriste indirektno metode zasnovane na modelima tla (parametrima čvrstoće smicanja), granična nosivost baze, odnosno granična nosivost omotača šipa, izračunavaju se na sledeći način

$$R_{b,k} = A_b \cdot q_{b,k}; \quad R_{s,k} = \sum_i A_{s,i} \cdot q_{s,k,i} \quad (6)$$

gde je:  $q_{b,k}$  - granični pritisak tla u nivou baze šipa,  $q_{s,k}$  - granična vrednost otpora smicanja po omotaču šipa,  $A_b$  - površina baze šipa,  $A_s$  - površina omotača šipa. Ovako dobijene vrednosti se redukuju modelskim faktorom ( $\gamma_{R,d}$ ), čija je vrednost prema nacionalnom aneksu prSRPS EN 1997-1\_NA,  $\gamma_{R,d} = 1.5$ . Analiza je urađena korišćenjem Mayerhofog rešenja gde se karakteristične vrednosti graničnog opterećenja tla u nivou baze šipa, odnosno karakteristična otpornost trenjem duž omotača šipa, računaju na sledeći način

$$q_{b,k} = c'_k \cdot N_c^* + K_0 \cdot \sigma'_v \cdot N_q^*; \quad q_{s,k,i} = c'_{k,i} + K_{0,i} \cdot \sigma'_{v,i} \cdot \tan \varphi'_{k,i} \quad (7)$$

Rezultati sprovedene analize za oba geotehnička modela, prikazani su u Tabeli 3.

**Tabela 3.** Karakteristične nosivosti šipa prema analiziranim geotehničkim modelima tla

model tla	nosivost baze šipa		nosivost omotača šipa		proračunska nosivost šipa
	$R_{b,k}$ (kN)	$R_{b,d}$ (kN)	$R_{s,k}$ (kN)	$R_{s,d}$ (kN)	$R_{c,d}$ (kN)
GTM-1	3975	2410	6725	4075	6485
GTM-2	4275	2590	6730	4080	6670

U slučaju da se granična nosivost šipa analizira preko ukupnih napona, čvrstoća se izražava preko nedrenirane kohezije  $c_u$ . U tom slučaju najčešće se primenjuje  $\alpha$  metoda za definisanje granične nosivosti smičuće otpornosti po omotaču šipa, dok se granična nosivost baze šipa računa kao i u slučaju plitkih temelja, na sledeći način

$$q_{b,k} = N_c \cdot c_u + \sigma_v \quad q_{s,k,i} = \alpha_{u,i} \cdot c_{u,i} \quad (8)$$

gde je  $\alpha_u$  adhezioni faktor, tj. koeficijent redukcije nedrenirane smičuće čvrstoće na kontaktu tla i omotača šipa. On se kreće u relativno širokim granicama zbog različite osetljivosti sitnozrnog tla na lokaciji ispitivanja, i posebno se daje za pobijene, a posebno za bušene šipove (u radu je primenjena metoda API [1], [2]). Analiza je sprovedena samo za GTM 1, s obzirom da istraživanjima koja su rađena za studiju izvodljivosti, nedrenirana čvrstoća smicanja nije određivana. Rezultati su prikazani u Tabeli br. 4.

**Tabela 4.** Granična nosivosti šipa za nedrenirane uslove (ukupni naponi)

model tla	nosivost baze šipa		nosivost omotača šipa		proračunska nosivost šipa
	$R_{b,k}$ (kN)	$R_{b,d}$ (kN)	$R_{s,k}$ (kN)	$R_{s,d}$ (kN)	$R_{c,d}$ (kN)
GTM-1	4120	2495	5750	3485	5980

### 5.3. Analiza nosivosti na osnovu modela šipa – rezultati CPT opita

Analiza nosivosti šipa na osnovu modela šipa, tj. korišćenjem pojedinačnih profila dobijenih terenskim opitom statičke penetracije – CPT, izvršena je primenom metode Bustamante & Ganeselli (poznata i kao LCPC metoda, 1982), gde se karakteristične vrednosti graničnog opterećenja tla u nivou baze šipa, odnosno karakteristična otpornost trenjem duž omotača šipa, računaju na sledeći način

$$q_{b,k} = q_{cb} \cdot k_b; \quad q_{s,k,i} = \frac{q_{cs,i}}{k_{s,i}} \quad (9)$$

