

# PRIMERJAVA REZULTATOV RAČUNSKIH ANALIZ KONZOLNIH IN SIDRANIH PILOTNIH STEN

## COMPARISON OF THE RESULTS OF NUMERICAL ANALYSES OF CANTILIVER AND ANCHORED SHEET PILE WALLS

BOŠTJAN PULKO, asist., dipl.gradb. inž., Katedra za mehaniko tal z laboratorijem, FAGG  
 JANKO LOGAR, asist. mag., Katedra za mehaniko tal z laboratorijem, FAGG

**POVZETEK:** Prikazana je primerjava rezultatov elastooplastičnih napetostno deformacijskih analiz konzolne in enkrat sidrane pilotne stene z rezultati, ki jih dobimo s klasičnimi postopki, ki jih uporabljamo pri projektiranju pilotnih sten. V okviru elastooplastične analize z metodo končnih elementov smo prikazali vpliv interakcije med zemljinjo in konstrukcijo na prerazporeditev zemeljskih pritiskov in notranjih sil v steni.

**SUMMARY:** The results of elastoplastic stress - strain analyses of cantiliver and anchored sheet pile walls are compared to the results obtained by "classical" procedures which are used in everyday practice when designing such structures. The elastoplastic analysis incorporated into the finite element procedure was used to show the effect of soil - structure interaction on the redistribution of earth pressures and internal forces in the wall.

### UVOD

Pri projektiranju konzolnih in enkrat sidranih pilotnih sten v geotehnični praksi najpogosteje uporabljamo klasično metodo, ki temelji na poznavanju rušnih mehanizmov in kinematizma konstrukcije. Analizo stabilnosti pilotne stene običajno izvajamo z upoštevanjem klasične teorije zdrsnih zemeljskih pritiskov. Rezultat takšne analize je pri konzolni pilotni steni minimalna globina vpetja, ki zagotavlja stabilnost, in pri sidrani pilotni steni minimalna globina vpetja ter ustrezna sidrna sila. Ker pomikov, ki omogočajo polno mobilizacijo aktivnih in pasivnih pritiskov, ne moremo dopustiti, je uporaba ustreznih količnikov varnosti za mobilizacijo strižnih karakteristik edini način, s katerim lahko vsaj posredno kontroliramo velikost pomikov oziroma deformacij. Posledica dejstva, da so za mobilizacijo ekstremnih pasivnih pritiskov potrebni mnogo večji premiki kot za mobilizacijo aktivnih pritiskov, je uporaba različnih varnostnih faktorjev za pasivne in aktivne pritiske. Napoved pomikov oziroma deformacij s takšno analizo ni mogoča, prav tako pa s takšnim izračunom ne moremo zajeti vpliva deformabilnosti konstrukcije in povečanja globine vpetja na prerazporeditev zemeljskih pritiskov, notranjih sil in na spremembo sile v sidru. Ker pri takšni analizi vrste pomembnih dejavnikov, ki lahko bistveno vplivajo na varnost in predvsem na funkcionalnost konstrukcij, ne moremo upoštevati, so izredno pomembne izkušnje, pridobljene pri gradnji takšnih objektov, in poznavanje vpliva posameznih dejavnikov.

Napetostno deformacijska analiza po metodi končnih elementov predstavlja orodje, s katerim lahko analiziramo vpliv posameznih parametrov na varnost in funkcionalnost takšnih konstrukcij ob uporabi ustreznih konstitucijskih modelov in parametrov, ki te modele določajo.

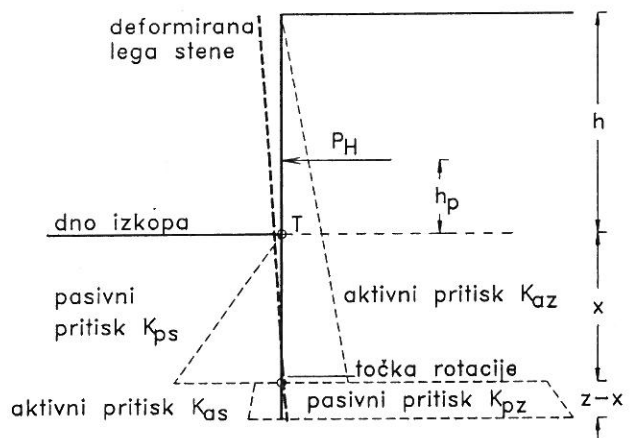
Namen prispevka je prikazati primerjavo rezultatov "klasičnih" računskih analiz konzolne in enkrat sidrane pilotne stene z analizo po MKE ob upoštevanju elastooplastičnega modela za zemljinjo ter

prikaz vpliva posameznih parametrov na globalno varnost, funkcionalnost in nenazadnje tudi na ekonomičnost konstrukcij, ki jih v praksi mnogokrat uporabljamo.

### STATIČNA ANALIZA PILOTNIH STEN

#### Konzolna pilotna stena

Konzolne pilotne stene so konstrukcije, pri katerih zagotovimo ravnotežje z vpetjem pilotov v tla. V praksi pogosto uporabljen računski model temelji na upoštevanju ustreznega kinematizma in na privzeti razporeditvi zemeljskih pritiskov, ki jih izračunamo z upoštevanjem ustreznih količnikov varnosti. Način deformiranja in razporeditev aktivnih in pasivnih pritiskov sta razvidni s slike 1. Takšno porazdelitev, ki jo pogojuje način deformiranja, najpogosteje upoštevamo pri izpeljavi ravnotežnih enačb za zagotovitev ravnotežja momentov in horizontalnih sil.



Slika 1. Računski model za analizo konzolne pilotne stene

Ravnotežna enačba za sile v horizontalni smeri  $\sum H = 0$  je:

$$(b_1 - b_2)x^2 + 2(a_1 - a_2)x + b_2z^2 + 2a_2z + 2P_H = 0, \quad (1)$$

momentna ravnotežna enačba na točko T  $\sum M^T = 0$  pa:

$$2(b_1 - b_2)x^3 + 3(a_1 - a_2)x^2 + 2b_2z^3 + 3a_2z^2 - 6P_H h_p = 0. \quad (2)$$

Pri tem smo upoštevali oznake s slike 1 in:

$$a_1 = \sigma_{vz} K_{az} - \sigma_{vs} K_{ps} - 2c_{am} \sqrt{K_{az}} - 2c_{pm} \sqrt{K_{ps}} + \sigma_w, \quad (3)$$

$$a_2 = \sigma_{vz} K_{pz} - \sigma_{vs} K_{as} + 2c_{am} \sqrt{K_{as}} + 2c_{pm} \sqrt{K_{pz}} + \sigma_w, \quad (4)$$

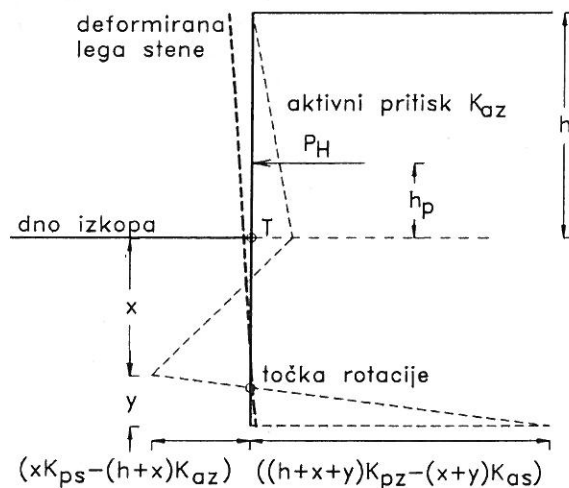
$$b_1 = \gamma'(K_{az} - K_{ps}), \quad (5)$$

$$b_2 = \gamma'(K_{pz} - K_{as}), \quad (6)$$

kjer je:

