

RAZVOJ PROGRAMSKOG SISTEMA *GeoData2*: GEOMEHANIČKI PRORAČUNI PONAŠANJA TLA

Miroljub Samardaković

Rezime: Opisan je originalan programski sistem za geomehaničke proračune ponašanja tla: nosivost tla plitkih temelja i šipova, sleganje, konsolidacija i pokazatelji interakcije tla ispod plitkih temelja, stabilnost kosina i pritisci na potporne konstrukcije u seizmičkim uslovima. Sa kompatibilnim sistemom *GeoData1*, za određivanje pokazatelja svojstava tla, sistem omogućava savremeno rešavanje većine zadataka primenjene Mehanike tla na nivou višem od konvencionalnog i pogodan je za istraživanje pojedinih uticaja na rešenja. Analizirani su namena, potencijali i pravci daljeg razvoja sistema.

Ključne reči: ekspertni sistemi; mehanika tla; temelji; kosine; potporni zidovi.

Abstract: A original knowledge-based (expert) system for geomechanical calculations of soil behaviour is described: bearing capacity, settlement, consolidation and interaction coefficients beneath shallow foundations, slope stability, soil pressures in seismic condotions. With the compatible system *GeoData1*, for soil parameter determination, the system enables to solve the most of currently soil mechanics problems and separate parameter influence examination and can be used to assist with the interpretation of geomechanical data determinated by site and laboratory tests. The role and potential of the system are discussed.

Keywords: knowledge-based systems; soil mechanics; foundations; geoslopes; retaining walls.

1 UVOD

Posle mnoštva konvencionalnih kompjuterskih programa za rešavanje pojedinačnih zadataka u građevinskoj geotehnici, složenost i međusobna povezanost tih zadataka uslovili su, a buran razvoj hardvera i softvera omogućio, stvaranje većeg broja programskih sistema za primenu u raznim oblastima geotehnike. Kad su ovi sistemi sa unutrašnjom organizacijom (*bazom znanja, kontekstom i mehanizmom zaključivanja*) drugačiji od konvencionalnih programa i namenjeni su korisnicima sa znanjima većim od prosečnih, mogu se nazvati *ekspertnim* ili, realnije, *knowledge-based* sistemima.

U uslovima neophodnog korišćenja široke i obimne teorijske i tehničke osnove (baze znanja), potrebe određivanja, prikaza i ocene velikog broja

parametara od značaja za zaključivanje i izbora mehaničkih i matematičkih modela tla, kao i izrade obimnijih i raznovrsnijih proračuna ponašanja tla kao dela građevinskog objekta, u svetu je poslednjih godina u toku razvoj određenog broja ekspertnih sistema (čije su opšte i posebne karakteristike prikazane npr. prema Moula, Toll, Vaptismas, 1995 i Toll, 1995 i novijim).

Nezavisno od tih rezultata (zbog prekinutog dugogodišnjeg uvida u inostranu periodiku) i u krajnje skromnim materijalnim i kadrovskim mogućnostima za izvršenje takvih (timskih) zadataka, u Laboratoriji za geotehniku Instituta GAF u Nišu autor je razvio kompatibilne sisteme *GeoData1*, za određivanje i prikaz geomehaničkih pokazatelja svojstava tla (Samardaković, 1996), i *GeoData2*, za geomehaničke proračune

ponašanja tla plitkih temelja i šipova, u padinama (kosinama) i uz potporne konstrukcije, kojima je obuhvaćena većina zadataka primenjene Mehanike tla.

Sažet prikaz sadržine, forme, mogućnosti sa rezultatima primene i daljeg razvoja ovih sistema dat je u ranijim radovima autora (1996^a, 1996^b).

2 BAZA ZNANJA SISTEMA

Bazu znanja sistema *GeoData2* čini naučna i stručna osnova, ugrađena u vidu jednačina (implicitnih ili eksplicitnih) teorijskih rešenja, numeričkim metodama (regresijom ili interpolacijom) utvrđenih relacija izvorno datih tabelarno ili dijagramima i pojedinačno datih veličina, kriterijuma i definicija koji se primenjuju u geomehničkim proračunima za:

temeljno tlo

- granično i dozvoljeno opterećenje u pogledu loma tla (plitkih temelja i šipova)
- naponi u tlu i sleganja metodom integracije napona, usled dejstva više temelja
- vremenski tok sleganja (konsolidacija)
- sleganja metodom integracije pomeranja
- pokazatelji interakcije tla i temelja konačne krutosti

tlo padina (kosina)

faktor sigurnosti slojevitog, delimično potopljenog tla sa spoljašnjim opterećenjem u seizmičkim uslovima, metodama lamela, za klizne površine oblika:

- kružnocilindričnog, sa određivanjem kritične klizne površine
- poligonalcilindričnog, sa određivanjem međulamelnih sila

tlo uz potporne konstrukcije

granični pritisak (aktivan) i otpor (pasivan) tla za opšti slučaj u seizmičkim uslovima.

Primenjene metode i forma rezultata proračuna sažeto su prikazani u daljem tekstu. Programski sistem se usavršava i proširuje delovima koji ovde nisu prikazani (pritisci na podgradu u rovu, na armirano-betonske zidove, seizmička stabilnost kosina za translatorno kliženje i dr.).

3 PRORAČUNI PONAŠANJA TLA

3.1 TEMELJNO TLO

Dozvoljeno opterećenje u pogledu loma tla

Za proširenu varijantu rešenja Brinch Hansen-a prema Pravilniku o tehničkim normativima za temeljenje građevinskih objekata (1990) i željene parcijalne faktore sigurnosti, dozvoljeni pritisak (q_a) na efektivnom delu kontaktne površine i vertikalna komponenta rezultante (V_a) dobijaju se tabelarno i grafički (Sl.1) za sve oblike (B'/L') efektivne površine i željeno područje vrednosti efektivne širine stope (B') na odabranoj dubini.

DOZVOLJENO OPTEREĆENJE (q_a, V_a) U POGLEDU LOMA TLA

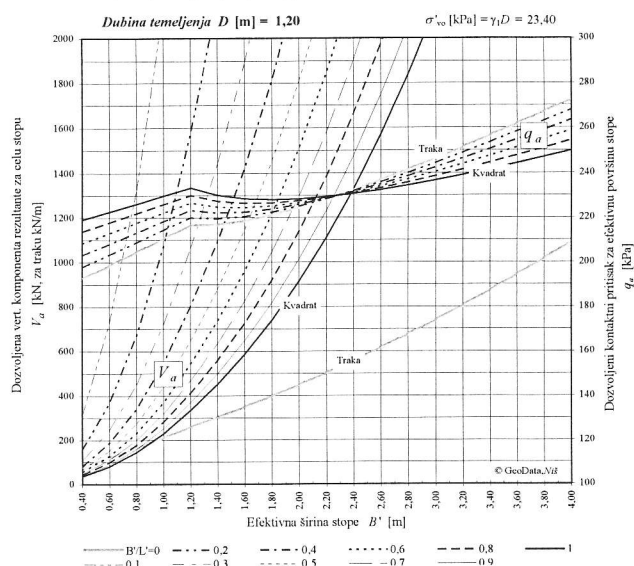
Temelji: Temelji u delu zgrade bez podruma

Računski profil terena: Homogena peskovita glina

DIJAGRAM ZA DIMENZIONISANJE EKSCENTRIČNO OPTEREĆENIH PRAVOUGAONIH STOPE
(Programski sistem *GeoData2*, u skladu sa Pravilnikom [Sl.list SFRJ br.15/1990] i dr.)

