

**Helena VRECL**  
asist., dipl.gradb.inž. Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo

**Borut MACUH**  
asist.mag., dipl.gradb.inž. Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo

**Bojan ŽLENDER**  
prof.dr., dipl.gradb.inž. Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo

**Stanislav ŠKRABL**  
prof.dr., dipl.gradb.inž. Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo

**Ludvik TRAUNER**  
prof.dr., dipl.gradb.inž. Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo

## **TRIAKSIALNI PREIZKUSI PERMOKARBONSKIH SKRILAVCEV**

**POVZETEK:** Pri gradnji infrastrukturnih objektov v Sloveniji se srečujemo z mnogimi vrstami geoloških materialov z različnimi geotehničnimi karakteristikami. Največ težav pri gradnjah nam povzročajo skrilavi glinovci in meljevci permokarbonske starosti. Karakteristike teh materialov smo določali v Laboratoriju za mehaniko tal na Fakulteti za gradbeništvo s serijo dolgotrajnih dreniranih in nedreniranih triaksialnih preizkusov. V prispevku je opisana laboratorijska oprema, rezultati laboratorijskih preiskav ter primerjava rezultatov predložene analitične funkcije z analizo rezultatov laboratorijskih preiskav.

## **TRIAXIAL TESTS OF PERMO-CARBONIFEROUS CLAYSTONE**

**SUMMARY:** During extensive construction of infrastructure in Slovenia we are dealing with many types of geological materials that have different geotechnical characteristics. Most of the problems are caused by slated permocarboniferous claystone (shale) and siltstone. The characteristics of those materials were determined in Laboratory for Soil Mechanics of Faculty of Civil Engineering with series of long-term drained and undrained triaxial tests. The contribution presents description of the laboratory equipment, results of laboratory tests and a comparison of the results of described analytical function with the laboratory tests results.

## UVOD

Permokarbonski skrilavci in meljevci so mehke kamnine katerih lastnosti so zaradi tektonskih procesov in vplivov talne vode zelo heterogene in težko določljive. Značilno za te kamnine je, da so plastovite, skrilave in razpokane v različnih smereh, ki v naravi niso vnaprej predvidljive. Zaradi anizotropnih lastnosti takšnih kamnin so za določanje njihovih karakteristik primerne le preiskave na čim večjih vzorcih, kjer so površine popuščanja materiala razporejene naključno ter jih ni mogoče vnaprej predvideti.

Za izvedbo laboratorijskih preiskav smo prejeli večje število vzorcev kamnin z lokacij posameznih objektov na odseku avtoceste Blagovica-Vransko. Namen preiskav je bil določitev konstitutivnih parametrov, ki omogočajo geotehnične analize po elastoplastični teoriji. Izvedeni so bili standardni preizkusi (osnovne fizikalne lastnosti, enoosna tlačna trdnost, direktni translacijski in rotacijski strižni preizkusi), ki pa ne dajejo primernih in zadostnih podatkov za izvedbo elastoplastičnih geotehničnih analiz. Zato smo izvedli serijo kompresijskih cilindričnih triaksialnih preizkusov, z inkrementalnimi ali zveznimi spremembami obremenitev (ali kombinacijo obeh), s praviloma eno vmesno razbremenitvijo.

## LABORATORIJSKA OPREMA

Preizkušance smo vgrajevali v cilindrične celice Waykeham Farrance, različnih velikosti, ki omogočajo premere preizkušancev 50 do 100 mm in njim primernih višin. Celice so povezane z opremo za vzpostavljanje in merjenje sfernih pritiskov na preizkušanec in z merilci sprememb prostornine. Opremljene so s priključki za merjenje pornih tlakov ali iztoka porne vode. Celica se vgradi v univerzalni preizkusni aparat Wille UP 25, ki je opremljen z merilcem pomikov, merilci pornih tlakov in merilcem osne sile. Največja dovoljena obremenitev je 5 kN, kar zadošča za izvedbo preizkusov na mehkih kamninah (osna obtežba do 2500 kPa). Preizkusni aparat je povezan z osebnim računalnikom. Krmiljenje preizkusov omogoča programski paket Winbond 41.

