

Primljen / Received: 24.5.2021.

Ispravljen / Corrected: 10.1.2023.

Prihvaćen / Accepted: 22.1.2023.

Dostupno online / Available online: 10.3.2023.

# Anizotropija deformacijskih svojstava meke stijene

## Autori:

Prof.dr.sc. **Slobodan Živaljević**, dipl.ing.građ.Sveučilište Crne Gore  
Građevinski fakultet u Podgorici  
[slobodanz@ucg.ac.me](mailto:slobodanz@ucg.ac.me)

Autor za korespondenciju

Prof.dr.sc. **Zvonko Tomanović**, dipl.ing.građ.GeoT d.o.o, Podgorica, Crna Gora  
[zvonko@geot.me](mailto:zvonko@geot.me)Mr.sc. **Borko Miladinović**, dipl.ing.građ.Sveučilište Crne Gore  
Građevinski fakultet u Podgorici  
[borkom@ucg.ac.me](mailto:borkom@ucg.ac.me)

Prethodno priopćenje

**Slobodan Živaljević, Zvonko Tomanović, Borko Miladinović**

## Anizotropija deformacijskih svojstava meke stijene

Slojevitost kao tipično svojstvo sedimentnih stijena, uzrok je inherentne anizotropije deformacijskih svojstava stijenskih masa. Rezultati jednoosnih i troosnih, kratkotrajnih i testova puzanja provedenih od strane autora na orijentiranim uzorcima meke sedimentne stijene - lapora prezentirani su u ovom radu. Interpolacijom rezultata kratkotrajnih pokusa utvrđena je parabolična ovisnost sekantnog modula deformabilnosti o kutu ( $\alpha$ ) između opterećenja i ravnine prirodne slojevitosti u intervalu od 0 do 90 stupnjeva. Vremenski ovisan deformacijski odgovor je opisan utvrđivanjem ovisnosti parametara modificiranog Wallnerovog modela o kutu  $\alpha$  u intervalu od 45 do 90 stupnjeva na osnovi rezultata provedenih testova puzanja.

### Ključne riječi:

meka stijena, puzanje, anizotropija, slojevitost, sekantni modul, troosni, lapora

Research Paper

**Slobodan Živaljević, Zvonko Tomanović, Borko Miladinović**

## Deformation anisotropy of soft rock

Bedding, being a typical feature of sedimentary rocks, is a cause of inherent anisotropy of deformation properties of rock mass. Results of uniaxial and triaxial, short-term and creep tests conducted by the authors on the specimens of a soft sedimentary rock - marl are presented in this paper. Interpolation of results of the short-term tests enabled for determining the parabolic dependence of secant modulus of deformability on angle ( $\alpha$ ) between load and natural bedding planes in the interval from 0 to 90 degrees. The time-dependent deformation response is described by determining the dependence of parameters of the modified Wallner's model on the angle  $\alpha$  in the interval from 45 to 90 degrees, based on the results of the performed creep tests.

### Key words:

soft rock, creep, anisotropy, bedding, secant modulus, triaxial, marl

## 1. Uvod

Anizotropija mekih sedimentnih stijena ima značajan utjecaj na naponsko-deformacijsko ponašanje (pri izvođenju i tijekom uporabe) zasjeke, usjeka, tunela i drugih geotehničkih konstrukcija. Važnost anizotropije mekih stijena bit će kratko elaborirano kroz analizu stanja naprezanja oko tunelskog otvora, zbog njihovog praktičnog značenja i karaktera sekundarnog stanja naprezanja koje se inducira izgradnjom tunela. Nakon iskopa tunelskog otvora dolazi do promjene prirodnog – primarnog stanja naprezanja u stijenskoj masi u neposrednoj blizini otvora. Ovisno o veličini otvora, karakteristika stijenske mase i primijenjene podgrade, uspostavlja se novo ravnotežno stanje. U okviru ovog tzv. sekundarnog stanja naprezanja općenito dolazi do rasterećenja pojedinih elemenata stijene u radijalnom smjeru, odnosno do dodatnog opterećenja pojedinih elemenata u tangencijalnom smjeru (slika 1.). Preraspodjela naprezanja uzrokovana iskopom otvora praćena je pojavom trenutačnih i razvojem vremenski ovisnih deformacija. Predviđanje cjelovitog deformacijskog odgovora stijenske mase oko kružnog otvora od ključnog je značenja za projektiranje i izvođenje tunela. Procjena vremenski ovisnih deformacija (puzanja) posebno je značajna za meke stijene (kamena sol, lapor, glinenac, muljnjak i druge) zato što vrijednosti vremenski ovisnih deformacija mogu dostići vrijednosti trenutačnih deformacija ovisno o vremenskom intervalu između faza iskopa. Također, deformacije puzanja mogu dovesti do vremenski ovisnog povećanja pritiska na podgradi [1].

Općenito su sve stijenske mase prirodno anizotropne zbog prisutnosti pukotina, rasjeda i drugih tzv. sekundarnih struktura. Međutim, čak i neispucale masivne stijene su anizotropne zbog toga što kao rezultat njihove geneze posjeduju primarne strukture kao što su: slojevitost, škriljavost, laminacija i folijacija. Ova, takozvana inherentna anizotropija, tipična je

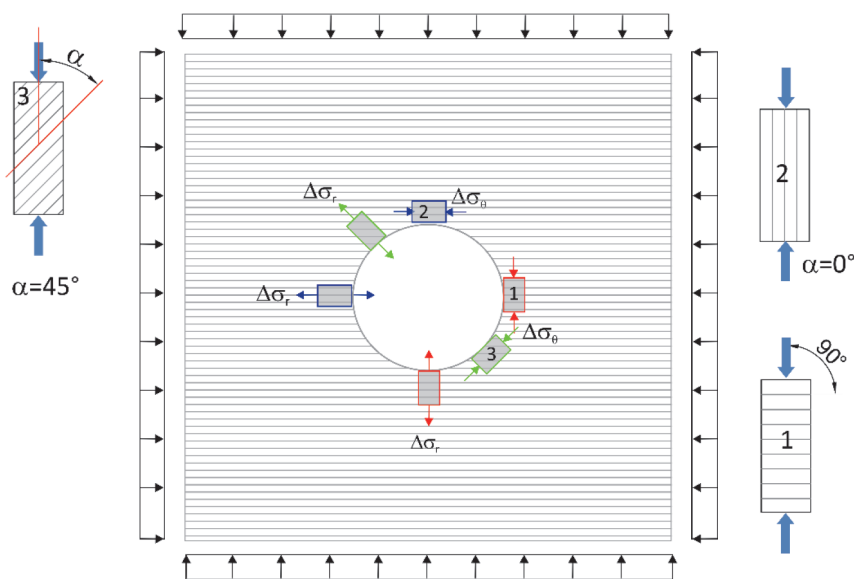
za metamorfne i sedimentne stijene. Izotropija može biti i inducirana promjenom stanja naprezanja [2]. Međutim, predmet ovog rada je inherentna anizotropija deformabilnih svojstava sedimentnih stijena.