F [kN]	k_a [1]	0,05	γ_1 [kN/m ³]	19,50	F_{γ} [1]	2,5	N_{γ} [1]	4,90
H [kN]	H_L [kN]		γ_2 [kN/m ³]	19,50	F_{γ} [1]	1,5	N_{γ} [1]	3,67
M_B [kNm]	M_L [kNm]		c [kPa]	8	e_m [kPa]	3,20	N_c [1]	12,54
H_{lim}/V	H_{lim}/V	0,050	ϕ [°]	25	ϕ_m [°]	17,27	NPT [m]	5,00
$e_B = M_B/V$	$e_L = M_L/V$		$(z/B)_{lim}$	0,59	Fizička površina stope $A = BL$			
$B' = B - 2e_B$	$L' = L - 2e_L$		$(z/B)_{max}$	1,73	Efektivna površina stope $A' = B'L'$			

* Za traku ($B'/L'=0$) su V, H [kN/m] i M [kNm/m] po dužnom metru trake.



Za navedene faktore sigurnosti F_{sc} i F_{sp} dozvoljena vertikalna komponenta rezultante stope $V_a = q_a A' = q_a B'L'$.

Postupak dimenzionisanja stope:

Za datu silu $V = V_a$ (bez seizmike $V/0,80 = V_a$) odabere se B'/L' (ili B'), iz dijagrama očita potrebno B' (ili B'/L') i sačuva $L' = B'/(B'/L')$. Odabere se orijentacija B' i L' i njima dodaju dvostruki ekscentriciteti za te pravce, tako da fizičke dimenzije stope budu $B = B' + 2e_B$, $L = L' + 2e_L$, $B'/(B'/L') = B'/L'$, $B \geq L$, $p = V_a/(BL) \leq q_a$.

Sl.1 Dijagram za dimenzionisanje temelja na osnovu dozvoljenog opterećenja u pogledu loma tla

Takav prikaz omogućava konstrukteru da, sa jednakim faktorima sigurnosti za svaki temelj, za dobijenu komponentu $V=V_a$ i ekscentricitete (e_B , e_L) rezultante i odabrani oblik (B'/L') direktno odredi potrebno B' (i q_a ako ga interesuje) i potrebne fizičke dimenzije stope:

$$B = B' + 2e_B$$

$$L = B'/(B'/L') + 2e_L$$

pri čemu bi, zbog ekscentriciteta, srednji kontakt-ni pritisak bio

$$p = V/(BL) < q_a = V/(B'L')$$

a računski ivični naponi (kakvi se na glini ne mogu ni ostvariti) nisu merodavni.

Za poznate komponente (V, H) i ekscentricitete rezultante sistem sadrži opciju sa rešenjem u vidu dijagrama sa koga se za odabranu jednu fizičku dimenziju stope (B ili L) očitava potrebna veličina druge dimenzije (Sl.2).

DOZVOLJENO OPTEREĆENJE (q_a) U POGLEDU LOMA TLA ISPOD TEMELJA I

Temelji: Temelji u delu zgrade bez podruma

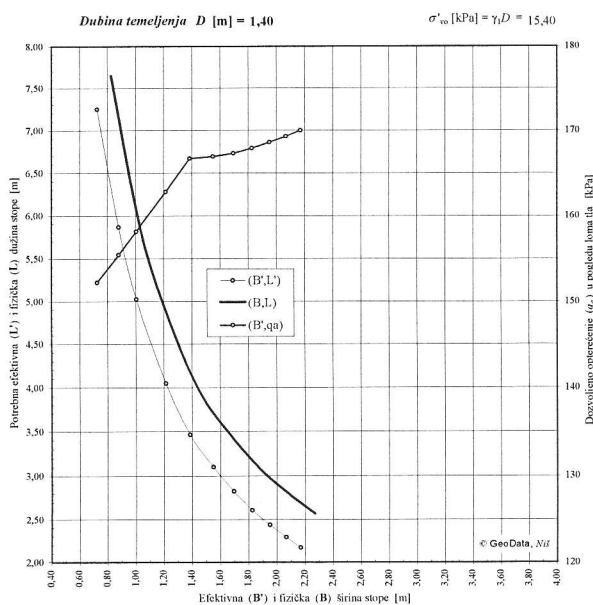
Računski profil terena: Homogena peskovita glina

DIJAGRAM ZA DIMENZIONISANJE TEMELJA I ZA DATO EKSCENTRIČNO OPTEREĆENJE

(Programski sistem GeoData2, u skladu sa Pravilnikom [Sl.list SFRJ br.15/1990] i dr.)

V [kN]	800	H_1 [kN]	0	γ_1 [kN/m ³]	11,00	F_{sc} [1]	2,5	N_q [1]	4,561
H_2 [kN]	40	M_1 [kNm]	160	c [kPa]	10	c_m [kPa]	4,00	N_c [1]	3,301
M_2 [kNm]	40	$e_B = M_2/V$	0,05	ϕ [°]	24	ϕ_m [°]	16,53	N_{pV} [m]	1,00
H_3/V [1]	0,050	H_3/V [1]	0,000	$(Z/B)_{lim}$	0,574	Fizička površina stope	$A = B \cdot L$		
$B' = B - 2e_B$		$L' = L - 2e_L$		$(Z/B)_{max}$	1,71	Elektrivna površina stope	$A' = B' \cdot L'$		

* Za traku po dužinom metru $L' - L' = 1,00$ m: V/H [kN/m], M [kNm/m].



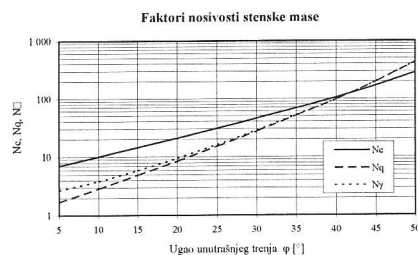
Sl.2 Potrebne dimenzije stope za dato opterećenje

Za temeljenje na čvrsto vezanoj ali oštećenoj steni dijagram dozvoljenog opterećenja u pogledu loma tla (Sl.3) dobija se adaptacijom rešenja za ovakvo tlo (Stagg, Zienkiewicz, 1968 i Bowles, 1982) sa ekvivalentnim parametrima najmanje čvrstoće (c, ϕ) i deformabilnosti (v, E) sloja oštećene stene, određenim postupkom Hoek-a (2000) na osnovu korelacije sa pokazateljima čvrstoće prema uslovu loma Hoek-Brown (Hoek i dr., 2002), izmerenih ili procenjenih pri

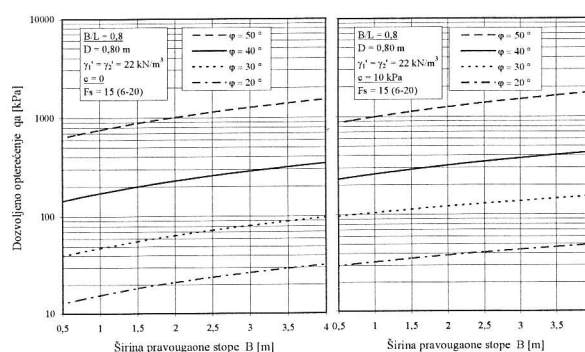
klasifikaciji oštećene stenske mase (vrsta stene, vrsta i stepen oštećenosti, vrsta objekta i dr.).