- $\gamma$  efektivna prostorninska teža zemljine,
- $K_{as}$  koeficient aktivnega zemeljskega pritiska na strani izkopa,
- $K_{ps}$  koeficient pasivnega zemeljskega pritiska na strani izkopa,
- $K_{az}$  koeficient aktivnega zemeljskega pritiska na zaledni strani,
- $K_{pz}$  koeficient pasivnega zemeljskega pritiska na zaledni strani,
- $c_{am}$  mobilizirana vrednost kohezije (aktivno stanje),
- $c_{pm}$  mobilizirana vrednost kohezije (pasivno stanje),
- $\sigma_{vs}$  vertikalna napetost na koti izkopa na površini izkopa,
- $\sigma_{vz}$  vertikalna napetost na koti izkopa v zaledju,
- $\sigma_w$  hidrostatski tlak na koti izkopa v zaledju,
- $P_H$  rezultanta vseh horizontalnih sil na zaledju nad koto izkopa,
- $h_p$  ročica rezultante horizontalnih sil do kote izkopa.

Predpostavljen razpored pritiskov je običajno dobra aproksimacija za račun potrebne globine vpetja, ni pa v skladu z deformacijsko analizo, saj imamo v območju točke rotacije, kjer so pomiki najmanjši, velike napetosti. Skladnejši z deformacijsko analizo je alternativni postopek, ki uporablja modificiran razpored zemeljskih pritiskov, prikazan na sliki 2.



Slika 2. Modificiran računski model za analizo konzolne pilotne stene

Ravnotežne enačbe za modificiran razpored zemeljskih pritiskov izpeljemo podobno in jih podajamo v integralni obliki:

Ravnotežna enačba za sile v horizontalni smeri  $\sum H = 0$  je:

$$P_H + \int_0^x (a_1 + b_1 z) dz + \int_0^y \left\{ (a_1 + b_1 x) + z \frac{a_2 + b_2(x+z) - (a_1 + b_1 x)}{y} \right\} dz = 0, \quad (7)$$

momentna ravnotežna enačba na točko T  $\sum M^T = 0$  pa:

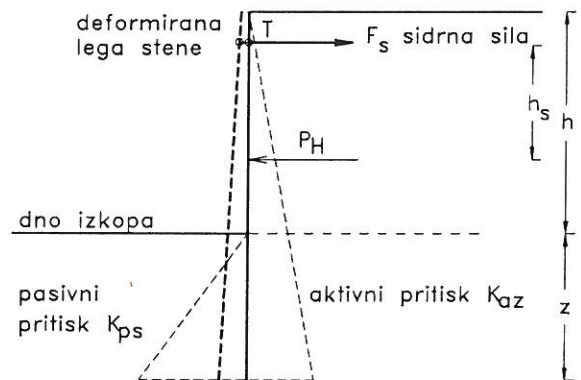
$$P_H h_p + \int_0^x (a_1 + b_1 z) z dz + \int_0^y \left\{ (a_1 + b_1 x) + z \frac{a_2 + b_2(x+z) - (a_1 + b_1 x)}{y} \right\} (x+z) dz = 0. \quad (8)$$

Vidimo, da se postopek določitve potrebne minimalne globine vpetja in globine točke rotacije konzolne pilotne stene v obeh primerih prevede na rešitev sistema dveh nelinearnih enačb, ki ga rešimo z Newtonovo metodo. Notranje sile po konstrukciji določimo ob privzeti razporeditvi pritiskov in ob upoštevanju izračunanih vrednosti za globino vpetja in točko rotacije.

### Enkrat sidrana pilotna stena

Statični model in razporeditev zemeljskih pritiskov, ki ga uporabljamo za izračun relativno togih pilotnih sten, vidimo na sliki 3. Aktivne pritiske zaledja na konstrukcijo prevzame sidro in pasivni odpor zemljine na strani izkopa. Momentno ravnotežno enačbo izpeljemo na mesto, kjer je pritrjeno sidro. Predpostavljeni razpored zemeljskih pritiskov privede do kubične enačbe za potrebno globino vpetja  $z$ , ki še zagotavlja stabilnost konstrukcije.

$$2b_1 z^3 + 3(b_1 h_s + a_1) z^2 + 6a_1 h_s z + 6P_H h_s = 0 \quad (9)$$



Slika 3. Uporabljene oznake in računski model za analizo enkrat sidrane pilotne stene

Iz ravnotežne enačbe za horizontalno smer izrazimo še horizontalno komponento sidrne sile:

$$F_{SH} = \frac{b_1 z^2}{2} + a_1 z + P_H \quad (10)$$

### REZULTATI RAČUNSKIH ANALIZ

#### Konzolna pilotna stena

Analizirali smo konzolno pilotno steno izvedeno v homogenem materialu. Za elastoplastično analizo po metodi končnih elementov smo uporabili Mohr-Coulombov idealno elastoplastični model.

Obširno so teoretične osnove za elastooplastično analizo pilotnih sten po MKE podane v ločenem članku (Logar, Pulko, 1993).

**Preglednica 1.** Podatki za zemljino, pilotno steno in kontaktne elemente

Zemljina		
strižni kot	$\varphi$	28°
kohezija	$c$	3 kPa
kompresijski modul	$K$	16666.7 kPa
strižni modul	$G$	3571.4 kPa
elastični modul	$E_z$	10000 kPa
Poissonov količnik	$\nu$	0.4
Pilotna stena		
površina preseka	$A$	0.5 m <sup>2</sup>
vztrajnostni moment	$I$	0.01042 m <sup>4</sup>
elastični modul	$E_b$	31.5 GPa
Kontaktne elemente		
togost v normalni smeri	$K_n$	10 <sup>6</sup> kPa
togost v tangentialni smeri	$K_t$	3500 kPa
trenjski kot na kontaktu	$\varphi'$	0° (14°)
adhezijska sila	$F_{ca}$	0 kN

Račun potrebne globine vpetja smo izvedli na štiri načine:

- K1 račun po osnovni varianti razporeditve zemeljskih pritiskov (slika 1) z upoštevanjem nemobiliziranih strižnih karakteristik
- K2 račun po modificirani varianti razporeditve zemeljskih pritiskov (slika 2) z upoštevanjem nemobiliziranih strižnih karakteristik  $\varphi' = 0^\circ$ .
- K1F račun po osnovni varianti razporeditve zemeljskih pritiskov (slika 1) z upoštevanjem mobiliziranih strižnih ka-

rakteristik, pri čemer smo upoštevali količnik varnosti  $F_c = 2$  za kohezijo,  $F_{\varphi a} = 1.3$  za račun aktivnih in  $F_{\varphi p} = 2.0$  za račun pasivnih pritiskov

K2F račun po modificirani varianti razporeditve zemeljskih pritiskov (slika 2) z upoštevanjem mobiliziranih strižnih karakteristik, pri čemer smo upoštevali enake količnike varnosti kot v primeru K1F.