Univerzalni preizkusni aparat in programski paket omogočata izvedbo različnih preizkusov (direktni translacijski in rotacijski strižni preizkus, edometrski preizkus, triaksialne preizkuse, preizkuse vodoprepustnosti, preizkuse enoosne tlačne trdnosti in CBR preizkuse). Zaenkrat lahko v našem laboratoriju izvajamo edometrske in kompresijske triaksialne preizkuse ter preizkuse enoosne tlačne trdnosti.

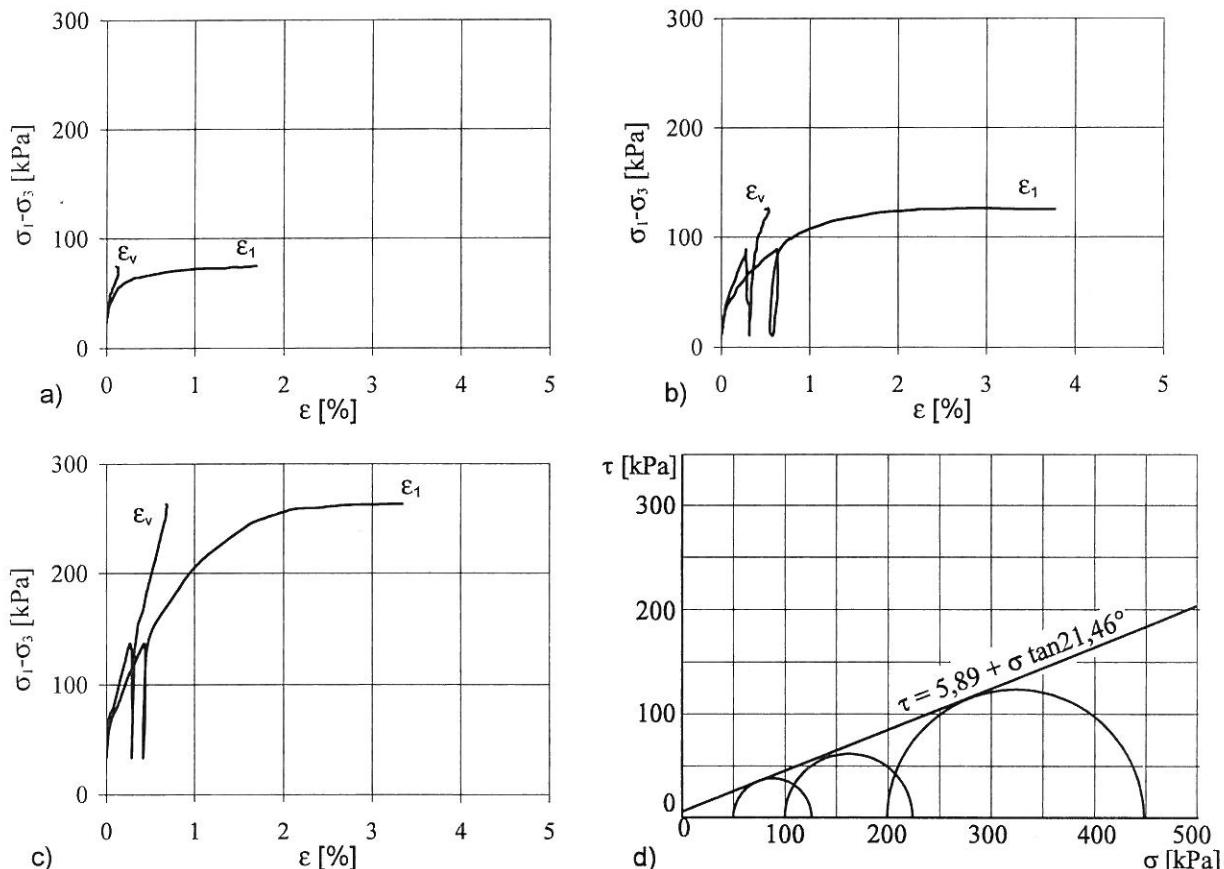
## IZVEDBA IN INTERPRETACIJA TRIAKSIALNIH PREIZKUSOV

Vzorci so bili odvzeti na različnih lokacijah posameznih objektov na odseku AC Vransko-Blagovica. Triaksialne preizkuse smo izvedli na kamninah iz različnih globin med 8 do 30 m.

