

## REOLOŠKE SOVISNOSTI ZA POLŽARICO IZ LJUBLJANSKEGA BARJA

POVZETEK: Mehanske lastnosti Ljubljanskega barja dominantno zaznamuje zelo stisljiv in anizotropen glinast melj v židki konsistenci (MH, MH-CH) - imenovan polžarica. Njegovo nelinearno in časovno odvisno reološko obnašanje je bilo večkrat raziskovano z dolgotrajnimi triaksialnimi laboratorijskimi raziskavami. Časovne sovisnice teh preiskav so prikazane v obliki reološkega modela, ki omogoča natančnejše račune najrazličnejših aplikativnih nalog, predvsem za določanje konsolidacije in stabilnosti barjanskega polprostora.

Prispevek prikazuje uporabo reološkega modela pri gradnji inovativnega plitvega temeljenja na žaluzijskih temeljnih konstrukcijah. Podani so primeri: modelni in obtežni preizkus, prototip in izgradnja tipične stanovanjske sošeske na Ljubljanskem barju.

Prispevek daje pobude za nadaljevanje raziskav z novejšimi triaksialnimi aparaturami, ki omogočajo tudi dinamične obremenitve.

## RHEOLOGICAL RELATIONSHIPS OF SNAIL-CLAY FROM LJUBLJANA MARSHLANDS

SUMMARY: Mechanical properties of Ljubljana marsh are dominantly marked with high compressible and anisotropic clayey silt in liquid consistence state (MH, MH-CH) – called snail-clay. Its non-linear and time depending rheological behaviour was researched several times with long termed triaxial laboratory investigations. Time relationships of these investigations are presented in a form of rheological model, which enables more precise calculations of diverse application problems, especial for determination of consolidation and stability of Ljubljana marshland half-space.

The paper presents application of the rheological model for construction of innovative shallow foundation on hinge-tied foundation structures. Further, examples are presented: model and loading test, prototype, and construction of typical house settlement on Ljubljana marshland.

The contribution gives initiative for continuation of investigations with recent developed triaxial apparatus, which enables also dynamic loading.

## UVOD

Pred 5000 leti, ko je bilo Ljubljansko barje še jezero, je na njem uspevala mogočna kultura koliščarjev. Tam so našli gostoljuben naravni prostor. V 1. stoletju n.š. so se na Barju naselili Rimljani, ki so prvi posegli v naravni prostor. Velikopotezno so izsuševali zemljo, gradili ceste in celo spremenili tok Ljubljanice, da bi bili bližje podpeškemu kamnolomu. Do polovice 18. stoletja je na zamočvirjeno pokrajino stopila le malo katera človeška noga. Barje je spremenilo svojo podobo po obsežnem osuševanju z jarki in predvsem z Gruberjevim prekopom. Pridobljena polja in travniki so kmalu privabili nove prebivalce, in ti so Barju dali svojevrsten pečat tudi z gradnjo hiš na pilotih.

V zadnjih desetletjih se na Ljubljanskem barju išče novi prostor, ki bi naj bil sodobno urbanistično urejen in naseljen predvsem z individualnimi stanovanjskimi hišami. Zaradi tega je bila raziskana nova tehnologija plitvega temeljenja (imenovano "žaluzijsko temeljenje" - na členkasto med seboj povezanih temeljnih ploščah), ki je bila najprej prototipno izvedena in nato uspešno uporabljena pri manjši stanovanjski soseski.

Za reševanje plitvega temeljenja in tudi drugih geotehničnih posegov na Ljubljanskem barju je potrebno dobro poznavanje reoloških odnosov polžarice, ki pretežno sestavlja zemeljski polprostor omenjenega območja. V prispevku so podani rezultati dolgotrajnih triaksialnih preiskav v obliki časovnih sovisnic in reološkega modela, ki je bil uporabljen pri razvoju žaluzijskega temeljenja.

## VZORCI IN PREIZKUŠANCI

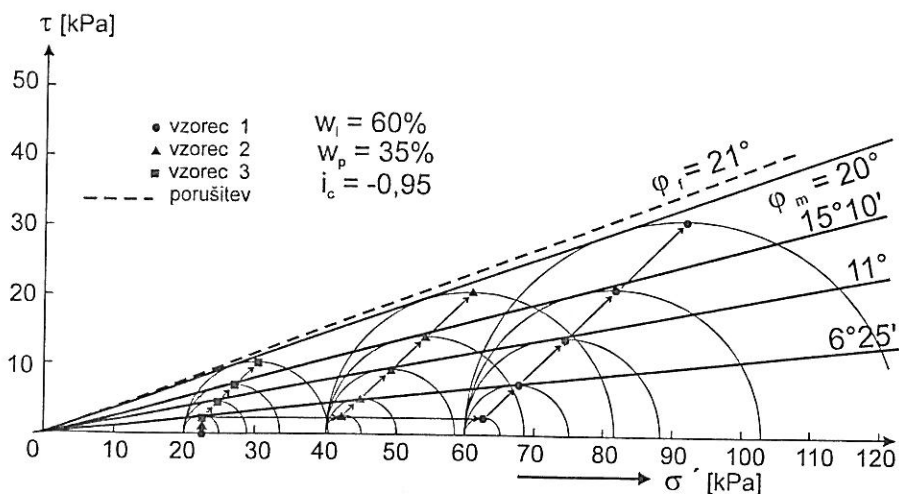
Vzorci so bili odvzeti 3. aprila 1979 z dna izkopa gradbene jame za temelj viadukta preko avtoceste na odseku Ljubljana-Vrhnika (globina 1.80 oz. 2.50 m). Dimenzije vzorca so bile: premer 20 cm ter višina 30 cm. Priprava preizkušancev je bila izvedena istega dne (3. aprila 1979). Dimenzije preizkušancev pa so bile: premer 10 cm ter višina 18 oz. 22 cm. Še istega dne (3. aprila 1979) so bili preizkušanci vgrajeni, in sicer: preizkušanca 1 in 3 v navadno, preizkušanec 2 pa v ekstenzijsko triaksialno celico. Preiskava je potekala do 11. julija 1979. V tabeli 1 so zbrane fizikalne in geometrijske karakteristike vzorcev oz. preizkušancev pred in po preiskavi.

