

Geotehnički uslovi izgradnje metro stanice „Savski trg“ – beogradski metro linija 1; Geotechnical Conditions for the Construction of the "Savski Trg" Metro Station as Part of the Belgrade Metro Line 1

Dragoslav Rakić, Nemanja Stanić, Josip Išek, Slavoljub Stojković



Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду

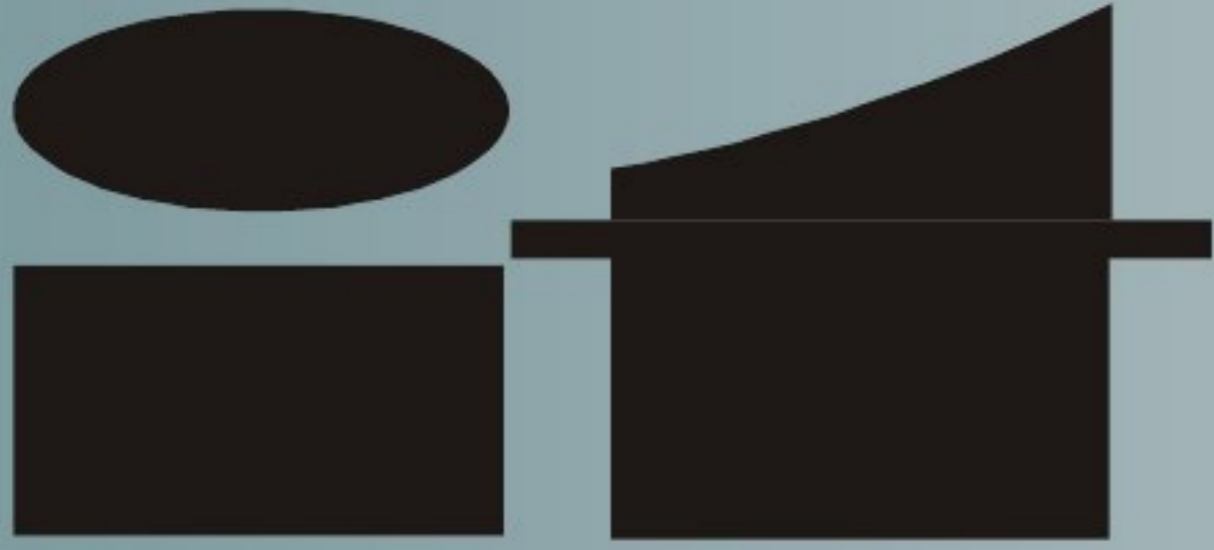
[ДР РГФ]

Geotehnički uslovi izgradnje metro stanice „Savski trg“ – beogradski metro linija 1; Geotechnical Conditions for the Construction of the "Savski Trg" Metro Station as Part of the Belgrade Metro Line 1 | Dragoslav Rakić, Nemanja Stanić, Josip Išek, Slavoljub Stojković | Geotehnički aspekti građevinarstva i zemljotresno inženjerstvo – Vrnjačka Banja, 01-03. novembar 2023. | 2023 | |

<http://dr.rgf.bg.ac.rs/s/repo/item/0008405>

Дигитални репозиторијум Рударско-геолошког факултета Универзитета у Београду омогућава приступ издањима Факултета и радовима запослених доступним у слободном приступу. - Претрага репозиторијума доступна је на www.dr.rgf.bg.ac.rs

The Digital repository of The University of Belgrade Faculty of Mining and Geology archives faculty publications available in open access, as well as the employees' publications. - The Repository is available at: www.dr.rgf.bg.ac.rs



**SAVEZ GRAĐEVINSKIH
INŽENJERA SRBIJE**

ASSOCIATION OF CIVIL ENGINEERS OF SERBIA

ZBORNIK RADOVA / PROCEEDINGS

**MEĐUNARODNO NAUČNO-STRUČNO SAVETOVANJE
INTERNATIONAL SCIENTIFIC FORUM**

**GEOTEHNIČKI ASPEKTI GRAĐEVINARSTVA
I ZEMLJOTRESNO INŽENJERSTVO**

GEOTECHNICAL ASPECTS OF CIVIL ENGINEERING AND EARTHQUAKE ENGINEERING



Vrnjačka Banja, 1-3. novembar 2023.

624.042.7(082)(0.034.2)
699.841(082)(0.034.2)
550.34(082)(0.034.2)

МЕЂУНАРОДНО научно-стручно саветовање Геотехнички аспекти грађевинарства и земљотресно инжењерство (2023 ; Врњачка Бања)

Zbornik radova Međunarodno naučno-stručnog savetovanja Geotehnički aspekti građevinarstva i zemljotresno inženjerstvo, Vrnjacka Banja, 01. - 03. novembar 2023. [Elektronski izvor] = Proceedings International Scientific Conference Geotechnical Aspects of Civil Engineering and Earthquake Engineering / [organizatori] Savez građevinskih inženjera Srbije ... [et al.] ; editor Radomir Folić. - Beograd : Savez građevinskih inženjera Srbije = Association of Civil Engineers of Serbia, 2023 (Beograd : Razvojno istraživački centar grafičkog inženjerstva). - 1 USB fleš memorija ; 7 x 2 x 1 cm

Sistemske zahteve: Nisu navedeni. - Nasl. sa naslovne strane dokumenta. - Radovi na srp. i engl. jeziku. - Tiraž 200. - Bibliografija uz svaki rad. - Abstracts.

ISBN 978-86-88897-17-4

a) Сеизмичке конструкције -- Зборници b) Геотехничке конструкције -- Зборници v) Земљотреси -- Зборници

COBISS.SR-ID 128354569

IZDAVAČ (PUBLISHER):

Savez građevinskih inženjera Srbije / *Association of Civil Engineers of Serbia*
Srbija, Beograd, Kneza Miloša 9/I, Tel. +381 (0) 11 32 30 357; +381 (0) 11 32 42 589

EDITOR / (Editor in Chief): Prof. emeritus dr Radomir FOLIĆ

TEHNIČKI UREDNIK / (Editor): Stoja TODOROVIĆ - Saška

Svi radovi u ovom zborniku radova su recenzirani. Stavovi izneti u ovoj publikaciji ne odražavaju nužno i stavove izdavača, programskog odbora ili editora.

TIRAŽ (Circulation): 200

ŠTAMPA (Printed by): Razvojno istraživački centar grafičkog inženjerstva, Beograd

Međunarodno naučno-stručno savetovanje "Geotehnički aspekti građevinarstva i zemljotresno inženjerstvo" organizovano je pod pokroviteljstvom. **Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije.**

33.	Dragoslav Rakić, Nemanja Stanić, Josip Išek, Slavoljub Simić (Srbija) GEOTEHNIČKI USLOVI IZGRADNJE METRO STANICE „SAVSKI TRG“ –BEOGRADSKI METRO LINIJA 1	380
34.	Dragoslav Rakić, Nikola Božović, Miloš Stevanović, Milan Bogdanović (Srbija) ANALIZA NOSIVOSTI VERTIKALNO OPTEREĆENOG ŠIPA ZA POTREBE IZGRADNJE PETLJE „MEROŠINA 1“ NA AUTOPUTU E-80 DEONICA: NIŠ – MEROŠINA	392
35.	L. Kuljansi, J. Lagendijk (Holandija) MECHANICALLY STABILISED WORKING PLATFORMS FOR WINDFARMS USING THE LATEST GENERATION OF STABILISING GEOGRIDS.....	404
36.	Boris Folić, Miloš Čokić, Radomir Folić (Srbija) STATIC LOAD INFLUENCE IN THE PILE CAP AND ALONG THE PILES.....	414
37.	Tanja Miladinović, Slavica Janković, Miroljub Živanović (Srbija) EGZOGENI GEODINAMIČKI PROCESI I POJAVE I OCENA STABILNOSTI TERENA U ZONI LINIJE 1 BEOGRADSKOG METROA ...	424
38.	Jelena Pejovic, Nina Serdar (Crna Gora) MODAL COMBINATION PATTERNS FOR NONLINEAR STATIC PUSHOVER ANALYSIS OF RC HIGH-RISE BUILDINGS	433
39.	Dragana Slavković, Toplica Novaković, Miloš Ranković, Miodrag Pisarević, Mihajlo Lazić, Vladimir (Србија) UTICAJ „WICK“ DRENOVA NA VREMENSKI TOK KONSOLIDACIONOG SLEGANJA NASIPA AUTO-PUTA KUZMIN – SREMSKA RAČA.....	441
40.	Katarina Popović, Slobodan Živaljević, Milovan Šoškić (Crna Gora) UTICAJ PARAMETARA PUKOTINSKIH SISTEMA NA STABILNOST KAMENIH KOSINA.....	451
41.	Arijon Mujalović, Miodrag Bujišić, Slobodan Živaljević (Crna Gora) PARAMETARSKA ANALIZA SLIJEGANJA POVRŠINE TERENA USLED TUNELSKOG ISKOPA U ZAVISNOSTI OD KARAKTERISTIKA STIJENSKE MASE I VISINE NADSLOJA	460
42.	Milorad Jovanovski, Jovan Br. Papić, Igor Peševski (Severna Makedonija) SOME ASPECTS OF GROUND MODELLING RELATED TO ROCK MASSES IN THE LIGHT OF EUROCODE 7 WITH PRACTICAL EXAMPLES.....	468
43.	Zoran Bonić, Elefterija Zlatanović, Nikola Romić, Nebojša Davidović, Nemanja Marinković, Branimir Stanković (Србија) UTICAJ INTERAKCIJE TEMELJ – TLO NA NOSIVOST NA PROBIJANJE TEMELJA SAMACA OD ARMIRANOG BETONA	478



SAVEZ GRAĐEVINSKIH INŽENJERA SRBIJE
ASSOCIATION OF CIVIL ENGINEERS OF SERBIA

GEOTEHNIČKI ASPEKTI GRAĐEVINARSTVA I ZEMLJOTRESNO
INŽENJERSTVO - Vrnjačka Banja, 01-03. novembar 2023.

Dragoslav Rakić¹, Nemanja Stanić², Josip Išek³, Slavoljub Simić⁴

GEOTEHNIČKI USLOVI IZGRADNJE METRO STANICE „SAVSKI TRG“ – BEOGRADSKI METRO LINIJA 1

Rezime: Ukrštanje linija 1 i 2 beogradskog metroa, planirano je na lokaciji “Savski trg” gde će se izgraditi zajednička metro stanica. Zbog složene konstrukcije objekta i različite dubine dijafragmi, koja na delu metro linije 2 iznosi preko 40 m, planirana je fazna izgradnja. U vezi sa tim u radu je prikazan način definisanja geotehničkog modela, kao i geotehnički proračuni u kojima su analizirani: fazni načini iskopa, filtraciona analiza, uticaj pornih i efektivnih napona na stabilnost dijafragme, horizontalna i vertikalna pomeranja kao i interakcija dijafragme i armiranobetonskih ploča.