Elastoplastično analizo smo izvedli za številne variante globin pilotne stene in tako poiskali mejni primer. Objavljamo rezultate za naslednje tri računске primere:

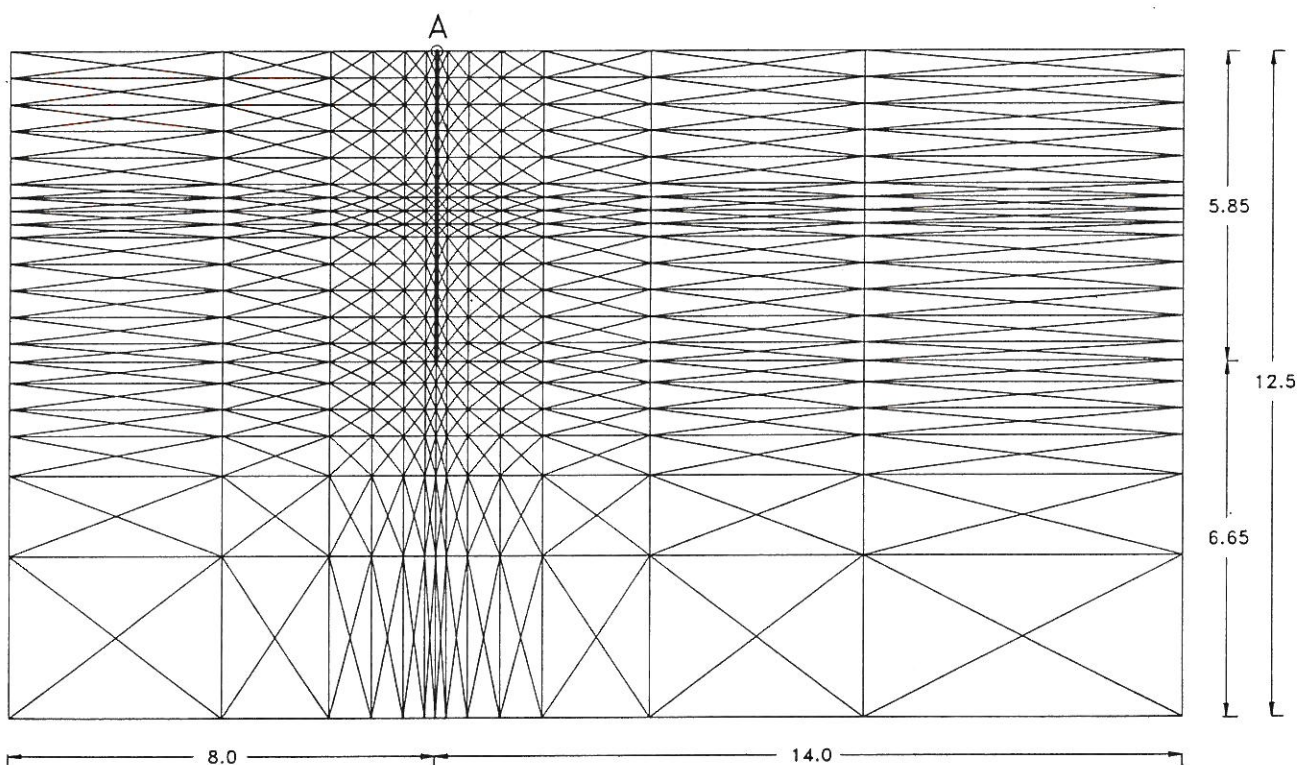
K800 račun z dolžino pilotne stene  $L_s = 8$  m in upoštevanjem gladkega kontakta med zemljino in konstrukcijo ( $\varphi' = 0^\circ$ )

K585 račun z dolžino pilotne stene  $L_s = 5.85$  m in upoštevanjem gladkega kontakta ( $\varphi' = 0^\circ$ )

K585' račun z dolžino pilotne stene  $L_s = 5.85$  m in upoštevanjem hrapavega kontakta ( $\varphi' = \varphi/2 = 14^\circ$ )

Globina izkopa pred pilotno steno znaša v vseh treh primerih 3 m, globina vpetja pilotne stene pa variantno 5 m oziroma 2.85 m. Geometrijski in materialni podatki so podani v preglednici 1.

Kot referenčno začetno stanje je upoštevano stanje po izgradnji pilotne stene pred začetkom izvajanja izkopa (pomiki zaradi lastne teže pilotov se izvršijo pred začetkom analize). Začetno napetostno stanje v vertikalni smeri določa lastna teža zemljine, bočne pritiske pa smo izračunali ob upoštevanju količnika mirnih zemeljskih pritiskov  $k_0 = \nu/(1 - \nu)$ . V računu smo uporabili dejanske nemobilizirane strižne karakteristike  $\varphi$  in  $c$ . Mreža končnih elementov, ki smo jo uporabili v elastooplastični analizi, je prikazana na sliki 4.