PRORAČUN DOZVOLJENOG OPTEREĆENJA U POGLEDU LOMA STENSKE MASE ISPOD PLITKOG TEMELJA SA OSNOVOM OBLIKA PRAVUGAONIKA

Terzaghi (1943) + Stagg, Zienkiewicz (1968) + Bowles (1982)



Dozvoljeno opterećenje stenske mase



Sl.3 Dimenzionisanje temelja na oštećenoj stenskoj masi

DOZVOLJENO OPTEREĆENJE ŠIPA U POGLEDU LOMA TLA

Prema Pravilniku o tehničkim normativima za temeljenje građevinskih objekata (1990) Geomehnički programski sistem GeoData2 (ver. II 1999, M.Sam.)

Računski profil terena: B2

Opterećenje na površini
 p [kPa] 0

Površinski sloj (Nasip)
 h_0 [m] 1,00
 γ [kN/m³] 19,00

Srednji sloj (2: 3: Šljunkovita glina)

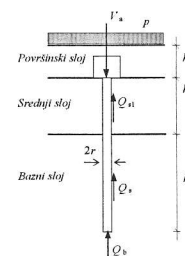
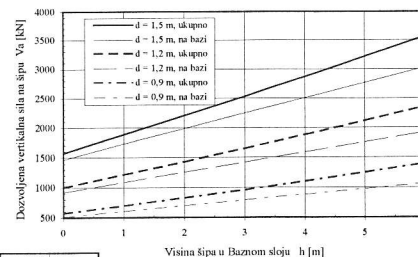
h_1 [m]	4,65	c [kPa]	10	ϕ [°]	21	σ'_p [kPa]	0	F_{sc}	2,5	α m [kPa]	0
γ [kN/m ³]	19,50	c_m [kPa]	10	ϕ_m [°]	21,1	δ [°]	10	$F_{s\delta}$	1,5	δm [°]	6,7
σ'_p [kPa]	0	σ'_p [kPa]	0	σ'_p [kPa]	0	σ'_p [kPa]	0	σ'_p [kPa]	0	σ'_p [kPa]	0
δ [°]	10	δ [°]	10	δ [°]	10	δ [°]	10	δ [°]	10	δ [°]	10
OCR	1	Kos	1	Kos	1	Kos	1	Kos	1	Kos	1

Bazni sloj (4: Dezintegrirani škriljac)

γ [kN/m ³]	21,00	c [kPa]	30	ϕ [°]	30	σ'_p [kPa]	0	F_{sc}	2,5	α m [kPa]	0
γ [kN/m ³]	21,00	c_m [kPa]	30	ϕ_m [°]	30	σ'_p [kPa]	0	F_{sc}	2,5	α m [kPa]	0
σ'_p [kPa]	0	σ'_p [kPa]	0	σ'_p [kPa]	0	σ'_p [kPa]	0	σ'_p [kPa]	0	σ'_p [kPa]	0
δ [°]	15	δ [°]	15	δ [°]	15	δ [°]	15	δ [°]	15	δ [°]	15
OCRb	1	Kob	0,500	Kob	0,500	Kob	0,500	Kob	0,500	Kob	0,500
OCRs	1	Kos	0,500	Kos	0,500	Kos	0,500	Kos	0,500	Kos	0,500

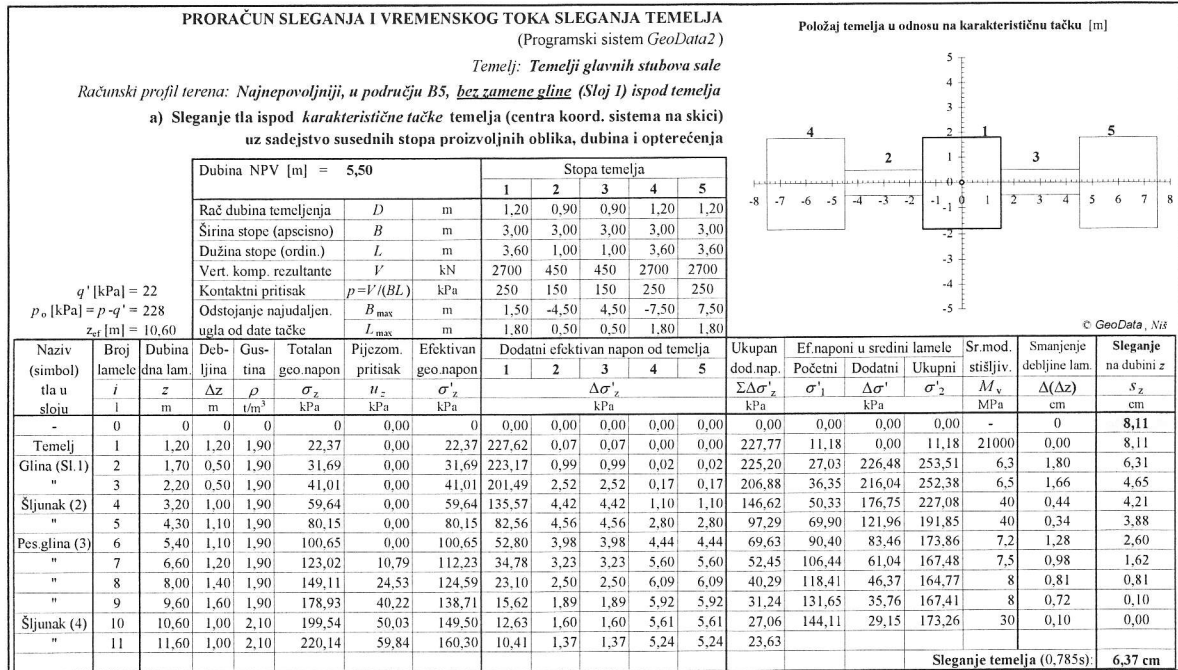
Presek šipa

d [m]	0,90	d [m]	1,20	d [m]	1,50
$r = d/2$ [m]	0,45	$r = d/2$ [m]	0,60	$r = d/2$ [m]	0,75
A [m ²]	0,64	A [m ²]	1,13	A [m ²]	1,77
O [m]	2,83	O [m]	3,77	O [m]	4,71



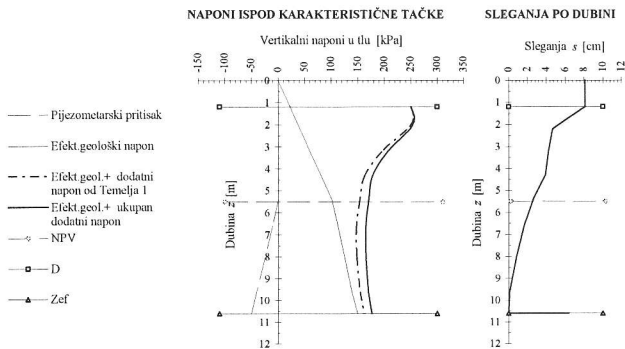
Sl.4 Dimenzionisanje šipova u pogledu loma tla

Za uobičajeni aluvijalni sklop terena, sistemom GeoData2 dobija se i dijagram potrebne dubine bušenih šipova željenog prečnika (Sl.4),



Sl.5a Proračun napona i sleganja tla ispod željene tačke temelja uz sadejstvo susjednih temelja

b) Dijagrami vertikalnih napona i sleganja tla ispod karakteristične tačke, sleganje njenog temelja i dijagram vremenskog toka sleganja



Računsko sleganje tla ispod karakteristične tačke $s [cm] = 8,11$

Računsko sleganje njenog krutog temelja $s_{tem} [cm] = 6,37$

(0,785×s)

