

# NUMERIČNA ANALIZA PRENOSA VERTIKALNE OBTEŽBE V TLA PO KOLU NUMERICAL ANALYSIS OF LOAD TRANSFER FROM PILE INTO THE SOIL

GEZA VOGRINČIČ, doc. dr., Oddelek za matematiko in mehaniko, FNT

**POVZETEK:** V prispevku prikazujemo aplikacijo hkratne rešitve difuzijske in ravnovesnih enačb po metodi končnih elementov pri analizi prenosa osne tlačne obtežbe po vertikalnem kolu v heterogena temeljna tla.

**SUMMARY:** The paper presents the application of the simultaneous solution of diffusion and equilibrium equations by the finite element method, on analysis of transfer of compressional axial load along the vertical pile to the surrounding heterogeneous soil.

## UVOD

V tem prispevku želimo predstaviti del obširne študije, ki obravnava analizo prenosa obtežbe v tla po kolu. Kompleksno izvršeno analizo osamljenega (posamičnega) tlačno obremenjenega vertikalnega votlega armiranobetonskega kola s premerom  $\phi$  70 cm, osnovano na hkratni rešitvi difuzijske in ravnovesnih enačb, bomo prikazali na dveh primerih. Prispevek po svoji vsebini sodi v problematiko globokega temeljenja, navezuje se pa tudi na referat B. Majesa "Uporaba metode končnih elementov v geotehniko", ki je uvrščen v 2. glavno temo tega strokovnega posvetovanja.

## UPORABLJENA TEORETIČNA IZHODIŠČA

Ne da bi v podrobnosti ponavljali v omenjenem referatu popisane osnove metode končnih elementov, naj povdarimo le najvažnejša teoretična izhodišča numeričnih izračunov, ki jih želimo prikazati v nadaljevanju:

Uporabljen je računalniški program OSA razvit na FAGG, ki aplicira hkratno rešitev difuzijske in ravnovesnih enačb po metodi končnih elementov, na osnosimetrične deformacijsko-napetostne pogoje. Reološke sovisnosti nelinearnih viskoznih zemljin po nelinearnem Kelvinovem modelu so za monotono naraščajoča napetostna stanja izražene z družinama deformacijskih izotah, t.j. s sovisnicami med oktaedričnimi normalnimi napetostmi, normalnimi oktaedričnimi deformacijami in hitrostmi iz-

prememb oktaedričnih normalnih deformacij, ter s sovisnicami med strižnimi oktaedričnimi napetostmi, strižnimi oktaedričnimi deformacijami in njihovimi hitrostmi. Upoštewane so propustnosti zemljin v odvisnosti od njihovih, glede na obremenitve spreminjajočih se poroznosti in trdnosti zemljin po Mohr-Coulombovi zakonitosti. Program upošteva končni element trikotne oblike s šestimi vozlišči za pomike (dve komponenti pomika v ortogonalnih smereh po radiju  $r$  in globini  $z$ ) in s tremi vogalnimi vozlišči za presežne porne tlake. Število vseh prostostnih stopenj je 15.

## PRIMER 1

V Primeru 1 smo diskretizirali kol z oznako PAB 3 in dvoslojno zemljinско telo z mrežo trikotnih končnih elementov, ob upoštevanju na sliki 1 prikazanih dimenzij in robnih pogojev. Račun je bil najprej izvršen za določene, s preiskavami ugotovljene reološke parametre, prikazane v preglednici 1. Obremenjevanje kola s tlačno osno silo je potekalo po stopnjah (slika 2). Za začetno napetostno stanje okolne zemljine po zabitju kola nismo imeli na voljo nobenih podatkov, saj tovrstnih meritev med preizkusnim obteževanjem kola nismo opravili. Zaradi tega smo izvedli najprej tri izračune A1, A2 in A3 v katerih smo za sorazmernostni koeficient  $k^*$  med navpično normalno napetostjo in horizontalno normalno napetostjo upoštevali alternativno vrednosti  $k^* = \nu/(1 - \nu)$  ( $\nu$  ... Poissonov količnik), nato  $k^* = 0.5K_p$ , kjer je  $K_p$  koeficient pasivnega zemeljskega pri-

tiska in končno še za  $k^* = 1$  (torej hidrostatsko stanje napetosti).

