

Primljen / Received: 27.2.2014.

Ispravljen / Corrected: 23.6.2014.

Prihvaćen / Accepted: 27.6.2014.

Dostupno online / Available online: 10.7.2014.

# Slijeganja tla izazvana bušenjem tunela u krutim glinama

## Autori:



Dr.sc. **Davor Milaković**, dipl.ing.građ.  
 Institut IGH  
 Zavod za geotehniku  
[davor.milakovic@igh.hr](mailto:davor.milakovic@igh.hr)



Prof.dr.sc. **Antun Szavits-Nossan**, dipl.ing.građ.  
 Sveučilište u Zagrebu  
 Građevinski fakultet  
 Zavod za geotehniku  
[szavits@grad.hr](mailto:szavits@grad.hr)

Izvorni znanstveni rad

**Davor Milaković, Antun Szavits-Nossan**

## Slijeganja tla izazvana bušenjem tunela u krutim glinama

Izvođenje tunela u vodom zasićenom tlu izaziva u tlu promjene naprezanja i deformacija koje prije svega ovise o mehaničkim karakteristikama tla u zoni izgradnje tunela. U ovom radu su prognozirane kratkotrajne i dugotrajne deformacije tla te naročito slijeganja na površini terena nakon izvedbe tunela. Navedene prognoze su dobivene pomoću široko primjenjivanog numeričkog modela tla koji vjerno opisuje rezultate troosnih ispitivanja, uz primjenu postojećih postupaka određivanja parametara tla, ali uzimajući u obzir njegovu prirodnu heterogenost uočljivu kroz heterogenost prirodne vlažnosti gline.

### Ključne riječi:

tunel, slijeganja, 3D model, heterogenost, krute gline

Original scientific paper

**Davor Milaković, Antun Szavits-Nossan**

## Ground settlement induced by tunnel boring in stiff clay

Tunnel construction in water saturated soil causes changes in stress and strain of soil, which is primarily dependant on mechanical properties of soil in the tunnel construction zone. The paper presents a prediction of short-term and long-term deformations of soil, with a particular emphasis on ground surface settlements after the tunnel construction. The aforementioned predictions were made using a widely applicable numerical soil model that accurately describes the results of triaxial tests, in combination with the existing procedures for determination of soil parameters, taking at that into account natural heterogeneity of the soil as observed through heterogeneity of natural moisture of clay.

### Key words:

tunnel, settlements, 3D model, heterogeneity, stiff clay

Wissenschaftlicher Originalbeitrag

**Davor Milaković, Antun Szavits-Nossan**

## Durch Tunnelbohrungen verursachte Bodensetzungen steifer Tonböden

Die Tunnelkonstruktion in wassergesättigtem Boden verursacht Veränderungen des Spannungs- und Dehnungszustandes, der hauptsächlich von den mechanischen Bodeneigenschaften in der Konstruktionszone abhängt. In dieser Arbeit werden Kurzzeit- und Langzeitverformungen des Bodens, insbesondere Setzungen der Erdoberfläche, nach der Tunnelkonstruktion bestimmt. Die Vorhersage der Verformungen beruht auf weit angewandten numerischen Bodenmodellen, die zusammen mit bestehenden Verfahren für die Bestimmung von Bodenparametern Resultate triaxialer Versuche mit Genauigkeit beschreiben, und die aufgrund der uneinheitlichen Feuchtigkeit erkennbare natürliche Bodenheterogenität berücksichtigen.

### Schlüsselwörter:

Tunnel, Setzung, 3D Modell, Heterogenität, steife Tonböden

## 1. Uvod

U Zagrebu se već duže razmišlja o izgradnji podzemne željeznice i o načinima njene izgradnje. Područje središnjeg dijela Zagreba karakterizira uslojeno vodom zasićeno tlo u kojem se pri površini nalaze šljunci do dubine od kojih desetak metara, pokriveni tanjim slojem gline i nasipa, a ispod kojih se pružaju jako prekonsolidirane krute gline do većih dubina. Upravo te krute gline pogodne su za izgradnju tunelskih cijevi podzemne željeznice. Kako se u središnjem dijelu Zagreba nalaze zgrade građene u razdoblju između dva svjetska rata pa i starije, koje su po svojoj konstrukciji osjetljive na veličinu ukupnih i diferencijalnih slijeganja, nužno je istražiti kako bušenje tunela u krutim glinama utječe na trenutačna i konsolidacijska slijeganja površine terena.

Može se navesti mnogo razloga zašto je prognoza slijeganja na površini terena izazvanih geotehničkim zahvatima, pa i onim najjednostavnijim, ograničene točnosti. Općenito se smatra da ti razlozi uključuju prirodu tla (heterogenost izazvanu složenim geološkim procesima), ograničenja u opsegu, vrstama i kvaliteti ispitivanja njegovih mehaničkih svojstava, ograničenja u raspoloživim modelima ponašanja, kao i mnoge detalje u tehnologiji izvođenja zahvata koje današnjim sredstvima nije moguće precizno obuhvatiti analitičkim postupcima [1-3].

Za standardne geotehničke zahvate (slijeganje temelja, nosivost pilota i sl.) današnja struka u postupcima prognoze često, zbog prethodno iznesenog problema, nastoji primjenjivati korelacije između odgovarajućih rezultata ispitivanja tla i mjerenih veličina pomaka na izvedenim građevinama, a koje su dobivene povratnim analizama. Takve korelacije omogućuju dati pouzdaniju prognozu pomaka tla od onih baziranih na laboratorijskom ispitivanju uzoraka tla i primjeni mehaničkih teorija za tu prognozu. Međutim, primjena takvih korelacija moguća je jedino za standardne građevine kad ih je ispitano više i na različitim vrstama tla da bi se korelacije uopće mogle uspostaviti.

Veličina i vremenski tok slijeganja tla izazvan dubinskim zahvatom bušenja tunela složeni je problem mehanike tla. Malo je takvih zahvata izvedeno, a još manje je takvih gdje postoje dovoljna ispitivanja tla i mjerenja pomaka da bi se mogle uspostaviti korelacije između pomaka i ispitivanja tla. Zato struci jedino preostaje da se osloni na laboratorijska ispitivanja mehaničkih svojstava reprezentativnih uzoraka tla, na primjerena terenska ispitivanja tla te na korištenje mehaničkih modela ponašanja geotehničkih zahvata (metoda konačnih elemenata i sl.). Zbog vrlo malog iskustva oko primjene takvog postupka u vezi s problemom utjecaja bušenja tunela na pomake koji su na površini tla, njegova provjera na slučajevima u kojima postoji relativno dobro ispitano tlo i mjereni podaci o pomacima i pornim tlakovima stručno je zanimljiva i korisna. Jedan od rijetkih takvih objavljenih slučajeva, a svakako po opsegu i kvaliteti najzanimljiviji, jest izgradnja tunela na liniji podzemne željeznice JLE u Londonu.