Zaradi skrilave strukture kamnine so bili preizkusi izvedeni v velikih triaksialnih celicah, ki omogočajo vgradnjo preizkušancev premera do 10 cm. Za določitev elastoplastičnih parametrov glinastih skrilavcev so bili izvedeni cilindrični triaksilani preizkusi kamnin na valjastih preizkušancih premera  $d = 85$  mm ter višine 170 mm.

Vsi preizkusi so bili izvedeni po konsolidaciji preizkušancev pri naravni vlažnosti pri izbranem napetostnem stanju, ki je ustrezalo stanju v naravi. Pri začetnih napetostnih stanjih so bili preizkušanci konsolidirani tako dolgo, da je sprememba prostorninske deformacije upadla pod vrednost  $0.1 \text{ cm}^3 / 24 \text{ ur}$ , kar ustreza meji natančnosti, ki jo lahko dosežemo z razpoložljivo laboratorijsko opremo. Nato so bili obremenjeni z inkrementalnimi ali zveznimi prirastki napetosti. Inkrementalni preizkusi so bili izvedeni kot konvencionalni triaksialni kompresijski preizkusi. Preizkusi z zveznim obremenjevanjem so bili praviloma izvedeni z izbranim prirastkom osnih specifičnih deformacij  $d\varepsilon_1 / dt = 0.001 \% / \text{min}$ , ob omejitvi  $d\sigma_1 / dt = 1 \text{ kPa} / \text{min}$ . Razbremenitev in ponovna obremenitev sta bili izvedeni s spremembami osne napetosti  $d\sigma_1 / dt = 1 \text{ kPa} / \text{min}$ . Izvedeni so bili drenirani in nedrenirani preizkusi. Potek obremenjevanja in razbremenjevanja vsakega preizkusa je bil računalniško zapisan in shranjen. Zapisani so bili sferna komponenta napetosti, prirastki osne napetosti, osna deformacija, spremembe prostornine preizkušanca,porni tlaki ali iztok porne vode. Meritve so interpretirane grafično v odvisnosti od časa in medsebojni

odvisnosti. Na slikah 1 in 2 so prikazani rezultati preizkusov dreniranih vzorcev iz vrtin 1S in 4S v območju zidu OZ-10.