Kot prikazujejo vzporedne računske sovisnice pomikov glave kola in obtežbe  $P$  (slika 3) se izmerjeni najbolj približa izračun A3, t.j. račun z vrednostjo  $k^* = 1$ .

Podobno je tudi pri vzporeditvi prenosa obtežbe oz. normalnih osnih napetosti  $\sigma_{zz}$  vzdolž kola (slika 4).

V nadaljevanju računske analize smo v izračunu "B" upoštevali za sloj zemljine v neposredni bližini trupa kola (10 cm oddaljenosti) rezidualno strižno trdnost, v računu "C" pa še kontaktne elemente ob trupu kola (po predlogu Desaia). V tem primeru je soglasje z izračunanimi pomiki in izmerki, kot kaže slika 5, dobro. Ugodnejša je tudi vzporeditev časovnih sovisnic pomikov in raznosa obtežbe vzdolž kola (slika 6). V okviru te numerične analize smo ugotovili tudi potek normalnih napetosti  $\sigma_{zz}$  v radialni smeri od kola, časovne sovisnice presežnih pornih tlakov in upad presežnih pornih tlakov  $\pi$  z oddaljenostjo od kola v radialni smeri (slika 7). Iz slike 8 so razvidne podrobnosti deformirane mreže končnih elementov ob nogi kola in tendenca usedanja okolnih tal in kola pod določeno obremenitvijo kola.

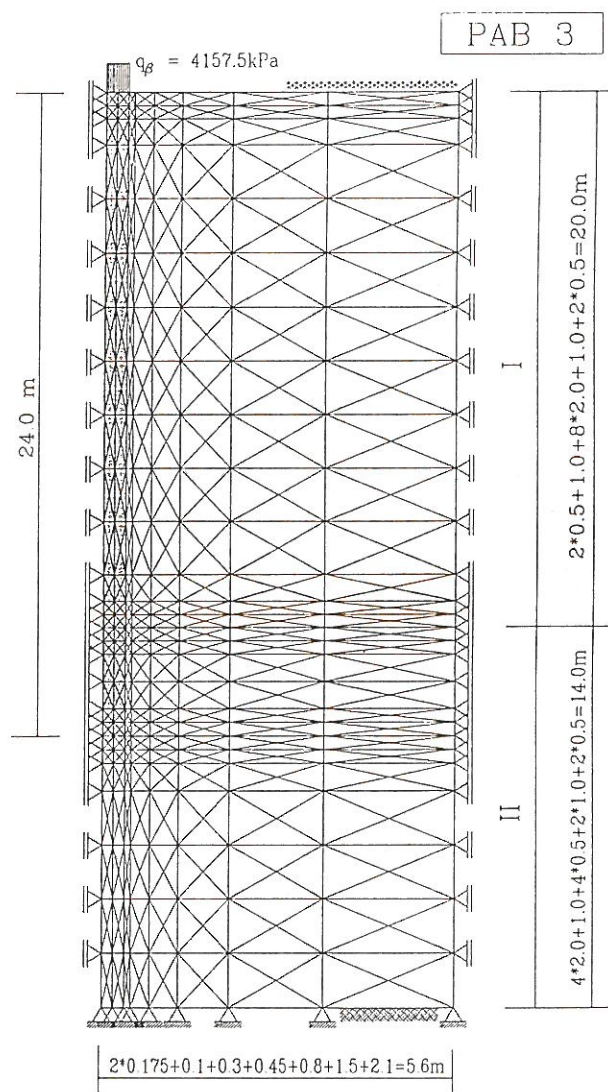
Preglednica 1. Reološki parametri za zemljini ob kolu PAB 3