**Tabela 1.** Fizikalne in geometrijske karakteristike preizkušancev

vzorec oz. preizkušanec	pred preiskavo			po preiskavi		
	1	2	3	1	2	3
vlaga vzorca $w$ [%]	93.77	89.61	95.27			
vlaga preizkušanca $w$ [%]	84.50	82.70	93.17	63.06	62.93	80.71
premer preizkušanca $D_0$ [cm]	10.04	10.01	10.02	9.62	10.01	9.83
višina preizkušanca $h_0$ [cm]	21.94	17.65	21.80	20.55	17.65	21.55
specifična gravitacija $G_s$ [-]	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63	2.63
prostorninska teža $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	14.9	15.0	15.2	1.53	1.50	1.49
stopnja zasičenosti $S_r$ [%]	98.99	65.20	104.0	92.24	65.20	96.80

## NAPETOSTNE POTI

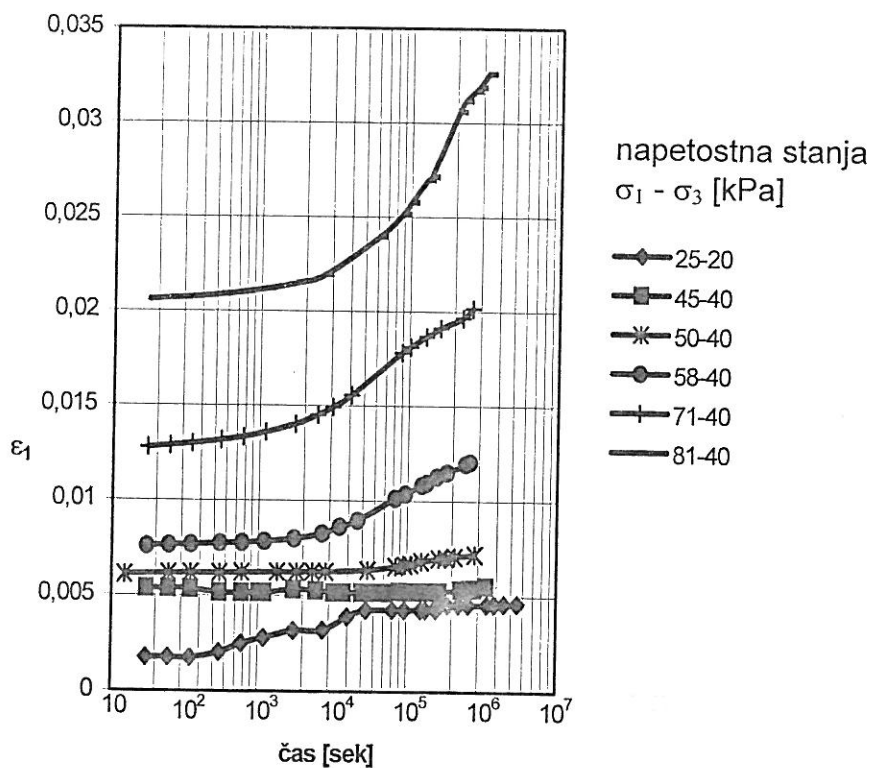
V Laboratoriju za mehaniko tal (leta 1979) na takratni Fakulteti za arhitekturo, gradbeništvo in geodezijo Univerze E. Kardelja v Ljubljani so bili izvedeni triaksialni drenirani počasni preizkusi polžarice (zelo porozne pleistocenske jezerske meljaste gline) po napetostnih poteh, ki so za tri preizkušance prikazane na sliki 1.



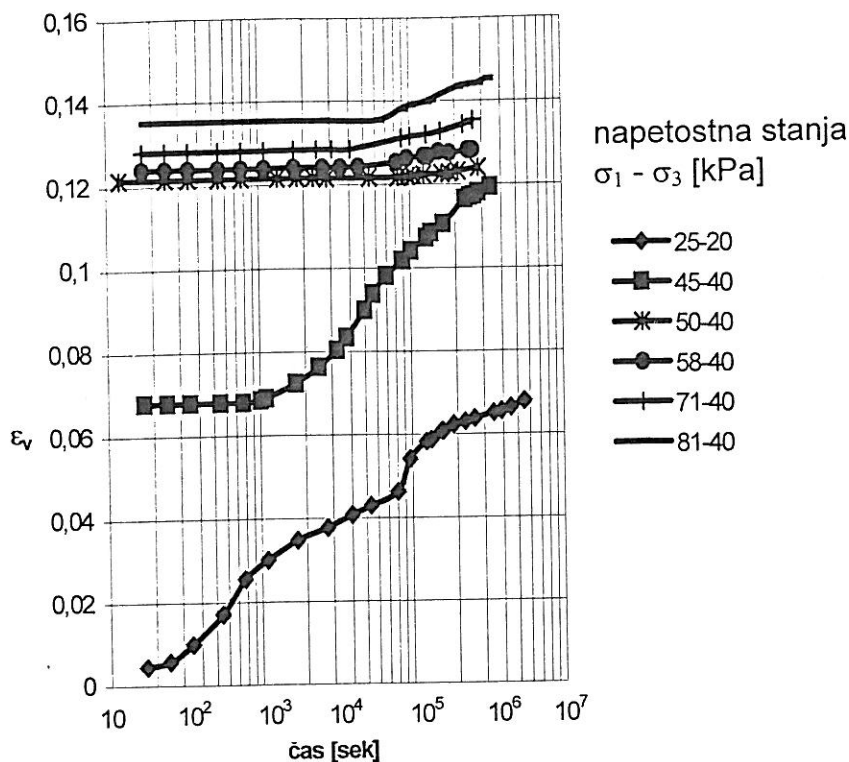
Slika 1. Napetostne poti triaksialnih preizkusov izvedenih s tremi vzorci gline polžarice iz Ljubljanskega barja