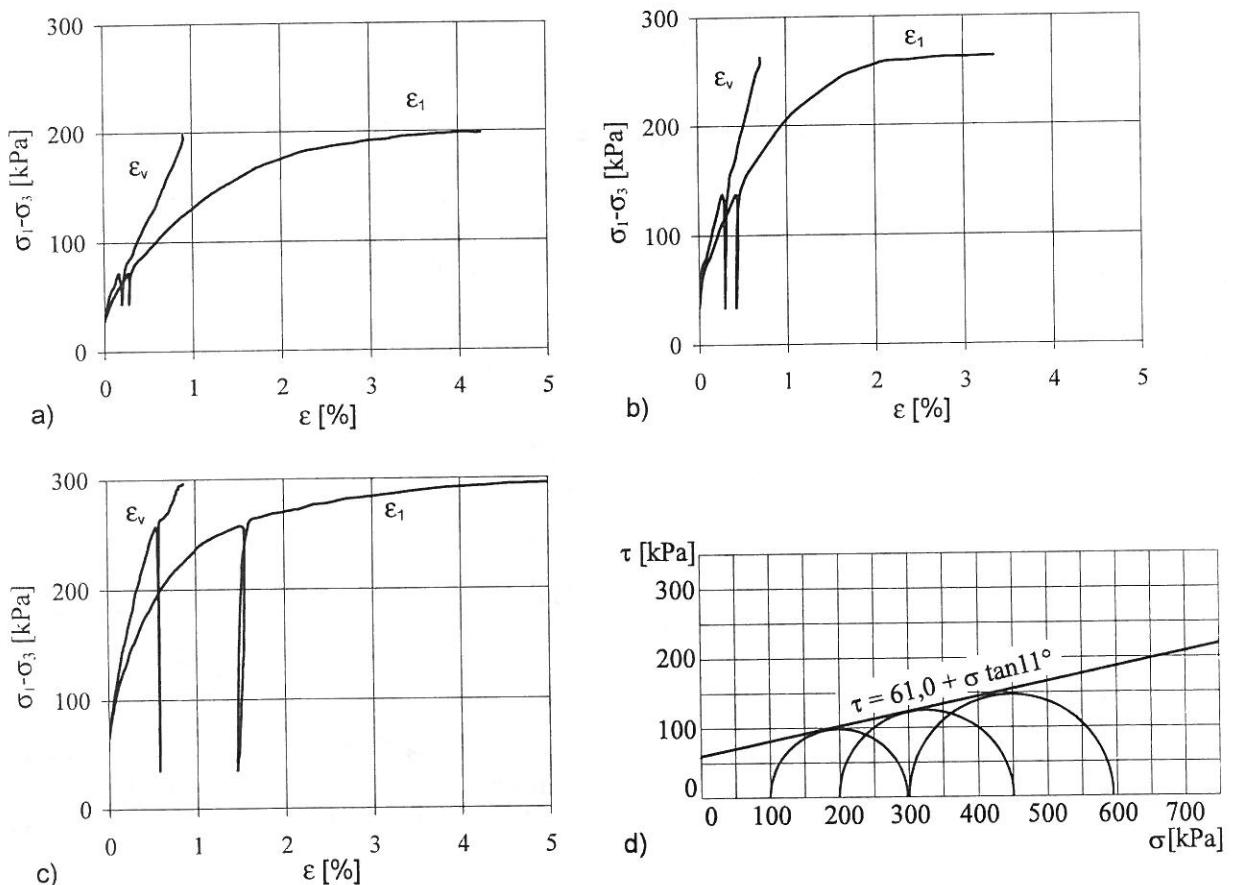
Slika 1: a) do c) Diagrami sovisnosti  $\epsilon_1 = \epsilon_1(\sigma_1-\sigma_3)$ ,  $\epsilon_v = \epsilon_v(\sigma_1-\sigma_3)$  za sferne obremenitve 50, 100 in 200 kPa; d) Strižna trdnost po Mohr-Coulombovem kriteriju porušitve

Rezultati preizkusov kažejo na heterogeno sestavo kamnin in na dejstvo, da ovojnica Mohrovih krogov praviloma ni premica. Za vrtino 1S sta ugotovljena strižna parametra  $c = 5.89$  kPa in  $\phi = 21.46^\circ$ , za vrtino 4S pa  $c = 61$  kPa in  $\phi = 11^\circ$ . Manjša odstopanja so sicer mogoča zaradi dejstva, da se pri preizkusih vzdolž vzpostavljenе porušitve vzorcev aktivirajo medplastni porni tlaki, ki nekoliko znižujejo vrednosti efektivnih napetosti, ki pa jih zaradi zelo majhnih sprememb prostornine in majhne prepustnosti obravnavanih materialov ni mogoče natančno izmeriti.

