

**Nina JUREČIČ**

IRGO, Inštitut za rudarstvo geotehnologijo in okolje, Slovenčeva 93, Ljubljana  
e-naslov: nina.jurecic@irgo.si

**Lidija ZDRAVKOVIĆ**

Imperial College London, London, Velika Britanija  
e-naslov: l.zdravkovic@imperial.ac.uk

**Vojkan JOVIČIĆ**

IRGO, Inštitut za rudarstvo geotehnologijo in okolje, Slovenčeva 93, Ljubljana  
e-naslov: vojkan.jovicic@irgo.si

## **NAPOVED POSEDKOV V LONDONSKI GLINI Z UPORABO MODELOV S KINEMATIČNIM UTRJEVANJEM**

**POVZETEK:** Z uvajanjem kriterija uporabnosti v Eurocod 7 je napoved deformacij postal del načrtovanja geotehničnih konstrukcij in je s tem v numeričnih analizah mejnih problemov obnašanje zemljin pri majhnih deformacijah postalo vedno bolj pomembno. To vodi k nadaljnjem razvoju tako primernih konstitutivnih modelov za opis obnašanja zemljin kot k napredku v natančnosti meritev togosti pri majhnih deformacijah v laboratoriju. V prispevku so upoštevani najnovejši rezultati laboratorijskih preiskav Londonske gline, ki so jih opravili na Imperial College London v sklopu terenskih del na Terminalu 5 letališča Heathrow, London, Velika Britanija. V numeričnih analizah izkopa predora pod St. James's parkom (St. James's park, Jubilee extension, London, Velika Britanija) sta upoštevani nelinearni izotropni elastični model (Nonlinear isotropic elastic model), nelinearni anizotropni elastični model (Nonlinear transversely isotropic elastic model) ter dva kinematična modela; M2-SKH model in M3-SKH model (modified two/three surface kinematic hardening model). Vse analize so bile opravljene v programskem okolju ICFEP (Imperial College Finite Element Program) na Imperial College London, Velika Britanija. V prispevku je prikazan vpliv razlik v togosti pri majhnih deformacijah na napoved posedkov ter primerjava s terenskimi meritvami nad predorom pod St. James's parkom.

## **PREDICTIONS OF GROUND MOVEMENTS IN LONDON CLAY USING CINEMATIC HARDENING MODELS**

**ABSTRACT:** With the introduction of the serviceability criterion in Eurocode 7 the prediction of deformation became the part of the design of geotechnical structures. Correspondingly, the necessity of accounting for small strain behaviour of soils in numerical analyses of serviceability limit states of geotechnical structures has become even more important. This has led to the further development of the appropriate soil constitutive models, as well as to the further advances in accurate laboratory measurements of small strain stiffness. The current paper considers recent laboratory research into the behaviour of London Clay, performed at Imperial College London in conjunction with the major ground works for Heathrow Terminal 5 in London, UK. The nonlinear isotropic elastic, nonlinear transversely isotropic elastic and two kinematic hardening models; M2-SKH model in M3-SKH model (modified two/three surface kinematic hardening model) were used in the numerical simulations of the construction of tunnel under St. James's park (St. James's park, Jubilee extension, London, UK). All analyses have been performed using the finite element software ICFEP (Imperial College Finite Element Program) at Imperial College London, UK. The effect of different small strain stiffness data on the predicted ground movements is presented and compared with the field data.

## UVOD

Napredek v laboratorijskem testiranju je pripomogel k boljšemu razumevanju obnašanja geotehničnih materialov pri majhnih deformacijah. Vzporedno z napredkom v laboratorijskem testiranju so se razvijali tudi konstitutivni modeli. Iz enostavnih nelinearno elastičnih modelov (Simpson et al., 1979; Jardine et al., 1986) v bolj napredne kinematične modele, ki lahko opišejo tako nelinearnost in plastično obnašanje v začetnih stopnjah obtežbe, kot tudi ostale naprednejše aspekte obnašanja naravnih materialov (Manzari in Dafalias, 1997; Kavvas in Amorosi, 2000; Baudet in Stallebrass, 2004; Grammatikopoulou et al., 2006).

V prispevku so upoštevani rezultati laboratorijskih preiskav londonske gline, ki so jih opravili na Imperial College London v sklopu terenskih del na Terminalu 5 letališča Heathrow, London, Velika Britanija. Rezultati so bili objavljeni v Geotechnique Symposium in Print 2007 (Volume 51, Issue 1). V omenjeni izdaji je prikazana primerjava najnovejših togostnih krivulj za londonsko glino (Hight et al., 2007) s prej obstoječimi podatki. Primerjava je pokazala, da se togostni odziv pri majhnih deformacijah razlikuje od predhodnih raziskav. Omenjeni podatki se ne razlikujejo samo v togosti ampak tudi njeni degradaciji v območju majhnih deformacij.