### REZULTATI PREISKAV

Delni rezultati odnosov med napetostmi, deformacijami in časom, ki so v splošnem nelinearni in z izrazitim viskozno obnašanjem pri nespremenjenih napetostnih stanjih, so prikazani s konsolidacijskimi krivuljami triaksialnih preizkusov valjastih vzorcev za osno ( $\epsilon_1$ ) in volumsko ( $\epsilon_v$ ) deformacijo na slikah 2 in 3. Podrobnejši podatki o rezultatih konsolidacijskih preiskav so zbrani v Laboratoriju za mehaniko tal na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru.



Slika 2. Osne deformacije ( $\epsilon_1$ ) za drugi preizkušanelec v odvisnosti od časa  $t$ .



Slika 3. Volumska deformacija ( $\epsilon_v$ ) za drugi vzorec v odvisnosti od časa t.

### REOLOŠKI MODEL

Iz znanih osnih ( $\epsilon_1$ ) in volumskih ( $\epsilon_v$ ) deformacij dobimo oktaederske sferne ( $\epsilon^0$ ) in strižne ( $\gamma^0$ ) deformacije po enačbah (Šuklje 1967, 1979):

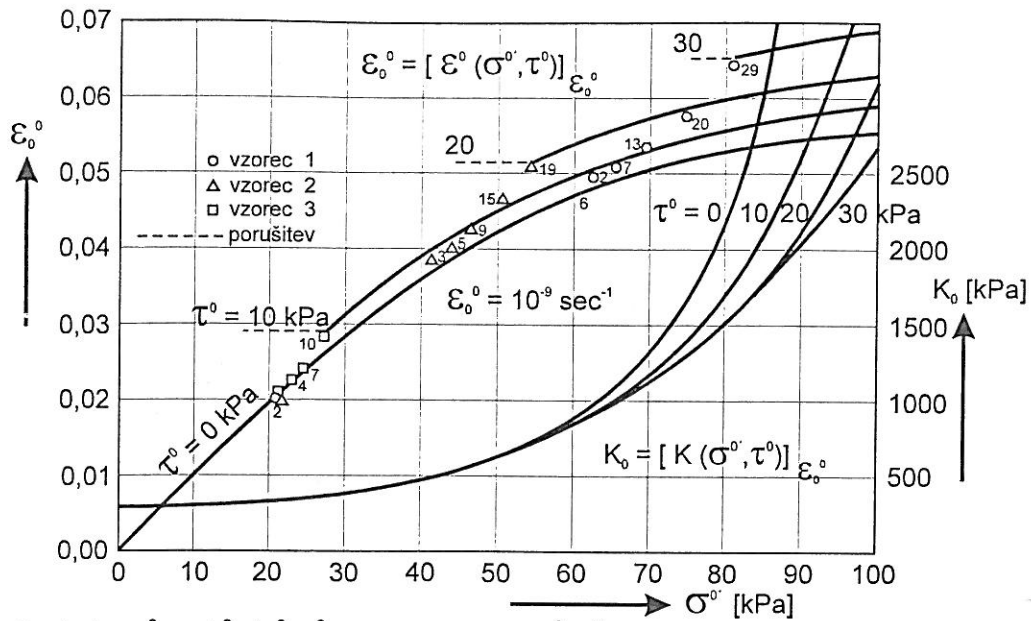
$$\epsilon^0 = \frac{\epsilon_v}{3} = \epsilon_0^0 + \beta_0 \cdot \ln \left( \frac{\dot{\epsilon}_0^0}{\dot{\epsilon}_0^0} \right) \quad (1)$$

$$\gamma^0 = \frac{\sqrt{2}}{3} (3 \cdot \epsilon_1 - \epsilon_v) = \gamma_0^0 + \beta_\gamma \cdot \ln \left( \frac{\dot{\gamma}_0^0}{\dot{\gamma}_0^0} \right) \quad (2)$$