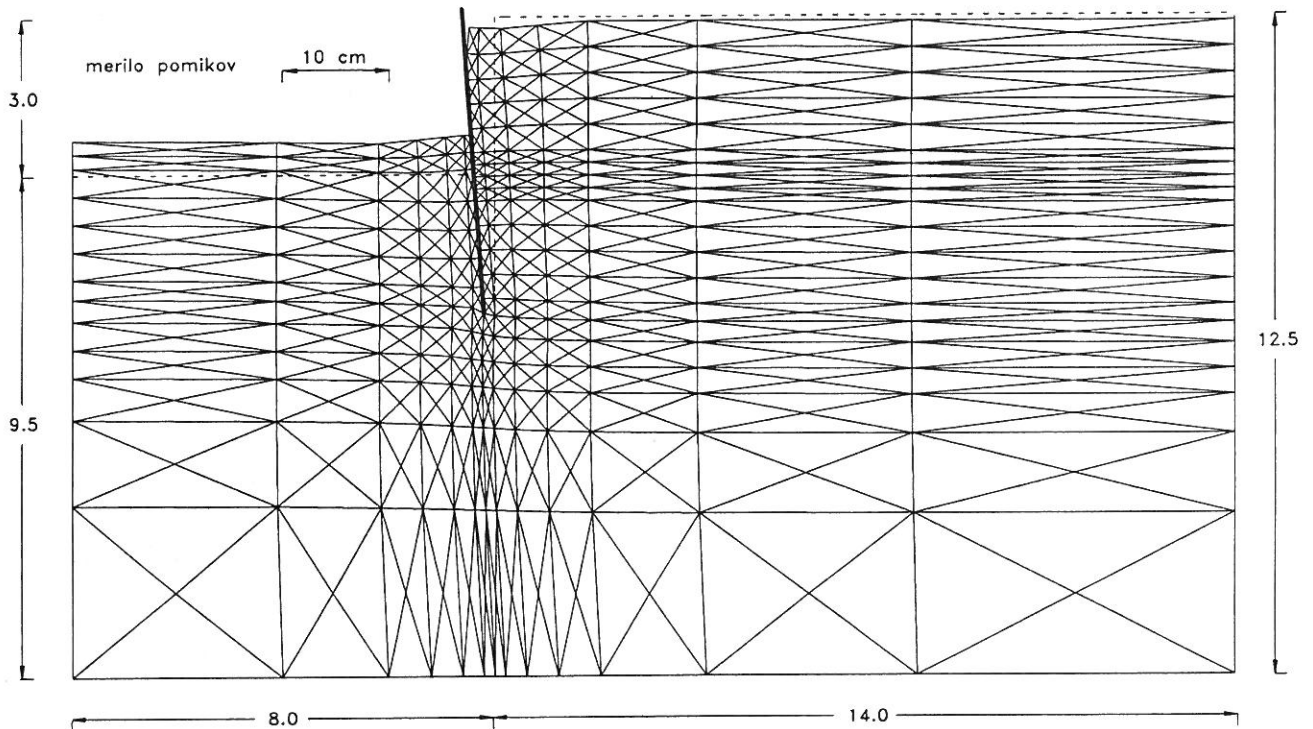


**Slika 4.** Mreža končnih elementov za analizo konzolne pilotne stene po MKE

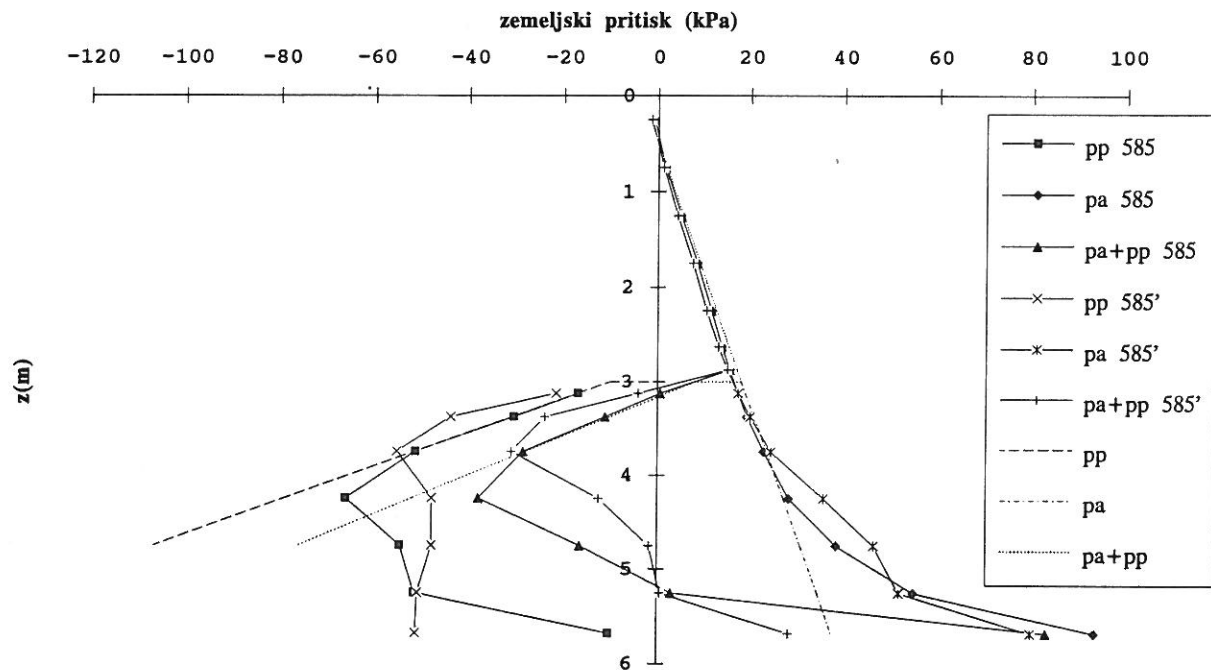
Na slikah 5 do 9 podajamo naslednje primerjave:

- deformirana in nedeformirana mreža končnih elementov po izvršenem izkopu 3 m za primer K585. Faktor povečanja merila pomikov glede na merilo geometrije mreže je 20 (slika 5),
- zemeljski pritiski na pilotno steno za primera K585 in K585' - vpliv trenja med zemljino in konstrukcijo na zemeljske pritiske (slika 6),

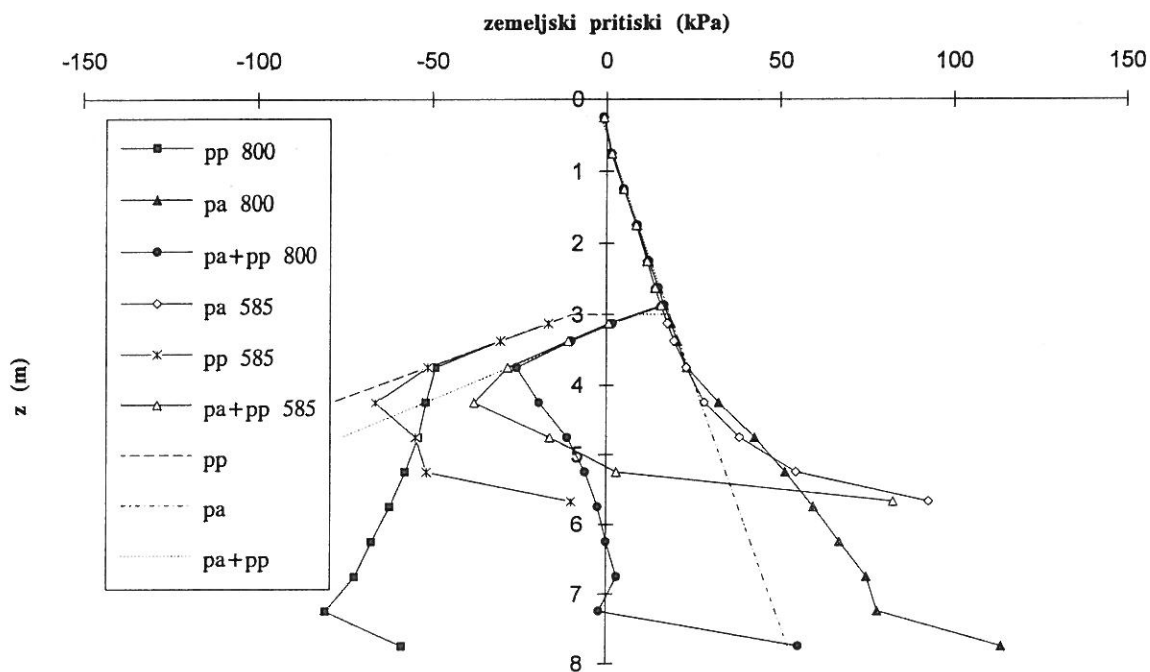
- zemeljski pritiski na pilotno steno za primera K585 in K800 - vpliv povečanja globine vpetja na razpored zemeljskih pritiskov (slika 7),
- upogibni momenti za primera K585 in K585' - vpliv trenja med zemljino in konstrukcijo na upogibne momente (slika 8),
- upogibni momenti za primera K800 in K585 - vpliv globine vpetja na upogibne momente (slika 9).