Ključne reči: beogradski metro, metro stanica, geotehnički model, stabilnost dijafragme, horizontalna pomeranja, vertikalna pomeranja.

GEOTECHNICAL CONDITIONS FOR THE CONSTRUCTION OF THE "SAVSKI TRG" METRO STATION AS PART OF THE BELGRADE METRO LINE 1

Summary: The intersection of of lines 1 and 2 of the Belgrade metro is planned at the location of “Savski trg”, the location where a joint metro station will be built. Due to the complex structure construction and the different depths of diaphragms, the diaphragm on the part of the metro line 2 is more than 40 m deep, phased construction is planned. In this regard, the paper presents the manner of defining a geotechnical model as well as geotechnical calculations in which phased methods of excavation, filtration analysis, the influence of pore and effective stresses on the stability of the diaphragm, horizontal and vertical displacements, as well as interaction between diaphragms and reinforced concrete slab are analyzed.

Keywords: Belgrade metro, metro station, geotechnical model, diaphragm stability, horizontal displacements, vertical displacements.

¹ Prof. dr. dipl. inž. geol., Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet,
dragoslav.rakic@rgf.bg.ac.rs

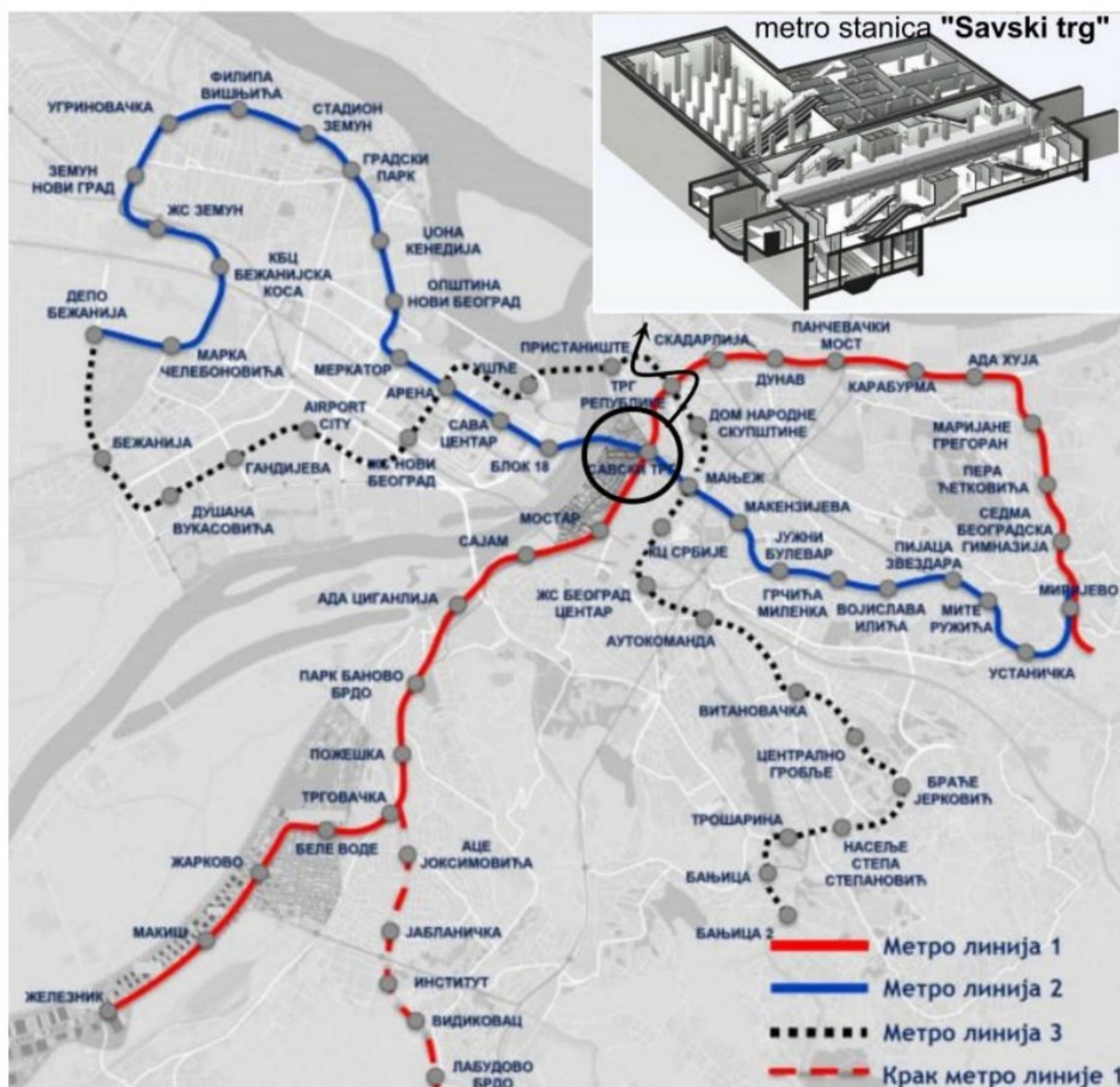
² Dipl. inž. geol., Hidrozavod DTD, Novi Sad

³ Dipl. inž. geol., JKP Beogradski metro i voz, Beograd

⁴ Dipl. inž. građ., JKP Beogradski metro i voz, Beograd

1. UVOD

Kako bi se rešili ozbiljni saobraćajni problemi u Beogradu, zadnjih pedeset godina se analizira mogućnost spuštanja saobraćaja ispod površine terena izgradnjom metroa. Počev od 1973 god., urađen je veći broj studija vezanih za izgradnju beogradskog metroa. Međutim, tek 2019 god., u okviru "Generalnog projekta izgradnje metroa", definisane su trase budućih metro linija 1 i 2. Njihova ukupna dužina iznosi 42.9 km, i na njima je planirana izgradnja 44 metro stanice (slika 1).



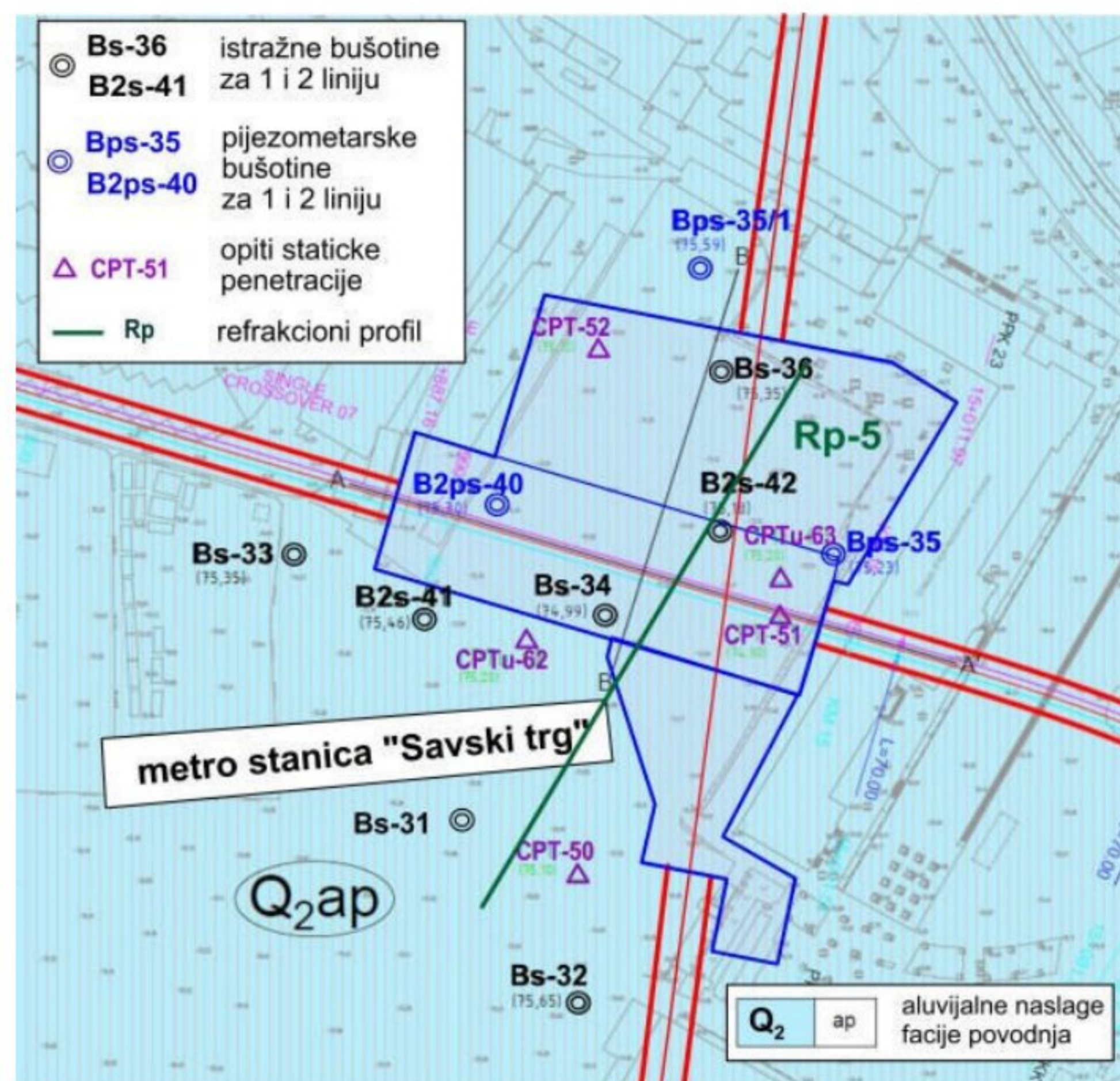
Slika 1. Šematski prikaz usvojenih trasa linija 1 i 2 beogradskog metroa

Geotehnička istraživanja za potrebe izgradnje linije 1 obavljena su tokom 2021 god., a istraživanja za liniju 2 obavljena su tokom 2022 god. Trenutno se zbog delimičnog izmeštanja dela trase linije 2, izvode nova geotehnička istraživanja. Ukrštanje ovih linija planirano je na lokaciji "Savski trg" gde će se izgraditi zajednička metro stanica (slika 1). Lokacija ove metro stanice je na mestu nekadašnjih perona Glavne železničke stanice.

Ova metro stanica predstavlja složeni geotehnički objekat koji čine tri različita dela: deo metro stanice u okviru linije 1, deo metro stanice u okviru linije 2 i zajednički deo za obe metro linije. Deo u okviru linije 1 i zajednički deo sadrže po tri armiranobetonske ploče koje obezbeđuju trajnu stabilnost armiranobetonskih dijafragmi, dok je na delu u sklopu linije 2 planirana izgradnja četiri armiranobetonske ploče [1].