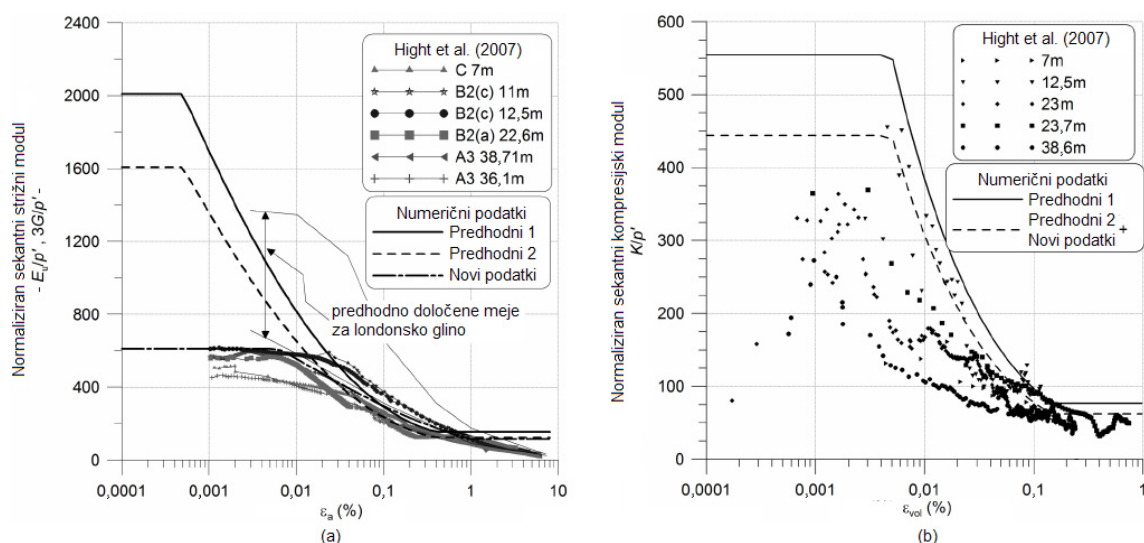
Dosedanje numerične analize geotehničnih konstrukcij v londonski glini so bile narejene s predhodnimi podatki o glini. Ob tem se pojavi vprašanje o vplivu novih laboratorijskih rezultatov na napoved posedkov podobnih geotehničnih primerov. Jurečič et al. (2012) so naredili primerjavo predhodnih in novih podatkov na primeru izkopa predora za londonsko podzemno železnico (Jubilee line) pod St. James's parkom, London, Velika Britanija z izotropnim (Jardine et al., 1986) in anizotropnim (Franzius et al. 2005) nelinearnem elastičnim modelom. Dodatno so bile v letu 2011 narejene analize z M2-SKH in M3-SKH modelom. V prispevku je prikazana primerjava predhodnih in novih podatkov na primeru izkopa predora. Vse analize so bile opravljene v programskem okolju ICPEP (Imperial College Finite Element Program) (Potts in Zdravkovic, 1999) na Imperial College London, Velika Britanija.

## KALIBRACIJA KONSTITUTIVNIH MODELOV

V numeričnih analizah opisanih v Jurečič et al., 2012 je obnašanje londonske gline simulirano s kombinacijo izotropnega ali anizotropnega nelinearnega elastičnega modela ter Mohr-Coulomb-ovega modela (Potts in Zdravkovic, 1999). Za nelinearni elastični del modela je bil v prvi seriji analiz uporabljen izotropni model, ki omogoča neodvisen vnos parametrov za opis odvisnosti strižne in kompresijske togosti od napetostnega in deformacijskega stanja (Jardine et al., 1986). V drugi seriji je bil uporabljen anizotropni model, ki so ga razvili Franzius et al. (2005) in je formuliran na podoben način kot prej omenjen izotropni model s to razliko, da je razvoj kompresijske togosti mogoče eksplicitno podati. Enačbe uporabljene pri določitvi togostnih krivulj so podane v Jurečič et al., 2012. Poudariti je potrebno, da je bilo pri določevanju vhodnih podatkov za analize, največ pozornosti usmerjene na kalibracijo togosti pri majhnih deformacijah za londonsko glino. V analizah opravljenih v letu 2011 je bila londonska glina modelirana s kinematičnima modeloma; modificiranim modelom z dvema kinematičnima ploskvama (M2-SKH) in tremi kinematičnimi ploskvami (M3-SKH).

## Razpoložljivi podatki

Na sliki (Sl. 1) so podane vrednosti strižnega in kompresijskega modula za londonsko glino, povzeto po Hight et al., 2007; ki so bile uporabljene pri kalibraciji modelov (Jurečič et al., 2012). Slika (Sl. 1a) prikazuje spremembo normaliziranega sekantnega Young-ovega modula elastičnosti  $E_s/p'$  z aksialno deformacijo  $\epsilon_a$ , pri čemer je  $p'$  srednja efektivna napetost. Krivulje so bile določene na podlagi nedreniranih triosnih testov na vzorcih londonske gline iz Terminala 5 letališča Heathrow, London, Velika Britanija. Vzorci so bili odvzeti iz različnih globlin in pripadajo različnim litološkim enotam londonske gline (Gasparre, 2005). Na sliki (Sl. 1a) sta prikazani tudi krivulji starejših laboratorijskih preiskav (oznake: predhodni 1 in predhodni 2). Nova serija podatkov kaže na ozek razpon togosti in postopen padec togosti z deformacijo. Podatki predhodnih raziskav imajo večjo magnitudo in bolj hiter padec togosti. Slika (Sl. 1b) podaja sekantni kompresijski modul  $K/p'$  normaliziran s trenutno srednjo efektivno napetostjo  $p'$  v odvisnosti od volumske deformacije  $\epsilon_{vol}$ .



Slika 1. Normalizirani sekantni strižni moduli (a) in normalizirani sekantni kompresijski moduli (b) za londonsko glino (povzeto po Hight et al., 2007).

### Kalibracija izotropne togosti

Kalibracija je povzeta po Jurečič et al., 2012. Za izotropni model velja pri nedreniranih pogojih  $E_u = 3G$ , pri čemer je  $G$ , strižna togost. Krivulji 'Predhodni 1' in 'Predhodni 2' sta bili uporabljeni pri predhodnih analizah podobnih problemov, ki so jih opravili Addenbrooke et al. (1997). Krivulja, ki ustrezno opiše nove laboratorijske podatke je na sliki (Sl. 1a) označena s črtkano linijo (oznaka: Novi podatki). Krivulja zajame zgornji del laboratorijskih podatkov v elastičnem delu, degradacijo togosti pa opisuje s približno srednjo vrednostjo. Vhodni podatki za nelinearni izotropni model so bili določeni na podlagi enačb podanih v Jurečič et al., 2012 in so podani v preglednici (Pregl. 1). Podobno kot slika (Sl. 1a), slika (Sl. 1b) prikazuje normaliziran kompresijski modul. Parametri za omenjeni modul so podani v preglednici (Pregl. 2).