Slika 5. Deformirana mreža končnih elementov za primer K585. Faktor povečanja pomikov glede na merilo mreže je 20



Slika 6. Diagram zemeljskih pritiskov na pilotno steno za primera K585 in K585' - vpliv trenja na razpored zemeljskih pritiskov



Slika 7. Diagram zemeljskih pritiskov na pilotno steno za primerja K585 in K800 - vpliv globine vpetja na razpored zemeljskih pritiskov

V preglednici 2 so podane globine vpetja, maksimalne jakosti momentov in za elasto-plastične analize tudi horizontalni in vertikalni pomik točke A:

Preglednica 2. Primerjava rezultatov računskih analiz konzolne pilotne stene

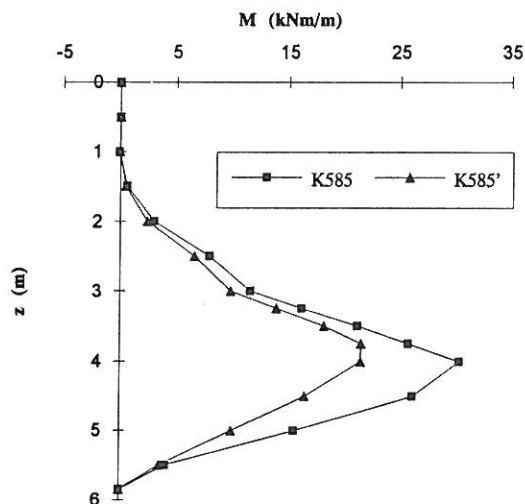
Primer	vpetje		$M_{max}$		$u_x^A$ (cm)	$u_y^A$ (cm)
	(m)	%	(kNm)	%		
K1	2.36	83	37.9	125	-	-
K2	2.41	85	37.9	125	-	-
K1F	4.98	175	121.6	401	-	-
K2F	5.10	179	121.6	401	-	-
K585	2.85	100	30.3	100	2.4	-1.0
K585'	2.85*	100*	21.5	71	1.2	0.0
K800	5.00 <sup>+</sup>	175 <sup>+</sup>	34.0	112	2.2	-1.1

\* Globine vpetja nismo ponovno računali. Cilj tega računa je bil primerjava rezultatov (zemeljskih pritiskov in upogibnih momentov) za gladek oziroma hrapav kontakt med steno in zemljino ob sicer enakih pogojih.

<sup>+</sup> Globine vpetja nismo računali. Privzeta je bila vrednost, podobna tistim, ki jih dobimo po klasičnem računu za realne vrednosti količnikov varnosti.

Primerjavo v preglednici 2 smo izvedli glede na elasto-plastično analizo pilotne stene z vpetjem 2.85 m in ob upoštevanju gladkega kontakta med steno in zemljino. Za dani primer smo z variranjem računске globine vpetja ugotovili, da predstavlja mejno stanje. V primeru, ko smo upoštevali koeficient trenja  $\varphi' = 14^\circ$ , izkazuje izračun bistveno manjše pomike in momente v pilotni steni, zato lahko sklepamo, da trenje povečuje varnost konstrukcije. Najpogosteje ta ugoden vpliv trenja med konstrukcijo in zemljino zanemarjamo. Na podlagi rezultatov lahko sklepamo, da klasična

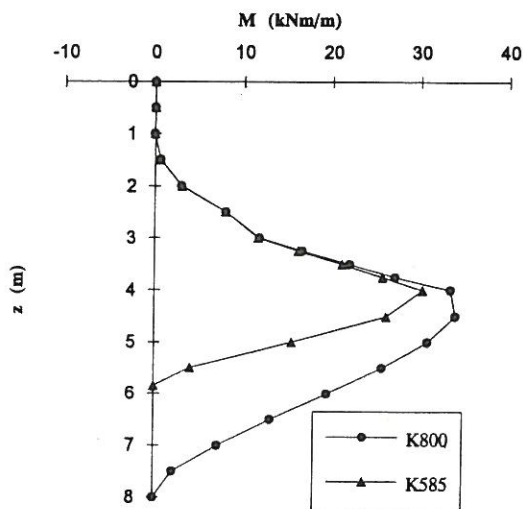
metoda s predpostavljenimi oblikami zemeljskih pritiskov v primeru računa z nemobiliziranimi strižnimi pritiski daje premajhne globine vpetja, saj se pasivni pritiski na zaledni strani dna pilotne stene ne mobilizirajo popolno.



Slika 8. Diagram upogibnih momentov za računska primerja K585 in K585'

V primeru računa z mobiliziranimi strižnimi karakteristikami (K1F in K2F) izračunani potrebni globine vpetja izkazuje potrebno varnost, kar je v skladu z računskimi količniki varnosti. Iz rezultatov elasto-plastične analize primerja K800 z računsko globino vpetja 5 m vidimo (preglednica 2), da so vrednosti upogibnih momen-

tov, izračunane po klasičnem postopku, znatno prevelike. Navedene primerjave upogibnih momentov v danem primeru ne gre posploševati, saj je stopnja mobiliziranosti aktivnih in pasivnih pritiskov neposredno odvisna od deformabilnosti zemljine. Če je zemljina zelo deformabilna, so za mobilizacijo polnih aktivnih ali pasivnih pritiskov potrebni večji premiki kot pri malo deformabilni zemljini.



Slika 9. Diagram upogibnih momentov za računski primeri K800 in K585

Vpliv povečanja globine vpetja (K800) na upogibne momente je relativno majhen. Ker je za mobilizacijo aktivnih pritiskov potre-

ben relativno majhen pomik, se pri neoviranem deformiranju dela pilotne stene nad nivojem izkopa v zaledju vzpostavi aktivno stanje zemeljskih pritiskov, ki ne vpliva bistveno na velikost maksimalnega momenta (slika 9).

### Sidrana pilotna stena

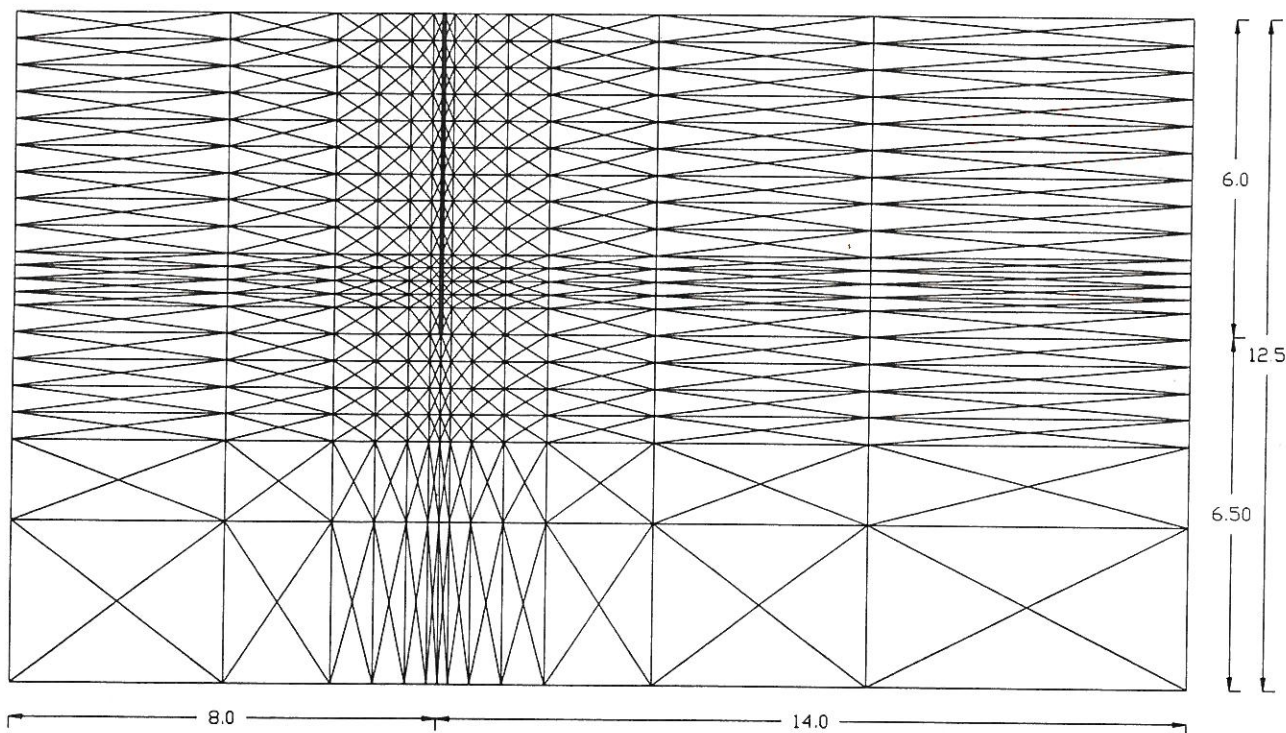
Analizirali smo enkrat sidrano pilotno steno, ki žšiti izkop globine 5 m. V računu smo analizirali vpliv globine vpetja sidrane pilotne stene na velikost sidrne sile in notranjih sil po pilotni steni, vpliv togosti pilotne stene na prerezporeditev zemeljskih pritiskov in notranjih sil ter izvedli primerjavo s klasičnim računom enkrat sidranih pilotnih sten. Vse elastoplastične analize so bile narejene za primer gladkega kontakta med zemljino in konstrukcijo.

