

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Vana Prašo, Karlo Jednačak

**OCJENA OSJETLJIVOSTI TUNELA BUDUĆEG ZAGREBAČKOG
METROA U STATIČKIM I DINAMIČKIM UVJETIMA**

Zagreb, 2022.

Ovaj rad izrađen je u Zavodu za geotehniku Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod mentorstvom izv.prof.dr.sc. Maria Bačića, mag.ing.aedif. i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade za akademsku godinu 2021./2022.

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. PREGLED STANJA PODRUČJA	2
2.1 Pregled tehnologija izvođenja tunela TBM metodom	2
2.1.1. Općenito o TBM metodi	2
2.1.2. Klasifikacija strojeva za iskop tunela	5
2.2 Analiza prijedloga budućih trasa zagrebačkog metroa	8
2.2.1 Rješenja i alternative budućih trasa zagrebačkog metroa	8
2.3 Pregled istraživanja parametarskih analiza TBM tunela izvedenih u tlu	23
2.3.1 Metode proračuna slijeganja površine terena	23
3. HIPOTEZA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA	29
3.1 Hipoteza	29
3.2 Ciljevi istraživanja	29
4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA	30
5. ANALIZA PODLOGA I ODABIR RELEVANTNOG PROFILA TLA	31
5.1 Geologija i hidrogeologija promatranog područja	32
5.2 Seizmičke karakteristike promatranog područja	32
5.3 Analiza dostupnih podloga o provedenim istražnim radovima	33
5.4 Statistička obrada prikupljenih podataka	34
5.5. Odabir relevantnog profila tla za numeričke analize	53
6. TRODIMENZIONALNE NUMERIČKE ANALIZE ZAGREBAČKOG METROA . 55	
6.1. Uvod u 3D numeričke analize	55
6.2. Statički proračuni	57
6.2.1. Varijacija rješenja s jednom TBM cijevi	65
6.2.2. Varijacija rješenja s dvije TBM cijevi	82
6.3. Dinamički proračuni	111
6.3.1. X – pomaci potresnog opterećenja	114

6.3.2. Y – pomaci potresnog opterećenja	116
6.3.3. Z – pomaci potresnog opterećenja	118
7. RASPRAVA I ZAKLJUČAK	120
8. PREPORUKE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA	125
9. REFERENCE	126
POPIS TABLICA	129

1. UVOD

Grad Zagreb, glavni grad Republike Hrvatske, svakodnevno prihvaća velike količine ljudi koji dijelom žive u njemu a dijelom i cirkuliraju što kroz poslovne, privatne ili turističke motive. Velike količine ljudi stvaraju veliko opterećenje na prometnu infrastrukturu, pa se tako u gradovima pokušavaju naći što efikasnija rješenja javnog prijevoza kako bi se broj osobnih automobila smanjio, tj. rasteretila prometna infrastruktura. Zagreb trenutno raspolaže javnim prijevozom u vidu autobusnih linija, tramvajskih linija, te vlakova koji prolaze kroz sami centar Zagreba. Sve to prema studijama nije, ili neće biti, dovoljno kako bi se zadržala učinkovitost gradske prometne infrastrukture. Jedno od mogućih rješenja za Zagreb je izgradnja metro sustava po uzoru na druge velike europske gradove. Izgradnja metroa skup je proces koji je potrebno detaljno istražiti te ispitati mogućnosti kako sa financijske, tako i sa tehničke strane provedbe. Obzirom na vrijeme gradnje užeg centra Zagreba, potrebno je provesti istraživanja o utjecaju same gradnje podzemnog sustava tunelskih cijevi na postojeće građevine u gradu. Potresna otpornost tunelske konstrukcije također predstavlja važan zadatak pred inženjersku struku, a uzimajući u obzir seizmičku aktivnost Zagreba. Motivirani navedenim problemima proveli smo istraživački rad na temelju kojeg će biti doneseni zaključci o pomacima tunela tijekom izgradnje i eksploatacije na samu tunelsku cijev i na površini terena gdje se nalazi brojna gradska infrastruktura. Pri tome je uzeta u obzir inherentna varijabilnost fizikalno – mehaničkih karakteristika tla na način da je ponašanje tunela metroa evaluirano za čitavi identificirani raspon mogućih parametara tla, dok su u dinamičkim uvjetima analizirana različita potresna opterećenja i njihov utjecaj na pomake tunelske cijevi i površine terena te je kao referentno opterećenje uzet zapis zagrebačkog potresa iz ožujka 2020. godine.

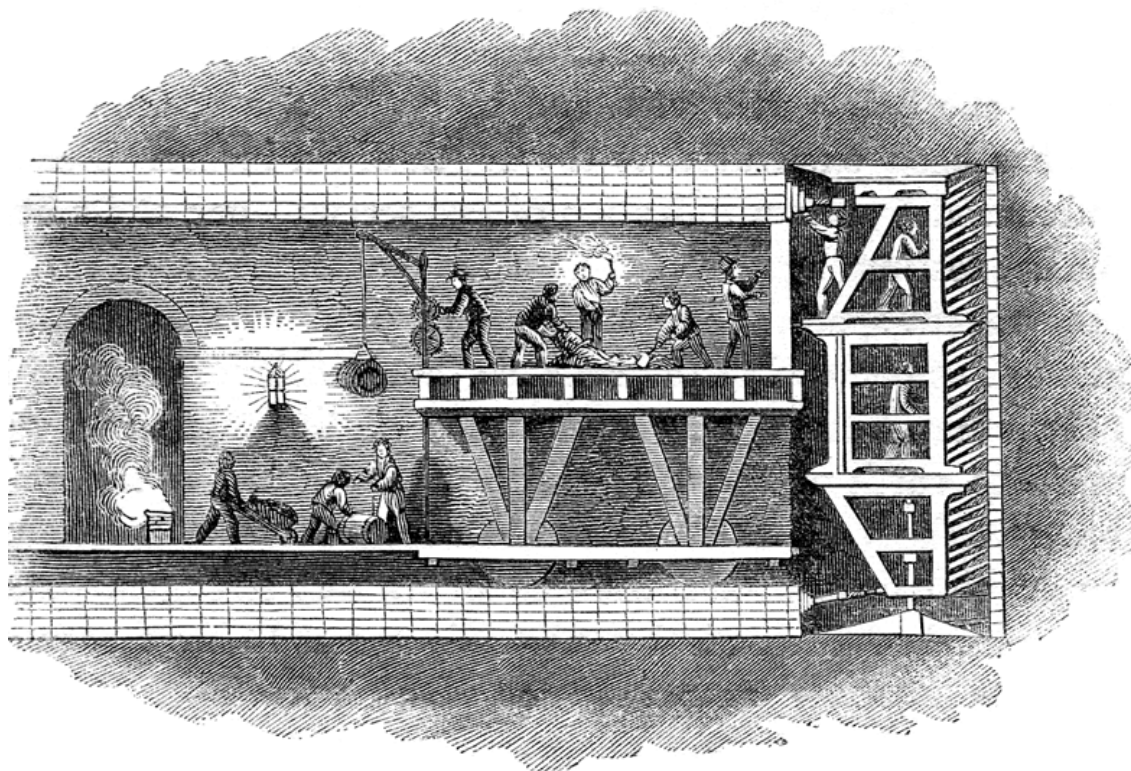
2. PREGLED STANJA PODRUČJA

2.1 Pregled tehnologija izvođenja tunela TBM metodom

2.1.1. Općenito o TBM metodi

Izvedba tunela kompleksan je građevinski zahvat koji se kroz povijest mijenjao u pogledu načina izvedbe. Čovjek je od početnih načina ručnih iskopa za manje tunele, preko iskopa miniranjem i strojevima za klasične iskope, došao do sada već normalne primjene iskopa tunela TBM metodom. TBM metoda (eng. Tunnel Boring Machine) predstavlja moderan i efikasan način iskopa i izvedbe tunela. Kao što i sam naziv metode kaže, cijela se metoda iskopa temelji na sofisticiranim strojevima koji su namijenjeni isključivo za izvedbu tunela, kolokvijalno se nazivaju i „krtica“.

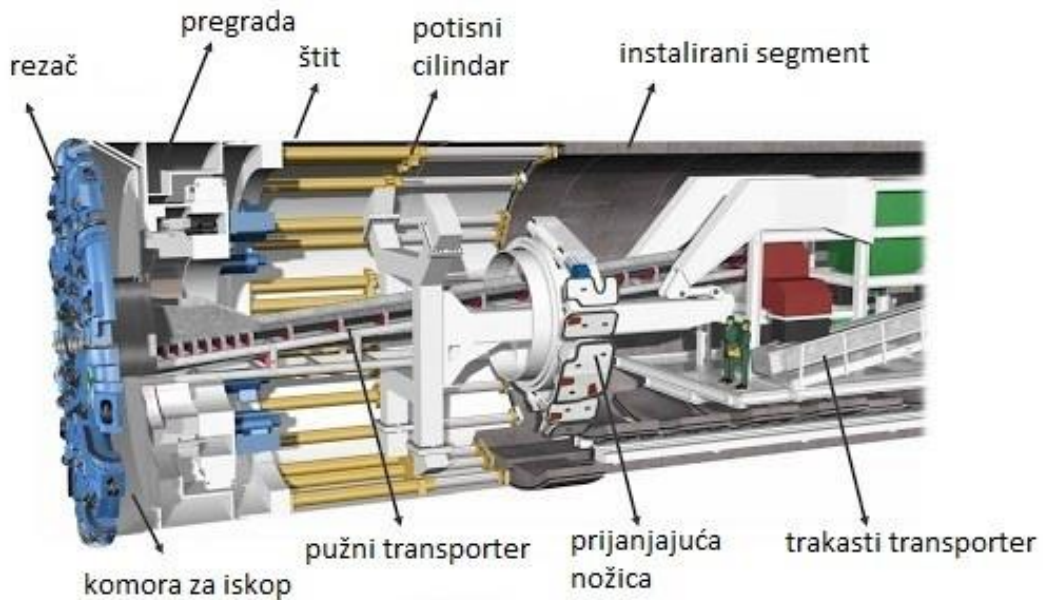
Prvi koraci u razvoju današnje TBM metode bili su pri izgradnji Viktorijanskog tunela ispod rijeke Temze u 19.st. Tada je Sir Marc Isambard Brunel prvi puta koristio sustav iskopa sličan današnjim strojevima za iskop tunela [1]. Brunelova ideja za iskop tunela Temza temeljila se na tada klasičnom iskopu ali uz osiguranje prethodno iskopanog dijela „štitom“, tj svojevrsnom podgradom. Iz današnje perspektive to je vrlo sličan način izvedbe tunela, uz dodatak da današnji strojevi vrše iskop uz to što prethodno iskopani dio podupiru i osiguravaju. Brunelovom idejom, i provedbom iste na tunelu Temza počeo je značajan razvoj u načinima i metodama iskopa tunela, te su se godinama mnogi znanstvenici i inženjeri bavili usavršavanjem strojeva za različite uvjete i zahtjeve iskopa tunela.



Slika 1. Sir Marc Isambard Brunel-ova metoda iskopa tunela ispod Temze [2]

Današnje TBM metode se najosnovnije mogu podijeliti na strojeve koji vrše iskop u tvrdim stijenama, strojeve koji vrše iskope u mekim tlima i strojevi za iskope mikrotunela. Svaki se od ovih strojeva razlikuje o uvjetima za koje je najpogodniji i čije zahtjeve ispunjava. Kod iskopa tunela nailazi se na različite uvjete geologije, razine podzemnih voda ali i zahtjeva uvjeta okolnih građevina i sustava. Bitno je da se pri odabiru TBM metode uzimaju svi faktori kako ne bi i ovako skup način izvedbe postao neisplativ ili neizvediv. Iako se ovisno o kategoriji u koju spadaju strojevi razlikuju po uvjetima za koje su predviđeni, generalno se sastoje od istih glavnih dijelova i istog principa rada. Svi strojevi za iskop tunela sastoje se od frontalnog diska koji služi za vršenje iskopa, glavnog tijela stroja u kojem se odvija proces rada cijelog stroja i čije tijelo služi kao podgrada iskopanom dijelu, i trake za transport iskopanog materijala koja se nalazi u tijelu stroja. Sami disk može na sebi imati različite dodatke poput sustava za

injektiranje pojedinih aditiva, ili različite tipove noževa za iskop, dok se u tijelu stroja nalaze razni sustavi za vršenje popratnih građevinskih zahvata ovisno o tipu stroja i zahtjevima projekta.



Slika 2. Presjek jednog stroja za iskop tunela „krtice“ [3]

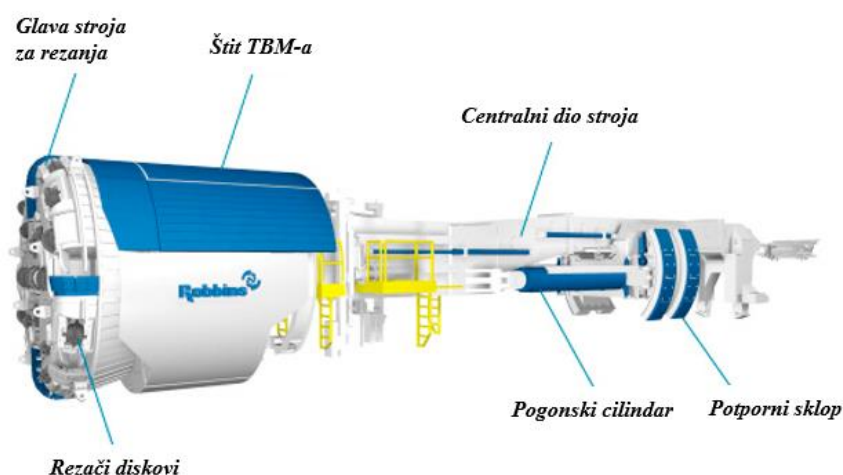
Zbog kompleksnosti i veličine strojeva za iskop tunela otežani su transport, ali i sastavljanje samih strojeva, tako da posljedično značajno raste cijena ovakvih strojeva. Obzirom da su cijene visoke bitno je da se osim uzimanja svih relevantnih faktora pri odabiru vrste TBM-a, provede i analiza opće isplativosti ovakve metode iskopa tunela. Općenito se okvirno procjenjuje da je isplativost korištenja TBM metoda za tunele minimalno 2 km duljine, uz iznimku kod mekih tla lošijih karakteristika gdje ova metoda i dalje može biti jeftinija uzevši u obzir znatno veću sigurnost [4]. Kod tunela većih duljina TBM osim isplativost nudi veliku sigurnost, ali i visoku razinu kvalitete izvedbe radova, s toga je u mnogim državama svijeta prvi izbor pri izgradnji novih i zahtjevnih tunela.

2.1.2. Klasifikacija strojeva za iskop tunela

2.1.2.1. Iskop u stijeni

Iskopi u stijeni mogu se vršiti sa dva tipa strojeva, jedan od njih, 'Beam type', pogodan je isključivo za iskope u stijenama dok se 'Shield type' strojem iskopi mogu vršiti u stijeni i u određenim uvjetima mekog tla. 'Beam type' metoda karakteristična je za iskope u stijeni jer se stroj sastoji od glave kojom se vrši iskop i otvorenog tijela na čijem dijelu se mogu vršiti geotehnički zahvati poput ugrađivanja sidara ili mlaznog betona. Obzirom da je stijena kruti materijal nije potrebno sa iskopom paralelno raditi podgradu, s toga će ovakav otvoreni tip konstrukcije stroja zadovoljavati uvjete za iskop [4].

S druge strane 'Shield type' [4], kako mu i samo ime kaže, ima zatvoreno tijelo stroja, svojevrsan „štit“. Osim što se zatvorenim tipom stroja omogućava iskop u mekim tlima, paralelno pri iskopu tijelo stroja osigurava sigurne uvjete u iskopanom dijelu i paralelno se mogu vršiti mjere zaštite iskopa kako ne bi došlo do urušavanja iskopa. Kod iskopa u stijenama pozitivan učinak očituje se preuzimanjem dijela opterećenja stijene konstrukcijom tijela čime se olakšava i ubrzava iskop.



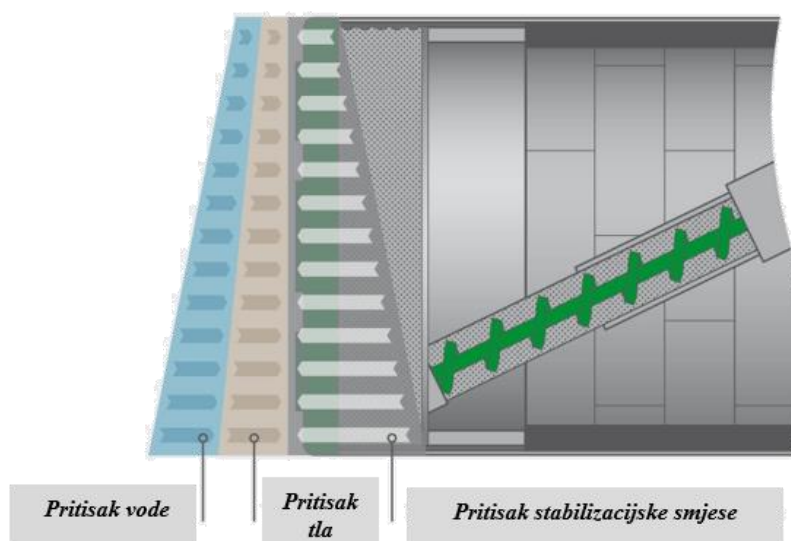
Slika 3. Beam type – karakterističan stroj za iskop u stijenama [4]

2.1.2.2. Iskopi u mekom tlu

Kompleksni uvjeti u mekim tlima zahtijevali su od inženjera razvoj novih načina iskopa i strojeva sa raznovrsnim karakteristikama. Strojevi za iskop u mekom tlu dijele na 'Shield type', Strojevi za mehanički iskop, Iskop pod kontroliranim pritiskom, 'Slurry type' [4]. U nastavku je prikazan kratki uvod u svaku od ovih metoda iskopa mekog tla.

Strojevi za mehanički iskop funkcioniraju po principu vršenja iskopa bez paralelnog osiguranja iskopanog dijela svojim sustavima. Kod ovakvog iskopa u cijelom procesu sudjeluje više strojeva koji svaki odrađuje svoj dio iskopa ili osiguranja samog iskopa.

Iskop pod kontroliranim pritiskom vrši se isključivo u mekim tlima, stroj funkcionira po principu konstantnog očitavanja pritiska na licu iskopa tunela. Ova metoda karakteristična je za uvjete u tlu sa pritiskom vode, gdje se za očuvanje stabilnosti lica iskopa tunela mora osigurati konstantni pritisak stroja na lice iskopa, koji je jednak pritisku od podzemne vode i neiskopanog dijela. Ovakvom se ravnotežom pritisaka osigurava stabilnost iskopa prije nego se na lice iskopa TBM-om injektiraju aditivi ili smjese za poboljšanje stabilnosti [4].



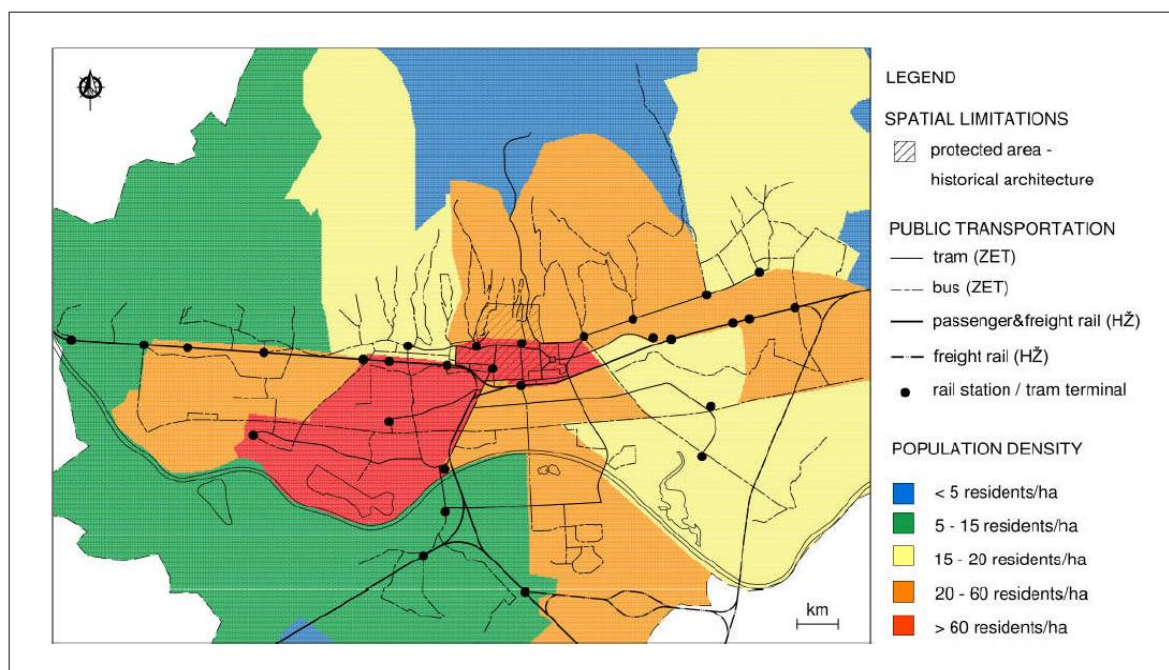
Slika 4. Princip rada EPBM – balans pritisaka [4]

'Slurry type' strojevi za iskope koriste se kod izrazito nestabilnih ili pjeskovitih tla, ovom je metodom iskopa moguće ostvariti najveću sigurnost iskopa. Metoda funkcionira tako što se ravnoteža pritiska vode i iskopa postiže injekcijom smjesa, često na bazi betona. Uz iskope osim ugradnje smjesa za ojačanje tla moderne izvedbe ovakvih strojeva nude mogućnost paralelne ugradnje predgotovljenih betonskih elemenata u vidu podgrade tunela.

2.2 Analiza prijedloga budućih trasa zagrebačkog metroa

2.2.1 Rješenja i alternative budućih trasa zagrebačkog metroa

Prometna prenapučenost, manjak parkirališnih mjesta, buka i ispušni plinovi godinama su svakodnevnica građana. Građani u Zagrebu se od prijevoznih sredstava služe automobilima (33%), tramvajima (23%), autobusima (11%), vlakovima (1%) [5]. Tramvaj uz sebe veže niz problema u pogledu prometnih zastoja jer skupa s autobusom i automobilom dijeli prometni trak, pri čemu nerijetko dolazi do nestanka struje, sudara i općeg kolapsa u prometu. S druge strane, automobili predstavljaju jedinu vezu s ruralnim područjima koja ne obuhvaćaju opseg škola, tržnica, ureda, tržnih centara, muzeja i ostalih svakidašnjih aktivnosti što dodatno potječe pritisak osobnih vozila. Učinkovito rješenje za poboljšanje postojeće transportne mreže predstavlja izgradnju podzemne željeznice - metroa. Glavni cilj nadogradnje prometnog sustava ogleda se u što većoj zaštiti putnika, zaštiti okoliša, ekonomskoj isplativosti i efikasnosti.



Slika 5. Postojeća prometna infrastruktura i naseljenost populacije u Zagrebu [5]

Prvi spomen o mogućnosti postojanja podzemne željeznice u Zagrebu dogodio se unazad 45 godina [6]. U želji za promjenom tadašnjeg stanja skupina od 10 sudionika pod radnim naslovom „Metro Zagreb“ u godini obilježavanja 900 godina postojanja Zagreba (točnije 20.4.1994.) razgovarala je o problematici s ciljem poboljšanja gradske sredine [6]. Jedno od idejnih rješenja ukazivalo je na izgradnju prve kružne linije buduće podzemne željeznice, poput linije u Moskvi (Slika 6) i Parizu, što bi Zagrebu donijelo novo osvježanje i atrakciju.



Slika 6. Kružna linija u Moskvi, jedan od ljepših primjera metroa u arhitektonskom smislu [7]

Prema datim informacijama [6], linija bi trebala imati duljinu od 12 km, razmak stanica od 0,5-1,5 km te spajati Donji grad s lokacijama Novoga Zagreba: Velesajma, Sigeta, Sopota i Središća. Zagreb je uzdužno povezan u smjeru istok-zapad te u istom smjeru se nalaze: planina Medvednica, glavna željeznička pruga koja prolazi Glavnim kolodvorom, brza cesta (Ljubljanska avenija), tok rijeke Save, cestovna obilaznica grada Zagreba i južna željeznička pruga koja prolazi preko ranžirnog kolodvora. Intenzivan promet se odvija i na relaciji sjever-jug pri čemu su Novi Zagreb i Donji grad međusobno povezani.

Prema [6] dana su četiri alternativna rješenja:

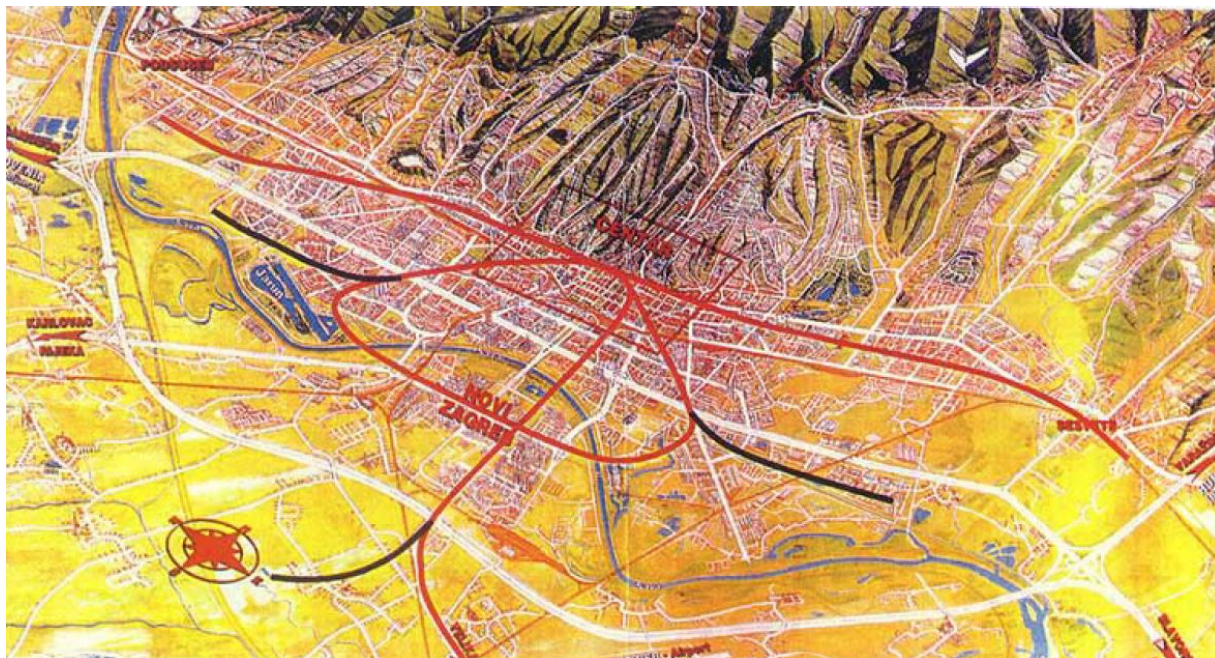
Prvi stupanj povezuje dva područja na tangenti sjever-jug, već spomenuti Novi Zagreb i Donji grad te produljenje linije prema zračnoj luci Pleso i Velikoj Gorici. Južni dio linije do Save izveo bi se kao nadzemna linija koja prelazi most te nakon mosta ide ispod površine. Podzemni dio kretao bi se po pravcu Draškovićeve ulice do Trga hrvatskih velikana.

Drugi stupanj ponovno povezuje središte Donjega grada s novim naseljima, ujedno i stari centar grada s lokalnim centrima u novim kvartovima te oživljava lokalni promet južno od Save. Konkretnije, izvodila bi se zatvorena kružna linija počevši od Trga žrtava fašizma preko Trga bana Jelačića dalje do Trešnjevke ka Jarunu, te vraćajući se preko Avenije Dubrovnik prelazeći Savu, prema TE-TO ka središnjem dijelu Zagreba natrag do čvorišta Trga hrvatskih velikana.

Treći stupanj spaja prigradska područja na tangenti istok-zapad u podzemnom rješenju. Velika opterećenost populacije u prigradskim naseljima iziskuje široku prometnu rasprostranjenost kakvu trenutno ne posjeduje.

Četvrti stupanj podrazumijeva produljenje čvorišta prema gradskim naseljima, gdje je udaljenost do prve stanice podzemne željeznice velika.

S brzom gradskom željeznicom značajno bi smanjili utrošak vremena putujući do svakog dijela grada – maksimalno 30 minuta u prosjeku.



Slika 7. Rješenje trase zagrebačkog metroa iz 2001.godine [6]

Podaci iz 2018. predlažu četiri nove i jednu istraženu varijantu obzirom na: postojeću mrežu putničkog transporta, smjer kretanja i lokaciju trase (podzemna ili nadzemna) [5]:

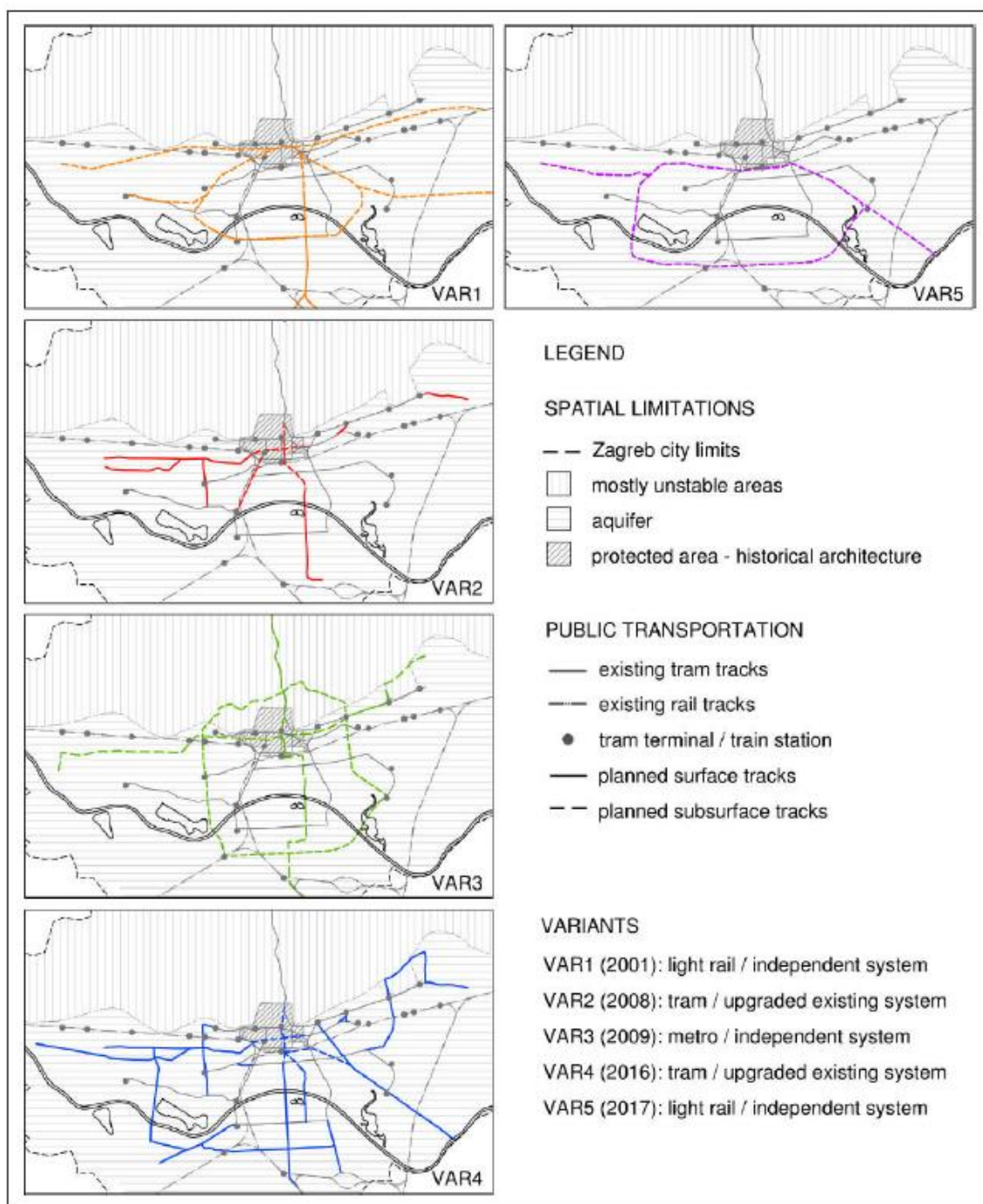
Prva varijanta referencira se na spomenuti rad iz 2001. godine. Uključuje izvođenje tzv. kružne linije koja povezuje Donji grad i Novi Zagreb te četiri podzemne trase koje se šire od povijesne jezgre (područje Trga bana Josipa Jelačića) do istočnog i zapadnog dijela grada. Varijanta 1 također čini poveznicu između centra grada i Velike Gorice. Sumirajući navedeno, 70% trase išlo bi 15-20 m ispod zemlje u slojevima gline a ostatak bi prolazio iznad zemlje, točnije preko mosta iznad Save i nadalje k sjeveru. Preporuča se iskop tunelskih cijevi NATM ili TBM metodom, a podzemna stajališta Top-Down metodom.

Druga varijanta koristi tramvajsku mrežu u podzemnom i površinskom smislu, šireći se od centra grada do naseljenog istočnog, zapadnog i južnog područja. Trasa bi bila podzemno locirana u povijesnoj jezgri i u gustom predjelu Donjega grada. Predloženi iskop za podzemne stanice bi se provodio s površine, koristeći betonske dijafragme, a tunelska cijev izvedbom TBM metode u zoni gline. Preporuča se dvotračna izvedba tunela.

Treća varijanta uključuje podzemni i nadzemni dio koji prelazi preko tri mosta iznad rijeke Save. Četiri podzemne planirane trase obuhvaćaju zonu od glavnog gradskog trga pa sve do istoka, zapada, juga i sjevera. Predviđena konstrukcija varijante 3 zaobišla bi zaštićeni dio centra, a prolazila bi ispod planirane južne avenije u Novom Zagrebu. Tunel bi imao dvije paralelne trake, jednu u svakom smjeru, na udaljenosti od 11 metara. Iskop podzemnih stanica provodio bi se metodom C&C, a tunelske cijevi TBM metodom.

Četvrta varijanta jamči nadogradnju postojeće tramvajске mreže. Planirani tramvajski sustav prolazio bi kroz povijesno područje Donjega grada, pri čemu bi 14% bio pod zemljom.

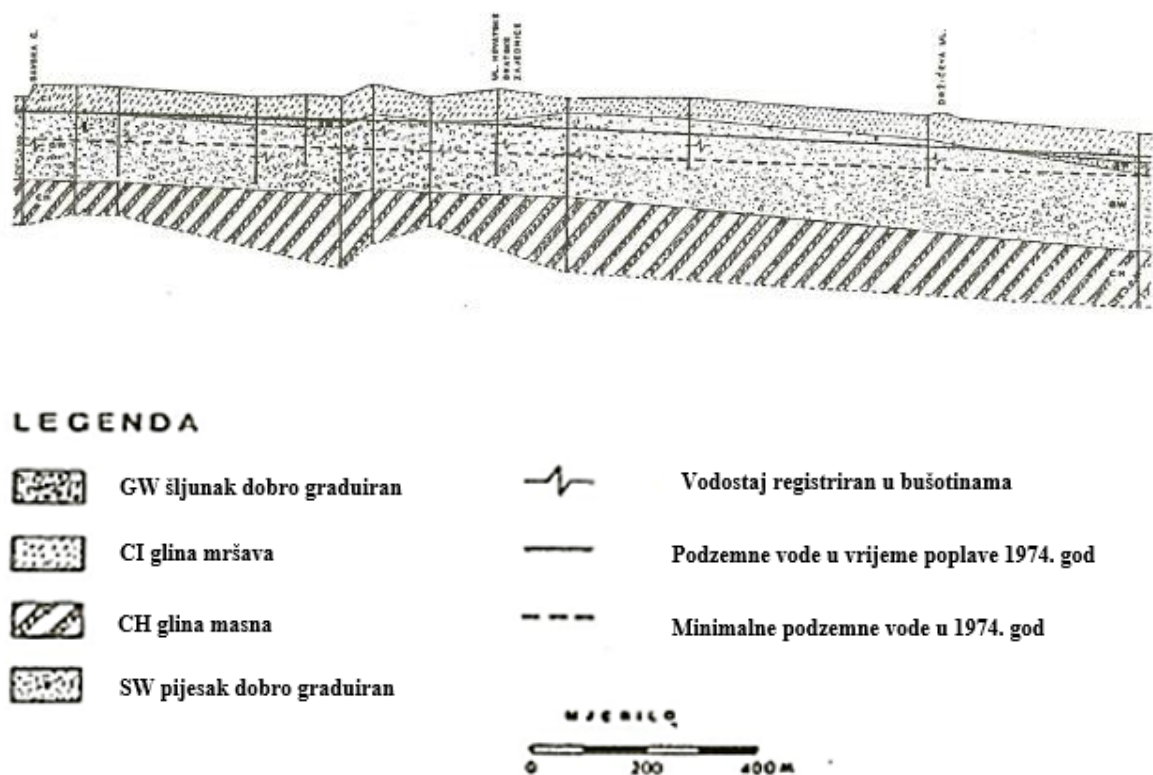
Peta varijanta predviđa kružnu željezničku prugu na južnoj granici Donjega grada, ispod rijeke Save i planirane južne avenije u Novom Zagrebu. Prijedlog za iskop tunelskih cijevi, koji bi imao dvije trake- jednu u svakom smjeru, predviđa se NATM i TBM metodom, a podzemna stajališta Top-down metodom.



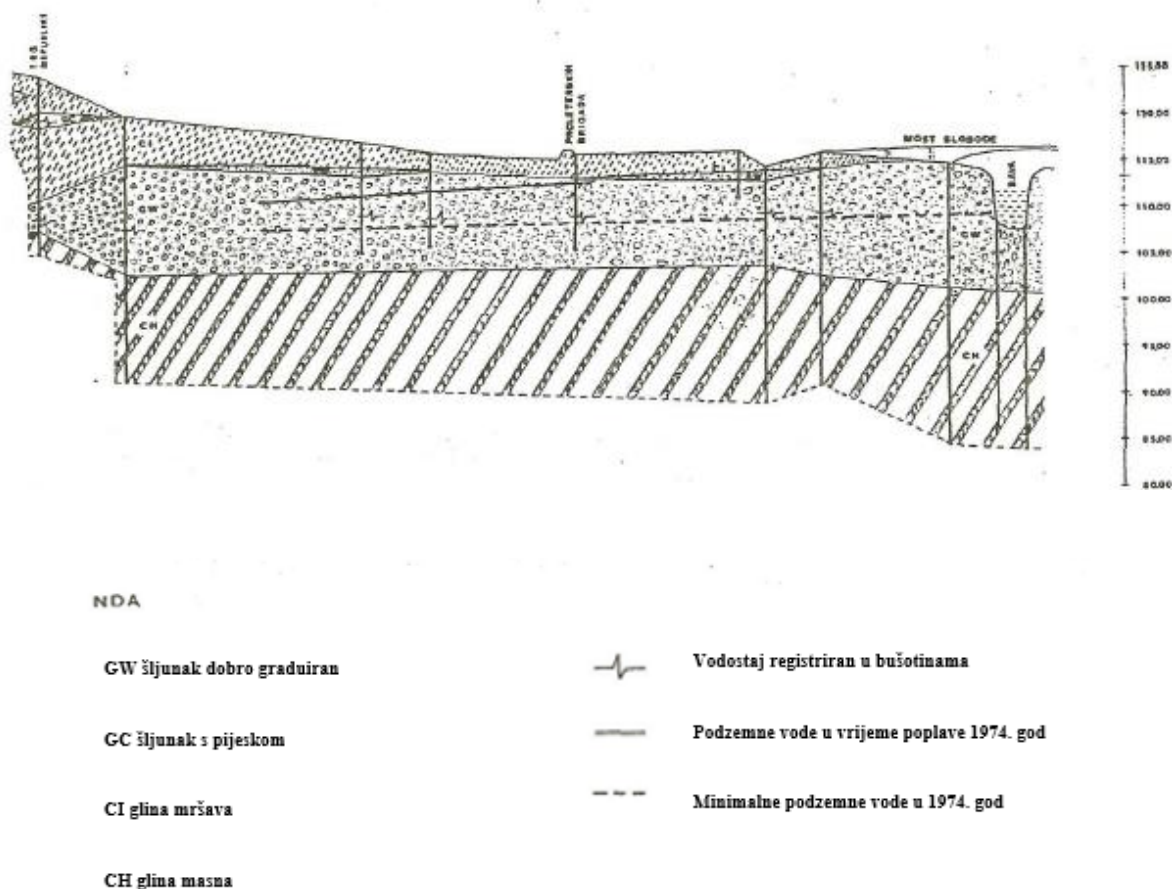
Slika 8. Pet varijanti novog gradskog prijevoza iz 2018. godine [5]

Središnjim Zagrebom prevladava uslojeno tlo zasićeno vodom [5]. Krećući se od površine do dubine od 10 metara nalaze se šljunci, pokriveni tanjim slojem gline i nasipa, a ispod šljunaka vrlo konsolidirane krute gline do većih dubina. Uobičajeno je takva kruta glina odlična podloga

za izgradnju tunelskih cijevi podzemne željeznice. Dubinski zahvat bušenja tunela je složen postupak gdje je potrebno uspostaviti korelaciju između rezultata ispitivanja tla i mjerenih veličina pomaka. Međutim, takvih je zahvata malo izvedeno te se struka mora osloniti na laboratorijska ispitivanja mehaničkih svojstava relevantnih uzoraka, korištenje modela ponašanja geotehničkih zahvata i primjerena terenska ispitivanja. U nastavku su prikazani dubinski hidrogeološki profili iz 1974. godine [8].