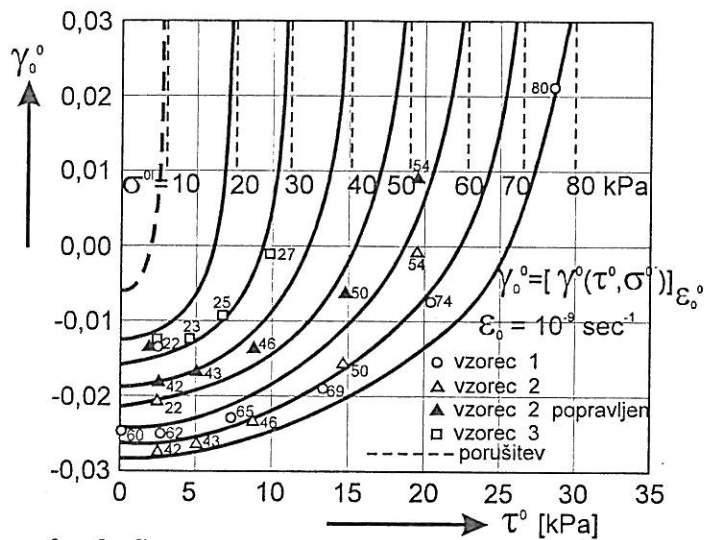
V pogojih dreniranih triaksialnih preizkusov je efektivno napetostno stanje docela določeno z vrednostnima oktaederske sferne ( $\sigma^{0i}$ ) in strižne ( $\tau^0$ ) napetosti. Tako lahko parametre  $\epsilon_0^0$ ,  $\gamma_0^0$ ,  $\beta_0$  in  $\beta_\gamma$  v enačbah (1) in (2) izrazimo kot funkcije spremenljivk  $\sigma^{0i}$  in  $\tau^0$ .

### REOLOŠKE SOVISNICE

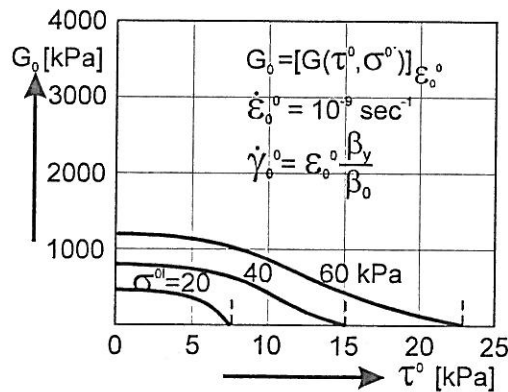
Na način, obrazloženem v predhodnem poglavju so bile iz podatkov preiskave sestavljene družine sovisnic reoloških parametrov in oktaederskih napetosti ter od njih odvisna kompresijski ( $K_0$ ) in distorzijski ( $G_0$ ) modul (glej slike 4 do 8).



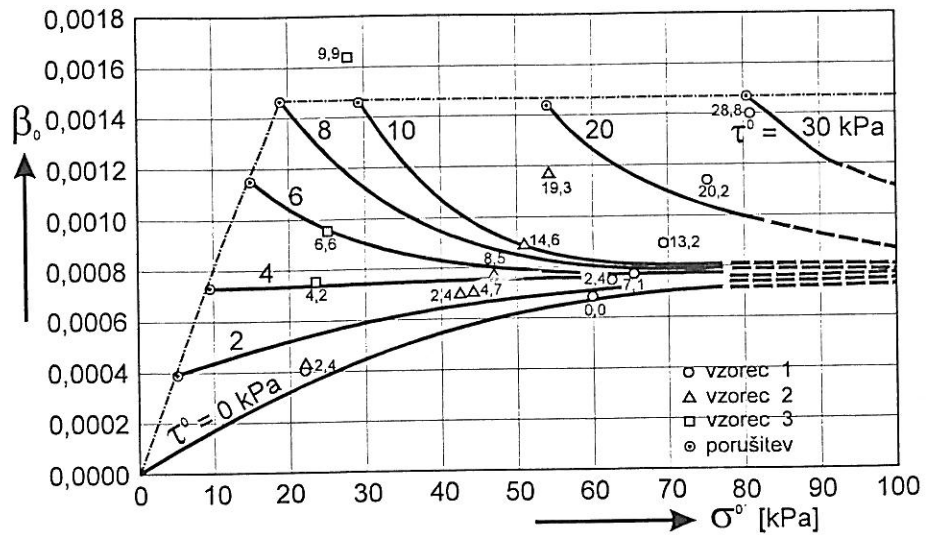
Slika 4. Sovisnice  $\epsilon_0^o = \{\epsilon_0^o(\sigma^o)\}_{\tau^o = \text{const}}$  in  $K_0 = \{K_0(\sigma^o)\}_{\tau^o = \text{const}}$  za monotono naraščajoče napetostne poti  $\{\sigma_\beta^o > \sigma_\alpha^o, (\tau^o/\sigma^o)_\beta > (\tau^o/\sigma^o)_\alpha\}$  triaksialnih preizkusov po sliki 1 pri izbrani  $d\epsilon_0^o/dt = 10^{-9} \text{ s}^{-1}$



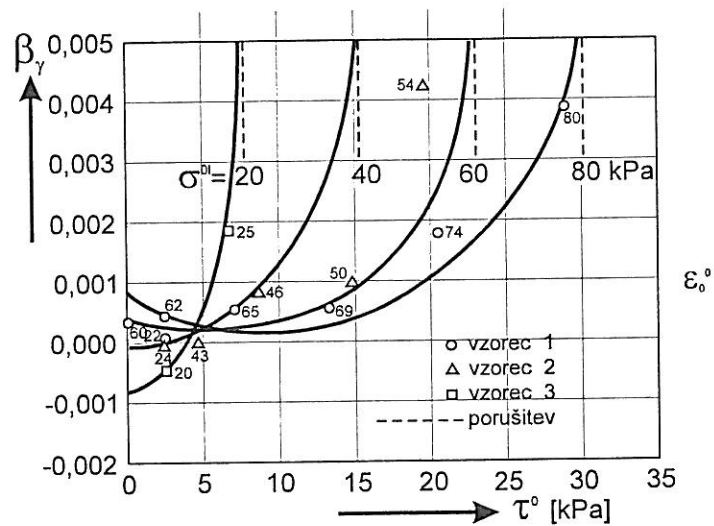
Slika 5. Sovisnice  $\gamma_0^o = \{\gamma_0^o(\tau^o)\}_{\sigma^o = \text{const}}$ , sicer kot pri sliki 4