To može za našu stručnu javnost biti posebno zanimljivo jer se radi o tlu koje se pretežno sastoji od jako prekonsolidirane krute gline, u mnogočemu slične glini koju nalazimo na dubinama većim od oko desetak metara u gradu Zagrebu. Mehanička svojstva londonske gline, kroz koju prolaze ti tuneli, vrlo su dobro i svestrano ispitana. Tuneli su građeni posebnim tunelskim strojevima uz rotacijsko mehaničko bušenje čela s primjenom štita uz izgradnju montažne betonske obloge neposredno iza bušačkog stroja. Na lokaciji St. James's Park u Londonu izveden je program vrlo opsežnih mjerenja slijeganja na površini i deformacija tla po dubini kao i mjerenja razvoja tlakova podzemne vode izazvanih bušenjem, sve u pravilnim vremenskim razmacima tijekom izvedbe tunela.

Do sada najdetaljniju analizu navedenih podataka proveo je Wongsaraj sa suradnicima [4, 5]. U tim su analizama primijenjena opsežna troosna i edometarska laboratorijska ispitivanja gline iz kvalitetnih neporemećenih uzoraka dobivenih istražnim radovima na raznim lokacijama u Londonu, kao i razna terenska ispitivanja tla (geološka i geofizička ispitivanja, ispitivanja vodopropusnosti in situ i druga). Autori su naročitu pažnju posvetili utjecaju početnog stanja naprezanja kao i utjecaju anizotropije krutosti tla. Pokazali su da anizotropija krutosti, pri čemu je horizontalna krutost londonske gline do 50 % veća od vertikalne, ima značajan utjecaj na veličinu slijeganja tla. U svojim analizama su koristili i svojim potrebama prilagodili složeni nelinearni elastoplastični konstitucijski model tla Hashigucia i Uena [6] koji uzima u obzir utjecaj početnog stanja naprezanja, utjecaj anizotropije, utjecaj smjera promjene naprezanja kao i utjecaj stupnja mobilizacije čvrstoće tla. Značajno je da su utvrdili presudan utjecaj dreniranja koji ugradnja obloge tunela ima na veličinu i razvoj deformacija u tlu i na površini tijekom vremena. Sve u svemu, Wongsaraj i suradnici svojim su analizama pokazali da se detaljnim istražnim radovima mogu utvrditi bitna mehanička svojstva krutih glina koja, kad se ugrade u odgovarajuće složeni model ponašanja tla uz odgovarajuće rubne uvjete dreniranja u oblozi tunela i rubne uvjete izazvane sukcesivnim bušenjem tunela, daju inženjerski prihvatljive prognoze trenutačnih i konsolidacijskih slijeganja na površini tla.

Međutim, Wongsaraj i suradnici u svojim istraživanjima zanemaruju dostupne podatke koji pokazuju da se unutar sloja londonske gline mogu razlučiti podslojevi međusobno različitih mehaničkih svojstava, prije svega njene prirodne vlažnosti [7-9]. Različitost mehaničkih svojstava duž visine debelog sloja gline ne iznenađuje ako se uzme u obzir starost i složena geološka prošlost nastanka te gline, tj. vrijeme u kojem nije ni moguće očekivati nastanak jednog idealnog homogenog sloja tla. Zato se takve heterogenosti mogu očekivati u debljim slojevima gline kod kojih je, zbog samog trajanja njihova nastanka, geološka prošlost složena. Kako je općepoznato da na krutost gline istog mineraloškog sastava značajnu ulogu ima njena vlažnost, uz trenutačno stanje naprezanja, opravdano je pretpostaviti

da će promjena vlažnosti, uz sve ostale jednake parametre, utjecati na njenu krutost. Upravo brojna objavljena troosna ispitivanja na neporemećenim uzorcima iz različitih dubina slojeva londonske gline omogućuju da se hipoteza o utjecaju vlažnosti na krutost londonske gline ispita, te ako se utvrdi da ona postoji, da se ispita utjecaj heterogenosti londonske gline na slijeganje tla od bušenja tunela.

Određeni nedostatak složenih analiza Wongsaroja i suradnika jest korišteni matematički model ponašanja gline. Model nije korišten izvan uskog kruga istraživača, a parametri mu nemaju jasno fizikalno značenje te traže relativno nepoznate postupke za njihovo određivanje. Za primjenu takvog modela u geotehničkoj praksi to nije zanemariv problem jer izbor parametara modela, kao jedan od ključnih koraka u numeričkim simulacijama, ostavlja nerazumljivim i u subjektivnoj domeni.

Zato se postavljaju dva opravdana pitanja: prvo, kakav utjecaj ima očito nehomogena raspodjela mehaničkih svojstava londonske gline po dubini, i drugo, je li nužno primijenjivati malo poznati složeni model ponašanja tla kao i vrlo nestandardne i teško dostupne pokuse za određivanje anizotropije tla da bi se dobila za praksu prihvatljiva prognoza slijeganja tla za složeni slučaj izgradnje tunelskih cijevi u podzemlju.

Na ta pitanja pokušava odgovoriti ovaj rad. U njemu će se numerički simulirati slučaj tunela u Londonu i slučaj iskopa građevne jame u Zagrebu, ali uzimajući u obzir standardno dostupne pokuse za utvrđivanje prostorne heterogenosti mehaničkih svojstava tla kao i uz korištenje komercijalno dostupnog i dosta široko primjenjivanog analitičkog alata (metoda konačnih elemenata i izotropni nelinearni elastoplastični model ponašanja tla, čiji parametri imaju jasno fizikalno značenje).

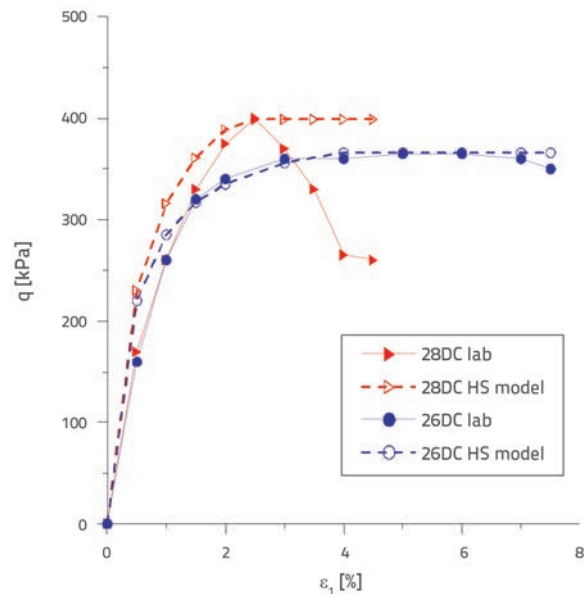
## 2. Odabrani model tla

U ovom je radu za analizu slučaja izgradnje tunela u Londonu i iskopa građevne jame u Zagrebu izabran izotropni dvostruko očvršćujući elastoplastični "Hardening soil" model (HS model) koji može opisati složeni odnos naprezanja i deformacija u tlu [10-12], a koji je u relativno širokoj primjeni kako u svijetu tako i kod nas. Taj konstitucijski model tla za određivanje materijalnih parametara koristi rezultate uobičajenih laboratorijskih i terenskih ispitivanja.