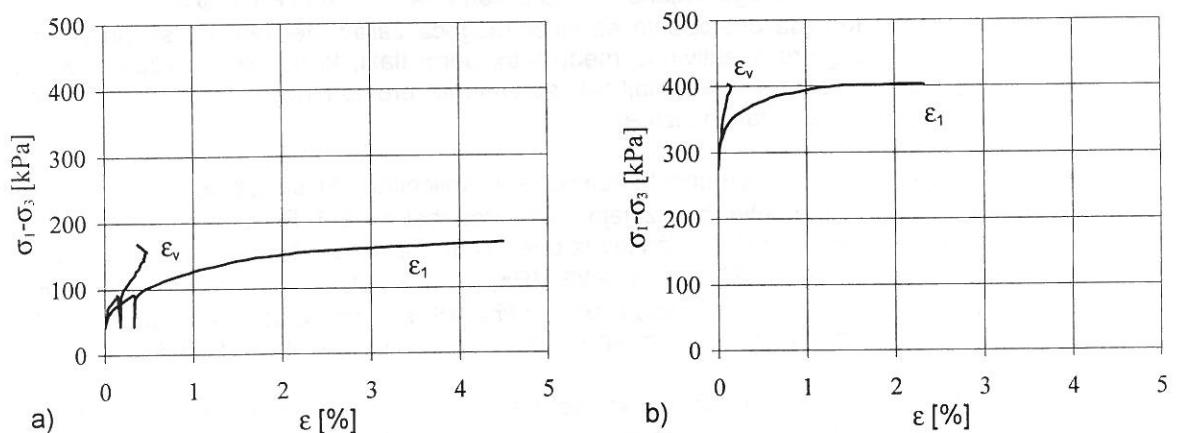
Rezultati preizkusov kažejo na realne vrednosti Poissonovih količnikov, ki se gibljejo med vrednostmi  $\nu = 0.11$  do  $0.3$  ter se v območju porušitve približujejo mejni vrednosti  $\nu = 0.5$ . Rezultati preizkusov kažejo tudi na zelo nizke module elastičnosti preizkušancev iz obeh vrtin. Za preizkušance iz vrtine 1S je modul elastičnosti pri sferni napetosti  $\sigma_3 = 50$  kPa enak  $E = 25$  MPa, pri  $\sigma_3 = 100$  kPa ima vrednost  $E = 18$  MPa in pri  $\sigma_3 = 200$  kPa okoli  $E = 27$  MPa. Za preizkušance iz vrtine 4S je modul elastičnosti pri  $\sigma_3 = 100$  kPa okoli  $E = 12$  MPa, pri  $\sigma_3 = 200$  kPa je enak  $E = 17$  MPa ter pri  $\sigma_3 = 300$  kPa okoli  $E = 25$  MPa.

Vrednosti razbremenilnega modula elastičnosti so po naši oceni manj realne zaradi vpliva hitrosti predhodnega obremenjevanja. Glede na predviden čas razbremenjevanja (izvajanja izkopov) ob izgradnji podporne konstrukcije je verjetno hitrost razbremenjevanja preizkušancev previsoka. Vplive

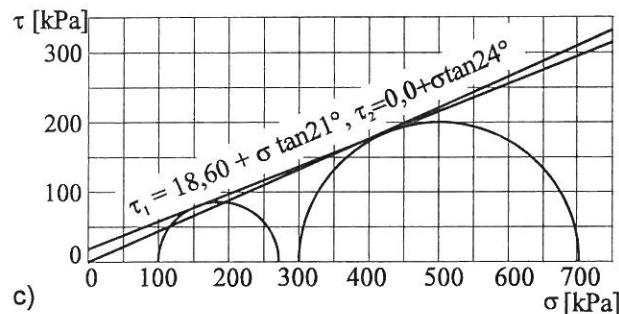
rabremenjevanja bi bilo potrebno pri določevanju parametrov upoštevati. Zaradi kratkega časa, ki smo ga imeli za izvedbo preizkusov teh vplivov še nismo raziskali.



Slika 2: a) do c) Diagrami sovisnosti  $\epsilon_1 = \epsilon_1(\sigma_1-\sigma_3)$ ,  $\epsilon_v = \epsilon_v(\sigma_1-\sigma_3)$  za sferne obremenitve 100, 200 in 300 kPa; d) Strižna trdnost po Mohr-Coulombovem kriteriju porušitve