U gornjim jednačinama su  $k_b$  i  $k_s$  bezdimenzioni koeficijenti koji zavise od vrste tla i njegove penetracione otpornosti. Za otpornost tla u nivou baze šipa, usvaja se srednja aritmetička vrednost merena na visini



između +aD iznad baze i –aD ispod baze šipa, uz prethodnu korekciju krive. S obzirom da su oba opita završena u sloju lapora glinovitih iznad baze šipa, vrednost  $q_c$  je usvojena prema modelima prikazanim na Slici 7, tj. usvojeno je  $q_c = 12$  MPa. Otpornost duž omotača šipa zavisi od vrste tla i izmerenog otpora vrha konusa, uz napomenu da je za sve sredine definisana maksimalna vrednost koja zavisi od načina izvođenja šipa i vrste tla.

Sam postupak proračuna je sličan postupku probnog opterećenja šipa. I u ovom slučaju se dobijene vrednosti redukuju u zavisnosti od broja analiziranih modela šipa koji se formiraju na osnovu CPT opita. Međutim, vrednosti korelacionih faktora su nešto drugačije i za slučaj analize dva modela šipa oni su  $\xi_3 = 1.35$ , odnosno  $\xi_4 = 1.27$  (prSRPS EN 1997 -1/NA Tabela A.10.), tako da se granična nosivost šipa računa prema sledećim jednačinama

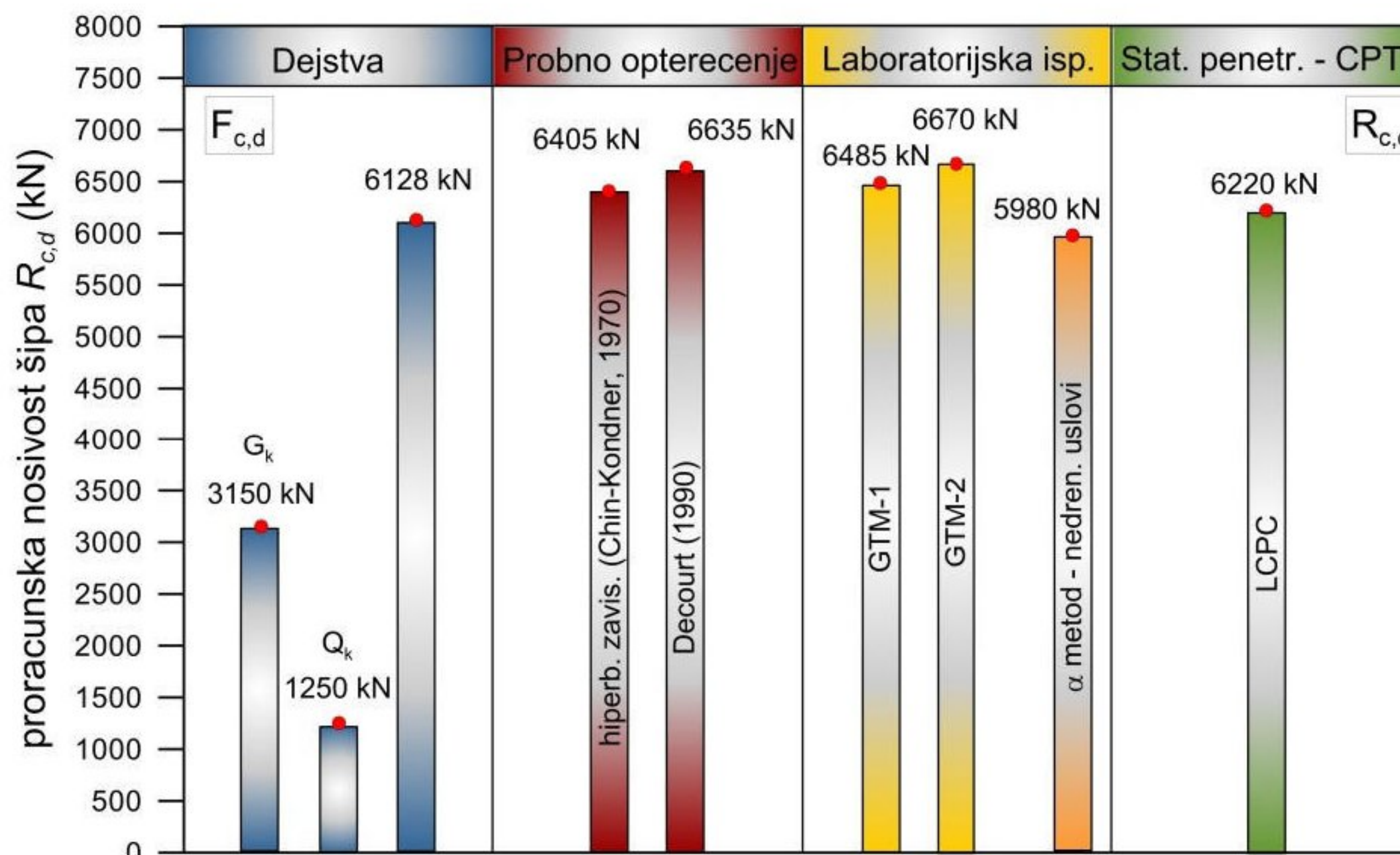
$$R_{c,d} = \frac{R_{b,k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s,k}}{\gamma_s}; \quad R_{b,k} = \min \left\{ \frac{(R_{b,m})_{sred.}}{\xi_3}, \frac{(R_{b,m})_{min}}{\xi_4} \right\}; \quad R_{s,k} = \min \left\{ \frac{(R_{s,m})_{sred.}}{\xi_3}, \frac{(R_{s,m})_{min}}{\xi_4} \right\} \quad (10)$$