Provjera primjenjivosti toga modela na krute gline, koje su predmet analiza u ovom radu, provedena je usporedbom rezultata simulacije troosnih i edometarskih pokusa na modelu u odnosu na rezultate istih pokusa u laboratoriju, za razne lokacije u Londonu i Zagrebu.

U prvom koraku je provedena simulacija troosnog konsolidiranog testa u dreniranim uvjetima (CD/CID/DC) i simulacija jednodimenzionalne konsolidacije u edometru (E/OED/O). Za navedene simulacije su korištena laboratorijska ispitivanja londonske gline na lokaciji novog

Terminala 5 londonskog aerodroma Heathrow [13]. Rezultati laboratorijskih ispitivanja uvršteni su u konstitutivne jednadžbe HS modela te su tako dobiveni računski parametri koji odgovaraju odabranim dubinama uzimanja uzoraka. Korištenjem programa SoilTest, koji numerički simulira laboratorijska ispitivanja, dobivene su standardne krivulje ponašanja tla koje su uspoređene s rezultatima izvornih ispitivanja u laboratoriju [14]. Usporedni rezultati troosnog dreniranog pokusa u laboratoriju i na modelu prikazani su na slici 1.

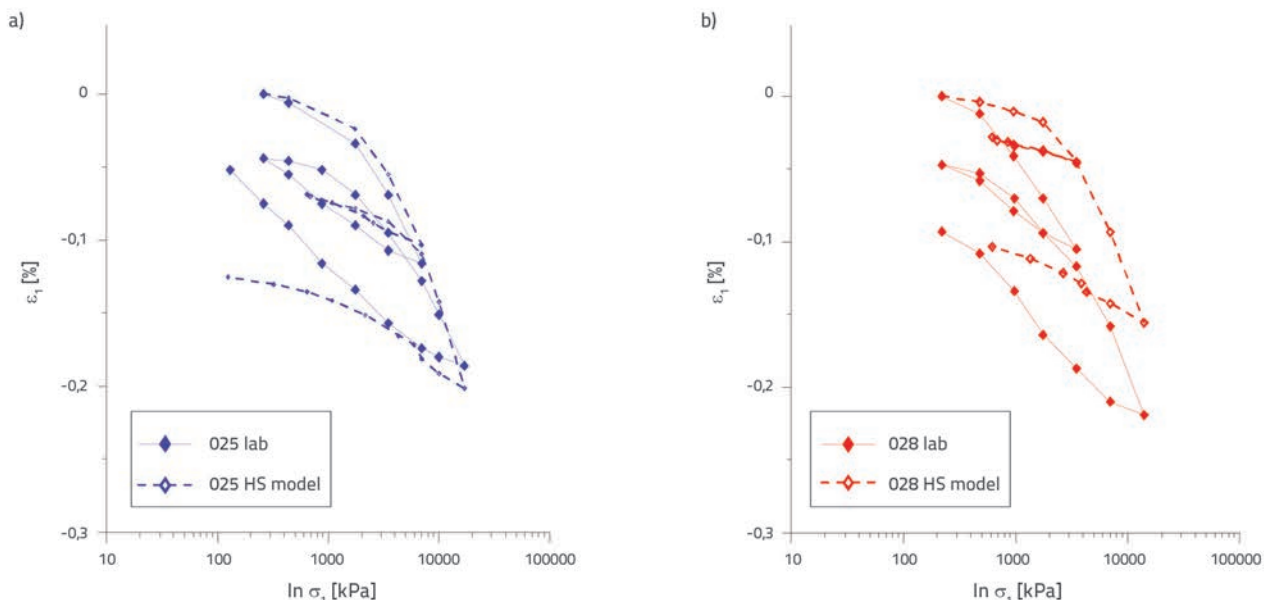


Slika 1. Simulacija troosnih dreniranih pokusa londonske gline u HS modelu, krivulja  $\varepsilon_1$ - $q$

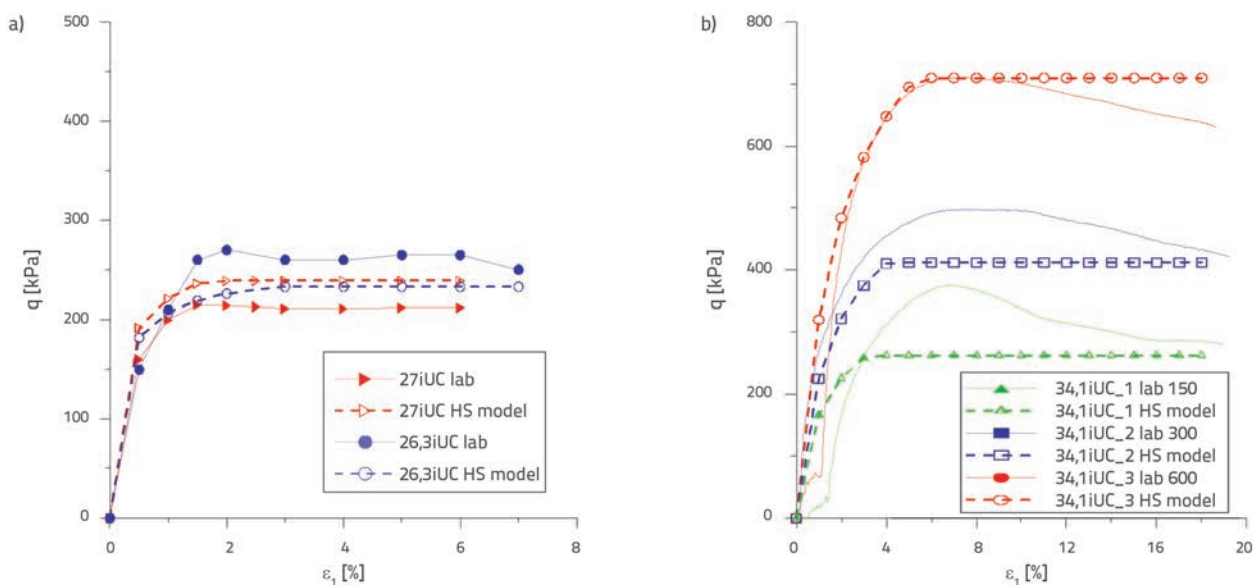
Rezultati numeričke simulacije pokazuju dobro slaganje krivulja  $\varepsilon_1$ - $q$  u odnosu na laboratorijska ispitivanja. Veličina devijatorskog naprezanja pri slomu  $q = \sigma_1' - \sigma_3'$  dominantno je pod utjecajem kuta unutarnjeg trenja  $\varphi'$  i kohezije  $c'$ . Oblik krivulje  $\varepsilon_1$ - $q$  laboratorijskog ispitivanja oznake 28DC, koja je inače karakteristična za londonsku prekonsolidiranu glinu, pokazuje tzv. omekšavajuće (*softening*) ponašanje nakon dostizanja vršne čvrstoće  $q_{max}$ . S obzirom na to da Hardening soil model ne prepoznaje omekšavanje tla, simulacija devijatorskog naprezanja nakon sloma ostaje na istom nivou, za razliku od krivulje laboratorijskog ispitivanja koja pada do vrijednosti rezidualne čvrstoće.