Preglednica 1. Togostni parametri za londonsko glino, izotropni nelinearni elastični model (Jurečič et al., 2012).

krivulja	A	B	$C \times 10^{-4}$ (%)	$\alpha$	$\gamma$	$\epsilon_{d,min} \times 10^{-4}$ (%)	$\epsilon_{d,max}$ (%)	$G_{min}$ (kPa)
Predhodni 1	1400	1270	1	1,335	0,617	8,66025	0,6928	2667
Predhodni 2	1120	1016	1	1,335	0,617	8,66025	0,6928	2667
Novi podatki	350	330	30	1,335	0,617	107,39	1,732	2667

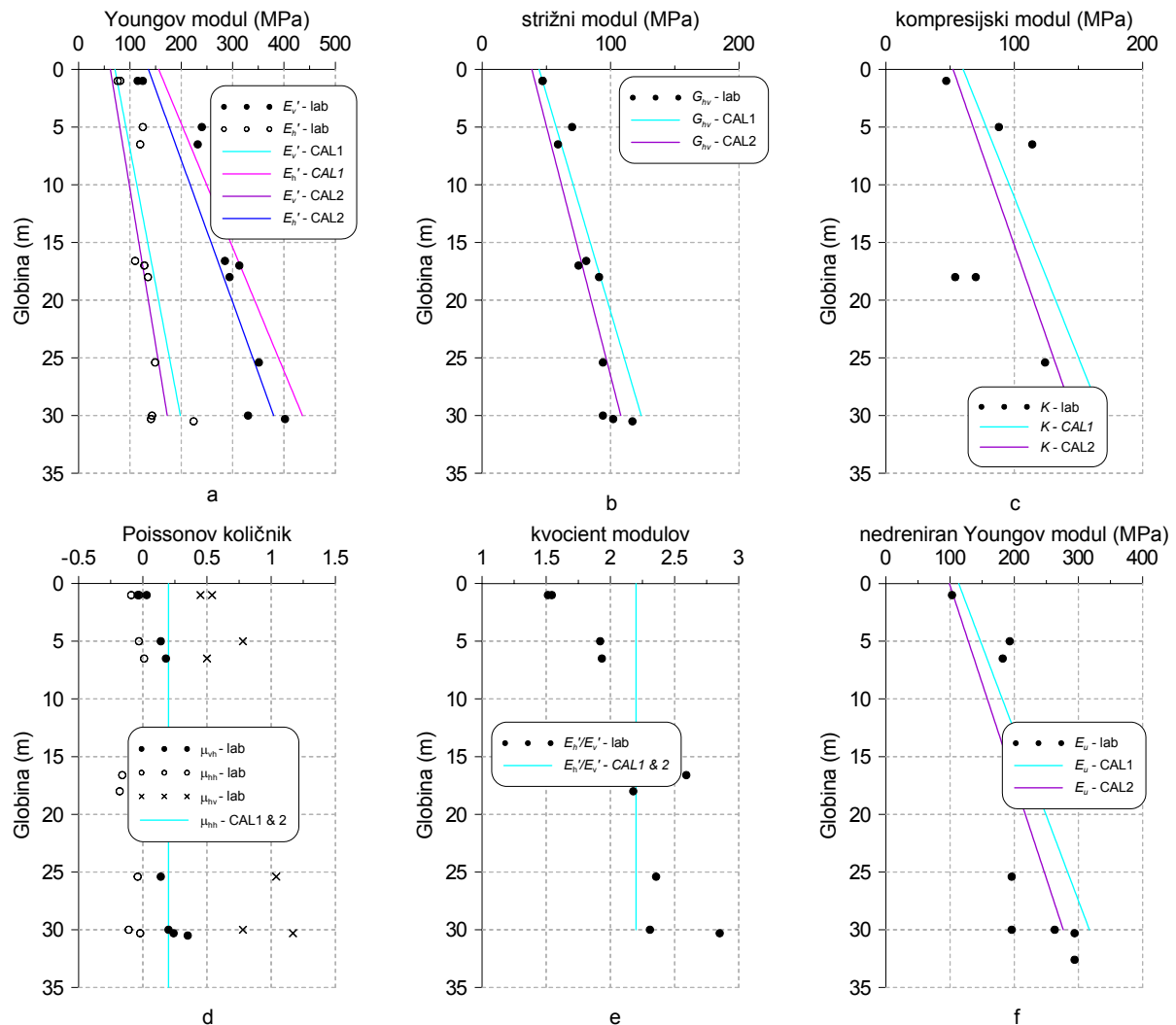
Preglednica 2. Parametri za izračun kompresijskega modula za londonsko glino, izotropni nelinearni elastični model (Jurečič et al., 2012).

krivulja	R	S	$T \times 10^{-3}$ (%)	$\delta$	$\eta$	$\epsilon_{vol,min} \times 10^{-3}$ (%)	$\epsilon_{vol,max}$ (%)	$K_{min}$ (kPa)
Predhodni 1	686	633	1	2,069	0,420	5,0	0,15	5000
Predhodni 2	549	506	1	2,069	0,420	5,0	0,15	5000
Novi podatki	549	506	1	2,069	0,420	5,0	0,15	5000

### Kalibracija anizotropne togosti

Že vrsto let je znano, da je strižna togost londonske gline anizotropna. Zaradi sedimentacije in močne prekonsolidacije, ki je posledica erozije približno 200 m londonske gline v geološki preteklosti, se glina v horizontalni smeri obnaša bolj togo kot v vertikalni. Novi podatki (Gasparre, 2005 in Gasparre et al., 2007) so pripomogli k razumevanju anizotropije elastične togosti. Vendar