2. OSNOVNE GEOLOŠKE KARAKTERISTIKE TERENA NA LOKACIJI METRO STANICE „SAVSKI TRG“

Da bi se definisala geološka građa i uradile geotehničke podloge za metro stanicu „Savski trg“, tokom 2021 i 2022 god., izveden je zavidan obim terenskih i laboratorijskih istraživanja. Kako se radi o metro stanici u kojoj će se ukrštati linija 1 i linija 2 beogradskog metroa, istraživanja su rađena fazno, odnosno 2021 god., istraživanja su urađena u sklopu linije 1, dok su u sklopu linije 2 istraživanja obavljena tokom 2022. god.



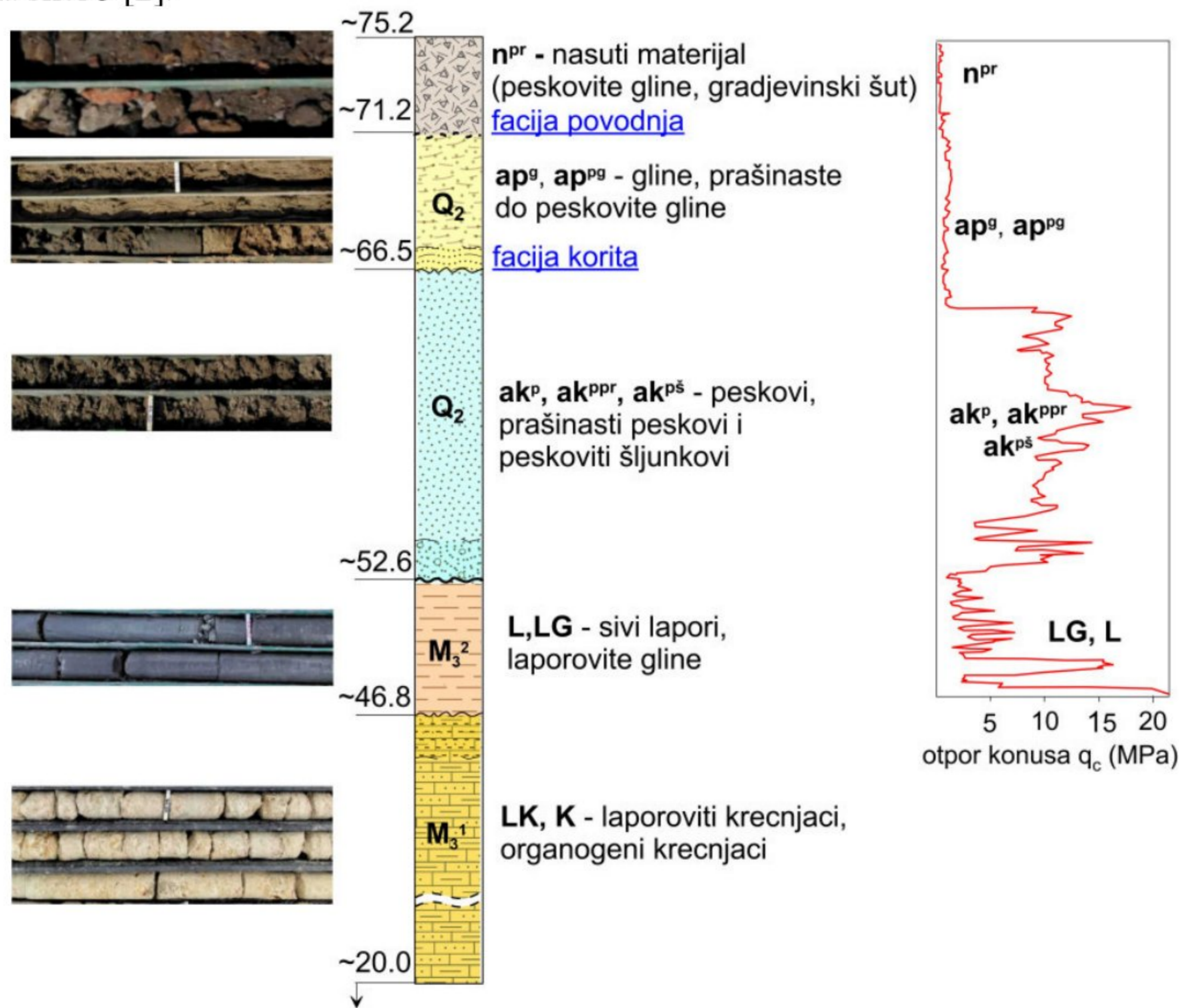
Slika 2. Inženjerskogeološka karta sa rasporedom istražnih radova

Terenska istraživanja koja su izvedena u užoj zoni metro stanice, prikazana su na slici 2, dok je zbirni prikaz svih istraživanja, uključujući i laboratorijska ispitivanja, prikazan u Tabeli 1 [2].

Geotehnički istražni radovi	Linija 1 (2021)	Linija 2 (2022)
Inženjerskogeološko kartiranje	inženjerskogeološka karta 1 : 2000	inženjerskogeološka karta 1 : 2000
Istražno bušenje	5 istražnih bušotina ukupne dužine 183 m	2 istražne bušotine ukupne dužine 94 m
Piježometarske bušotine	2 piježometra ukupne dužine 91.5 m	1 piježometar ukupne dužine 47 m
SPT opiti	18 opita	9 opita
CPT opiti	3 opita	2 opita
Geofizička ispitivanja	Refrakciona seizmika – Rp profil dužine 150 m	-
Laboratorijska geomehanička ispitivanja	26 uzoraka tla 17 uzoraka stenske mase	13 uzoraka tla

Tabela 1. Geotehnička istraživanja izvedena na lokaciji metro stanice „Savski trg“

U geomorfološkom pogledu lokacija metro stanice pripada ravničarskom delu priobalja Save. Do dubine od oko 55 m, utvrđene su sledeće inženjerskogeološke jedinice: sedimenti srednjeg i gornjeg Miocena, kvartarne tvorevine i savremeni antropogeni nanosi. Sedimente srednjeg Miocena (M_2^2) izgrađuju Badenski krečnjaci dok je gornji Miocen izgrađen od organogenih krečnjaka i laporovitih krečnjaka Sarmatske starosti (M_3^1) i sivih lapora i laporovitih glina Panonske starosti (M_3^2). Ovi Mioceni sedimenti čine neposrednu podinu savremenom aluvijalnom nanosu reke Save. Prema starosti i genezi, u okviru aluvijalnih naslaga izdvojeni su produkti samo mlađeg ciklusa rečne sedimentacije (Q_2). U okviru kvartarnih naslaga izdvojeni su sedimenti facije korita, facije povodnja, a povremeno i sedimenti starača i mrtvaja. U podinskom delu teren je pretežno izgrađen od krupnozrnih sedimenata (facije korita) predstavljeni peskovima i zaglinjenim šljunkovitim peskovima (ak^p , ak^{ppr} , $ak^{pš}$), koji se u nekim zonama ritmički smenjuju sa mlađim finozrnijim sedimentima (prašinski peskovi i prašinate glina). Sedimenti povodnja i mrtvaja izgrađeni su od sivosmeđih i sivih glina i prašinih do peskovitih glina (ap^g , ap^{pg} , a^m). U površinskim delovima sadržaj organske materije daje im tamno sivu boju što ukazuje na prisustvo baruštinskog depozita iz facije mrtvaje. Antropogene (tehnogene) naslage čine površinski pokrivač na čitavom delu proučavanog prostora (n^{pr}). Površinski nasip je formiran od peskovite gline i peska pomešanog sa drugim građevinskim materijalima (kamen, opeka, beton, šljaka i dr.). Njegova debljina je različita, a na lokaciji metro stanice je oko 5.5 m. Karakterističan geološki presek terena (stratigrafski stub) na lokaciji metro stanice "Savski trg," prikazan je na slici 3 [2].

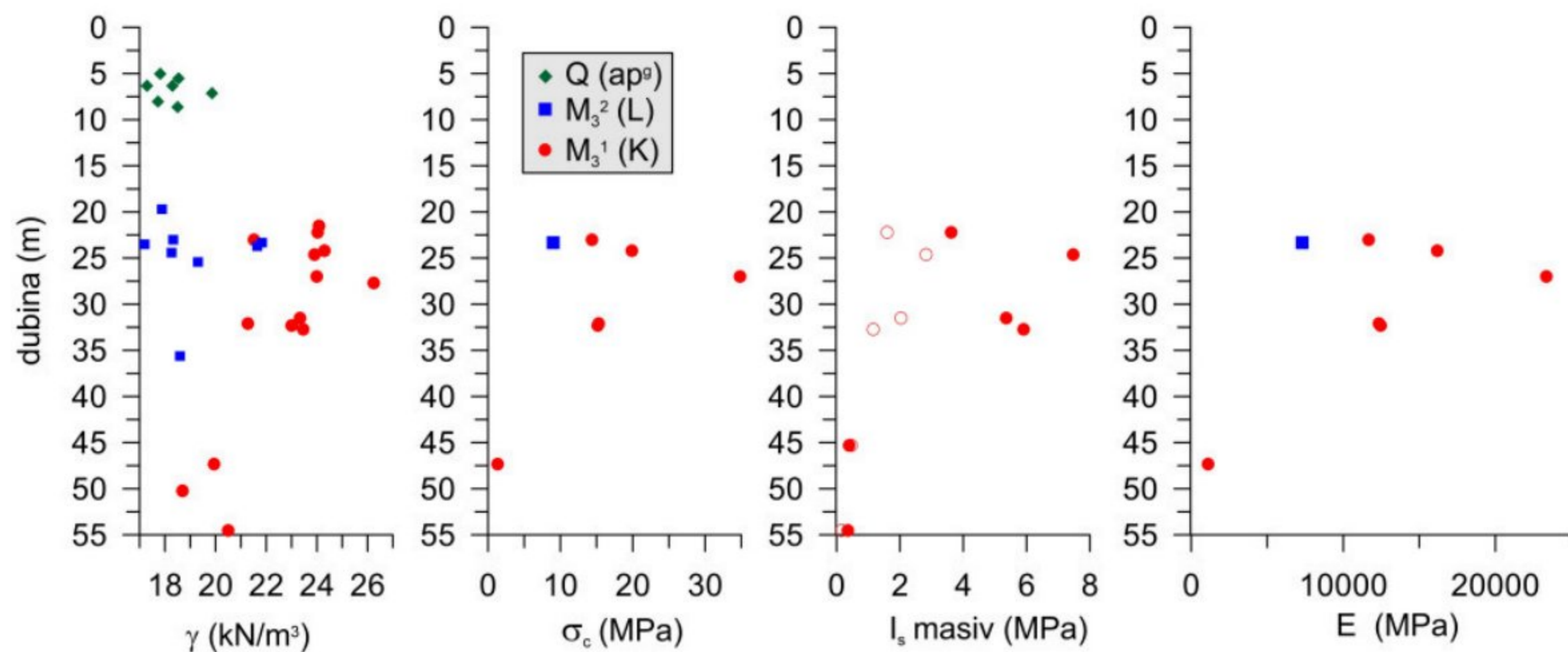


Slika 3. Uopšteni stratigrafski stub sa izgledom jezgra na lokaciji metro stanice

3. DEFINISANJE GEOTEHNIČKIH PARAMETARA ZA PRORAČUNSKI MODEL TERENA

Za definisanje fizičko-mehaničkih parametara prilikom formiranja geotehničkog modela, korišćeni su rezultati laboratorijskih i terenskih penetracionih ispitivanja (statičke - CPT i standardne - SPT penetracije). Laboratorijskim ispitivanjima uzoraka tla i stenskih masa, određivani su identifikaciono-klasifikacioni pokazatelji kao i otporno deformabilne karakteristike.