Usporedni rezultati edometarskog pokusa u laboratoriju i na modelu prikazani su na slici 2. Rezultati numeričke simulacije uglavnom dobro oponašaju krivulje primarnih slijeganja dobivenih u laboratoriju. Veća odstupanja uočavaju se pri rasterećenju kod većih vrijednosti naprezanja.

U drugom koraku je provedena potvrda (verifikacija) prethodno odabranih računskih parametara Hardening soil modela putem simulacije standardnog konsolidiranog troosnog pokusa u nedreniranim uvjetima (CU/CIU/UC). S obzirom na to da su uzorci uzeti iz istih podslojeva



Slika 2. Simulacija edometarskih pokusa londonske gline u HS modelu: a) O25; b) O28



Slika 3. Simulacija troosnih nedreniranih pokusa londonske i zagrebačke gline u HS modelu: a) krivulja  $\epsilon_1$ - $q$  za londonsku glinu; b) krivulja  $\epsilon_1$ - $q$  za zagrebačku glinu

londonske gline, odabrani su isti računski efektivni parametri Hardening soil modela kao i za troosni drenirani test.

Usporedni rezultati konsolidiranog troosnog nedreniranog pokusa u laboratoriju i na modelu pokazuju dobro slaganje za oba ispitna uzorka (slika 3.a).

Kako bi se upotpunila slika o ponašanju krutih gline u nedreniranim uvjetima, provedena je simulacija nedreniranih pokusa zagrebačke gline na lokaciji Ban Centra u Zagrebu. Usporedni rezultati ispitivanja u laboratoriju i na modelu prikazani su na slici 3.b.

Usporedne analize krivulja ( $\epsilon_1$ - $q$ ) uglavnom potvrđuju analize provedene na londonskoj glini. Krivulje  $\epsilon_1$ - $q$  svih laboratorijskih ispitivanja zagrebačke gline pokazuju određeno omekšavajuće (*softening*) ponašanje nakon dostizanja vršne čvrstoće  $q_{max}$  ali je ono bitno manje u odnosu na standardne krivulje ( $\epsilon_1$ - $q$ ) dobivene u londonskoj glini (pokus 28DC na slici 1.). Razlog navedenog trenda ponašanja vjerojatno leži u manjoj prekonsolidaciji zagrebačke gline.

Iz usporednih analiza krivulja možemo zaključiti kako HS model vjerno opisuje rezultate troosnih i edometarskih pokusa na krutim glinama.

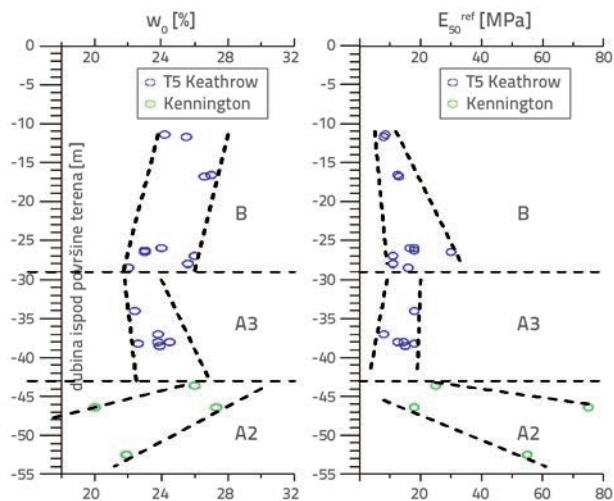
### 3. Heterogenost gline i parametri odabranog modela tla

Heterogenost debelih naslaga londonske gline očituje se, među ostalim, u heterogenoj razdiobi prirodne vlažnosti s obzirom na dubinu ispod površine terena. Iz analize te razdiobe kao i drugih dostupnih podataka, istraživači su izdvojili nekoliko podslojeva gline, svaki s približno linearnom razdiobom prirodne vlažnosti po dubini podsloja [7-9]. Milaković [14] je iz dostupnih troosnih pokusa na neporemećenim uzorcima gline izvađenim s lokacija T5 aerodroma Heathrow i lokacije Kennington u središtu Londona [13, 15] odredio parametre HS modela za svaki pokus posebno. Zatim je utvrdio linearnu korelaciju između tako dobivenih parametara i prirodne vlažnosti neporemećenih uzoraka tla unutar svakog od prethodno odabranih podslojeva. Iz parametara tih linearnih korelacija odredio je razdiobu parametara HS modela po dubini ispod površine terena za svaki od podslojeva na lokaciji

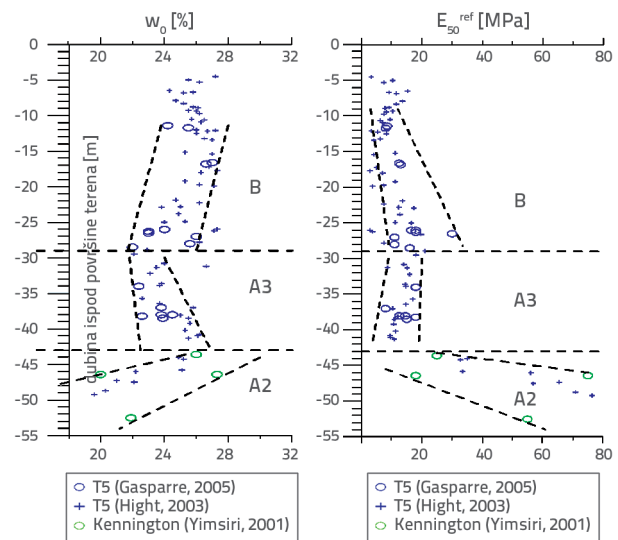
St James Park, lokaciju za koju će uspoređivati rezultate numeričkih simulacija izgradnje tunela podzemne željeznice na liniji JLE s terenskim mjerjenjima u vrijeme izgradnje tih tunela. Ovdje se prikazuje naznačeni postupak određivanja parametara HS modela samo za parametar  $E_{50}^{ref}$ . To je parametar krutosti koji povezuje sekantni Youngov modul tla  $E_{50}$  (kad devijatorsko naprezanje dosegne 50 % čvrstoće tla) i manje glavno efektivno naprezanje u tlu  $\sigma'_3$  prema izrazu:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} (\sigma'_3 / p_{ref})^m \quad (1)$$