Srednji modul stišljivosti $M_{av} [kPa] = 10460$

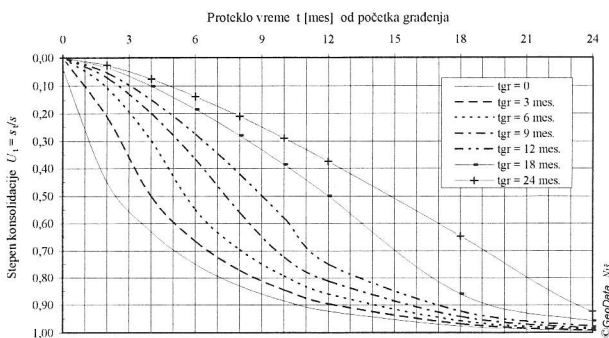
(A_{se}/s)

Srednji koeficijent vodopropustljivosti $k [m/s] = 9,50E-10$

Srednji koeficijent konsolidacije $c_v [m^2/s] = 1,01E-06$

Visina dreniranja $H_{dr} [m] = 5,80$

VREMENSKI TOK SLEGANJA (KONSOLIDACIJE TLA) ZA RAZLIČITA VREMENA GRAĐENJA (NANOŠENJA OPTEREĆENJA)



Sl.5b Dijagrami napona i sleganja u dubini i vremenskog toka sleganja (Sl.5a) za različita vremena građenja objekta

na osnovu dozvoljene vertikalne sile (V_a) u pogledu loma tla, prema rešenju predloženom Pravilnikom za temeljenje (1990), imajući u vidu i detalje iz inostrane stručne literature.

Sleganja tla i temelja

Proračun sleganja može se izvršiti na dva načina:

a) metodom *integracije napona* (vertikalnih dilatacija) u dubini ispod proizvoljne tačke, koji se računaju usled dejstva 1-4 susjedna temelja, međusobno različitih, sa automatskim određivanjem dubine efektivnog dejstva i mogućnošću ručnog unosa modula deformacije (M_v) zavisno od prikazanih napona u lamelama (ili drugačijim postupcima), i

b) metodom *integracije pomeranja* odabrane karakteristične tačke kontaktne površine, za elastičan poluprostor *ekvivalentan* realnom tlu do dubine fektivnog dejstva temelja, čije elastične konstante (ν_u, E_u ili ν', E') su zadate ili su za dati profil određene na osnovu proračuna metodom integracije napona.

Za metodu *integracije napona* u tabelu se unose geometrijski podaci i opterećenja svakog temelja (gornji deo tabele) i, za dobijene promene napona u lamelama/slojevima tla i laboratorijske rezultate, moduli stišljivosti tla (Sl.5a).

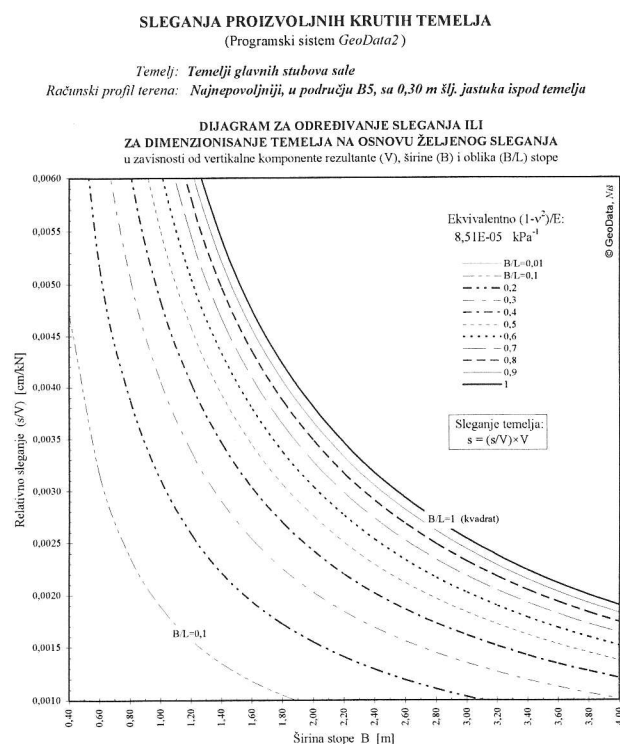
Naponi ispod željene tačke (ispod stope ili pored nje) računaju se na osnovu superpozicije rešenja Boussinesq-a prema Steinbrenner-u tj. Holl-u (1940) (npr. Poulos, Davis, 1974). Sračunati naponi i sleganja tačaka do dubine efektivnog dejstva prikazuju se na dijagramima (Sl.5b), sa korigovanom vrednošću sleganja krutog temelja i srednjim vrednostima M_v i koeficijenta konsolidacije (c_v) za unetu prosečnu vrednost koeficijenta vodopropustljivosti (k) za lamele koje se sležu.

Za visinu dreniranja (H_{dr}), koja se unosi na osnovu dobijene dubine efektivnog dejstva (z_{ef}), na istom prilogu (Sl.5b) automatski se, preko numeričkog rešenja Terzaghi-jeve teorije jednodimenzionalne konsolidacije (npr. Olson, 1986), dobijaju *dijagrami vremenskog toka sleganja* za proizvoljno očekivano vreme građenja objekta (opterećivanja tla).

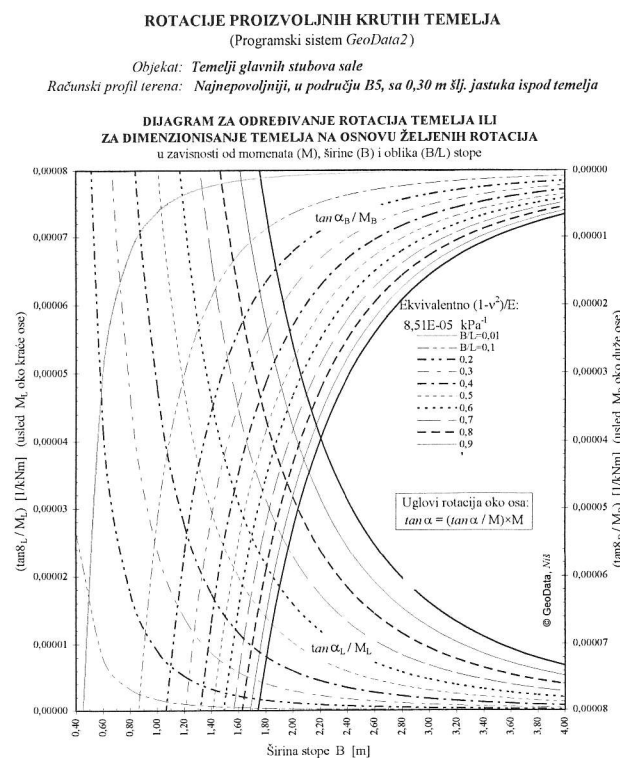
Metodom *integracije pomeranja*, na osnovu veličina koeficijenata sleganja karakterističnih tačaka (ugrađenih nelinearnom interpolacijom), računa se *inicijalno* i *ukupno* sleganje odabrane tačke fleksibilnog temelja ili sleganje krutog temelja. Pošto realnost tog rezultata zavisi pre svega od unetih veličina *ekvivalentnih elastičnih konstanti* tla, one mogu biti povratno sračunate iz rešenja prema Sl.5.