SLOJ (zemljina)	I	II
<b>Poroznost in propustnost:</b>		
$e_{in}$	2.12	0.61
$k_1$ (m/s)	$3.062 \cdot 10^{-13}$	$2.554 \cdot 10^{-21}$
$k_2$	3.18	40.74
$\kappa$	1.2	1
<b>Deformacijski in trdnostni parametri:</b>		
$a$ (kPa)	288	6509
$b$	3.7	14.2
$f$ ( $h = \tau_f^0$ ) ... zakonitost "A"	10.14	-
$f$ ( $h = 1$ ) (kPa) ... zakonitost "B"	-	9650
$d$ (kPa)	-	205
$c'$ (kPa)	8	29
$\varphi'$ (°)	14	21
<b>Viskoznostni parametri:</b>		
$a_1$	$2.07 \cdot 10^{-3}$	$8.29 \cdot 10^{-5}$
$b_1$ (1/kPa)	$7.34 \cdot 10^{-6}$	$7.72 \cdot 10^{-7}$
$t_{0e}$ (s)	$10^5$	$10^5$
$m$	-0.002	-0.002
$f_1$	$7.42 \cdot 10^{-3}$	$2.27 \cdot 10^{-4}$
$g_1$ (1/kPa)	$1.596 \cdot 10^{-5}$	$2.043 \cdot 10^{-6}$
$h_1$	0	0
$t_{0\gamma}$ (s)	$10^5$	$10^5$
$n$	-0.002	-0.002

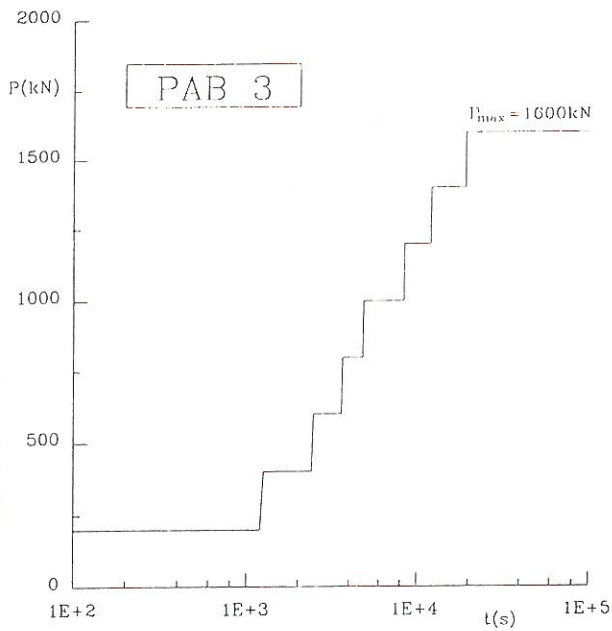
Iz izolinijs količnikov varnosti  $F$ , ki je definiran s kvocientom med strižno odpornostjo zemljine in doseženo strižno napetostjo v obravnavani točki ( $F = \tau_f^0 / \tau^0$ ) v področju noge kola pa lahko ugotovimo kje prične, pri dovolj veliki obtežbi, plastifikacija zemljine (slika 9).

## PRIMER 2

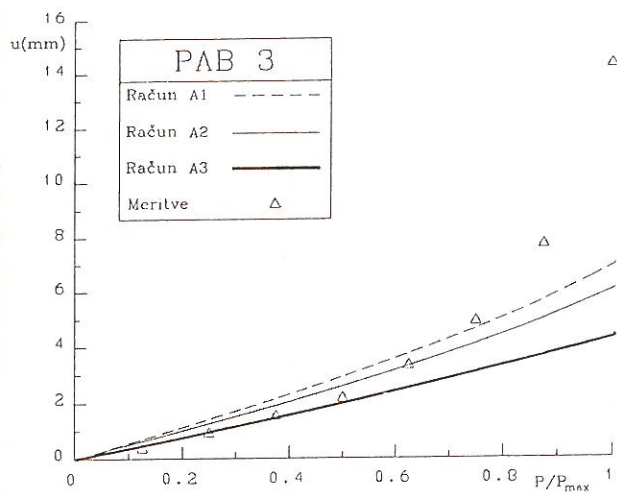
V Primeru 2 smo obravnavali podobno vrsto dobro instrumentiranega kola z oznako PAB 1, ki je bil zabiti v štirislojna tla; sloja I in III sestavljajo koherentne, sloja II in IV pa nevezljive zemljine. Slika 10 prikazuje za ta primer mrežo končnih elementov in slika 11 časovni potek obremenjevanja kola z osno silo. Od izvršenih izračunov in primerjav bi posebej omenili le ugotovitve,