Preglednica 3. Podatki o pilotni steni in sidru

Podatki o pilotni steni		
Primer	$A \text{ (m}^2\text{)}$	$I \text{ (m}^4\text{)}$
S600T/S800T	0.50	0.01042
S600P/S800P	0.20	0.00130
Podatki o sidru		
$A_S \text{ (cm}^2\text{)}$	4.62 (12 $\phi$ 7)	
Prosta dolžina (m)	10.0	

Mreža končnih elementov, ki smo jo uporabili za elastoplastično analizo je prikazana na sliki 10.

Izkop smo izvedli v petih fazah po 1 m, sidro pa namestimo po izvedeni 1. fazi izkopa. V računu nismo upoštevali prednapetja sidra. Materialni podatki za zemljino in kontaktne elemente so enaki kot v primeru konzolne pilotne stene in so podani v pregled-



Slika 10. Mreža končnih elementov za analizo 1 krat sidrane pilotne stene po MKE

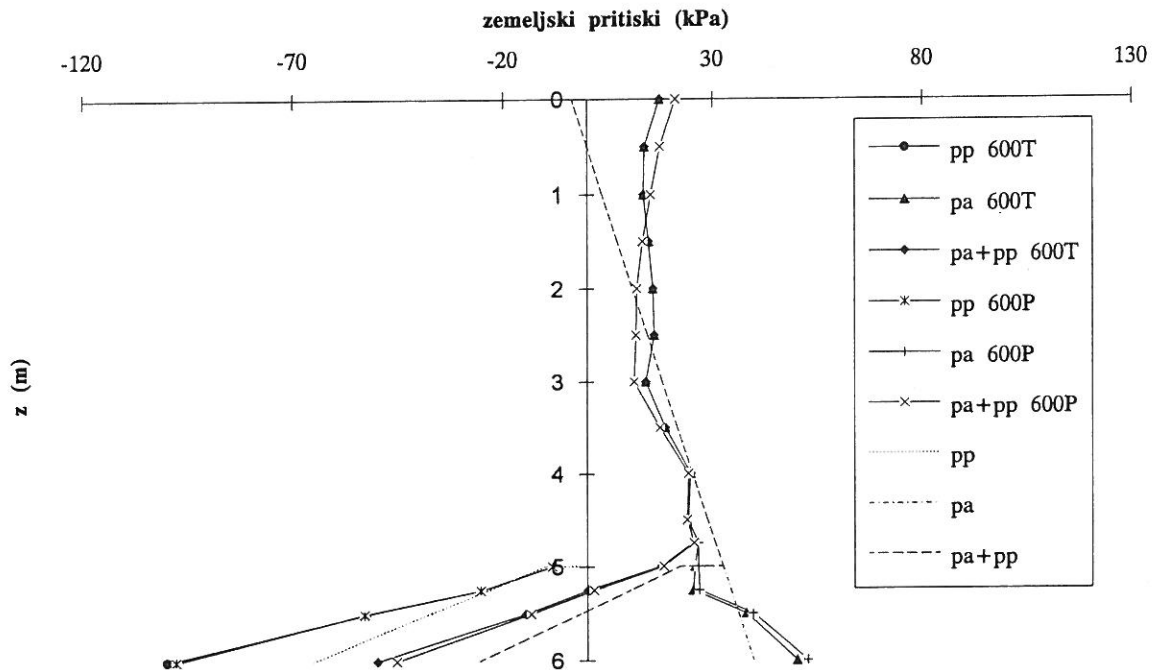
nici 1. Podatki za pilotno steno in sidro so navedeni v preglednici 3:

Izvedli smo naslednje računske analize:

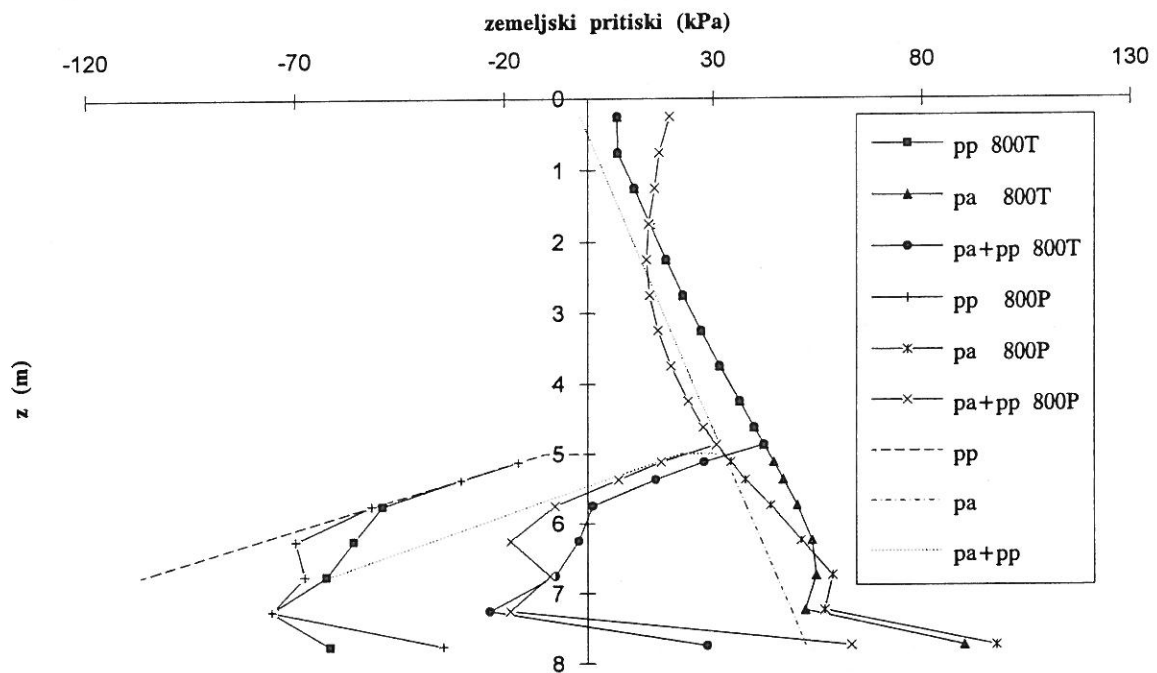
- S račun po klasični metodi z nemobiliziranimi strižnimi karakteristikami,
- SF račun po klasični metodi razporeditve zemeljskih pritiskov z upoštevanjem mobiliziranih strižnih karakteristik,

pri čemer smo upoštevali količnik varnosti  $F_c = 2$  za kohezijo,  $F_{\varphi a} = 1.3$  za račun aktivnih in  $F_{\varphi p} = 2.0$  za račun pasivnih pritiskov,

S600T račun za globino vpetja 1 m in debelino stene 0.50 m,  
 S600P račun za globino vpetja 1 m in debelino stene 0.50 m,  
 S800T račun za globino vpetja 1 m in debelino stene 0.25 m,  
 S600P račun za globino vpetja 1 m in debelino stene 0.50 m.