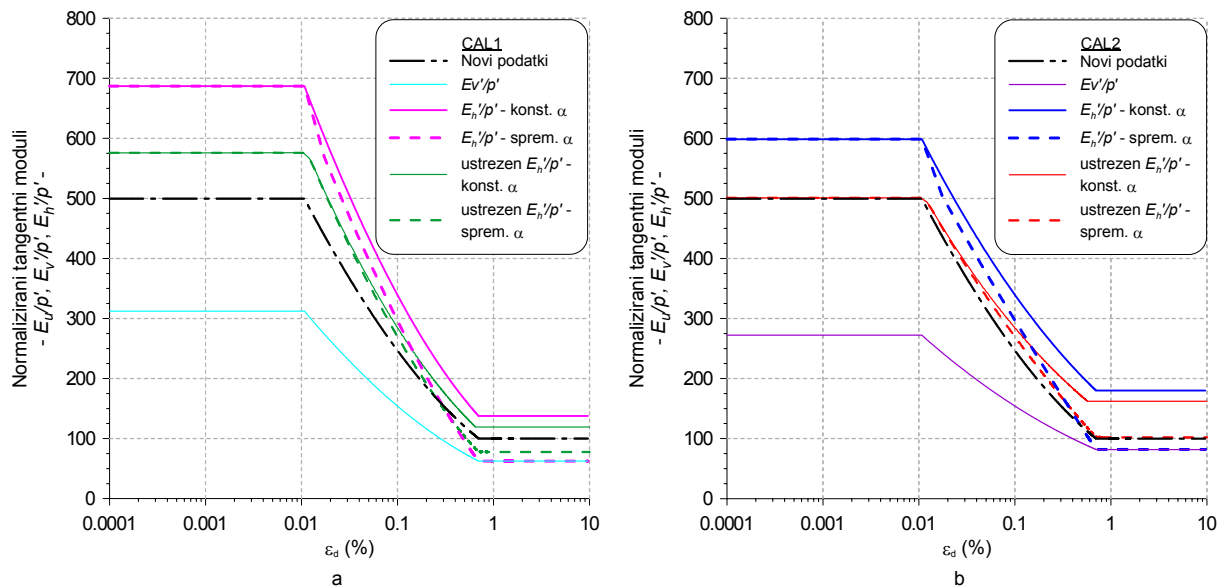
tudi na podlagi novih podatkov ni mogoče sklepati kako se anizotropija razvija z deformacijami. Pri določanju anizotropnih togostnih krivulj (Jurečič et al., 2012) so bile potrebne določene predpostavke. Glede na to da ni bilo drugih razpoložljivih podatkov so bile za vhodne podatke uporabljene le krivulje tangentne strižne togosti. Na sliki (Sl. 2) so prikazane krivulje za kalibracijo lastnosti londonske gline pri zelo majhnih deformacijah v območju elastičnega platoja. Slika prikazuje variiranje podatkov z globino/litološkimi enotami. Nelinearni anizotropni model (Franzius et al., 2005) temelji na triparametrski prečno anizotropni formulaciji, ki sta jo podala Graham in Housby (1983) in velja za območje platoja v kombinaciji z nelinearnim odzivom pod platojem. Za omenjeni model so potrebni trije neodvisni parametri; drenirani Young-ov modul  $E_v$  (v vertikalni smeri), dreniran Poisson-ov količnik  $\mu'_{hh}$  za horizontalne deformacije in anizotropni parameter  $\alpha$ . Parametri so bili določeni na podlagi enačb podanih v Jurečič et al., 2012.



Slika 2. Profili parametrov elastične togosti, Jurečič et al., 2012.

Vhodni podatki za anizotropni model so bili določeni na podlagi dveh kalibracijskih postopkov, ki sta podrobneje opisana v Jurečič et al., 2012. Tangentne krivulje, ki predstavljajo vhodne podatke za anizotropni model so prikazane na sliki (Sl. 3). Vhodni podatki za omenjeni model so podani v preglednici (Pregl. 3). Na sliki (Sl. 2) vidimo, da so rezultati obeh kalibracijskih pristopov znotraj laboratorijsko določenih vrednosti za londonsko glino. Če primerjamo sliki (Sl. 3a in Sl. 3b) vidimo, da so vrednosti  $E'_v/p'$  in  $E'_h/p'$  pri zelo majhnih deformacijah nižje pri kalibracijskem pristopu 2, kar posledično pripomore k temu, da so krivulje na sliki (Sl. 2a) na levi strani v odvisnosti od krivulj pridobljenih po pristopu CAL1, vendar še vedno znotraj eksperimentalno določenih podatkov. Podobno velja za vrednosti  $G_{vh}$  (Sl. 2b),  $E_v$  (Sl. 2f) in  $K$  (Sl. 2c). Glede na to, da ni nobenih

eksperimentalnih dokazov o tem, da je razmerje med horizontalno in vertikalno elastično togostjo res konstantno tudi pri večjih deformacijah, je bila v izračunih upoštevana tudi možnost, da se količnik  $\alpha$  z deformacijo spreminja.



Slika 3. Normalizirani tangentni moduli določeni na podlagi kalibracijskega pristopa 1 (a) in pristopa 2 (b), nelinearni anizotropni model, Jurečič et al., 2012.

Preglednica 3. Vhodni parametri za londonsko glino, anizotropni nelinearni elastični model, Jurečič et al., 2012.

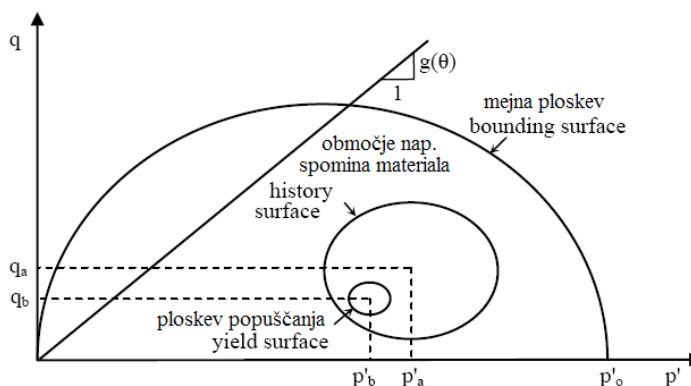
krivulja	P	Q	D (%)	$\beta$	$\xi$	$\epsilon_{d,min} \times 10^{-4}$ (%)	$\epsilon_{d,max}$ (%)	$E'_{v,min}$ (kPa)
CAL1	219	207	0,0030	1,336	0,67	107,39	0,6928	2000
CAL2	200	190	0,0025	1,3	0,55	107,39	0,6928	2000

### Kalibracija M2-SKH in M3-SKH modela

M3-SKH model (Grammatikopoulou, 2004) je nadgrajen 3-SKH model (Stallebrass in Taylor, 1997), ki je razširjen 2-SKH model (At-Tabbaa in Wood, 1989). 2-SKH model je modificiran model Cam-clay z dodatno kinematično ploskvijo. Model je sposoben razločevati med obremenjevanjem in razbremenjevanjem, vendar samo delno upošteva vpliv napetostnega spomina materiala. Zato je Stallebrasova (1990) omenjeni koncept nadgradila z vpeljavo dodatne kinematične ploskve. 3-SKH model tako znotraj Cam Clay mejne ploskve vsebuje še ploskev popuščenja (ang. yield surface), ki razmejuje elastično območje zelo majhnih deformacij od območja plastičnih deformacij in ploskev, ki predstavlja območje napetostnega spomina materiala (ang. history surface). Shematski prikaz 3-SKH modela je prikazan na sliki (Sl. 4). Smer in velikost premikanja kinematičnih ploskev je določena s pomočjo kinematičnih pravil translacije, ki določajo kako se središča ploskev premikajo vzdolž vektorjev, ki povezujejo napetosti na ploskvi popuščenja z njihovimi projekcijami na mejno ploskev. Izotropno utrjevanje se pokaže kot povečanje premera celotne elipse. Razlika med že obstoječima 2-SKH in 3-SKH ter modificiranima; M2-SKH in M3-SKH je v tem, da modificirana modela bolj uspešno modelirata pogoje porušitve. Tako pri modificiranih modelih dobimo postopen prehod med elastičnim in plastičnim obnašanjem materiala, brez skoka. Podrobneje so razlike med modeli opisane v doktorski disertaciji Grammatikopoulou, 2004.