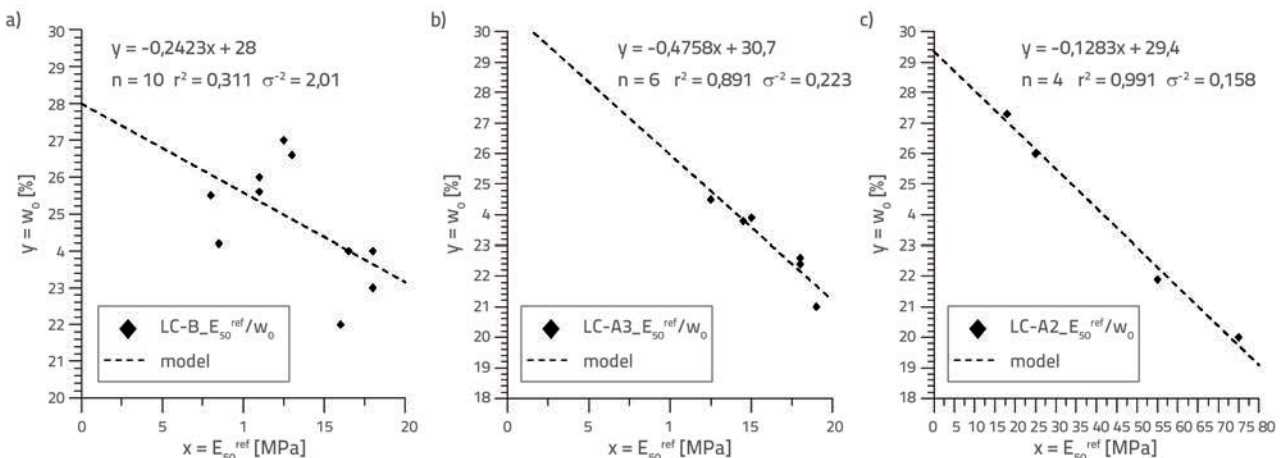
gdje je  $p_{ref} = 100$  kPa, a  $m$  parametar kojim se regulira ovisnost krutosti o stanju naprezanja. Rezultate naznačenog postupka prikazuju slike 4, 5, 6 i 7. Slika 4 prikazuje razdiobu prirodne vlažnosti  $w_0$  i parametra  $E_{50}^{ref}$  po dubini za provedene troosne pokuse u podslojevima A2, A3 i B na lokacijama T5 aerodroma Heathrow [13] i Kennington [15]. Slika 5 prikazuje lokalne



Slika 4. Raspodjela mjenjenih modula krutosti,  $E_{50}^{ref}$  po dubini i pripadne prirodne vlažnosti,  $w_0$  dobivenih iz uzoraka londonske gline na lokaciji T5 aerodroma Heathrow [13] i Kennington [15]



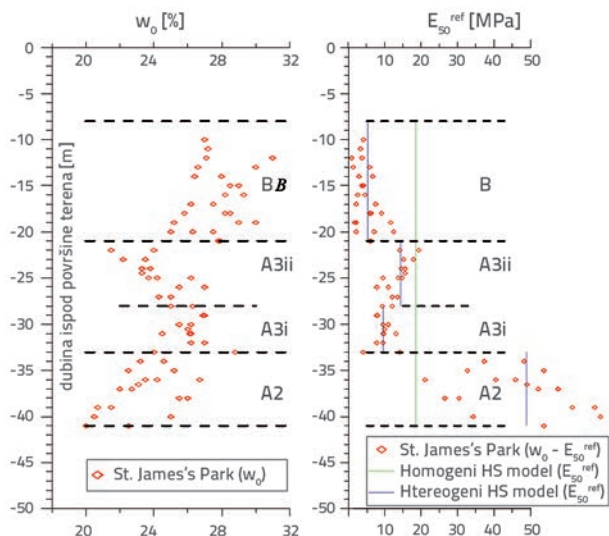
Slika 6. Usporedba mjenjenih veličina  $E_{50}^{ref}$  (kružići) i prognoziranu veličinu  $E_{50}^{ref}$  (križići) dobivenih iz korelacije  $E_{50}^{ref}$  i prirodne vlažnosti  $w_0$  na lokaciji T5 aerodroma Heathrow [9]



Slika 5. Lokalna korelacija  $E_{50}^{ref}$  i  $w_0$ : a) za podsloj B londonske gline b) za podsloj A3 londonske gline c) za podsloj A2 londonske gline



linearne korelacije prirodne vlažnosti i parametra krutosti unutar podslojeva sa slike 4. Slika 6 prikazuje primjenu korelacija sa slike 5 na sve podatke vlažnosti na lokacijama T5 aerodroma Heathrow i Kennington, a slika 7 prikazuje primjenu tih korelacija na dostupne podatke prirodne vlažnosti na lokaciji St James park. Slični se rezultati dobiju i primjenom navedenog postupka za ostale parametre HS modela [14].



Slika 7. Određivanje računskih modula krutosti,  $E_{50}^{ref}$  homogenog i heterogenog HS modela iz korelacija s izmjerenom prirodnom vlažnosti na lokaciji St James's Park [16]

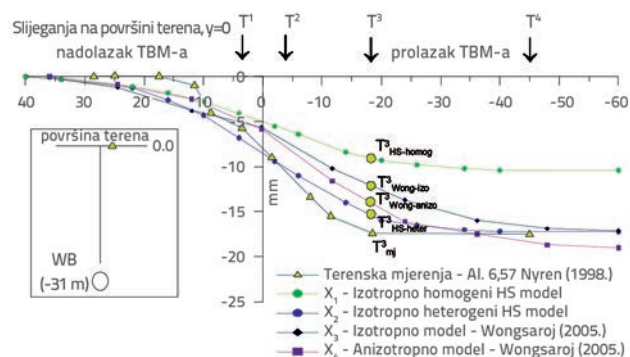
#### 4. Potvrda prihvatljivosti predloženih postupaka i numeričkog modela tla

Potvrda prihvatljivosti postupaka određivanja parametara numeričkog modela tla provedena je kroz usporedbu rezultata numeričke simulacije slučaja izgradnje tunela na lokaciji St. James's Park u Londonu kao i simulacije iskopa građevne jame na lokaciji Ban Centra u Zagrebu s rezultatima mjerenja pri izgradnji navedenih tunela i navedene građevne jame.

#### 4.1. Numerička simulacija mjereno slučaja iskopa tunela u londonskoj glini

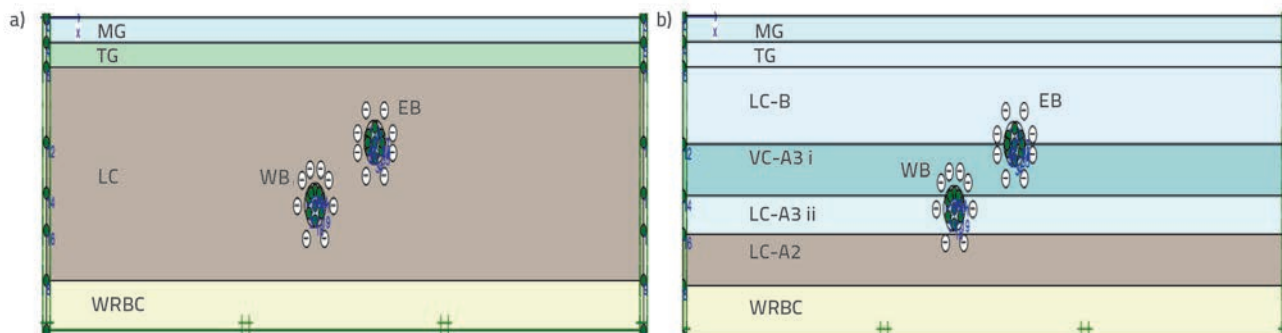
Analiza izgradnje tunela na lokaciji St. James's Park u Londonu provedena je za dva HS modela; jedan koji uzima u obzir heterogenost tla (slika 8.b), gdje su materijalni parametri londonske gline određeni za svaki od geoloških podslojeva, i drugi koji tretira londonsku glinu kao homogeno tlo (slika 8.a), gdje su materijalni parametri dobiveni kao srednja vrijednost parametara svih geoloških podslojeva londonske gline. Osim HS modela, uspoređeni su i rezultati istraživanja Wongsaraja [4] na izotropnom i anizotropnom modelu, gdje je to bilo moguće.