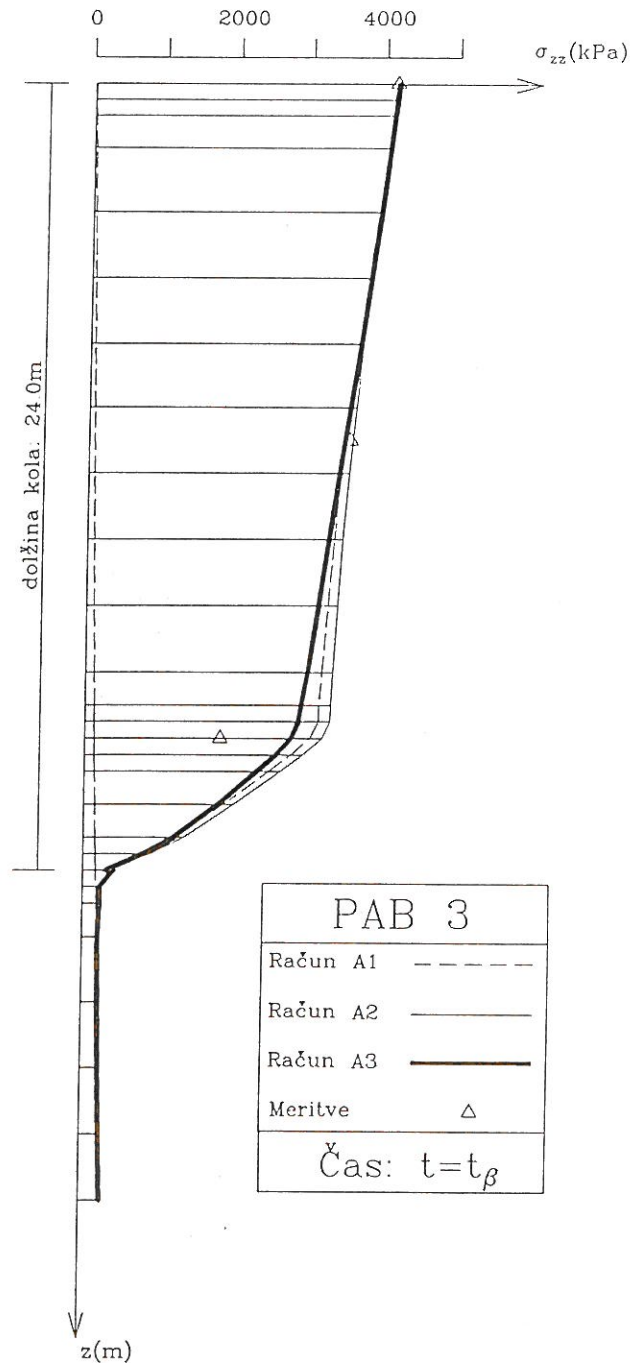
Slika 1. Mreža končnih elementov za dvoslojno zemlinsko telo



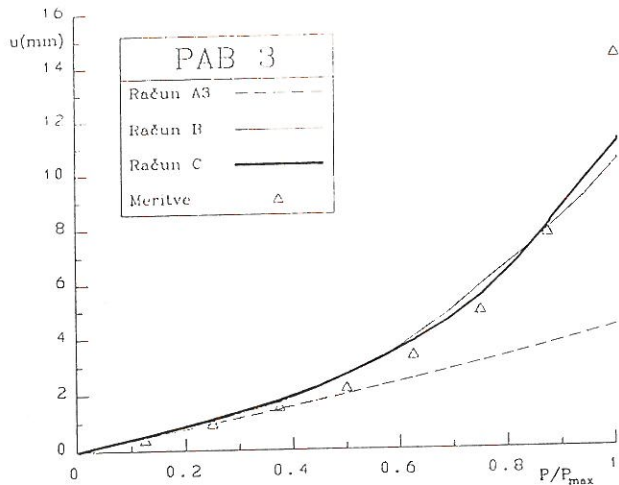
Slika 2. Časovno naraščanje obtežbe P na glavi kola