Slika 6. Sovisnice  $G_0 = \{G_0(\tau^o)\}_{\sigma^o = \text{const}}$ , sicer kot pri sliki 4



Slika 7. Sovisnice  $\beta_0 = \{\beta_0(\tau^0)\}_{\sigma^0 = \text{const}}$ , sicer kot pri sliki 4



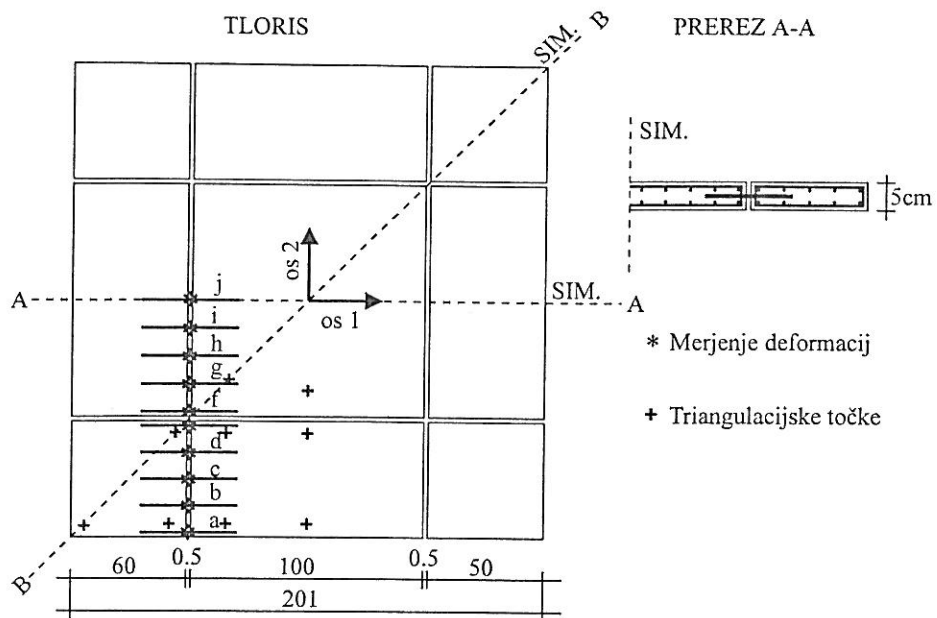
Slika 8. Sovisnice  $\beta_\gamma = \{\beta_\gamma(\tau^0)\}_{\sigma^0 = \text{const}}$ , sicer kot pri sliki 4

### PRIMERI UPORABE

Rezultati laboratorijskih raziskav polžarice, izraženi s podanimi reološkimi sovisnicami (glej predhodno poglavje), so bili uporabljeni pri izgradnji različnih objektov na območju Ljubljanskega barja. Tukaj podajamo nekaj primerov uporabe:

#### Primer modelnega preizkusa

V okviru večletnega raziskovalnega dela je bil izveden modelni preizkus na žaluzijski plošči velikosti 2 krat 2 metra (sliki 9 in 10). Vzporeditve računskih in izmerjenih posedkov so podane na sliki 11.

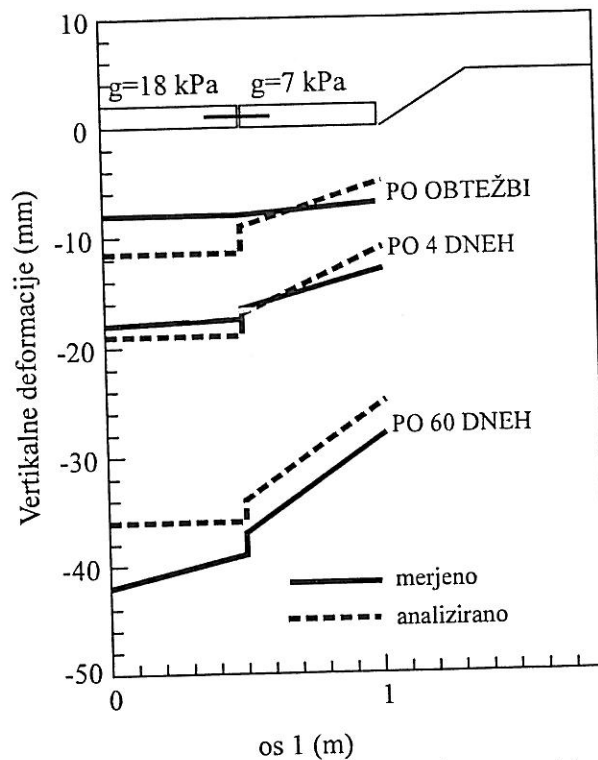


Slika 9. Model žaluzijske plošče



Slika 10. Izvedba modelnega preizkusa





Slika 11. Vzporeditev računskih in izmerjenih posedkov modelnega preizkusa

#### Primer obtežnega preizkusa

Slika 12 prikazuje izvedbo obtežnega preizkusa.