Slojevitost kao tipično svojstvo sedimentnih stijena uzrok je inherentne anizotropije deformacijskih svojstava stijenskih masa. Mehaničko ponašanje većine prirodnih depozita je anizotropno zbog anizotropne mikrostrukture formirane tijekom procesa sedimentacije [3]. U ovom se radu pojam slojevitost odnosi na tipičnu favoriziranu orijentaciju mineralnih zrna u horizontalnim ravninama okomito na smjer sedimentacije, proizašle iz uvjeta taloženja, kompakcije i dijageneze stijene. Ovakav tip anizotropije definirane jednom ravninom izotropije (ravnina slojevitosti) i osi anizotropije (normala na ravninu slojevitosti, smjer sedimentacije) naziva se transverzalna izotropija [4, 5]. Utjecaj transverzalne i općenito anizotropije na čvrstoću opsežno je istraživano [6-10] za razliku od utjecaja anizotropije na kratkotrajne, a posebno na vremenski ovisne deformacije.

Na slici 1. prikazani su tipični prizmatični elementi sedimentne stijene oko tunelskog otvora, koji su opterećeni ili rasterećeni okomito na ravnine slojevitosti, paralelno s ravninama slojevitosti i pod kutom od 45 stupnjeva u odnosu na ravnine prirodne slojevitosti u okviru ukupne raspodjele sekundarnih naprezanja. Trenutačni modul deformabilnosti u smjeru okomitom na ravnine slojevitosti obično je veći nego modul deformabilnosti paralelno ravninama slojevitosti [11]. Promjenu tangentskog modula elastičnosti ovisno o kutu između opterećenja i ravnine prirodne slojevitosti utvrdili su Nasser i sur. [12] za škriljce na osnovi rezultata jednoosnih i troosnih testova. Opadajući trend modula elastičnosti s porastom kuta  $\alpha$  utvrdili su za pješčenjake Meng i sur. [13], odnosno za škriljce Jin i sur. [14]. S druge strane, brzine sekundarnog puzanja obično su veće kada je uzorak opterećen okomito na ravninu slojevitosti

nego kada je opterećen paralelno s njima [15-20]. Ovo znači da će deformacijski odgovor određenih elemenata stijene blizu tunelskog otvora, kako kratkotrajni tako i vremenski ovisni, ovisiti o kutu opterećenja/rasterećenja u odnosu na ravninu prirodne slojevitosti.

U suvremenoj projektantskoj praksi je uobičajen proračun podgradnih konstrukcija tunela primjenom FEM/FDE metoda implementiranih u komercijalnim računalnim programima na osnovi odabranog reološkog modela. Prema tome, korišteni reološki model idealno bi trebao obuhvatiti kratkotrajno i dugotrajno ponašanje stijenskog materijala pri opterećenju i rasterećenju kao i njegovu inherentnu anizotropiju. Međutim, u praksi je i dalje uobičajena primjena izotropnih



Slika 1. Sekundarno stanje naprezanja oko kružnog tunelskog otvora

modela, često nelinearnih s različitim materijalnim svojstvima za opterećenje/rasterećenje iako postoje napredniji. Na primjer, viskoelastoplastični model za uslojenu glinovitu stijenu razvili su Li i sur. [21]. Wang i sur. [22] predložili su viskoplastični model za modeliranje transversalno izotropnog ponašanja ugljenih škriljaca.

U ovom radu prikazani su odabrani rezultati eksperimentalnog istraživanja kratkotrajnog i vremenski-ovisnog deformacijskog odgovora neogenog lapora kao predstavnika mekih sedimentnih stijena. Rezultati su dio opsežnog ispitivanja neogenog lapora koje je na Građevinskom fakultetu u Podgorici provedeno u dvije eksperimentalne kampanje: prva od 1999. do 2004. i druga od 2011. do 2015. godine. Naglasak u prvoj kampanji bio je na deformacije pri opterećenju uglavnom na prizmatičnim i pločastim uzorcima, a u drugoj na deformacijama puzanja pri rasterećenju. Ograničeni broj uzoraka koji nije ispitan u drugoj kampanji ispitivanja puzanja, korišten je za ispitivanje utjecaja anizotropije materijala na kratkotrajne/dugotrajne deformacije materijala provođenjem jednoosnih i troosnih kratkotrajnih i dugotrajnih testova s različitim orijentacijom ravnina slojevitosti u odnosu na smjer opterećenja.

U ovom radu, nakon opisa karakteristika materijala, pripreme uzoraka, opreme za testiranje i procedure testiranja prikazani su i komentirani karakteristični rezultati. Deformacijski odgovor je opisan utvrđivanjem ovisnosti parametara modificiranog Wallnerovog modela (vezanih za puzanje) od kuta  $\alpha$  u intervalu od 45 do 90 stupnjeva na osnovi rezultata provedenih testova. Kratkotrajni odgovor je opisan utvrđivanjem ovisnosti sekantnog modula deformabilnosti o kutu  $\alpha$ . Izrazita nelinearnost u odgovoru materijala uvjetovala je primjenu sekantnih modula. Primijenjena metodologija omogućuje da se za jednoosno stanje naprezanja, na osnovi jednoosnih testova puzanja za tri različite orijentacije uzoraka (npr. za vrijednosti  $\alpha$  od 0, 45 i 90 stupnjeva) interpolacijom rezultata utvrde ovisnosti za cijeli interval  $\alpha$  od 0 do 90 stupnjeva. Međutim, znatno veći opseg testova, od provedenih u ovom istraživanju, potreban je za uključivanje utjecaja bočnog naprezanja u model.

vapnencima čine krovinu glavnom ugljenom sloju. Starost pljevaljskog bazena je najmlađi donji miocen (približno odgovara gornjem karpatijanu). Na osnovi kemijskih analiza kao i određivanja mikroflora i mikrofauna utvrđeno je da je Pljevaljsko jezero pripadalo tipu hidrološki otvorenih karbonatnih jezera s tvrdom vodom. Kod ovog tipa jezera otjecanje i isparavanje su u ravnoteži s dotokom vode. Prema klasifikaciji Wrighta, to je bilo jezero niske energije sa strmom obalom (u Potrljici) koju definiraju premiocenski rasjedi [23]. Prostor Potrljice je pripadao profudalu ovog Pljevaljskog neogenog jezera.