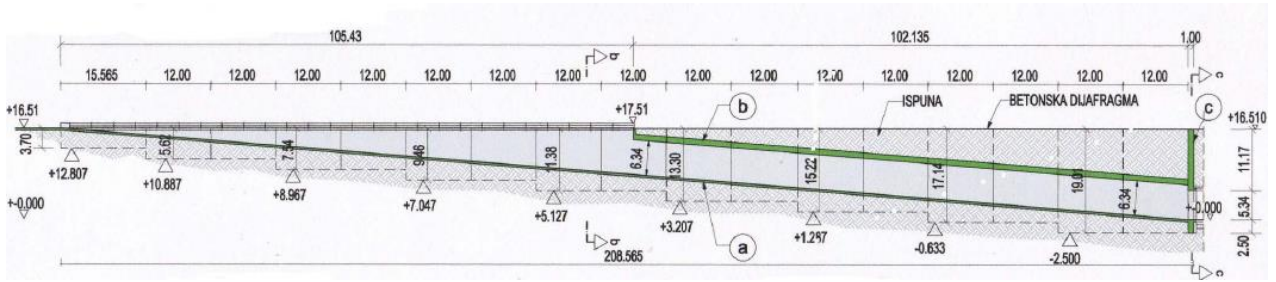
Slika 9. Prognozni geotehnički profil uz južni rub Vukovarske ulice (zapad - istok), 1974. [8]



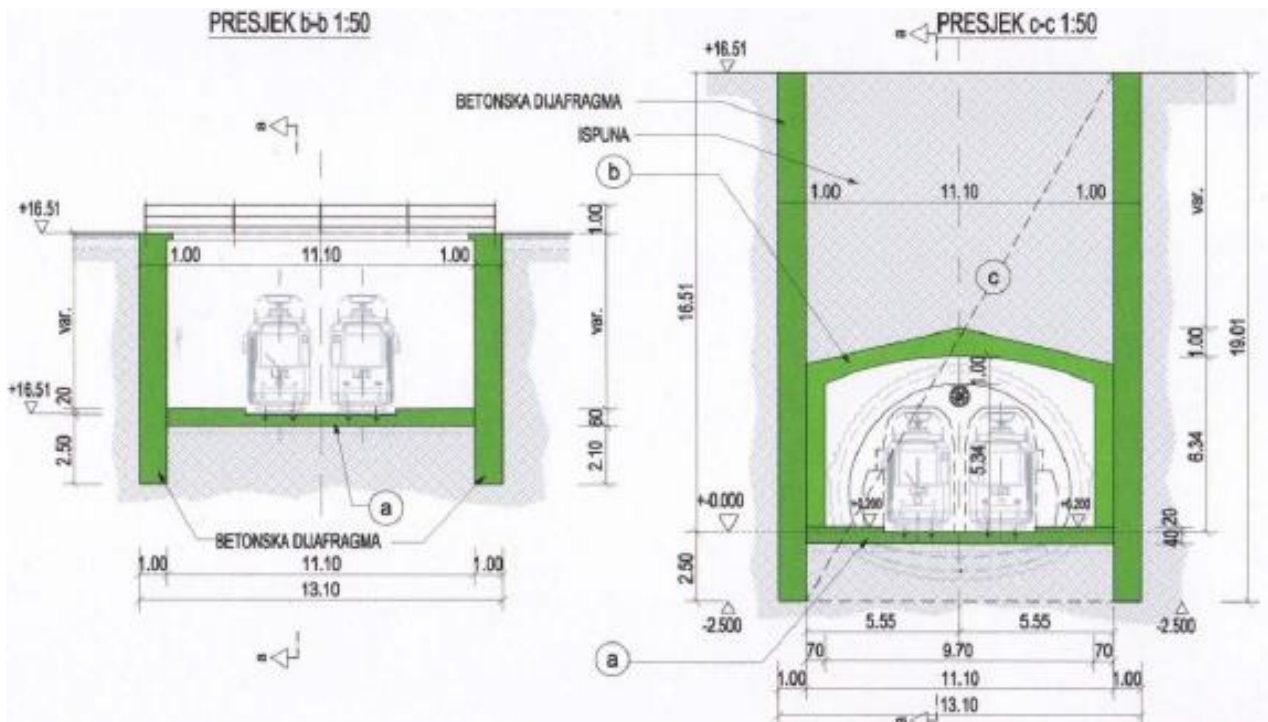
Slika 10. Prognozni geotehnički profil (sjever - jug) kroz središte grada, 1974. [8]

Prema Ivšiću [8], za izvedbu lagane gradske željeznice, potencijalne probleme predstavlja podzemna voda u višim dijelovima sloja gline, proslojcima ili lećama nekoherentnih materijala te mogućim pukotinama (rasjedima, diskontinuitetima) u glinovitom sloju. S ispravnom tehnologijom građenja nužno je ograničiti eventualne pomake i slijeganja. Potreban je maksimalan monitoring tijekom same izvedbe kako u dubini, tako i na površini.

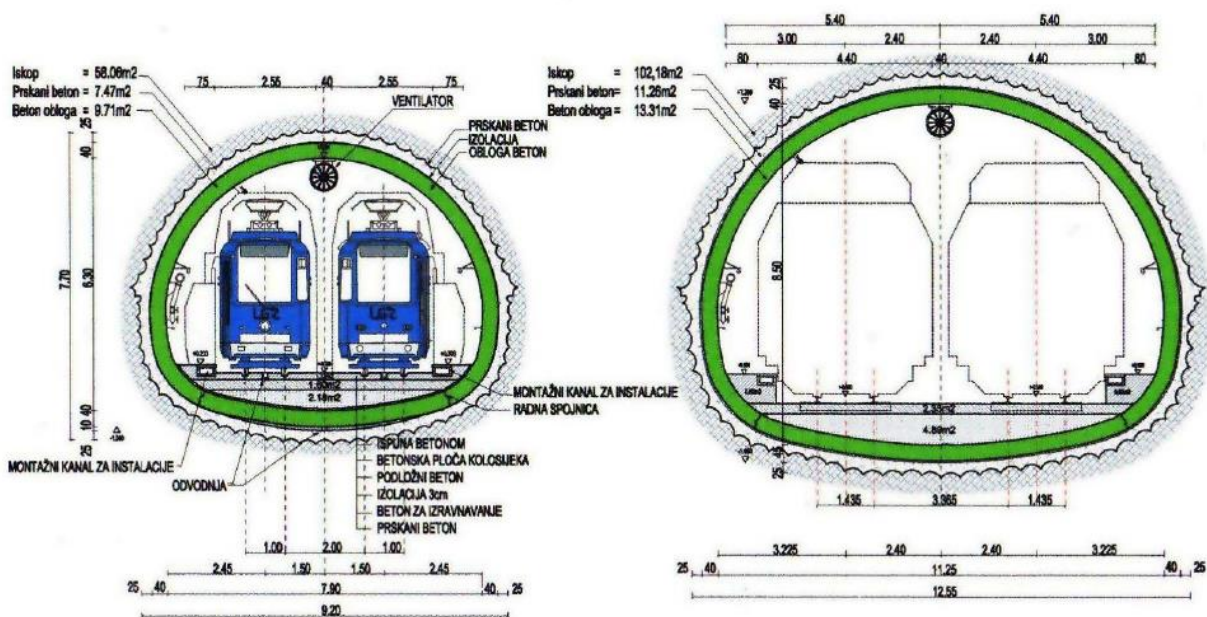
U nastavku su dane slike kojima Kolić i drugi [9] predlažu rješenja objekata na linijama laganih gradskih željeznica i prognoziraju cijene izvedbe.



Slika 11. Uzdužni presjek rampe za silaženje u podzemlje [9]



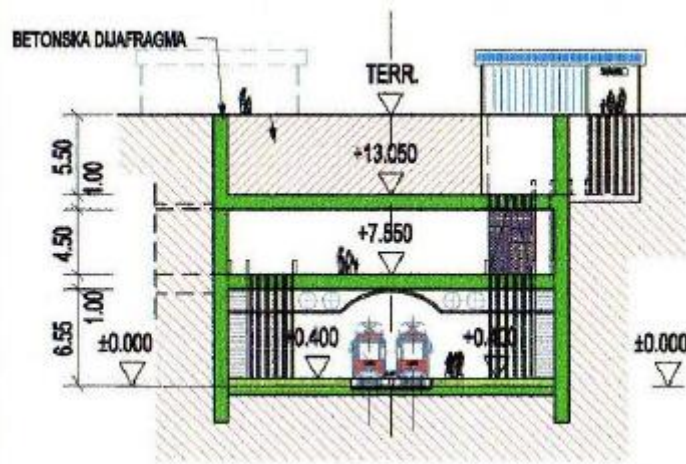
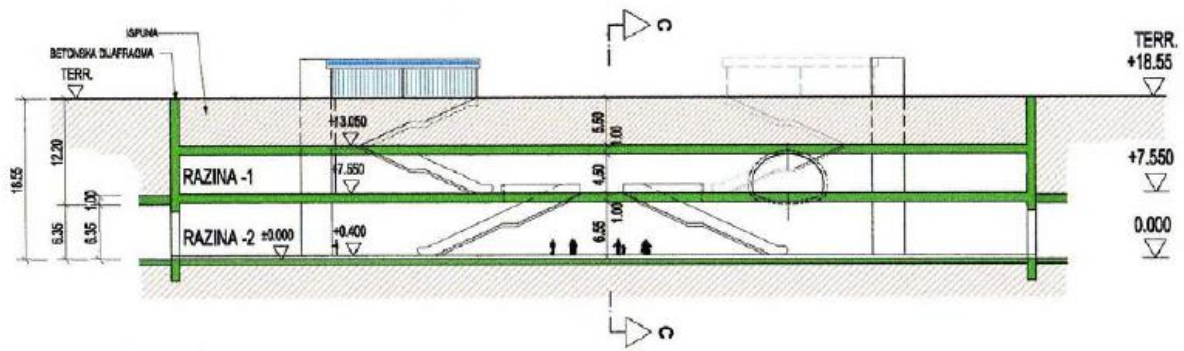
Slika 12. Poprečni presjek rampe za silaženje u podzemlje [9]



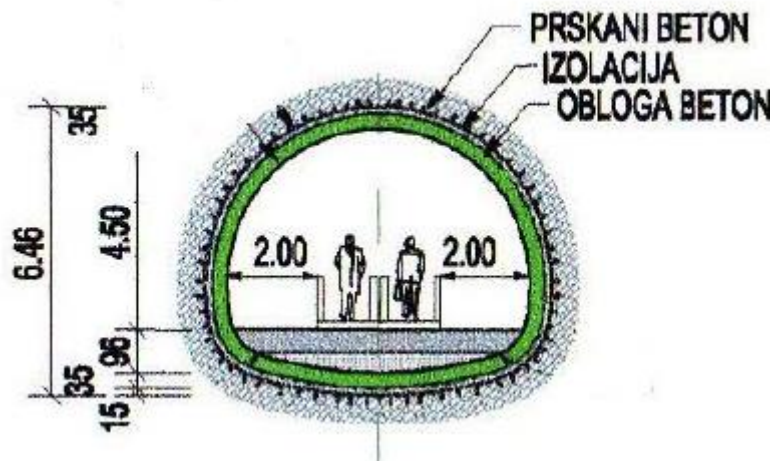
Slika 13. Tunel za podzemno vođenje trase [9]

Na prethodnoj slici prikazana su dva dvokolosiječna tunela za podzemno vođenje trase.

Za lijevi tunel, čije su tračnice širine 1m, površina iskopa iznosi 58 m² s cijenom izvedbe od 29.500 €/m. Desnom tunelu je površina iskopa 102 m² a cijena izvedbe 47.500 €/m.

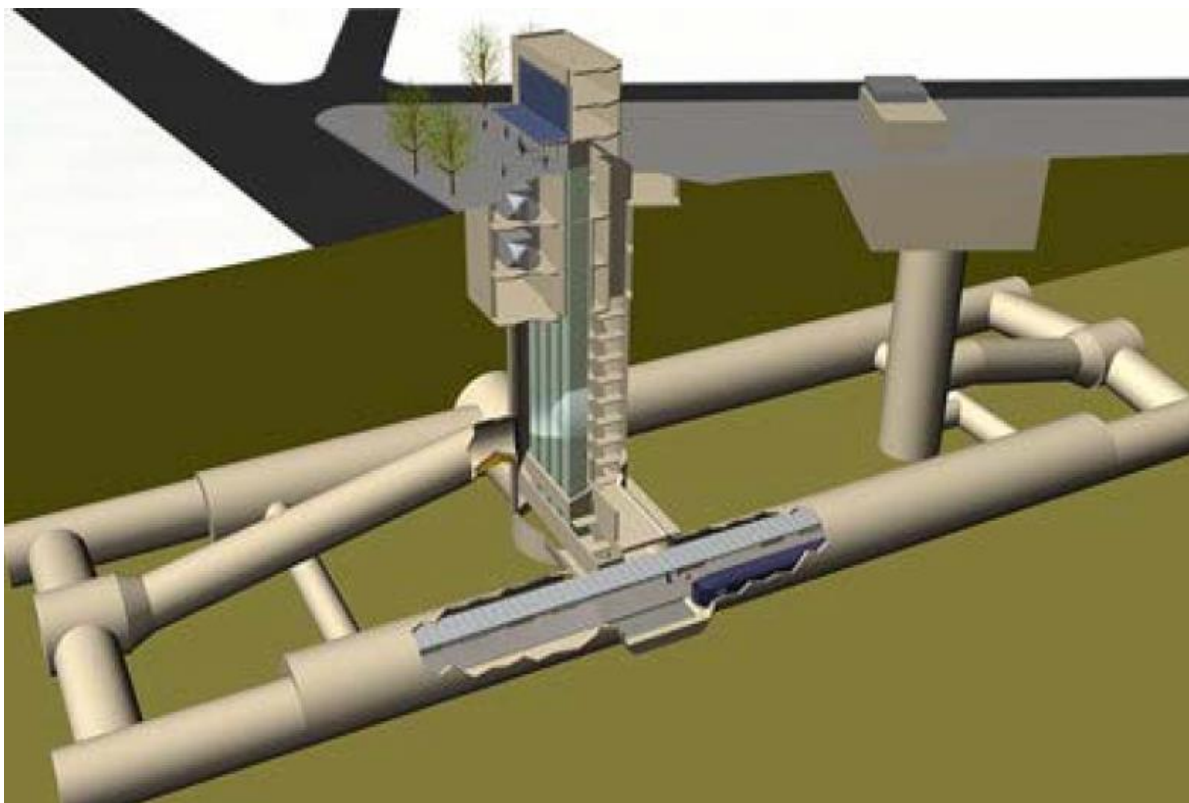


Slika 14. Presjeci kroz stanicu - Trg bana Josipa Jelačića [9]



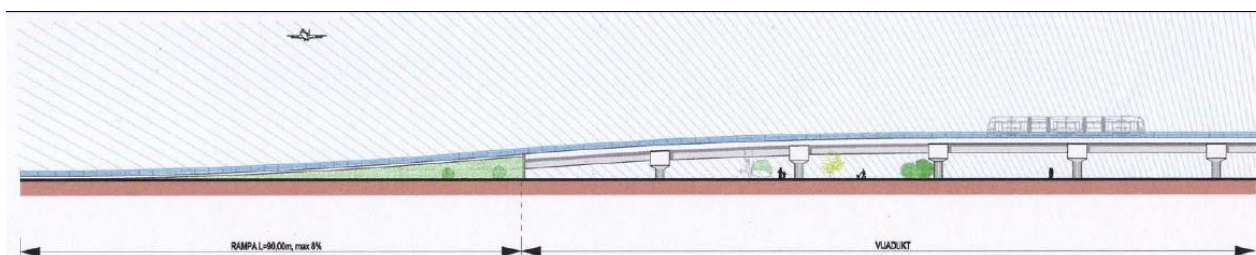
Slika 15. Pješački tunel [9]

Na slici 16. nalazi se primjer podzemne stanice građene tunelskom metodom.

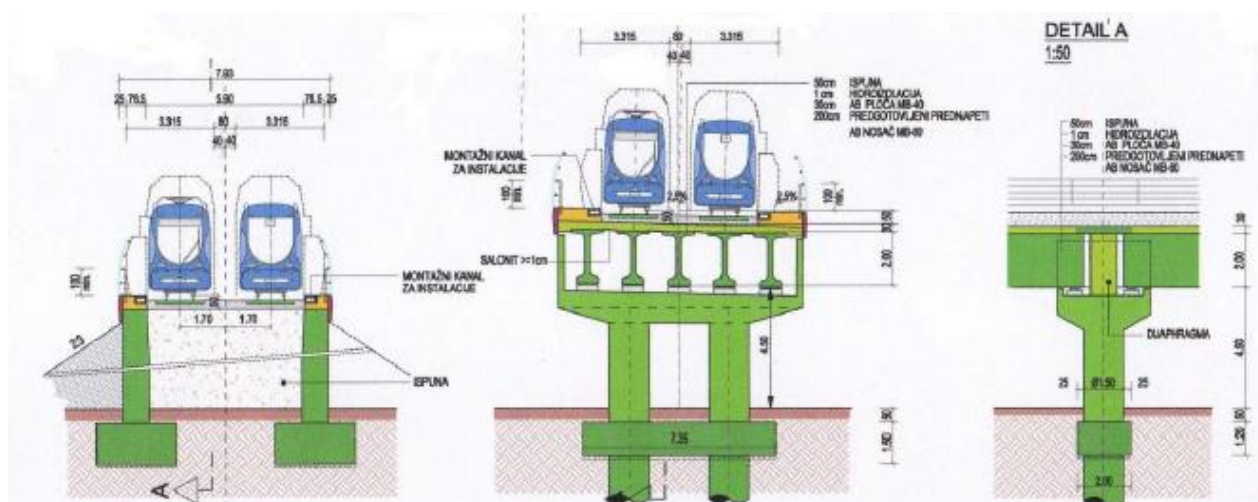


Slika 16. Podzemna stanica [9]

Pri tome autori [9] definiraju omjer cijena na način - stanica izvedena s površine : izvedba tunelskom metodom = 1:2 – 1:3.



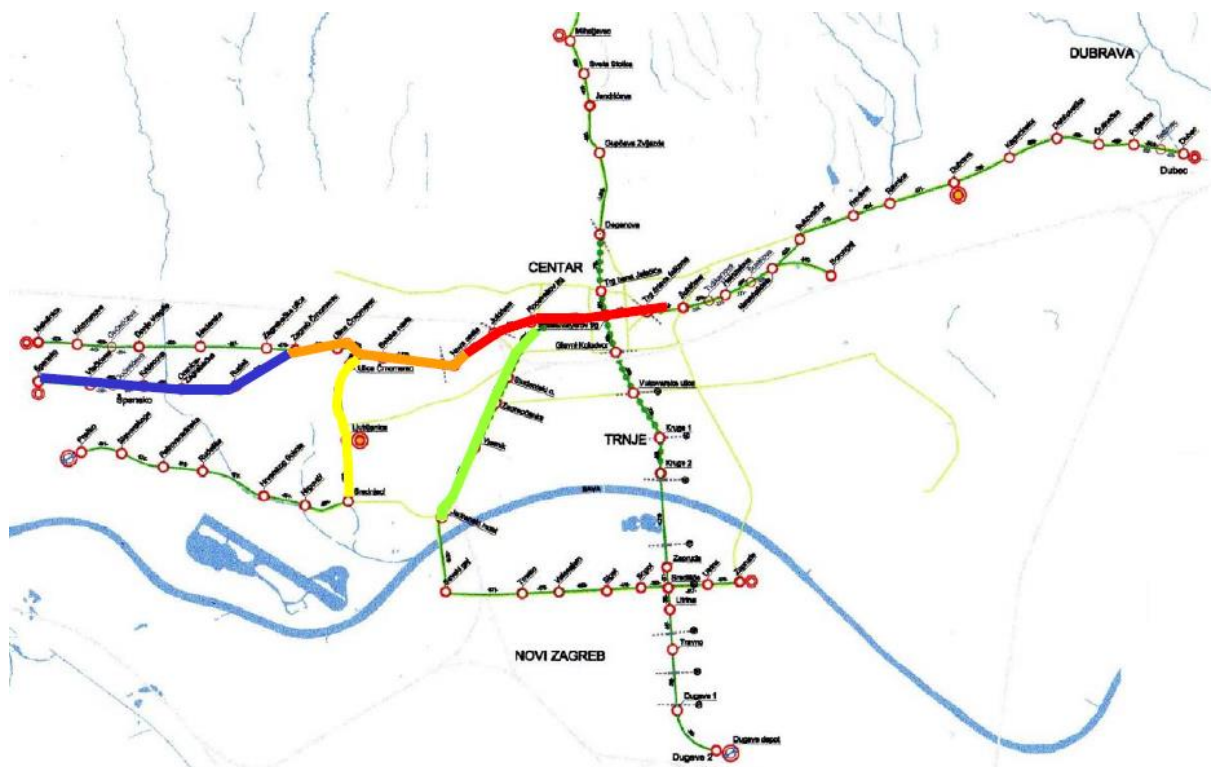
Slika 17. Uzdužni presjek rampe + vijadukt [9]



Slika 18. Poprečni presjeci rampe + vijadukt [9]

Prema zaključcima autora [9] slijedi da su prognozni troškovi varijantnih rješenja slijedeći:

- Dvostruki uski kolosijek u razini: **5.500 €/m'**
- Dvostruki uski kolosijek na vijaduktu: **15.000 €/m'**
- Dvostruki uski kolosijek u tunelu: **29.500 €/m'**
- Podzemne stanice (s površine i ispod): **5.500.000 – 11.000.000 €/kom**
- Most preko Save: **17.500.000 €/kom**



1. faza: 2.6 km / 116.7 mil. € (trajanje 24 mjeseci)

2.a faza: 2.7 km / 15.2 mil. € (trajanje 8 mjeseci)

2.b faza: 2.4 km / 98.9. mil. € (trajanje 24 mjeseci)

3.a faza: 3.5 km / 22.3 mil. € (trajanje 10 mjeseci)

depot Španjolsko: 20.000.000 €

3.b faza: 2.3 km / 15.5 mil. € (trajanje 7 mjeseci)

Slika 19. Vremenski plan izgradnje (istok - zapad) [9]



2. faza: 3.3 km / 136.4 mil. € (trajanje 30 mjeseci)

3.a faza: 1.8 km / 41 mil. € (trajanje 24 mjeseci)

3.b faza: 2.1 km / 26 mil. € (trajanje 12 mjeseci)

depot Dugave: 20.000.000 €

Slika 20. Vremenski plan izgradnje (sjever - jug) [9]

2.3 Pregled istraživanja parametarskih analiza TBM tunela izvedenih u tlu

2.3.1 Metode proračuna slijeganja površine terena

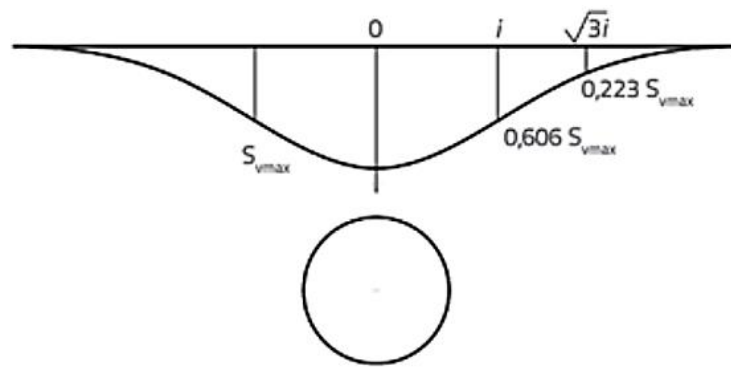
Projektiranje tunela zahtjeva dobru procjenu slijeganja površine terena. Zgrade koje se nalaze u središnjem Zagrebu građene su u najvećem dijelu između dva svjetska rata, tako da postoji opasnost za gradnju tunela u odnosu na veličine ukupnih i diferencijalnih slijeganja. U tom slučaju, potrebno je dobro istražiti kako bušenje tunela u krutim glinama utječe na trenutačna i konsolidacijska slijeganja površine terena. Kako bi što bolje procijenili veličinu potencijalnih slijeganja, u obzir moramo uzeti određene parametre: dubinu i promjer tunela, početno stanje naprezanja, naponsko – deformacijsko ponašanje tla oko tunela te 3D efekt izgradnje tunela. Osim NATM, koristi se i metoda štita koja se primjenjuje u veoma složenim geotehničkim uvjetima (meko tlo s malom visinom nadsloja). Metode koje se danas koriste za procjenu slijeganja površine terena uslijed izgradnje tunela su empirijske, numeričke i analitičke metode [10]. Empirijske metode imaju jednostavne proračune, veliku primjenu u praksi i daju dobre rezultate kada su uvjeti izgradnje tunela poznati. Poprečni profil slijeganja se može dobro prikazati normalnom raspodjelom Gaussove funkcije [10]. Ova primjena je vrlo prihvaćena u praksi i spada u često korištenu empirijsku metodu za procjenu slijeganja površine terena. Vertikalna slijeganja u poprečnom smjeru dana su sljedećim odnosom [10]:

$$S_v(x) = S_{vmax} \exp\left(-\frac{x^2}{2i^2}\right)$$

S_{vmax} – maksimalno slijeganje koje se javlja iznad osi tunela

x – horizontalna udaljenost od osi tunela

i – širina poprečnog profila slijeganja i horizontalna udaljenost od osi tunela do točke infleksije



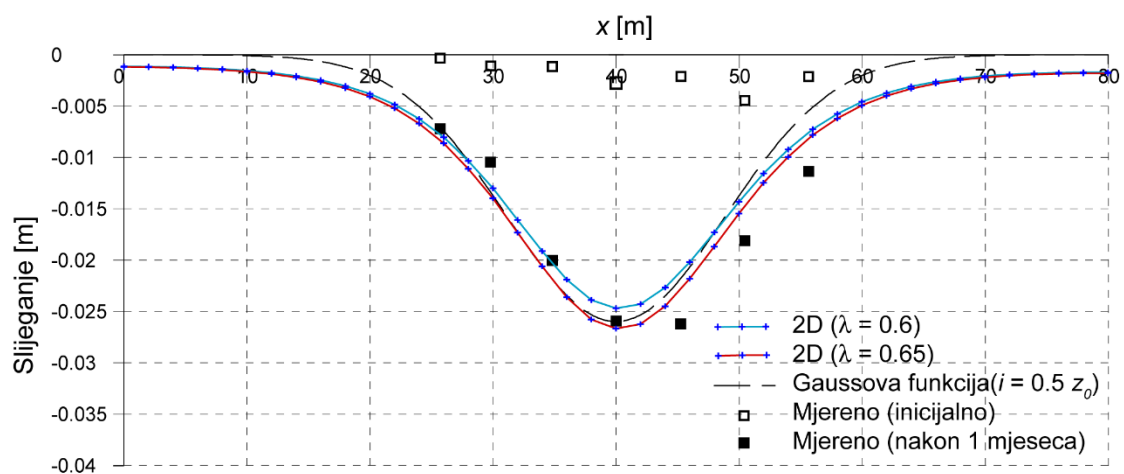
Slika 21. Gaussova krivulja slijeganja površine terena uslijed izgradnje tunela [10]

Za vrijeme izgradnje tunela u glinovitom tlu, slijeganja se najčešće događaju u nedreniranim uvjetima i obično se karakteriziraju parametrom koji predstavlja faktor gubitka volumena tla, V_L . Gubitak volumena tla je odnos deformiranog volumena u tunelskom otvoru i teorijskog volumena tunelskog otvora. Zaključno s tim, gubitak volumena na konturi iskopa jednak je volumenu profila slijeganja površine terena koji se dobiva integracijom prethodnog izraza (S_v). Važnost V_L ukazuje na tezu da se granične vrijednosti ovog parametra definiraju i u okviru ugovorne dokumentacije za izgradnju tunela [10]. Empirijske metode su korisne u ranoj fazi projektiranja tunela i koriste se u kombinaciji s analitičkim.

Analitičke metode su determinirane na 2D analize tunela kružnog presjeka u homogenoj sredini i s ovom metodom ne možemo kvalitetno odrediti interakciju konstrukcije i tla. S druge strane, analitičke metode daju jednostavna (elastična ili elastoplastična) rješenja u zatvorenom obliku.

Numeričke metode obuhvaćaju slijedeće stavke [10]: heterogenost sredine, nelinearno ponašanje tla, složena geometrija problema, metoda izgradnje i interakcija konstrukcije i tla. Napredak metode konačnih elemenata (FEM – Finite element method), koja spada u numeričku metodu, osigurao je efektivnu 3D analizu, koja je nužna za izgradnju tunela i praćenje slijeganja površine. Numeričkoj metodi je mana cijena i vrijeme proračuna.

Primjer koji je bio razmotren za rješavanje problema ovog rada je izgradnja tunela s otvorenim čelom u beogradskoj laporasto – glinovitoj sredini [11]. Provedeno je niz 2D i 3D elastoplastičnih analiza. Simulirana je parametarska analiza u kojoj se provjeravao utjecaj koeficijenta bočnog tlaka mirovanja K_0 , deformabilnosti tla, anizotropije, parametara posmične čvrstoće na utjecaj slijeganja. Konkretno se radi o tunelu "Dedinje" koji je dio beogradskog željezničkog čvora čija je tunnelska cijev širine 5,4 m i visine 7,1 m (bez obloge) [11]. Budući da govor o nesimetričnom modelu, analizirana je puna geometrija problema. Tunel je izveden primjenom belgijske metode [11]. Modeliranje je provedeno po standardnom postupku, koristeći Mohr – Coulomb-ov kriterij loma, započevši s "in situ" stanjem naprezanja te postepenim uklanjanjem materijala tla (prvo gornji svod i postavljanjem odgovarajuće podgrade, a nakon toga donji dio tunela + ugradnja obloge) [11]. Što se tiče utjecaja koeficijenta bočnog pritiska tla, niže vrijednosti K_0 rezultiraju uže i dublje poprečne profile slijeganja. Niže vrijednosti modula elastičnosti, E daju veća slijeganja. Kohezija i kut unutarnjeg trenja također značajno utječu na veličinu slijeganja. Povećanjem stupnja anizotropije (odnos nezavisnog modula posmika G i vertikalnog modula E) profil slijeganja površine terena postaje veći.

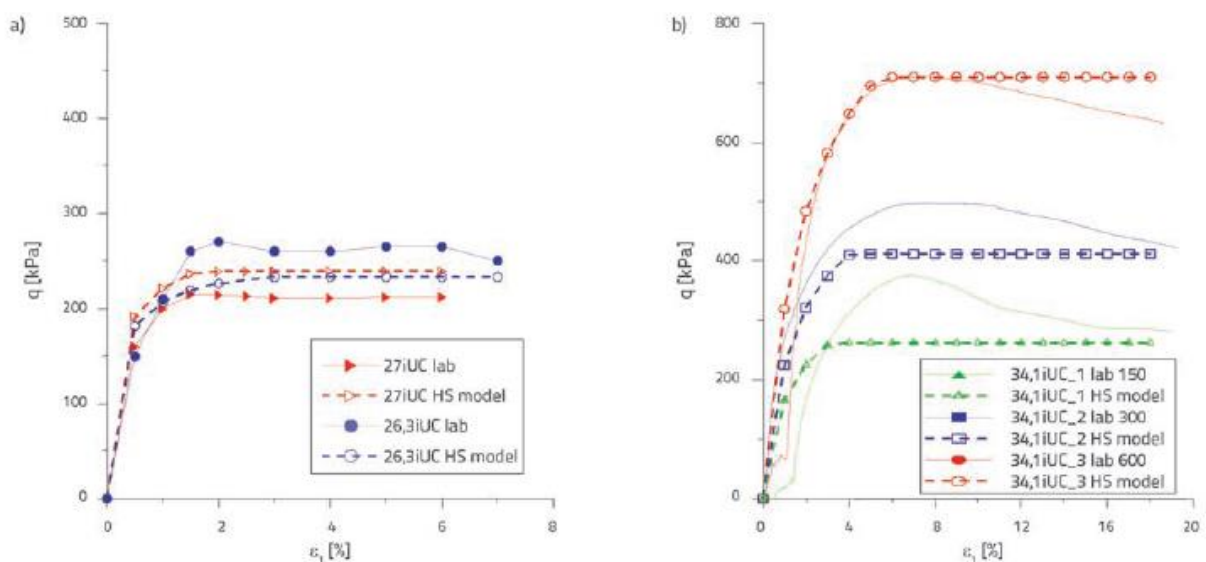


Slika 22. Profil slijeganja površine terena tunela Dedinje, Gaussova krivulja i podaci mjerenja [11]

Za procjenu pouzdane vrijednosti slijeganja pri izvedbi tunela, nužno je uzeti u obzir pomake i relaksaciju naprezanja koji se događaju na čelu tunela prije ugradnje obloge. Moguće je izostaviti prethodno definiranje postotka rasterećenja naprezanja (prije ugradnje obloge) takozvani V_L , uz primjenu potpunog 3D FE modela kako bi se predvidjela određena veličina slijeganja površine terena.

Jedan od korisnih primjena je i izgradnja tunela na liniji podzemne željeznice JLE (Jubilee Line Extension) u Londonu. Autor [12] koji se bavio problematikom je Wongsaroj sa suradnicima. Tlo, u kojem se izvršio zahvat podzemne željeznice, jest jako prekonsolidirana kruta glina, čiju sličnost nalazimo i u Zagrebu na dubinama većim od 10 m. Svi mehanički parametri londonske gline su vrlo dobro ispitani i tunel je građen posebnim strojevima. Primijenjena su troosna i edometarska laboratorijska ispitivanja gline iz kvalitetnih neporemećenih uzoraka te terenska geološka i geofizička ispitivanja, te ispitivanja vodopropusnosti. Posebnu pozornost autori su posvetili utjecaju anizotropije krutosti tla i utjecaju početnog stanja naprezanja. Horizontalna krutost londonske gline je do 50% veća od vertikalne, a sama anizotropija ima velik utjecaj na veličinu slijeganja [12]. Uz odgovarajuće rubne uvjete dreniranja u oblozi i rubne uvjete izazvane sukcesivnim bušenjem tunela, bitna mehanička svojstva krutih glina kada se ugrade u model ponašanja tla pokazuju dobre rezultate trenutačnih i konsolidacijskih slijeganja na površini tla. Na krutost gline istog mineraloškog sastava utječe njezina prirodna vlažnost, što uvjetuje da će promjena vlažnosti također utjecati na njezinu krutost. Nedostatak složenih analiza Wongsaroja i suradnika je korišteni matematički model ponašanja gline [12]. Geotehnička praksa problem s nejasnim fizikalnim značenjima parametara ne može zanemariti jer je izbor parametara modela jedan od ključnih koraka u numeričkim simulacijama. Odabrani model tla, kao jedan od često primjenjivanih u svijetu i kod nas, u slučaju izgradnje tunela u Londonu i iskopa građevne jame u Zagrebu, je Hardening Soil koji opisuje složeni odnos

naprezanja i deformacija u tlu (u ovom radu je također korišten i prikazan HS model u numeričkim 3D analizama). U prvom koraku provedena je analiza troosnog konsolidiranog pokusa u dreniranim uvjetima (CD/CID/DC) te simulacija jednodimenzionalne konsolidacije u edometru (E/OED/O). Preko programa SoilTest [12] koji numerički programira laboratorijska ispitivanja, dobivene su standardne krivulje ponašanja tla uspoređene s rezultatima pravih ispitivanja u laboratoriju. U drugom koraku je verificirano stanje prethodno odabranih računskih parametara HS materijala preko standardnog konsolidiranog troosnog pokusa u nedreniranim uvjetima (CU/CIU/UC). Za konačnu procjenu ponašanja krutih glina u nedreniranim uvjetima, simulirano je rješenje nedreniranih ispitivanja zagrebačke gline na Trgu bana Josipa Jelačića (usporedni rezultati laboratorija i modela su na slici 23). Krivulje $\varepsilon_1 - q$ laboratorijskih ispitivanja zagrebačke gline se ponašaju omekšavajuće nakon što dostignu vršnu čvrstoću q_{max} zbog manje prekonsolidacije zagrebačke gline. Komparativnim analizama krivulja argumentirano je da Hardening Soil model odlično opisuje rezultate troosnih i edometarskih ispitivanja na krutim glinama.



Slika 23. Simulacija krivulja $\varepsilon_1 - q$ u troosnim nedreniranim pokusima u HS materijalu za a) londonsku glinu; b) zagrebačku glinu [12]

Na lokaciji St. James's Park u Londonu analiza izgradnje promatrana je za dva HS modela: prvi slučaj uzima u obzir heterogenost tla, a drugi slučaj tretira londonsku glinu kao homogeno tlo. U slučaju heterogenog tla, parametri su dobiveni za svaki od geoloških podslojeva, a u slučaju homogenosti materijalni kriteriji su korišteni kao srednja vrijednost svih geoloških podslojeva londonske gline. Rezultati [12] su pokazali da heterogenost tla u HS modelu daje manja odstupanja slijeganja površine terena i bolje opisuje konsolidacijska slijeganja u tlu (najveći utjecaj na konsolidacijsku promjenu slijeganja imaju drenažni uvjeti u oblozi tunela).

Slično je i provedeno za iskop građevne jame u Zagrebu na Jelačićevom trgu. Za iskop građevne jame u tlu potrebno je koristiti određene elemente (dijafragma) koji će spriječiti dodatne pomake uz poboljšanje prognoze slijeganja s odabirom modela s prirodnom heterogenošću krutih glina. Uzimajući u obzir prirodnu heterogenost krutih zagrebačkih glina među različitim podslojevima opisano je bolje ponašanje zaštitne konstrukcije (dijafragme) nego u slučaju kad se promatra homogenost tla. Kao i u ranijim slučajevima, bitno je promatrati utjecaj anizotropije krutosti tla.

3. HIPOTEZA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

3.1 Hipoteza

Provedbom složenih trodimenzionalnih numeričkih parametarskih analiza može se kvantificirati utjecaj lokalnih uvjeta temeljnog tla i geometrije tunela na ponašanje tunelske konstrukcije zagrebačkog metroa u statičkim i dinamičkim uvjetima, kao i utjecaj njegove izvedbe na površinu terena gdje se nalazi brojna infrastruktura i objekti.

3.2 Ciljevi istraživanja

Kao glavni cilj istraživanja definira se evaluacija osjetljivosti rezultata numeričkih analiza na varijaciju fizikalno-mehaničkih parametra temeljnog tla u gradu Zagrebu, kojega karakterizira izrazita inherentna heterogenost i anizotropnost. Osim toga, evaluirati će se i ponašanje tunela u dinamičkim (seizmičkim) uvjetima za varijabilna potresna opterećenja, što je od izrazite važnosti uzimajući u obzir seizmičnost grada Zagreba. Statistička obrada rezultata numeričkih analiza će omogućiti ocjenu statičke i dinamičke osjetljivosti tunelske konstrukcije budućeg zagrebačkog metroa izvedenog TBM (Tunnel Boring Machine) metodom.

Cilj istraživanja je i formiranje baze rezultata složenih numeričkih analiza koja će poslužiti za buduća istraživanja o mogućnostima i potrebama izvedbe tunela metroa u gradu Zagrebu.

4. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Metodologija istraživanja podijeljena je na 5 osnovnih faze, provedenih sa ciljem ocjene statičke i dinamičke osjetljivosti tunelskih cijevi budućeg metroa u Zagrebu.

U **prvoj fazi Pregled stanja područja** cilj je prikupljanje, te usvajanje osnovnih teorijskih i iskustvenih spoznaja o metro sustavima u svijetu, ali i radovima na temu Zagrebačkog metroa.

Druga faza obuhvaća uspostavu detaljnog plana istraživanja i provedbe numeričkih analiza.

Cilj treće faze obrada je svih dostupnih podataka i podloga vezano na parametre tla potrebne za numeričko modeliranje tunelskih cijevi, te njihova statistička obrada.

U **četvrtoj se fazi** nakon prikupljenih podataka uspostavio numerički model, te su provedene statičke i dinamičke analize s varijacijama parametara.

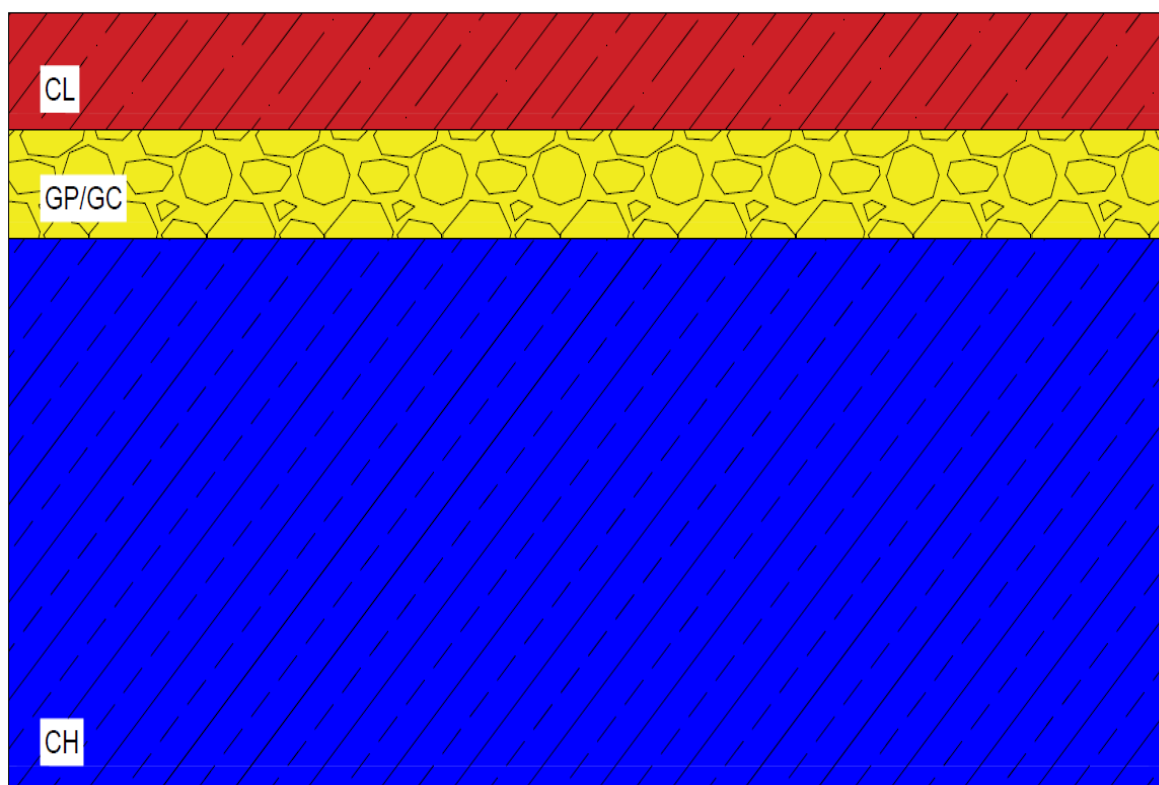
Posljednja faza obuhvaća zaključke na temelju prikupljenih rezultata provedenih numeričkih analiza, te uspostavu općih preporuka za daljnja istraživanja temeljene na zaključcima provedenog istraživanja.



Slika 24. Metodologija istraživačkog rada

5. ANALIZA PODLOGA I ODABIR RELEVANTNOG PROFILA TLA

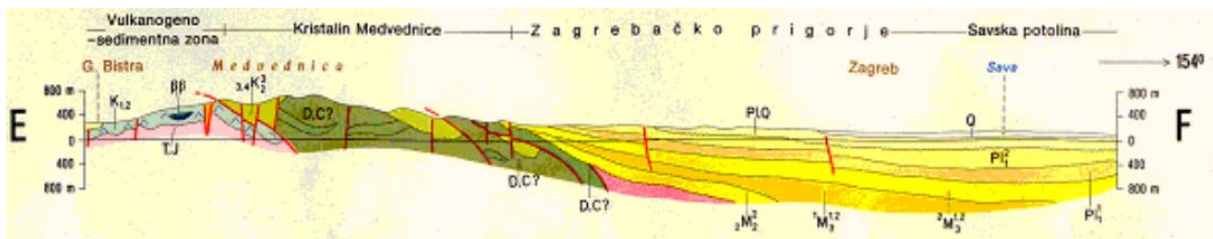
Prikaz karakteristične uslojenosti tla na Zagrebačkom području vidljiva je na Slici 25. Prikazani profil tla konačno je odabrani profil tla korišten za numeričke analize u ovom radu. Skica odabranog profila tla prikazan je na početku ovog poglavlja sa ciljem čitateljevog jednostavnijeg razumijevanja teorijski razrađene geologije, prikazane obrade podloga, i rezultata statistički obrađenih parametara tla.