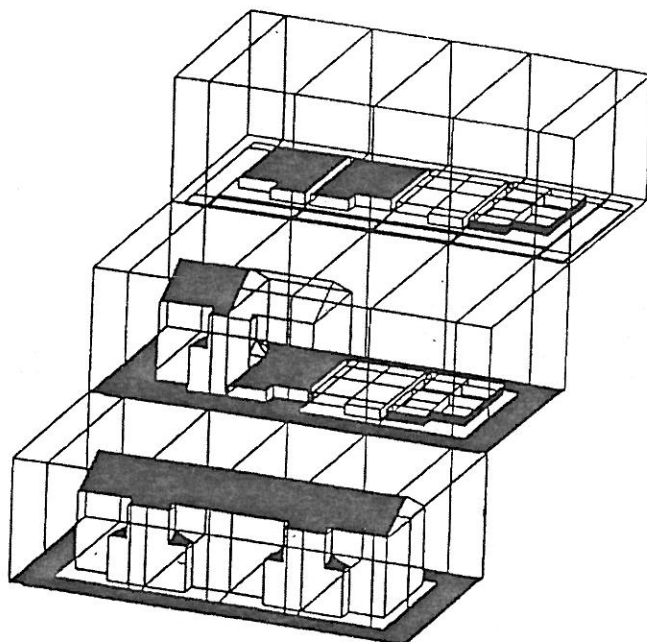


Slika 12. Obtežni preizkus

#### Primer prototipne izvedbe žaluzijskega temeljenja

Leta 1988 je bil izveden prototip plitvega temeljenja na žaluzijskih ploščah za štiri stanovanjske hiše na Jurčkovi poti, kot prikazujeta sliki 13 in 14.





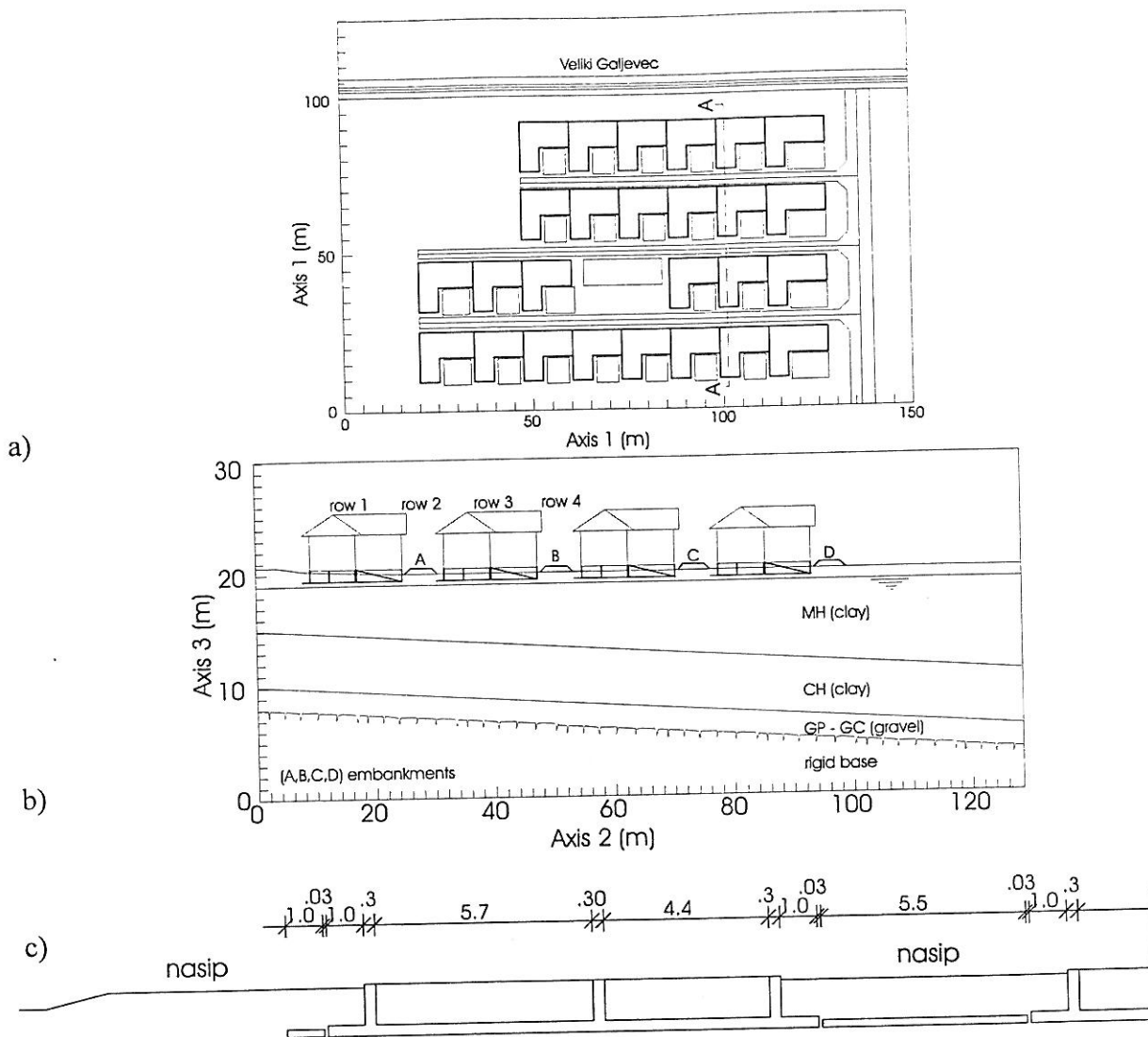
**Slika 13.** Prototip plitvega temeljenja na žaluzijskih ploščah