Odstupanja između proračunanih i mjenjenih vrijednosti prikazana su na slici 9. Na manjoj slici naznačen je kružićem položaj tunelske cijevi u odnosu na repera na površini terena, označen trokutićem.



Slika 9. Postupak za utvrđivanje odstupanja između proračunanih i mjenjenih slijeganja pri izgradnji zapadne tunelske cijevi na lokaciji St James Park

Odstupanje između proračunanih i mjenjenih slijeganja sa slike 9. može se prikazati putem sljedećih jednadžbi u nekim karakterističnim trenucima ( $T^1$  do  $T^4$ ) napredovanja izgradnje tunela:



Slika 8. Shematski prikaz a) homogenog i b) heterogenog HS modela na lokaciji St. James's Park u Londonu (WB – zapadna cijev tunela, EB – istočna cijev tunela, MG – nasip, TG – šljunak, LC – londonska glina, WRBC – WRB glina podloge)

homogeni HS model, izraz (2)

$$X_1 = \frac{1}{4} \left[ \frac{y(T_{mj}^1) - y(T_{HS-homog}^1)}{y(T_{mj}^1)} + \frac{y(T_{mj}^2) - y(T_{HS-homog}^2)}{y(T_{mj}^2)} + \frac{y(T_{mj}^3) - y(T_{HS-homog}^3)}{y(T_{mj}^3)} + \frac{y(T_{mj}^4) - y(T_{HS-homog}^4)}{y(T_{mj}^4)} \right] \quad (2)$$

heterogeni HS model, izraz (3)

$$X_2 = \frac{1}{4} \left[ \frac{y(T_{mj}^1) - y(T_{HS-heter}^1)}{y(T_{mj}^1)} + \frac{y(T_{mj}^2) - y(T_{HS-heter}^2)}{y(T_{mj}^2)} + \frac{y(T_{mj}^3) - y(T_{HS-heter}^3)}{y(T_{mj}^3)} + \frac{y(T_{mj}^4) - y(T_{HS-heter}^4)}{y(T_{mj}^4)} \right] \quad (3)$$

izotropni Wongsarojev model, izraz (4)

$$X_3 = \frac{1}{4} \left[ \frac{y(T_{mj}^1) - y(T_{Wong-izot}^1)}{y(T_{mj}^1)} + \frac{y(T_{mj}^2) - y(T_{Wong-izot}^2)}{y(T_{mj}^2)} + \frac{y(T_{mj}^3) - y(T_{Wong-izot}^3)}{y(T_{mj}^3)} + \frac{y(T_{mj}^4) - y(T_{Wong-izot}^4)}{y(T_{mj}^4)} \right] \quad (4)$$

anizotropni Wongsarojev model, izraz (5)

$$X_4 = \frac{1}{4} \left[ \frac{y(T_{mj}^1) - y(T_{Wong-anizot}^1)}{y(T_{mj}^1)} + \frac{y(T_{mj}^2) - y(T_{Wong-anizot}^2)}{y(T_{mj}^2)} + \frac{y(T_{mj}^3) - y(T_{Wong-anizot}^3)}{y(T_{mj}^3)} + \frac{y(T_{mj}^4) - y(T_{Wong-anizot}^4)}{y(T_{mj}^4)} \right] \quad (5)$$

gdje je

- $y(T_{mj}^i)$  - mjerena veličina slijeganja tla u trenutku prolaska TBM-a na poziciji "i",
- $y(T_{iHS}^i)$  - proračunska veličina slijeganja tla u trenutku prolaska TBM-a na poziciji "i" (HS model),
- $y(T_{iWong}^i)$  - proračunska veličina slijeganja tla u trenutku prolaska TBM-a na poziciji "i" (Wongsarojev model).

Usporedbe su provedene za sljedeće numeričke modele: HS model (homogeni i heterogeni) i Wongsarojev model (izotropni i anizotropni), gdje je to bilo moguće. Naime, Wongsaroj [4] u svojem istraživanju nije prikazao rezultate izotropnog i anizotropnog modela za sve slučajeve koji su analizirani u ovom radu.

Rezultati odstupanja proračunanih trenutačnih slijeganja u tlu u odnosu na terenska Nyrenova mjerenja [17] prikazani su u tablici 1.

Iz prosječnih rezultata odstupanja naznačenih u tablici 1. vidljivo je da HS model, koji uzima u obzir prirodnu heterogenost tla, daje znatno manja odstupanja (27 %) u odnosu na HS model koji tretira londonsku glinu kao homogeno tlo (40 %). Naročito se to odnosi na slijeganja na površini terena. Nadalje, uočeno je da heterogeni HS model bolje opisuje trenutačna

Tablica 1. Rezultati numeričkih simulacija i opažanja na terenu: usporedbe trenutačnih slijeganja u tlu

Promatrana cijev tunela	Numerička simulacija bušenja tunela na lokaciji St. James's Park u Londonu	Izotropni homogeni HS model	Izotropni heterogeni HS model	Izotropni model Wongsaroja	Anizotropni model Wongsaroja	Proračunske varijante - na površini terena - na određenoj dubini y - uzdužno na os tunela - poprečno na os tunela
WB – ZAPADNA CIJEV TUNELA	Trenutačna slijeganja u tlu	37	5	20	17	Na površini terena y = 0 uzdužno na os tunela
		39	11	20	15	Na dubini y = -9,4 m uzdužno na os tunela
		32	17	19	21	Na dubini y = -22,6 m uzdužno na os tunela
		8	37	42	24	Na dubini y = -27,5 m uzdužno na os tunela
		32	31	44	39	Na površini terena y = 0 poprečno na os tunela
	Trenutačni horizontalni pomaci	36	18	20	17	4 m desno od osi tunela
EB – ISTOČNA CIJEV TUNELA	Trenutačna slijeganja u tlu	51	38	-	30	Na površini terena y = 0 uzdužno na os tunela
		58	33	-	25	Na dubini y = -9,0 m uzdužno na os tunela
		57	33	-	32	Na dubini y = -12,4 m uzdužno na os tunela
		47	38	-	17	Na površini terena y = 0 poprečno na os tunela
	Trenutačni horizontalni pomaci	47	54	-	31	4 m desno od osi tunela
WB + EB	Odstupanja trenutačnih slijeganja u tlu	40	27	-	24	PROSJEČNA
		58	54	44	39	NAJVEĆA
*Napomena: Rezultati proračuna čije su vrijednosti najbliže terenskim mjerenjima označeni su osjenčanom ćelijom						

Tablica 2. Rezultati numeričkih simulacija i opažanja na terenu: usporedbe konsolidacijskih slijeganja u tlu