Debljina sedimentata se povećava od oboda prema centru bazena gdje iznosi 128 m. Prema udjelu kalcijevog karbonata ovi slojevi su izdvojeni u četiri nivoa-paketa: prvih 25 m iznad ugljenog sloja sadrži 90 %  $\text{CaCO}_3$  (laporoviti vapnenci), sljedećih 30-40 m su cementni lapori (70 %  $\text{CaCO}_3$ ) prekriveni s približno 20 m laporovitih vapnenaca (90 %  $\text{CaCO}_3$ ) koji leže ispod završnog sloja debljine 40-50 m koji čine cementni lapori (70-75 %  $\text{CaCO}_3$ ).

Prema Pettijohnu [24], lapor se definira kao stijena koja sadrži 35 to 65 posto karbonata i odgovarajući udio gline. Snimke uzoraka prirodnog lapora dobivene upotrebom skenirajućeg elektronskog mikroskopa (SEM) otkrivaju da se radi o heterogenoj poroznoj mješavini karbonatnih zrna i zrna gline (slika 3.a).

Prema rendgenskoj difraktometriji (slika 3.b), testirani lapor se uglavnom sastoji od kalcita (64,4 %) i kvarca (8,3 %), a u glinovitoj fazi zastupljeni su ilit (6,3 %), montmorilonit (9,6 %) i muskovit (11,3 %). Vlažnost testiranih uzoraka je bila od 16 do 19 %, a prosječna jednoosna tlačna čvrstoća materijala oko  $\sigma_c = 11,65 \text{ MN/m}^2$ . Ovisnost jednoosne tlačne čvrstoće cilindričnih i prizmatičnih uzoraka lapora opterećenih pod kutovima od 0°, 45° i 90° u odnosu na ravninu prirodne slojevitosti prikazana je na slici 4. Bez obzira na znatno rasipanje rezultata, naglašen je utjecaj prirodne vlažnosti na dobivene vrijednosti jednoosne čvrstoće u odnosu na

## 2. Eksperimentalno istraživanje

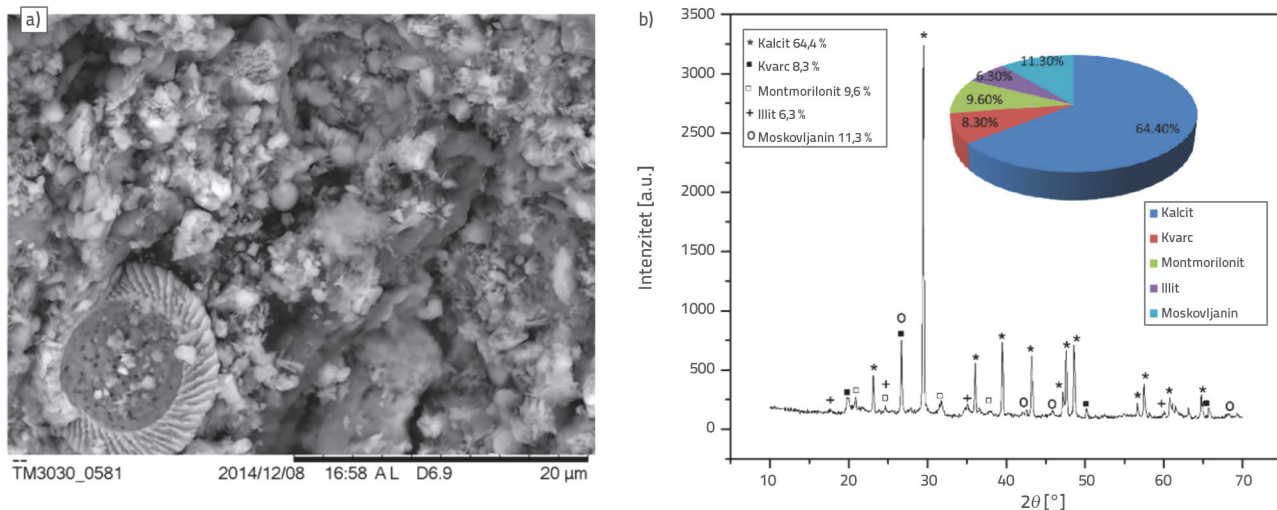
### 2.1. Karakteristike materijala

Uzorci lapora potječu iz otvorenog iskopa Potrljica u pljevaljskom bazenu (slika 2.), Crna Gora, koji predstavlja plitku paleokršku depresiju ispunjenu ugljunosnim sedimentima taloženim u miocenu kada je na tom prostoru postojalo Pljevaljsko jezero. Lapori zastupljeni u pljevaljskom bazenu su jezerski sedimenti miocenske starosti koji zajedno s laporovitim