Vhodni parametri za londonsko glino so bili določeni na podlagi simulacije nedreniranih trisnih laboratorijskih testov. Na podlagi omenjenih testov so bili določeni parametri, ki najbolj ustrezno opišejo degradacijo togosti in se najbolj ujamejo s podatki o londonski glini. Kot vhodni krivulji sta bili uporabljeni krivulji označeni s 'predhodni 2' in 'novi podatki'. Vhodni parametri določeni na podlagi simulacij laboratorijskih testov so za omenjena modela podani v preglednici (Pregl. 4). Pri

tem je potrebno omeniti, da obstoječi eksperimentalni podatki niso zajemali napetostnih poti, ki bi omogočale določitev parametra  $T$ , tako da je bil ta določen na podlagi literature (Grammatikopoulou, 2008).



Slika 4. Shematski prikaz 3-SKH modela (po Stallebrass in Taylor, 1997).

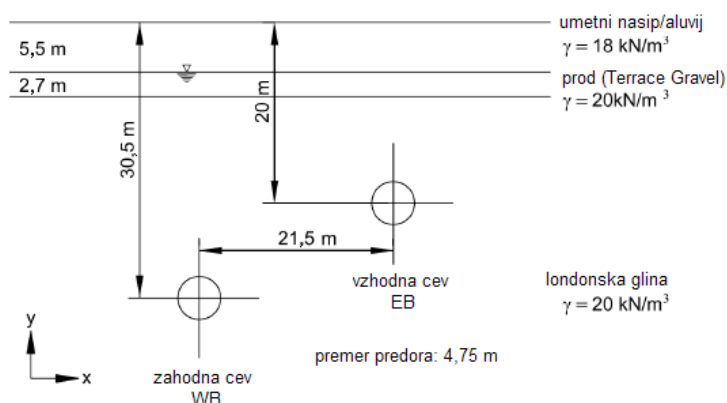
Preglednica 4. Vhodni parametri za M2-SKH in M3-SKH model.

	N	$\lambda^*$	$\kappa^*$	A	n	m	$\varphi'$	$Y_p$	$Z_p$	R	$\alpha$		
M2-SKH - Predhodni 2	3,43	0,097	0,003	595	0,87	0,28	22,5	0,0	1	0,035	1		
M2-SKH - Novi podatki	3,43	0,097	0,003	240	0,87	0,28	22,5	0,0	1	0,015	3		
	N	$\lambda^*$	$\kappa^*$	A	n	m	$\varphi'$	$Y_p$	$Z_p$	T	S	$\alpha_1$	$\alpha_2$
M3-SKH - Predhodni 2	3,43	0,097	0,003	240	0,87	0,28	22,5	0,0	1	0,2	0,0175	1	1
M3-SKH - Novi podatki	3,43	0,097	0,003	240	0,87	0,28	22,5	0,0	1	0,2	0,075	0,8	3

## PREDOR POD ST. JAMES'S PARKOM (PODZEMNA LINIJA JUBILEE)

### Geometrija in pogoji v tleh

Predor pod St. James's parkom je bil zgrajen leta 1996 kot del projekta razširitve podzemne linije Jubilee (Standing et al., 1996). Najprej je bil zgrajena zahodna cev (WB-West bound tunnel), osem mesecev kasneje pa mu je sledila še vzhodna cev (EB-East bound tunnel). Obe cevi potekata v londonski glini. V prispevku so opisane analize le za zahodno cev (WB). Geometrija problema in profil predora sta podana na sliki (Sl. 5). Od zgornje meje proda (Terrace gravel) in celotni formaciji londonske gline velja hidrostatska porazdelitev pornih pritiskov. Koeficient  $K_0$  za londonsko glino znaša 1,5, za umetni nasip in prod pa 0,5.



Slika 5. Geometrija analiziranega problema.

Težavnost napovedi posedkov v zemljinah z visokim  $K_0$ , kot je londonska glina, je bila dobro opisana že v predhodnih numeričnih raziskavah. Addenbrooke et al., 1997 in Franzius et al., 2005

so v svojih raziskavah pokazali da podobno velja tudi za primer predora pod St. James's parkom. Dodatno težavo pri modeliranju omenjenega problema predstavlja tudi visok procent izgube volumna na terenu. Izguba volumna kot posledica posedkov na površini za zahodno cev znaša 3,3% (Standing et al., 1996), kar je precej višja vrednost od pričakovane, ki v povprečju znaša med 1,0 in 1,5 %.

### Numerično modeliranje

V numeričnih analizah predora pod St. James's parkom so bili uporabljeni izotropni in anizotropni podatki o londonski glini opisani v prejšnjem poglavju. Umetni nasip bil modeliran z linearno elastičnim modelom, prodni nanosi pa z izotropnim nelinearnim Mohr-Coulomb-ovim modelom. Obloga v predoru je bila modelirana z elastičnimi prstani z ustreznimi lastnostmi prečnega prereza. Parametri za omenjene materiale so podani v preglednicah (Pregl. 5, Pregl. 6 in Pregl. 7).