Na Sl.6a i 6b data su i originalna rešenja za određivanje *sleganja i rotacija krutih temelja* za proizvoljne dimenzije (B, L) i opterećenja (V, M_B, M_L) ili za dimenzionisanje temelja na osnovu proizvoljnih opterećenja i željenih (dozvoljenih) veličina takvih pomeranja u datom profilu terena (čije elastične konstante, u prikazanom slučaju, odgovaraju sleganju prema Sl.5).

Pokazatelji interakcije tla i temelja konačne krutosti u statičkim uslovima su *ekvivalentne elastične konstante* (ν, E) za pretpostavku oslanjanja na elastičan poluprstor ili *modul reakcije* (k_s) za oslanjanje na Winkler-ov medijum. Oni reprezentuju tlo do dubine efektivnog dejstva temelja, koja zahvata slojeve različitih svojstava. Za reprezentivni (kruti) temelj objekta, ν i E se određuju unosom sleganja sračunatog integracijom napona (kao na Sl.5) u rešenje za sleganje integracijom pomeranja.



Sl.6a Određivanje sleganja proizvoljnog krutog temelja u datom profilu (kao na Sl.5)



Sl.6b Određivanje rotacija proizvoljnog krutog temelja u datom profilu (kao na Sl.5)

Tako dobijen izraz $(1-\nu^2)/E$ služi i za izradu dijagrama na Sl.6 (Samardaković, 1999^a).

Kao što je poznato, primena *modula reakcije** tla (koeficijenta posteljice) u analizi interakcije temelj-tlo i dalje je široka i opravdana (uz ispravne procene njegove veličine), uprkos grubim pojednostavljenjima pri uvođenju takvog modela tla.

Pošto su *deformabilnost* tla (iskazana modulom reakcije koji zavisi od konturnih uslova deformacije datog tla) i relativna *krutost* temelja međusobno uslovljeni, određivanje modula reakcije tla za temelje konačne krutosti (ploče i grede) mora se vršiti sukcesivnom aproksimacijom tražeći tzv. karakterističnu dužinu tj. *širinu efektivnog dejstva* (B_{ef}) jednog stuba na ploči, unoseći uticaje relativne dubine (D/B) za krupnozrno (tzv. nekoherentno) tlo i oblika kontaktne površine (B/L) za sitnozrno (koherentno) tlo.

PRORAČUN WINKLER-OVOG STATIČKOG MODULA REAKCIJE TLA (K_s)

(Programski sistem GeoData2, deo razvijen prema radu autora, 1991, u skladu sa DIN 4018, 1974, Teng, 1975, Selvadurai, 1979, Scott, 1981, i dr.)

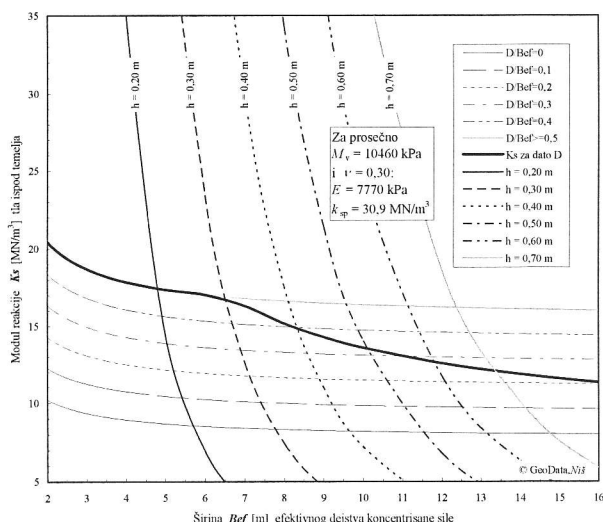
Temelj: Temeljna ploča

Računski profil terena: Kao za proračune sleganja

Dubina temeljenja: $D = 3,30$ m

Polazni modul reakcije: $K_{sp} = 30,9$ MN/m³, nekoherentno tlo

(određen za kvadratnu ploču ivice 0,30 m, na osnovu ekvivalentnog $(1-\nu^2)/E$ iz proračuna sleganja)



Postupak određivanja modula reakcije (K_s) tla ispod temelja konačne krutosti:

Za beskonačno široku temeljnu ploču poznate debljine (h), K_s je ordinata tačke preseka krive koja odgovara toj debljini i najdeblje krive (K_s za dato D), a apsisa (B_{ef}) predstavlja širinu efektivnog dejstva koncentrisane sile na istoj ploči.

Ako je širina ploče (ili manje odstojanje susednih stubova na ploči) $B > B_{ef}$ tada je $K_s = K_s(B_{ef})$, kao napred.

Ako je $B < B_{ef}$ tada je $K_s = K_s(B) > K_s(B_{ef})$ i očita se za B sa najdeblje krive.

Sl.7 Dijagram za određivanje modula reakcije tla u zavisnosti od krutosti temeljne ploče

Na osnovu analize kompetentnih istraživanja, autor (1991, 1999^b) je predložio postupak sa programom za određivanje “racionalne” debljine ploče, debljine za koju se ploča može smatrati krutom kao i *modula reakcije* (k_s) za željenu debljinu ploče i odstojanja stubova na njoj (Sl.7), pošavši od modula reakcije (k_p) koji bi bio dobijen opitom krutom kvadratnom pločom (ivice $B_p = 30$ cm), procenjenog iz literature za dati sastav i stanje tla ili sračunatog za primenjeni kontakti pritisak i $(1-\nu^2)/E$ dobijeno kao napred.

3.2. TLO PADINA (KOSINA)

U ovoj fazi, baza znanja sistema omogućava proračune faktora sigurnosti slojevitog, delimično potopljenog tla, metodama granične ravnoteže lamela, za klizne površine oblika:

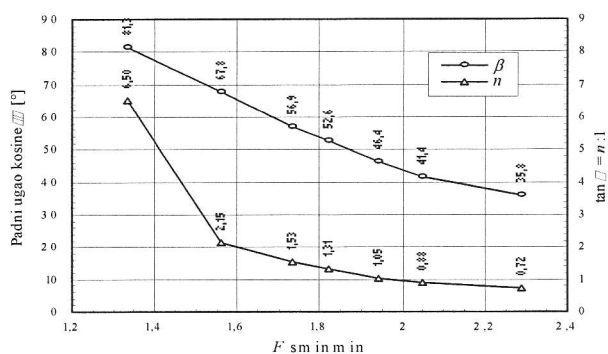
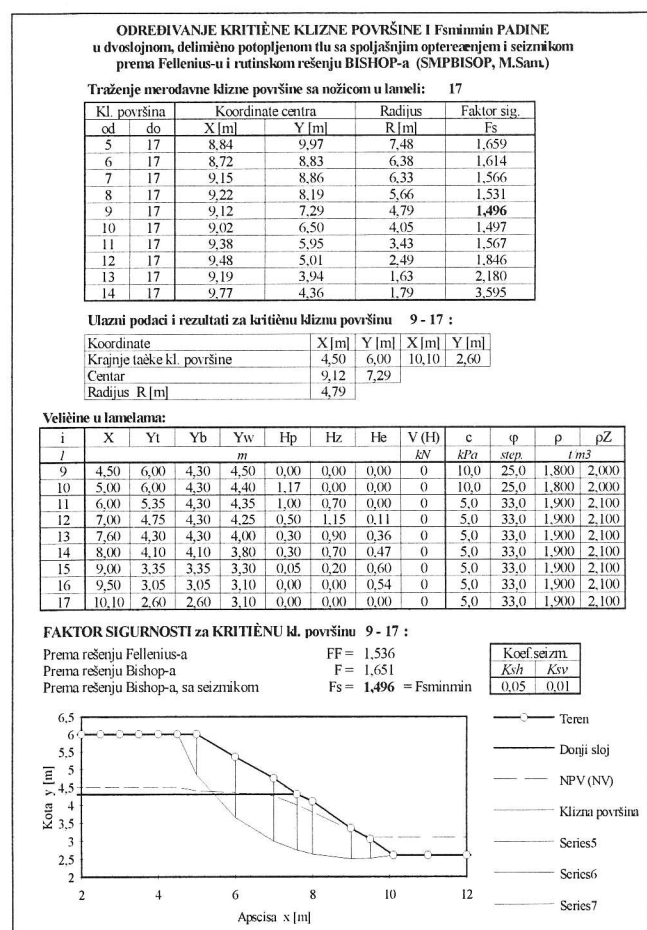
- kružnocilindričnog, sa određivanjem *minimalne vrednosti faktora sigurnosti* i kritične klizne površine *rešenjem Bishop-a* (1954) u okviru koga se dobija, i za iteraciju koristi kao polazno, rešenje prema Fellenius-u (npr. prema Bromhead, 1986),
- poligonalcilindričnog, kojim se aproksimira zadata površina proizvoljnog oblika, *rešenjem Janbu-a* (1954) sa korekcijama prema Janbu i dr. (1956) zbog međulamelnog smičućeg otpora, sa iteracijom određenim *horizontalnim komponentama međulamelnih sila* (prema analizi Chowdhury, 1978).