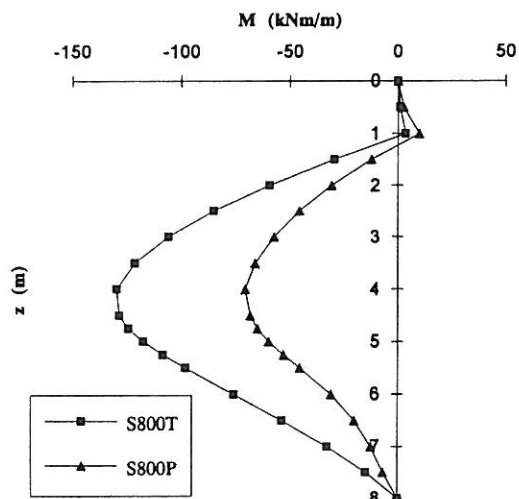
Slika 11. Diagram zemeljskih pritiskov na pilotno steno za primer S600P in S600T (1 m vpetja) - vpliv togosti pilotne stene na razpored zemeljskih pritiskov



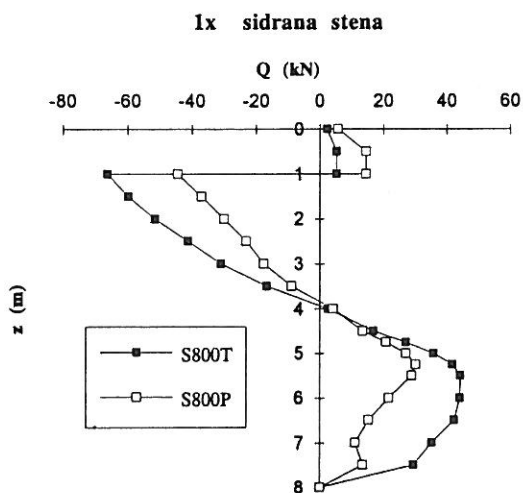
Slika 12. Diagram zemeljskih pritiskov na pilotno steno za primer S800P in S800T (3 m vpetja) - vpliv togosti pilotne stene na razpored zemeljskih pritiskov

Rezultati računskih analiz so prikazani v preglednici 4 in na slikah 11 do 17. Prikazane so naslednje primerjave:

- zemeljski pritiski na podporno konstrukcijo za primera S600T in S600P (slika 11) ter S800T in S800P (slika 12) - prikaz vpliva togosti pilotne stene na razpored zemeljskih pritiskov,
- upogibni momenti v podporni konstrukciji za primera S600P in S600T (slika 13) ter za primera S800P in S800T (slika 15). Pripadajoča diagrama prečnih sil sta na slikah 14 in 16. Prikaz vpliva togosti pilotne stene na razpored notranjih sil,
- deformirana mreža končnih elementov za primer S600P (slika 17).



Slika 13. Diagram upogibnih momentov v pilotni steni za primera S800T in S800P



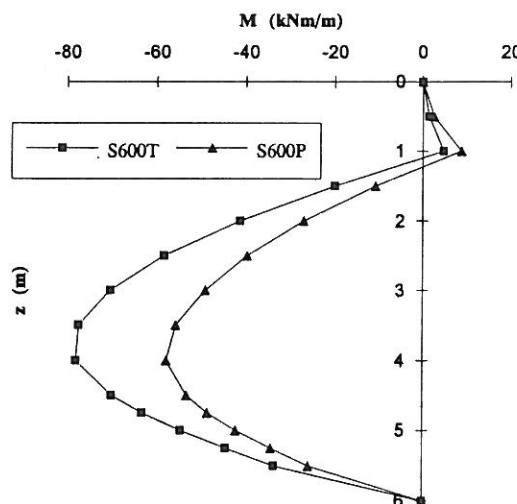
Slika 14. Diagram prečnih sil za primera S800T in S800P

V preglednici 4 podajamo primerjave izračunanih vrednosti sidrnih sil in maksimalnih vrednosti upogibnih momentov za analize po MKE in po klasičnem postopku. Za analize po MKE prikazujemo dodatno še pomike točke B.

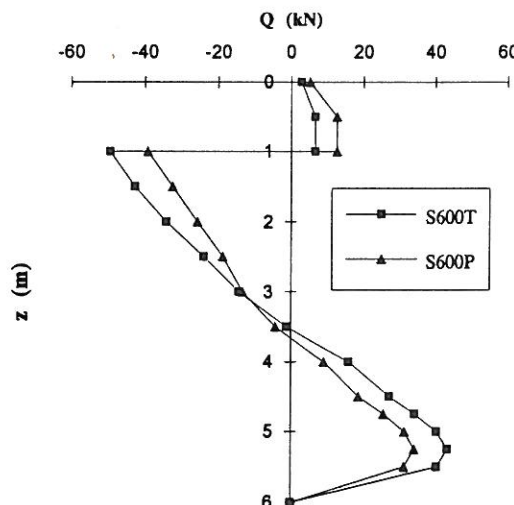
Preglednica 4. Primerjava rezultatov analiz sidrane pilotne stene

Primer	vpetje (m)	$F_s$ (kN)	$M_{max}$ (kNm)	$u_z^B$ (cm)	$u_y^B$ (cm)
S	1.73	39.6	67.9	-	-
SF	3.69	78.3	153.9	-	-
S600T	1.00	57.2	78.1	2.5	4.8
S600P	1.00	56.2	57.9	2.5	4.7
S800T	3.00*	76.0	129.6	1.8	4.0
S800P	3.00*	67.2	70.5	2.2	4.5

\* Globine vpetja nismo računali. Namenoma je bila privzeta večja vrednost, da analiziramo vpliv prekomernega vpetja sidrane stene na velikost sidrne sile, upogibnih momentov ter na prerezoreditev zemeljskih pritiskov.