Promatrana cijev tunela	Numerička simulacija bušenja tunela na lokaciji St. James's Park u Londonu	Izotropni homogeni HS model	Izotropni heterogeni HS model	Izotropni model Wongsaroja	Anizotropni model Wongsaroja	Proračunske varijante - na površini terena - na određenoj dubini y - uzdužno na os tunela - poprečno na os tunela
WB – ZAPADNA CIEV TUNELA	Konsolidacijska slijeganja u tlu	29	22	-	32	Na površini terena $y = 0$ poprečno na os tunela
		12	16	-	21	Na dubini $y = -5,5$ m
EB – ISTOČNA CIEV TUNELA	Konsolidacijska slijeganja u tlu	52	3	-	-	Na površini terena $y = 0$ poprečno na os tunela
		14	25	-	-	Na dubini $y = -5,0$ m
WB + EB	Odstupanja konsolidacijskih slijeganja u tlu	27	17	-	26	PROSJEČNA
		52	25	-	32	NAJVEĆA
*Napomena: Rezultati proračuna čije su vrijednosti najbliže terenskim mjerenjima označeni su osjenčanom ćelijom						

slijeganja u tlu za slučaj tunela koji je položen u dubljim slojevima gline, dok anizotropni Wongsarojev model povoljnije opisuje trenutačna slijeganja u tlu za slučaj tunela koji je bliže površini terena. Općenito, iz usporedbe odstupanja ovih dvaju modela u odnosu na terenska mjerenja vidljivo je da dobivene prognoze trenutačnih slijeganja u tlu za heterogeni HS model u prosjeku nisu ništa lošije od mnogo složenijeg Wongsaroeva modela koji uzima u obzir anizotropiju krutosti londonske gline.

Na sličan su način dobivena i odstupanja između proračunanih i mjerenih konsolidacijskih slijeganja u tlu za zapadnu i istočnu cijev tunela. Rezultati odstupanja proračunanih u odnosu na terenska Nyrenova mjerenja [17] prikazani su u tablici 2. Iz prosječnih rezultata odstupanja naznačenih u tablici 2. vidljivo je da HS model, koji uzima u obzir prirodnu heterogenost tla, daje nešto manja odstupanja (17 %) u odnosu na HS model koji tretira londonsku glinu kao homogeno tlo (27 %). Naročito se to odnosi na slijeganja na površini terena.

Osim toga, uočeno je da heterogeni HS model nešto bolje opisuje konsolidacijska slijeganja u tlu za slučaj tunela koji je položen u dubljim slojevima gline u odnosu na anizotropni model Wongsaroja.

Općenito, analiza odstupanja proračunanih od mjerenih konsolidacijskih slijeganja pokazuje kako su prognoze vremenskih tokova pomaka u tlu podjednaka i inženjerski prihvatljive za sve promatrane modele, da su odstupanja relativno mala odnosno da se proračuni dobro slažu s terenskim opažanjima.

Parametarskom analizom [14] je utvrđeno da najveći utjecaj na konsolidacijsku promjenu slijeganja imaju drenažni uvjeti u oblozi tunela, čime su potvrđeni rezultati Wongsarojeva istraživanja [4, 5].

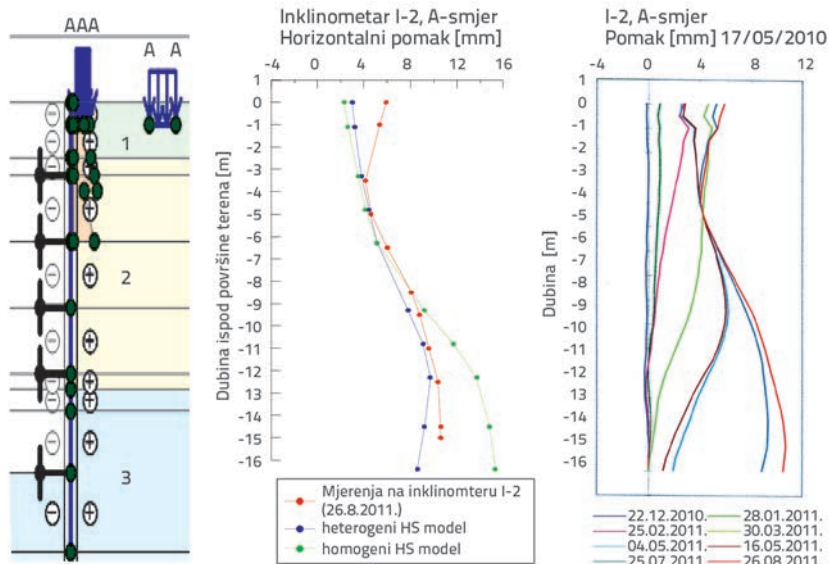
#### 4.2. Numerička simulacija iskopa građevne jame u zagrebačkoj glini

Slična analiza za dva HS modela, jedan koji uzima u obzir heterogenost glina i drugi koji tretira zagrebačku glinu kao homogeno tlo, provedena je za slučaj iskopa građevne jame na lokaciji Ban Centar u Zagrebu. Proračuni horizontalnih pomaka dijafragme prikazani su za karakteristične presjeke uz južnu i istočnu konturu dijafragme te su uspoređeni s terenskim mjerenjima u inklinometrima I-2 i I-5 (slika 10. i 11.).

Iz usporedbe prosječnih odstupanja proračunanih od mjerenih horizontalnih pomaka dijafragme (južna i istočna kontura) za izotropni heterogeni HS model (19 %) i izotropni homogeni HS model (56 %) vidljivo je da se primjenom postupaka koji uzimaju u obzir prirodnu heterogenost krutih zagrebačkih glina (heterogeni HS model) dobivaju znatno manja odstupanja od terenskih mjerenja u odnosu na model koji taj postupak ne primjenjuje (homogeni HS model). Detaljan prikaz primijenjenih analiza i rezultata odstupanja proračunanih od terenskih mjerenja nalazi se u [14].

Rezultati su potvrdili zapažanja do kojih se došlo u slučaju s londonskom glinom: korištenjem HS modela tla uz

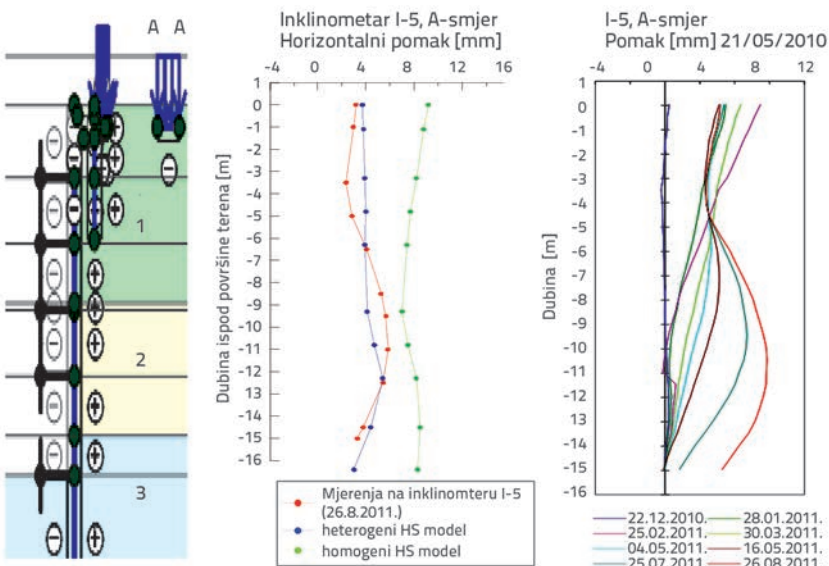




Slika 10. Usporedba proračunanih i mjerenih horizontalnih pomaka južne konture dijafragme za iskop do konačne kote 103.2 m n.m. (-16,8 m od površine terena): a) numerički model u Plaxis 2D (1 - svjetlozelena – normalno prekonsolidirana glina, 2 - svjetlosmeđa – šljunak, 3 - svjetloplava – zagrebačka glina); b) rezultati proračunskih pomaka na modelu; c) rezultati mjerenja na inklinometru I-2 [18]