Slika 25. Uslojenost tla - odabrani profil

5.1 Geologija i hidrogeologija promatranog područja

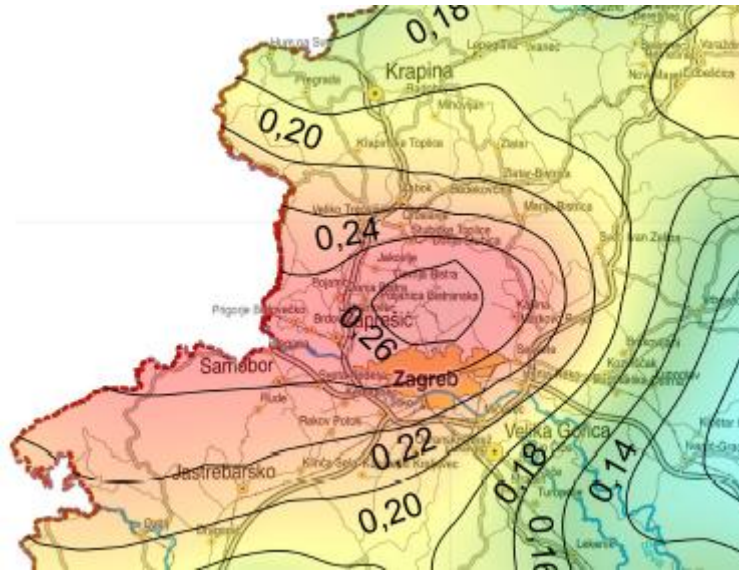
Područje grada Zagreba geološki okvirno može se podijeliti na terene Medvednice, Zagrebačkog prigorja i Savske potoline [8]. Ovakva podjela svrstava terene na područja različitih geoloških starosti što značajno utječe na očekivani profil tla na tom području. Najveći broj analiziranih trasa budućeg metroa u Zagrebu nalazi se u području Zagrebačkog prigorja i Savske potoline koji pripadaju zoni Zagrebačke depresije. Zona Zagrebačke depresije nastala je krajem geološkog razdoblja pleistocen kao posljedica tektonskih aktivnosti i dotoka vode iz Krškog polja [8]. Karakteristike zone Zagrebačke depresije su izmjene sitnozrnatih i krupnozrnatih slojeva po dubini, te riječni talozi kao najčešća pojava u površinskom sloju.



Slika 26. Prognozni geološki profil s osnovnim geološkim zonama [8]

5.2 Seizmičke karakteristike promatranog područja

Žumberačko-Medvednički rasjed, koji uključuje Medvednicu, predstavlja prostor granice zapadnog i južnog dijela Panonskog bazena, čime je posljedično područje grada Zagreba na tektonski aktivnom području [8]. No, promatra li se samo uže područje grada, bilježi se pojava jednog uzdužnog rasjeda (tzv. „Ilički rasjed“) te dva mlađa poprečna rasjeda [8]. Prisutnost svih navedenih rasjeda, i opće geološke karakteristike promatranog područja, navode na zaključak kako je područje grada Zagreba podložno tektonskim aktivnostima, tj. seizmičkim opterećenjima na građevinske zahvate i građevine.



Slika 27. Potresna karta Hrvatske - područje Zagreba [13]

5.3 Analiza dostupnih podloga o provedenim istražnim radovima

Za potrebe definiranja profila tla numeričkog modela metroa u Zagrebu korištene su podloge istražnih radova na danas već izgrađenom objektu Importanne Galerije. Obzirom kako je analizom mogućih trasa zagrebačkog metroa predviđena i trasa koja prolazi u neusporednoj blizini Importanne Galerije podaci dobiveni geotehničkim istražnim radovima na tom objektu relevantni su za aproksimaciju profila tla dionice od 100m tunela. Prilikom grupiranja što veće količine parametara tla za promatrano područje korišteni su Geotehnički elaborat Importanne Galerije [14], iz 1994. godine, te Projekt zaštite građevinske jame AB dijafragmom Importanne Galerije [15], iz 1996. godine. Još jedan razlog korištenja navedenih istražnih radova jer u činjenici da su rađene u velikom opsegu uz primjenu niza geotehničkih i geofizičkih metoda ispitivanja, te da je uspostavljeni profil tla mjerodavan za većinu ravninskog dijela grada Zagreba.

Geotehnički elaborat Importanne Galerije [14] dokument je na kojem se odabir relevantnog profila tla temeljio tijekom obrade podataka. Obzirom na opširnost elaborata obuhvaćeni su svi potrebni parametri i svi potrebni geotehnički istražni radovi. Od terenskih istražnih radova osim sondiranja terena, do max. 30m, izvedeni su standardni penetracijski testovi i „down hole“ ispitivanja brzine posmičnih valova. Vađenjem uzoraka tijekom sondiranja terena uzorci su korišteni u laboratorijskim ispitivanjima poput jednoosnih i troosnih testova, i određivanja zapreminskih težina, Atterbergovih granica, vlažnosti, i granulometrijskog sastava. Osim prikazanih rezultata istražnih radova u elaboratu su priloženi profili tla prema bušotinama koji su ovom radu korišteni isključivo za usporedbu sa profilom tla koji je dobiven neovisnom analizom podataka dostupnih istražnih radova. Rezultati istražnih radova statistički su obrađeni u svrhu dobivanja profila tla, te će biti prikazani u nastavku rada.

Projekt zaštite građevinske jame AB dijafragmom Importanne Galerije [15] obuhvaća sistematizirani prikaz istražnih radova iz Geotehnički elaborat Importanne Galerije, prikaz relevantnih profila tla u pojedinim presjecima bušotina, te projektnu dokumentaciju zaštite građevinske jame AB dijafragmom. Tijekom analize podloga ovog dokumenta korištene su sistematizirane vrijednosti istražnih radova za kontrolu provedene analize pojedinih parametara, te prikazani profili za usporedbu sa ustanovljenim profilom tla neovisnom analizom parametara iz elaborata. Na temelju svih prikupljenih podataka iz elaborata, te dobivenih parametara korelacijama, provedena je potpuna statistička analiza varijabilnosti parametara tla.

5.4 Statistička obrada prikupljenih podataka

Prikupljeni podaci obuhvaćaju rezultate terenskih ispitivanja (N_{spt}) i laboratorijskih ispitivanja (troosni pokusi, pokus izravnog posmika, Atterbergove granice i gustoće tla). Na temelju

prikupljenih podataka tražene su srednje vrijednosti po dubinama za određene bušotine kako bi se ustanovio profil tla. Pojedini parametri preuzeti iz rezultata ispitivanja korišteni su direktno, dok su se za pojedine parametre koristile korelacije za dobivanje novih parametara kako bi baza podataka bila što veća, a profil tla što je više moguće istovjetan onom u prirodi. Nakon što su svi parametri dobiveni iz korelacija, cjelokupna baza podataka podvrgnuta je statističkoj obradi u vidu dobivanja srednjih vrijednosti parametara za pojedini sloj tla. Prilikom dobivanja srednjih vrijednosti parametara obuhvaćeni su i parametri dobiveni korelacijama, i direktno dobiveni iz ispitivanja. Nakon objedinjenih srednjih vrijednosti parametara po slojevima napravljen je prikaz vrijednosti 0.5x standardne devijacije, 1.0x standardne devijacije i 1.5x standardne devijacije što će biti podloga za variranje parametara u analizi osjetljivosti budućeg metroa u Zagrebu. Uz tablični prikaz parametara prikazana je i normalna raspodjela parametara po slojevima za svaki pojedini parametar.

Korištene korelacije :

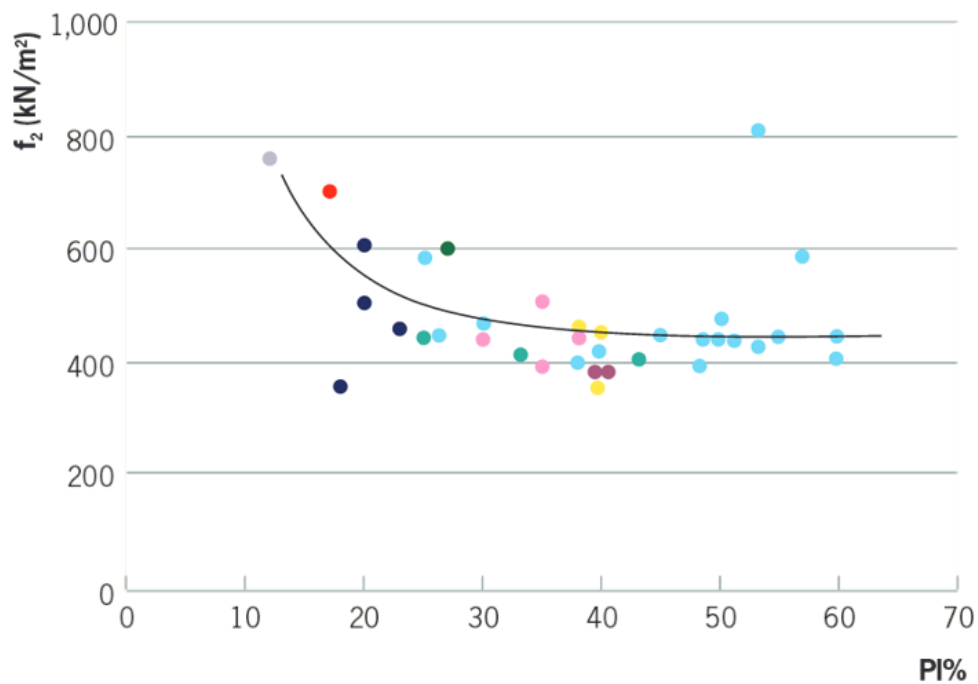
- *Stroud 1975 korelacija [16]*

$$E = N_{spt} \times f_2$$

E – Youngov modul elastičnosti [kPa]

N_{spt} – broj udaraca SPT-a

f_2 – koeficijent korelacije [MN/m²]



Slika 27. Stroud korelacija [15]

- *Korelacija Bowles [17]*

$$E = 600 \times (N_{60} + 6) + 2000$$

E – Youngov modul elastičnosti [kPa]

N₆₀ – korigirana vrijednost broja udaraca SPT-a

- *Korelacija Sorensen and Okkels [17]*

$$\varphi = 45 - 14 \times \log I_p$$

φ – kut trenja [°]

I_p – indeks plastičnosti [%]

- *Korelacija Ladd et al. [18]*

$$c_u = ((0,0037 \times I_p + 0,11) \times OCR^{0,8}) \times \sigma_v'$$

c_u – nedrenirana čvrstoća (kPa)

I_p – indeks plastičnosti (%)

OCR – koeficijent prekonsolidacije

σ_v' – efektivno naprežanje (kPa)

- *Korelacija Peck, Hanson, Thornburn (1974) [18]*

$$\varphi = 27,1 + 0,3 \times N_1 - 0,00054 \times N_1$$

φ – kut trenja [°]

N – broj udaraca SPT

Tijekom istražnih radova napravljene su istražne bušotine. Napravljeno je devet bušotina, a oznake bušotina su sljedeće : DB-1, SB-1, SB-2, SB-3, SB-4, UB-1, UB-2, UB-3, UB-4.

Tablica 1. Vrijednosti kuta trenja po bušotinama – korelacija *Peck, Hanson, Thornburn 1974*

Bušotina	SPT (N)	ϕ (°)
DB - 1	24.33	34.2
SB - 1	46.5	40
SB - 2	66.5	43.5
SB - 3	28.75	35.5
SB - 4	17.5	32.3
UB - 1	17.5	32.3
UB - 2	33.5	37
UB - 3	31.67	36.3
UB - 4	26	35

Tablica 2. Prikaz ispisanih parametara CL i CH sloja iz dostupnih rezultata ispitivanja DB1

Korelacija Stroud 1975

DB - 1	Nspt:	WL (%)	WP (%)	Ip (%)	f2	E (kPa)
CL	16	46	21,2	24,8	490	7840
	16	45	21,8	23,2	500	8000
	16	39	20,3	18,7	581	9296
	16	41	20,3	20,7	540	8640
	16	37	22,1	14,9	644	10304
	16	32,5	22,3	10,2	813	13008
CH	75	53	23,2	29,8	445	33375
	75	46,5	22,2	24,3	493	36975
	75	51	24,4	26,6	465	34875
	75	48,5	30,6	17,9	600	45000
	75	50	23,6	26,4	466	34950
	75	38,5	21,4	17,1	605	45375
	75	31	18,3	12,7	770	57750
	75	65	26	39	425	31875
	75	35	18,8	16,2	615	46125
	75	58,5	24,9	33,6	440	33000
	75	50,5	22,6	27,9	450	33750
	75	31,5	18,3	13,2	765	57375
	75	35	19,2	15,8	639	47925
	75	53	27,3	25,7	480	36000
75	53	26,7	26,3	467	35025	

Tablica 3. Prikaz ispisanih parametara CL i CH sloja iz dostupnih rezultata ispitivanja SB-1 ,
SB-2, SB-3 i SB-4

 Korelacija Stroud
1975

SB - 1	Nspt:	WL (%)	WP (%)	Ip (%)	f2	E (kPa)
CL	8,67	30	20,2	9,8	820	7109,4
CH	29	55	24,8	30,2	442	12818
	29	46,5	22,2	24,3	493	14297
	29	60	28,6	31,4	442	12818
	29	42	22,2	19,8	578	16762
	29	59,2	26,1	33,1	440	12760
SB - 2	Nspt:	WL (%)	WP (%)	Ip (%)	f2	E (kPa)
CL	18,75	39	20,3	18,7	581	10893,75
	18,75	36	19,4	16,6	615	11531,25
	18,75	31	20,8	10,2	813	15243,75
CH	28,25	46,9	22,7	24,2	493	13927,25
	28,25	65	24,7	40,3	440	12430
	28,25	53	25,5	27,5	455	12853,75
	28,25	50	22,8	27,2	454	12825,5
SB - 3	Nspt:	WL (%)	WP (%)	Ip (%)	f2	E (kPa)
CL	7,75	46	22	24	494	3828,5
	7,75	44	20,6	23,4	496	3844
	7,75	43	22,2	20,8	540	4185
	7,75	45,5	20,7	24,8	492	3813
CH	40,3	51	23,6	27,4	455	18336,5
	40,3	50,5	25,1	25,4	481	19384,3
	40,3	46	20,7	25,3	481	19384,3
	40,3	47	24,7	22,3	512	20633,6
	40,3	46	23,9	22,1	512	20633,6
	40,3	69	28,6	40,4	440	17732
	40,3	61	23,3	37,7	440	17732
SB - 4	Nspt:	WL (%)	WP (%)	Ip (%)	f2	E (kPa)
CL	10,67	39,5	19,6	19,9	542	5783,14
	10,67	36	19,9	16,1	615	6562,05
CH	11	53	22,2	30,8	444	4884
	11	45	22,9	22,1	512	5632

Tablica 4. Prikaz ispisanih parametara CL i CH sloja iz dostupnih rezultata ispitivanja UB-1 i

UB-2

Korelacija Stroud 1975

UB - 1	Nspt:	WL (%)	WP (%)	Ip (%)	f2	E (kPa)
CL	8	44	23,6	20,4	541	4328
	8	30,6	21,6	9	820	6560
CH		48	27,7	20,3	541	
		49	24,8	24,2	492	
		48,8	26,6	22,2	512	
		70	30,8	39,2	440	
		56	26,7	29,3	445	
		46,4	23,8	22,6	512	
		54,6	26,2	28,4	450	
UB - 2	Nspt:	WL (%)	WP (%)	Ip (%)	f2	E (kPa)
CL	8	40,2	19,5	20,7	541	4328
	8	43	20,7	22,3	512	4096
	8	45,2	22,6	22,6	512	4096
CH	75	33	19,3	13,7	648	48600
	75	54	26,3	27,7	455	34125
	75	55	27,8	27,2	455	34125
	75	48	20,5	27,5	455	34125
	75	50,5	27,2	23,3	492	36900
	75	37	22,2	14,8	645	48375
	75	39	21,2	17,8	600	45000
	75	65	22,8	42,2	440	33000
	75	54	23,5	30,5	444	33300
	75	32	17,5	14,5	645	48375

Tablica 5. Prikaz ispisanih parametara CL i CH sloja iz dostupnih rezultata ispitivanja UB-3 i

UB-4

Korelacija Stroud 1975

UB - 3	Nspt:	WL (%)	WP (%)	Ip (%)	f2	E (kPa)
CL	8	40	19,4	20,6	541	4328
	8	40,2	19,6	20,6	541	4328
	8	45	21,6	23,4	493	3944
	8	40,5	20,8	19,7	542	4336
	8	30	20,9	9,1	820	6560
CH	55	46	22,8	23,2	493	27115
	55	42	21,3	20,7	541	29755
	55	43	23,7	19,3	542	29810
	55	57	23	34	445	24475
	55	39	23,5	15,5	638	35090
	55	55,5	28,8	26,7	465	25575
	55	44	21,4	22,6	512	28160
	55	36	22,2	13,8	646	35530
	55	30,5	18,9	11,6	772	42460
	55	55	25,1	29,9	445	24475
UB - 4	Nspt:	WL (%)	WP (%)	Ip (%)	f2	E (kPa)
CL	8	32	18,9	13,1	646	5168
	8	48	21,8	26,2	465	3720
	8	40	21,7	18,3	581	4648
	8	41	23,8	17,2	600	4800
CH		53	25,8	27,2	454	
		54,9	26,4	28,5	450	
		44	30,1	13,9	655	
		46	23,4	22,6	512	
		67	26,7	40,3	440	
		51	26,6	24,4	492	
		59,5	28,9	30,6	444	
		46,3	23,3	23	512	

U Tablica 2., Tablica 3., Tablica 4. i Tablica 5. prikazane su preuzete vrijednosti rezultata ispitivanja za 1.sloj niskoplastične gline i 3.sloj visokoplastične gline. Rezultati koji su vidljivi u tablici su Atterbergove granice i broj udaraca SPT-a. U sklopu tablice očitane su vrijednosti parametra f_2 koji se koristio za dobivanje modula elastičnosti (E [kPa]) korelacijom Stroud 1975.

Na temelju vrijednosti granica tečenja i granica plastičnosti koje su dobivene direktno iz laboratorijskih ispitivanja izračunat je i indeks plastičnosti (I_p) koji je također prikazan u sklopu Tablica 2., Tablica 3., Tablica 4. i Tablica 5. Indeks plastičnosti nije korišten u parametarskim analizama koje su provedene u ovom istraživačkom radu, no mogu poslužiti u daljnjim istraživanjima u svrhu promatranja ponašanja pojedinih slojeva ili definiranja varijacije parametara u numeričkim analizama.

Tablica 6. Očitane vrijednosti f_2 za prosječne vrijednosti po bušotinama

	Bušotina	f_2 (očitano) (kPa)
CL	DB - 1	581
	SB - 1	820
	SB - 2	640
	SB - 3	500
	SB - 4	600
	UB - 1	645
	UB - 2	510
	UB - 3	586
CH	UB - 4	586
	DB - 1	513
	SB - 1	455
	SB - 2	445
	SB - 3	450
	SB - 4	466
	UB - 1	465
	UB - 2	513
UB - 3	520	
	UB - 4	467

Tablica 7. Relevantni parametri tla – 1.sloj CL

		Legenda:				
			Troosni pokus CIU		Korelacija Ladd et al.	
			Korelacija Stroud 1975.		Lab. Ispitivanja	
			Korelacija Sorensen and Okkels			
CL	cu (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	E (kPa) = f2 * NSPT	ρ (Mg/m3)	γ (kN / m3)
	35	20	26.33	7840	2.03	19.9143
	49	12	30.24	8000	2.04	20.0124
	15	6	28.42	9296	1.92	18.8352
	8	26	25.5	8640	1.52	14.9112
	104.2		25.48	10304	1.91	18.7371
	101.1		25.88	13008	1.9	18.639
	92.5		27.19	7109.4	1.99	19.5219
	96.4		26.58	10893.75	1.9	18.639
	85.3		28.58	11531.25		
	76.3		30.88	15243.75		
	75.5		31.12	3828.5		
	92.5		27.19	3844		
	88.5		27.92	4185		
	76.3		30.88	3813		
	102.7		25.68	5783.14		
	101.5		25.83	6562.05		
	96.5		25.48	4328		
	104.2		26.82	6560		
	94.8		28.1	4328		
	87.6		26.67	4096		
	95.8		31.64	4096		
	74.0		26.58	4328		
	96.4		26.12	4328		
	99.4		26.04	3944		
	100.0		26.61	4336		
	96.2		26.61	6560		
	96.2		25.83	5168		
	101.5		26.88	3720		
	94.4		31.57	4648		
74.2		29.36	4800			
81.8		25.14				
106.9		27.33				
91.8		27.7				
89.7						

cu – nedrenirana čvrstoća [kPa] ; c – kohezija [kPa] ; ϕ – kut trenja tla [°] ; E – modul elastičnosti [kPa] ; ρ – gustoća tla [Mg/m³] ; γ – zapreminska težina tla [kN/m³]

Tablica 5. sistematizirani je prikaz objedinjenih parametara tla za 1.sloj (CL) iz svih dostupnih rezultata ispitivanja i svih parametara dobivenih korelacijama. U tabličnom prikazu korištene su boje kako bi se naglasio način na koji je pojedini parametar dobiven ili otkuda je preuzet.

Tablica 8. Rezultati statističke obrade parametara za 1.sloj CL

1. sloj CL							
	cu (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	E (kPa)	ρ (Mg/m ³)	γ (kN / m ³)	
min	8	6	25	3720	2	15	min
max	107	26	32	15244	2	20	max
median	93	16	27	4984	2	19	median
mean	85	16	28	6504	2	19	mean
0.5*stdev	12.0	4.4	1.0	1552.2	0.1	0.8	0.5*stdev
1*stdev	24.0	8.8	2.0	3104.3	0.2	1.6	1*stdev
1.5*stdev	36.0	13.2	2.9	4656.5	0.2	2.4	1.5*stdev

Statističkom obradom parametara dobivene su srednje vrijednosti pojedinog parametra tla (μ), koja je bila polazišna točka za osnovnu analizu numeričkog modela budućeg metroa u Zagrebu. Srednje vrijednosti za relevantne parametre u 1.sloju iznose 16 kPa parametra kohezija tla, kut trenja od 28° i modul elastičnosti od 6504 kPa. U Tablica 8. prikazane su i vrijednosti 0.5x, 1.0x i 1.5x standardne devijacije koje su služile za varijaciju parametara u numeričkim analizama. Varijacije parametara promatrane su dodavanjem navedenih vrijednosti i oduzimanjem od srednje vrijednosti. U nastavku su prikazane konačne vrijednosti variranih parametara.

Tablica 9. Relevantni parametri tla – 2.sloj GP/GC

Legenda:

	Izravni posmik
	Korelacija Bowles
	Korelacija Peck 1974. (SPT - ϕ)

	ϕ (°)	E (kPa)
	GP/GC	41
46		33440
41		45500
42		22850
41		16100
42		16100
46		25700
41		24602
46		21200
42		
41		
46		
46		
42		
34.2		
40		
43.5		
35.5		
32.3		
32.3		
37		
36.3		
35		

ϕ – kut trenja tla [°] ; E – modul elastičnosti [kPa]

Za 2.sloj GP/GC prikazane su vrijednosti kuta trenja i modula elastičnosti. Za navedeni sloj u dostupnim dokumentacijama navedeno je najmanje podataka i provedeno najmanje istražnih radova. U tabličnom prikazu korištene su boje kako bi se naglasio način na koji je pojedini parametar dobiven ili otkuda je preuzet.

Tablica 10. Rezultati statističke obrade parametara za sloj šljunka GP/GC

2. sloj GP/GC			
	ϕ (°)	E (kPa)	
min	32	16100	min
max	46	45500	max
median	41	22850	median
mean	40	25077	mean
0.5*stdev	2.2	4652.4	0.5*stdev
1*stdev	4.4	9304.7	1*stdev
1.5*stdev	6.6	13957.1	1.5*stdev

Srednje vrijednosti za relevantne parametre u sloju šljunka iznose kut trenja od 40° i modul elastičnosti od 25077 kPa. U *Tablica 10.* prikazane su vrijednosti 0.5x, 1.0x i 1.5x standardne devijacije koje su služile za varijaciju parametara u numeričkim analizama. Varijacije parametara promatrane su dodavanjem navedenih vrijednosti i oduzimanjem od srednje vrijednosti. U nastavku su prikazane konačne vrijednosti variranih parametara.

Tablica 11. Relevantni parametri 3.sloj CH - 1. dio

		Legenda:				
			Troosni pokus CIU		Korel. Ladd et al.	
			Korelacija Stroud 1975.		Lab. Ispitivanja	
			Korelacija Sorensen and Okkels			
CH	cu (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	E (kPa) = f2 * NSPT	ρ (Mg/m3)	γ (kN / m3)
	82	53	23,18	33375	1,92	18,8352
	50	46	23,45	36975	1,94	19,0314
	113,7	108	18,15	34875	2,03	19,9143
	103,2	38	29,15	45000	2,04	20,0124
	107,6	62	24,36	34950	2,06	20,2086
	91,0		24,12	45375	2,02	19,8162
	107,2		24,36	57750	1,97	19,3257
	89,5		25,6	31875	1,97	19,3257
	81,1		25,05	46125	1,98	19,4238
	131,3		27,46	33000	2,06	20,2086
	87,8		25,1	33750	2,01	19,7181
	121,0		27,74	57375	2,08	20,4048
	110,1		29,55	47925	2,06	20,2086
	82,0		22,73	36000	2,02	19,8162
	87,0		23,63	35025	1,98	19,4238
	105,9		24,76	12818	2,09	20,5029
	107,1		29,31	14297	2,06	20,2086
	114,5		28,22	12818	2	19,62
	103,2		25,26	16762	2,05	20,1105
	116,8		25,12	12760	1,97	19,3257
	94,6		24,28	13927,25	2,07	20,3067
	120,0		25,6	12430	1,96	19,2276
	103,0		24,04	12853,75	1,88	18,4428
	133,8		26,85	12825,5	2,02	19,8162
	109,3		23,72	18336,5	1,96	19,2276
	108,8		25,63	19384,3	1,97	19,3257
	109,2		22,53	19384,3	2,16	21,1896
	105,3		24,85	20633,6	2,07	20,3067
	105,1		24,92	20633,6	1,93	18,9333
99,4		24,87	17732	1,95	19,1295	
99,0		25,33	17732	1,96	19,2276	
134,0		25,36	4884	1,86	18,2466	
128,8		26,12	5632	2	19,62	

Tablica 12. Relevantni parametri 3.sloj CH - 2. dio

Legenda		Troosni pokus CIU	Korelacija Ladd et al.
		Korelacija Stroud 1975.	Lab. Ispitivanja
		Korelacija Sorensen and Okkels	
CH	cu (kPa)	ϕ (°)	E (kPa) = f2 * NSPT
	115,7	26,18	48600
	99,0	22,51	34125
	95,6	22,93	34125
	103,0	24,16	34125
	99,2	26,18	36900
	131,7	26,7	48375
	100,0	26,15	33000
	111,1	22,69	33300
	83,0	24,46	48375
	109,7	26,04	27115
	108,8	24,65	29755
	109,3	29,09	29810
	101,3	24,81	24475
	90,8	24,85	25575
	137,4	25,86	28160
	115,1	28,62	35530
	84,5	27,49	42460
	101,1	22,25	24475
	96,4	24,22	
	93,7	28,74	
	121,8	25,88	
	107,8	27	
	100,0	23,56	
	83,2	28,34	
	79,0	25,03	
	113,9	26,04	
	108,8	29,04	
	111,3	30,1	
	83,4	24,34	
	100,0	24,92	
	133,8	24,63	
	103,4	29	
115,3	26,04		
	25,58		
	24,2		
	25,94		

Tablica 13. Rezultati statističke obrade parametara za 3.sloj CH

2.sloj CH							
	cu (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	E (kPa)	ρ (Mg/m3)	γ (kN / m3)	
min	50	38	18	4884	2	18	min
max	137	108	30	57750	2	21	max
median	105	53	25	33000	2	20	median
mean	104	61	25	29690	2	20	mean
0.5*stdev	7.9	13.8	1.0	6559.7	0.0	0.3	0.5*stdev
1*stdev	15.8	27.5	2.1	13119.4	0.1	0.6	1*stdev
1.5*stdev	23.8	41.3	3.1	19679.1	0.1	0.9	1.5*stdev

Statističkom obradom podataka iz *Tablica 11.* i *Tablica 12.* dobivene su srednje vrijednosti za potrebne parametre u sloju CH ; kut trenja od 25° , modul elastičnosti od 29690 kPa i kohezija 61 kPa. U *Tablica 13.* prikazane su vrijednosti 0.5x, 1.0x i 1.5x standardne devijacije koje su služile za varijaciju parametara u numeričkim analizama. Varijacije parametara promatrane su dodavanjem navedenih vrijednosti i oduzimanjem od srednje vrijednosti. U nastavku su prikazane konačne vrijednosti variranih parametara.

Za 3.sloj (glina CH) u dostupnim podlogama bio je dostupan najveći broj podataka, što je rezultiralo i najvećim brojem podataka dobivenih korelacijama, te sveukupno najvećom bazom parametara tla. Pošto su se statičke i dinamičke analize osjetljivosti metroa provodile sa pretpostavkom kako se tunelske cijevi metroa nalaze u 3.sloju (CH) svakako je dobro što je najveći broj podataka dostupan baš za taj sloj.

Tablica 14. Prikaz konačnih vrijednosti za varijacije standardnim devijacijama

	1.sloj CL			2.sloj GP/GC			3.sloj CH		
	c (kPa)	ϕ (°)	E (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	E (kPa)	c (kPa)	ϕ (°)	E (kPa)
- 1.5 σ	2,8	24,6	1847,5	-	33,8	11119,6	19,7	21,9	10011,3
- 1 σ	7,2	25,6	3399,7	-	36,0	15772,0	33,5	22,9	16571,0
- 0.5 σ	11,6	26,5	4951,9	-	38,2	20424,3	47,2	24,0	23130,7
Srednja vrijednost μ	16,0	27,5	6504,1	-	40,4	25076,7	61,0	25,0	29690,4
0.5 σ	20,4	28,5	8056,2	-	42,6	29729,0	74,8	26,0	36250,1
1 σ	24,8	29,5	9608,4	-	44,8	34381,4	102,3	28,1	49369,5
1.5 σ	29,2	30,5	11160,6	-	47,0	39033,7	143,5	31,3	69048,6

Prikazane vrijednosti u *Tablica 14.* korištene su u numeričkim analizama u svrhu variranja parametara pojedinih slojeva i promatranje slijeganja terena i tjemena tunela, maksimalnih vrijednosti te kroz vrijeme. Provedene analize, i rezultati provedenih analiza prikazani su u poglavlju 6. *Trodimenzionalne numeričke analize zagrebačkog metroa.*

U Tablici 15. prikazane su dubine slojeva po bušotinama na temelju čega su odabrane srednje vrijednosti debljina slojeva čime je definiran profil tla koji je korišten u 3D numeričkim analizama. Za prvi sloj (CL) odabrana debljina sloja iznosi 7.5m, dok je za drugi sloj odabrana dubina 14.5m od površine terena. Zadnji sloj (CL) odabran je kao sloj debljine oko 25m, što je u numeričkom modelu zbog proračuna zaokruženo na ukupnu dubinu dna od 50m od površine terena.

Tablica 15. Prikaz dubina slojeva prema dostupnim podlogama

Dubina za modeliranje		
CL	GP/GC	CH
7.5	14.05	30
5.4	15.5	25
7.6	16.2	25
7.8	14.4	25
7.5	14.3	16
6.2	15.1	25
7.2	13.4	25
9.1	14.4	25
9.9	14.3	25
Srednja dubina :	7.58	14.63
		25

Statičke analize rezilijentnosti tunelskih cijevi osim varijacijama parametara tla rađene su i varijacijama K_0 (koeficijent bočnog tlaka mirovanja). Koeficijent K_0 variran je za vrijednosti OCR-a 1,3 i 5 za svaki odgovarajući kut trenja (varijacija standardnih devijacija). Navedene varijacije koeficijenta bočnog tlaka napravljene su za 3.sloj profila tla, tj. sloj visokoplastične gline.

$$K_0 = (1 - \sin(\varphi)) \times (OCR \times \sin(\varphi))$$

φ – kut trenja [°]

OCR – koeficijent prekonsolidacije

K_0 – koeficijent bočnog tlaka mirovanja

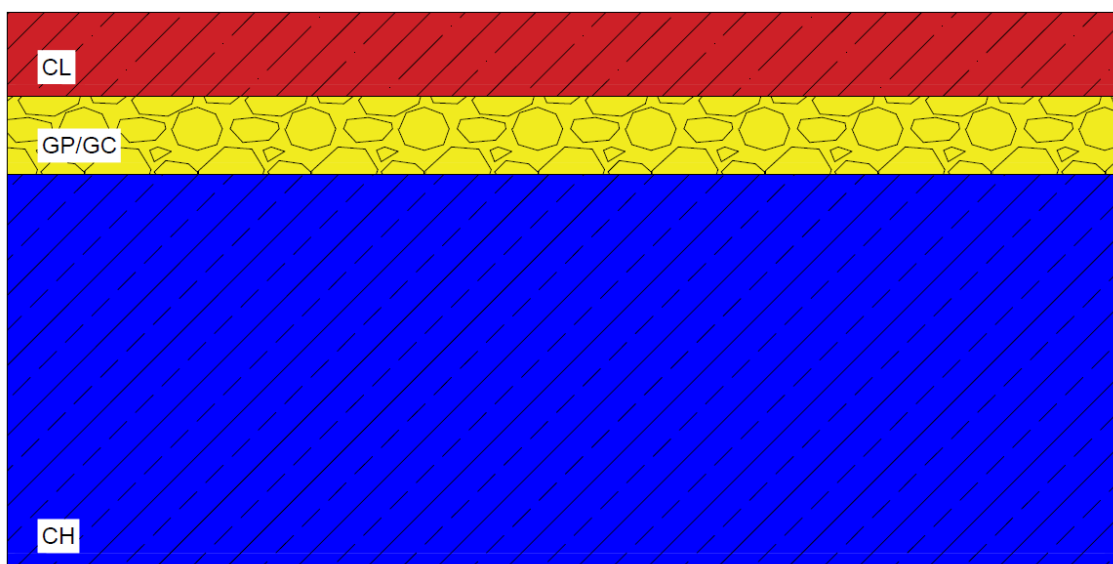
Tablica 16. Vrijednosti K_0 za odgovarajući kut trenja – 3.sloj

φ (°)	φ (rad)	K_0 (OCR = 1)	K_0 (OCR = 3)	K_0 (OCR = 5)
21,9	0,38	0,63	0,94	1,14
22,9	0,40	0,61	0,94	1,14
24	0,42	0,59	0,93	1,14
25	0,44	0,58	0,92	1,14
26	0,45	0,56	0,91	1,14
27,1	0,47	0,54	0,90	1,13
28,1	0,49	0,53	0,89	1,13

5.5. Odabir relevantnog profila tla za numeričke analize

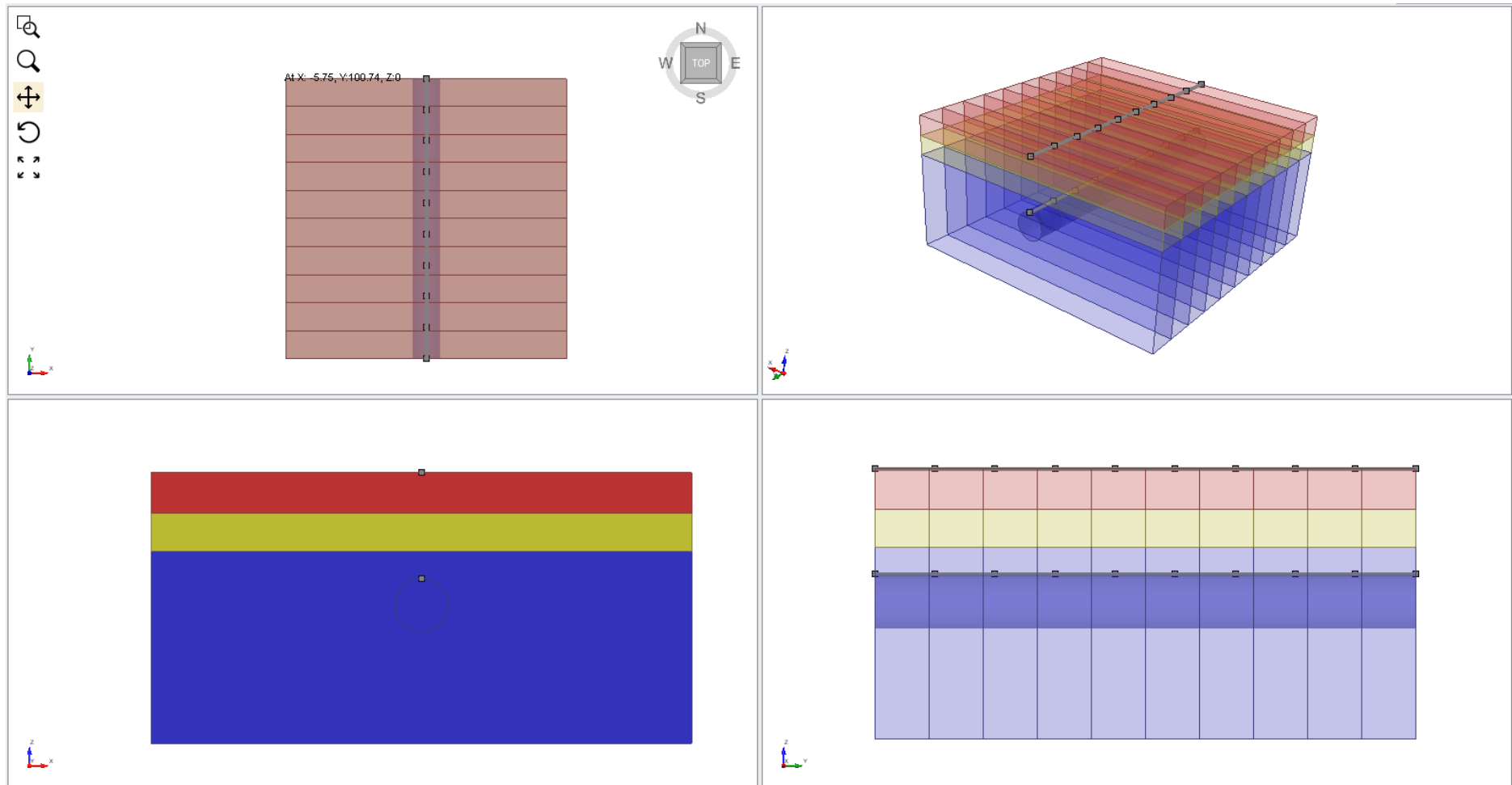
Nakon provedene analize dostupnih podloga i statističke obrade prikupljenih podataka iz dostupnih podloga o istražnim radovima na promatranjoj lokaciji uspostavljen je profil tla karakteristika:

- 3 sloja
 - 1. sloj (0 – 7,5m) – Glina niske plastičnosti CL
 - 2. sloj (7,5 – 14.5m) – Šljunak GP/GC
 - 3.sloj (14.5 – 50m) – Glina visoke plastičnosti CH



Slika 2278. Profil tla za numerički model

Prikaz konačno definiranog profila tla na Slika 28. prikazuje raspored slojeva po dubini sa naznačenim bojama koje su korištene u numeričkim analizama, programskom paketu RocScience. Odabrane boje za slojeve tla korištene su jednako u svim numeričkim modelima tijekom svih analiza. Crvena boja označava glinu niske plastičnosti u prvom sloju, žutom bojom označen je šljunak drugog sloja koji se nalazi na dubini (7,5 – 14,5m), dok je treći, ujedno i najniži, sloj označen plavom bojom te predstavlja glinu visoke plastičnosti.



Slika 289. Prikaz odabranog profila tla u numeričkim analizama

6. TRODIMENZIONALNE NUMERIČKE ANALIZE ZAGREBAČKOG METROA

6.1. Uvod u 3D numeričke analize

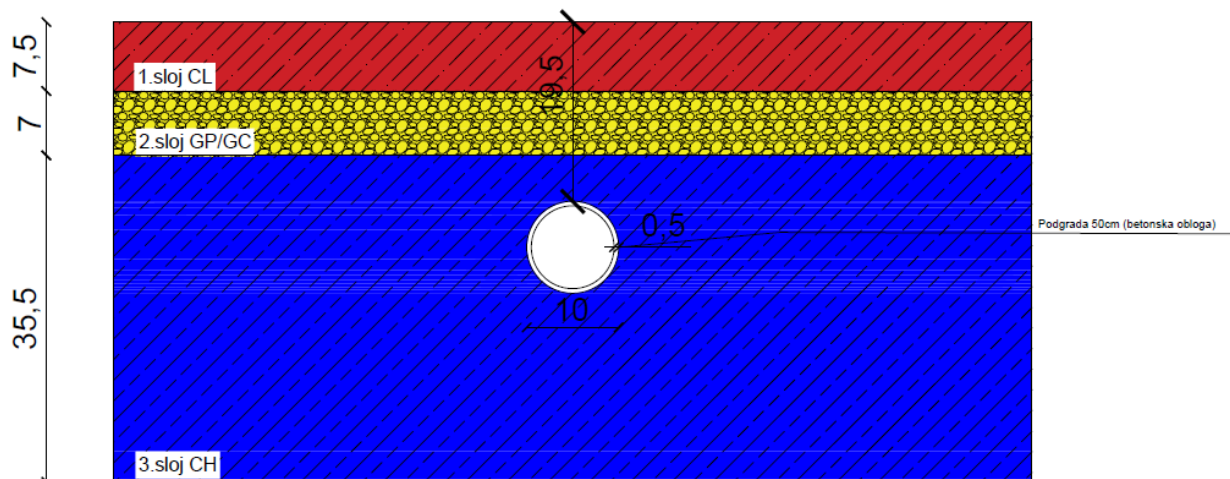
Za rješavanje numeričke problematike zagrebačkog metro sustava korišten je software RocScience (RS 3D). RS 3D služi za definiranje analiza naprezanja, deformacija, stabilnosti, provjeru protoka površinskih ili podzemnih voda te se koristi i za podzemne iskope. Pojednostavnjuje najsloženije građevinske, geotehničke i rudarske iskope pomoću 3D metode konačnih elemenata (3D FEM) i uključuje instalaciju potpornih konstrukcija [19].

Cilj provedenih analiza ovog rada bio je uočavanje promjene slijeganja na razini površine terena i tjemena tunela. Te promjene događale su se s varijacijom parametara slojeva (CL, GP/GC, CH). Parametri varirani u analizama su modul elastičnosti (E), kohezija (c), kut unutarnjeg trenja (φ) i koeficijent bočnog tlaka mirovanja (K0). Kod evaluacije E, c i φ modificiran je jedan sloj tla dok su druga dva ostala ista, sa svojim srednjim vrijednostima. Taj postupak je napravljen za svaki sloj. Kod K0 varirao se jedino sloj gline CH, dok su glina CL i šljunak GP/GC ostali kao srednja vrijednost. Osim toga, interpretirane su vremenski ovisne analize slijeganja tijekom izvedbe tunela, pri čemu se samo razradila modifikacija sloja donje gline (CH) a gornja glina (CL) i šljunak (GP/GC) su ostali u obliku srednje vrijednosti.