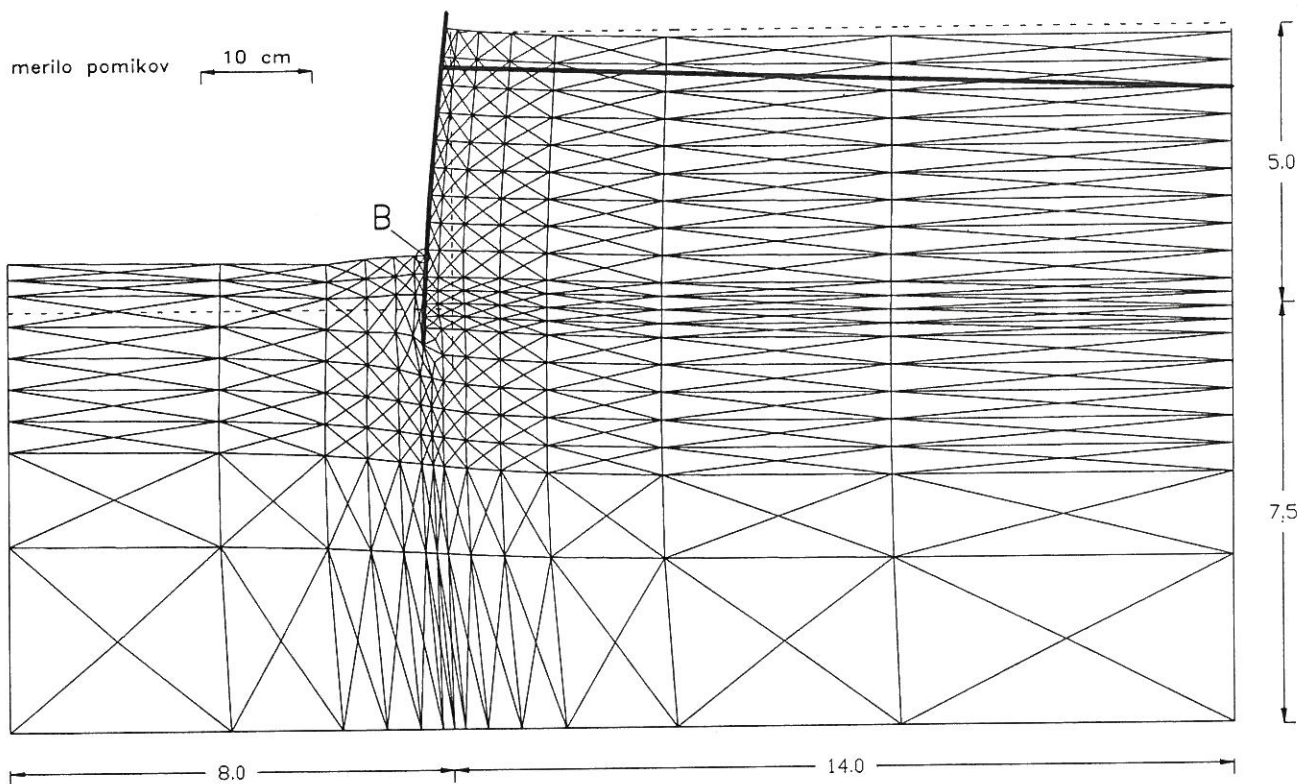


Slika 15. Diagram upogibnih momentov v pilotni steni za primera S600T in S600P



Slika 16. Diagram prečnih sil za primera S600T in S600P





Slika 17. Deformirana mreža končnih elementov za primer S600P. Faktor povečanja pomikov glede na merilo mreže je 20

V primeru S800T in S800P je očitna razlika v stopnji mobilizacije aktivnih zemeljskih pritiskov v zaledju konstrukcije (slika 12). Globina vpetja stene je tolikšna, da ne dovoljuje premikov, ki bi omogočili zmanjšanje zalednih zemeljskih pritiskov do mejnih aktivnih vrednosti. Prav tako je opazno, da se pasivni pritiski zaradi velike globine vpetja ne mobilizirajo v celoti. Vpliv navedenega se kaže v velikih razlikah pri sidrni sili (preglednica 4) in upogibnih momentih kot lahko vidimo iz diagrama upogibnih momentov (slika 13).

Primeri S600T in S600P predstavljata mejno stanje stabilnosti. Vpliv togosti na zemeljske pritiske (slika 11) in sidrno silo je majhen, zmanjša pa se tudi vpliv na upogibne momente v konstrukciji (slika 15). Pripadajoče prečne sile v pilotni steni so prikazane na sliki 16, na sliki 17 pa še deformirana mreža končnih elementov za računski primer S600P.

Iz diagramov zemeljskih pritiskov, upogibnih momentov in in vrednosti sidrnih sil je očitno, da povečanje globine vpetja omejuje velikost pomikov, kar rezultira v povečanih aktivnih zemeljskih pritiskih, to pa povzroči povečanje sidrne sile, prečnih sil in upogibnih momentov v konstrukciji. Povečanje globine torej povzroči povečanje globalne varnosti konstrukcije (globalna stabilnost, prevernitev, dvigi terena na strani izkopa pred pilotno steno, itd.), istočasno pa se zmanjša varnost same pilotne stene in sider saj se povečajo notranje sile in preti nevarnost izgube lokalne stabilnosti posameznih konstrukcijskih elementov pilotne stene.

Iz primerjave rezultatov elastooplastičnih analiz in rezultatov, dobljenih s klasično metodo, lahko sklepamo, da smo pri uporabi ustreznih varnostnih količnikov na varni strani. Pri izračunu s polnimi nemobiliziranimi strižnimi karakteristikami smo pri globini vpetja

in upogibnih momentih na varni strani, sidrne sile pa so lahko večje od računskih. Vzrok je v povečanju pritiskov v okolici sidra. Povečanje pritiskov v okolici sidra je v splošnem odvisno od razmerja med deformabilnostjo sidra in zemljine, kakor tudi od prednapetja sidra, ki lahko povzroči znatne prerazporeditve napetosti v zaledju stene. Na podlagi tega lahko tudi zaključimo, da sta uporaba relativno velikega varnostnega količnika za dopustno sidrno silo in preizkusna obremenitev sidra upravičena.

## ZAKLJUČEK

Elastoplastična analiza po metodi končnih elementov je koristen pripomoček pri analizi pilotnih sten in omogoča presojo vpliva parametrov na deformacijsko in napetostno stanje v zemljini, v pilotni steni in sidru. Izvedene analize potrjujejo teoretične osnove in pojasnjujejo temeljni princip vpliva interakcije med zemljino in konstrukcijo. Zaključkov izvedenih analiz pa kljub temu ne gre sploševati saj je vpliv deformabilnosti zemljine na rezultate lahko izjemno velik. Znatni so lahko tudi vplivi gostote mreže končnih elementov, izbira končnih elementov (stopnja interpolacije pomikov), izbran konstitucijski model, robni pogoji, itd. Poleg tega moramo vedeti, da tudi najbolj zahtevne računske analize in parametrične študije ne veljajo dosti, če jih ne potrdijo meritve na objektih.

## PRIZNANJA

Avtorja sta mlada raziskovalca na Katedri za mehaniko tal z laboratorijem pri FAGG. Pričujoči prispevek je nastal v okviru raziskovalne naloge "Konsolidacija in lezenje tal", ki jo, tako kot raziskovalno usposabljanje obeh avtorjev, financira Ministrstvo za znanost in tehnologijo Republike Slovenije. Mentorju doc.dr. Bojanu Majesu se zahvaljujemo za koristne nasvete pri nastajanju tega dela.

## LITERATURA

- Jumikis, A. R. (1964). *Mechanics of Soils*, D. Van Nostrand Company, Canada.
- Logar, J., Pulko, B. (1993). Elastoplastična analiza pilotnih sten, Zbornik 1. posvetovanja slovenskih geotehnikov, Bled, .
- Majes, B., Pulko, B. (1992). Statična analiza in dimenzioniranje pilotnih sten s pomočjo računalnika, Zbornik 6. seminarja Računalnik v gradbenem inženirstvu, Ljubljana, 106-111.
- Šuklje, L. (1984). *Mehanika tal*, Univerza v Ljubljani, FAGG, Ljubljana.