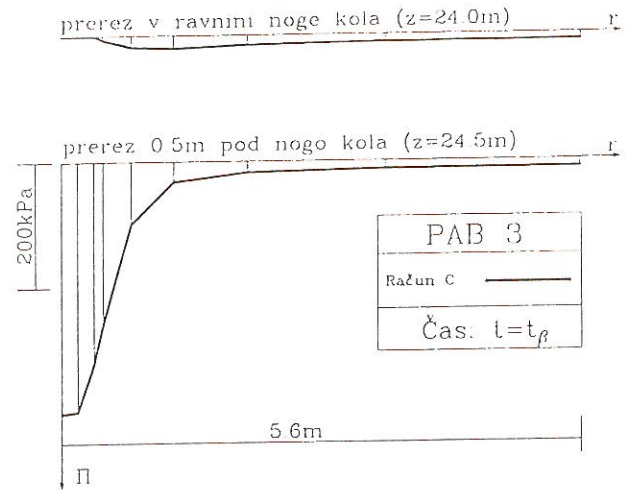
Slika 3. Vzoreditev izračunanih navpičnih pomikov glave kola PAB 3 (računski primeri A1, A2 in A3) ob koncu posamezne bremenske stopnje P, ( $P_{max}=1600$  kN)



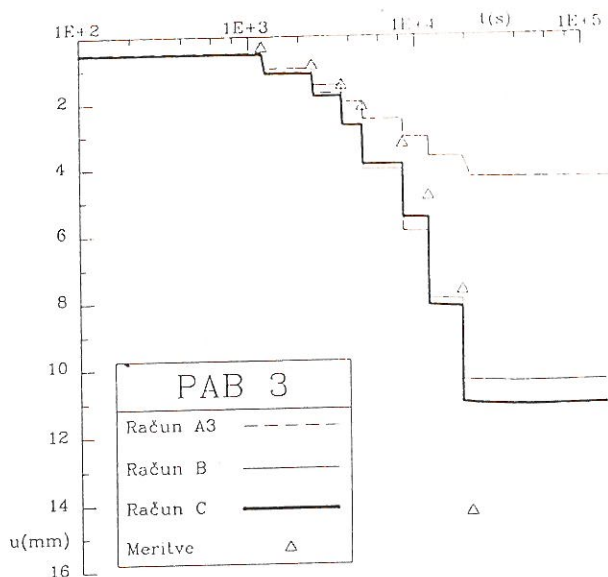
Slika 4. Potek normalnih navpičnih napetosti vzdolž osi kola PAB 3 ( $P_{max}=1600$  kN)



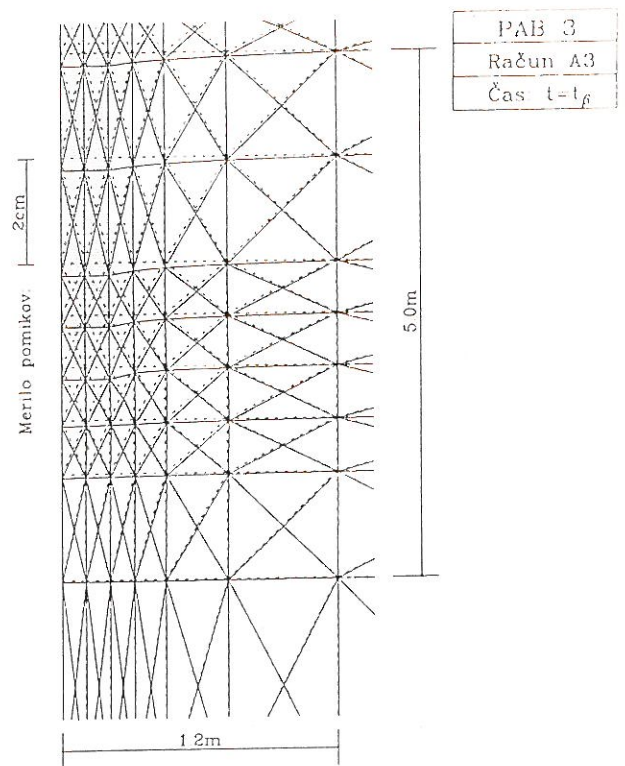
Slika 5. Vzporeditev izračunanih (primeri A3, B in C) in izmerjenih navpičnih pomikov glave kola v posamezni bremenski stopnji  $P$ , ( $P_{max} = 1600$  kN)