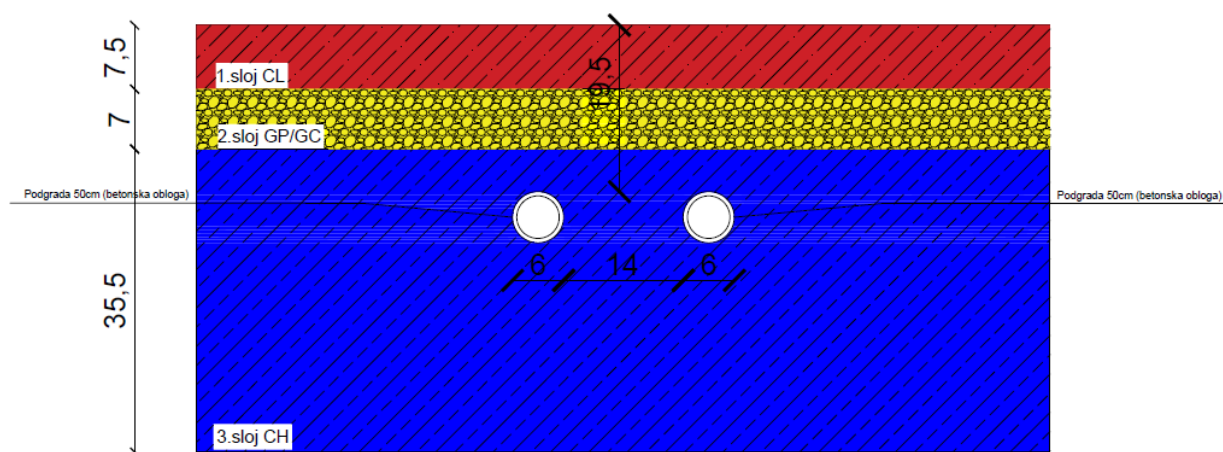
U svim analizama pri zadavanju materijala korišten je Mohr – Coulombov zakon čvrstoće kojem su ulazni parametri definirani preko kohezije i kuta unutarnjeg trenja. Osim ranije navedenih varijacija koje su uzrokovale preinaku u postojećem tlu, provedene su analize zamjene Mohr – Coulombovog materijala s konstitucijskim modelom očvršćavajućeg tla (eng. Hardening Soil) u donjem sloju gline (CH). Hardening Soil zahtjeva unošenje tri različite krutosti materijala a to su krutost pri 50% čvrstoće tla E_{50} , krutost pri rasterećenju E_{ur} i sekantni

edometarski modul E_{oed} . Napravljen je i grafički prikaz usporedbe materijala s Mohr – Coulombovom i s Hardening Soil varijantom. Model sadrži rubne uvjete na bočnim stranama i na dnu tj. pomaci su spriječeni u XYZ smjeru. U *Tablica 17.* prikazana je rekapitulacija provedenih statičkih analiza po slojevima za jednu i dvije cijevi, a u *Tablica 18.* rekapitulacija dinamičkih analiza.

Tunelska konstrukcija kružnog promjera kopana u donjem sloju gline visoke plastičnosti, analizirana je u dva rješenja. Prva varijanta odnosi se na iskop tunela s jednom cijevi, a druga varijanta u obliku dvije cijevi. U nastavku se nalazi ulazni model s vidljivom podjelom slojeva i tunelskim cijevima.



Slika 30. Presjek tla s jednom tunelskom cijevi



Slika 31. Presjek tla s dvije tunelske cijevi

6.2. Statički proračuni

Odabrani model tla je širok 100 metara, visok 50 metara i dug 100 metara. Prisutnost podzemne vode se nije uzimala u obzir u ovom radu. Promjer tunela u varijanti rješenja s jednom cijevi iznosi 10 metara dok veličina promjera tunela sa solucijom dvije cijevi iznosi 6 metara. Obje verzije rješenja nalaze se na jednakoj visini nadsloja od 19,5 metara i sadrže betonsku oblogu debljine 50 cm. Segment tla sastoji se od tri sloja. Prvi sloj je niskoplastična glina CL, drugi šljunak GP/GC i treći visokoplastična glina CH. Prva faza u svakoj analizi bila je početno stanje naprezanja (linearno-elastični materijal). Sve ostale faze su se sastojale od iskopa (elasto-plastični materijal) pojedinog segmenta uz ugradnju betonske podgrade. Iskop tunela izvršen je samo u donjem sloju gline CH. Kopao se dio po dio, u 10 etapa po 10 metara. Kod rješenja s dva tunela, prvo se izvela lijeva cijev, a tek onda desna. Pomaci su promatrani pomoću postavljenih linija (u RocScience-u tzv. *line query*) na razini površine terena i na tjemenu tunela. Parametri materijala koji su uneseni u program za statičke proračune su zapreminska težina (γ), modul elastičnosti (E), kohezija (c), kut unutarnjeg trenja (ϕ) i Poisson-ov koeficijent (ν).

Jedan od glavnih ciljeva rada bio je evaluirati granično stanje uporabivosti na razini tjemena tunela i na površini terena, s jednom ili dvije cijevi, na temelju prethodno definiranih statističkih distribucija pojedinih parametara. Najprije, razrađene su modifikacije s modulom elastičnosti i parametrima čvrstoće (kohezija i kut unutarnjeg trenja). Također, prikazane su analize s promjenama koeficijenta prekonsolidacije, OCR. OCR je po definiciji omjer napreznja prekonsolidacije σ'_p i vertikalnog efektivnog napreznja u tlu σ'_{v0} . Za normalno konsolidirana tla vrijedi da je $OCR=1$, a za prekonsolidirana $OCR>1$. Ciljano, u ovom radu upotrebljavane su vrijednosti OCR-a u iznosu od 1,3 i 5 za sloj gline CH na većoj dubini kod koje se može očekivati određeni stupanj prekonsolidiranosti.

Izraz [20] kojim je opisana promjena u prekonsolidiranom tlu glasi

$$K_0 = (1 - \sin\varphi)OCR^{\sin\varphi} [20]$$

pri čemu je:

K_0 - koeficijent bočnog tlaka mirovanja

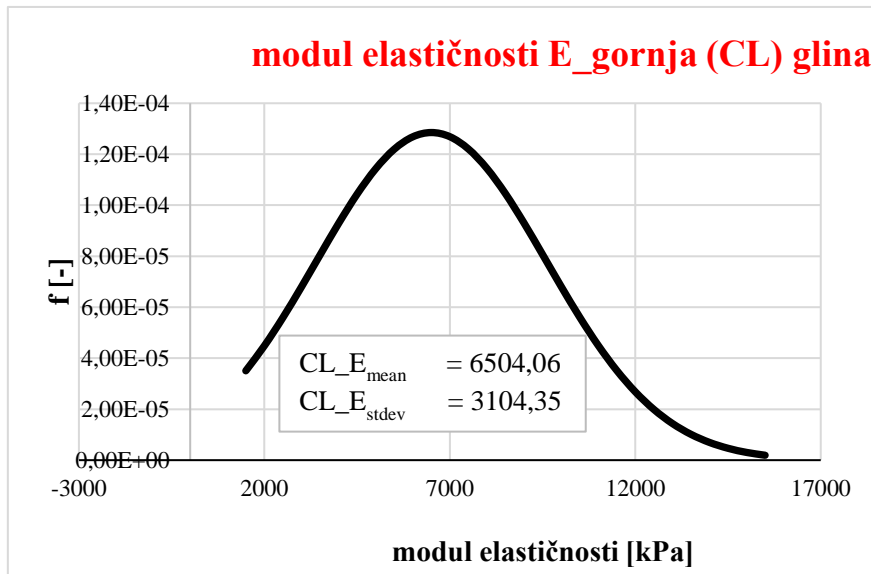
φ - kut unutarnjeg trenja

OCR- koeficijent prekonsolidacije.

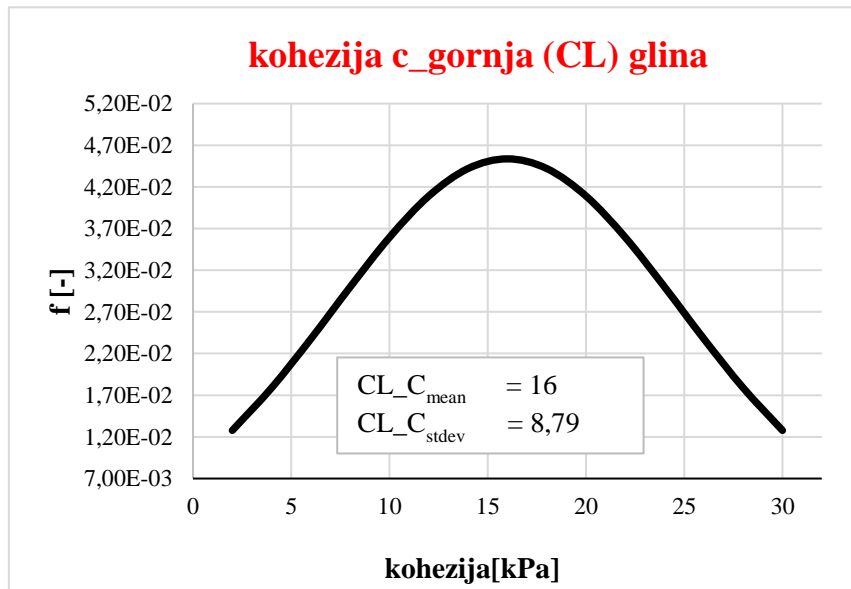
U nastavku je prikazana rekapitulacija svih provedenih analiza varijacija parametara. Dijagrami pomaka (u cm) na površini terena i tjemenu tunela definirani su za jednu i dvije cijevi. Lokacija grafova slijeganja u vremenu, kroz zadane faze iskopa, nalazi se u točki na sredini modela.

Tablica 17. Rekapitulacija provedenih statičkih analiza po slojevima za jednu i dvije cijevi

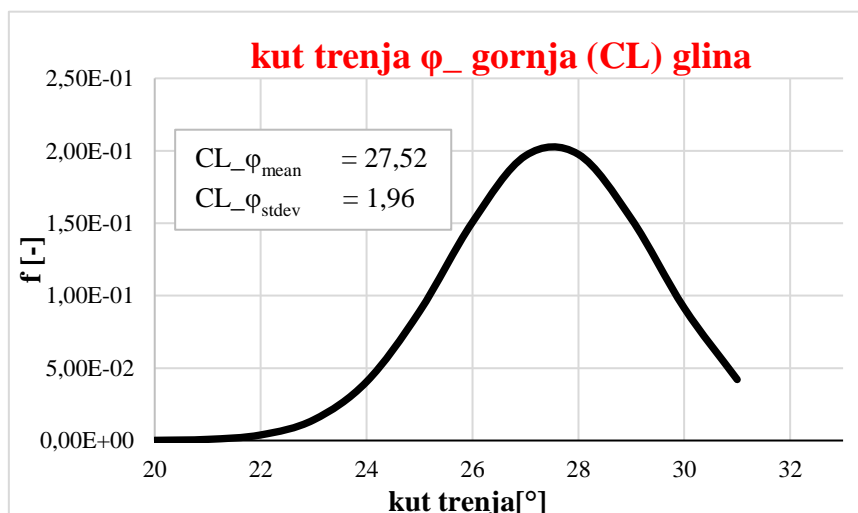
Redni broj analize	Statičke analize	Sloj	1 cijev	2 cijevi
1.1	Varijacija modula elastičnosti (E)	CL	+	+
1.2		GP/GC	+	+
1.3		CH	+	+
2.1	Varijacija kohezije (c)	CL	+	+
2.2		GP/GC	+	+
2.3		CH	+	+
3.1	Varijacija kuta unutarnjeg trenja (φ)	CL	+	+
3.2		GP/GC	+	+
3.3		CH	+	+
4	Varijacija koeficijenta bočnog tlaka mirovanja (K_0)	CH	+	+
5	Vremenski ovisno slijeganje tijekom izvedbe (varijacija modula elastičnosti E)	CH	+	+
6	Vremenski ovisno slijeganje tijekom izvedbe (varijacija kohezije c)	CH	+	+
7	Vremenski ovisno slijeganje tijekom izvedbe (varijacija kuta trenja φ)	CH	+	+



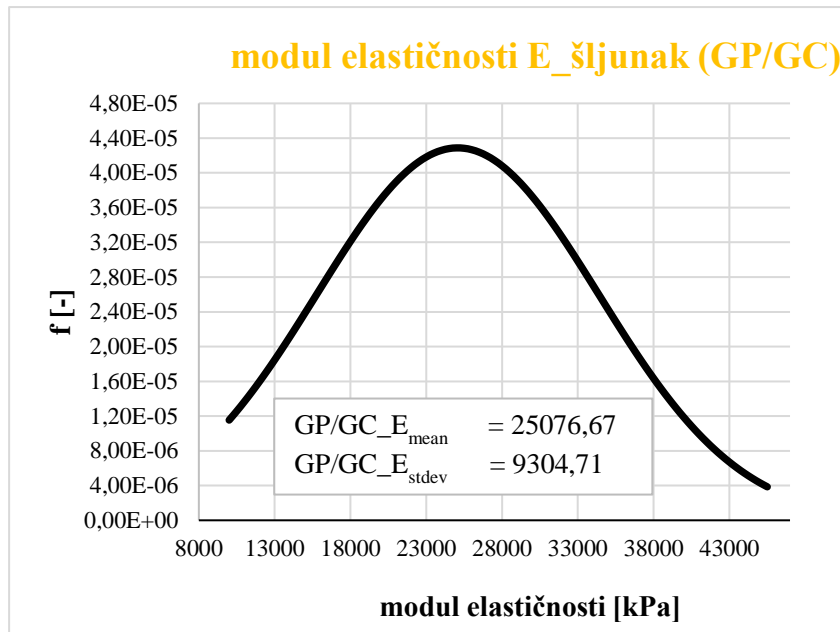
Slika 31. Normalna raspodjela modul elastičnosti - sloj CL



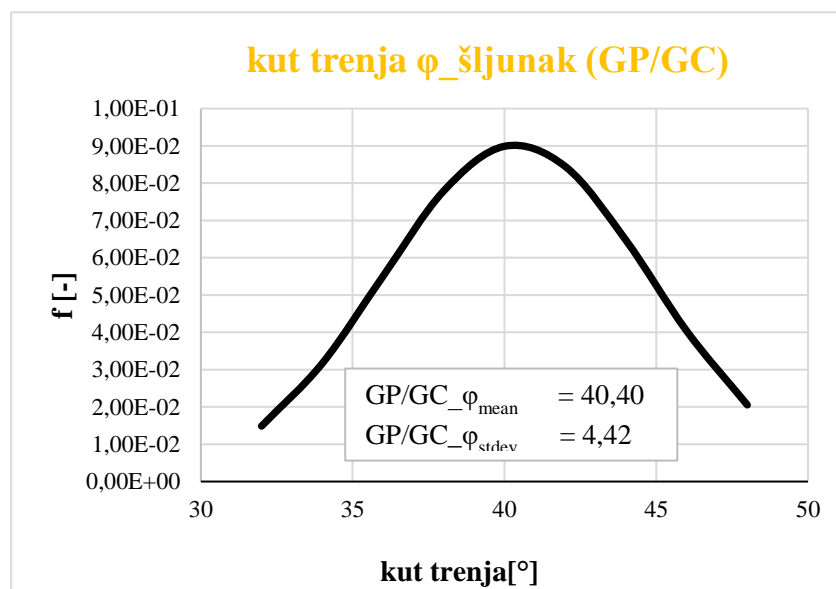
Slika 32. Normalna raspodjela kohezija - sloj CL



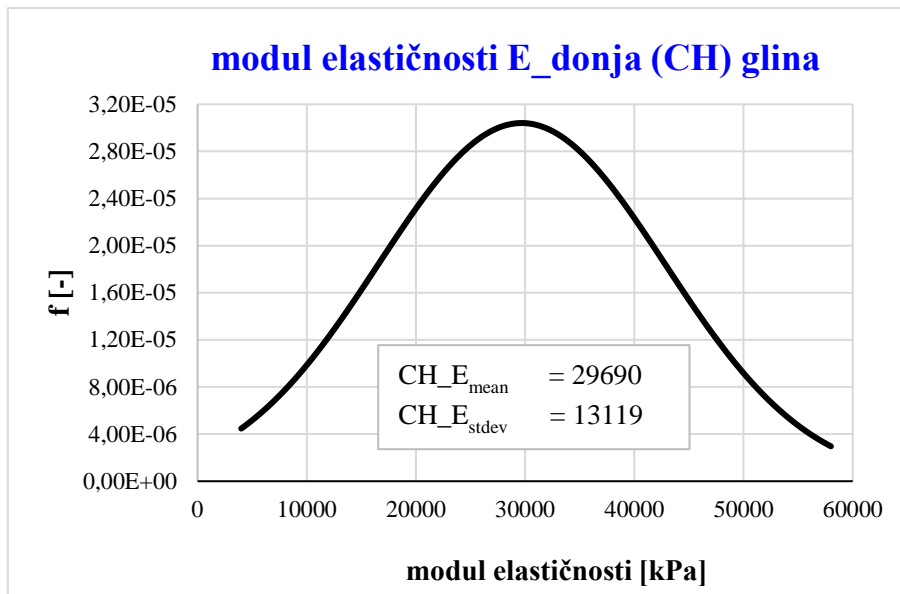
Slika 33. Normalna raspodjela kut trenja - sloj CL



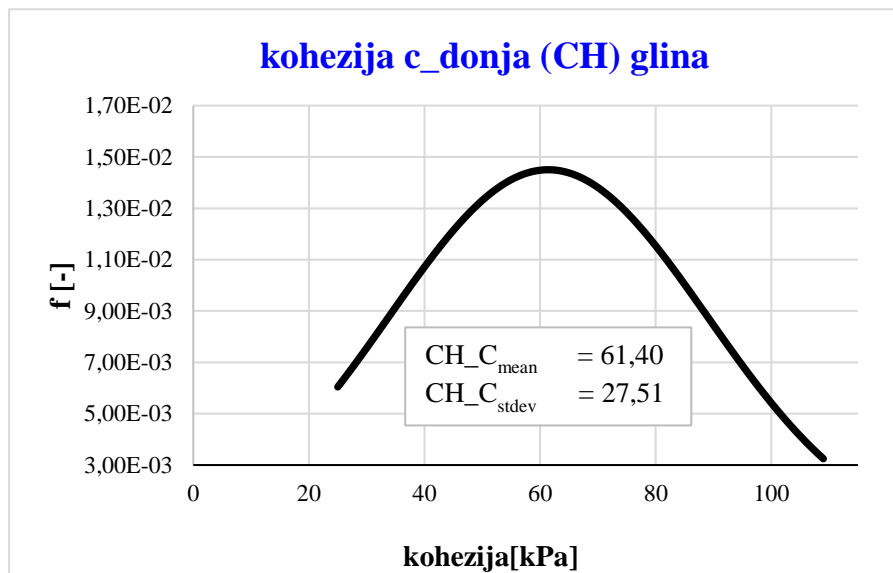
Slika 34. Normalna raspodjela modul elastičnosti - sloj GP/GC



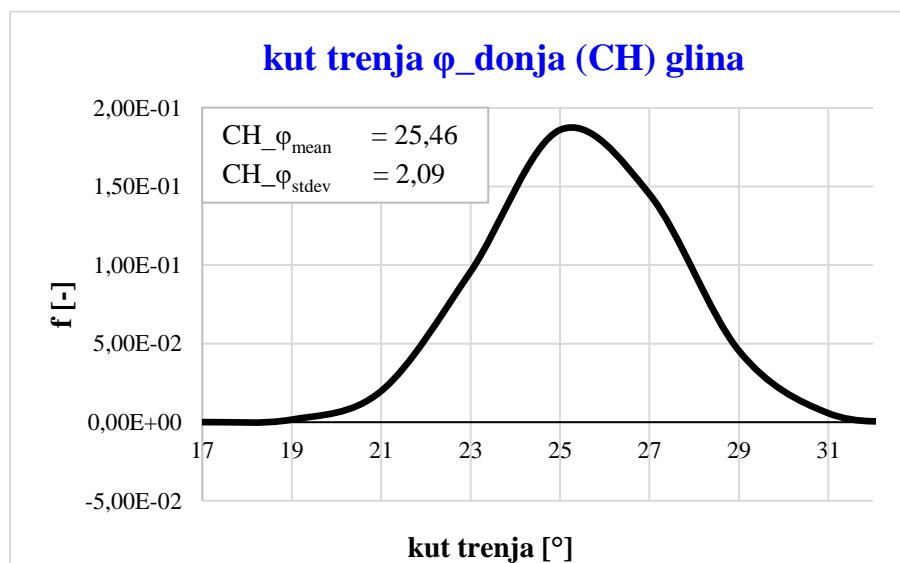
Slika 35. Normalna raspodjela kut trenja - sloj GP/GC



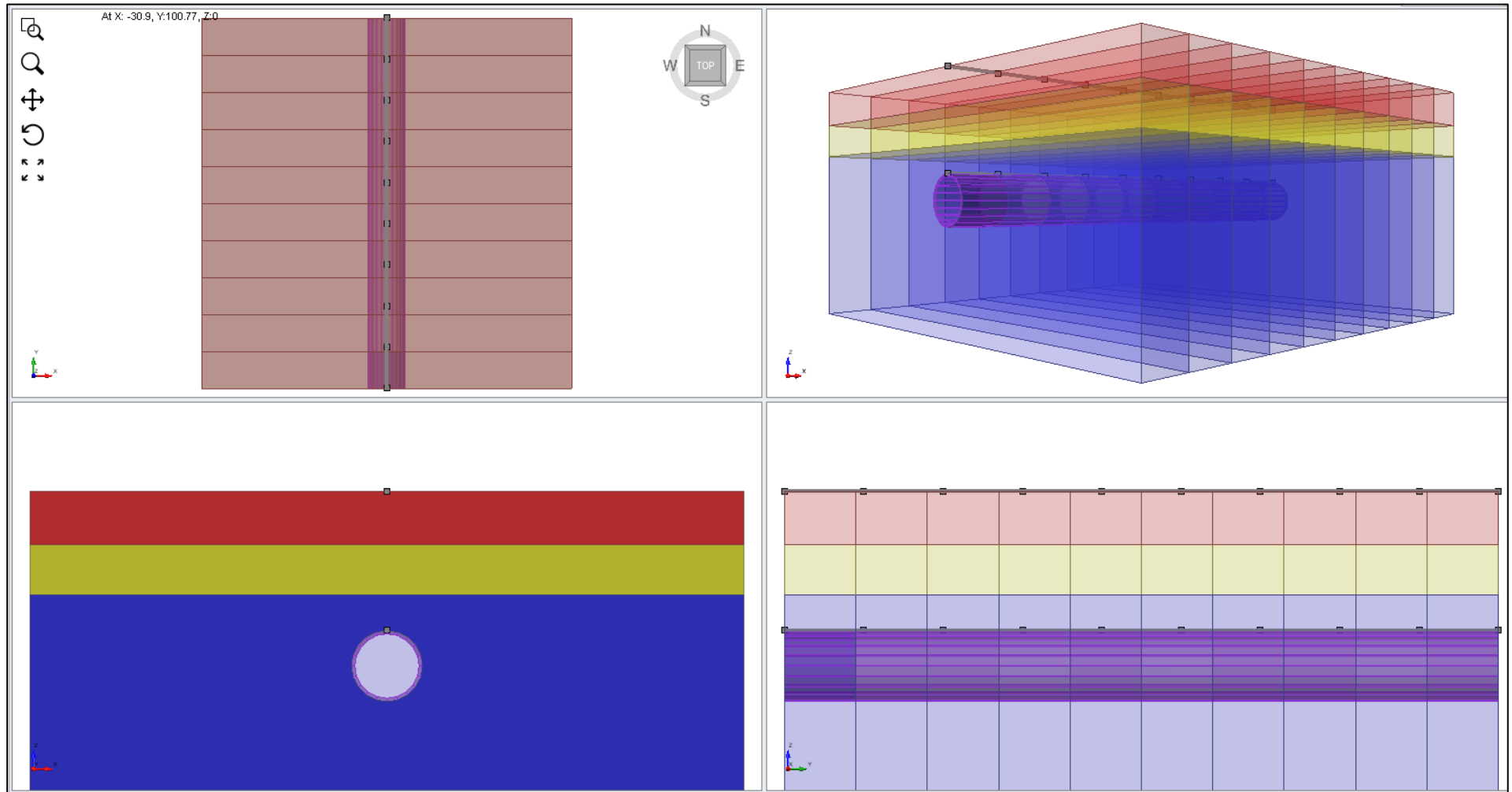
Slika 36. Normalna raspodjela modul elastičnosti - sloj CH



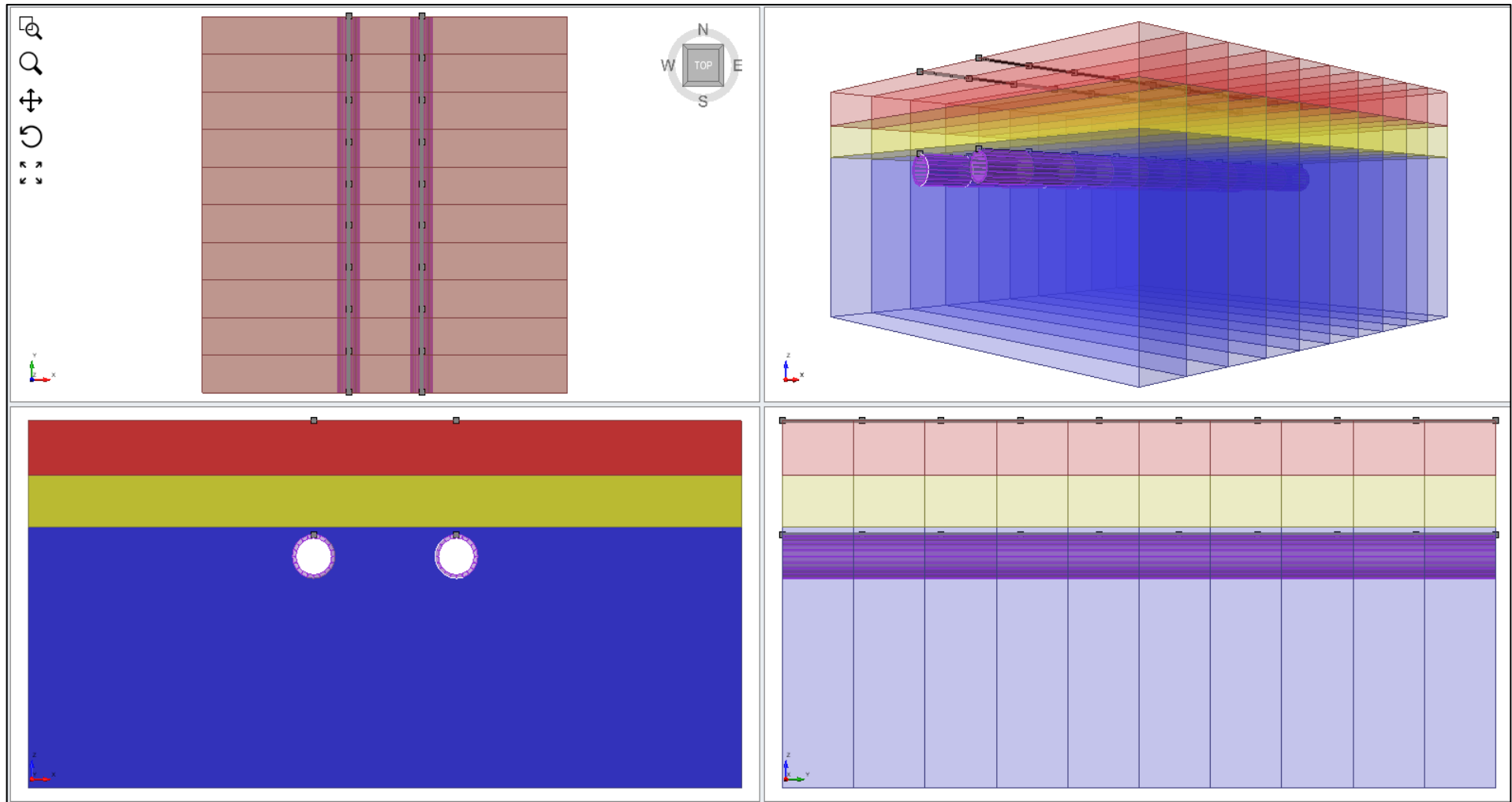
Slika 3729. Normalna raspodjela kohezija - sloj CH



Slika 38. Normalna raspodjela kut trenja - sloj CH



Slika 39. Ulazni model - jedna tunelska cijev



Slika 40. Ulazni model - dvije tunnelske cijevi

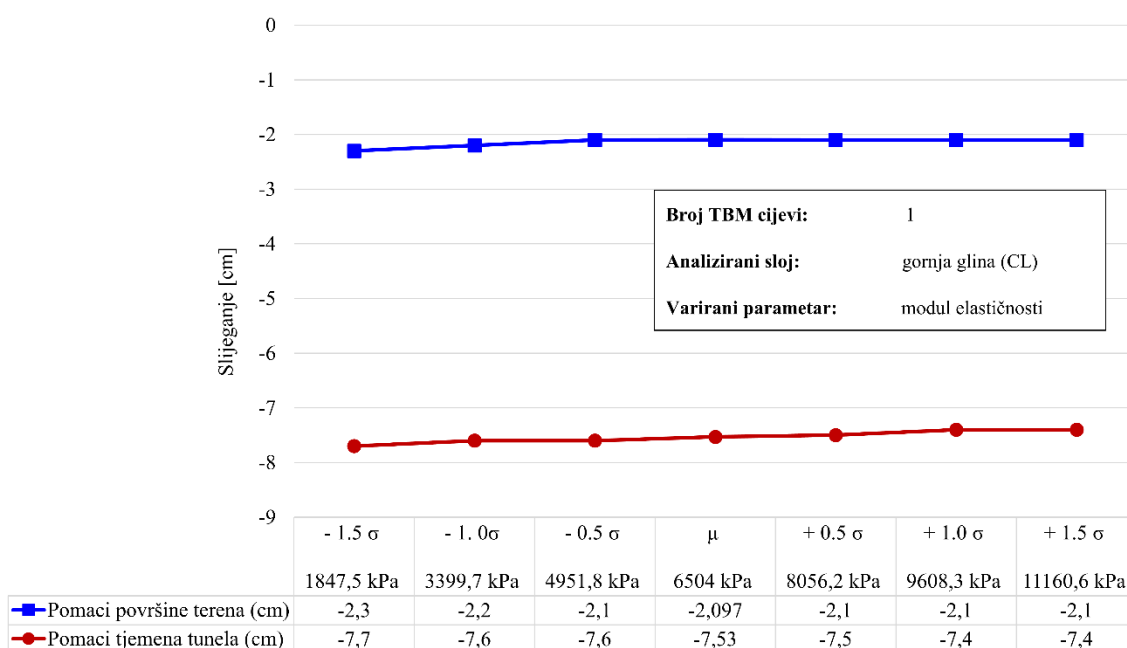
6.2.1. Varijacija rješenja s jednom TBM cijevi

6.2.1.1. Varijacija parametara tla

6.2.1.1.1. Varijacija modula elastičnosti

U nastavku su prikazani dijagrami slijeganja površine terena i tjemena tunela za slučaj jedne cijevi metroa, i to varijacijom modula elastičnosti sloja gornje gline (CL), sloja šljunka (GP/GC) te sloja donje gline (CH). Pri tome je na slikama naznačeno koji je parametar variran za koji sloj, dok su svi ostali parametri, za sve slojeve, u analizama definirani kao srednje (μ) vrijednosti određene na temelju statičke raspodjele.

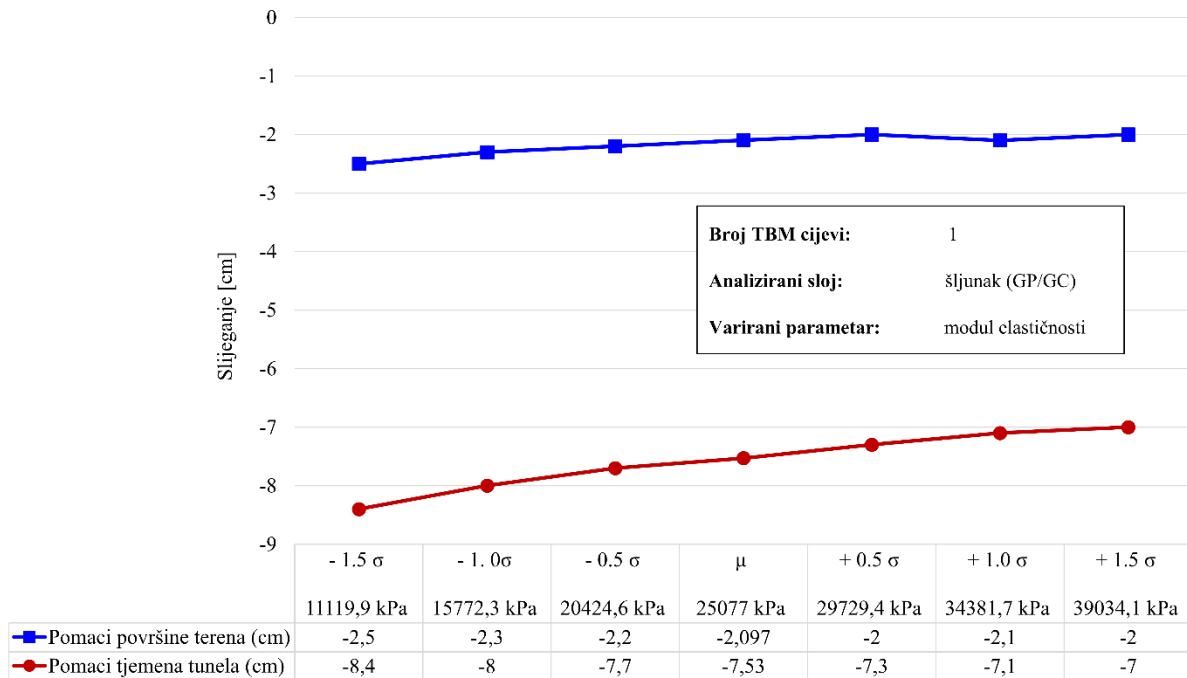
a) Varijacija sloja gornje gline CL



Slika 41. Varijacija modula elastičnosti prvog sloja - jedna cijev

Maksimalni pomak na površini terena je 2,3 cm, a na tjemenu tunela 7,7 cm s varijacijom modula elastičnosti prvog sloja. Trend pomaka je prilično konstantan.

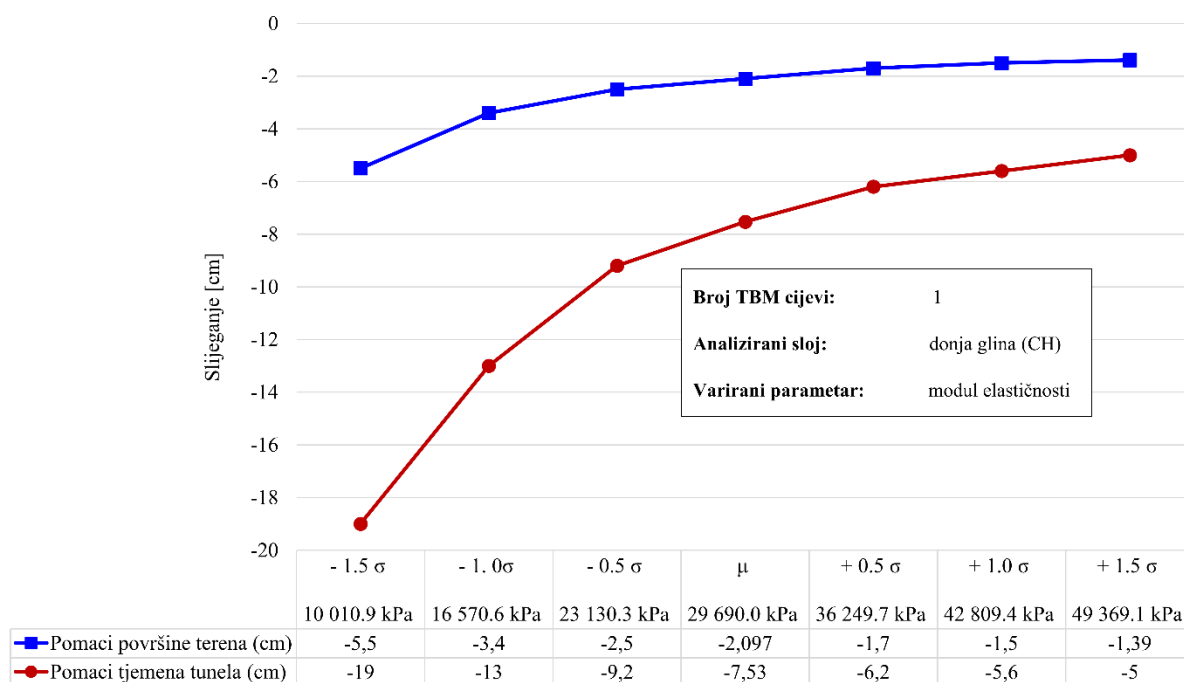
b) Varijacija sloja šljunka GP/GC



Slika 42. Varijacija modula elastičnosti drugog sloja - jedna cijev

Maksimalni pomak na površini terena je 2,5 cm, a na tjemenu tunela 8,4 cm s varijacijom modula elastičnosti drugog sloja. Trend pomaka je malo strmiji u odnosu na sloj gornje gline (CL).

c) Varijacija sloja donje gline CH



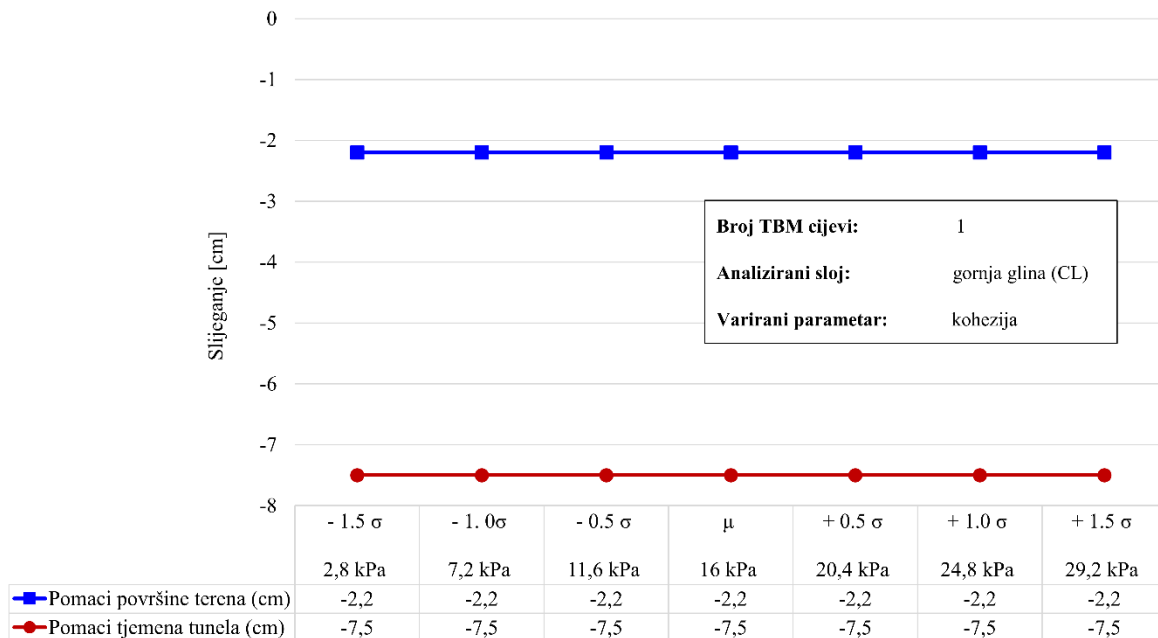
Slika 43. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja - jedna cijev

Maksimalni pomak na površini terena je 5,5 cm, a na tjemenu tunela rezultira s 19 cm, s varijacijom modula elastičnosti donje (CH) gline.

6.2.1.1.2. Varijacija kohezije

U nastavku su prikazani dijagrami slijeganja površine terena i tjemena tunela za slučaj jedne cijevi metroa, i to varijacijom kohezije sloja gornje gline (CL) i sloja donje gline (CH). Pri tome je na slikama naznačeno koji je parametar variran za koji sloj, dok su svi ostali parametri, za sve slojeve, u analizama definirani kao srednje (μ) vrijednosti određene na temelju statičke raspodjele.

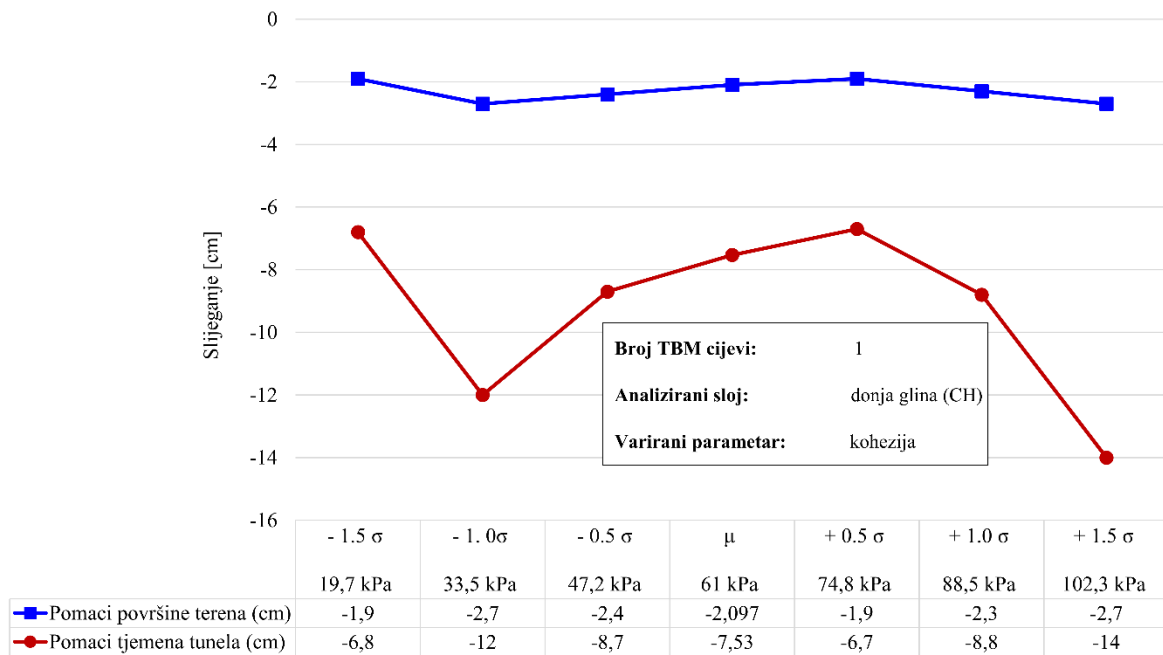
a) Varijacija sloja gornje gline CL



Slika 44. Varijacija kohezije prvog sloja - jedna cijev

Kod jedne cijevi, varijacijom kohezije gornje gline (CL), pomaci su potpuno jednaki u svim devijacijama i iznose 2,2 i 7,5 cm.

b) Varijacija sloja donje gline CH



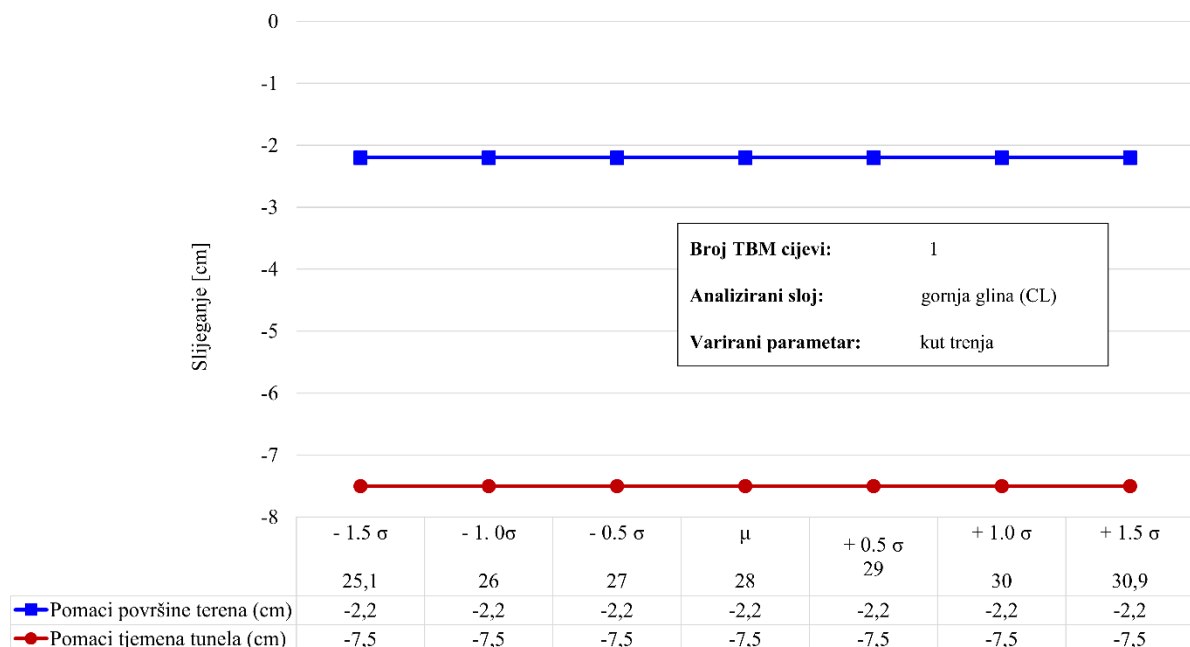
Slika 45. Varijacija kohezije trećeg sloja - jedna cijev

Kod varijacije kohezije donje (CH) gline u slučaju jedne TBM cijevi, pri čemu su svi ostali parametri tla definirani kao srednje (μ) vrijednosti, vidljiv je varijabilan trend, naročito izražen kod pomaka tjemena tunela. S povećanjem vrijednosti kohezije (uslijed povećanja standardne devijacije) dolazi do smanjenja pomaka, međutim, suprotno očekivanom, za vrijednosti kohezije koje odgovaraju (+1.0 σ , odnosno +1.5 σ) vidljiv je nagli porast slijezanja.