## 5. Zaključak

Za slučaj izgradnje dviju cijevi tunela Jubilee Line Extension (JLE) podzemne željeznice u zoni St. James's Park u Londonu, provedena je reinterpretacija dostupnih podataka o mehaničkim svojstvima londonske gline. Uzimajući u obzir uslojenost londonske gline kao i podatke o promjeni količine prirodne vlage po dubini, uspostavljene su korelacije između parametara konstitucijskog modela tla HS koji se često koristi u numeričkim simulacijama izgradnje geotehničkih zahvata u tlu. Primjenom tih korelacija na mjerene vlažnosti na lokaciji St. James's Park dobivene su različite računске krutosti tla za svaki od podslojeva londonske gline. Rezultati numeričkih simulacija na slučaju izgradnje tunela u Londonu pokazali su da primjena HS modela, koji uzima u obzir heterogenost krutosti tla među različitim podslojevima, daje znatno manja odstupanja proračunanih u odnosu na mjerena slijeganja negoli primjena HS modela koji promatra londonsku glinu kao jedan homogeni sloj. Opisani postupak potvrđen je u zagrebačkoj glini za slučaj iskopa građevne jame na lokaciji Ban Centar u Zagrebu. Rezultati analize za južnu i istočnu konturu građevne jame pokazali su da izotropni heterogeni HS model koji uzima u obzir heterogenost krutosti među različitim podslojevima zagrebačke gline znatno bolje opisuje ponašanje zaštitne konstrukcije (dijafragme) negoli HS model u kojem se heterogenost u debelom sloju gline ne uzima u obzir. Osim toga, rezultati analize na izotropnim HS modelima uspoređivani su i s rezultatima Wongsarjevih istraživanja na anizotropnom modelu. Rezultati su pokazali da je utjecaj heterogenosti tla na prognozu slijeganja površine tla barem jednako tako važan kao i utjecaj anizotropije krutosti tla. Zanimljivo je da i anizotropija krutosti tla uvijek dobivaju prihvatljivi rezultati za inženjersku praksu.



Slika 11. Usporedba proračunanih i mjerenih horizontalnih pomaka istočne konture dijafragme za iskop do konačne kote 103.2 m n.m. (-16,8 m od površine terena): a) numerički model u Plaxis 2D (1 - svjetlozelena – normalno prekonsolidirana glina, 2 - svjetlosmeđa – šljunak, 3 - svjetloplava – zagrebačka glina); b) rezultati proračunskih pomaka na modelu; c) rezultati mjerenja na inklinometru I-5 [18]

primjenu pogodnih postupaka za određivanje parametara tla, koji uzimaju u obzir prirodnu heterogenost krutih glina, mogu se znatno poboljšati prognoze pomaka zaštitne konstrukcije (dijafragme) uslijed iskopa građevne jame u tlu.

Ovime je potvrđeno da uzimanje u obzir prirodne heterogenosti tla, uočljive kroz heterogenost prirodne vlažnosti gline, daje inženjerski prihvatljive prognoze trenutanih i konsolidacijskih slijeganja tla uslijed izvedbe tunela i građevnih jama.

## LITERATURA

- [1] Terzaghi, K.: Opening discussion and closing address, Proceedings of 1st International Conference of Soil Mechanics, Harvard University, 1936.
- [2] Lambe, T.W.: Predictions in soil engineering, *Geotechnique* 23, No.2, pp. 149-202, 1973.
- [3] Simons, N.E., Menzies, B.K.: *A Short Course in foundation engineering*, Thomas Telford, 224p, 2000.
- [4] Wongsaroj, J.: Three-dimensional finite element analysis of short and long ground response to open-face tunnelling in stiff clay, PhD thesis, University of Cambridge, 2005.
- [5] Wongsaroj, J., Soga, K., Mair, R.J.: Modelling of long-term ground response to tunnelling under St. James's Park, London, *Geotechnique*, Vol.57, No.1, pp. 75-90, 2007.
- [6] Hashiguchi, K., Ueno, M.: Elastoplastic constitutive law of granular material: constitutive equations for soils, Proceedings of 9th International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Special Session 9, pp. 73-82, 1977.
- [7] King, C.: The stratigraphy of the London Basin and associated deposits, *Tertiary Research Special Paper*, Vol.6, Backhuys, 1981.
- [8] Standing, J.R., Burland, J.B.: Report on ground characterisation to explain tunnelling volume losses in the Westminster area, Internal report, Imperial College, University of London, 1999.
- [9] Hight, D.W., McMillan, F., Powell, J.J.M., Jardine, R.J., Allou, C.P.: Some characteristics of London Clay, *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils – Tan et. al. (eds)*, Swets & Zeitlinger, 2003.
- [10] Schanz, T.: Zur Modellierung des mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien, *Mitteilungen*, Heft 45, Institut of Geotechnical Engineering, University of Stuttgart, Stuttgart, 1998.
- [11] Brinkgreve, R.B.J., Vermeer, P.A.: *Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analysis*, Balkema, 2001.
- [12] Brinkgreve, R.B.J., Broere, W., Vermeer, P.A.: *Plaxis 3D Tunnel V2*, Delft University of Technology & Plaxis B.V., The Netherlands, 2004.
- [13] Gasparre, A.: Advance laboratory characterisation of London Clay, PhD thesis, Imperial College of London, 2005.
- [14] Milaković, D.: *Trenutačna i konsolidacijska slijeganja tla izazvana bušenjem tunela u krutim glinama*, Doktorska disertacija, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 2012.
- [15] Yimsiri, S.: Pre-failure deformation characteristic of soils: Anisotropy and soil fabric, PhD thesis, University of Cambridge, 2001.
- [16] Standing, J.R., Burland, J.B.: Unexpected tunnelling volume loss in Westminster area, London. *Geotechnique*, Vol.56, No.1, pp. 11-26, 2006.
- [17] Nyren, R.J.: Field measurements above twin tunnels in London Clay, PhD thesis, Imperial College, University of London, UK, 1998.
- [18] Kavur, B., Savi, R.: *Stambeno-poslovni objekt Ban Centar – Izvještaj o mjerenju (završni)*, Institut IGH d.d., kolovoz 2011.