Oba rešenja proširena su uvođenjem *spoljašnjeg opterećenja i seizmičkih uticaja* (kvazistatičkih), slično preporukama u svetu citiranih autora (Nonveiller, 1979, Maksimović, 1995) u oblasti kosina. Za oba rešenja krajevi kliznih površina su na ivicama lamela, počev od površine terena ili od dna zatežuće pukotine za koherentno tlo (ako se tako odabere), a za određivanje kritične klizne površine poželjan je izbor lamela manjih širina.

Rešenjem Bishop-a kritična klizna površina padine (kosine) traži se za željeno područje lamela, originalnim “tetivnim” postupkom: program prvo za najdužu tetivu (koja spaja početak i kraj klizne površine od polazne do najudaljenije lamele u čijem području tražimo

* Naziv pokazatelja i definicija prema JUS U.B0.100(1998).

rešenje) automatski menja radijus i nađe kritičnu površinu sa najmanjim faktorom sigurnosti (F_{min}) za tu tetivu, zatim ovo ponavlja za sledeće tetive (kliznih tela suženih za jednu krajnju lamelu) i na kraju iz nađenih kritičnih površina izdvaja merodavnu (sa F_{minmin}). Na Sl.8 prikazan je jednostavan primer primene programa za rešenje Bishop-a i kritičnom kliznom površinom (od lamele 9 do 17) sa merodavnim faktorom sigurnosti za analizirano područje padine (lamele 5-19).



Sl.8 Određivanje F_{minmin} rešenjem Bishop-a i dijagram F_{minmin} za različite nagibe (β) visokog zaseka

Rešenjem Janbu-a, za unete geometrijske podatke (apsolutne koordinate ili relativne, merene sa preseku terena) i parametre tla i spoljašnja opterećenja po lamelama dobijaju se tabela sa polaznim detaljima za lamele, tabela sa silama u lamelama i sračunatim i korigovanim veličinama faktora sigurnosti za četiri kombinacije opterećenja (Sl.9).

b) SPOLJ. OPTEREĆENJE I REZULTATI PRORAČUNA PREMA REŠENJU JANBU-A

Objekat: Rezervoar 1

Vertikalni presek: C-D

Klizna površina: 1

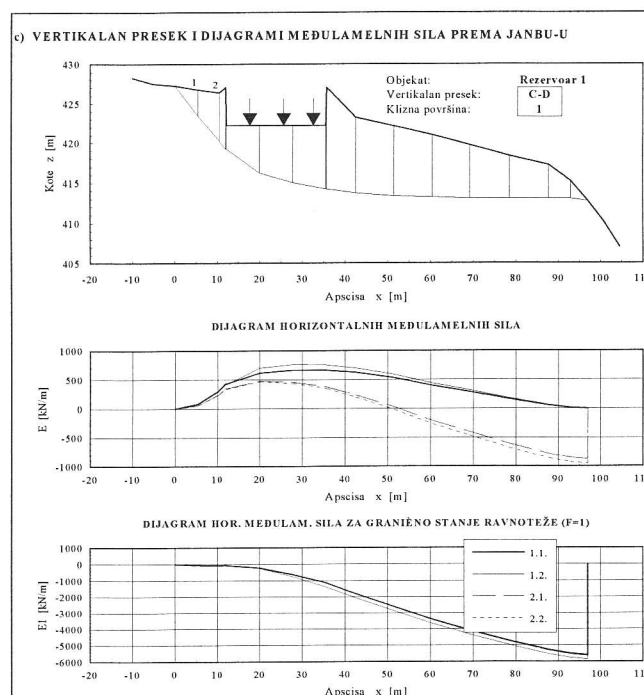
Kota spolj.vode [m]: 400,00

Faktori sigurnosti u pogledu klizanja:

- prema 'rutinskom' rešenju **F**
- korigovan zbog međulamelnih sila (preporučeno uslovno za 1.1.) **F_s = F×f₀**

1. Bez seizmike										2. Sa seizmikom									
1.1. Bez spolj. optereć.					1.2. Sa spolj. optereć.					2.1. Bez spolj. optereć.					2.2. Sa spolj. optereć.				
F = 5,23					F = 4,76					F = 3,19					F = 3,08				
F _s = 5,43					F _s = 4,94					F _s = 3,32					F _s = 3,20				
Oznaka lamele	Težina lamele	Hor. međulamel. sila	Hor. međ. sila za F=	Vertikalna spolj. sila	Horizontalna spolj. sila	Hor. međulamel. sila	Hor. međ. sila za F=	Seizm. težina lamele	Hor. međulamel. sila	Hor. međ. sila za F=	Vertikalna spolj. sila	Horizontalna spolj. sila	Hor. međulamel. sila	Hor. međ. sila za F=					
i	W	E	E1	V	H	E	E1	Ws	E	E1	Vs	HS	E	E1					
i	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m	kN/m					
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
1	184	85	-56	0	0	81	-56	185	61	-56	0	0	58	-56					
2	495	321	-69	0	0	310	-69	500	254	-68	0	0	248	-68					
3	215	433	-57	0	0	419	-57	217	350	-56	0	0	342	-56					
4	22	431	-70	0	0	416	-70	22	346	-69	0	0	338	-69					
5	723	616	-222	392	0	702	-243	730	476	-221	4	27	463	-222					
6	1061	665	-624	392	0	764	-751	1071	454	-626	4	27	435	-627					
7	1206	665	-1128	392	0	756	-1384	1218	376	-1134	4	27	349	-1137					
8	43	661	-1151	0	0	751	-1406	43	369	-1157	0	0	342	-1159					
9	1562	624	-1812	0	0	699	-2067	1578	234	-1824	0	0	198	-1826					
10	1696	529	-2611	0	0	587	-2866	1713	30	-2630	0	0	-16	-2632					
11	1534	390	-3409	0	0	432	-3664	1550	-210	-3434	0	0	-266	-3436					
12	1295	285	-4079	0	0	314	-4334	1308	-403	-4109	0	0	-466	-4112					
13	1150	160	-4730	0	0	177	-4985	1161	-608	-4766	0	0	-679	-4768					
14	910	56	-5275	0	0	62	-5530	919	-780	-5315	0	0	-857	-5317					
15	336	13	-5501	0	0	15	-5756	340	-851	-5542	0	0	-931	-5545					
16	93	0	-5595	0	0	0	-5850	94	-877	-5636	0	0	-958	-5645					

Sl.9a Rezultati proračuna prema rešenju Janbu-a



Sl.9b - Presek terena i međulamelne sile prema Janbu-u za sračunato F_s i potrebne sile za $F_s = 1$

Na Sl.9b dati su presek terena sa zadatom kliznom površinom i dijagrami horizontalnih komponenti međulamelnih sila za sračunate faktore sigurnosti i za graničnu ravnotežu ($F_s = 1$). Međulamelne sile dobijaju se automatizovanom iteracijom i mogu se odrediti i za bilo koju željenu vrednost F_s , čime se procenjuje opterećenje potporne konstrukcije ugrađene na mesto određene (npr. poslednje) lamele.