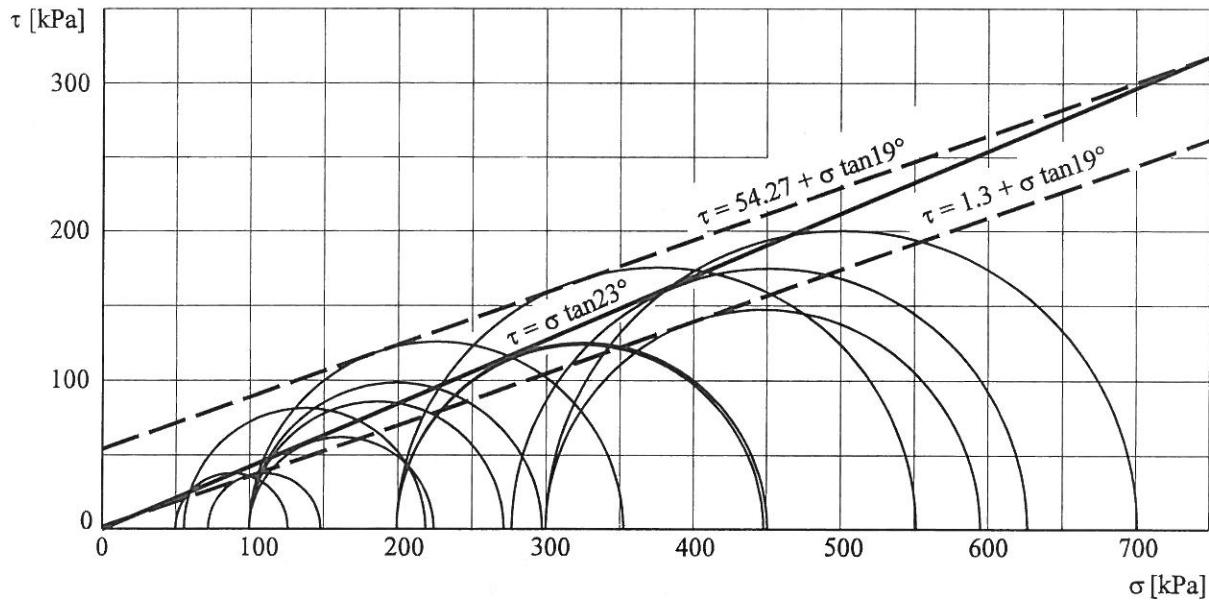
Slika 3: a) in b) Diagrami sovisnosti  $\epsilon_1 = \epsilon_1(\sigma_1-\sigma_3)$ ,  $\epsilon_v = \epsilon_v(\sigma_1-\sigma_3)$  za sferne obremenitve 100 in 300 kPa



Slika 3: c) Strižna trdnost po Mohr-Coulombovem kriteriju porušitve

Na sliki 3 so prikazani rezultati preizkusov dreniranih vzorcev iz vrtine G-2 v območju zidu PZ-19. Izvedena sta bila le dva preizkusa, zato ocenjujemo, da se dejanski vrednosti strižnih parametrov nahajata med vrednostmi  $c = 18.60 \text{ kPa}$  in  $\phi = 21^\circ$  oz.  $c = 0.0 \text{ kPa}$  in  $\phi = 24^\circ$ . Manjša odstopanja so sicer mogoča zaradi dejstva, da se pri preizkusih vzdolž vzpostavljene porušitve ploske preizkušancev aktivirajo medplastni porni tlaki, ki nekoliko znižujejo vrednosti efektivnih napetosti, ki jih zaradi zelo majhnih sprememb prostornine in majhne prepustnosti obravnavanih materialov ni mogoče natancno izmeriti. Rezultati preizkusov kažejo na realne vrednosti Poissonovih količnikov, ki se gibljejo med vrednostmi  $v = 0.2$  do  $0.3$  ter se v območju porušitve približujejo mejni vrednost  $v = 0.5$ . Rezultati preizkusov kažejo tudi na zelo nizke vrednosti modula elastičnosti, ki je pri sferski napetosti  $\sigma_3 = 100 \text{ kPa}$  okoli  $E = 15 \text{ MPa}$  ter pri sferski napetosti  $\sigma_3 = 300 \text{ kPa}$  enak  $E = 37 \text{ MPa}$ .

Skupni rezultati strižne trdnosti po Mohr-Coulombovem kriteriju porušitve za vse izvedene preizkuse (ne samo prej omenjene) so prikazani na sliki 4. Črtkani premici porušitve kažeta ekstremne vrednosti, polna premica pa možno strižno trdnost pri nični koheziji. Rezultati ostalih preizkusov so znotraj ekstremnih vrednosti. Iz njih je razvidno, da je kohezija dokaj nizka in znaša med 0 in  $55 \text{ kPa}$ , vrednost strižnega kota pa je med  $19$  in  $23^\circ$ .



Slika 4: Rezultati vseh opravljenih preiskav in pripadajoče Mohr-Coulombove strižne premice

## KONSTITUTIVNI PARAMETRI

Z ozirom na obliko napetostno-deformacijske linije je za obravnavane kamnine primerno uporabiti model za zemljine z utrjevanjem (Hinton 1989, Brinkgreve 1998), ki ga podpira tudi računalniški program Plaxis.