*Preglednica 5. Parametri, Mohr-Coulomb model, Jurečič et al., 2012.*

plast	strižni kot $\phi'$ (°)	kohezija $c'$ (kPa)	kot dilatacije $\psi$ (°)	togost (kPa)	Poisson-ov količnik $\mu$	prepustnost $k_0$ (m/s)
umetni nasip	-	-	-	5000	0,3	dreniran
prod	35,0	0,0	17,5	Pregl. 6	0,2	dreniran
londonska glina	22,5	5,0	11,25	Pregl. 1 in Pregl. 2	0,2	$2 \times 10^{-9}$

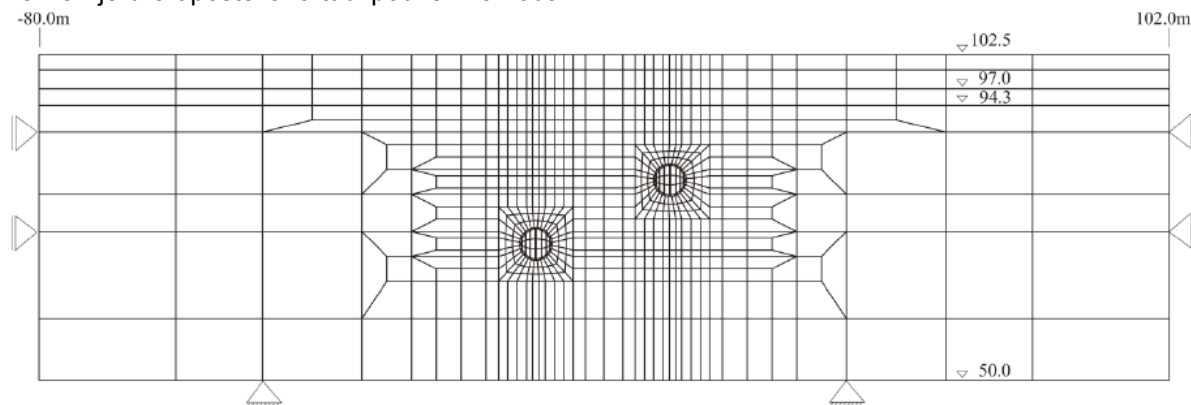
*Preglednica 6. Parametri za prod, izotropni nelinearni elastični model, Jurečič et al., 2012.*

parametri	A	B	$C \times 10^{-4}$ (%)	$\alpha$	$\gamma$	$\epsilon_{d,min} \times 10^{-4}$ (%)	$\epsilon_{d,max}$ (%)	$G_{min}$ (kPa)
strižna togost	1380	1248	5	0,974	0,617	8,83346	0,3464	2000
parametri	R	S	$T \times 10^{-3}$ (%)	$\delta$	$\eta$	$\epsilon_{vol,min} \times 10^{-3}$ (%)	$\epsilon_{vol,max}$ (%)	$K_{min}$ (kPa)
kompresijska togost	275	225	2	0,998	1,044	2,1	0,2	500

*Preglednica 7. Parametri za modeliranje obloge v predoru, Jurečič et al., 2012.*

Young-ov modul $E$ (kPa)	Poisson-ov količnik $\mu$	ploščina prereza $A$ (m <sup>2</sup> )	vztrajnostni moment $I$ (m <sup>4</sup> )
$28,0 \times 10^6$	0,15	0,2	$6,667 \times 10^{-4}$

Mreža končnih elementov za omenjen problem je prikazana na sliki (Sl. 6). Posamezne plasti so modelirane z 8-vozljiščnimi štirikotnimi elementi. Obloga predora je modelirana s 3-vozljiščnimi linijskimi elementi. Izkop zahodne cevi predora je potekal v nedreniranih pogojih in je bil modeliran po metodi izgube volumna (ang. volume loss method), ki je detajlno opisana v Potts in Zdravkovic, 2001. Predor je bil izkopen v 40 inkrementih, obloga pa je bila vstavljena, ko je bil dosežen predpisan procent izgube volumna. Robni pogoji so bili določeni tako, da so onemogočili horizontalne in vertikalne pomike na spodnji meji in horizontalne pomike na vertikalnih mejah. V analizah je bila upoštevana tudi podzemna voda.



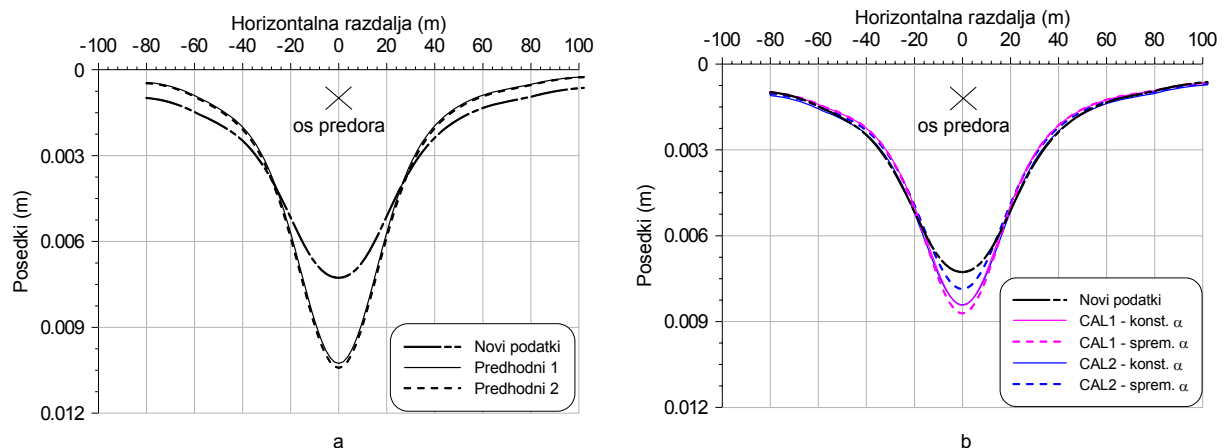
*Slika 6. Mreža končnih elementov za analizo predora pod St. James's parkom Jurečič et al., 2012.*

Hidravlični robni pogoji so določali drenirane pogoje v zgornjih dveh plasteh (umetni nasip in prod). Porni tlaki se vzdolž meje z londonsko glino ne spreminjajo.

Modela s kinematičnim utrjevanjem omogočata modeliranje geološke zgodovine, vendar v analizah, opisanih v prispevku, geološka zgodovina ni bila upoštevana. Opravljene so bile samo analize, pri katerih so bile pred začetkom kinematične ploskve centrirane.