Ugrađivanjem pristupa tzv. *opšte metode lamela* (GLE) za kliznu površinu proizvoljnog (a time i kružnog) oblika, čijim se specijalnim slučajevima mogu smatrati skoro sve aktuelne metode lamela jer uvode različita pojednostavljenja kako bi zadatak učinile statički jednoznačno rešivim, mogućnosti programskog sistema *GeoData2* znatno će se približiti skupim paketima koje proizvode moćne softverske kompanije, jer metoda konačnih elemenata još uvek nije pogodna za praktičnu primenu. Jedan od ciljeva je i razvoj programa za primenu nelinearnog uslova loma tla.

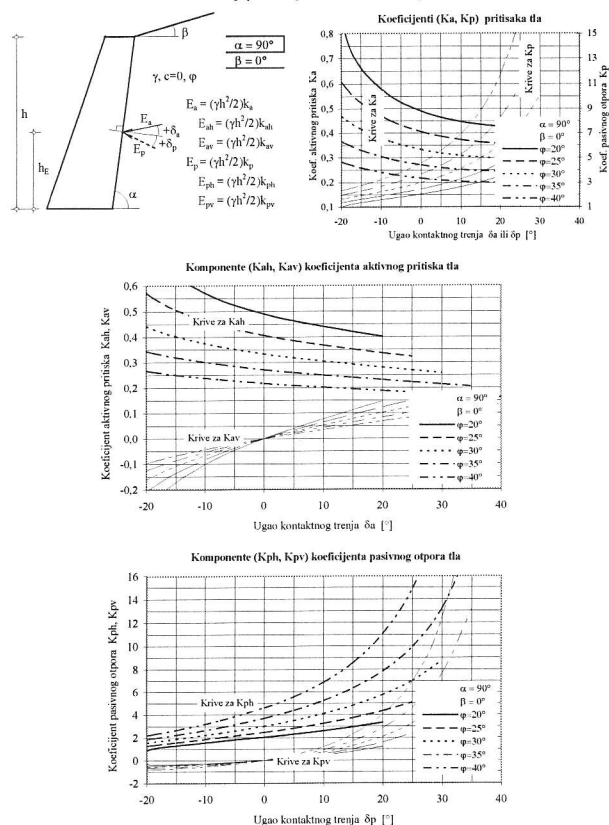
3.3 TLO UZ POTPORNE KONSTRUKCIJE

Ovaj segment sistema sadrži dve grupe rešenja za određivanje *pritisaka tla pri graničnoj ravnoteži* (aktivnog pritiska i pasivnog otpora) u opštem slučaju, za površinu zida proizvoljnog nagiba i kontaktnog trenja i površinu terena sa padnim uglom $|\pm\beta| \leq \varphi$, u seizmičkim uslovima, sa određivanjem kritične površine smicanja, i to:

- rešenja izvedena *prema Coulomb-u*, uz zanemarivanje kohezije tla, prošireno za seizmičke uticaje sa korekcijom smerova inercijalnih sila po teoriji *Mononobe i Okabe* (Fang, Chen, 1995),
- rešenja *Stanciu* (1990), izvedena prema *Coulomb-u*, proširena za uticaje kohezije, adhezije na kontaktu zid-tlo, spoljašnjeg jednakopodeljenog opterećenja i seizmike.

Analiza pojedinih uticaja na opšte rešenje prema *Coulomb-u* može se vršiti prema Sl.10 a primer određivanja pritiska, sila i njihovih komponenti u horizontalnom i vertikalnom pravcu prema rešenju a), prikazan je na Sl.11.

PRIMER ANALIZE PRITISAKA TLA NA ZID ZA OPŠTI SLUČAJ
(Coulomb, 1773 + Müller-Breslau, 1906, Programski sistem *GeoData2*)
Uticaj φ i δ na pritiske za dato α i β



Sl.10 Dijagrami za analizu uticaja na pritiske tla

PRORAČUN PRITISAKA TLA NA POTPORNI ZID U STATIČKIM I SEIZMIČKIM USLOVIMA (Coulomb + Mononobe, Okabe (Fang, Chen, 1995))									
Pokazatelji svojstva tla i terena			Karakteristike zida			Koeficijenti seizmičnosti			
Zapr. težina tla	γ [kN/m ³]	18,50	Ugao kont. trenja	δ [°]	16	Horizontalno	K_h [1]	0,05	
Kohezija	c [kPa]	0	Ugao kont. trenja	δ_p [°]	16	Vertikalno	K_v [1]	0,02	
Ugao un. trenja	φ [°]	28	Visina zida	h [m]	4,00				
Padni ugao terena	β [°]	15	Padni ugao pov. zida	α [°]	85				
AKTIVAN PRITISAK									
U pravcu		Rezultante		Horizontalno		Vertikalno			
Koeficijent pritiska	K_a	1	0,3624	K_{ah}	1	0,3557	K_{av}	1	0,0691
Sila (komponenta)	E_a	kN/m	53,6	E_{ah}	kN/m	52,6	E_{av}	kN/m	10,2
Pritisak u najnižoj zoni	p_a	kPa	26,8	p_{ah}	kPa	26,3	p_{av}	kPa	5,1
Padni ugao sile	αE_a	°	11,0						
Padni ugao površine loma									
	θ_a	°	48,3						
AKTIVAN PRITISAK U SEIZMIČKIM USLOVIMA									
Ugao otklona težine kl. tela		θ_a		°		2,8			
U pravcu		Rezultante		Horizontalno		Vertikalno			
Koeficijent pritiska	K_{as}	1	0,4153	K_{ash}	1	0,4077	K_{asv}	1	0,0792
Sila (komponenta)	E_{as}	kN/m	62,7	E_{ash}	kN/m	61,5	E_{asv}	kN/m	12,0
Pritisak u najnižoj zoni	p_{as}	kPa	31,3	p_{ash}	kPa	30,8	p_{asv}	kPa	6,0
PASIVAN PRITISAK (OTPOR) TLA									
U pravcu		Rezultante		Horizontalno		Vertikalno			
Koeficijent pritiska (otpora)	K_p	1	2,5578	K_{ph}	1	2,3879	K_{pv}	1	0,9166
Sila (komponenta)	E_p	kN/m	378,5	E_{ph}	kN/m	353,4	E_{pv}	kN/m	135,7
Pritisak (otpor) u najn. zoni	p_p	kPa	189,3	p_{ph}	kPa	176,7	p_{pv}	kPa	67,8
Padni ugao sile	αE_p	°	21,0						
Padni ugao površine loma									
	θ_p	°	6,7						
PASIVAN PRITISAK (OTPOR) TLA U SEIZMIČKIM USLOVIMA									
Ugao otklona težine kl. tela		θ_p		°		2,9			
U pravcu		Rezultante		Horizontalno		Vertikalno			
Koeficijent pritiska (otpora)	K_{ps}	1	2,4573	K_{psh}	1	2,2940	K_{psv}	1	0,8806
Sila (komponenta)	E_{ps}	kN/m	356,4	E_{psh}	kN/m	332,7	E_{psv}	kN/m	127,7
Pritisak (otpor) u najn. zoni	p_{ps}	kPa	178,2	p_{psh}	kPa	166,4	p_{psv}	kPa	63,9

Sl.11 Granični pritisak i otpor tla u seizmičkim uslovima

U ovome delu sistema su i rešenja za neposrednu praktičnu primenu, za opšti slučaj pritiska koherentnog tla sa nagnutom površinom i spoljašnjim opterećenjem na kosi zid, npr. prema Gudehus (1980).