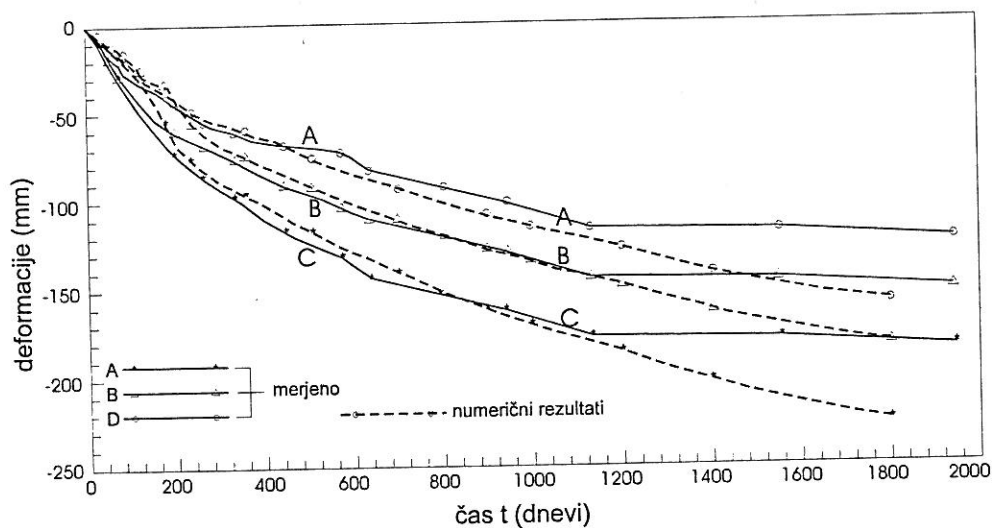
**Slika 14.** Končni izgled prototipne izgradnje

#### **Primer izgradnje stanovanjske soseske**

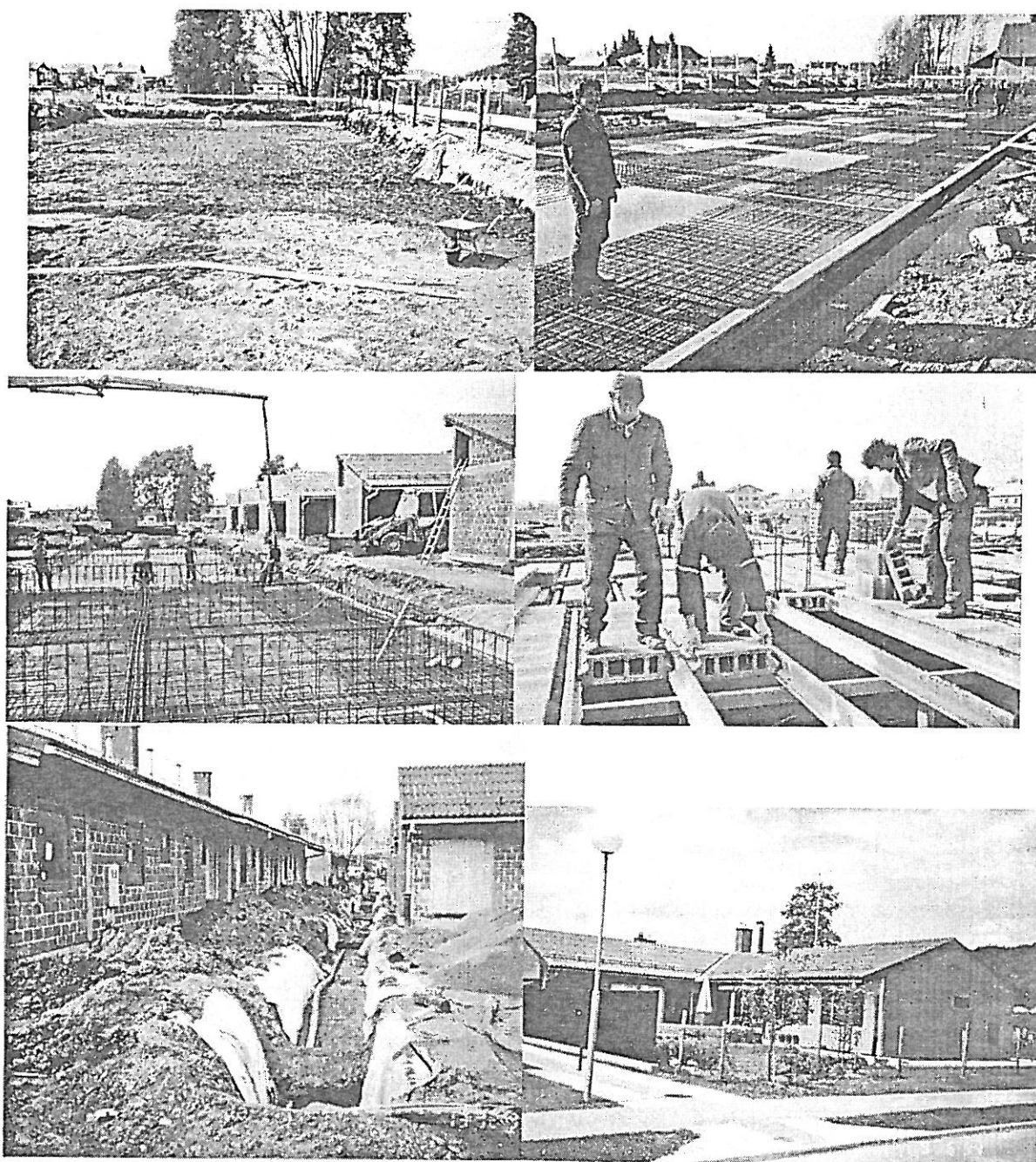
Inovativna tehnologija plitvega temeljenja na žaluzijskih temeljnih konstrukcijah je bila uspešno uporabljena pri gradnji stanovanjske soseske s 26 hišami, kot je prikazano na slikah 15 do 17.