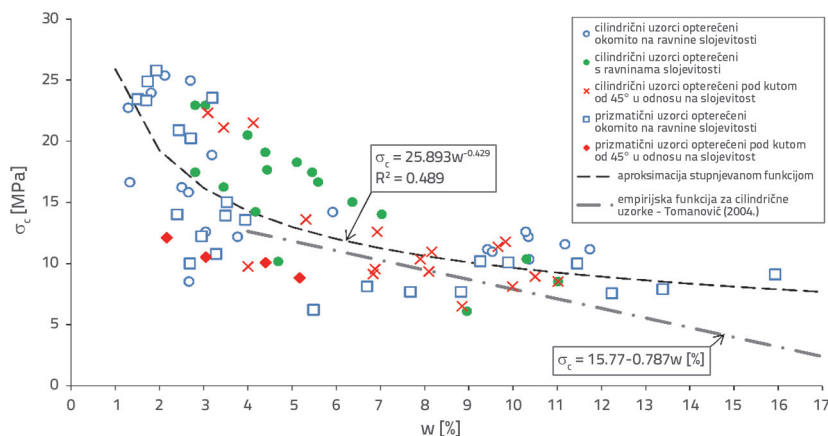


Slika 2. Otvoreni iskop Potrljica rudnika ugljena u Pljevljima, Crna Gora





Slika 3. a) SEM snimke testiranog lapora pri uvećanju 5000x; b) mineraloški sastav prema rendgenskoj difraktometriji



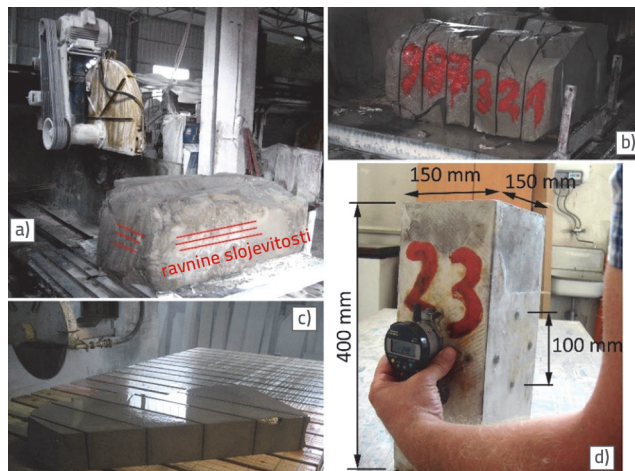
Slika 4. Jednoosna tlačna čvrstoća uzoraka lapora u funkciji vlažnosti

orijentaciju uzorka i njegove dimenzije. U pogledu trošnosti, ispitani uzorci su prema ISMR normi [25] opisani oznakom F kao svježa stijena, bez vidljivih znakova trošenja materijala.

### 2.2. Priprema uzoraka

Relativno kompaktan blok lapora izvađen je iz jedne stepenice otvorenog iskopa rudnika, sa dubine od približno 20 m od površine terena i otpremljen do tvornice za rezanje kamena (slika 5.a), gdje je izrezan u ploče debljine 15 cm (slika 5.b), gdje je izrezan u ploče debljine 15 cm (slika 5.b). Iz svake ploče su izrezani prizmatični uzorci dimenzija širina/dužina/visina = 15/15/40 cm, a zatim zapakirani i dopremljeni do laboratorija (slike 5.c i 5.d). Uglavnom, uzorkovanje, prijevoz, obrada, čuvanje uzoraka prije i tijekom ispitivanja provedeni su tako da ne dođe do povećanja stupnja trošnosti u mjeri koja bi utjecala na čvrstoću, kratkotrajnu i dugoročnu deformabilnost. Odmah nakon uzorkovanja, sredinom rujna 2010., blok je prenesen do natkrivenog prostora, gdje je dodatno zaštićen umotavanjem u plastičnu foliju. Krajem rujna 2010. dopremljen je do tvornice za rezanje kamena u Danilovgradu. Pri rezanju vodom nije došlo

do degradacije uzoraka nego do plitke penetracije vode po dubini uzorka. Nakon rezanja uzorci su sušeni nekoliko dana do približnog vraćanja na prirodnu vlažnost, brzinom koja nije dovela do degradacije ni u površinskoj zoni. Nekolicina uzoraka je odmah ispitana radi utvrđivanja kemijskog i mineraloškog sastava i utvrđivanja ovisnosti jednoosne čvrstoće UCS o udjelu vode, obliku uzorka i orijentaciji opterećenja. Većina je uzoraka nakon kontrole vlažnosti zapakirana na način koji omogućuje da ih se čuva bez značajnog gubitka vlage tijekom duljeg razdoblja. Osim toga, uzorci su čuvani u prostoriji u kojoj vlažnost zraka nije mogla značajno varirati tijekom godine i pri sezonskoj promjeni temperature.

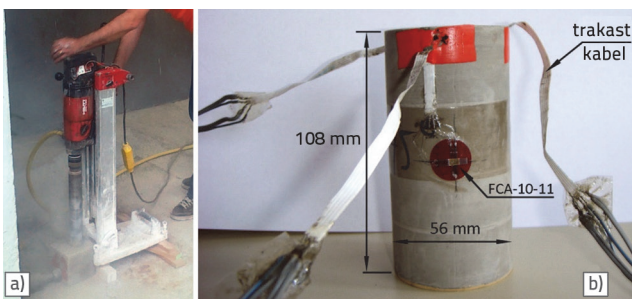


Slika 5. Priprema prizmatičnih uzoraka lapora za jednoosni test puzanja

Neposredno prije testiranja, prizmatični uzorci su opremljeni mjernim točkama radi mjerenja deformacija u smjeru paralelnom osi uzorka (aksijalnih, vertikalnih) i poprečnih deformacija (slika 5.d). Baza mjerenja je 100 mm, a za mjerenje je korišten digitalni komparator (slika 5.d). Metalne mjerne točke fiksirane su za uzorak upotrebom epoksidnog ljepila, a prema prethodno iscrtanoj mreži na površini uzorka. Nakon toga su uzorci premazivani tankim slojem vrućeg parafina radi smanjenja gubitka vlage iz uzorka tijekom testiranja. Ista je metoda primjenjena za pripremu neopterećenih uzoraka (tzv. kompenzacijskih prizmi) sa svrhom mjerenja deformacija koje potječu od promjena temperature i vlažnosti uzorka, što rezultira uglavnom skupljanjem uzorka bez promjene naprežanja, ali pri povišenim temperaturama i relativnom izduženja uzoraka, slika 7.