Osnو deformacijo kamnine lahko izrazimo s hiperbolično analitično funkcijo (Hinton, 1989):

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{\left(1 - \frac{R_f q}{q_f}\right)} \quad (1)$$

kjer je  $E_{50}$  deformacijski modul pri 50 odstotni trdnosti kamnine,  $q = \sigma_1 - \sigma_3$  označuje distorzionsko invarianto napetostnega tenzorja,  $R_f$  in  $q_f$  pa količnik strižnih obremenitev (porušitveni količnik) in vrednost distorzionske invariante ob porušitvi kamnine.

Defomacijski modul  $E_{50}$  in modul elastičnosti  $E$  izrazimo z analitično funkcijo v odvisnosti od sferne napetosti  $\sigma_3$ :

$$E_{50} = E^r \left( \frac{c \cot \varphi + \sigma_3}{c \cot \varphi + p^r} \right)^m \quad (2a)$$

$$E = E^r \left( \frac{c \cot \varphi + \sigma_3}{c \cot \varphi + p^r} \right)^m \quad (2b)$$

kjer  $c$ ,  $\varphi$  in  $p^r$  označujejo kohezijski del strižne trdnosti, kot notranjega trenja in referenčno vrednost sferne napetosti preizkušanca;  $E$  in  $E^r$  modul elastičnosti in referenčni modul elastičnosti, ki pripada izbranemu referenčnemu sfernemu tlaku ter  $m$  eksponent odvisen od vrste kamnine.

Funkcija plastičnega tečenja, ki določa prestop iz elastičnega v plastično stanje podaja ploskve popuščanja kamnine in jo izrazimo v odvisnosti od največje komponente plastične deformacije preizkušanca:

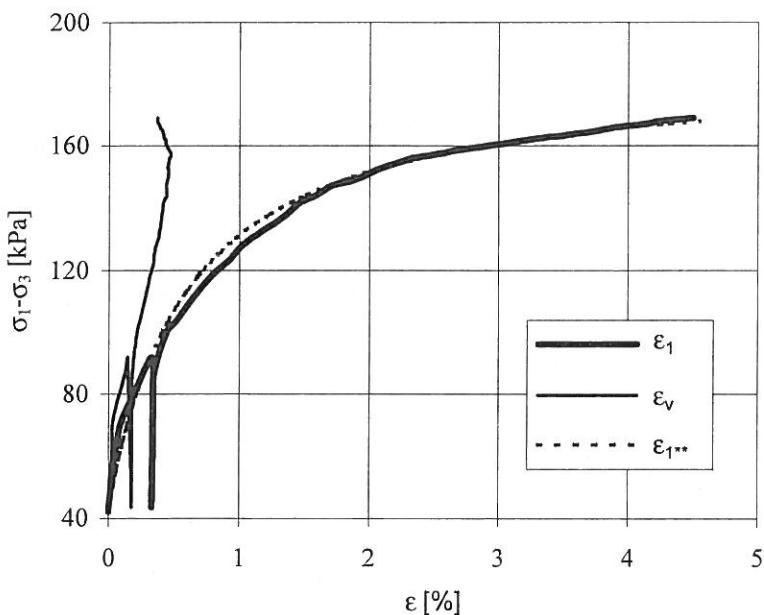
$$F(\sigma, k^p, \varepsilon_1^p) = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{\left(1 - \frac{R_f q}{q_f}\right)} - \frac{q}{E} - \varepsilon_1^p \quad (3)$$

Funkcijo plastičnega potenciala, ki določa velikost in smer plastičnih deformacij izrazimo v koordinatnem sistemu glavnih napetosti z izrazom:

$$Q(\sigma) = q - (c_m \cot \varphi_m + \sigma_1 + \sigma_3) \frac{(\sin \varphi_m - \sin \varphi_c)}{(1 - \sin \varphi_m \sin \varphi_c)} \quad (4)$$

kjer sta  $c_m$  in  $\varphi_m$  mobilizirani vrednosti strižnega kota in kohezije ter  $\varphi_c$  kritični strižni kot kamnine, ki označuje kritično stopnjo mobilizacije strižne trdnosti, ko se v vzorcu formira porušna ploskev in se v njej postopno sprošča notranja napetost. Pri nadalnjem obremenjevanju kamnine prične le-ta vzdolž porušne ploskve postopoma popuščati in prostornina vzorca prične postopoma naraščati.