Rezultati jasno pokazuju da je kvalitet stenske mase najbolji u intervalu dubine između 25 – 35 m, gde su istražnim radovima utvrđeni organogeni Sarmatski krečnjaci. Prilikom iskopa, najvećim delom biće obuhvaćeni upravo Sarmatski sedimenti, s obzirom da prema predloženom rešenju zaštite, osnova potporne konstrukcija neće biti dublja od 50 m u odnosu na površinu terena. Zbirni prikaz pojedinih fizičko-mehaničkih parametara stenskih masa i tla, dobijeni na osnovu laboratorijskih ispitivanja, prikazan je na slici 4.



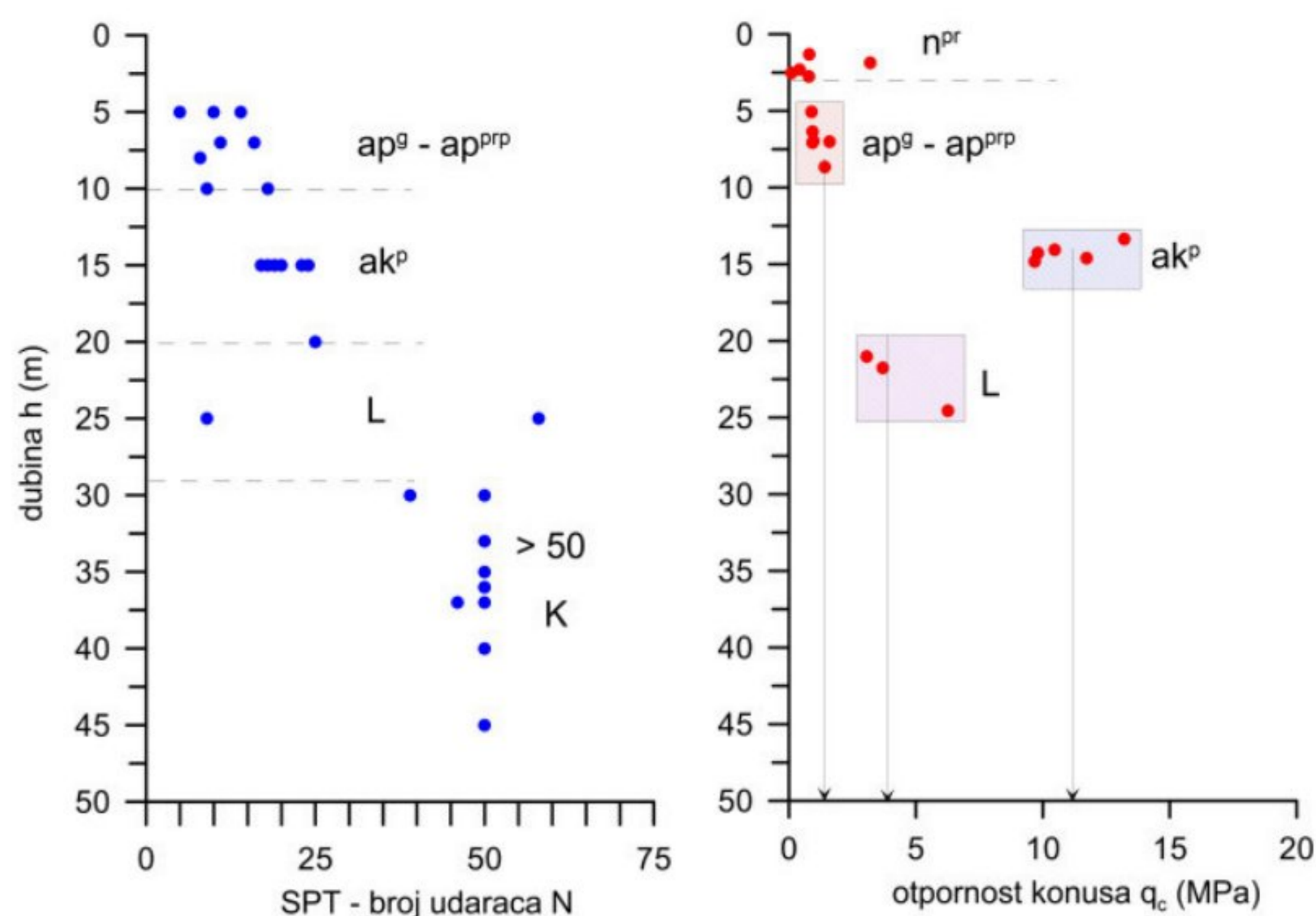
Slika 4. Prikaz pojedinih parametara tla i stenskih masa dobijen laboratorijskim ispitivanjima

Pored rezultata laboratorijskih ispitivanja, i rezultati terenskih ispitivanja, ukazuju da sa dubinom raste i otpornost i da je za glinovite sedimente broj udaraca dobijen SPT opitima $N < 15$ dok je za sredine koje sadrže i krupnozrne frakcija, otpornost nešto veće i kreće se do $N = 24$. Takođe, ujednačena otpornost u zavisnosti od litološke sredine, dobijena je i na osnovu rezultata statičke penetracije, uz jasno izraženo povećanje otpornosti konusa kada su u pitanju krupnozrne sredine (slika 5).

Bez obzira na izrazito rasipanje rezultata, za sitnozrne sedimente povodanjske facije (ap^g , ap^{pg}), a delimično i za zaglinjeni nasuti materijal, izvršena je procena stanja konzistencije odnosno nedrenirane čvrstoće smicanja. Prilikom usvajanja merodavnih vrednosti N i $(N_1)_{60}$, vodilo se računa o zoni terena za koju se definiše proračunski model. Nedrenirana čvrstoća smicanja iz SPT opita, definisana je na osnovu izraza $c_u = fN$, gde f zavisi od vrste tla i kreće se od 2 – 17.5 (Stroud 1974, Sivrikaya and Togrol 2006), dok je iz opita CPT, nedrenirana kohezija definisana na osnovu izraza $c_u = q_{c,net}/N_{kt}$ ($N_{kt} = 8-20$ za slabo konsolidovane gline, odnosno $N_{kt} > 20$ za tvrde i prekonsolidovane gline (Mayne, P.W., 2016, slika 6) [3], [6], [8]).

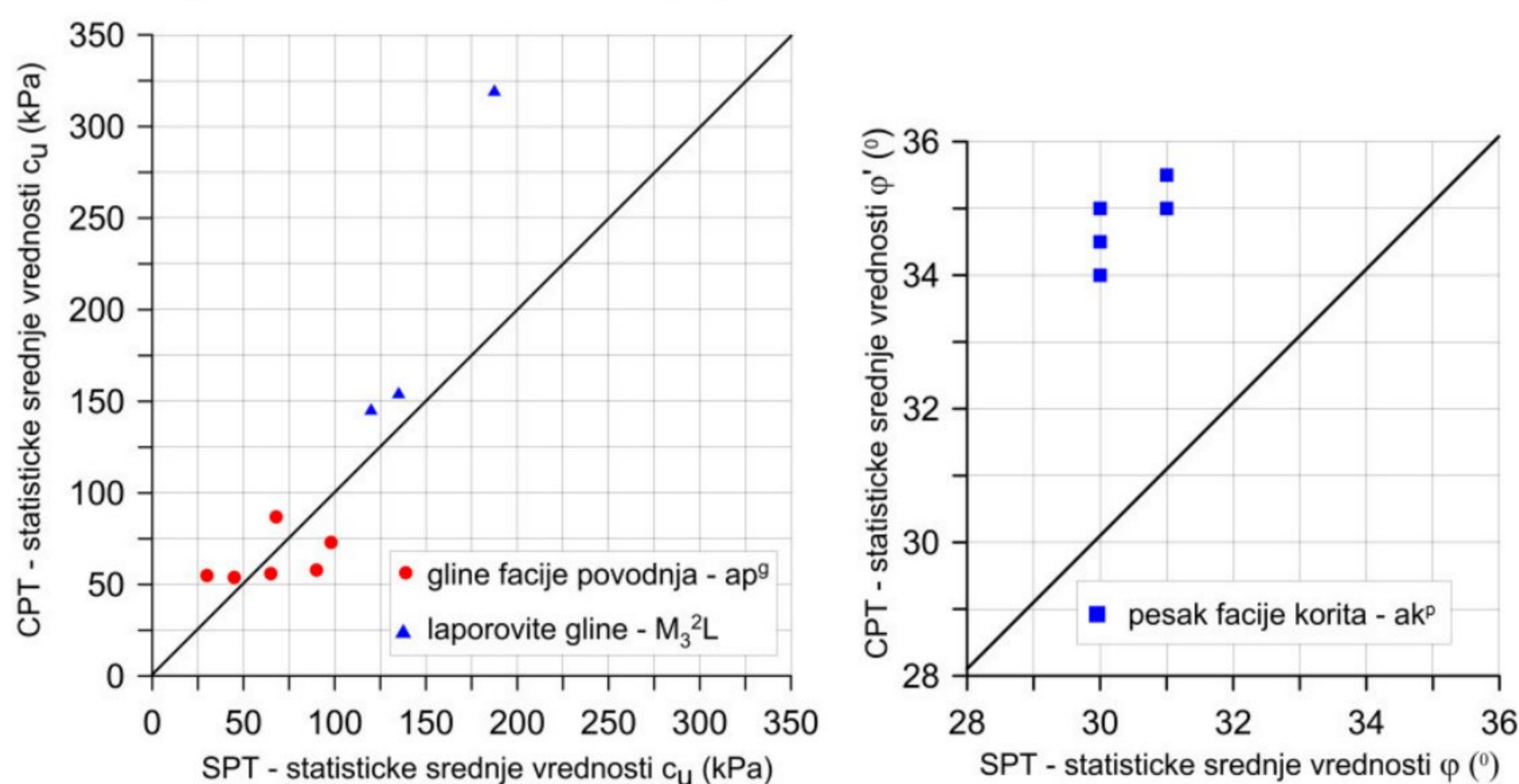
Parametri čvrstoće smicanja za peskovite sedimente facije korita, određivani su takođe na osnovu rezultata standardne i statičke penetracije. Za normalno konsolidovane

peskovite sedimente na osnovu vrednosti $(N_1)_{60}$, prvo je definisana relativna zbijenosti D_R , koja je iskorišćena za određivanje efektivnog ugla unutrašnjeg trenja (φ').