Cilindrični uzorci su izvađeni iz prethodno pripremljenih uzoraka oblika kocke dimenzija 15x15x15 cm rezanjem pomoću rotacijskog stroja u laboratoriju Građevinskog fakulteta (slika 6.a). Uzorci su izvađeni okomito na prirodnu slojevitost, pod kutom od 45 stupnjeva i paralelno s pružanjem slojeva. Promjer uzorka je 56 mm, a visina 108 mm. Rezanje izvađenih uzoraka na odgovarajuću dužinu je izvedeno strojem s rotacijskim nožem u laboratoriju Građevinskog fakulteta, gdje je obavljeno i poliranje baza uzoraka.

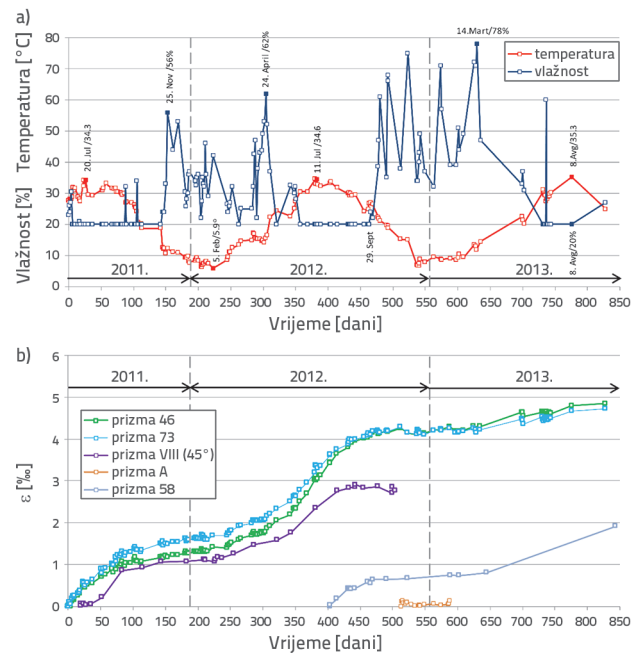
Za mjerenje deformacija u konvencionalnom troosnom testu cilindrični uzorci su opremljeni rozetama za mjerenje deformacija u dva okomita smjera (tip FCA-10-11, dužina pojedinačne mjerne trake 10 mm, proizvođač TML, Japan). Na svaki uzorak su nalijepljene po tri rozete u sredini visine uzorka i na jednakom međusobnom razmaku po opsegu uzorka (slika 6.b). Korišteno je dvokomponentno ljepilo P-2 (TML). Zbog ograničenog prostora u troosnoj (Hoekovoj) ćeliji, kabel koji povezuje rozetu s mjernim mostom treba biti što tanji. Ovdje je korišten komad trakastog kabela koji se vezuje za rozetu na uzorku, a na izlasku iz ćelije se nastavlja standardnim izvodnim kabelom. Nakon toga se uzorak postavlja u zaštitnu membranu (proizvođač: ELE UK). Troosni testovi puzanja na probnoj seriji uzoraka pokazalisu da na ovaj način opremljeni uzorci omogućuju praćenje vremenski ovisnih deformacija tijekom više mjeseci.



Slika 6. Priprema cilindričnih uzoraka lapora

Imajući u vidu varijacije u vlažnosti i temperaturi zraka tijekom višegodišnjih ispitivanja (slika 7.a), kompenzacijske (neopterećene) prizme identične testiranima postavljene su u blizini uređaja za testiranje. Pri svakom mjerenju deformacija

na opterećenim prizmama mjerene su i deformacije na kompenzacijskim prizmama 46, 73 i VIII (slika 7.b) radi korekcije mjerenja, uslijed utjecaja temperature/vlažnosti zraka u laboratoriju, čime je utjecaj tih dviju varijabli na skupljanje i/ili širenje uzorka tijekom vremena eliminiran oduzimanjem od ukupne izmjerene deformacije pri testu puzanja. Na ovaj način je izolirana deformacija puzanja iz ukupne izmjerene deformacije.



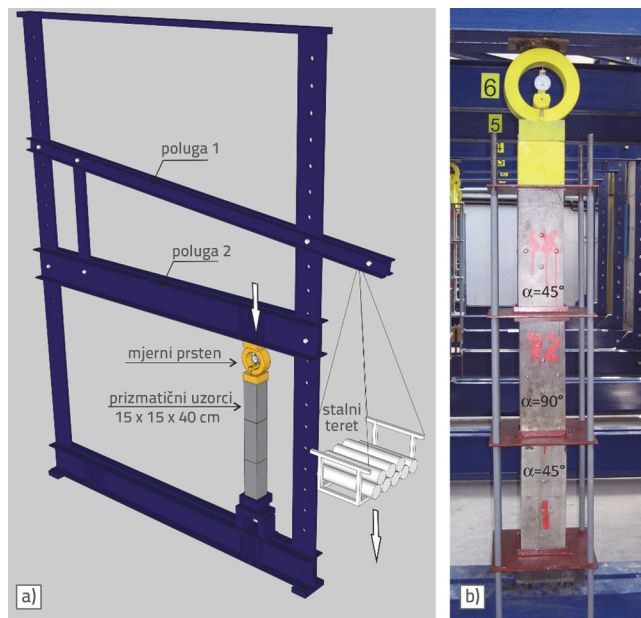
Slika 7. Usporedni dijagrami: a) temperature i vlažnosti zraka u laboratoriju; b) aksijalne deformacije kompenzacijskih prizmi

### 2.3. Opis opreme i procedure testiranja

Uređaj s dvostrukom polugom kapaciteta od 750 kN (slika 8.a) je korišten za održavanje konstantnog aksijalnog naprežanja na uzorcima. Uređaj je prilagođen tako da omogući istovremeno testiranje tri prizmatična uzorka iste serije postavljanjem jednog uzorka na vrh drugog [26]. Teret ovješena na kraj poluge 2 prenosi djelovanje na polugu 1 i nanosi se na uzorak kao tlačno naprežanje. Ovisno o poziciji uzorka duž poluge 1, oovješena težina se uvećava za 10 do 150 puta. Za mjerenje nanesenog opterećenja i kontrolu opterećenja tijekom testa puzanja korišten je prethodno projektiran mjerni prsten kapaciteta 250 kN (slika 8.b). Prednost primjene mehaničkog sustava je taj da se može postići dulje trajanje testa puzanja (reda veličine godina) u usporedbi s tradicionalnim hidrauličnim servosustavima. Sličan uređaj s više poluga, konzolnog tipa, razvili su Lu i Wang [27] za testove puzanja na muljnjaku.