Slika 5 prikazuje diagrama sovisnosti  $\varepsilon_1 = \varepsilon_1(\sigma_1 - \sigma_3)$ ,  $\varepsilon_v = \varepsilon_v(\sigma_1 - \sigma_3)$  za sferno obremenitev 100 kPa in primerjavo z osno specifično deformacijo  $\varepsilon_{1**}$  dobljeno z analitično funkcijo (enačba 1).



Slika 5: Eksperimentalne vrednosti osne ( $\varepsilon_1$ ) in volumske ( $\varepsilon_v$ ) deformacije ter analitične vrednosti osne deformacije ( $\varepsilon_{1**}$ ) vzorca iz vrtine G-2

Za glinaste skrilavce iz vrtine G-2 na območju PZ-19 predlagamo za geotehnične analize naslednje vrednosti konstitutivnih parametrov:

|                                 |                           |
|---------------------------------|---------------------------|
| strižni kot                     | $\varphi = 21^\circ$      |
| kohezija                        | $c = 18.6 \text{ kPa}$    |
| kritični strižni kot            | $\varphi_c = 18^\circ$    |
| kritična kohezija               | $c_c = 16 \text{ kPa}$    |
| deformacijski modul             | $E_{50} = 20 \text{ MPa}$ |
| pri referenčni sferni napetosti | $p' = 100 \text{ kPa}$    |
| modul elastičnosti              | $E = 75 \text{ MPa}$      |
| pri referenčni sferni napetosti | $p' = 100 \text{ kPa}$    |
| materialni konstanti            | $R_f = 0.9$<br>$m = 0.7$  |

## ZAKLJUČKI

Preiskave permokarbonskih skrilavcev kažejo na zelo heterogeno sestavo teh kamnin. Ocenujemo, da verjetni strižni kot teh kamnin znaša od  $\varphi = 19^\circ$  do  $22^\circ$  med tem, ko je kohezijska trdnost odvisna predvsem od njene preperelosti in znaša od  $c = 0 \text{ kPa}$  do  $55 \text{ kPa}$ . Elastoplastične karakteristike materiala je mogoče sorazmerno dobro aproksimirati z elastoplastičnim, neasociativnim modelom s hiperboličnim utrjevanjem. Kot pomembni karakteristiki glinastega skrilavca sta predvsem kritični strižni kot  $\varphi_c = 18^\circ$  ter parameter vpliva normalnih napetosti  $m = 0.7$ . Po presoji rezultatov številnih triaksialnih preizkusov ocenujemo, da ju lahko upoštevamo kot materialni konstanti.

Menimo, da intenziteta zbitosti kamnine in morebitni vplivi na karakteristike materiala pri odvzemu vzorcev ne morejo bistveno vplivati na notranje trenje kamnine in zato verjetno tudi ne vplivajo na kritični kot notranjega trenja. Pomembnost tega parametra se odraža prevsem pri pravilnem določanju sprememb prostorninskih deformacij kamnine, ki lahko bistveno vplivajo na posedke objektov, ki so temeljeni v tako zahtevnih pogojih, kot jih predstavljajo prepereli in slojeviti glinasti skrilavci.

## ZAHVALA

Zahvaljujemo se MINISTRSTVU ZA ZNANOST IN TEHNOLOGIJO, ki nam je omogočilo izvajanje raziskovalnega programa.

## LITERATURA

- [1] Oven, D.R.J., Hinton, E. (1980): Finite Elements in Plasticity: Theory and Practice, *Pineridge Press Limited*, Swansea, U.K.
- [2] Pande, G. N., Beer, G., Williams, J.R., (1990): Numerical Methods in Rock Mechanics, *John Wiley & Sons*, Chichester.
- [3] Brinkgreve, R.B.J., Vermeer, P.A., (1998): PLAXIS Finite Element Code for Soil and Rock Analyses. A.A. *BALKEMA*, Rotterdam, Brookfield.
- [4] Smith, I.M. Griffith, D.V., (1982), Programming the Finite Element Method, Second Edition. *John Wiley & Sons*, Chichester, U.K.