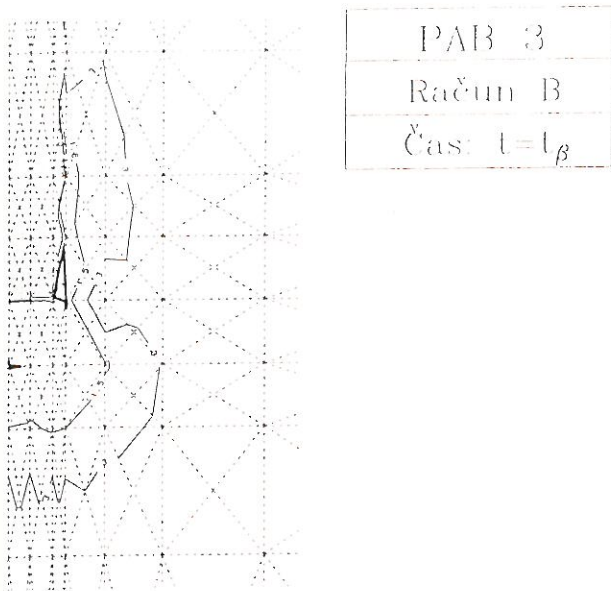
Slika 7. Upad presežnih pornih tlakov z oddaljenostjo od kola PAB 3 (za obtežbo  $P=P_{max}$ )



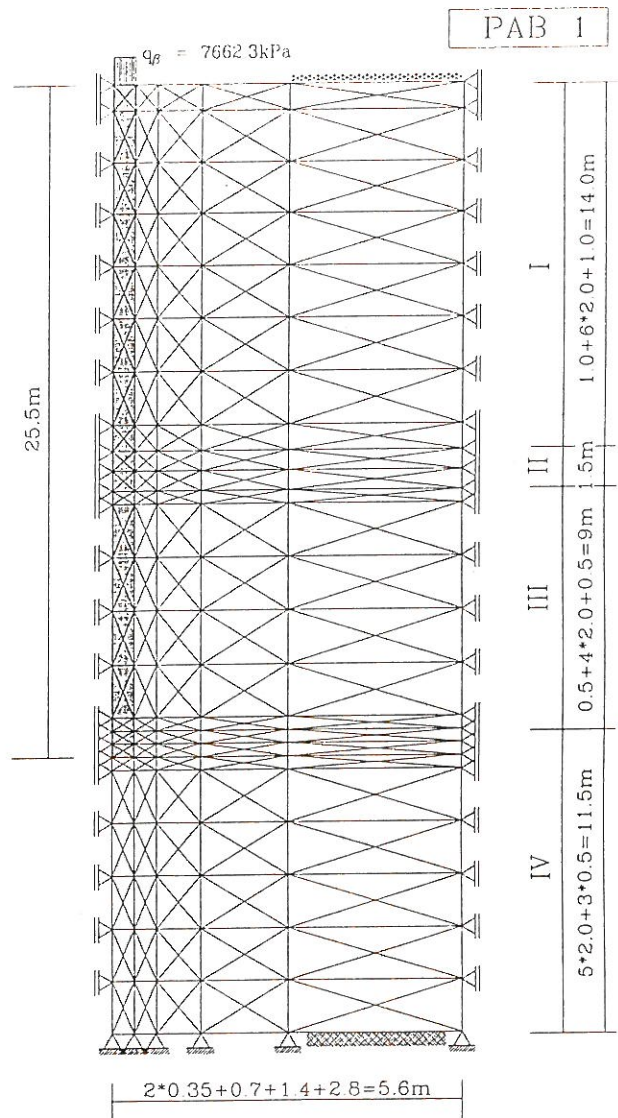
Slika 6. Časovne sovisnice izračunanih in izmerjenih pomikov glave kola PAB 3;  $u=u(t)$