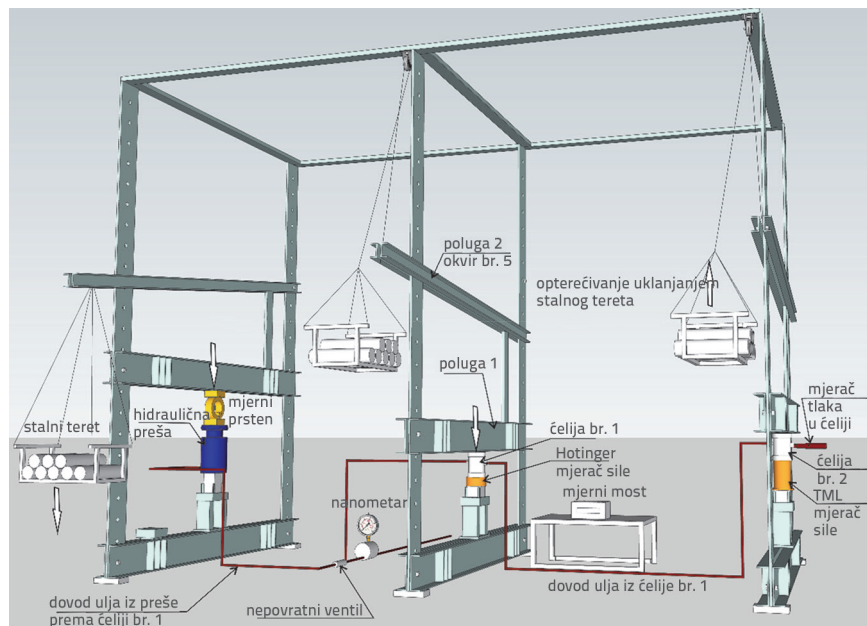
Aksijalno opterećenje je nanoseno u inkrementima čija je veličina jednaka jednoj četvrtini ukupnog naprežanja za test puzanja. Deformacije su mjerene 15, 30, 45 minuta, 1, 3, 6, 12, 24 sata, 3, 7, 15 dana nakon opterećenja, a zatim jednom mjesečno. Pri svakom mjerenju deformacija opterećenog uzorka, deformacije su također mjerene na dva neopterećena uzorka radi utvrđivanja

deformacija koje potječu od promjene vlažnosti - skupljanja uzorka i promjena ambijentalne temperature (korekcija temperature i vlažnosti). Radi usporedbe rezultata, jedan uzorak u okviru serije PR-7 (prizma 72) pripremljen je rezanjem okomito na ravninu slojevitosti (slika 8.b).



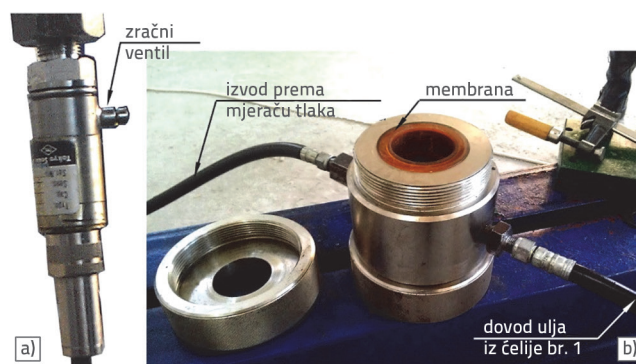
Slika 8. Oprema za testiranje: a) uređaj s dvostrukom polugom; b) okvir PR-7

Da bi se proveli troosni testovi puzanja, formirana je dispozicija tri susjedna uređaja s dvostrukom polugom (okviri 4, 5 i 6) prikazana na slici 9. U okvir br.4 je montirana hidraulična preša nosivosti 50 t, a u okvirima br.5 i br.6 montirane su po jedna troosna ćelija za uzorke stijene (Hoekova ćelija). Preša,



Slika 9. Dispozicija okvira za troosni test puzanja

dvije ćelije, manometar i mjerac tlaka fleksibilnim su crijevima povezane u jedan sustav. Vod ulja iz preše se nakon nepovratnog ventila račva prema manometru i ćeliji br.1 koja je povezana s ćelijom br. 2 (slika 10.b) iz koje postoji vod prema mjeracu pritiska vezanom za mjerni most. Mjerac pritiska je TML-ova ćelija za mjerenje pritiska ulja kapaciteta 20 MPa i točnosti 0.01 MPa (slika 10.a). Zračni ventil na tom mjeracu (slika 10.a) služio je za ispuštanje zaostalog zraka prilikom punjenja ćelija uljem, ali i za povremeno ispuštanje ulja kako bi se održao relativno konstantni tlak u ćelijama. Ovakva dispozicija omogućava nanošenje i održavanje iste vrijednosti tlaka ulja u troosnim ćelijama, odnosno istovremeno ispitivanje dva uzorka u seriji pod istim bočnim naprezanjem.



Slika 10. Detalji dispozicije za troosni test puzanja: a) Mjerac pritiska ćelija za mjerenje pritiska ulja proizvođača TML; b) Otvorena troosna ćelija broj 2

U odnosu na test puzanja proveden na prizmatičnim uzorcima, specifičnost je ovog testa u načinu nanošenja aksijalnog opterećenja. Zbog razlike u veličini uzoraka, ovdje se javlja potreba za nanošenjem manjih vrijednosti aksijalnih sila za istu potrebnu razinu aksijalnog tlaka. Budući da vlastita težina poluge