6.2.1.1.3. Varijacija kuta unutarnjeg trenja

U nastavku su prikazani dijagrami slijeganja površine terena i tjemena tunela za slučaj jedne cijevi metroa, i to varijacijom kuta unutarnjeg trenja sloja gornje gline (CL), šljunka (GP/GC) te sloja donje gline (CH). Pri tome je na slikama naznačeno koji je parametar variran za koji sloj, dok su svi ostali parametri, za sve slojeve, u analizama definirani kao srednje (μ) vrijednosti određene na temelju statičke raspodjele.

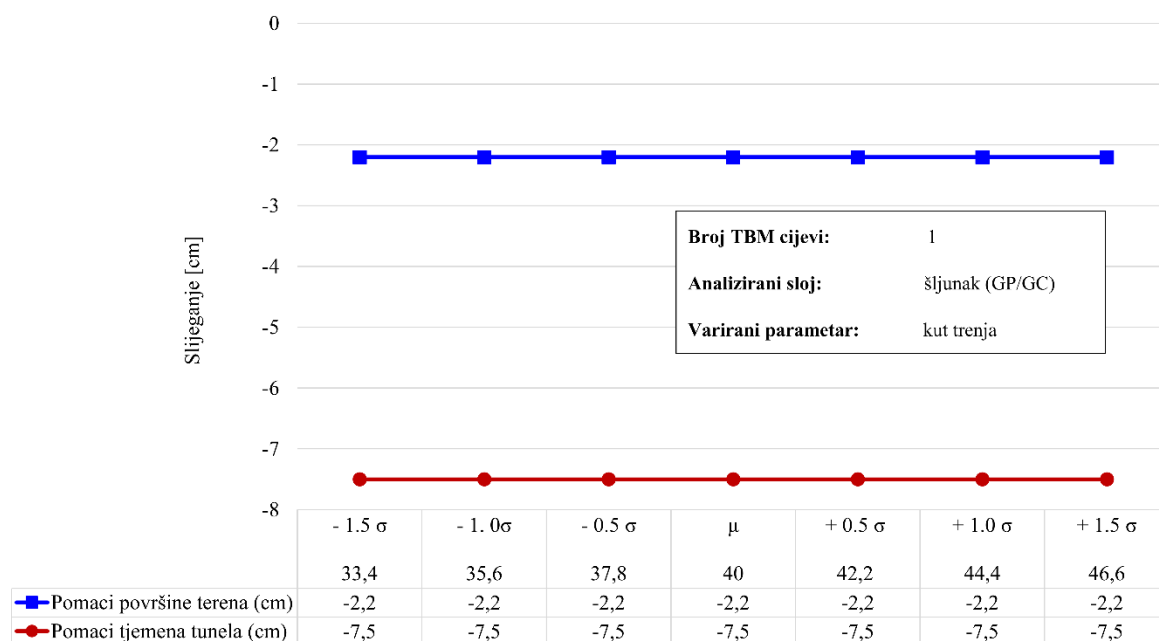
a) Varijacija sloja gornje gline CL



Slika 46. Varijacija kuta trenja prvog sloja - jedna cijev

Kod jedne cijevi, varijacijom kuta unutarnjeg trenja gornje gline, pomaci su potpuno jednaki u svim devijacijama i iznose 2,2 i 7,5 cm.

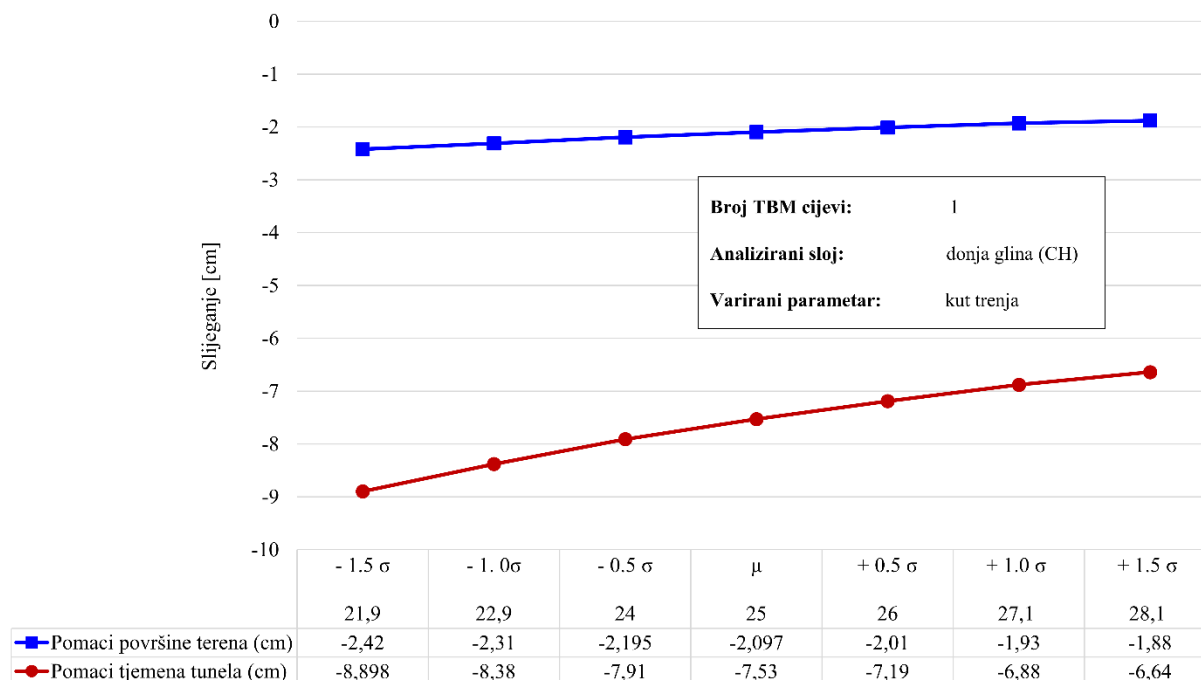
b) Varijacija sloja šljunka GP/GC



Slika 47. Varijacija kuta trenja drugog sloja - jedna cijev

Kod jedne cijevi, varijacijom kuta unutarnjeg trenja šljunka, pomaci su potpuno jednaki u svim devijacijama i iznose 2,2 i 7,5 cm.

c) Varijacija sloja donje gline CH



Slika 48. Varijacija kuta trenja trećeg sloja - jedna cijev

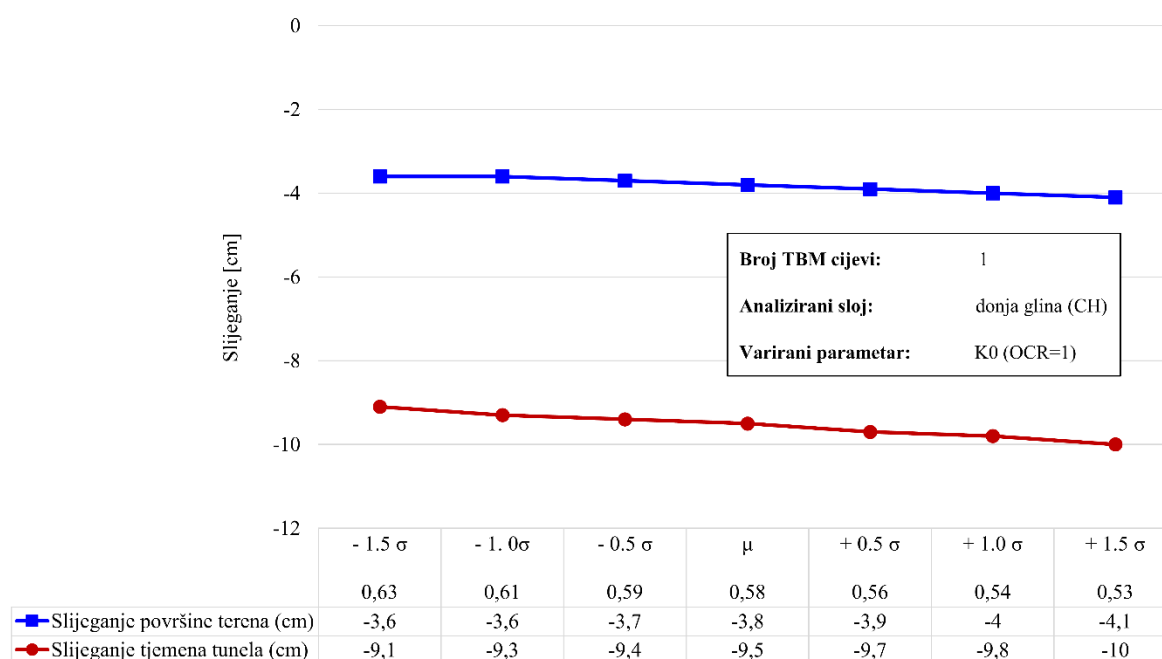
Kod varijacije u sloju donje gline CH primjećuje se razlika u slijeganju koje iznosi 2,42 cm i 8,98 cm.

6.2.1.1.4. Varijacija koeficijenta bočnog tlaka mirovanja

U nastavku su prikazani dijagrami slijeganja površine terena i tjemena tunela za slučaj jedne cijevi metroa, i to varijacijom koeficijenta bočnog tlaka mirovanja samo sloja donje gline (CH) za OCR=1,3 i 5. Pri tome je na slikama naznačeno koji je parametar variran za koji sloj, dok su svi ostali parametri, za sve slojeve, u analizama definirani kao srednje (μ) vrijednosti određene

na temelju statičke raspodjele. Također, predočen je sumarni prikaz varijacije K_0 za svaku promjenu OCR vrijednosti.

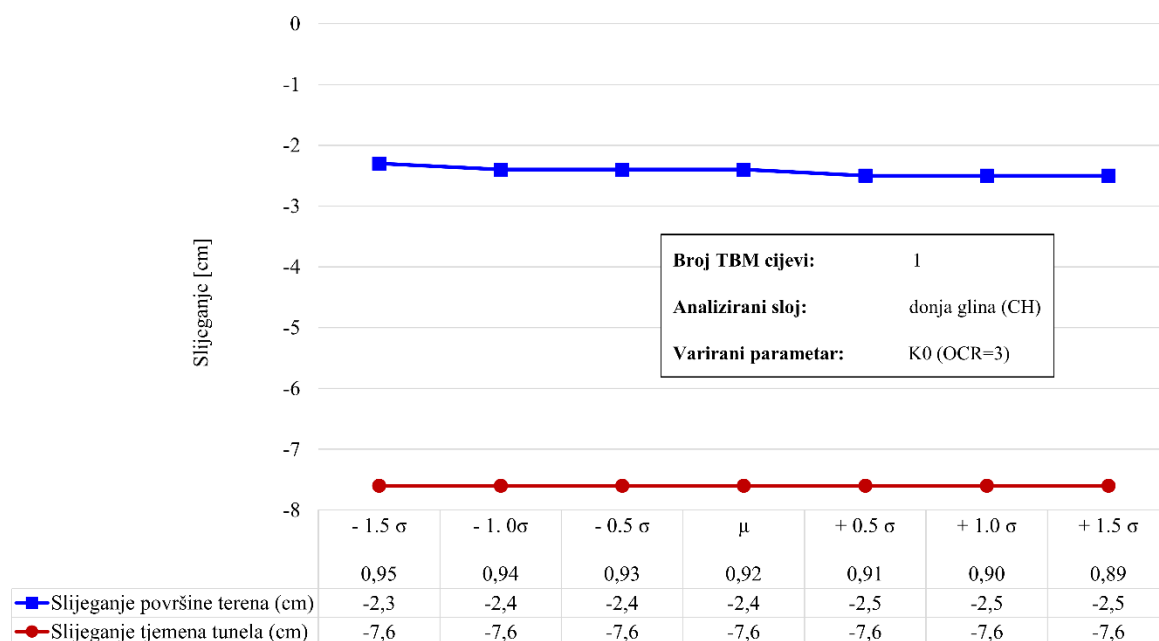
a) Varijacija sloja donje gline CH za OCR=1



Slika 49. Varijacija K_0 (OCR=1) trećeg sloja - jedna cijev

Varijacijom K_0 za slučaj kad je koeficijent prekonsolidacije jednak 1, dolazi do povećanja slijeganja kako se kreće prema standardnim devijacijama koje daju veće vrijednosti od srednje vrijednosti. Najveće slijeganje iznosi 4,1 cm za površinu terena i 10 cm za tjeme tunela u slučaju $+1.5\sigma$.

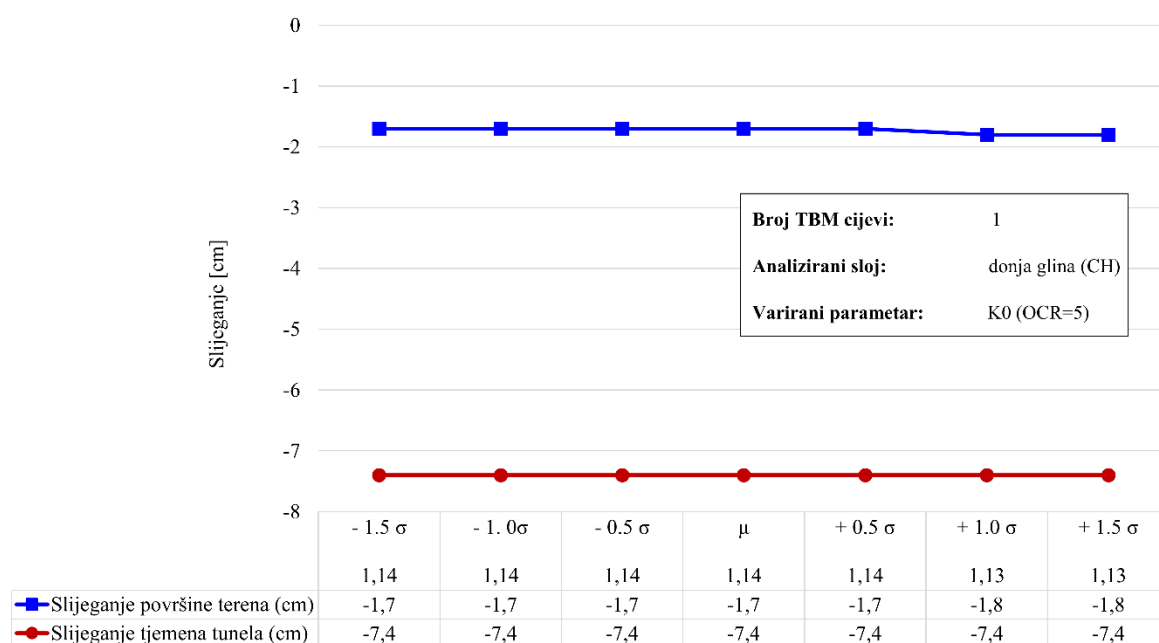
b) Varijacija sloja donje gline CH za OCR=3



Slika 50. Varijacija K0 (OCR=3) trećeg sloja - jedna cijev

Varijacijom K0 kod OCR=3, pomaci jedne cijevi na površini terena se kreću od 2,3-2,5 cm, a na tjemenu tunela su konstantni i iznose 7,6 cm.

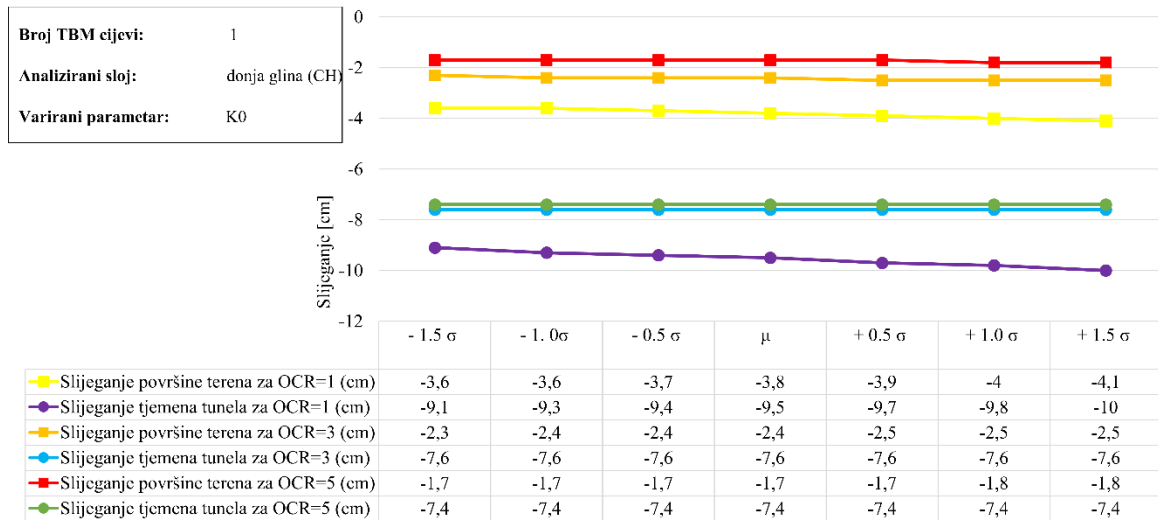
c) Varijacija sloja donje gline CH za OCR=5



Slika 51. Varijacija K0 (OCR=5) trećeg sloja - jedna cijev

Varijacijom K0 kod OCR=5, maksimalni pomak jedne cijevi na površini terena iznosi 1,14, a na tjemenu tunela je konstantan i iznosi 7,4 cm.

d) Sumarni prikaz varijacije K0 za donji sloj gline CH



Slika 52. Sumarni prikaz varijacije K0 - jedna cijev

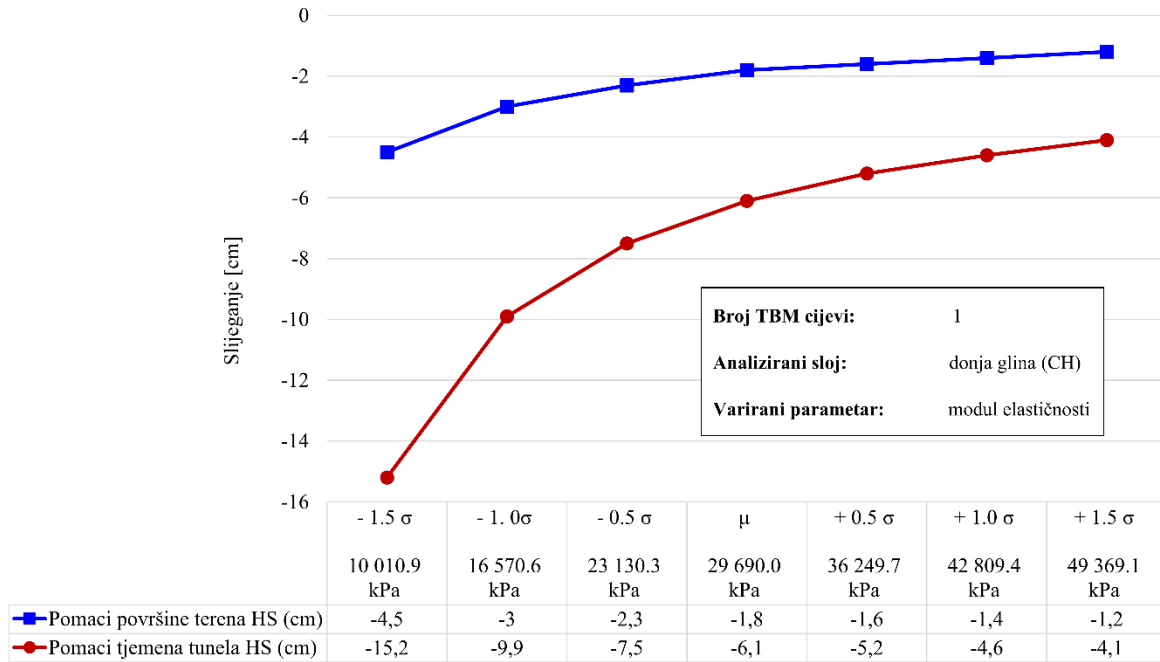
Na slici su prikazani svi pomaci površine terena i tjemena tunela u slučaju varijacije K0, za OCR=1,3,5. Jedino kod slučaja za OCR=1 pratimo povećanje slijeganja, dok svaka ostala varijacija rezultira konstantnim pomacima.

6.2.1.2. Usporedba konstitutivnih modela Mohr – Coulomb i Hardening Soil

U nastavku su prikazani dijagrami slijeganja površine terena i tjemena tunela za slučaj jedne cijevi metroa, i to varijacijom modula elastičnosti samo sloja donje gline (CH) korištenjem Hardening Soil modela. Pri tome je na slikama naznačeno koji je parametar variran za koji sloj, dok su svi ostali parametri, za sve slojeve, u analizama definirani kao srednje (μ) vrijednosti određene na temelju statičke raspodjele. Također, priložen je grafički dokaz o usporedbi Mohr

– Coulombovog i Hardening Soil materijala, kako bi jasnije predočili događanja u tlu prilikom mijenjanja tih modela.

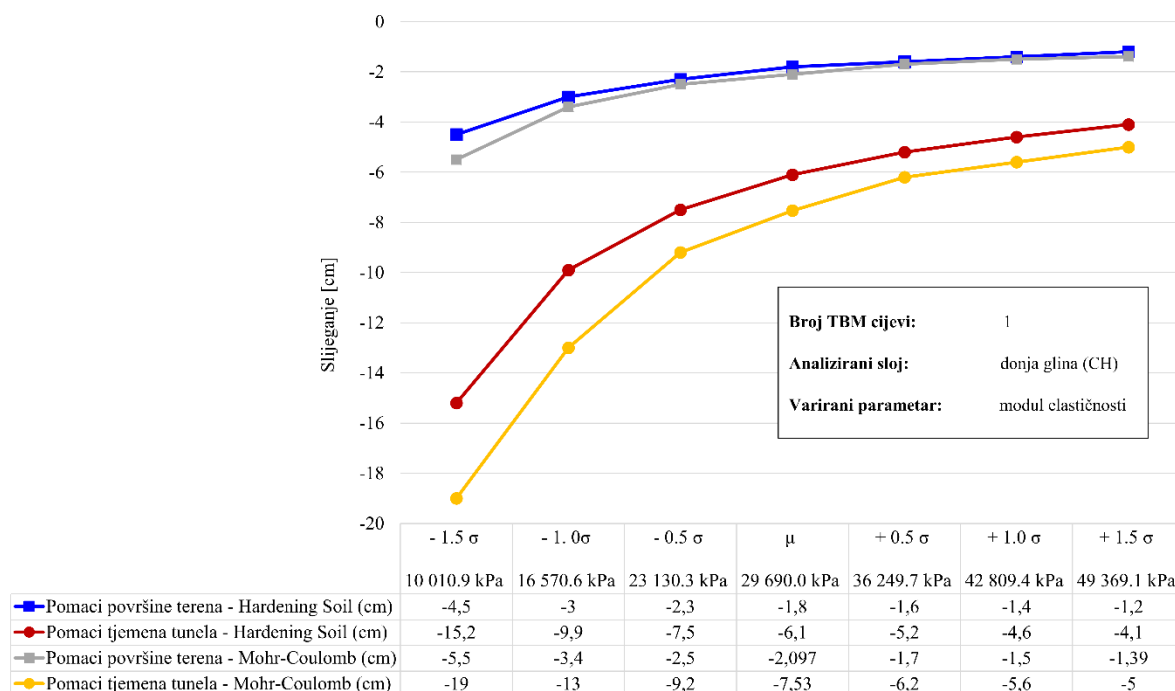
a) Varijacija modula elastičnosti donjeg sloja gline CH s Hardening Soil modelom



Slika 53. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja, Hardening soil - jedna cijev

Maksimalni pomak na površini terena je 4,5 cm, a na tjemenu tunela 15,2 cm pri korištenju Hardening Soil materijal u donjem sloju gline CH. Trend pomaka opada kako se približava standardnim devijacijama koje daju veće vrijednosti parametara od srednje.

b) Usporedba konstitutivnih modela Mohr – Coulombovog i Hardening Soil



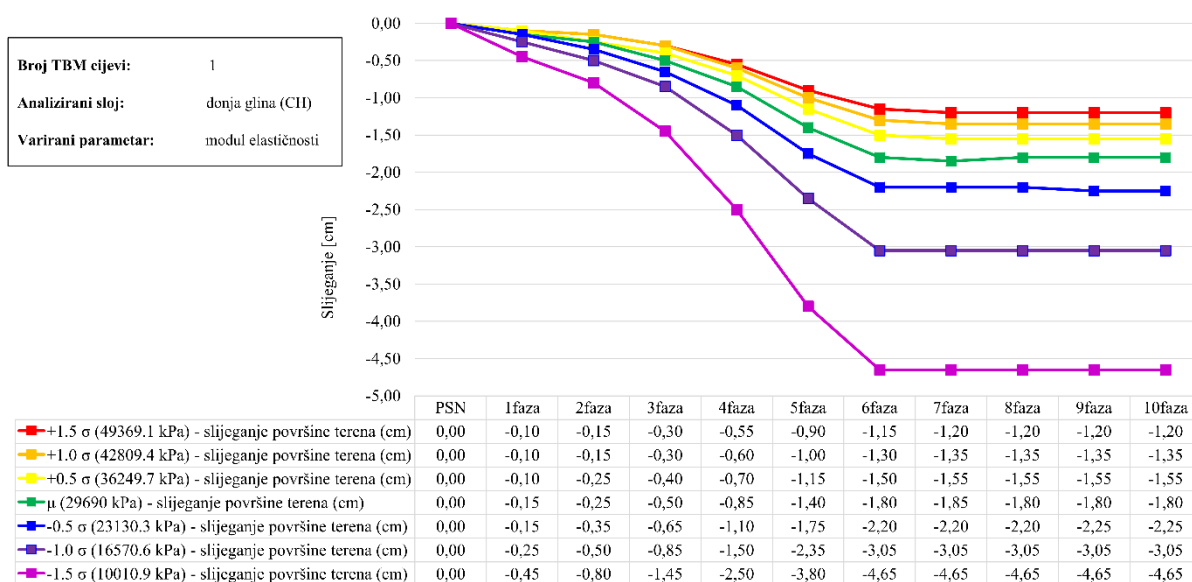
Slika 54. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja, usporedba M-C i HS materijala - jedna cijev

Usporedbom Mohr-Coulombovog i Hardening Soil materijala, dobiveni su pomaci površine terena u iznosu od 4,5 cm (HS) i 5,5 cm (M-C) te pomaci tjemena tunela od 15,2 cm (HS) i 19 cm (M-C) što znači da se model s Mohr-Coulombovim parametrima više sliježe.

6.2.1.3. Slijeganje ovisno o faznosti izvedbe tunela

U nastavku je prikazana ovisnost slijeganja o vremenu pri iskopima tunela jedne cijevi, u 10 faza iskopa po 10 metara. Promatrana je točka na površini koja se nalazi na sredini modela. Pri tome, na grafu su prikazane vrijednosti slijeganja te točke za svaku fazu te je variran samo donji sloj gline CH, dok su svi ostali parametri, za sve slojeve, u analizama definirani kao srednje (μ) vrijednosti određene na temelju statičke raspodjele.

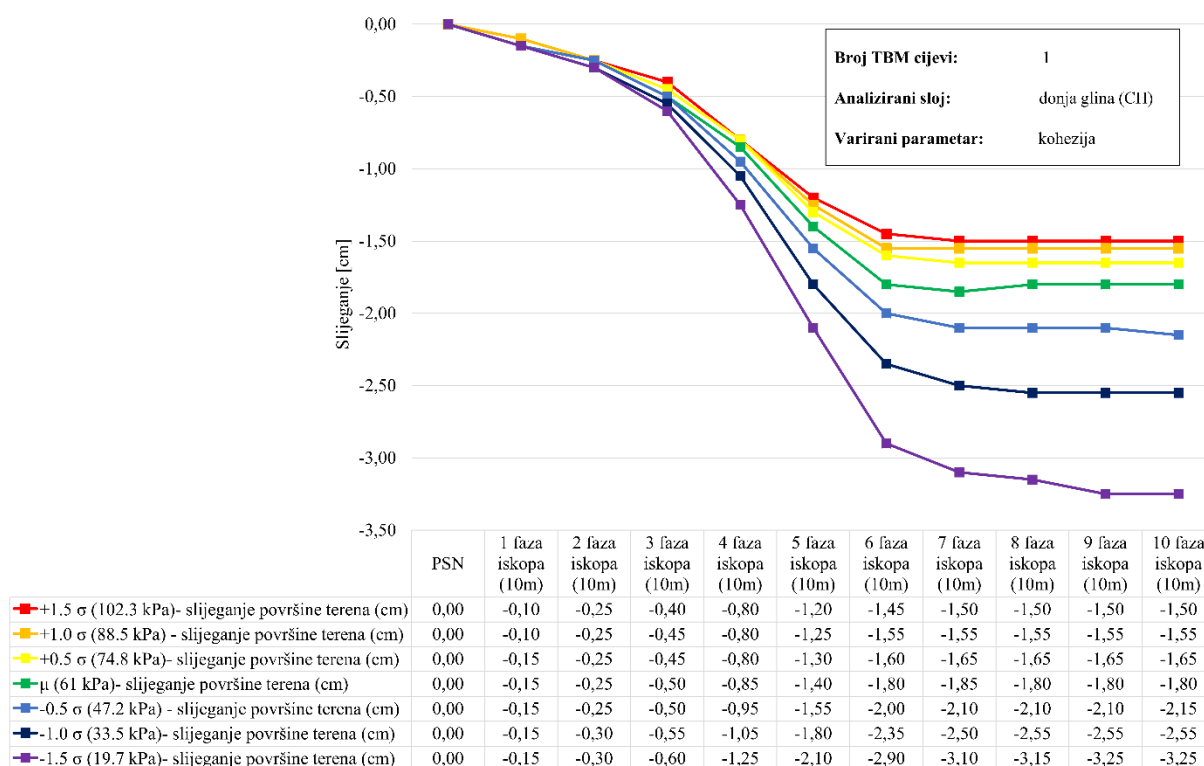
a) Slijeganje u fazama u odnosu na varijaciju modula elastičnosti



Slika 55. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela kroz faze - jedna cijev

Trend slijeganja se povećava pri svakom iskopu i maksimalni pomak iznosi 4,65 cm u zadnjoj fazi, kod -1.5σ .

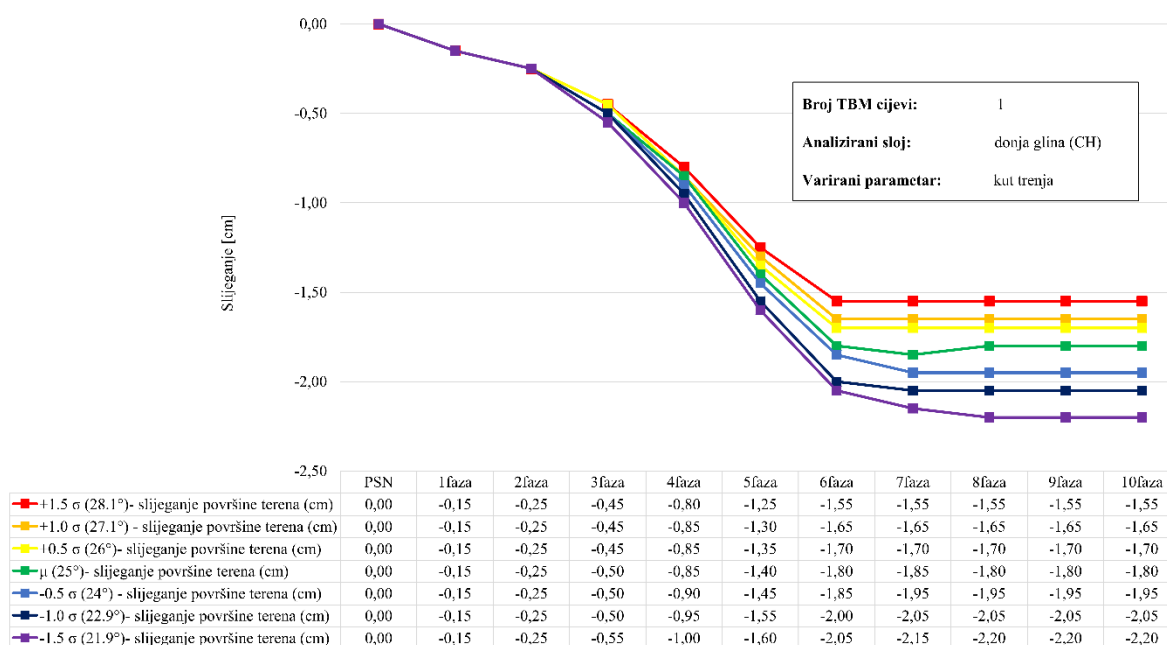
b) Slijeganje u fazama u odnosu na varijaciju kohezije



Slika 56. Varijacija kohezije trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela kroz faze - jedna cijev

Prethodni dijagram prikazuje slijeganje točke na sredini modela pri početnom stanju naprezanja i kroz deset faza iskopa po 10 m. Trend slijeganja se povećava pri svakom iskopu i maksimalni pomak iznosi 3,25 cm u zadnjoj fazi, kod -1.5σ .

c) Slijeganje u fazama u odnosu na varijaciju kuta trenja



Slika 57. Varijacija kuta trenja trećeg sloja, slijeganje površine terena na sredini modela - jedna cijev

Slijeganjem površine terena na sredini modela, kod PSN-a i prve dvije faze iskopa pomaci su jednaki za sve razmatrane vrijednosti (tj. za 0.5x, 1.0x i 1.5x standardne devijacije). Nakon druge faze dolazi do grananja pri čemu se slijeganje točke na površini terena povećava do kraja izvedbe i iznosi 2,2 cm.

6.2.2. Varijacija rješenja s dvije TBM cijevi

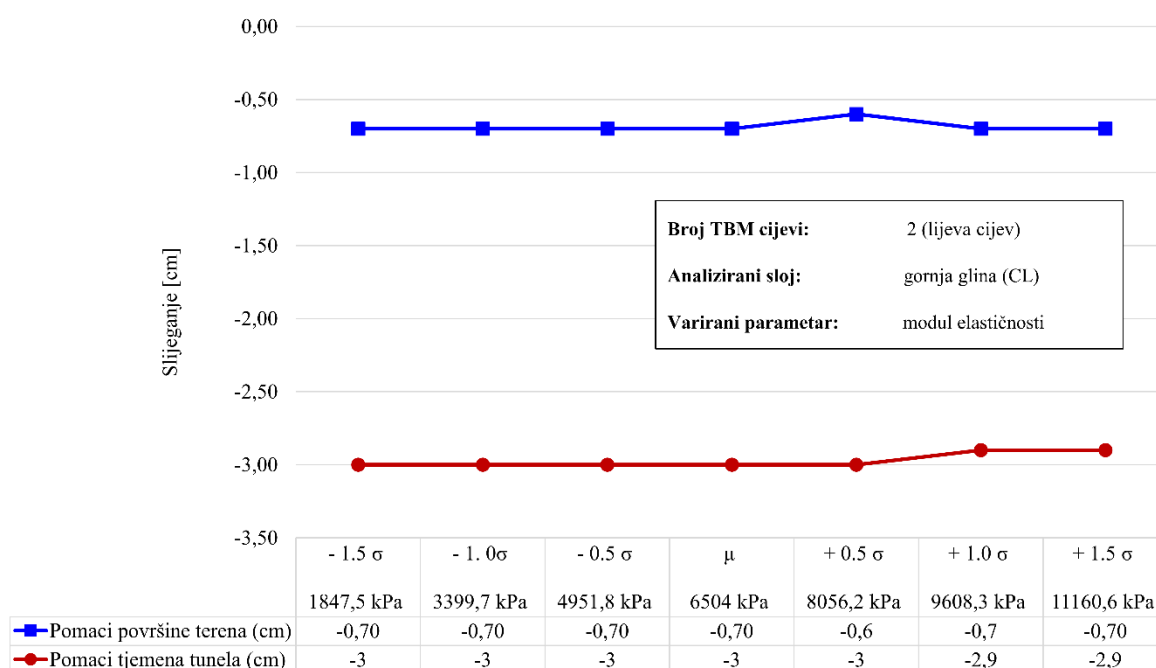
6.2.2.1. Varijacija parametara tla

6.2.2.1.1. Varijacija modula elastičnosti

U nastavku su prikazani dijagrami slijezanja površine terena i tjemena tunela za slučaj dvije cijevi metroa, i to varijacijom modula elastičnosti sloja gornje gline (CL), šljunka (GP/GC) te sloja donje gline (CH). Pri tome je na slikama naznačeno koji je parametar variran za koji sloj, dok su svi ostali parametri, za sve slojeve, u analizama definirani kao srednje (μ) vrijednosti određene na temelju statičke raspodjele. Lijeva i desna cijev prikazane su zasebno.

6.2.2.1.1.1. Lijeva cijev

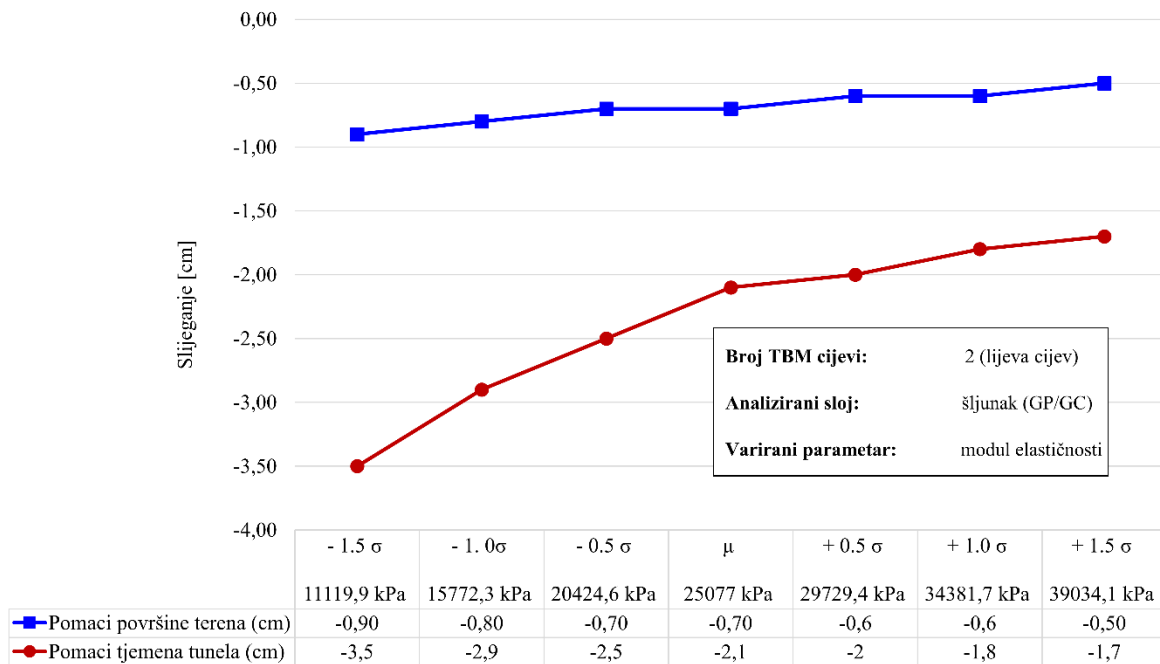
a) Varijacija gornjeg sloja gline CL



Slika 58. Varijacija modula elastičnosti prvog sloja - lijeva cijev

Promatrajući pomake lijeve cijevi, slijeganja površine terena su konstantna i iznose 0,7 cm (s jednim odstupanjem na $+0.5\sigma$) a tjemena tunela iznose 3 cm (iznimka kod standardne devijacije od $+1.0\sigma$ i $+1.5\sigma$).