Slika 5. Zbirni prikaz otpornosti tla na osnovu SPT i CPT rezultata ispitivanja

Na sličan način dobijen je i ugao unutrašnjeg trenja iz opita statičke penetracije, korišćenjem Majerhofove relacije $\varphi' = 28 + 2.5(q_c)^{0.5}$, [4]. Za definisanje fizičko-mehaničkih parametara, korišćene su i preporuke EVROKODA 7-2.



Slika 6. Međuzavisnost parametara čvrstoće smicanja dobijenih iz SPT i CPT opita

Kako se radi o priobalnom delu reke Save, analizirana su i filtraciona svojstva terena, gde su definisane vrednosti koeficijenta filtracije na osnovu rezultata terenskih ispitivanja i to opitom vodopropustljivosti „Lefranc test“ i „Lugeon test“.

Prikazani parametri su omogućili da se za stenski materijal – sarmatski laporoviti i organogeni krečnjaci, primeni Hoek-Brown konstitutivni model, dok su parametri za ostale sredine definisani preko „Hardening soil“ konstitutivnog modela. Usvojene

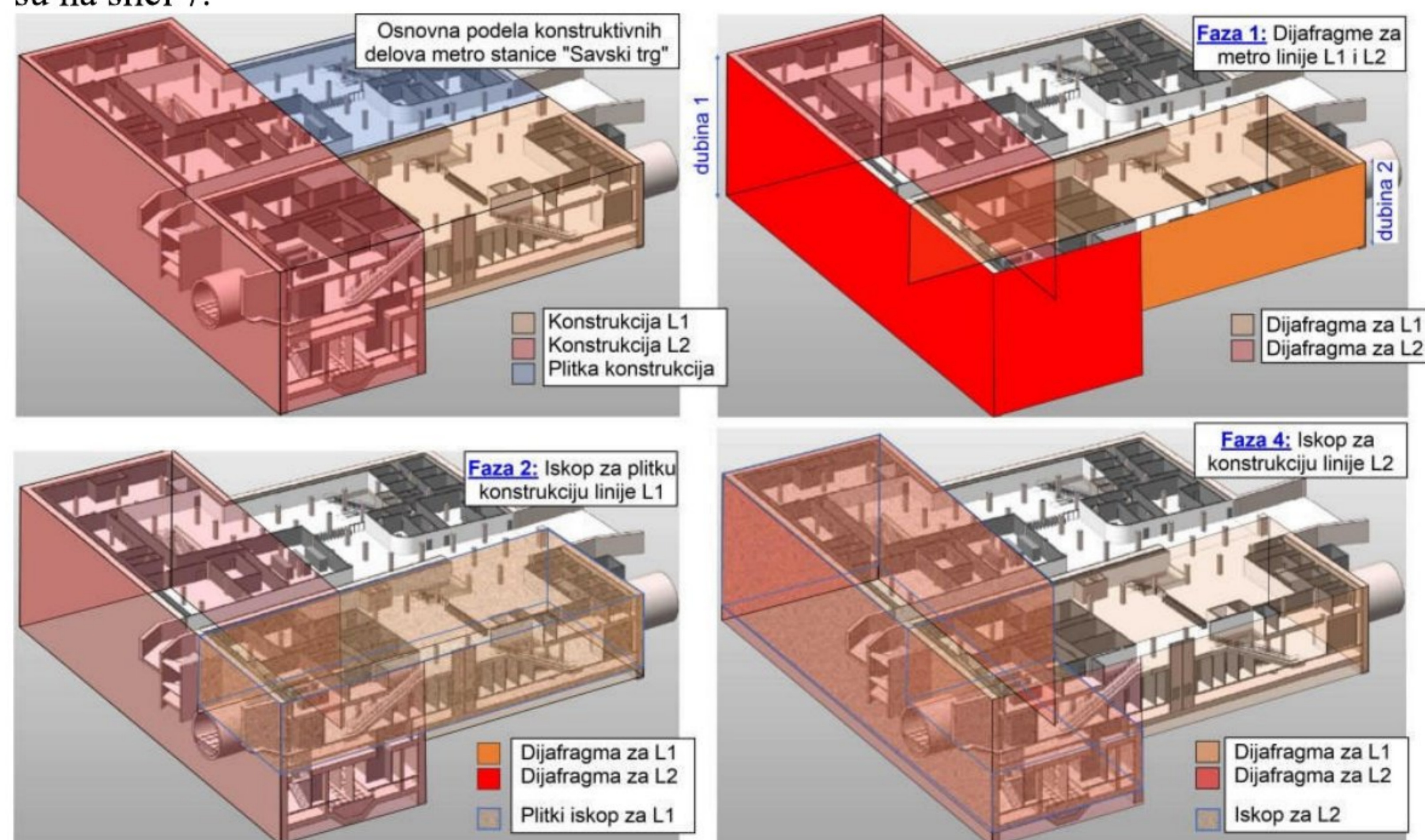
vrednosti fizičko-mehaničkih parametara za izdvojene sredine na lokaciji metro stanice, prikazane su u Tabeli 2.

Litološka jedinica	γ (kN/m ³)	c' (kN/m ²)	ϕ' (^o)	ν	E'_{opter}/E'_{raster} (MPa)	k_f (m/dan)	
Parametri tla							
nasip- n^{pr}	19	15	18	0.3	12/36	0.432	
povodanjske prašinate gline- ap^g	19	20	20	0.3	5/15	0.00388	
peskovi korita- ak^p	18.5	0	33	0.28	35/105	1.728	
Panonski sivi lapori- L	18.5	100	20	0.28	65/195	0.000864	
Parametri stenske mase							
	γ (kN/m ³)	σ'_{ci} (MPa)	m_i	GSI	ν	E'_{rm} (MPa)	k_f (m/dan)
Sarmatski organogeni krečnjaci- K	22.5	11	11	33	0.28	350	0.6048

Tabela 2. Usvojene vrednosti fizičko-mehaničkih parametara

4. GEOTEHNIČKA ANALIZA IZGRADNJE METRO STANICE

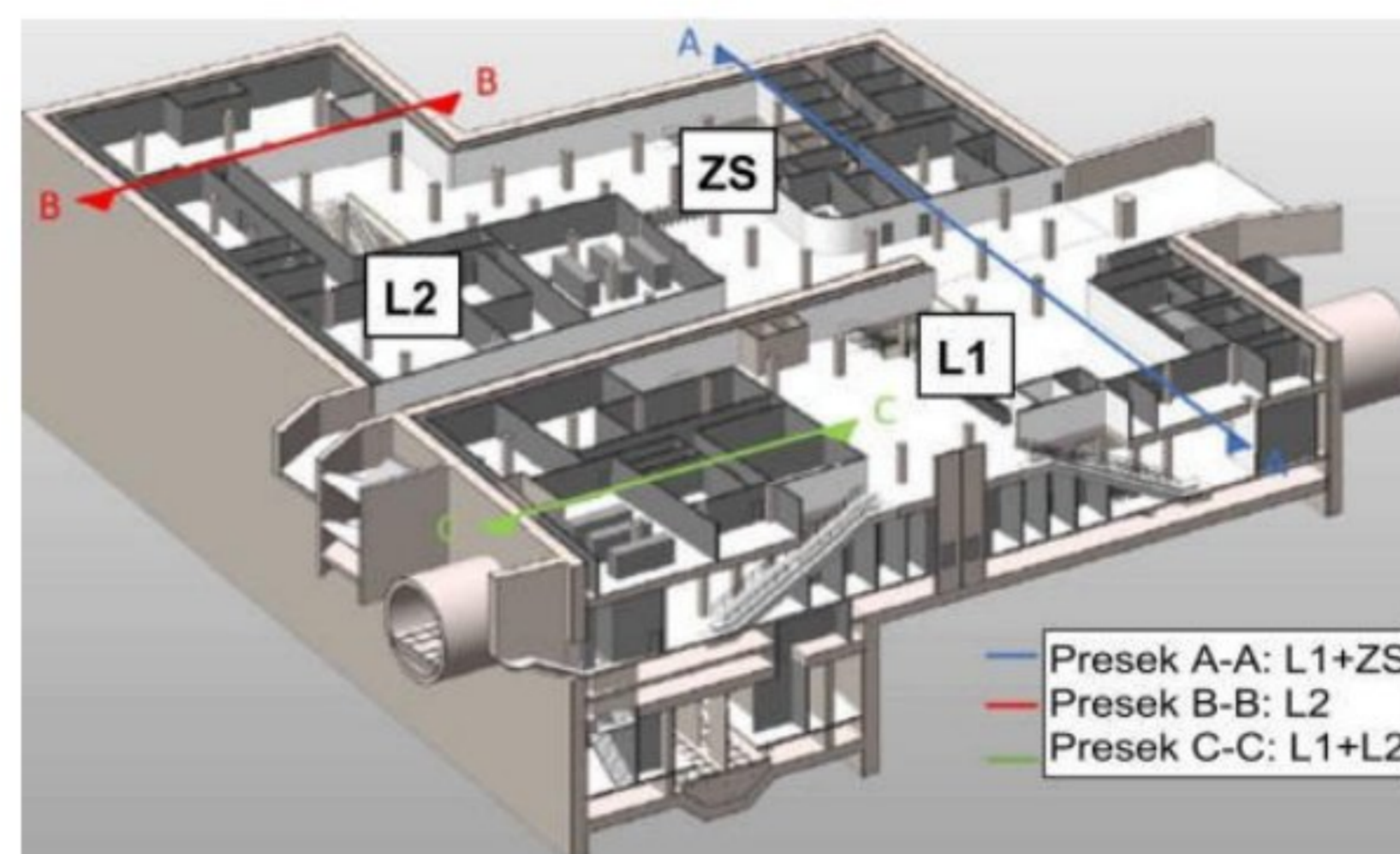
U pitanju je objekat složene konstrukcije, jer se u ovoj metro stanici ukrštaju Linije 1 i 2 beogradskog metroa, tako da je predviđena izgradnja po fazama. Prva faza podrazumeva izvođenje armiranobetonskih dijafragmi u okviru konstruktivnih delova koji pripadaju Linijama 1 i 2. Nakon toga planirane su faze iskopa i radovi na plitko ukopanom delu stanice koji će opsluživati Liniju 1, a nakon toga i faze za plitki deo Linije 2. Završna faza izgradnje plitkih objekata stanice podrazumeva građenje zajedničkog dela (plitkog boksa-kutije). Neke od karakterističnih faza građenja prikazane su na slici 7.