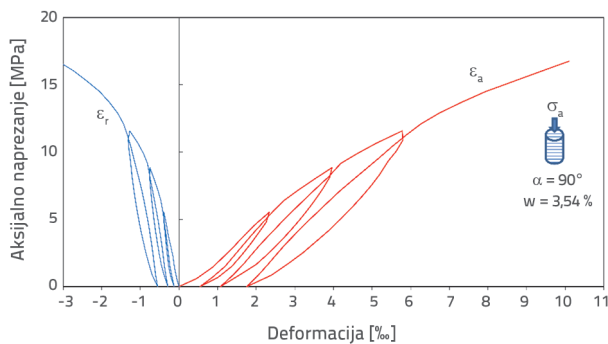
1 i poluge 2 nadilazi vrijednosti potrebnog opterećenja, okviri su opremljeni mehanizmom kojim se ta težina smanjuje na zahtijevanu vrijednost. Preko kolotura s kukom prebačeno je uže čiji je jedan kraj vezan za polugu 1 dok je o drugi kraj užeta obješena košara s mrtvim teretom. Dodavanjem tereta podiže se poluga 1, odnosno rasterećenje, što znači da se postupak nanošenja aksijalne sile svodi na uklanjanje dijelova tereta. Kontrola nanosene sile tijekom opterećivanja i za vrijeme trajanja testa provodise preko Hotingerovog mjerca sile kapaciteta 200 kN postavljenog ispod ćelije broj 1 i mjerca sile kapaciteta 1000 kN postavljenog ispod ćelije broj 2. Prikupljanje podataka s mjerca sile i tlaka te mjernih traka obavlja se preko statičkog mjernog mosta (proizvođač TML).



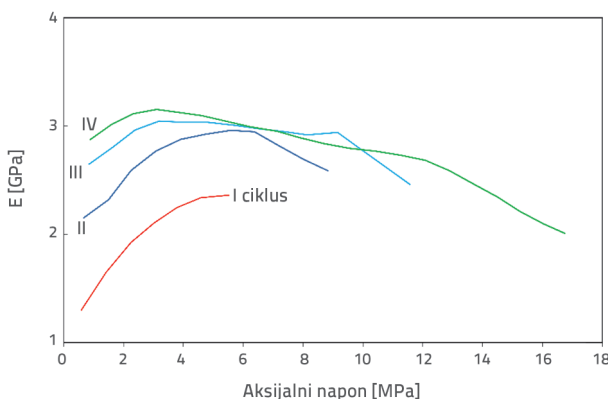
### 3. Odabrani rezultati kratkotrajnih testova

U ovom poglavlju su prikazani karakteristični rezultati kratkotrajnih jednoosnih i troosnih testova provedeni na orijentiranim cilindričnim uzorcima lapora.

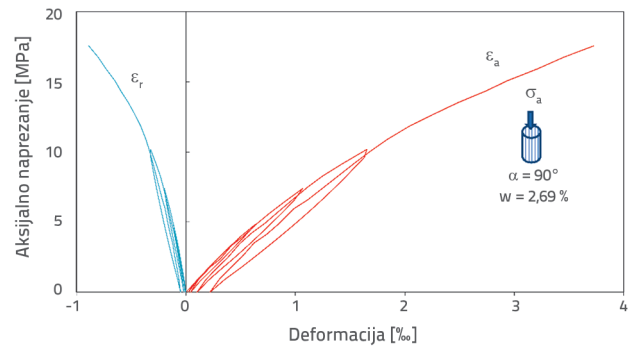
Jednoosni test je proveden na dva cilindrična uzorka različite orijentacije ( $\alpha = 0^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ ), slične vlažnosti. Nakon prvog opterećenja, provedena su još tri ( $\alpha = 90^\circ$ ) odnosno četiri ciklusa ( $\alpha = 0^\circ$ ) rasterećenje-ponovno opterećenje. Dijagrami prosječnih aksijalnih i radijalnih deformacija u funkciji aksijalnog napreznja prikazani su na slika 11. i slika 13. Uglavnom, naponsko-deformacijske krivulje ukazuju na nelinearnost materijala, akumulaciju nepovratnih deformacija nakon svakog ciklusa, histerezu u ciklusu rasterećenje - ponovno opterećenje. Za uzorak opterećen okomito na slojevitost, sekantni moduli defromabilnosti (slika 12.) pri opterećenju u okviru jednog ciklusa najprije rastu (krivulja konkavna prema gore, slika 11.), a zatim opadaju s porastom aksijalnog napreznja. To se najvjerojatnije može objasniti zatvaranjem kontakta ravnine slojevitosti pod pritiskom okomitim na njih. U prilog navedenoj hipotezi ide opadajući trend sekantnog modula opažen kod uzoraka opterećenih paralelno s ravninama slojevitosti u okviru jednog ciklusa opterećenja (slika 14.). Kod oba ispitivana uzorka iz ciklusa u ciklus se uočava trend povećanja vrijednosti modula defromabilnosti. Taj trend je izraženiji kod uzorka gdje je  $\alpha = 90^\circ$  i može se objasniti očvršćivanjem (prekonsolidacijom) materijala u prethodnom ciklusu.



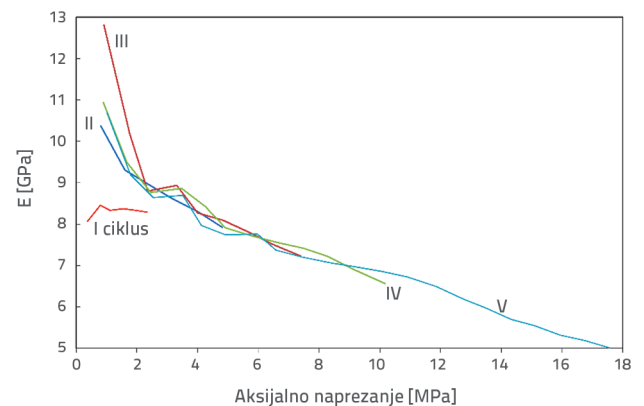
Slika 11. Dijagrami aksijalnih i radijalnih deformacija uzorka opterećenog okomito na ravninu slojevitosti



Slika 12. Dijagrami sekantnih modula defromabilnosti izmjerenih okomito na slojeve za različite cikluse opterećenja

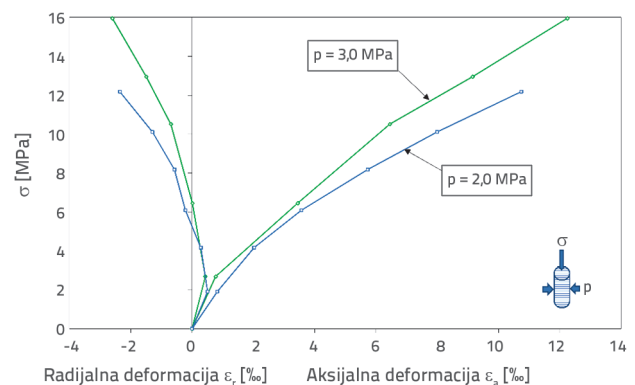


Slika 13. Dijagrami aksijalnih i radijalnih deformacija uzorka opterećen paralelno s ravninama slojevitosti