Kada se za proračun koristi više modela šipa, onda se računa prosečna kao i minimalna vrednost nosivosti baze i nosivosti omotača za svaki model šipa, a kao krajnji rezultat usvaja se manja vrednost. Rezultati sprovedene analize za oba modela šipa koji su prikazani na Slici 7, dati su u Tabeli 4.

**Tabela 4.** Karakteristične nosivosti šipa prema analiziranim modelima šipa

model tla	nosivost baze šipa		nosivost omotača šipa		proračunska nosivost šipa
	$R_{b,k}$ (kN)	$R_{b,d}$ (kN)	$R_{s,k}$ (kN)	$R_{s,d}$ (kN)	$R_{c,d}$ (kN)
CPT-3	4070		5290		
CPT-4	4070		5045		
Sred.	4070	2740	5170	3480	
Min.	4070	2915	5045	3610	
$R_{c,d}$ (kN)					6220

U prethodnim analizama nisu prikazani uticaji efekta opterećenja, koji se u proračun uvode preko parcijalnih faktora dejstva ( $\gamma_F$ ). Granično stanje loma provereno je za slučaj stalnog dejstva – parcijalni faktor  $\gamma_G$  i za slučaj promenljivog dejstva – parcijalni faktor  $\gamma_Q$ . Analiza je urađena za stalno opterećenje od  $G_k = 3150$  kN i za promenljivo opterećenje od  $Q_k = 1250$  kN. Zbirni prikaz rezultata proračunske nosivosti šipa ( $R_{c,d}$ ), u zavisnosti od primenjenih metoda proračuna, prikazan je na Slici 13.



**Slika 13.** Zbirni prikaz rezultata proračunske nosivosti šipa u zavisnosti od metoda proračuna

Sa slike se vidi da dobijene vrednosti variraju u zavisnosti od ulaznih podataka, ali su proračunske nosivosti šipa u svim analiziranim slučajevima za efektivno naponsko stanje, veće od proračunske vrednosti aksijalne sile pritiska ( $F_{c,d}$ ), bez obzira da li su primenjene direktne ili indirektno metode proračuna ( $F_{c,d} \leq R_{c,d}$ ). Treba napomenuti da je prilikom analize zanemarena težina šipa, s obzirom da šip ne izlazi iznad površine terena i da se ne očekuje uticaj negativnog trenja.



## 6. ZAKLJUČAK

Analize su urađene prema graničnim stanjima u skladu sa SRPS EN 1997-1:2017 standardom, odnosno predlogom nacionalnog anaksa prSRPS EN 1997-1/NA 2020. Koristeći preporuke koje su date u EC 7, dobijeni rezultati na osnovu rezultata laboratorijskih ispitivanja i rezultata opita statičke penetracije (CPT), pokazali su relativno dobro slaganje sa rezultatima probnog opterećenja šipa.

Treba naglasiti da je EC 7 standard uveo novi koncept projektovanja/proračuna preko „graničnih stanja“. Suština koncepta „graničnih stanja“ jeste izbegavanje njihovog prekoračenja. Prekoračenje graničnog stanja podrazumeva da konstrukcija/građevina više ne ispunjava relevantne kriterijume za projektovanje.