Slika 15. Primer plitvega temeljenja naselja na žaluzijskih temeljnih ploščah, a) tloris, b) prerez naselja, c) prerez žaluzijske plošče



Slika 16. Primerjava rezultatov numeričnih analiz in merjenih vertikalnih pomikov žaluzijskih temeljnih plošč



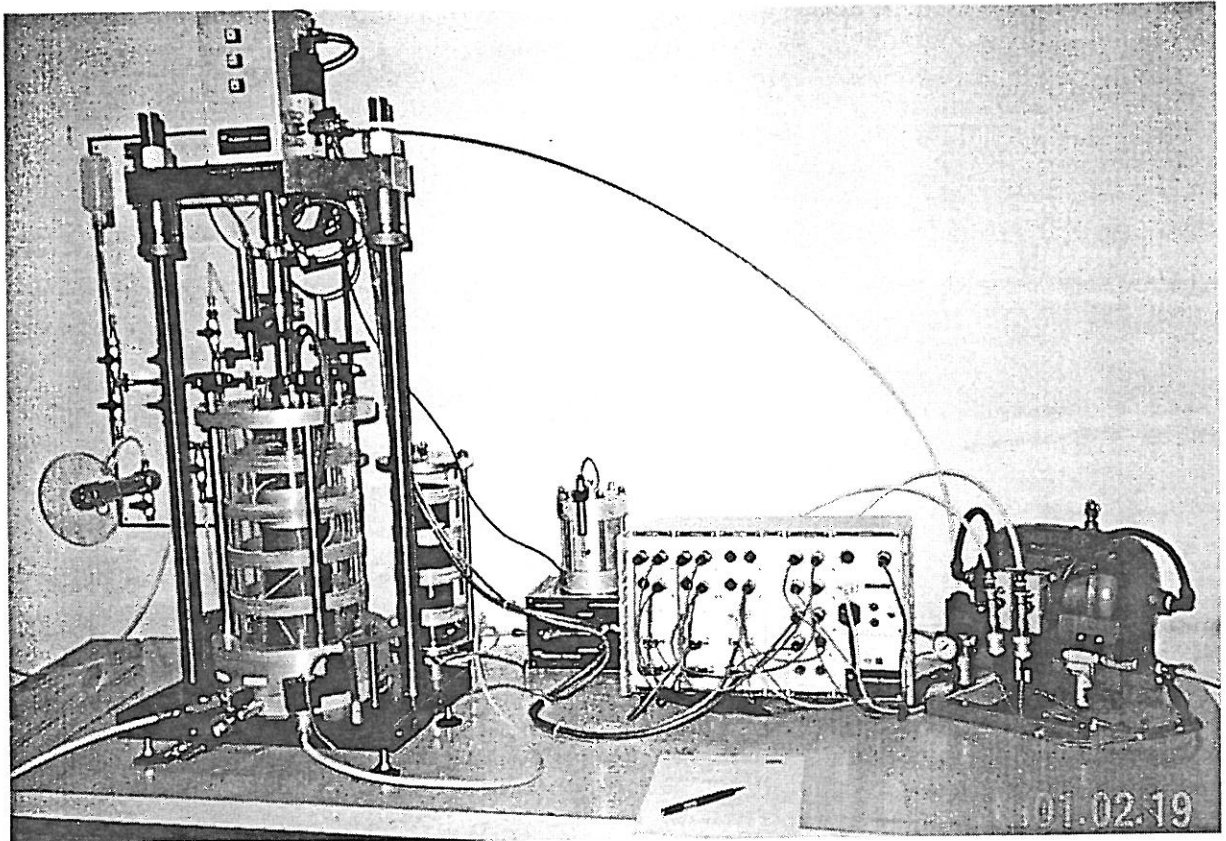
Slika 17. Sekvence izgradnje stanovanjske soseke na žalužijskih ploščah

## ZAKLJUČEK

Prikazane reološke sovisnosti polžarice iz Ljubljanskega barja so direktno koristne za geotehnične analize posedkov in stabilnosti najrazličnejših objektov, kar je že potrjeno s podanimi primeri.

Vsekakor pa bo potrebno s preiskavami nadaljevati, in predvsem z novo oziroma sodobno raziskovalno opremo rezultate še potrditi in dopolniti.

V Laboratoriju za mehaniko tal na Fakulteti za gradbeništvo v Mariboru smo v zadnjih 20 letih opravili še nekaj podobnih triaksialnih preiskav, ki so bile javno prezentirane. Z novim sistemom za dinamično preizkušanje koherentnih zemljin, ki ga prikazuje slika 18, pa bodo reološke sovisnice lahko podane še splošnejše.



**Slika 18.** Novi triaksialni aparat za dinamične in statične preizkuse zemljin v Laboratoriju za mehaniko tal na Fakulteti za gradbeništvo, Univerze v Mariboru

#### ZAHVALA

Pričujoči prispevek avtor posveča svojemu pokojnemu mentorju, akademiku Prof.dr. Luju Šukljetu, ki je avtorja popeljal v čudoviti svet reološkega obnašanja zemljin.

#### LITERATURA

- Šuklje, L. (1967). Common Factors Controlling the Consolidation and the Failure of Soils. Proc. Geotechn. Conf. Oslo, I, pp. 153-158.
- Šuklje, L. (1979). Non-Linear Viscous Soil Behaviour. Limit Analysis and Rheological Approach in Soil Mechanics, Eds W. Olszak and L. Šuklje, CISM Courses and Lectures No. 217, Springer-Verlag, Wien-New York, 1979, pp. 167-292.
- Trauner, L. (1982). Uporabnost teorije elastičnosti pri projektiranju temeljev. Doktorska disertacija. Univerza v Ljubljani, FAGG.