## REZULTATI

Ker je bil izkop modeliran v nedreniranih pogojih je strižna togost materialov tista, ki narekuje stopnjo posedkov na površini. Slika (Sl. 7) prikazuje posedke na površini takoj po aktivaciji obloge v predoru (Jurečič et al., 2012). Na sliki (Sl. 7a) so prikazani rezultati predhodnih analiz označeni s 'predhodni 1' in 'predhodni 2'. Rezultati analiz z novimi podatki o londonski glini so označeni z 'novi podatki'. Iz krivulj je razvidno, da so maksimalni posedki na površini določeni na podlagi predhodnih laboratorijskih podatkih podobni. Nad predorom znašajo približno 10,5 mm. S podatki dobljenimi s kalibracijo novih laboratorijskih podatkov (Hight et al., 2007) pa je krivulja posedkov širša, maksimalni posedki pa znašajo 8 mm (Jurečič et al., 2012). Zaradi boljše preglednosti so rezultati analiz z anizotropnim nelinearnim modelom podani ločeno na sliki (Sl. 7b). Za primerjavo so na omenjeni sliki podani tudi posedki izotropnih analiz z novimi podatki. Razvidno je, da so krivulje posedkov nekoliko ožje in globlje vendar še vedno ne dosežejo vrednosti predhodnih raziskav. Z vhodnimi podatki dobljenimi po kalibracijskem pristopu 1 (CAL1) dobimo nekoliko večje posedke kot z pristopom 2 (CAL2). Ne glede na to kako se razmerje  $E'_h/E'_v$  spreminja z deformacijo, njun vpliv na togost ni velik. Razlika v posedkih se kaže tudi glede na to ali je razmerje konstantno ali se z naraščanjem deformacije spreminja. Posledica spreminjajočega količnika so nekoliko večji posedki.

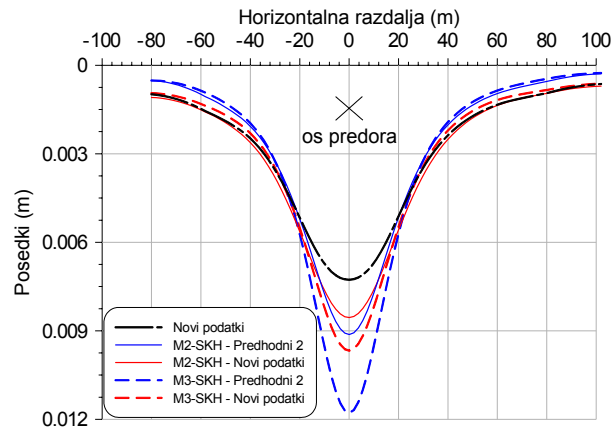


Slika 7. Napoved posedkov nad zahodno cevjo predora pod St. James's Parkom, (a) izotropni model; (b) anizotropni model, Jurečič et al., 2012.

Naslednja serija analiz je bila narejena s kinematičnimi modeli. Rezultati analiz so prikazani na sliki (Sl. 8). Za primerjavo so na omenjeni sliki podani tudi posedki izotropnih analiz z novimi podatki ('novi podatki'). Iz slike je razvidno, da kinematičnimi modeli napovejo večje posedke kot analize z izotropnim in anizotropnim modelom. Krivulje posedkov so nekoliko ožje, maksimalni posedki pa znašajo 8,5 mm (M2-SKH - novi podatki), 9,1 mm (M2-SKH - predhodni 2), 9,7 mm (M3-SKH - novi podatki) in 11,8 mm (M3-SKH - predhodni 2). Z M2-SKH modelom dobimo manjše posedke kot z M3-SKH, prav tako dobimo manjše posedke z najnovjšimi podatki.

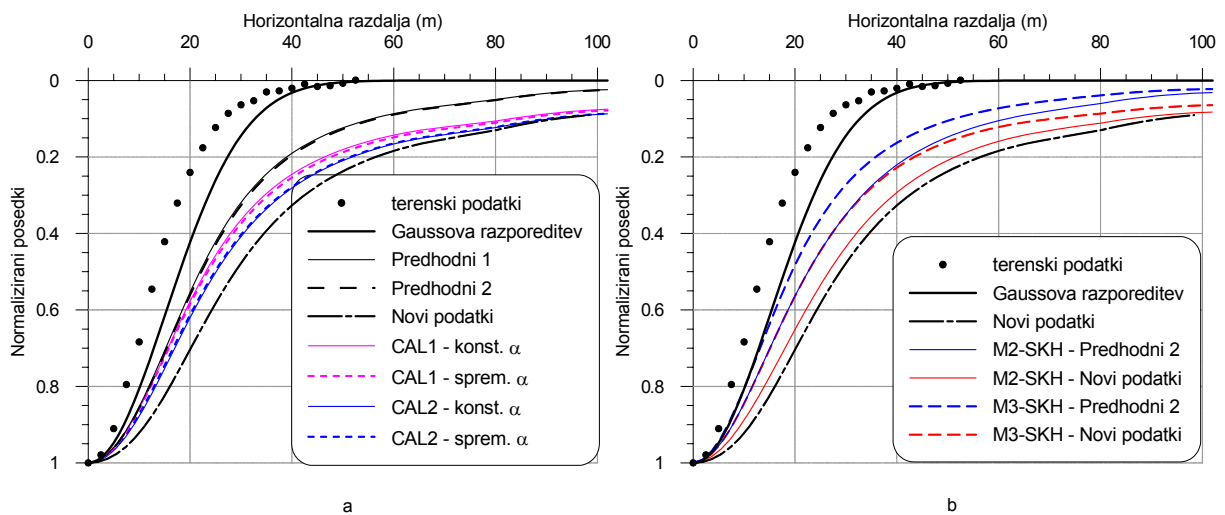
Ne glede na to, da maksimalna razlika med napovedmi maksimalnih posedkov znaša 33% (8 - 12 mm) so dobljeni posedki še vedno v povprečju za polovico manjši od posedkov izmerjenih na terenu (20 mm). Delno je razliko mogoče razložiti z mobilizirano stopnjo elastične deviatorične deformacije  $\epsilon_d$  okoli predora v posamezni analizi.





Slika 8. Napoved posedkov nad zahodno cevjo predora pod St. James's Parkom, kinematični modeli.

Za lažjo primerjavo razlik med posedki so na sliki (Sl. 9) prikazane normalizirane krivulje vseh omenjenih analiz. Posedko so normalizirani z maksimalnim posedkom posamezne analize. Na sliki (Sl. 9a) so prikazani normalizirani posedki analiz z izotropnim in anizotropnim modelom (povzeto po Jurečič et al., 2012). Na sliki (Sl. 9b) so prikazani normalizirani posedki analiz s kinematičnimi modeli. Napoved M3-SKH modela se najbolj približa Gaussovi krivulji, vendar še vedno nekoliko odstopa od terenskih meritev.