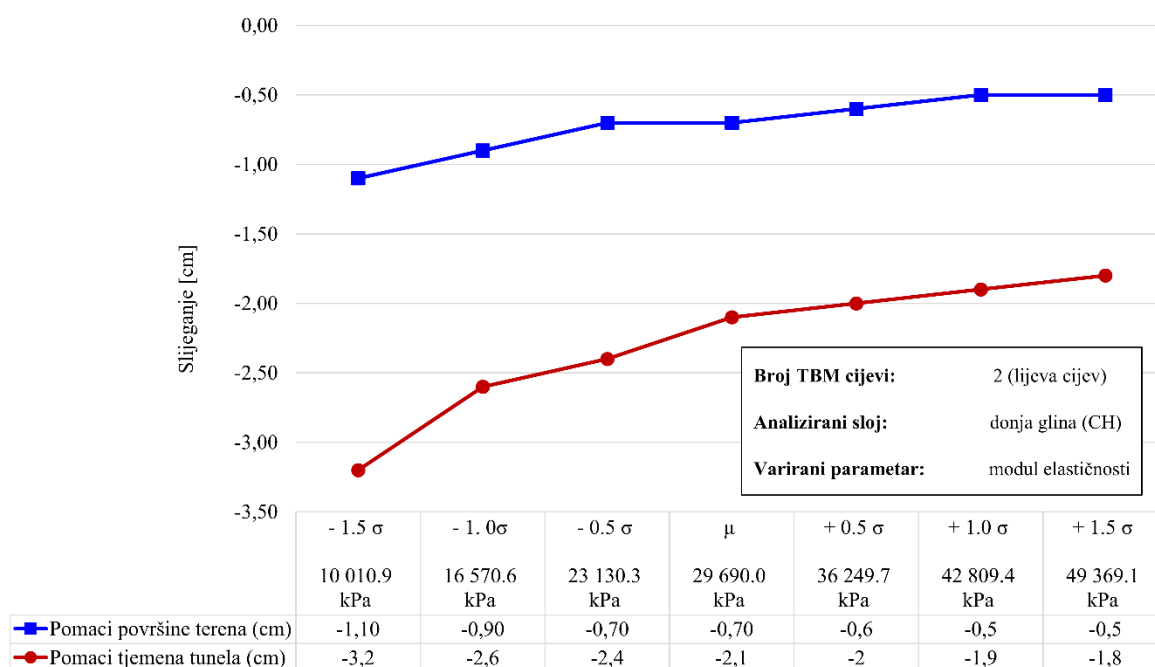
b) Varijacija sloja šljunka GP/GC



Slika 59. Varijacija modula elastičnosti drugog sloja - lijeva cijev

Maksimalni pomak lijeve cijevi na površini terena iznosi 0,9 cm, na tjemenu tunela 3,5 cm, pri varijaciji modula elastičnosti drugog sloja. Varijacijom sloja šljunka GP/GC dobiven je najveći pomak na tjemenu tunela (u odnosu na slojeve gline niske i visoke plastičnosti).

c) Varijacija donjeg sloja gline CH

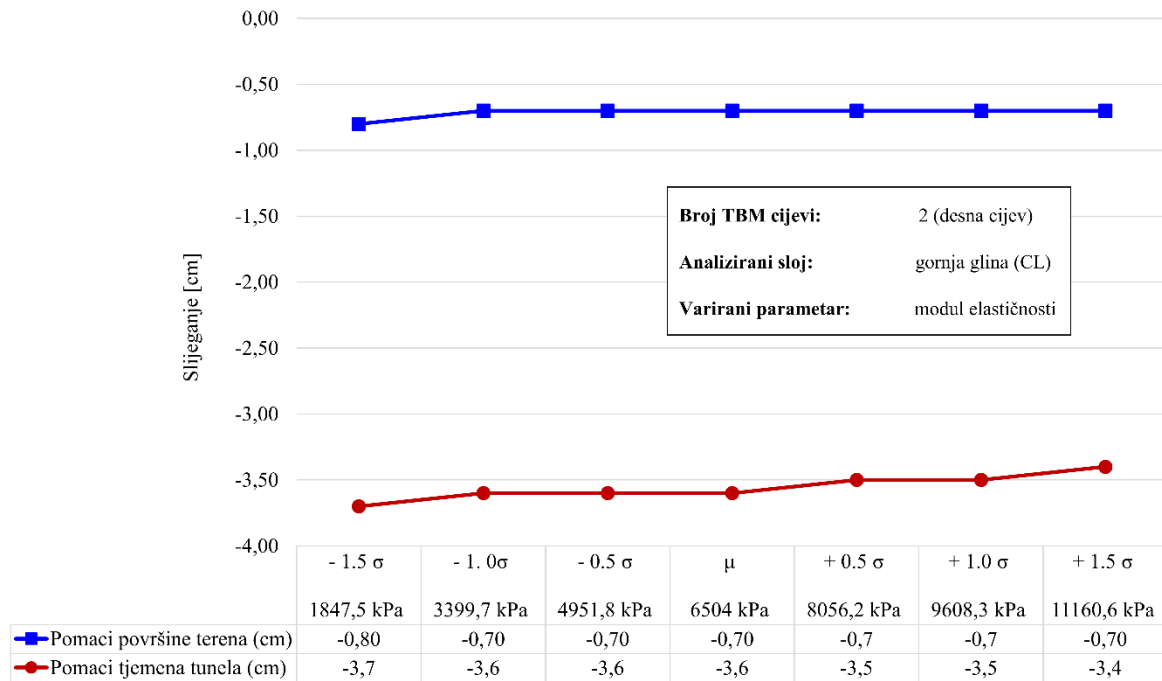


Slika 60. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja - lijeva cijev

Maksimalni pomak lijeve cijevi na površini terena iznosi 1,1 cm, na tjemenu tunela 3,2 cm, pri varijaciji modula elastičnosti donjeg sloja gline CH. Varijacijom CH dobiven je najveći pomak na površini terena (u odnosu na sloj CL i GP/GC).

6.2.2.1.1.2. Desna cijev

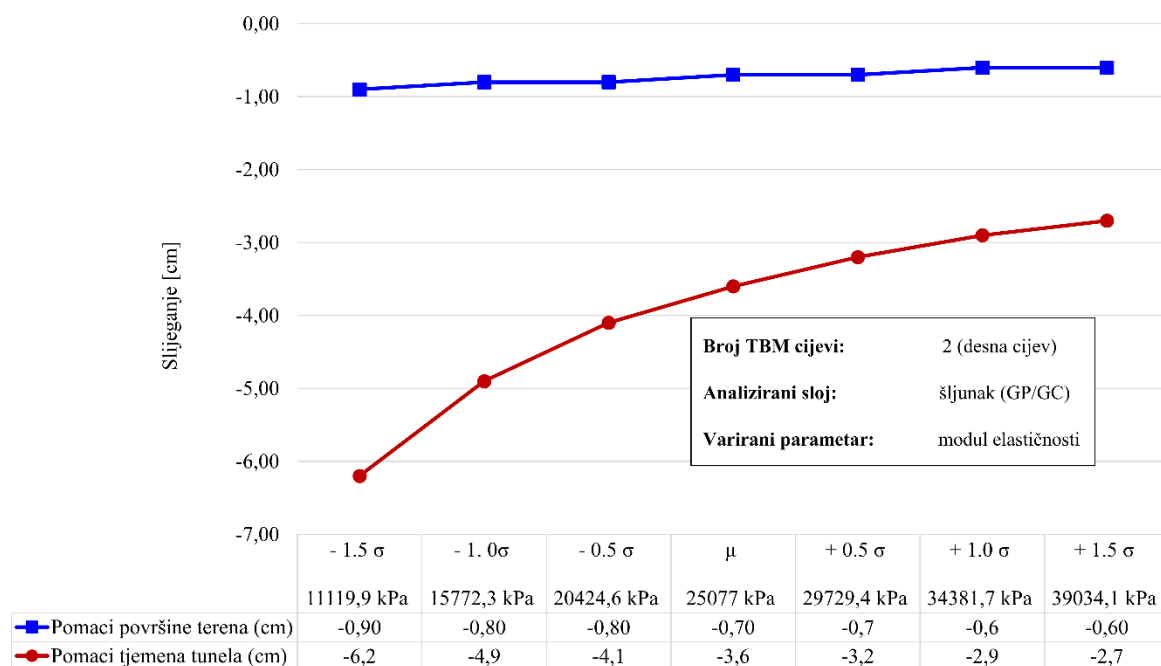
a) Varijacija gornjeg sloja gline CL



Slika 61. Varijacija modula elastičnosti prvog sloja - desna cijev

Maksimalno slijezanje površine terena varijacijom modula elastičnosti sloja gornje gline CL iznosi 0,8 cm, a tjemena tunela 3,7 cm. Trend slijezanja desne cijevi je skoro pa konstantan.

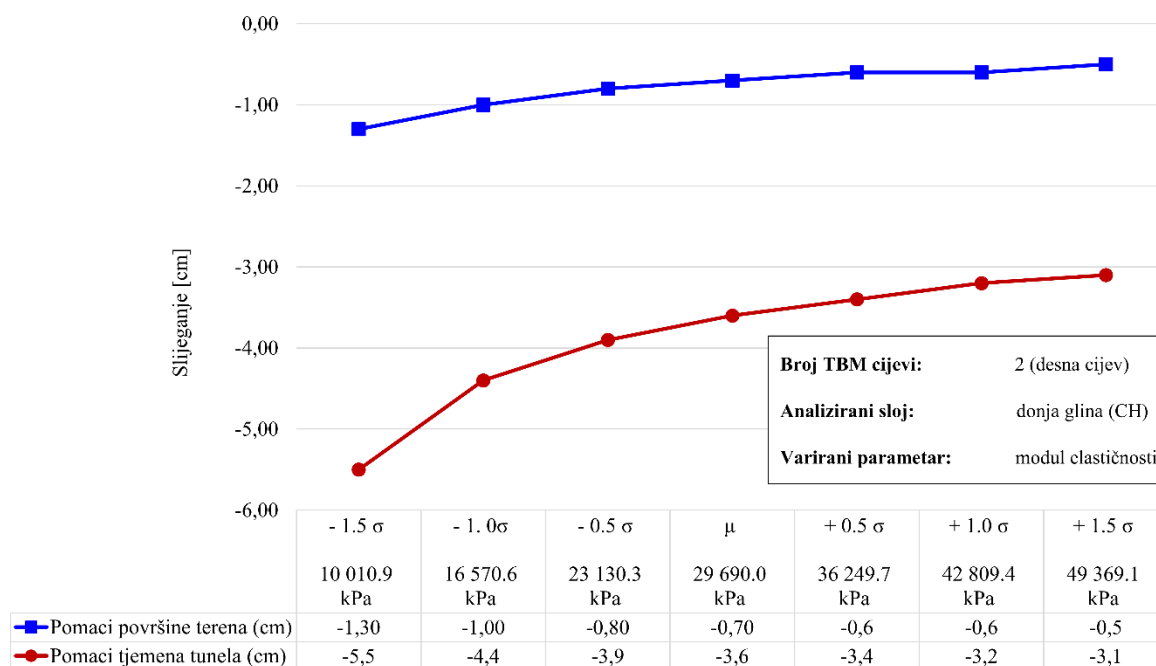
b) Varijacija sloja šljunka GP/GC



Slika 62. Varijacija modula elastičnosti drugog sloja - desna cijev

Trend slijeganja nalikuje prethodnim dijagramima, kod varijacije modula elastičnosti sloja šljunka GP/GC, pri čemu je maksimalno slijeganje površine terena 0,9 cm a tjemena tunela 6,2 cm.

c) Varijacija sloja donje gline CH



Slika 63. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja – desna cijev

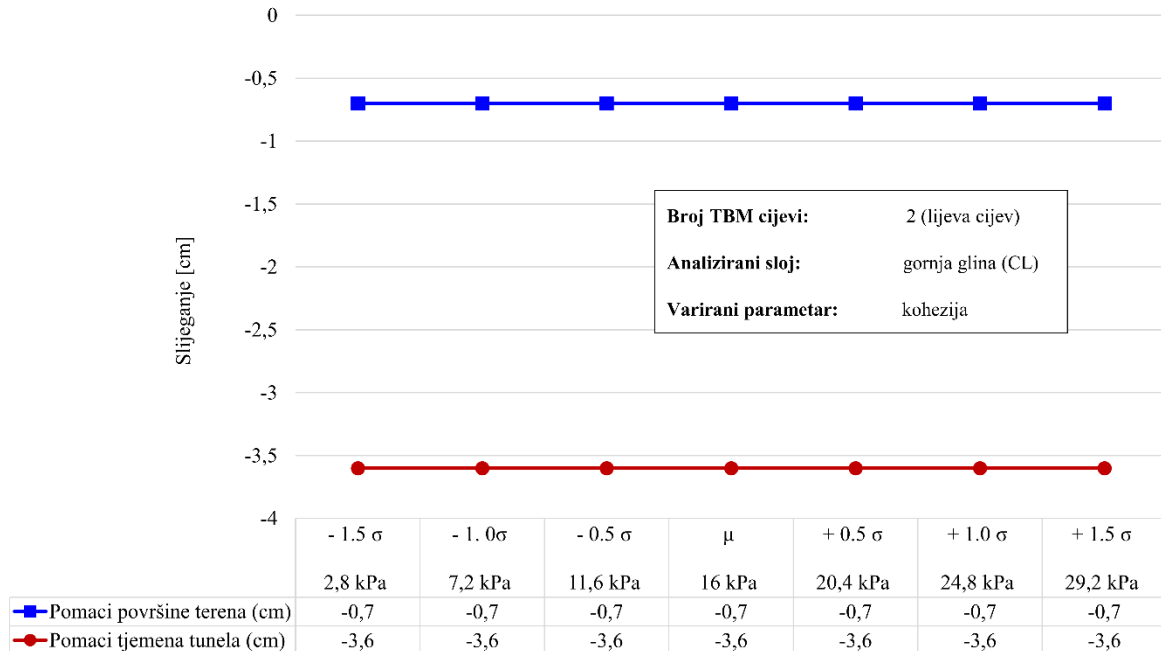
Maksimalni pomak površine terena iznosi 1,3 cm, a tjemena tunela 5,5 cm, pri varijaciji modula elastičnosti sloja gline CH desne cijevi.

6.2.2.1.2. Varijacija kohezije

U nastavku su prikazani dijagrami slijezanja površine terena i tjemena tunela za slučaj dvije cijevi metroa, i to varijacijom kohezije sloja gornje gline (CL) i sloja donje gline (CH). Pri tome je na slikama naznačeno koji je parametar variran za koji sloj, dok su svi ostali parametri, za sve slojeve, u analizama definirani kao srednje (μ) vrijednosti određene na temelju statičke raspodjele. Lijeva i desna cijev prikazane su zasebno.

6.2.2.1.2.1. Lijeva cijev

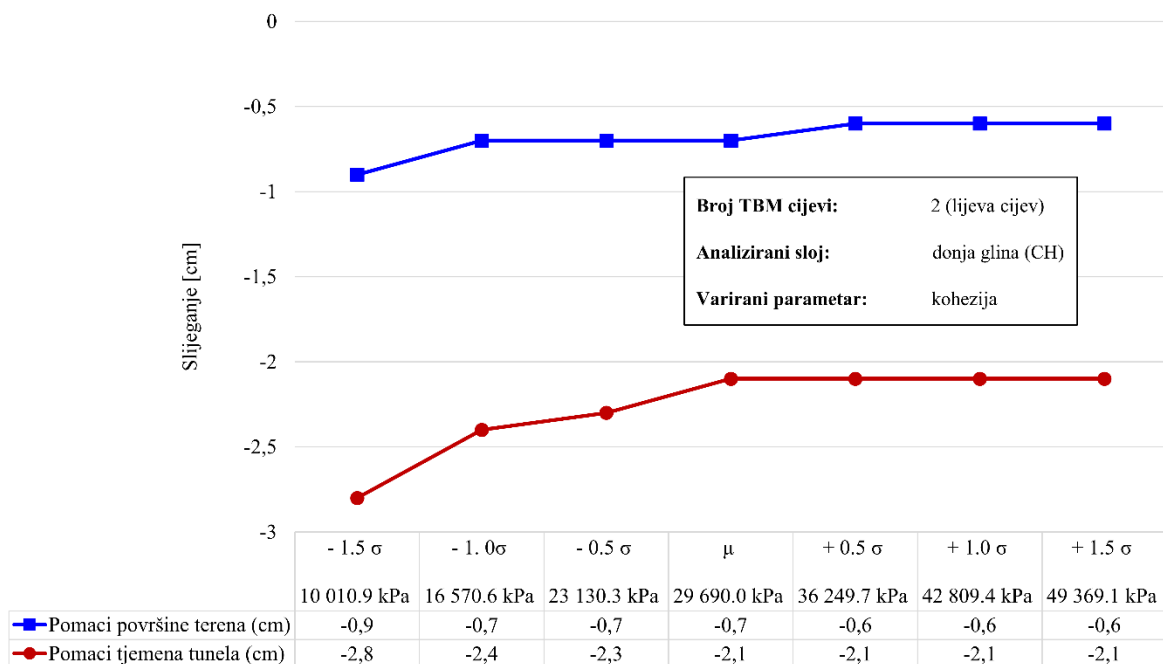
a) Variranje gornjeg sloja gline CL



Slika 64. Varijacija kohezije prvog sloja - lijeva cijev

Promatrajući pomake lijeve cijevi, varijacijom kohezije sloja gornje gline CL, pomaci su potpuno jednaki sve vrijednosti standardnih devijacija i iznose 0,7 i 3,6 cm.

b) Varijacija donjeg sloja gline CH

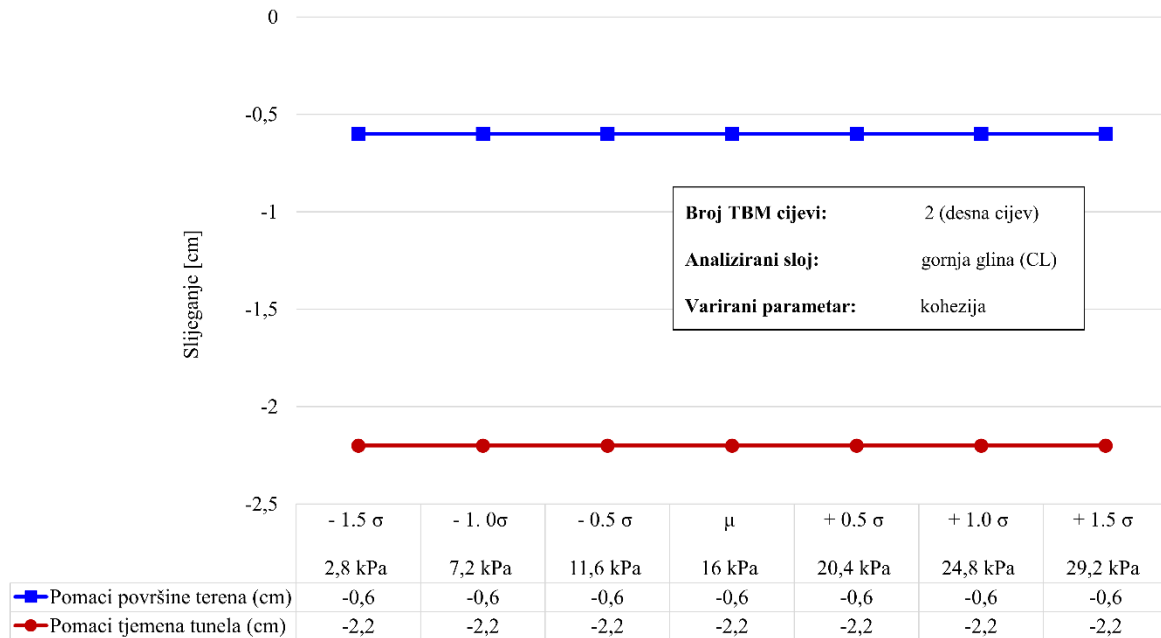


Slika 65. Varijacija kohezije trećeg sloja - lijeva cijev

Maksimalni pomak na razini površine terena lijeve cijevi iznosi 0,9 cm a tjemena tunela 2,8 cm.

6.2.2.1.2.2. Desna cijev

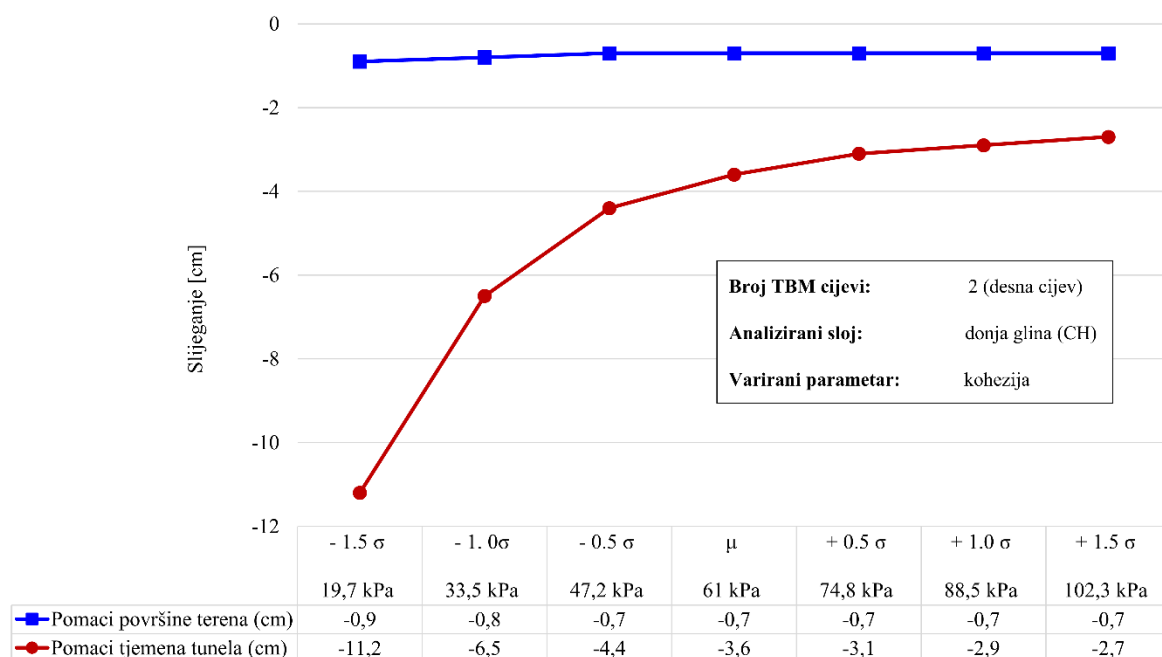
a) Varijacija sloja gornje gline CL



Slika 66. Varijacija kohezije prvog sloja - desna cijev

Varijacijom kohezije u sloju gornje gline CL, pomaci su potpuno jednaki sve vrijednosti standardnih devijacija i iznose 0,6 i 2,2 cm.

b) Varijacija sloja donje gline CL



Slika 67. Varijacija kohezije trećeg sloja - desna cijev

Maksimalni pomak desne cijevi na razini tjemena tunela iznosi 11,2 cm i smanjuje se kako standardna devijacija raste prema većim vrijednostima parametara od srednje vrijednosti, a na površini terena 0,9 cm i ostaje konstantan.

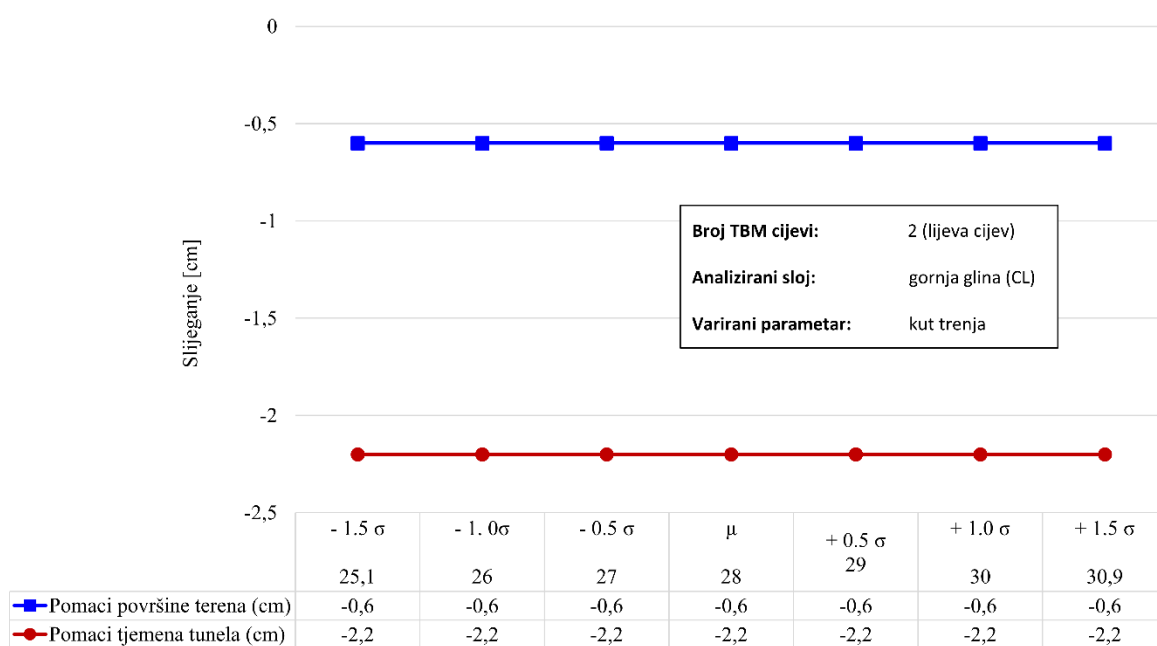
6.2.2.1.3. Varijacija kuta unutarnjeg trenja

U nastavku su prikazani dijagrami slijezanja površine terena i tjemena tunela za slučaj dvije cijevi metroa, i to varijacijom kuta unutarnjeg trenja sloja gornje gline (CL), sloja šljunka GP/GC te sloja donje gline (CH). Pri tome je na slikama naznačeno koji je parametar variran

za koji sloj, dok su svi ostali parametri, za sve slojeve, u analizama definirani kao srednje (μ) vrijednosti određene na temelju statičke raspodjele. Lijeva i desna cijev prikazane su zasebno.

6.2.2.1.3.1. Lijeva cijev

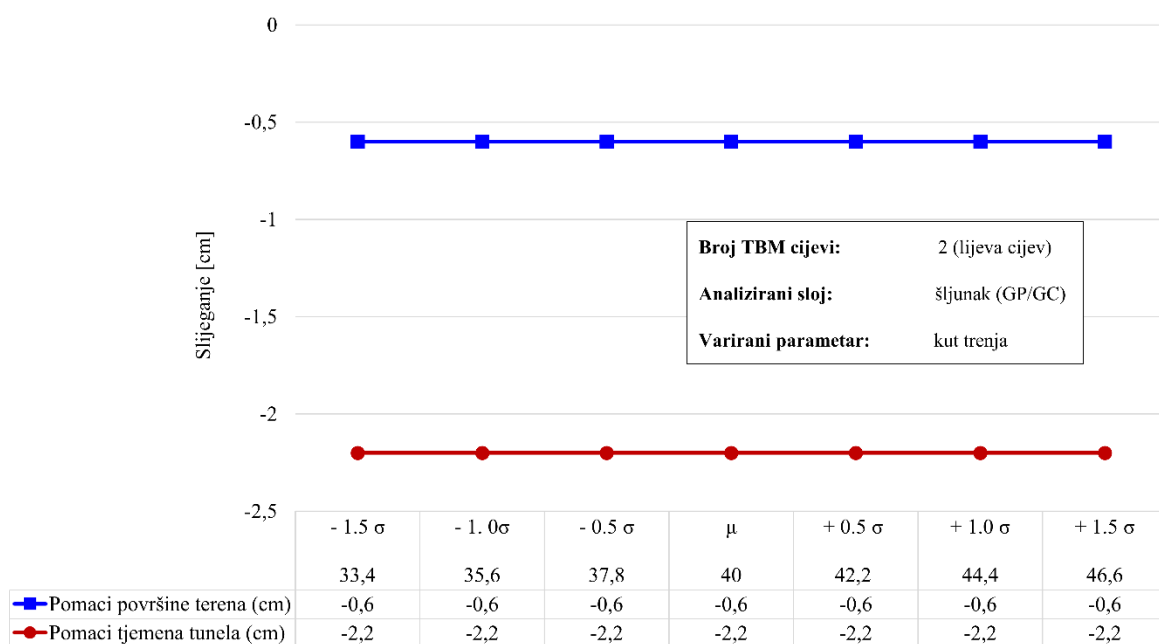
a) Variranje gornjeg sloja gline CL



Slika 68. Varijacija kuta trenja prvog sloja - lijeva cijev

Varijacijom kuta trenja sloja gornje gline CL, pomaci lijeve cijevi su potpuno jednaki sve vrijednosti standardnih devijacija i iznose 0,6 i 2,2 cm.

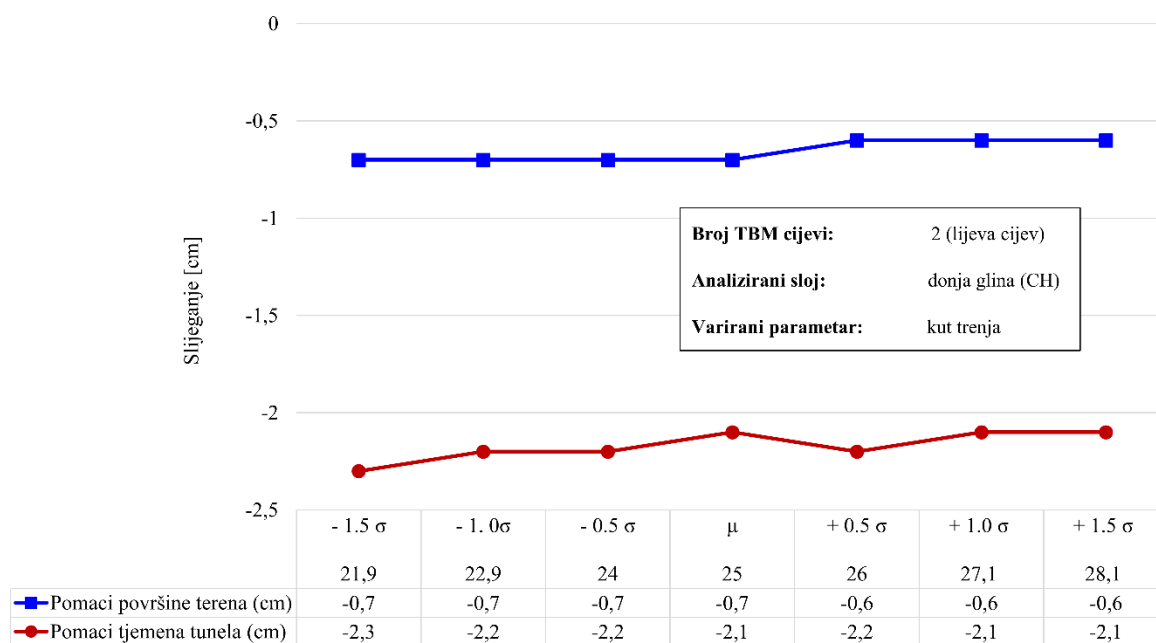
b) Variranje sloja šljunka GP/GC



Slika 69. Varijacija kuta trenja drugog sloja - lijeva cijev

Varijacijom kuta unutarnjeg trenja šljunka GP/GC, pomaci lijeve cijevi su potpuno jednaki za sve razmatrane vrijednosti (tj. za 0.5x, 1.0x i 1.5x standardne devijacije) i iznose 0,6 i 2,2 cm.

c) Variranje donjeg sloja gline CH

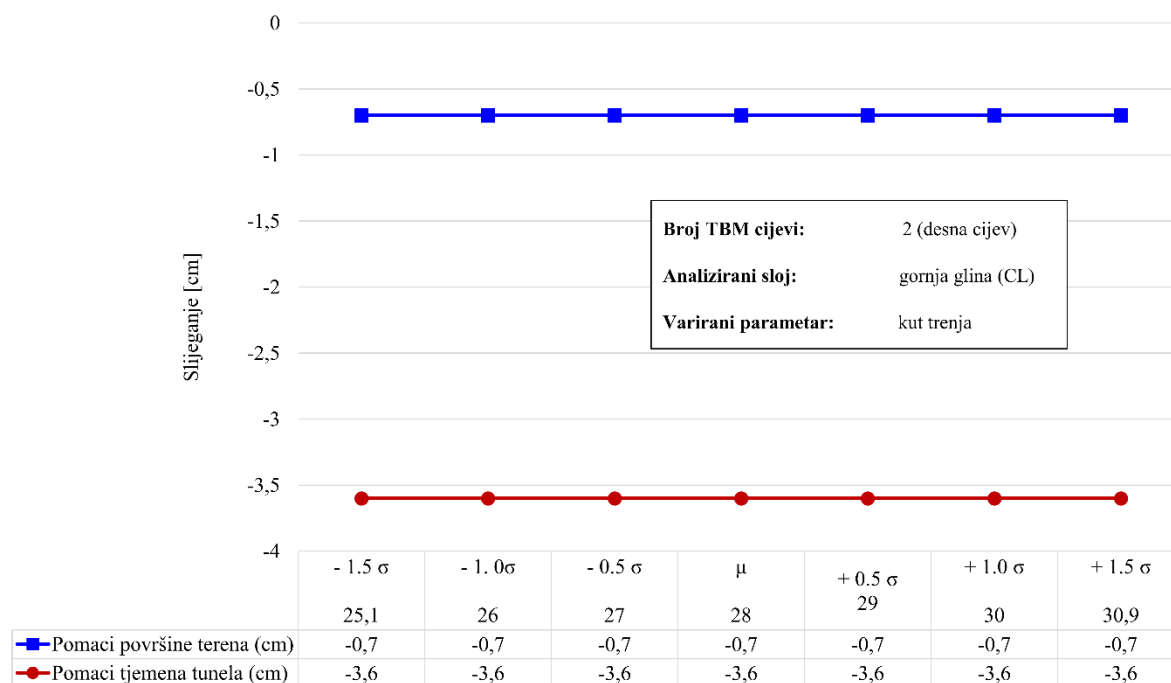


Slika 70. Varijacija kuta trenja trećeg sloja - lijeva cijev

Maksimalni pomak na razini površine terena iznosi 0,7 cm, a tjemena tunela 2,3 cm.

6.2.2.1.3.2. Desna cijev

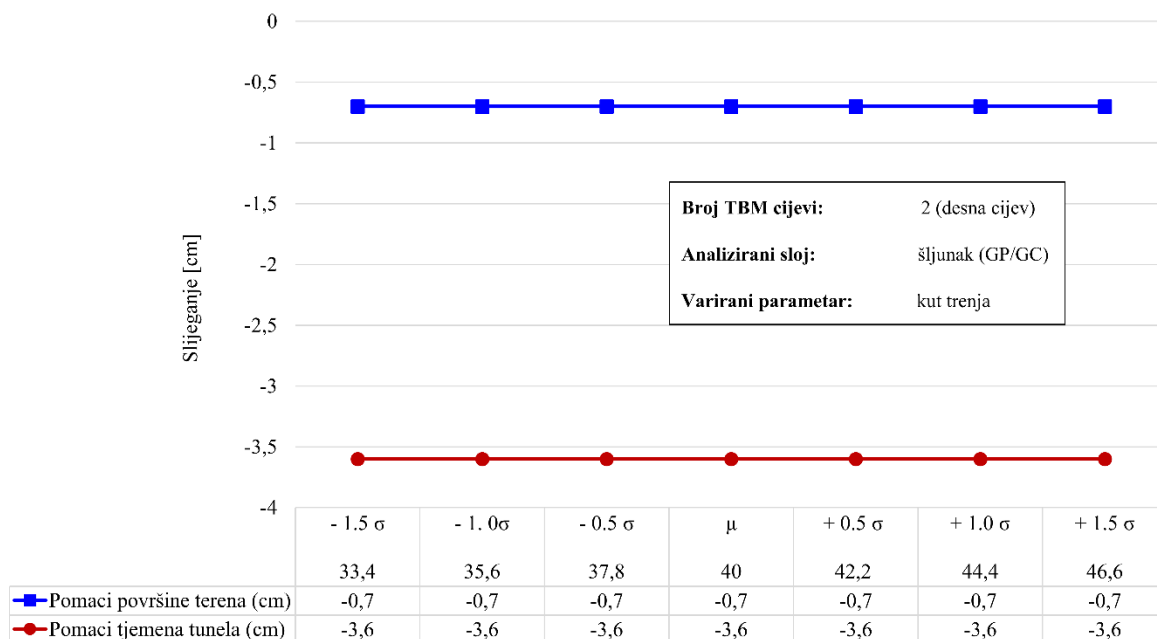
a) Varijacija gornjeg sloja gline CL



Slika 71. Varijacija kuta trenja prvog sloja - desna cijev

Varijacijom kuta trenja gornjeg sloja gline CL, pomaci desne cijevi su potpuno za sve razmatrane vrijednosti (tj. za 0.5x, 1.0x i 1.5x standardne devijacije) i iznose 0,7 i 3,6 cm.

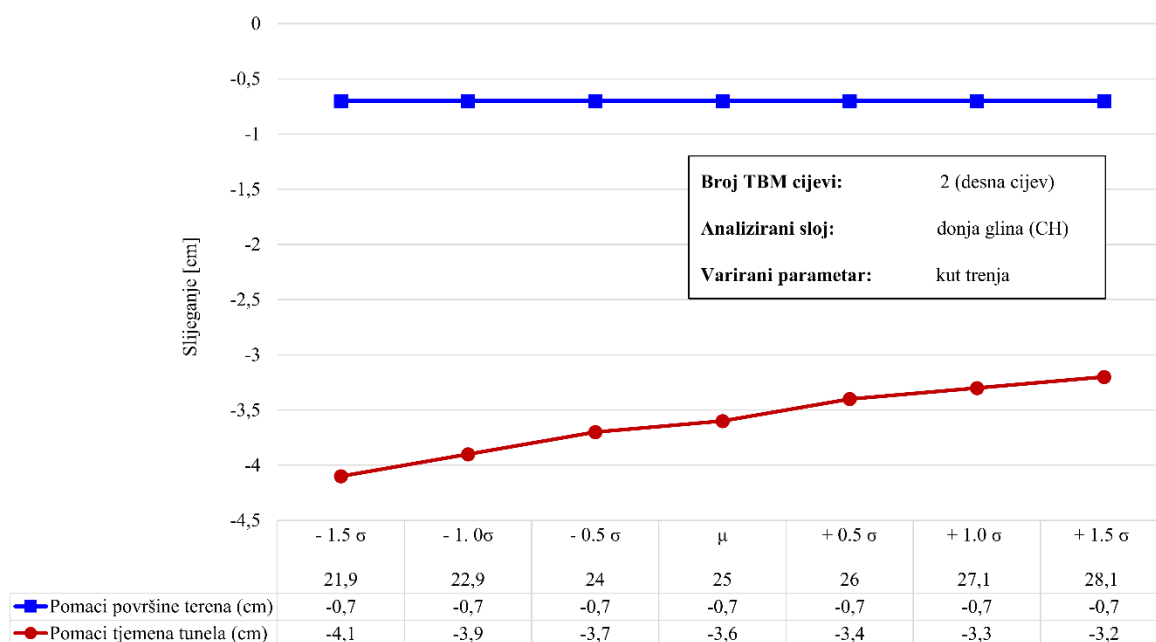
b) Varijacija sloja šljunka GP/GC



Slika 72. Varijacija kuta trenja drugog sloja - desna cijev

Varijacijom kuta unutarnjeg trenja šljunka, pomaci desne cijevi su potpuno jednaki za sve razmatrane vrijednosti (tj. za 0.5x, 1.0x i 1.5x standardne devijacije) i iznose 0,7 i 3,6 cm.

c) Varijacija sloja donje gline CH



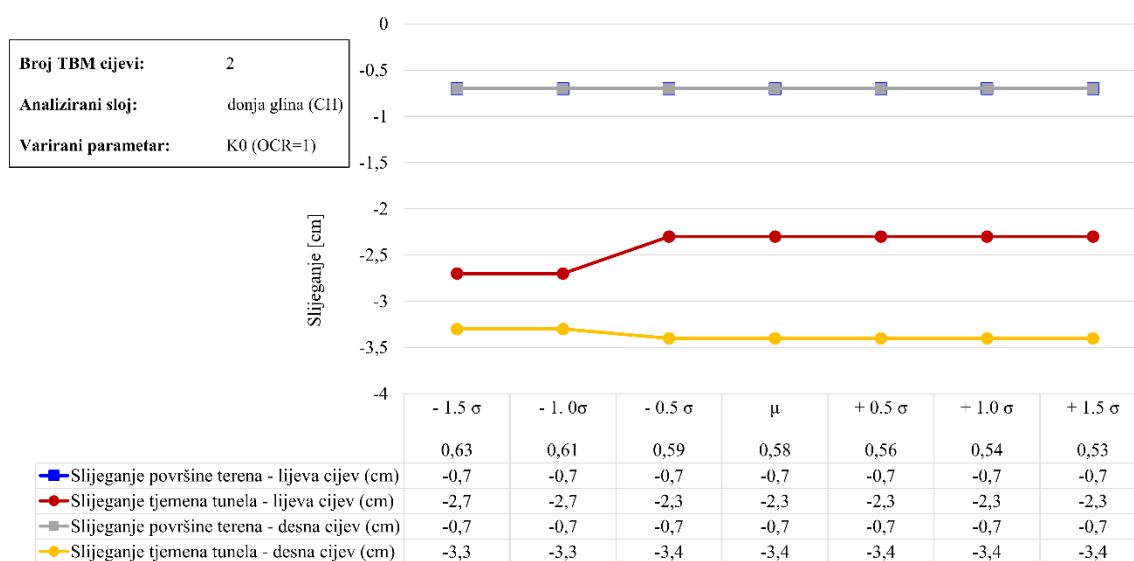
Slika 73. Varijacija kuta trenja trećeg sloja - desna cijev

Varijacijom kuta trenja donjeg sloja gline CH, pomaci desne cijevi iznose 0,7 cm za površinu terena i konstantni su tijekom veće i manje te srednje vrijednosti standardne devijacije, a tjemena tunela 4,1 cm i smanjuju se.

6.2.2.1.4. Varijacija koeficijenta bočnog tlaka mirovanja

U nastavku su prikazani dijagrami slijeganja površine terena i tjemena tunela za slučaj dvije cijevi metroa, i to varijacijom koeficijenta bočnog tlaka mirovanja samo sloja donje gline (CH) za OCR=1,3 i 5. Pri tome je na slikama naznačeno koji je parametar variran za koji sloj, dok su svi ostali parametri, za sve slojeve, u analizama definirani kao srednje (μ) vrijednosti određene na temelju statičke raspodjele. Također, predložen je sumarni prikaz varijacije K0 obje cijevi za svaku promjenu OCR vrijednosti.

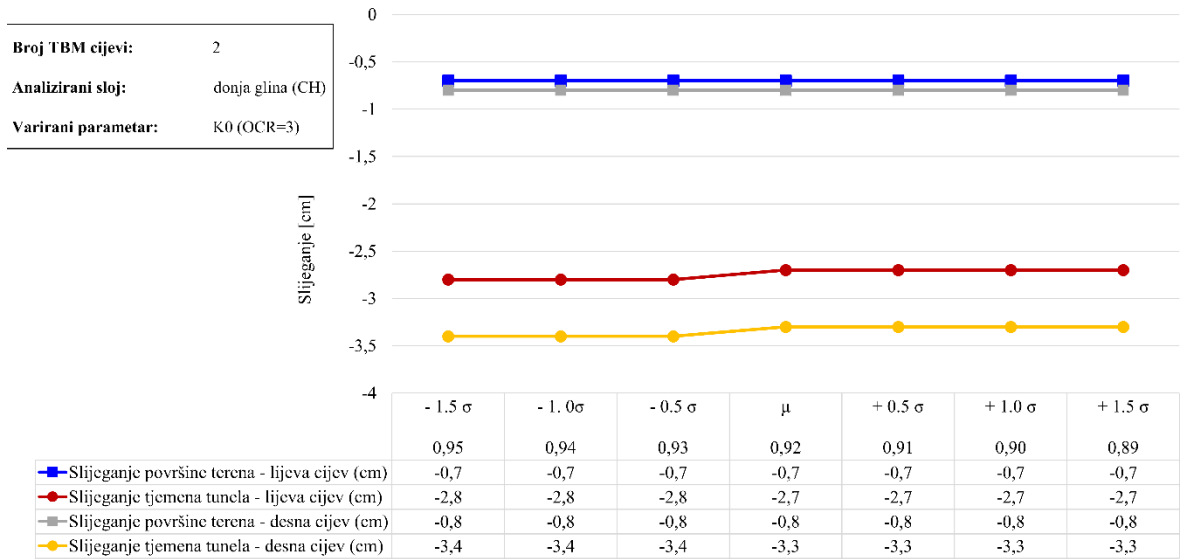
a) Varijacija sloja donje gline CH za OCR=1



Slika 74. Varijacija K0 (OCR=1) - dvije cijevi

Varijacijom K0 (OCR=1) pomaci površine terena lijeve i desne cijevi preklapaju se i iznose 0,7 cm, dok se slijezanje tjemena tunela razlikuje i grana paralelno jedno s drugim.