Prva generacija EC 7 standarda se uveliko primenjuje u praksi, ali se očekuju i određena unapređenja, s obzirom da je objavljena i draft verzija druge generacije EC 7 standarda. U vezi sa tim tokom 2022.i 2023. god. održano je i nekoliko webinarara („Webinar on pile design in the second generation of Eurocode 7“), a očekuje se da će konačna verzija biti objavljena tokom 2026. god. Objavlivanjem druge generacije EC 7 standarda, aktuelna verzija (koja sadrži dva dela: opšta pravila i uputstva vezana za istraživanje i ispitivanje terena) će pretrpeti i određene izmene i dopune. Druga generacija EC 7 standarda, sadržaće tri dela i to: opšta pravila EN 1997-1: 2024 (dopunjena opisom materijala, uticajima podzemne vode, geotehničkim analizama i dr.), svojstva tla EN 1997-2: 2024 (daju se novine i uputstva za istraživanje terena, načinu prikupljanja informacija, pripremi proračunskih modela i dr.) i geotehničke konstrukcije EN 1997-3: 2024 (koji predstavlja novi deo sa prikazom posebnih pravila koja se koriste za projektovanje i verifikaciju geotehničkih konstrukcija). U okviru trećeg dela i to u poglavlju 6 prikazana su i pravila koja se odnose na fundiranje objekata na šipovima.

## Literatura

- [1] American Petroleum Institute (API). 2014. *Recommended practice 2A-WSD, Planning, designing and constructing fixed offshore platforms-Working stress design*, 22th ed. American Petroleum Institute. pp. 310.
- [2] Cherubini, C., Vessia, G. 2007. Reliability approach for the side resistance of piles by means of the total stress analysis ( $\alpha$  Method). *Canadian Geotechnical Journal*, No 44, pp. 1378-1390.
- [3] Decourt, L. (1999). Behavior of foundations under working load conditions. *Proceedings of the Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Brazil, Vol. 4.* pp 453-488.
- [4] Frank, R. (2008). Evaluation of Eurocode 7 – Two pile foundation design examples, *International seminar on EUROCODE 7 and geotechnical aspects of EUROCODE 8*, Struga, R. Macedonia, pp. 88-96.
- [5] Rakić, D., Ćorić, S. and Šušić, N. (2010). Application of EC 7 standards in defining geotechnical conditions for the kiln foundation of cement factory “Holcim – Serbia”, *Proceedings of the 14th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering DECGE2010*, Bratislava, Slovakia, CD-Session 2.
- [6] Rakić, D., Šušić, N., Basarić, I., Đoković, K., Berisavljević, D. (2014). Load test of Large Diameter Piles for the Bridge Across Danube River in Belgrade, *15th Danube-European Conference on Geotechnical Engineering DECGE2014 – “Geotechnics of Roads and Railways”*, Vienna, Austria, Conference Proceedings Volume 2, pp. 867-872.
- [7] Rakić, D.; Berisavljević, Z.; Basarić, I.; Lazić, M.; Stevanović, M. (2017). Opšti geotehnički uslovi izgradnje autoputa E-80 Niš – Merdare, Deonica: Niš – Pločnik, II Deo, *Zbornik radova VII naučno-stručnog međunarodnog savetovanja: Geotehnički aspekti građevinarstva*, 83-92.
- [8] Rakić, D.; Berisavljević, Z.; Basarić, I.; Lazić, M.; Stevanović, M. (2018). Inženjerskogeološki uslovi izgradnje prve deonice autoputa Niš – Merdare, *Zbornik radova - CD (Book of papers - CD)*, Treći Srpski kongres o putevima, Beograd, str. 12-23.
- [9] Rakić, D.; Berisavljević, Z.; Basarić, I.; Bogdanović, S.; Janković, J. (2019). Geotechnical zoning of the terrain along the first section of E-80 highway in Serbia – SEETO route 7”, *Proceedings of the XVII European Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering ECSMGE-2019, Geotechnical Engineering foundation of the future*, Reykjavik, Iceland.
- [10] Rakić, D.; Božović, N.; Stevanović, M.; Bogdanović, M. (2023). “Analiza nosivosti vertikalno opterećenog šipa za potrebe izgradnje petlje „Merošina 1“ na autoputu E-80 Deonica: Niš - Merošina“, *Zbornik radova međunarodnog naučno-stručnog savetovanja – Zemljotresno inženjerstvo i geotehnički aspekti građevinarstva*, Vrnjačka Banja, str. 392-403.
- [11] SRPS EN 1997-1 Evrokod 7: Geotehničko projektovanje – Deo 1: Opšta pravila.