Slika 7. Prikaz osnovnih konstruktivnih delova sa karakterističnim fazama građenja metro stanice

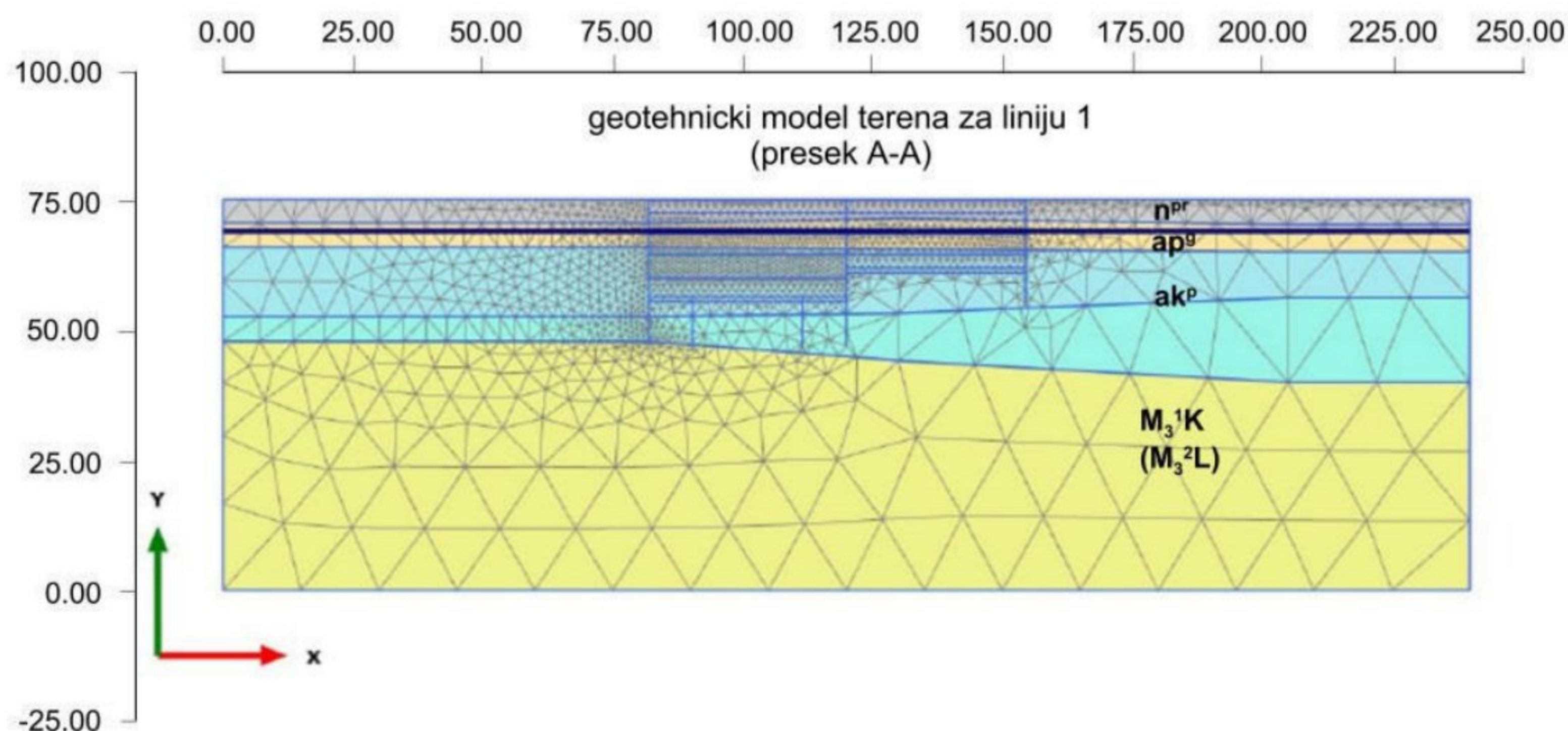
Treba napomenuti da sve tri konstruktivne jedinice, pored dijafragmi različitih dubina, sadrže i armiranobetonske ploče (za L1 i za zajednički plići deo po 3 AB ploče, a za L2 4 AB ploče) čija je funkcija trajno obezbeđenje dijafragmi. Po pravilu su to: temeljna AB ploča (debljine od 0.9-1.4m), donja i gornja AB međuploča (debljine po 0.9 m) i krovna AB ploča (debljine 1.3 m).

Geotehničke analize su urađene za tri karakteristična preseka (A-A, B-B i C-C), koji su prethodno definisani u skladu sa fazama građenja metro stanice. Poprečni presek A-A odgovara delu konstrukcije koji pripada Liniji 1 i plitkoj zajedničkoj konstrukciji. Poprečni presek B-B karakterističan je za konstrukciju koja pripada Liniji 2, dok poprečni presek C-C uključuje zajednički deo za obe Linije (slika 8).



Slika 8. Karakteristični poprečni preseki za koji su izvršene geotehničke analize

Na osnovu usvojenih vrednosti fizičko-mehaničkih parametara, definisani su različiti proračunski geotehnički modeli, prema kojima su izvršene analize u skladu sa fazama iskopa, a koje su uključile interakciju tla i različitih konstruktivnih sistema zaštite iskopa, kao što su dijafragme, razupirači i armiranobetonske ploče. Analizom je obuhvaćena stabilnost dijafragme uzimajući u obzir promene naponskih stanja u zavisnosti od hidroloških uslova, a definisane su i vrednosti horizontalnih i vertikalnih pomeranja. Treba napomenuti da su na geotehničkom modelu izvršena i određena uprošćavanja (litološka i geometrijska) koja nisu značajnije uticala na rezultate. Karakterističan numerički model terena, koji odgovara preseku A-A tj. delu metro stanice koji pripada Liniji 1, prikazan je na slici 9.

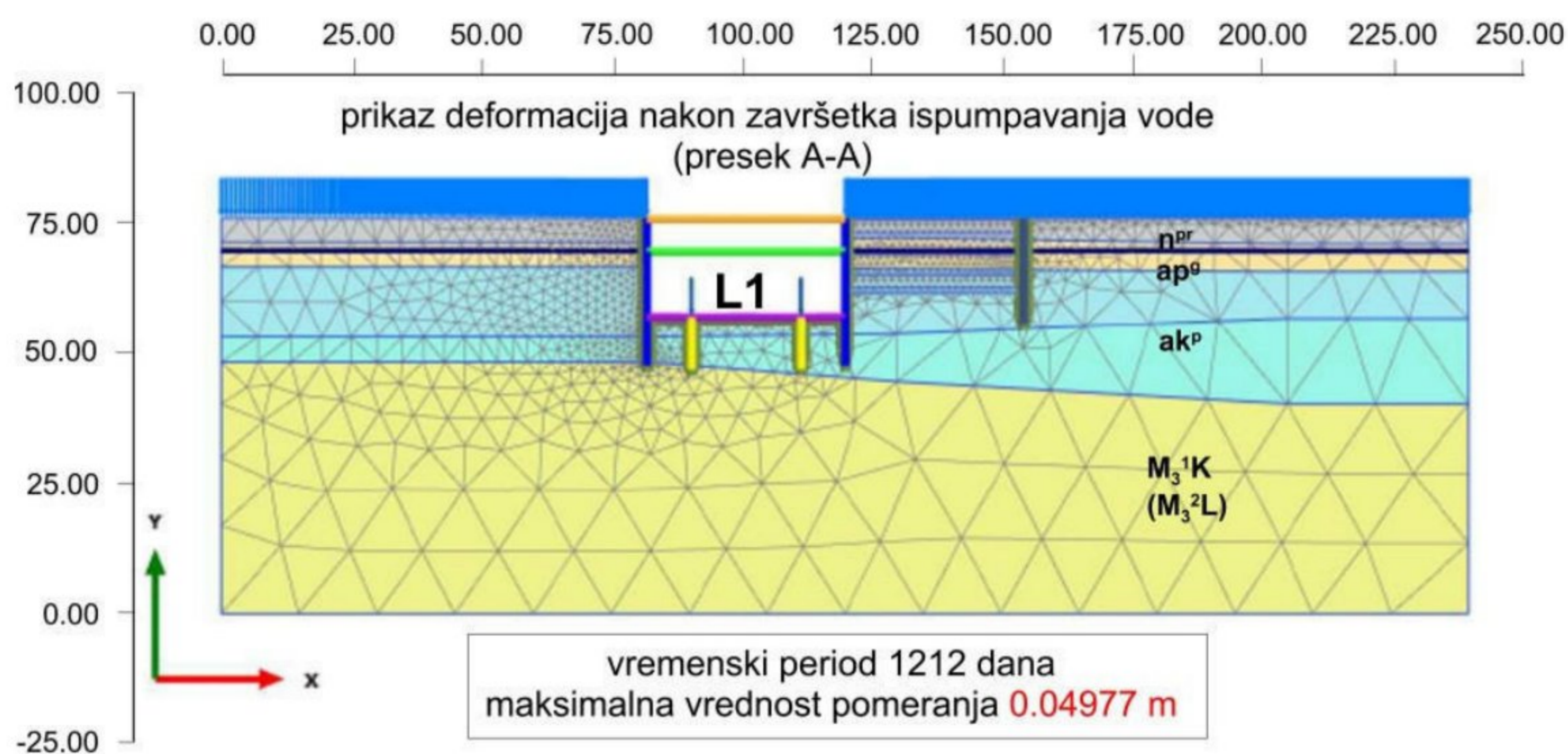


Slika 9. Numerički model terena duž preseka A-A na delu metro stanice za Liniju 1

Svi proračuni su izvršeni korišćenjem softverskog paketa Plaxis 2D Ultimate [5]. Proračun je urađen fazno čime je obuhvaćen i vremenski faktor tj. disipacija pornih pritisaka tokom vremena građenja. Svaka faza je vremenski definisana, a obuhvaćen je period od min 2 do max. 1895 dana (preko 5 god), tj. do završetka procesa konsolidacije. Prilikom svake naredne faze proračuna, korišćeno je naponsko stanje iz prethodne faze, tako da je izvršeno postepeno sabiranje promene napona i deformacija.