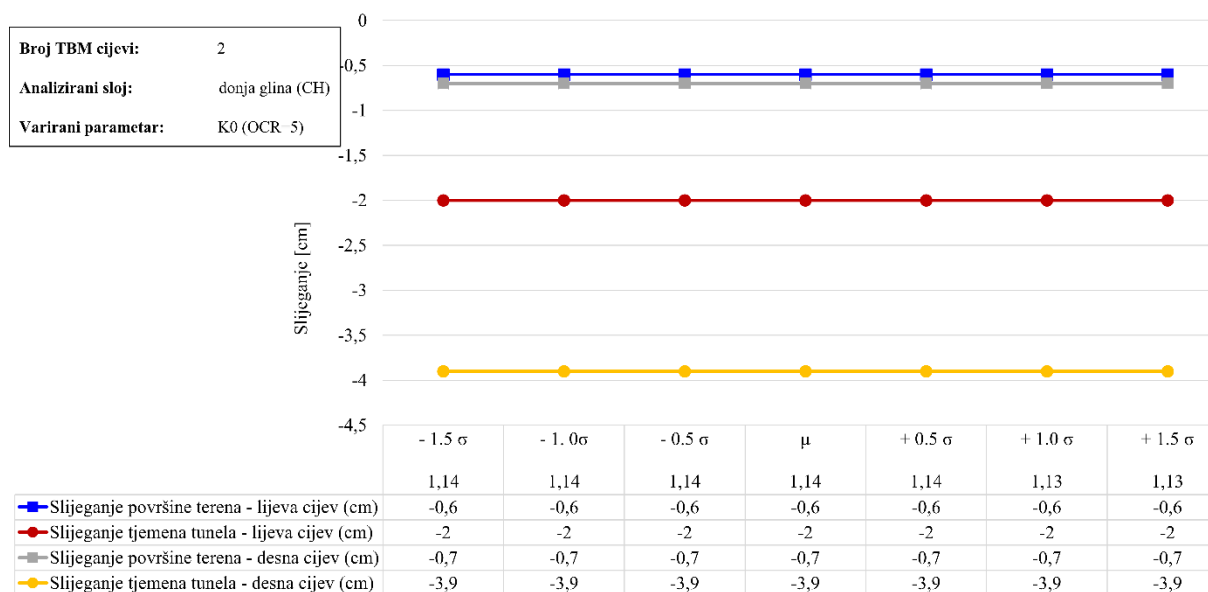
b) Varijacija sloja donje gline CH za OCR=3



Slika 75. Varijacija K0 (OCR=3) - dvije cijevi

Slijeganja lijeve i desne cijevi na razini terena su konstantna i iznose 0,95 i 0,8 cm, a na razini tjemena tunela se kreću između 3,4 i 0,7 cm, kod varijacije K0 u slučaju kad je OCR=3.

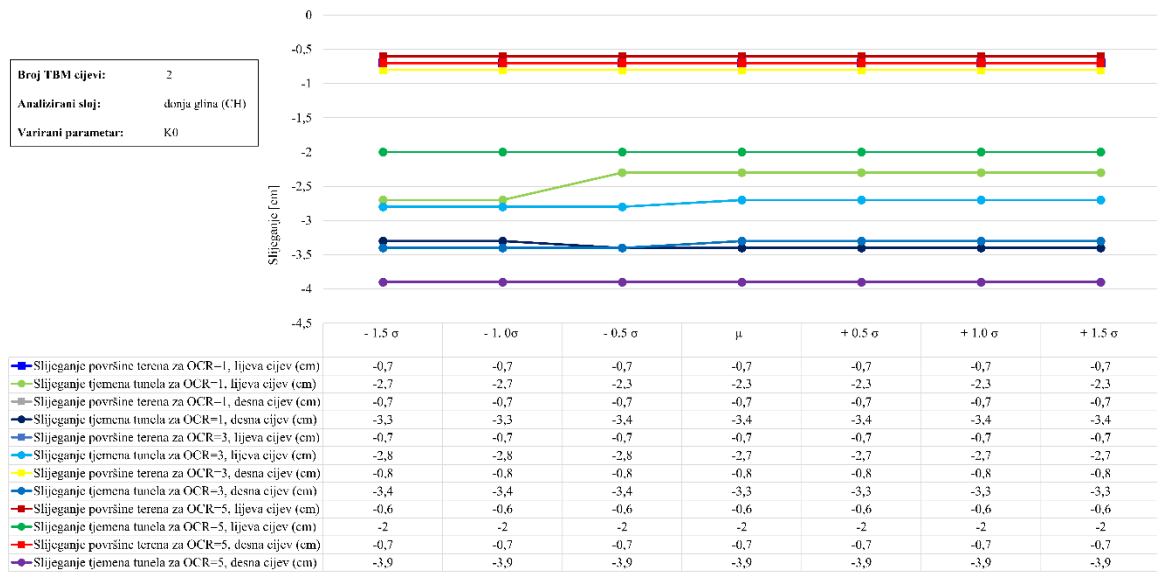
c) Varijacija sloja donje gline za OCR=5



Slika 76. Varijacija K0 (OCR=5) - dvije cijevi

Slijezanje tjemena tunela desne cijevi izdvaja se s iznosom od 3,9 cm. Pomaci površine terena su skoro pa jednaki.

d) Sumarni prikaz varijacije K0 za donji sloj gline CH



Slika 77. Sumarni prikaz varijacije K0 – dvije cijevi

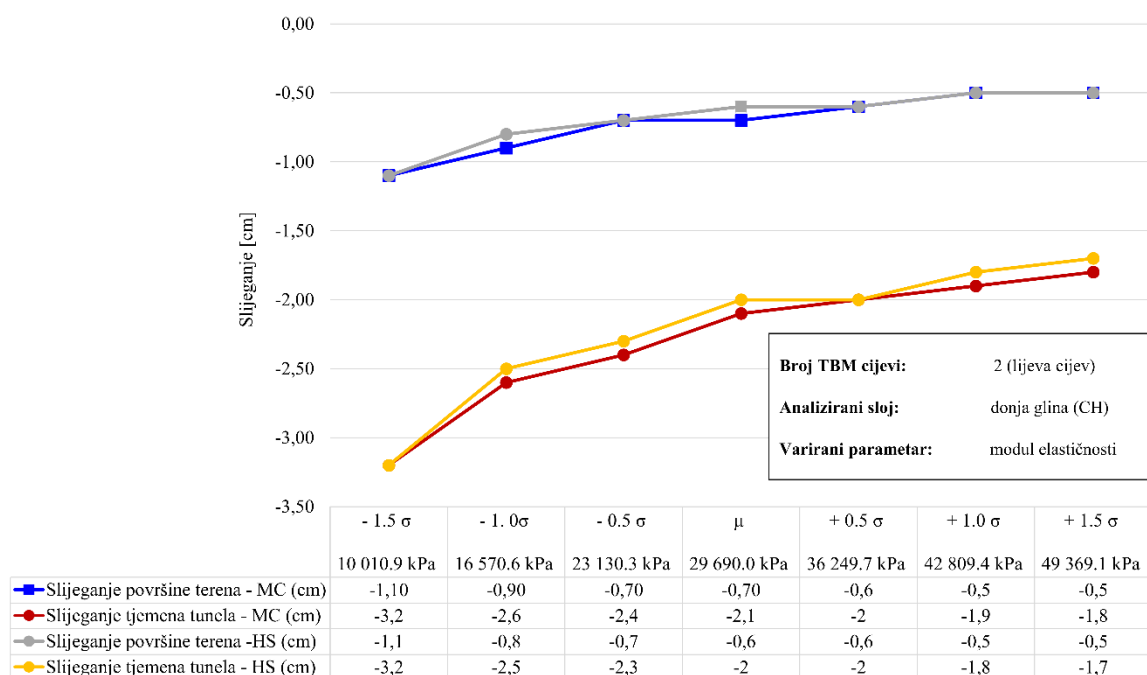
Sumarnim prikazom lijeve i desne cijevi može se primijetiti da se slijezanja površine terena u većoj mjeri preklapaju, dok se pomaci tjemena tunela razlikuju u okviru od 2,0 do 3,9 cm.

6.2.2.2. Usporedba konstitutivnih modela Mohr – Coulomb i Hardening Soil

U nastavku su prikazani dijagrami slijezanja površine terena i tjemena tunela za slučaj dvije cijevi metroa, i to varijacijom modula elastičnosti samo sloja donje gline (CH) korištenjem Hardening Soil modela. Pri tome je na slikama naznačeno koji je parametar variran za koji sloj, dok su svi ostali parametri, za sve slojeve, u analizama definirani kao srednje (μ) vrijednosti određene na temelju statičke raspodjele. Također, priložen je grafički dokaz o usporedbi Mohr

– Coulombovog i Hardening Soil materijala, kako bi jasnije predočili događanja u tlu prilikom mijenjanja tih modela.

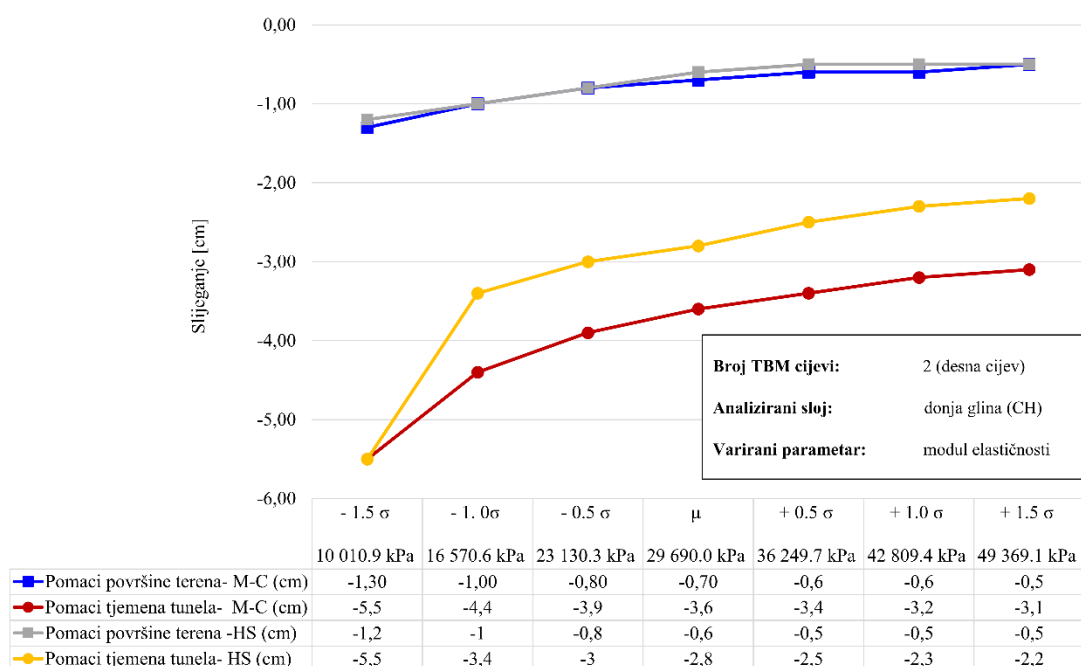
a) Lijeva cijev



Slika 78. Varijacija modula elastičnosti, usporedba M-C i HS materijala, lijeva cijev

Iznosi slijezanja površine terena i tjemena tunela se skoro pa preklapaju usporedbom M-C i HS materijala pri čemu najveći pomak na razini tjemena tunela iznosi 3,2 cm a površine terena 1,1 cm.

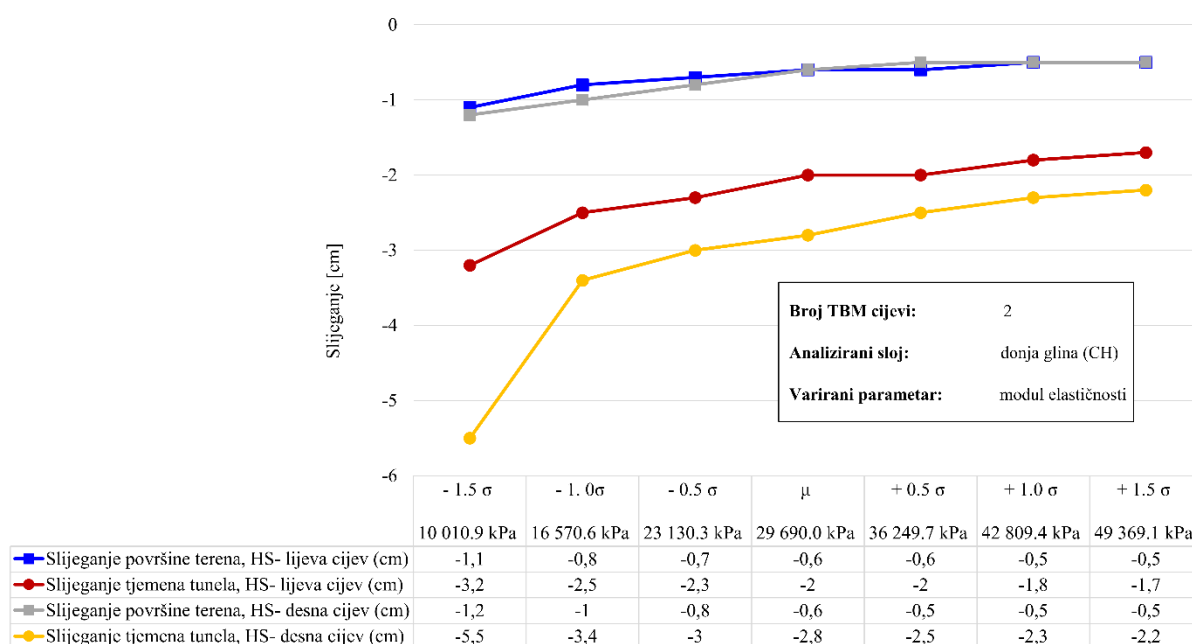
b) Desna cijev



Slika 79. Varijacija modula elastičnosti, usporedba M-C i HS materijala – desna cijev

Trend slijeganja desne cijevi se malo razlikuje od lijeve, gdje se slijeganja na razini tjemena tunela razilaze odmah nakon -1.5 σ . Maksimalna slijeganja kod HS materijala su 1,2 i 5,5 cm, a kod M-C su 1,3 i 5,5 cm.

c) Obje cijevi



Slika 80. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja, Hardening soil – dvije cijevi

Desna cijev slegnula se više od lijeve cijevi pri korištenju Hardening Soil materijala. Iznosi slijevanja za lijevu cijev iznose 1,1 cm i 3,2 cm, a desne 1,2 cm i 5,5 cm.

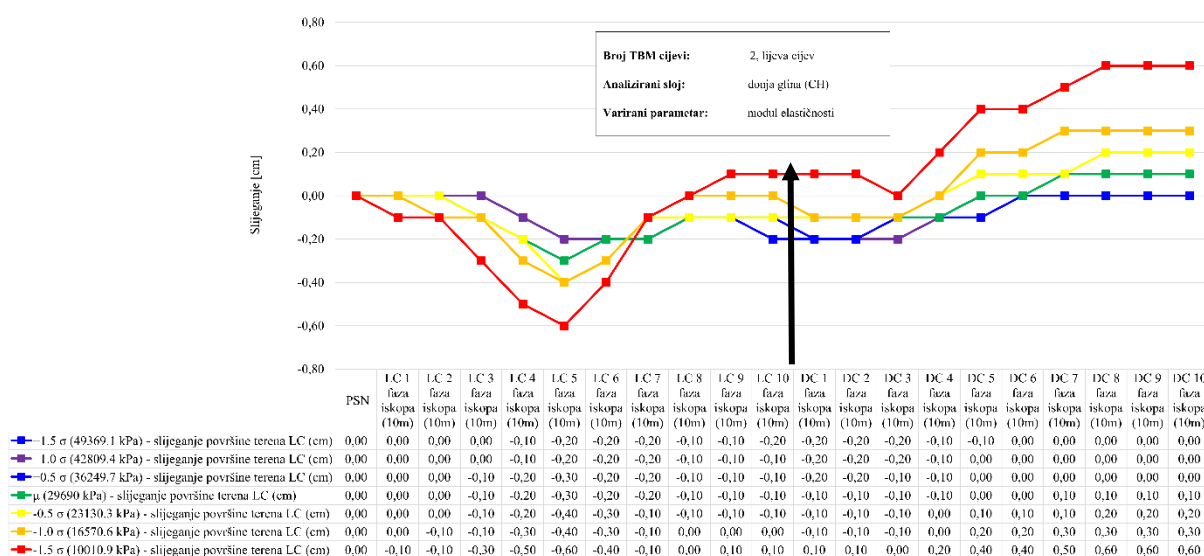
6.2.2.3. Slijevanje ovisno o faznosti izvedbe tunela

U nastavku je prikazana ovisnost slijevanja o vremenu pri iskopima tunela dvije cijevi, u 20 faza iskopa po 10 metara. Promatrana je točka na površini koja se nalazi na sredini modela. Pri tome, na grafu su prikazane vrijednosti slijevanja te točke za svaku fazu te je variran samo donji sloj gline CH, dok su svi ostali parametri, za sve slojeve, u analizama definirani kao srednje (μ) vrijednosti određene na temelju statičke raspodjele. U grafičkim prikazima označen je kraj

iskopa lijeve cijevi što ujedno predstavlja i početak iskopa desne cijevi. Varirani parametri su modul elastičnosti, kohezija i kut unutarnjeg trenja. Na svim grafovima dolazi do izdizanja točke na sredini modela koje uzrokuje izvedba (iskop) druge cijevi.

6.2.2.3.1. Varijacija modula elastičnosti

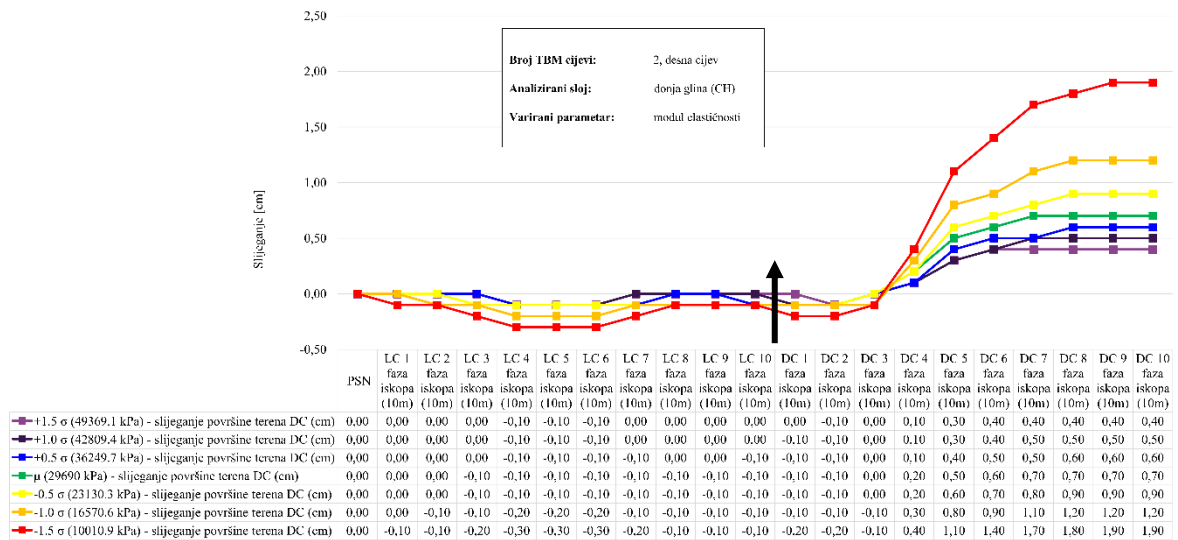
a) Slijeganje u fazama lijeve cijevi



Slika 81. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela po fazama - lijeva cijev

Promatra se lijeva cijev, lokacija slijeganja nalazi se na sredini površine modela. Na prethodnom dijagramu primjećuje se povećanje slijeganja do pete faze iskopa gdje maksimalan pomak iznosi 0,6 cm. Nakon pete faze dolazi do smanjenja slijeganja i točka se počinje izdizati daljnjim povećanjem iskopa. Izdizanje terena (točka koja se nalazi na lijevoj cijevi) uzrokuje kopanje tj. izvedba desne cijevi koja se sliježe. Već u sedmoj fazi iskopa druge (desne) cijevi, pomaci postaju konstantni do kraja.

b) Slijeganje u fazama desne cijevi

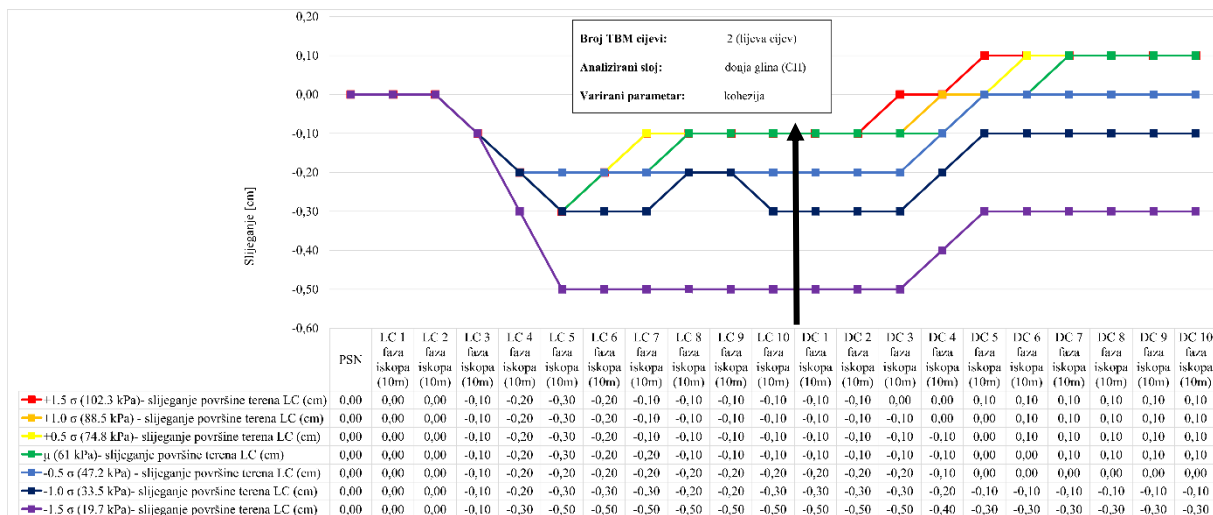


Slika 82. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela po fazama - desna cijev

Iskopima lijeve cijevi, desna cijev se sliježe u najvećoj vrijednosti od 0,3 cm. Nakon završetka iskopa lijeve cijevi, desna cijev se počinje kopati i točka na sredini površine modela se počinje izdizati već u svojoj trećoj fazi, pri čemu dostiže iznos pomaka od 1,9 cm.

6.2.2.3.2. Varijacija kohezije

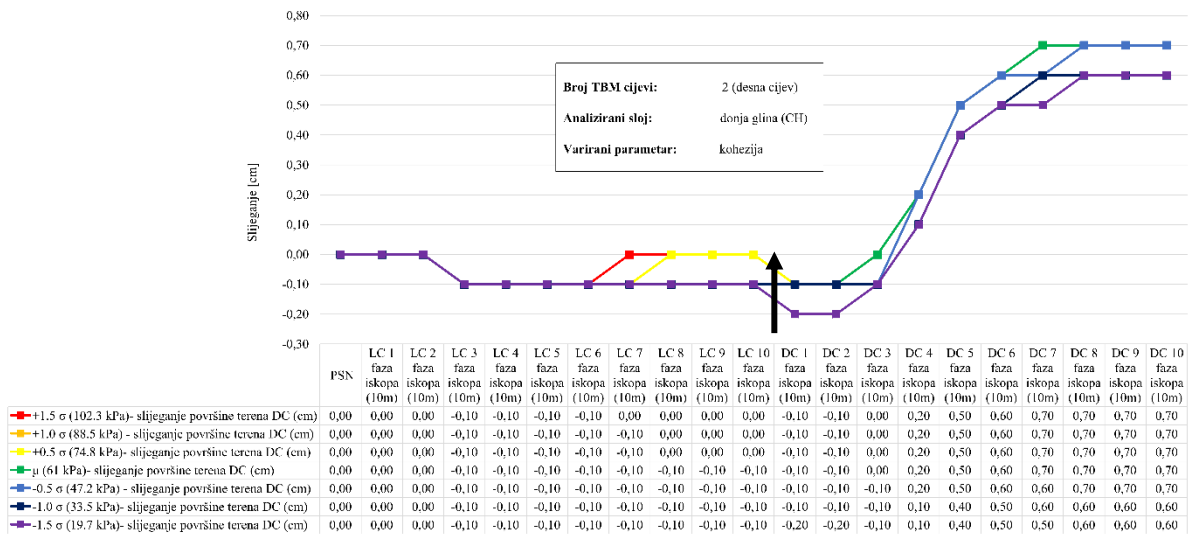
a) Slijeganje u fazama lijeve cijevi



Slika 83. Varijacija kohezije trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela po fazama - lijeva cijev

Slijeganje se povećava iskopom lijeve cijevi do četvrte faze, nakon čega relativno miruje na konstantnoj vrijednosti. Iskopom desne cijevi u trećoj fazi kreće izdizanje točke do maksimalne vrijednosti od +0,3 cm, te ostaje konstantno do kraja.

b) Slijeganje u fazama desne cijevi

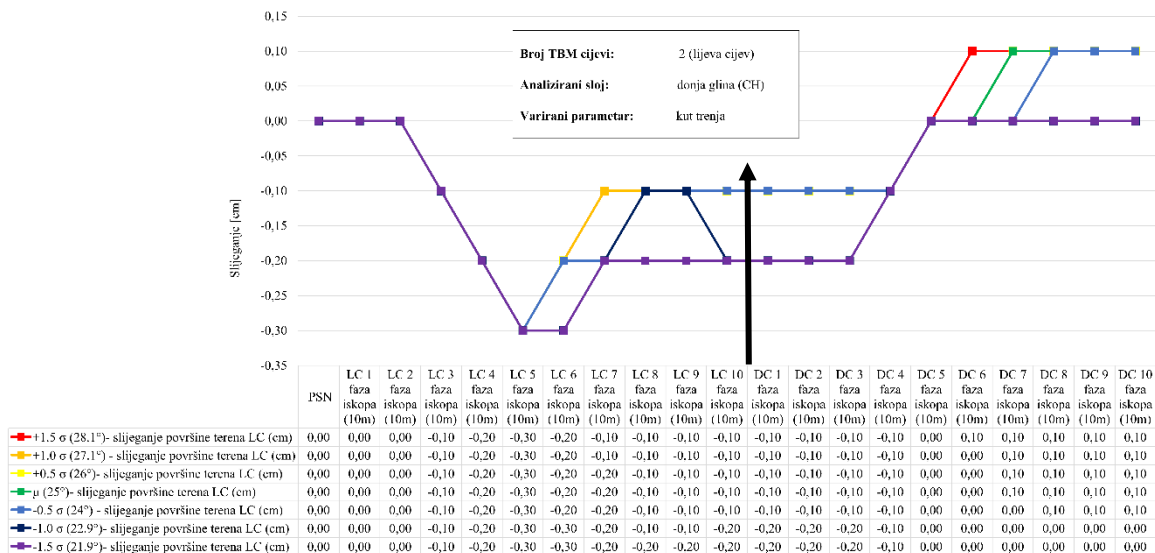


Slika 84. Varijacija kohezije trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela po fazama- desna cijev

Slijeganja se u prvih šest faza iskopa lijeve cijevi preklapaju u jednu krivulju, nakon čega kreće grananje. U početku iskopa desne cijevi, točka se sliježe te se naglo počinje izdizati do vrijednosti od +0,7 cm.

6.2.2.3.3. Varijacija kuta trenja

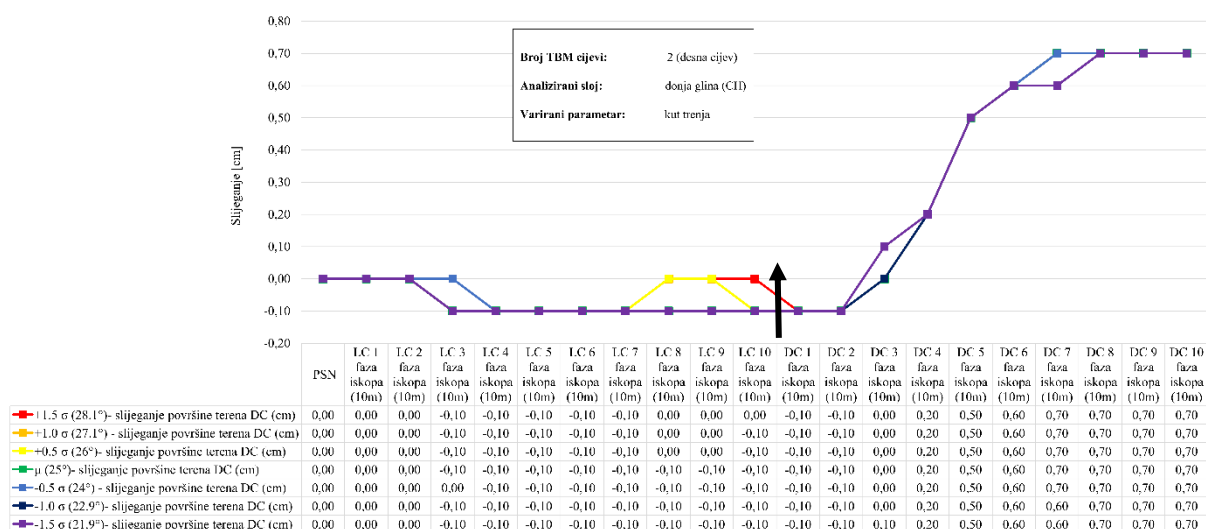
a) Slijeganje u fazama lijeve cijevi



Slika 85. Varijacija kuta trenja trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela po fazama - lijeva cijev

Kopanjem lijeve cijevi, poslije druge faze, slijeganje naglo raste te se iznosi slijeganja standardnih devijacija preklapaju sve do pete faze iskopa, nakon čega dolazi do smanjenja slijeganja. Završavajući iskope desne cijevi, dolazi do pozitivnog pomaka točke na sredini modela (površina lijeve cijevi) i najveće izdizanje iznosi 0,1 cm.

b) Slijeganje u fazama desne cijevi



Slika 86. Varijacija kuta trenja trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela po fazama - desna cijev

U slučaju varijacije kuta trenja donje CH gline dijagram slijeganja po fazama iskopa se skoro pa preklapa u svim slučajevima kombinacije standardnih devijacija. Maksimalno izdizanje točke na sredini modela površine terena iznosi 0,7 cm i dostignuto je već u sedmoj fazi iskopa desne cijevi.

6.3. Dinamički proračuni

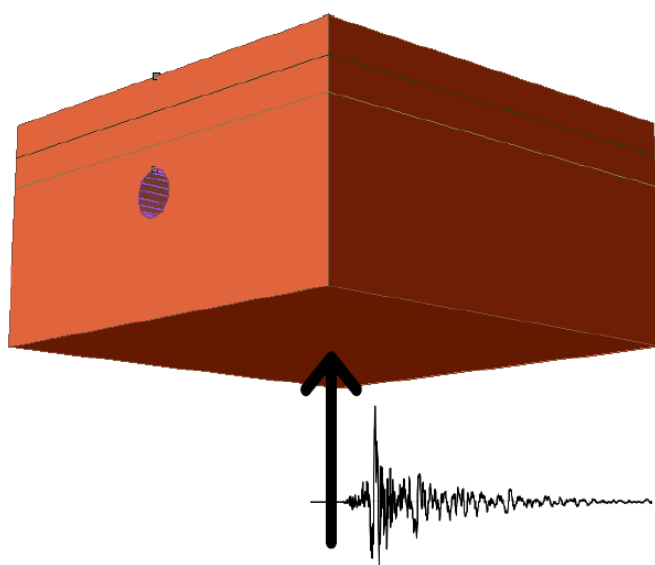
Motivacija za provedbu dinamičkih analiza je u činjenici da je grad Zagreb lociran u seizmički izrazito aktivnom području. Svjedoci smo i nedavnih razornih potresa koji su pogodili Zagreb i njegovu okolicu. U jutro 22. ožujka 2020. godine u 6 sati i 24 minute, grad je zadesio potres jačine 5,5 stupnjeva po Richteru [21]. Prema Euromediterranskom seizmološkom centru, epicentar se nalazio 7 kilometara sjeverno od središta Zagreba na dubini od 10 km. Nakon prvog jakog potresa uslijedila su dva manja, zabilježena u 7:01h i 7:41h. Tijekom idućeg dana na području Zagreba zapisano je 57 dodatnih potresa. U malo manje od mjesec dana građani su osjetili oko 145 podrhtavanja tla koji su bili magnitude iznad 1,3 stupnja po Richterovoj ljestvici [21]. Materijalne štete su se najviše osjetile u samom povijesnom središtu grada te je, između ostalog, oštećen i vrh južnog tornja Zagrebačke katedrale. Bio je to treći najjači potres u gradu Zagrebu [21].

U ovom radu je bilo potrebno ispitati utjecaj dinamike na izvedenom tunelu s rezultirajućim pomacima u tri smjera, koji su nametnuti zadanim opterećenjem. Akcelerogram zagrebačkog potresa korišten u uz suglasnost Seizmološke službe geofizičkog odsjeka Prirodoslovno – matematičkog fakulteta u Zagrebu. Provedeno je šest analiza tj. referentni potres iz ožujka 2020. čije su akceleracije u vremenu uvećane za 1.2, 1.4, 1.6, 1.8 i 2 puta. U nastavku je prikazana sumarna tablica provedenih dinamičkih analiza (promatrana je samo jedna cijev).

Tablica 18. Rekapitulacija provedenih dinamičkih analiza za jednu cijev

Dinamičke analize	1 cijev
Referentni ZGB potres – ref_{ZGB}	+
$ref_{ZGB} \times 1,2$	+
$ref_{ZGB} \times 1,4$	+
$ref_{ZGB} \times 1,6$	+
$ref_{ZGB} \times 1,8$	+
$ref_{ZGB} \times 2,0$	+

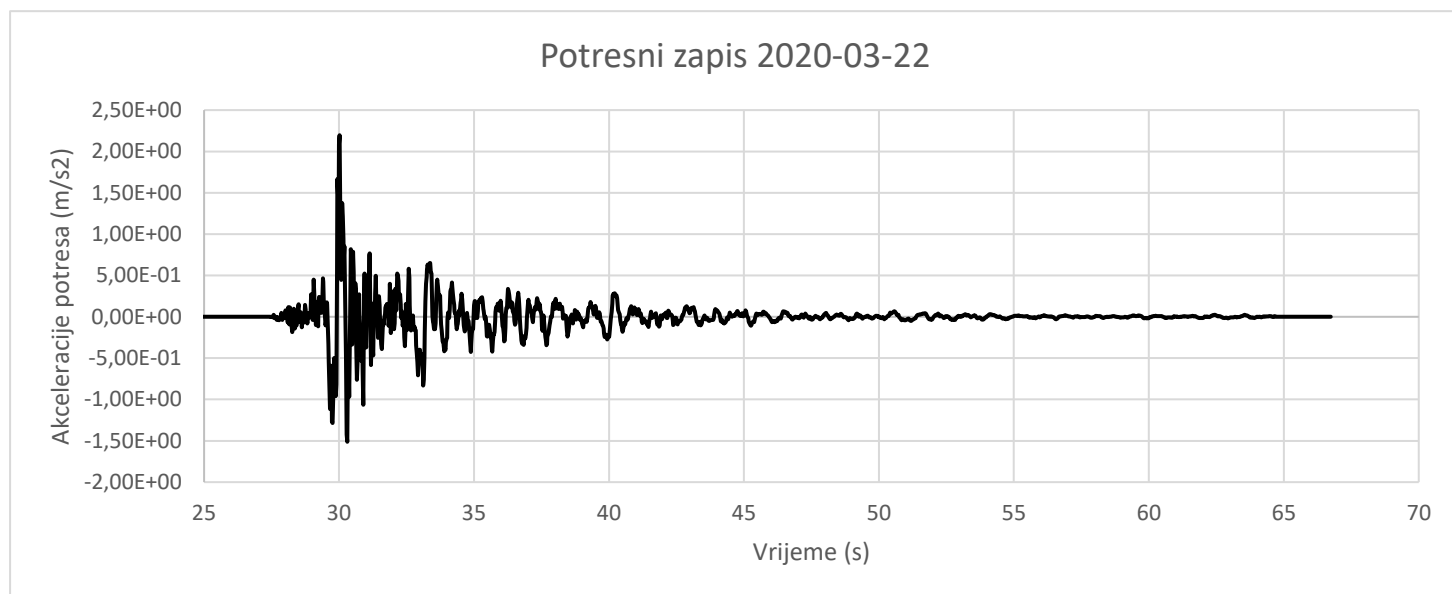
Slika 64. prikazuje model tunelske cijevi sa zadanim rubnim uvjetima oko cijelog modela (osim površine terena) gdje su primijenjeni uvjeti „Absorb“ čime je spriječena refleksija potresnog vala, te utjecaj opterećenja od akcelorograma na dnu. Linija pomaka (*line query*) promatrana je iznad tunelske cijevi na površini terena i na razini tjemena tunela.



Slika 87. Opterećenje potresom na dnu modela i rubni uvjeti

Prikaz potresnog zapisa korištenog u proračunu:

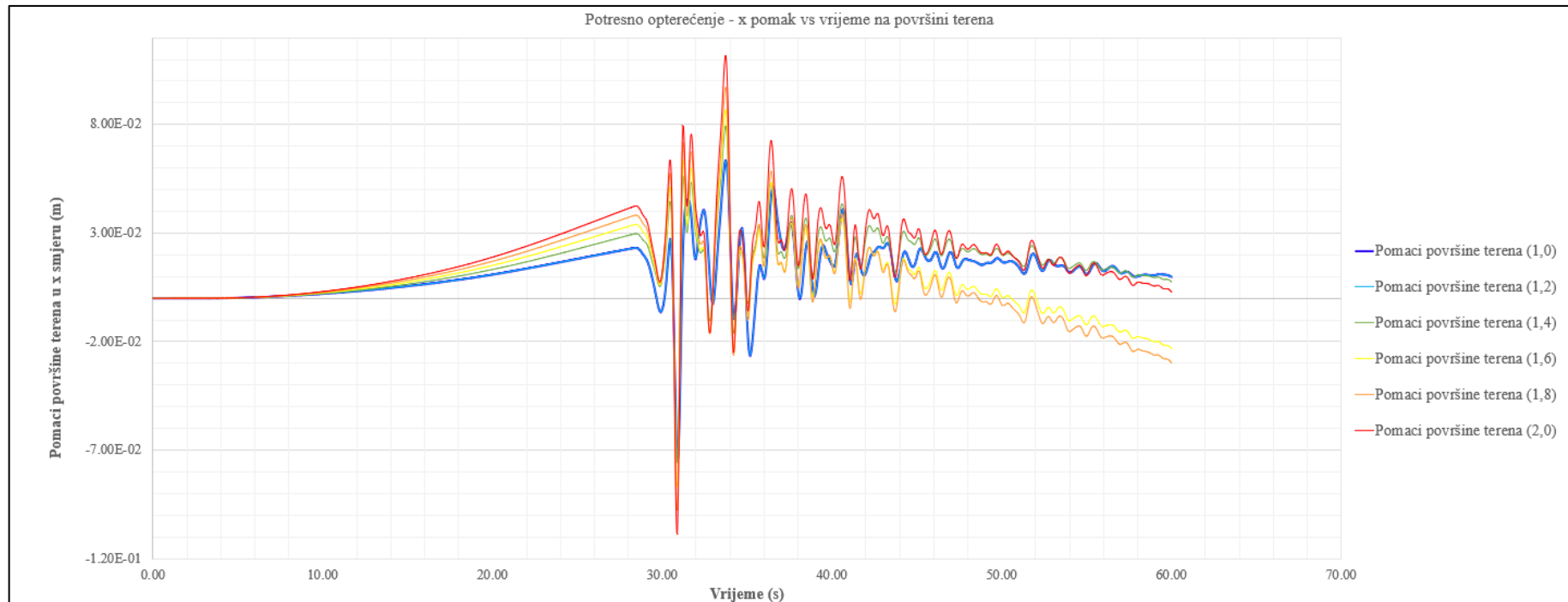
2020-03-22 05:24:03 ZG mainshock (CROATIA) 45.884N 16.013E 8km
mb 0 ML 5.5 Ms 0 Mw 0 Reverse
UHS QUHS (CROATIA) 45.808N 15.999E Unknown
Epicentral distance 8.5221km Azimuth 187.3411° Hypocentral distance 11.6887km



Slika 88. Zagrebački potres (22.3.2020) – zapis seizmografa

6.3.1. X – pomaci potresnog opterećenja

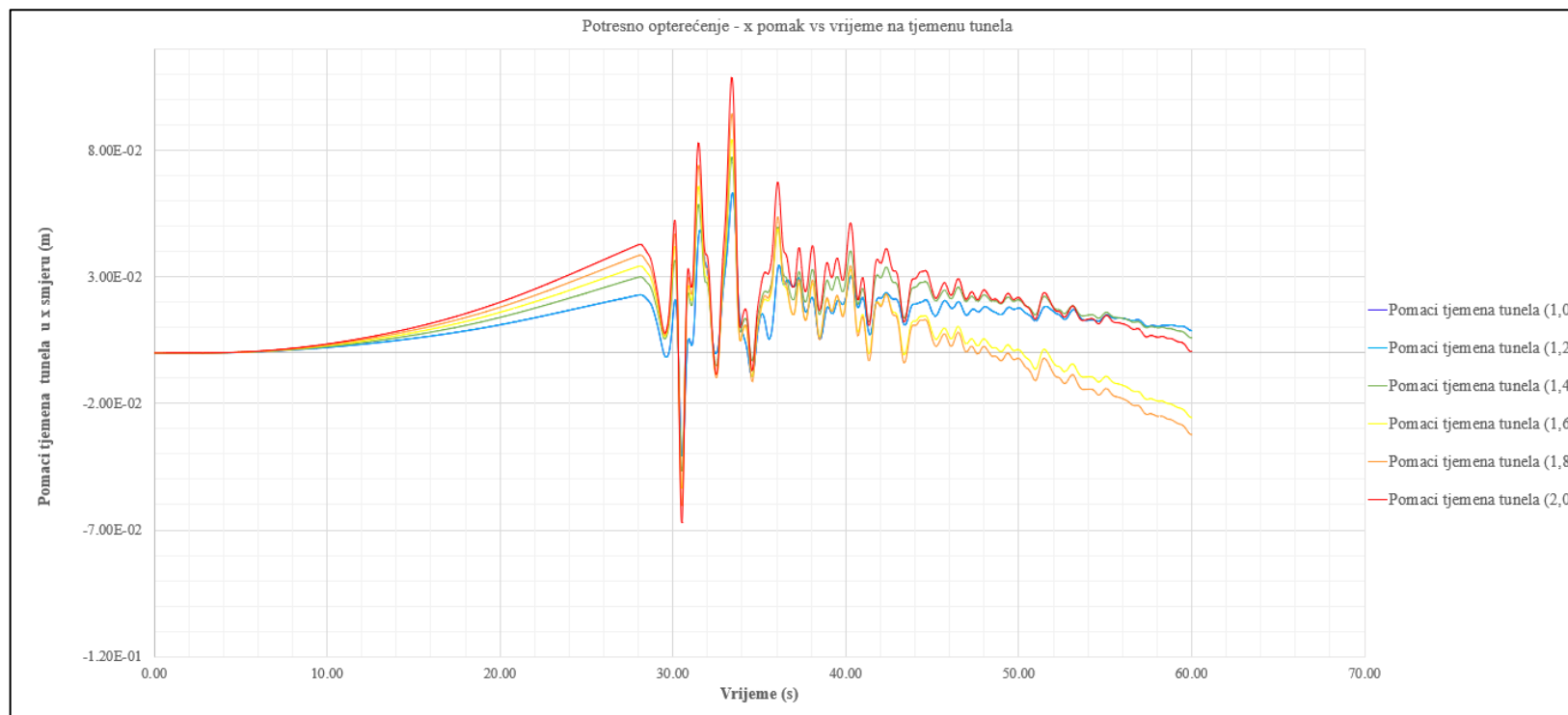
a) Pomak na površini terena



Slika 89. Odnos X – pomak vs vrijeme na površini terena

Najveći pomak u X smjeru na površini terena iznosi 11,2 cm i dogodio se nakon tridesete sekunde čija su ubrzanja u vremenu veća za 2 puta od ubrzanja iz referentnog potresa iz ožujka 2020. Nakon četrdesete sekunde pomaci se smanjuju do konačne vrijednosti od 0,27 cm.

b) Pomak na tjemenu tunela

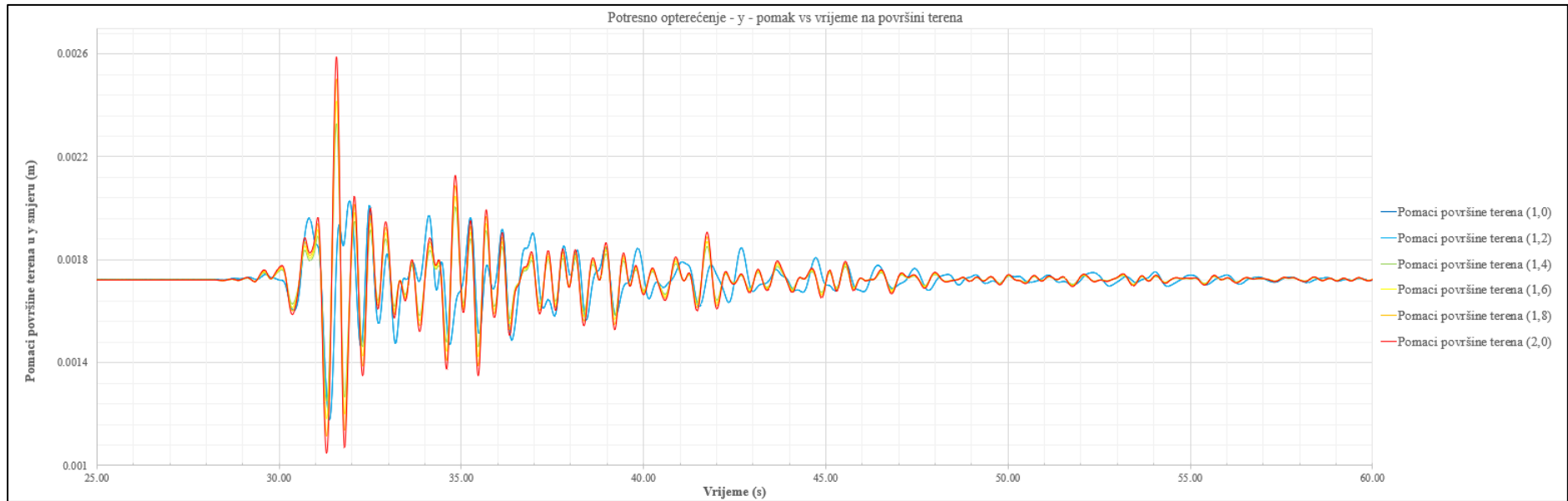


Slika 90. Odnos X - pomak vs vrijeme na tjemenu tunela

Najveći pomak u X smjeru na tjemenu tunela iznosi 10,9 cm i dogodio se nakon tridesete sekunde čija su ubrzanja u vremenu veća za 2 puta od ubrzanja iz referentnog potresa iz ožujka 2020. Nakon četrdesete sekunde pomaci se smanjuju do konačne vrijednosti od 0,05 cm.