Slika 9. Normalizirane krivulje posedkov nad predorom Jurečič et al., 2012.

## ZAKLJUČEK

Na primeru predora pod St. James's parkom, London, Velika Britanija so bile narejene obširne numerične analize z najnovejšimi rezultati laboratorijskih preiskav londonske glin, ki so jih opravili na Imperial College London v sklopu terenskih del na Terminalu 5 letališča Heathrow. Novi rezultati o londonski glini se razlikujejo od prej obstoječih in so omogočili vpogled v njene lastnosti pri majhnih deformacijah. V prispevku so opisani rezultati analiz opravljenih v programskem paketu ICFEP s štirimi materialnimi modeli; nelinearni izotropni elastični model (ang. nonlinear isotropic elastic model), nelinearni anizotropni elastični model (ang. nonlinear transversely isotropic elastic model) ter kinematičnima modeloma; M2-SKH model in M3-SKH model (ang. modified two/three surface kinematic hardening model).

Izotropne togostne krivulje določene na podlagi novih podatkov imajo manjšo magnitudo platoja, večji elastični plato od predhodnih in napovejo plitvejše in širše posedke v primerjavi s posedki dobljenimi z predhodnimi izotropnimi togostnimi krivuljami. Z uporabo anizotropne nelinearne togosti dobimo nekoliko večje posedke v primerjavi z izotropnimi. Vendar so še vedno manjši od

posedkov napovedanih z predhodnimi podatki. Vpliv količnika  $\alpha$  pri anizotropnem modelu (glede na to ali je konstanten ali ne) je v našem primeru izkopa zanemarljiv. Z modeli s kinematičnim utrjevanjem dobimo večje posedke vendar še vedno obstaja razlika med analizami s predhodnimi podatki (predhodni 2) in novimi podatki (novi podatki), pri čemer je najboljša napoved dosežena z modelom M3-SKH z naborom podatkov Predhodni 2. Z prej obstoječimi podatki dobimo večje posedke kot z novimi podatki, ne glede na to ali uporabimo naprednejše kinematične modele ali ne. Maksimalna razlika med napovedmi maksimalnih posedkov z novimi podatki znaša 20% (8 - 10 mm). Ne glede na izbran model z nobeno od analiz ni bilo mogoče zelo približno napovedati terensko izmerjenih posedkov.

## LITERATURA

- Addenbrooke T.I., Potts D.M. in Puzrin A.M. 1997. The influence of pre-failure soil stiffness on the numerical analysis of tunnel construction; *Geotechnique* 47 (3), pp. 693-712.
- Al-Tabbaa A. in Wood D.M. 1989. An experimental based 'bubble' model for clay. International Conference on Numerical Models in Geomechanics; Rotterdam, Balkema, pp. 91-99.
- Baudet B. in Stallebrass S. 2004. A constitutive model for structured clays; *Geotechnique* 54 (4), pp 269-278.
- Franzius J.N., Potts D.M. in Burland J.B. 2005. The influence of soil anisotropy and  $K_0$  on ground surface movements resulting from tunnel excavation; *Geotechnique* 55 (3), pp. 189-199.
- Gasparre A. 2005. Advanced laboratory characterisation of London Clay; PhD thesis, Imperial College London.
- Gasparre A., Nishimura S., Minh N.A., Coop M.R. in Jardine R.J. 2007. The stiffness of natural London Clay; *Geotechnique* 57 (1), pp. 33-47.
- Graham J. in Houlsby G.T. 1983. Anisotropic elasticity of a natural clay; *Geotechnique* 33 (2), pp. 165-180.
- Grammatikopoulou A. 2004. Development, implementation and application of kinematic hardening models for overconsolidated clays. PhD thesis, Imperial College, University of London, London, UK.
- Grammatikopoulou A., Zdravkovic L. in Potts D.M. 2006. General formulation of two kinematic hardening constitutive models with a smooth elasto-plastic transition; *ASCE Int. Jnl. Geomechanics* 6 (5), pp. 291-302.
- Grammatikopoulou A., Zdravkovic L. in Potts D.M. 2008. The influence of previous stress history and stress path direction on the surface settlement trough induced by tunnelling; *Geotechnique* 58 (4), pp. 269-281.
- Hight D.W., Gasparre A., Nishimura S., Minh A.N., Jardine R.J. in Coop M.R. 2007. Characteristics of the London Clay from the Terminal 5 site at Heathrow Airport; *Geotechnique* 57 (1), pp. 3-18.
- Jardine R.J., Potts D.M., Fourie A.B. in Burland J.B. 1986. Studies of the influence of non-linear stress-strain characteristics in soil-structure interaction; *Geotechnique* 36 (3), pp. 377-396.
- Jurecic N., Zdravkovic L., Jovicic V. 2012. Effect of the small strain stiffness of London Clay on predictions of ground movements; *Proceedings ICE: GEotechnical Engineering*. V tiskanju.
- Kavvas M. in Amorosi A. 2000. A constitutive model for structured soils; *Geotechnique* 50 (3), pp. 263-273.
- Manzari M.T. in Dafalias Y.F. 1997. A critical state two-surface plasticity model for sands; *Geotechnique* 47 (2), pp 255-272.
- Potts D.M. in Zdravkovic L. 1999. Finite element analysis in geotechnical engineering: Theory; Thomas Telford, London, UK.
- Potts D.M. in Zdravkovic L. 2001. Finite element analysis in geotechnical engineering: Application; Thomas Telford, London, UK.
- Simpson B., O'Riordan N.J. in Croft D.D. 1979. A computer model for the analysis of ground movements in London Clay; *Geotechnique* 29 (2), pp. 149-175.
- Stallebrass S. 1990. Modelling the effect of recent stress history on the deformation of the overconsolidated soils, PhD thesis, City University, London.
- Stallebrass S.E. in Taylor R.N. 1997. The development and evaluation of constitutive model for the prediction of ground movements in overconsolidated clay; *Geotechnique* 47 (2) pp. 235-253.
- Standing J.R., Nyren R.J., Burland J.B. in Longworth T.I. 1996. The measurement of ground movement due to tunneling at two control sites along Jubilee Line Extension. *Proc. Int. Symp. Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, London, pp. 751-756.