Za poprečni presek A-A koji odgovara delu konstrukcije Linije 1 - L1 i plitkoj zajedničkoj konstrukciji - ZS, proračun je izvršen u okviru 32 faze izgradnje uzimajući u obzir tehnologiju građenja „bottom up“ - odozdo na gore (18 faza za L1 i 14 faza za ZS). Za poprečni presek B-B koji odgovara Liniji 2, proračun je izvršen u okviru 21 faze izgradnje uzimajući u obzir tehnologiju građenja „top down“ – odozgo na dole. Za poprečni presek C-C kao zajednički deo za obe Linije, proračun je izvršen u okviru 8 faza građenja i to za svaki deo konstrukcije po 4. Ovim konstruktivnim fazama je obuhvaćena konstrukcija dijafragme, sniženje nivoa podzemne vode, tehnologije iskopa na različitim dubinama, postavljanje razupirača, izgradnja AB međuploča, temeljnih i krovnih ploča.

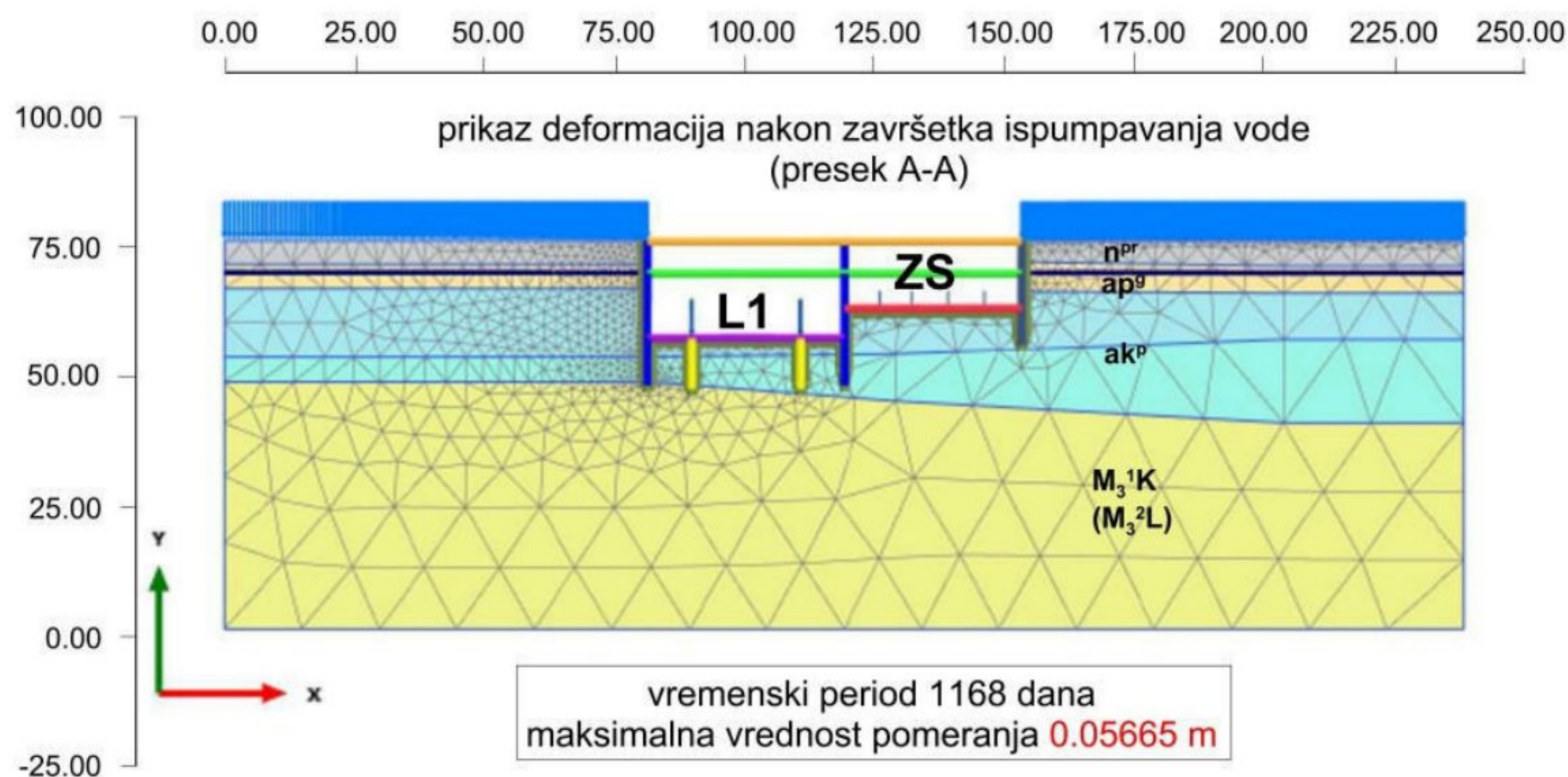
Na Slikama 10 i 11 prikazani su proračunski modeli duž geotehničkog preseka A-A sa rezultatima pomeranja tokom završne faze iskopa dela konstrukcije koji pripada Liniji 1, odnosno zajedničkom plitkom delu za obe linije. Slični proračuni su urađeni i za geotehničke preseke B-B i C-C.



Slika 10. Numerički model sa prikazom deformacija nakon završne faze iskopa za Liniju 1

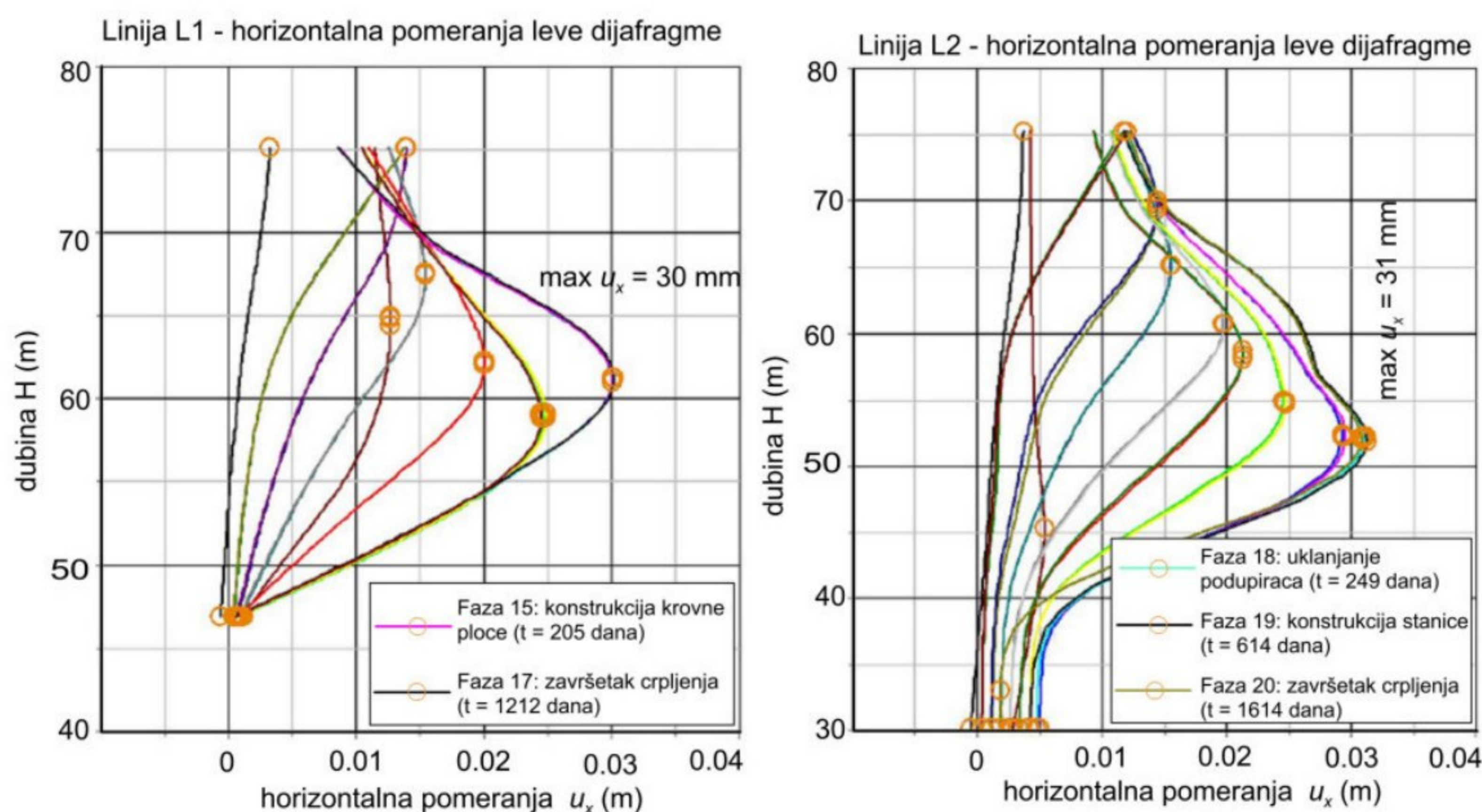
Za procenu infiltracije vode kroz dno iskopa urađen je filtracioni proračun, uzimajući u obzir karakteristične hidrauličke uslove, tj. sniženje i održavanje nivoa podzemne vode na dubini od 1.0 m ispod temeljne ploče. Proračunima su dobijene količine dotoka vode u iskop i za deo konstrukcije koji pripada Liniji 1 iznosi $0.051 \text{ m}^3/\text{dan}/\text{m}'$ ($5.905 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}'$), a za deo plitke zajedničke konstrukcije - ZS, iznosi $0.06339 \text{ m}^3/\text{dan}/\text{m}'$ ($7.337 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}'$). Dotok vode u iskop za deo konstrukcije koji pripada Liniji 2 iznosi $5.247 \text{ m}^3/\text{dan}/\text{m}'$ ($6.073 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{sec}/\text{m}'$) [1]. Međutim, treba napomenuti da je jedan od glavnih geotehničkih rizika kada su u pitanju duboki iskopi, upravo nedovoljno pouzdani podaci vezani za dotok podzemne vode u iskop odnosno funkcionalnost planiranog sistema obaranja nivoa podzemne vode. Iz tih razloga je

predloženo da se u narednoj fazi istraživanja predvide i odgovarajuća in situ probna crpljenja.