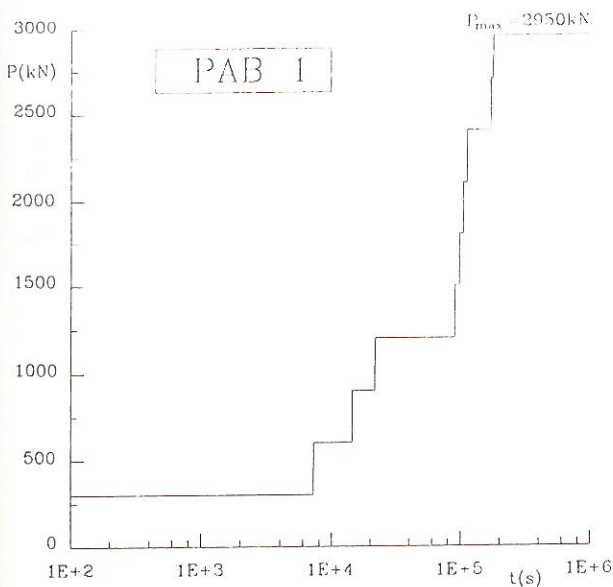
Slika 8. Podroben prikaz deformirane mreže končnih elementov v področju ob nogi kola PAB 3, za računski primer A3



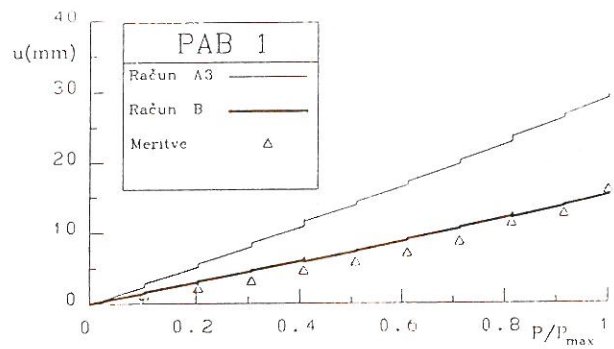
Slika 9. Izolinije količnikov varnosti  $F$  v področju noge kola PAB 3, za računski primer B



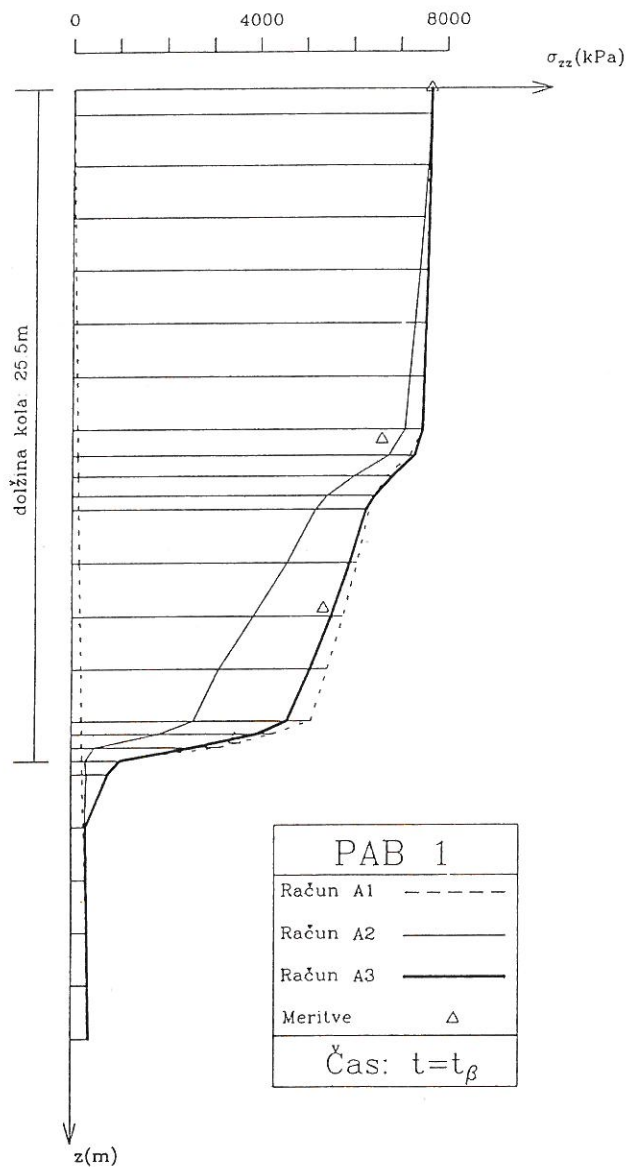
Slika 10. Mreža končnih elementov za štirislojno zemljinsko telo in kol PAB 1