4 ZAKLJUČNE NAPOMENE

U sadašnjoj fazi razvoja, sistem *GeoData2* omogućava izradu geomehaničkih proračuna ponašanja (deformacija i uslova stabilnosti) tla u skoro svim tipičnim zadacima građevinske geotehnike. Tako koncipiran, u kombinaciji sa sistemom *GeoData1* (za određivanje i prikaz geomehaničkih pokazatelja svojstava tla, opisanim u prethodnom broju časopisa), uspešno je primenjen u izradi oko 200 geomehaničkih elaborata, ekspertiza i studija za značajne objekte u ovom delu zemlje, dajući projektantima podloge sa znatno boljim izborom, obradom i prikazom potrebnih podataka nego što je u rutinskoj (često banalizovanoj) praksi uobičajeno.

Pri tome se često koristi *povratna* analiza ili "šta-ako", omogućena bazičnim programom *Excel*, čime se, uz grafičke mogućnosti sistema, jednostavno i uspešno uočavaju područja i stepen uticaja i značaj pojedinih ulaznih ili usputnih parametara – što sistem preporučuje za istraživačke svrhe.

S obzirom na opredeljenje da sisteme *GeoData* čine pre svega geotehnička naučno-stručna a zatim programerska rešenja, svojevremena orijentacija na *Excel* pokazala se ispravnom, što se potvrđuje i njegovim sve češćim korišćenjem od strane vodećih svetskih firmi za geomehaničku opremu i proračune.

Intervencijama preko ugrađenog jezika *Visual Basic for Applications*, proširivanjem baze znanja i izradom odgovarajućih interfejsa (korisničkih tabela za unos i zaštitu podataka, čitanje i povezivanje rezultata) dalji razvoj sistema omogućiće još veću primenu u navedenim i drugim oblastima geotehničkih istraživanja i prakse.

U toku je *dorada* sistema, pre svega boljim povezivanjem postojećih komponenta, kao i

proširivanje programima za rešavanje zadataka koje nameće, pre svega, obimna i raznovrsna stručna praksa u raznim oblastima građevinske geotehnike.

LITERATURA

- Bishop, A.W. (1954): The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, *Proc. Europ. Conf. Stability Earth Slopes*, Stockholm, 1, 1-13.
- Bowles, J.E. (1982): *Foundation analysis and design*, McGraw-Hill, Singapore, 167.
- Bromhead, E.N. (1986): *The stability of slopes*, Surrey University press, Glasgow.
- Chowdhury, R.N. (1978): *Slope analysis*, Elsevier, Amsterdam, 143-146.
- Fang, Y.-S., Chen, T.-J. (1995): Modification of Mononobe-Okabe theory, *Geotechnique*, 45, No 1, ICE, London, 165-167.
- Gudehus, G. (1980): *Erddruckermittlung*, *Grundbau Taschenbuch*, 3. Aufl., Teil 1 (Smolczyk, U., herausgeber), Ernst & Sohn, Berlin, 325-326.
- Hoek (2000): *Rock engineering*, Evert Hoek Consulting Engineer Inc., Vancouver, 1-313.
- Hoek, E. i dr. (2002): *Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition*, Rocscience Inc., Toronto, 1-7.
- Janbu, N. (1954): Application of composite slip surfaces for stability analysis, *Proc. Europ. Conf. Stability Earth Slopes*, Stockholm, 3, 43-49.
- Janbu, N., Bjerrum, L. and Kjaernsli, B. (1956): Soil mechanics applied to some engineering problems, *Norwegian Geotechnical Institute, Publ. No. 16*, Oslo, 5-26.
- Maksimović, M.M. (1995): *Mehanika tla*, Grosknjiga, Beograd, 484.
- Moula, M., Toll, D.G., Vaptismas, N. (1995): Knowledge-based systems in geotechnical engineering, *Geotechnique*, 45, No. 2, ICE, London, 209-221.
- Nonveiller, E. (1979): *Mehanika tla i temeljenje građevina*, Školska knjiga, Zagreb, 449-452.
- Olson, R.E. (1986): State of the art: Consolidation testing, in Yong, Townsend (editors), *Consolidation of soils*, ASTM, STP 892, Philadelphia, 11.
- Poulos, H.G., Davis, E.H. (1974): *Elastic solutions for soil and rock mechanics*, John Wiley, New York, 12, 54.
- *** (1990): Pravilnik o tehničkim normativima za temeljenje građevinskih objekata, Sl. list SFRJ, br. 15.
- Samardaković, M. (1991): Racionalna debljina temeljne ploče i statički modul reakcije tla – međusobna zavisnost i dijagrami za njihovo određivanje, *Zbornik radova*, br. 12, Građevinski fakultet, Niš, 257-270.
- Samardaković, M. (1996^a): Geomehnički programski sistemi *GeoData1* i *GeoData2*, *Zbornik radova Međunarodnog naučnog skupa "Pravci razvoja geotehnike"* (Beograd, 1996), Rudarsko-geološki fakultet i Sava centar, Beograd, 395-404.

- Samardaković, M. (1996^b): Razvoj programskog sistema *GeoData1*: Geomehanički pokazatelji svojstava tla, *Nauka+praksa*, br.3, Institut GAF, Niš.
- Samardaković, M. (1999^a): Određivanje pokazatelja deformabilnosti tla za analizu interakcije sa plitkim temeljima (I) – Ekvivalentne elastične konstante tla, *Zbornik radova XXI kongresa JUDIMK*, Beograd, str.211-216.
- Samardaković, M. (1999^b): Određivanje pokazatelja deformabilnosti tla za analizu interakcije sa plitkim temeljima (II) – Modul reakcije tla, *Zbornik radova XXI kongresa JUDIMK*, Beograd, str.205-210.
- Samardaković, M. (2002): Stability analysis of slopes with translational failure surfaces and steady seepage flow, *Proceedings of the 12th Danube-European Conference "Geotechnical Engineering"*, (Passau, 2002), DGGT, Essen.
- Stagg, K.G., Zienkiewicz, O.C. (1968): *Rock mechanics in engineering practice*, John Wiley & Sons, London, 151.
- Stanciu, A. (1990): Une généralisation de la théorie de Coulomb pour le calcul de la poussée et de la butée des terres, *Revue Française de Géotechnique*, No 50, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 39-59.
- Toll, D.G. (1995): The role of a knowledge-based system in interpreting geotechnical information, *Geotechnique*, 45, No.3, ICE, London, 525-531.