Slika 11. Numerički model sa prikazom deformacija nakon završne faze iskopa za Liniju 1 i zajedničku plitku konstrukciju Linije 1 i Linije 2

Kriterijumi dozvoljenih pomeranja dijafragme su unapred definisani i za vrh dijafragme ona su ograničena na 15 mm, a središnjeg dela (trbuha dijafragme) ograničena su na 30 mm. Kao što se na Slici 12 može videti, maksimalna horizontalna pomeranja na vrhu dijafragme za oba konstruktivna dela Linije 1 i Linije 2 su u dozvoljenim granicama, dok su maksimalna horizontalna pomeranja središnjeg dela na levoj dijafragmi u okviru konstruktivnog dela Linije 2, neznato veća od dozvoljenih i iznose 31 mm.



slika 12. Numerički model sa prikazom deformacija nakon završne faze iskopa za Liniju 1 i zajedničku plitku konstrukciju Linije 1 i Linije 2

Rezultujuća normalna sila dobijena je integracijom horizontalnih i vertikalnih napona sa leve i desne strane dijafragme od kote temeljne ploče do baze (dna) dijafragme. Analize su pokazale da su momenti savijanja i horizontalne sile ispod maksimalno prihvatljive vrednosti za sve analizirane geometrije dijafragmi.

Smičuće i normalne sile u AB pločama i temeljnoj ploči su znatno ispod dozvoljenih. Treba napomenuti da uticaj bubrenja tla na temeljnu ploču nije uzet u obzir, s obzirom da je tehnologijom građenja „top down“ (odozgo na dole), sprečeno provlažavanje iskopa zbog izgradnje krovne AB ploče.

Pasivni otpori tla na uklještenom delu dijafragme, određeni su korišćenjem metode Caquot and Kerisel, koja je preporučena i u SRPS EN 1997-1 [7] i to za horizontalnu površinu terena iza dijafragme ($\beta = 0$). Prilikom definisanja koeficijenta pasivnog pritiska tla K_p , za ugao trenja na kontaktu dijafragme i tla, usvojena je vrednost $\delta = 2/3\phi'$. Sprovedene analize su potvrdile stabilnost dijafragme jer su dobijene znatno veće vrednosti faktora sigurnosti od dozvoljenih. Zbirni rezultati verifikacije za analizirane preseke, prikazani su u Tabeli 3.

Sile bočnih pritisaka tla	Linija L1 Presek A-A		Linija L2 Presek B-B
	dijafragma	plitka konstrukcija	
E_a (kN)	2208	975,7	4592
E_p (kN)	3831	2087	20470
F_s	1.74	2.14	4.46

Tabela 3. Rezultati verifikacije bočnih pritisaka tla (GEO)

Analiza opšte stabilnosti dijafragme urađena je samo za presek A-A koji je karakterističan za Liniju 1. Za presek B-B koji je karakterističan za Liniju 2, kao i za presek C-C, konstruktivni elementi su uklješteni u stensku masu. Šema proračuna kao i rezultati sprovedene analize prikazani su u Tabeli 4, iz koje se može videti da je i opšta stabilnost dijafragme zadovoljena.

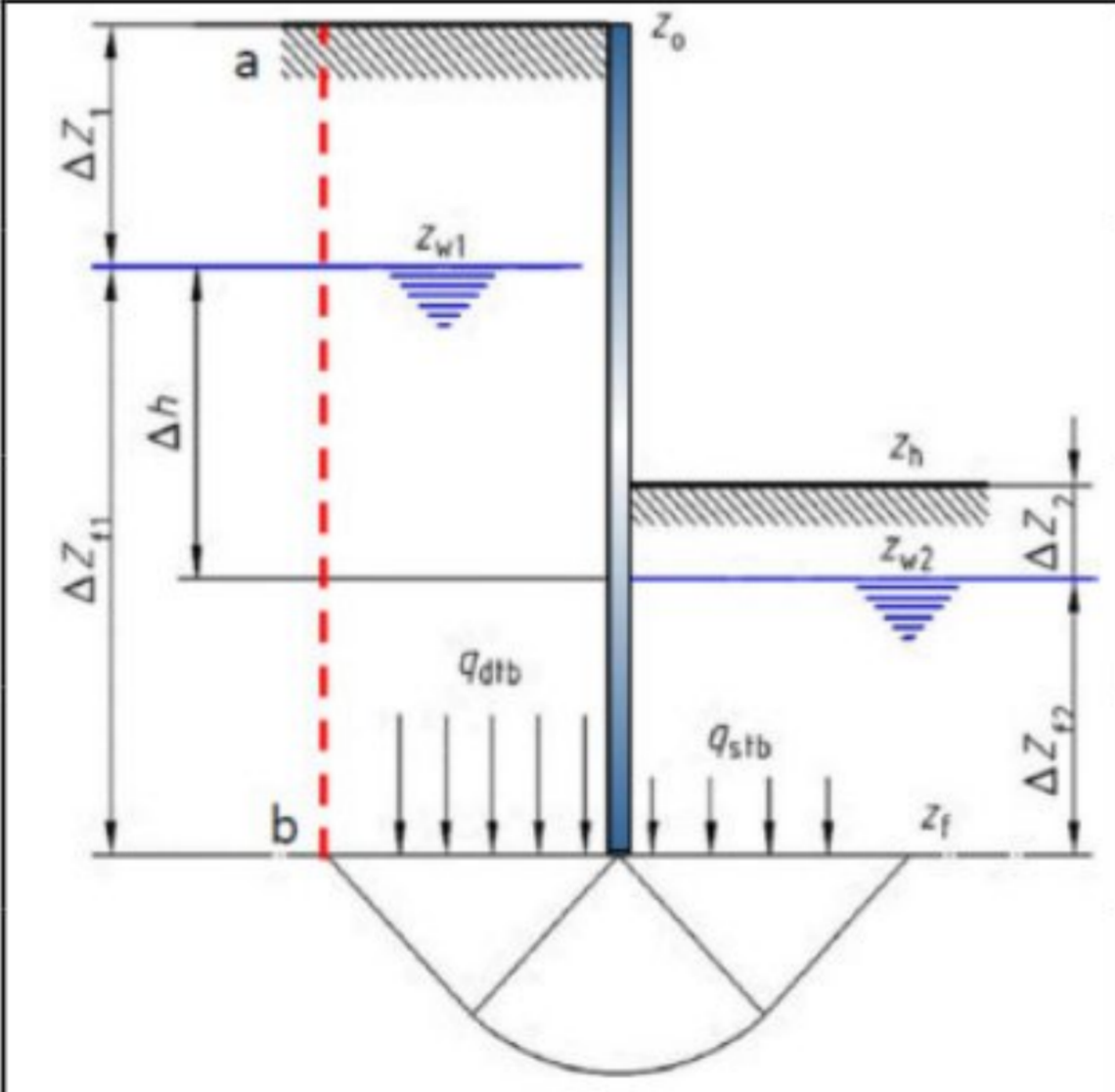
	Verifikacija stabilnosti dijafragme – L1: presek A-A		
	q_{stb} (kPa)	q_{dst} (kPa)	F_s
	1473	761.4	1.93
Verifikacija stabilnosti plitke konstrukcije – ZS: presek A-A			
	1427	545.4	2,62

Tabela 4. Rezultati verifikacije opšte stabilnosti zaštitnih konstrukcija za L1: presek A-A

5. ZAKLJUČAK

Izvođenje dubokih iskopa spada u kategoriju najsloženijih geotehničkih radova, jer pored problema koji se javljaju unutar samog iskopa, izvođenje dubokih iskopa

predstavlja i opasnost za objekte u njihovom neposrednom okruženju. U tom smislu poznavanje geotehničkih karakteristika terena, pa samim tim i definisanje fizičko-mehaničkih pokazatelja, je od posebne važnosti. Bilo da su definisani terenskim ili laboratorijskim ispitivanjima, njihov pravilan izbor predstavlja najbitniji ulazni podatak o terenu, na osnovu kojih se vrše i odgovarajuće numeričke analize.

Da bi se procenio uticaj dubokih iskopa na promenu naponskih stanja u terenu, kao i uticaj na projektovane zaštitne konstrukcije, u programskom paketu Plaxis 2D Ultimate, formirani su dvodimenzionalni geotehnički modeli duž karakterističnih preseka metro stanice „Savski Trg“. Ova metro stanica je specifična, s obzirom da se u njoj ukrštaju Linije 1 i 2 beogradskog metroa, tako da je analiza urađena za tri geotehnička preseka, čime su obuhvaćene različite faze građenja metro stanice (deo stanice za Liniju 1 i plići zajednički deo-presek A-A, deo stanice za Liniju 2 - presek B-B i deo koji pripada Linijama 1 i 2 - presek C-C).

Izvršene geotehničke analize prikazane su u obliku grafičkih i numeričkih rezultata i to: sile u poprečnim presecima i horizontalna pomeranja dijafragme, vertikalna pomeranja temeljne ploče, sile u razupiračima i AB pločama, porni pritisci i bočni pritisci tla na dijafragmu.

Rezultati sprovedene numeričke analize, pokazali su da za projektovanu zaštitnu konstrukciju metro stanice „Savski Trg“, mogu da se primene predložene tehnologije građenja i to: „top down“ – odozgo na dole za konstrukciju koja pripada Liniji 2, dok se za konstrukciju koja pripada Liniji 1 kao i pliću zajedničku konstrukciju Linije 1 i 2, može primeniti tehnologija građenja „bottom up“ - odozdo na gore. Sprovedenim numeričkim analizama, pokazano je da se projektovana zaštitna konstrukcija može izvesti racionalno, a da konstruktivni elementi ispunjavaju zadate kriterijume po pitanju horizontalnih i vertikalnih pomeranja, nosivosti i stabilnosti.

6. REFERENCE

- [1] Grupa autora, (2022). Geotechnical design report – Metro station „Savski Trg“, Hidrozavod DTD, Novi Sad.
- [2] Grupa autora, (2021). Knjiga 3 – Elaborat o geotehničkim uslovima izgradnje za potrebe Idejnog projekta za izgradnju prve faze prve linije metroa u Beogradu – Sekcija Savki aluvion, Sveska 11: Geotehnički uslovi izgradnje metro stanice „Savski trg“ (km: 11+700 – km: 11+780), Hidrozavod DTD, Novi Sad.
- [3] Mayne, P.W. (2016). Evaluating effective stress parameters and undrained shear strength of soft-firm clays from CPT and DMT. *Australian Geomechanics Journal* 51 (4): 27-55.
- [4] Meyerhof, G. (1956). Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils. *Proc. SM1*, (82): 1-19.
- [5] PLAXIS 2D-Reference Manual (2020), Edition V20.02, pp. 547.
- [6] Sivrikaya, O. and Togrol, E. (2006). Determination of undrained shear strength of fine-grained soils by means of SPT and its application in Turkey, *Engineering Geology*, 86, pp 52-69.
- [7] SRPS EN 1997-1 Evrokod 7: Geotehničko projektovanje – Deo 1: Opšta pravila.
- [8] Stroud, M. A. (1974). The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks. In *Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing ESOPT*, Stockholm 1974. Stockholm, National Swedish Building Research, pp 367-375.