6.3.2. Y – pomaci potresnog opterećenja

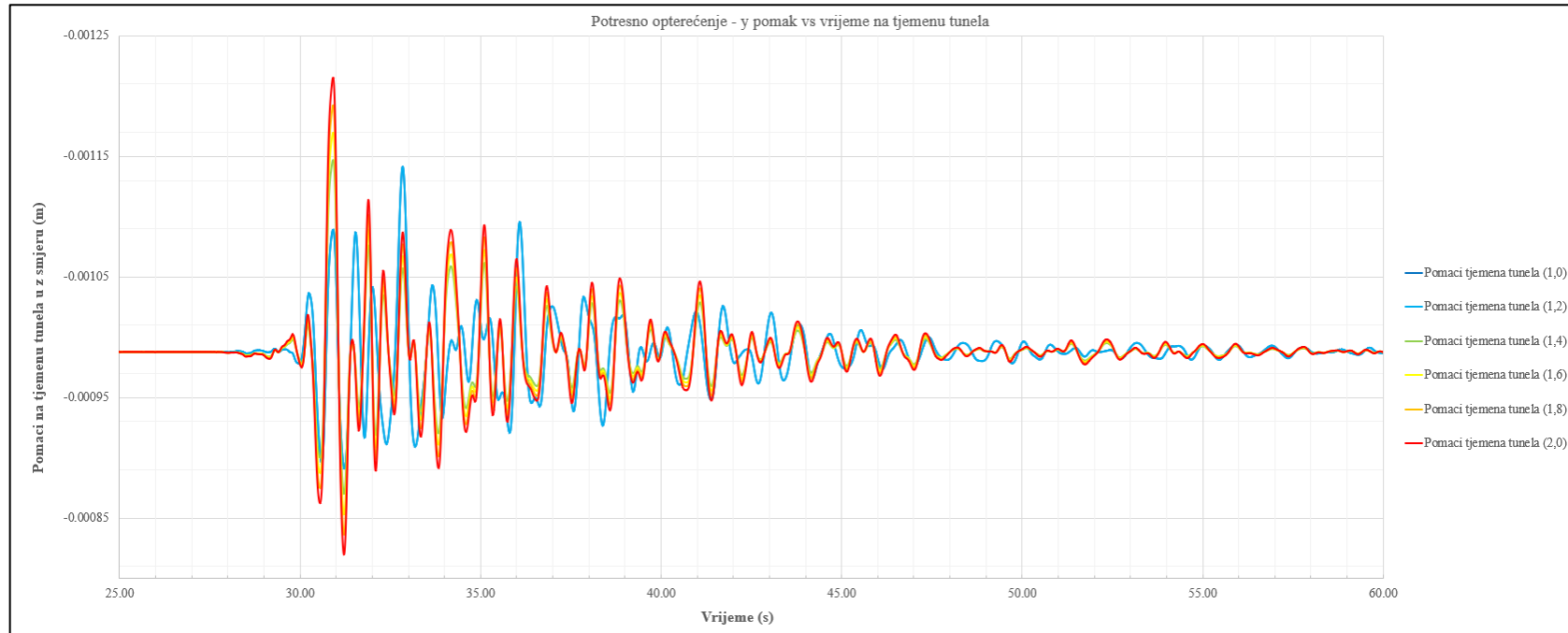
a) Pomak na površini terena



Slika 91. Odnos Y - pomak vs vrijeme na površini terena

U Y smjeru pomaci na površini terena su minimalni do tridesete sekunde, naglo rastu do vrijednosti od 0,26 cm, nakon četrdesete sekunde smanjuju se do konačnog pomaka u iznosu od 0,17 cm.

b) Pomak na tjemenu tunela

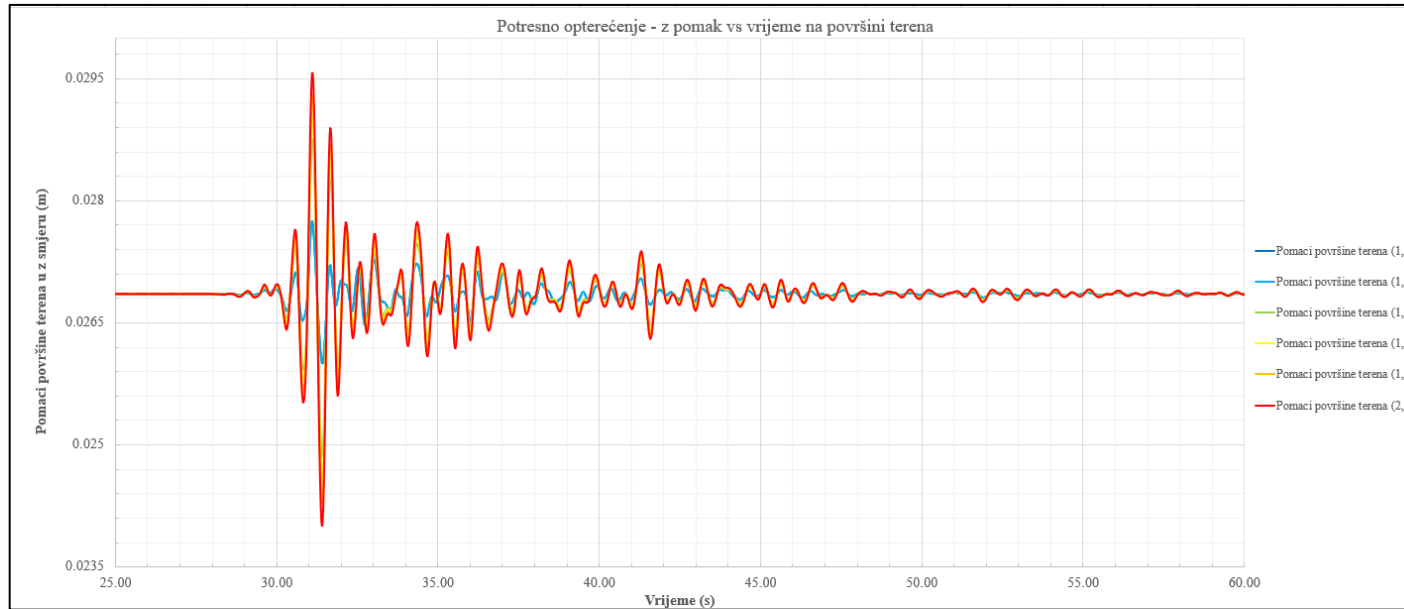


Slika 92. Odnos Y - pomak vs vrijeme na tjemenu tunela

U Y smjeru pomaci na tjemenu tunela su minimalni do tridesete sekunde, naglo rastu do vrijednosti od 0,089 cm, nakon četrdesete sekunde se smanjuju do konačnog iznosa od 0,0099 cm.

6.3.3. Z – pomaci potresnog opterećenja

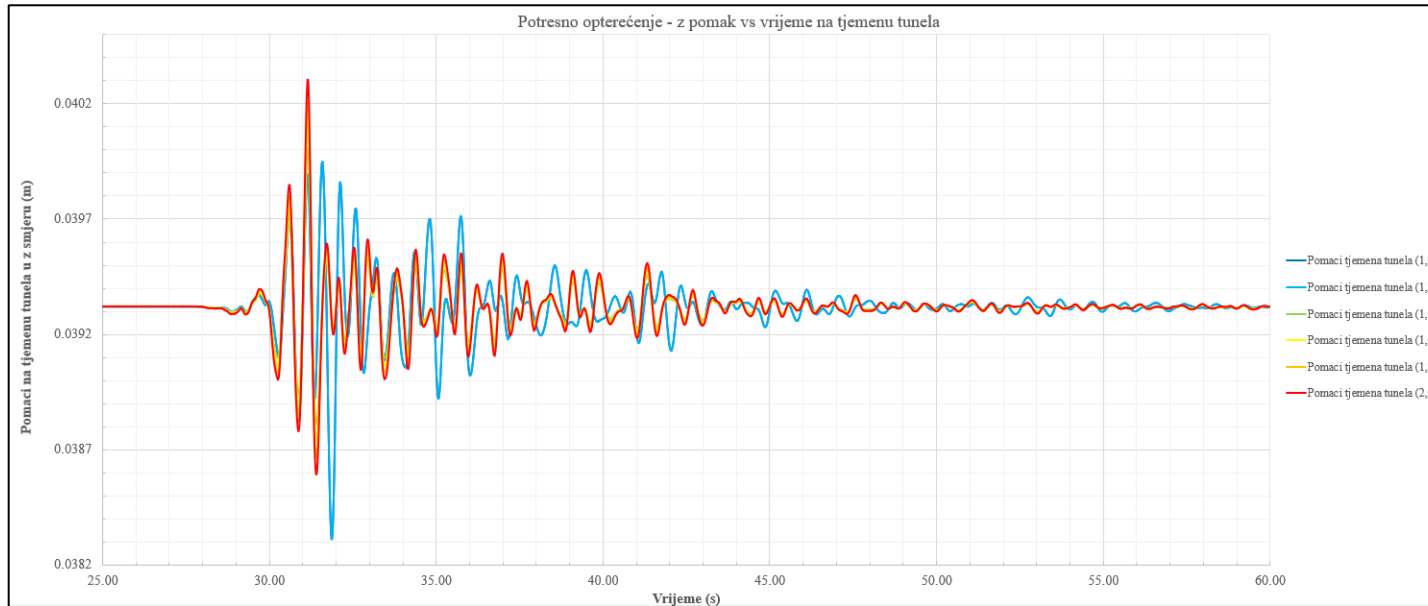
a) Pomak na površini terena



Slika 93. Odnos Z - pomak vs vrijeme na površini terena

U Z smjeru pomaci na površini terena su minimalni do tridesete sekunde, naglo rastu do vrijednosti od 2,96 cm, nakon četrdesete sekunde smanjuju se do konačne vrijednosti od 2,68 cm. Najveći pomaci uzrokovani su analizom za potres čija su ubrzanja u vremenu veća za dva puta od ubrzanja iz referentnog potresa iz ožujka 2020.

b) Pomak na tjemenu tunela



Slika 94. Odnos Z - pomak vs vrijeme na tjemenu tunela

U Z smjeru pomaci na tjemenu tunela su minimalni do tridesete sekunde, naglo rastu do vrijednosti od 4,03 cm, nakon četrdesete sekunde smanjuju se do konačne vrijednosti od 3,9 cm. Najveći pomaci uzrokovani su analizom za potres čija su ubrzanja u vremenu veća za dva puta od ubrzanja iz referentnog potresa iz ožujka 2020.

7. RASPRAVA I ZAKLJUČAK

Provedenim numeričkim analizama pretpostavljene su dimenzije tunelskih cijevi promjera od 10 m za jednu cijev, te 6 m za dvije cijevi na osnovom razmaku od 20 m. Prema dobivenim rezultatima jasno je vidljivo kako se kod izvedbe 2 tunelske cijevi aktiviraju manji pomaci tjemena tunela, ali i površine terena. Razlika u slijeganjima modela sa jednom i dvije cijevi premašuje iznose od 50% smanjenja pomaka što su značajne vrijednosti u vidu sigurnosti izvedbe tunelskih cijevi. Iako je numeričkim analizama dokazano kako izvedba dvije cijevi generira manje pomake pitanje je ekonomske isplativosti istog. Provedbom projekta metroa u Zagrebu sa dvije tunelske cijevi zahtjeva korištenje 2 seta TBM postrojenja, ili izvedba jednom TBM garniturom što značajno produljuje vrijeme izgradnje. Navedeni problemi izvedbe značajno poskupljuju i ovako već skup proces gradnje TBM-om. Kod tunelskog sustav od dvije cijevi osim generiranja manjih pomaka, čime se smanjuje utjecaj na postojeću infrastrukturu i objekte, uočava se pojava izdizanja površine terena prilikom izvedbe obje cijevi. U procesu odabira varijantnog rješenja, jedna/dvije tunelske cijevi, potrebno je pronaći kompromis između navedenih činjenica velike razlike u pomacima i ekonomske isplativosti tehnologije izvođenja.

Osim odabira varijantnog rješenja, jedne ili dvije tunelske cijevi, ovim radom obuhvaćene su varijacije parametara tla što je značajno za analizu slijeganja obzirom da parametri tla duž trase zasigurno nisu jednaki. Rezultati varijacije parametara kuta trenja, kohezija i modula elastičnosti nedvojbeno pokazuju kako je modul elastičnosti kritičan faktor u generiranju povećanja slijeganja. Tijekom varijacija kohezije i kuta trenja promjene pomaka zanemarive su, pojava izražena u sloju CL i GP/GC, ili su u očekivanim granicama što je slučaj u sloju CH. Drugačiji trendovi promjene slijeganja javljaju se u varijacijama modula elastičnosti gdje se

promjenom iznosa modula elastičnosti promjene u pomacima javljaju u sva tri sloja tla. Obzirom da se tunelske cijevi nalaze u sloju CH (3.sloj), varijacijom modula elastičnosti tog sloja dolazi do generiranja najveće promjene u pomacima, kako na tjemenu tunela tako i na površini terena. Modul elastičnosti utječe na slijeganja u toj mjeri da ukoliko gledamo vrijednosti slijeganja za najmanju vrijednosti modula (10010.9 kPa) i najveće korištene vrijednosti modula (49369.1 kPa) razlika pomaka iznosi čak 14 cm. Prilikom analiziranja utjecaja tla na pomake tijekom izgradnje tunela potrebno je obratiti pažnju i na konstitutivni model korišten prilikom numeričkih simulacija. Usporedbom konstitutivnih modela Mohr-Coulombo i Hardening Soil uočene su razlike u iznosima pomaka, iako trendovi promjene pomaka ostaju slični. Promatrane su razlike u konstitutivnim modelima u trećem soju (CH) za varijacije modula elastičnosti. Primijećeno je kako se prilikom korištenja Hardening Soil modela generiraju oko 10-20% manji pomaci nego Mohr-Coulombovim zakonom čvrstoće. Tijekom provedbe parametarskih analiza napravljena je analiza utjecaja promjene koeficijenta bočnog tlaka mirovanja K_0 , predviđena je varijacija K_0 za vrijednosti OCR 1,3,5. Rezultati ovih numeričkih analiza daju zanimljive rezultate gdje su vidljive promjene pomaka za iznose K_0 , jednak kut trenja sa različitim vrijednostima OCR-a, no pomaci ostaju približno jednaki za različite vrijednosti K_0 dobivenog variranjem kuta trenja a držanjem OCR jednakim.

U nastavku su dane sumarne tablice koje prikazuju minimalne i maksimalne pomake (slijeganja) na površini terena i tjemenu tunela za sve provedene statičke analize. Također u tablicama prikazani su X, Y i Z maksimalni pomaci za provedene dinamičke analize.

Tablica 19. Sumarna tablica statičke analize – pomaci površine terena

POMACI POVRŠINE TERENA	1 cijev			2 cijevi - lijeva cijev			2 cijevi - desna cijev		
	1. sloj	2.sloj	3.sloj	1. sloj	2.sloj	3.sloj	1. sloj	2.sloj	3.sloj
Modul elastičnosti E									
Minimalni pomak (cm)	2,097	2	1,39	0,6	0,5	0,5	0,7	0,6	0,5
Maksimalni pomak (cm)	2,3	2,5	5,5	0,7	0,9	1,1	0,8	0,9	1,3
Kut trenja φ									
Minimalni pomak (cm)	2,2	2,2	1,88	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7
Maksimalni pomak (cm)	2,2	2,2	2,42	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7
Kohezija c									
Minimalni pomak (cm)	2,2		1,9	0,7		0,6	0,6		0,7
Maksimalni pomak (cm)	2,2		2,7	0,7		0,9	0,6		0,9
Hardening soil - modul elastičnosti E									
Minimalni pomak (cm)	*		1,2	*		0,5	*		0,5
Maksimalni pomak (cm)			4,5			1,1			1,2
K0 - OCR 1									
Minimalni pomak (cm)	*		3,6	*		0,7	*		0,7
Maksimalni pomak (cm)			4,1			0,7			0,7
K0 - OCR 3									
Minimalni pomak (cm)	*		2,3	*		0,7	*		0,8
Maksimalni pomak (cm)			2,5			0,7			0,8
K0 - OCR 5									
Minimalni pomak (cm)	*		1,7	*		0,6	*		0,7
Maksimalni pomak (cm)			1,8			0,6			0,7

*nakon što je analizama uspostavljeno da najveći utjecaj na slijeganje ima sloj donje gline (CH) pristupljeno je varijaciji označenih parametara samo za navedeni sloj

Tablica 20. Sumarna tablica statičke analize – pomaci tjemena tunela

POMACI TJEMENA TUNELA	1 cijev			2 cijevi - lijeva cijev			2 cijevi - desna cijev		
	1. sloj	2.sloj	3.sloj	1. sloj	2.sloj	3.sloj	1. sloj	2.sloj	3.sloj
Modul elastičnosti E									
Minimalni pomak (cm)	7,4	7	5	2,9	1,7	1,8	3,4	2,7	3,1
Maksimalni pomak (cm)	7,7	8,4	19	3	3,5	3,2	3,7	6,2	5,5
Kut trenja φ									
Minimalni pomak (cm)	7,5	7,5	6,64	2,2	2,2	2,1	3,6	3,6	3,2
Maksimalni pomak (cm)	7,5	7,5	8,9	2,2	2,2	2,3	3,6	3,6	4,1
Kohezija c									
Minimalni pomak (cm)	7,5		6,8	3,6		2,1	2,2		2,7
Maksimalni pomak (cm)	7,5		14	3,6		2,8	2,2		11,2
Hardening soil - modul elastičnosti E									
Minimalni pomak (cm)	*		4,1	*		1,7	*		2,2
Maksimalni pomak (cm)			15,2			3,2			5,5
K0 - OCR 1									
Minimalni pomak (cm)	*		9,1	*		2,3	*		3,3
Maksimalni pomak (cm)			10			2,7			3,4
K0 - OCR 3									
Minimalni pomak (cm)	*		7,6	*		2,7	*		3,3
Maksimalni pomak (cm)			7,6			2,8			3,4
K0 - OCR 5									
Minimalni pomak (cm)	*		7,4	*		2	*		3,9
Maksimalni pomak (cm)			7,4			2			3,9

*nakon što je analizama uspostavljeno da najveći utjecaj na slijeganje ima sloj donje gline (CH) pristupljeno je varijaciji označenih parametara samo za navedeni sloj

Tablica 21. Sumarna tablica dinamičke analize

POMACI POVRŠINE TERENA	x pomak	y pomak	z pomak
<i>refzGB x 1.0</i>			
Maksimalni pomak (cm)	6,33	0,2	2,77
<i>refzGB x 1.2</i>			
Maksimalni pomak (cm)	6,33	0,2	2,77
<i>refzGB x 1.4</i>			
Maksimalni pomak (cm)	7,94	0,23	2,88
<i>refzGB x 1.6</i>			
Maksimalni pomak (cm)	8,68	0,24	2,9
<i>refzGB x 1.8</i>			
Maksimalni pomak (cm)	9,73	0,25	2,93
<i>refzGB x 2.0</i>			
Maksimalni pomak (cm)	11,2	0,26	2,96
POMACI TJEMENA TUNELA	x pomak	y pomak	z pomak
<i>refzGB x 1.0</i>			
Maksimalni pomak (cm)	6,33	0,089	3,99
<i>refzGB x 1.2</i>			
Maksimalni pomak (cm)	6,33	0,089	3,99
<i>refzGB x 1.4</i>			
Maksimalni pomak (cm)	7,75	0,087	4
<i>refzGB x 1.6</i>			
Maksimalni pomak (cm)	8,45	0,085	4,01
<i>refzGB x 1.8</i>			
Maksimalni pomak (cm)	9,47	0,084	4,02
<i>refzGB x 2.0</i>			
Maksimalni pomak (cm)	10,9	0,082	4,03

8. PREPORUKE ZA DALJNJA ISTRAŽIVANJA

Na temelju rezultata numeričkih analiza i donesenih zaključaka u nastavku su iznesene preporuke za daljnja istraživanja na temu budućeg metro sustava u Zagrebu. Parametri tla prepoznati su kao ključni faktor utjecaja na pomake na razini tjemena tunela i površine terena, čime se direktno utječe na postojeće građevine. Od ključne važnosti je istražiti raspone vrijednosti krutosti tla obzirom da se krutost pokazala kao parametar koji ima najveći utjecaj na pomake izazvane izvedbom TBM metodom. Preporuča se provedba detaljnih istražnih radova na svim dijelovima (predviđenih) trasa budućeg metroa sa ciljem definiranja potpunog profila tla kako bi se sa sigurnošću predvidjela moguća slijeganja prilikom izvedbe. Istražni radovi trebali bi obuhvaćati istražne bušotine, CPTU ispitivanja, laboratorijska ispitivanja i geofizičke metode.

Obzirom da se tunelske cijevi na predviđenim trasama nalaze većinom ispod postojećih objekata nužno je prikupiti geodetske i katastarske podatke o instalacijama, kanalizacijama i samim građevinama na površini terena. Stvaranjem svojevrstne baze podataka, uz navedene zaključke ovog rada, olakšao bi se proces odabira varijantnih rješenja broja, veličine i položaja tunelskih cijevi.

9. REFERENCE

- [1] ConsultAnz, *A Short History of Tunnel Boring Machines*. Dostupno:
<https://www.consultanz.com.au/short-history-on-tunnel-boring-machines/>
[Pristupljeno: 15. ožujka, 2022.]
- [2] Mike Dash, The Epic Struggle to Tunnel Under the Thames, *Smithsonian magazine*.
Dostupno: <https://www.smithsonianmag.com/history/the-epic-struggle-to-tunnel-under-the-thames-14638810/>
[Pristupljeno: 18. ožujka, 2022.]
- [3] Geotech, *Strojevi za bušenje tunela (TBM-ovi)*. Dostupno:
<https://www.geotech.hr/strojevi-za-busenje-tunela-tbm-ovi/>
[Pristupljeno: 18. ožujka, 2022.]
- [4] Bai Yun, *Underground Engineering*, str. 117- 204, Academic press, 2018.
- [5] Ahac S., Ahac M., Zagreb metro plans – current issues and future development, Lakušić S, *Road and Rail Infrastructure V*, 17-19 svibanj 2018. Zadar, "Tiskara Zelina" Zagreb, 2018.
- [6] Kolić D., Kolić V. Prihvatljivost podzemne željeznice u Zagrebu. *Građevinar*. 2001;9, 563-571.
- [7] Domingo I. *Russiable*. <https://russiable.com/using-moscow-metro/>
[Pristupljeno: 10. svibanj, 2021.]

- [8] Ivšić T. Lagana gradska željeznica. 2006.
- [9] Kolić D. Design Concept and Financing of the Light Rail Zagreb Project. HKIG. 7. rujan 2009.
- [10] Maraš – Dragojević S. Analiza slijeganja površine terena uslijed izgradnje tunela. *Građevinar*. 2012;7, 573 – 581.
- [11] Maraš – Dragojević S. Primjena metode konačnih elemenata za 2D i 3D analize slijeganja izazvanih izgradnjom tunela. *Građevinar*. 2020;8, 673 – 680.
- [12] Milaković D., Szavits – Nossan A. Slijeganja tla izazvana bušenjem tunela u krutim glinama. *Građevinar*. 2014;6, 503 – 512.
- [13] Karte potresnih područja Republike Hrvatske, <http://seizkarta.gfz.hr/hazmap/karta.php>
[Pristupljeno : 1.4.2022.]
- [14] Institut građevinarstva Hrvatske, Zavod za geotehniku, Geotehnički elaborat Importanne Galleria. Zagreb, lipanj 1994.
- [15] Institut građevinarstva Hrvatske, Zavod za geotehniku, Zaštita građevinske jame armiranobetonskom dijafragmom Importanne Galleria. Zagreb, ožujak 1996.
- [16] Stroud M.A., Butler F.G., The standard penetration test and the engineering properties of glacial materials, *The Engineering Behaviour of Glacial Materials*, str. 124-135. travanj 1975.
- [17] Bowles J.E., Foundation Analysis and Design, 4th edition. 1988.

- [18] Jay Amertunga, Nagaratnam Sivakugan, Braja M.Das, Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering, *Development sin Geotechnical Engineering*. Springer, 2019.
- [19] RocScience, <https://www.rocscience.com/>
- [Pristupljeno: 1. lipanj, 2022.]
- [20] Mayne W.P. K₀–OCR relationships in soil, 1982. Journal of the Geotechnical Engineering Division 108(6):851-872
- [21] Prirodoslovno – matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Geofizički odsjek, https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/o_zagrebackom_potresu_2020
- [Pristupljeno: 10. lipanj, 2022.]

POPIS TABLICA

Tablica 1. Vrijednosti kuta trenja po bušotinama – korelacija <i>Peck, Hanson, Thornburn</i>	45
Tablica 2. Prikaz ispisanih parametara CL i CH sloja iz dostupnih rezultata ispitivanja DB1.....	46
Tablica 3. Prikaz ispisanih parametara CL i CH sloja iz dostupnih rezultata ispitivanja SB-1,SB-2,SB-3 i SB-4.....	47
Tablica 4. Prikaz ispisanih parametara CL i CH sloja iz dostupnih rezultata ispitivanja UB-1 i UB-2.....	48
Tablica 5. Prikaz ispisanih parametara CL i CH sloja iz dostupnih rezultata ispitivanja UB-3 i UB-4.....	49
Tablica 6. Očitane vrijednosti f_2 za prosječne vrijednosti po bušotinama.....	50
Tablica 7. Relevantni parametri tla – 1.sloj CL.....	51
Tablica 8. Rezultati statističke obrade parametara za 1.sloj CL.....	52
Tablica 9. Relevantni parametri tla – 2.sloj GP/GC.....	53
Tablica 10. Rezultati statističke obrade parametara za 2.sloj GP/GC.....	54
Tablica 11. Relevantni parametri tla – 3.sloj CH-1.dio.....	55
Tablica 12. Relevantni parametri tla – 3.sloj CH-2.dio.....	56
Tablica 13. Rezultati statističke obrade parametara za 3.sloj CH.....	57
Tablica 14. Prikaz konačnih vrijednosti za varijacije standardnim devijacijama.....	58
Tablica 15. Prikaz dubina slojeva prema dostupnim podlogama.....	59
Tablica 16. Vrijednosti K_0 za odgovarajući kut trenja – 3.sloj.....	60
Tablica 17. Rekapitulacija provedenih statičkih analiza po slojevima za jednu i dvije cijevi.....	67
Tablica 18. Rekapitulacija provedenih dinamičkih analiza za jednu cijev.....	120

Tablica 19. Sumarna tablica statičke analize – pomaci površine terena.....	131
Tablica 20. Sumarna tablica statičke analize – pomaci tjemena tunela.....	132
Tablica 21. Sumarna tablica dinamičke analize.....	133

POPIS SLIKA

Slika 1. Sir Marc Isambard Brunel-ova metoda iskopa tunela ispod Temze.....	3
Slika 2. Presjek jednog stroja za iskop tunela „krtice“.....	4
Slika 3. Beam type – karakterističan stroj za iskop u stijinama.....	5
Slika 4. Princip rada EPBM – balans pritisaka.....	6
Slika 5. Postojeća prometna infrastruktura i naseljenost populacije u Zagrebu.....	8
Slika 6. Kružna linija u Moskvi, jedan od ljepših primjera metroa u arhitektonskom smislu.....	10
Slika 7. Rješenje trase zagrebačkog metroa iz 2001. godine.....	12
Slika 8. Pet varijanti novog gradskog prijevoza iz 2018. godine.....	14
Slika 9. Prognozni geotehnički profil uz južni rub Vukovarske ulice (zapad - istok), 1974.....	15
Slika 10. Prognozni geotehnički profil (sjever - jug) kroz središte grada, 1974.....	16
Slika 11. Uzdužni presjek rampe za silaženje u podzemlje.....	17
Slika 12. Poprečni presjek rampe za silaženje u podzemlje.....	17
Slika 13. Tunel za podzemno vođenje trase.....	18
Slika 14. Presjeci kroz stanicu - Trg bana Josipa Jelačića.....	19
Slika 15. Pješački tunel.....	19
Slika 16. Podzemna stanica.....	20
Slika 17. Uzdužni presjek rampe + vijadukt.....	20
Slika 18. Poprečni presjeci rampe + vijadukt.....	21

Slika 19. Vremenski plan izgradnje (istok-zapad).....	23
Slika 20. Vremenski plan izgradnje (sjever - jug).....	24
Slika 21. Gaussova krivulja slijeganja površine terena uslijed izgradnje tunela.....	26
Slika 22. Profil slijeganja površine terena tunela Dedinje, Gaussova krivulja i podaci mjerenja.....	27
Slika 23. Simulacija krivulja $\epsilon_1 - q$ u troosnim nedreniranim pokusima u HS materijalu za a) londonsku glinu; b) zagrebačku glinu.....	29
Slika 24. Metodologija istraživačkog rada.....	32
Slika 25. Uslojenost tla - odabrani profil.....	33
Slika 26. Prognozni geološki profil s osnovnim geološkim zonama.....	34
Slika 27. Stroud korelacija.....	38
Slika 28. Profil tla za numerički model.....	57
Slika 29. Prikaz odabranog profila tla u numeričkim analizama.....	58
Slika 30. Presjek tla s jednom tunelskom cijevi.....	60
Slika 31. Presjek tla s dvije tunelske cijevi.....	60
Slika 32. Normalna raspodjela modul elastičnosti - sloj CL.....	64
Slika 33. Normalna raspodjela kut trenja - sloj CL.....	64
Slika 34. Normalna raspodjela modul elastičnosti - sloj GP/GC.....	65
Slika 35. Normalna raspodjela kut trenja - sloj GP/GC.....	65
Slika 36. Normalna raspodjela modul elastičnosti - sloj CH.....	66
Slika 37. Normalna raspodjela kohezija - sloj CH.....	66

Slika 38. Normalna raspodjela kut trenja - sloj CH.....	66
Slika 39. Ulazni model - jedna tunelska cijev.....	67
Slika 40. Ulazni model - dvije tunelske cijevi.....	68
Slika 41. Varijacija modula elastičnosti prvog sloja - jedna cijev.....	69
Slika 42. Varijacija modula elastičnosti drugog sloja - jedna cijev.....	70
Slika 43. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja - jedna cijev.....	71
Slika 44. Varijacija kohezije prvog sloja - jedna cijev.....	72
Slika 45. Varijacija kohezije trećeg sloja - jedna cijev.....	73
Slika 46. Varijacija kuta trenja prvog sloja - jedna cijev.....	74
Slika 47. Varijacija kuta trenja drugog sloja - jedna cijev.....	75
Slika 48. Varijacija kuta trenja trećeg sloja - jedna cijev.....	76
Slika 49. Varijacija K0 (OCR=1) trećeg sloja - jedna cijev.....	77
Slika 50. Varijacija K0 (OCR=3) trećeg sloja - jedna cijev.....	78
Slika 51. Varijacija K0 (OCR=5) trećeg sloja - jedna cijev.....	79
Slika 52. Sumarni prikaz varijacije K0 - jedna cijev.....	80
Slika 53. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja, Hardening soil - jedna cijev.....	81
Slika 54. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja, usporedba M-C i HS materijala - jedna cijev.....	82
Slika 55. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela kroz faze - jedna cijev.....	83
Slika 56. Varijacija kohezije trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela kroz faze - jedna cijev.....	84

Slika 57. Varijacija kuta trenja trećeg sloja, slijeganje površine terena na sredini modela - jedna cijev.....	85
Slika 58. Varijacija modula elastičnosti prvog sloja - lijeva cijev.....	86
Slika 59. Varijacija modula elastičnosti drugog sloja - lijeva cijev.....	87
Slika 60. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja - lijeva cijev.....	88
Slika 61. Varijacija modula elastičnosti prvog sloja - desna cijev.....	89
Slika 62. Varijacija modula elastičnosti drugog sloja - desna cijev.....	90
Slika 63. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja – desna cijev.....	91
Slika 64. Varijacija kohezije prvog sloja - lijeva cijev.....	92
Slika 65. Varijacija kohezije trećeg sloja - lijeva cijev.....	93
Slika 66. Varijacija kohezije prvog sloja - desna cijev.....	94
Slika 67. Varijacija kohezije trećeg sloja - desna cijev.....	95
Slika 68. Varijacija kuta trenja prvog sloja - lijeva cijev.....	96
Slika 69. Varijacija kuta trenja drugog sloja - lijeva cijev.....	97
Slika 70. Varijacija kuta trenja trećeg sloja - lijeva cijev.....	98
Slika 71. Varijacija kuta trenja prvog sloja - desna cijev.....	99
Slika 72. Varijacija kuta trenja drugog sloja - desna cijev.....	100
Slika 73. Varijacija kuta trenja trećeg sloja - desna cijev.....	101
Slika 74. Varijacija K0 (OCR=1) - dvije cijevi.....	102
Slika 75. Varijacija K0 (OCR=3) - dvije cijevi.....	103

Slika 76. Varijacija K0 (OCR=5) - dvije cijevi.....	104
Slika 77. Sumarni prikaz varijacije K0 – dvije cijevi.....	105
Slika 78. Varijacija modula elastičnosti, usporedba M-C i HS materijala, lijeva cijev.....	106
Slika 79. Varijacija modula elastičnosti, usporedba M-C i HS materijala – desna cijev.....	107
Slika 80. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja, Hardening soil – dvije cijevi.....	108
Slika 81. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela po fazama - lijeva cijev.....	109
Slika 82. Varijacija modula elastičnosti trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela po fazama - desna cijev.....	110
Slika 83. Varijacija kohezije trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela po fazama - lijeva cijev.....	111
Slika 84. Varijacija kohezije trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela po fazama- desna cijev.....	112
Slika 85. Varijacija kuta trenja trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela po fazama - lijeva cijev.....	113
Slika 86. Varijacija kuta trenja trećeg sloja, slijeganje točke na sredini modela po fazama - desna cijev.....	114
Slika 87. Opterećenje potresom na dnu modela i rubni uvjeti.....	116
Slika 88. Zagrebački potres (22.3.2020) – zapis seizmografa.....	117
Slika 89. Odnos X – pomak vs vrijeme na površini terena.....	118
Slika 90. Odnos X - pomak vs vrijeme na tjemenu tunela.....	119
Slika 91. Odnos Y - pomak vs vrijeme na površini terena.....	120
Slika 92. Odnos Y - pomak vs vrijeme na tjemenu tunela.....	121
Slika 93. Odnos Z - pomak vs vrijeme na površini terena.....	122

Slika 94. Odnos Z - pomak vs vrijeme na tjemenu tunela.....123

SAŽETAK

Autori: Vana Prašo, Karlo Jednačak

Naslov: Ocjena osjetljivosti tunela budućeg zagrebačkog metroa u statičkim i dinamičkim uvjetima

Po uzoru na druge europske gradove, problem preopterećenosti zagrebačke prometne infrastrukture moguće je riješiti izgradnjom metro sustava. Radovi na ovu temu do sada provedeni su na razini prostorno-prometnih planiranja budućeg metroa u Zagrebu, dok ne postoje detaljna istraživanja tehničkih aspekata izvedbe metroa u Zagrebu, te njegovog utjecaja na infrastrukturu i objekte koji se nalaze na površini. Obzirom da je izgradnja metro sustava kompleksan zahvat koji obuhvaća velike izazove s financijske i tehničke strane potrebno je posvetiti više pažnje tom području. Motivirani navedenom situacijom i identificiranom problematikom metro sustava u Zagrebu, ovaj rad napravljen je s ciljem evaluacije osjetljivosti rezultata numeričkih analiza na varijaciju parametara temeljnog tla i seizmičkih opterećenja. Osim varijacija parametara temeljnog tla i seizmičkih opterećenja promatrana su varijantna rješenja jedne i dvije tunelske cijevi. Prilikom provedbe numeričkih analiza predviđena je metoda izvedbe tunelskih cijevi TBM tehnologijom (tzv. krtica). Rezultatima svih provedenih numeričkih simulacija ponašanja tla tijekom izvedbe tunela, donesen je zaključak kako najveći utjecaj na generiranje pomaka ima sloj gline visoke plastičnosti u kojem se izvodi metro sustav, pri čemu je najizraženiji utjecaj krutosti tla. Izvedbom dvije tunelske cijevi javljaju se manji pomaci površine terena i tjemena tunela nego izvedbom jedne cijevi, no postavlja se pitanje financijske isplativosti takvog rješenja. Osim toga, radi naglašene seizmičke aktivnosti Zagreba, u radu je istražen i utjecaj potresa iz ožujka 2020. na ponašanje tunela metroa, kao i utjecaj potresa s većim ubrzanjima tla u odnosu na navedeni referentni potres. Provedbom dinamičkih analiza uočeno je kako se najveći pomaci javljaju u smjeru okomitom na tunelske cijevi. Ovaj rad može poslužiti kao kvalitetna podloga za daljnja istraživanja na temu budućeg metro sustava u Zagrebu, obzirom da obuhvaća prikaz numeričkih analiza geotehničke problematike, ali i potpunu statističku obradu i raspodjelu podataka parametara tla.

KLJUČNE RIJEČI: zagrebački metro, TBM, slijeganje, varijabilnost parametara tla, zagrebački potres

ABSTRACT

Authors: Vana Prašo, Karlo Jednačak

Title: Assessment of the future Zagreb metro tunnel sensitivity in static and dynamic conditions

Following the example of other European cities, the problem of congestion of Zagreb's transport infrastructure can be solved by constructing a metro system. Work on this topic has so far been carried out at the level of spatial and traffic planning of the future metro in Zagreb, while there is no detailed research of technical aspects of the tunnel structure, and its impact on infrastructure and facilities located on the surface. Given that the construction of the metro system is a complex project that involves major challenges from the financial and technical side, it is necessary to pay more attention to this area. Motivated by the above situation and the identify problems of the metro system in Zagreb, this study is conducted with the aim of evaluating the sensitivity of the results of numerical analyzes to the variation of foundation soil parameters and seismic loads. In addition to variations in foundation soil parameters and seismic loads, variant solutions of one and two tunnel pipes were observed. During the implementation of numerical analyzes, the method of tunnel pipe construction using TBM technology (so-called mole) is envisaged. The results of all performed numerical simulations of soil behavior during the construction of the tunnel, concluded that the largest influence on the generation of displacement has a layer of high plastic clay in which the metro system is performed, with the most pronounced impact its stiffness. Simulation of technical solution involving two TBM pipes yielded smaller displacements when compared to the technical solution of one larger TBM pipe, but the question of the financial viability of such a solution arises. In addition, due to the pronounced seismic activity of Zagreb, the study analysis the impact of the March 2020 earthquake on the behavior of the subway tunnel, as well as the impact of earthquakes with higher ground accelerations compared to the reference earthquake. By performing dynamic analyzes, it was noticed that the largest displacements occur in the direction perpendicular to the tunnel pipes. This study presents good basis for further research on the topic of the future metro system in Zagreb, as it gives comprehensive overview of the statistical distribution of relevant soil parameters and their influence on the behaviour of the metro tunnel structure in both static and dynamic conditions.

KEY WORDS: Zagreb metro, TBM, settlement, variability of soil parameters, Zagreb earthquake