Slika 11. Časovno naraščanje obtežbe  $P$  (tlačna sila) na glavi kola PAB 1

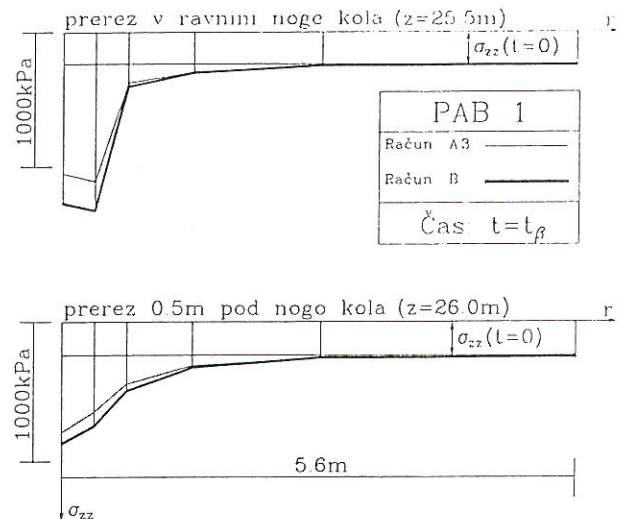


Slika 13. Vzoreditev izračunanih navpičnih pomikov glave kola PAB 1 v posamezni bremenski stopnji  $P$  ( $P_{max}=2950$  kN)



Slika 12. Potek normalnih navpičnih napetosti vzdolž osi kola PAB 1 ( $P_{max} = 2950$  kN)

da smo pri variiranju začetnega napetostnega stanja prišli do podobnih ugotovitev kot v Primeru 1. Torej



Slika 14. Potek navpičnih normalnih napetosti v radialni smeri

najugodnejši so izračuni s koeficientom  $k^* = 1$  (slika 12). Vendar dobimo za ta kol, ki poteka tudi skozi nevezljive peščeno prodnate sloje z izmerki pomikov dobro soglasje le v primeru izračunov "B" (slika 13), kjer smo upoštevali povečanje kompresijskega  $K$  in strižnega modula  $G$  nekoherentnih slojev II in IV, zaradi dejstva, da se med zabijanjem kola nekoherentne zemljine zgoščijo. Razliko za oba izračuna v poteku navpičnih normalnih napetosti  $\sigma_{zz}$  v radialni smeri prikazuje slika 14.

V obeh obravnavanih primerih smo ugotovili, da je upoštevan vpliv viskoznostnih lastnosti koherentnih zemljin za obravnavan čas minimalen.

## LITERATURA

- Majes, B. (1990). Dvodimenzionalna konsolidacija nelinearnih viskoznih zasičenih zemljin, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Ljubljana.
- Vogrinčič, G. (1992). Analiza prenosa obtežbe v tla po kolu, Doktorska disertacija, Univerza v Ljubljani, Ljubljana.