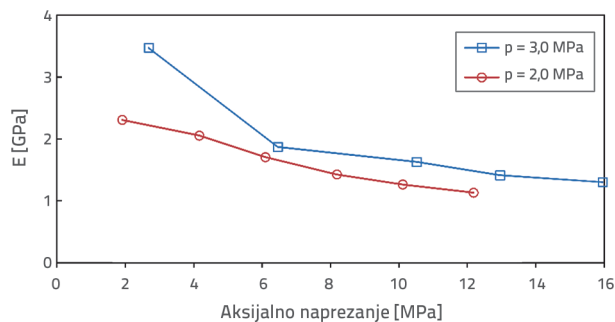
Slika 14. Dijagrami aksijalnih i radijalnih deformacija uzorka opterećen paralelno s ravninama slojevitosti

Na slici 15. su prikazani karakteristični rezultati konvencionalnog testa troosne kompresije na uzorcima opterećenim okomito na ravninu slojevitosti za dvije razine bočnog napreznja. Na slici 16. su prikazane vrijednosti sekantnih modula u funkciji aksijalnog i bočnog pritiska. S povećanjem vrijednosti bočnog napreznja povećavaju se i vrijednosti sekantnih modula. Također, u odnosu na jednoosni test ( $p = 0$  MPa) prikazane krivulje pokazuju smanjenje sekantnog modula s porastom aksijalnog napreznja.

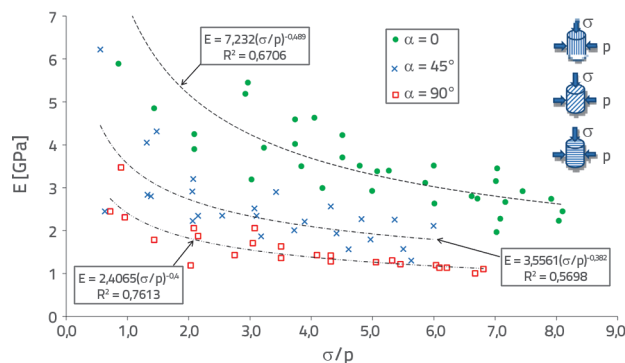


Slika 15. Dijagrami aksijalnih napreznja-deformacija uzoraka opterećen okomito na ravninu slojevitosti za dvije razine bočnog napreznja

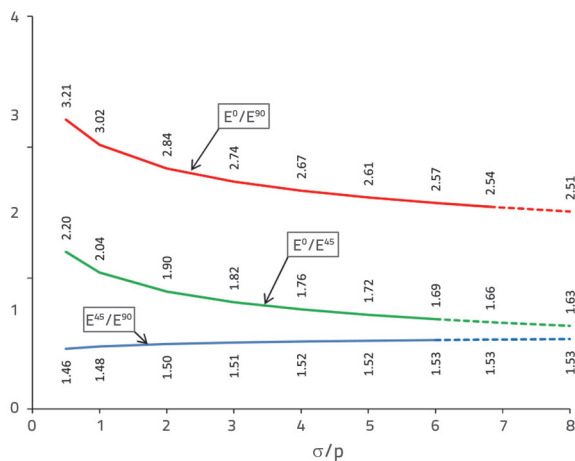
Iz više troosnih testova izmjereni sekantni moduli za vrijednosti kuta  $\alpha$  od 0,45 i 90 stupnjeva u funkciji odnosa aksijalnog i bočnog pritiska  $\sigma/p$  prikazani su na slici 17. Bočna naprezanja u testovima su bila 2,0 i 3,0 MPa. Isprekidanim linijama prikazane su ovisnosti sekantnih modula o  $\sigma/p$  dobivene regresijskom analizom. Bez obzira na očito rasipanje rezultata, dobivene ovisnosti omogućavaju procjenu relativnih odnosa između modula za tri kuta  $\alpha$  (slika 18.). Prosječne vrijednosti odnosa sekantnih modula deformabilnosti  $E_0/E_{90} = 2,88$ ,  $E_{45}/E_{90} = 1,50$ .



Slika 16. Dijagrami sekantnih modula deformabilnosti izmjerenih okomito na slojeve za dvije razine bočnog naprezanja



Slika 17. Sekantni moduli u funkciji kuta  $\alpha$ , isprekidanim linijama su prikazane regresijske krivulje



Slika 18. Odnosi sekantnih modula

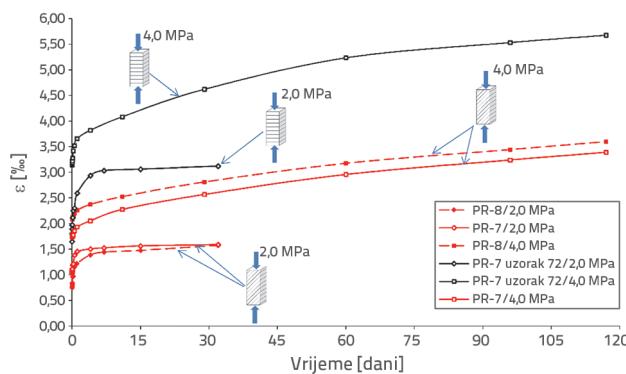
## 4. Odabrani rezultati testova puzanja

### 4.1. Jednoosni testovi puzanja

Jednoosni testovi puzanja su provedeni na dvije serije od po tri prizmatična uzorka (PR-7 i PR-8) za razinu naprezanja puzanja od 2,0 u trajanju od mjesec dana i 4,0 MPa, u trajanju od četiri mjeseca. Jedan uzorak u seriji PR-7, opterećen je okomito na slojeve, ostali pod kutom od 45 stupnjeva. Nakon testa su izmjerene prosječna vlažnost od 3,4 % i prosječna vrijednost jednoosne čvrstoće 10,38 MPa. Trenutačni odgovor materijala pri nanošenju naprezanja puzanja izražen je sekantnim modulima deformabilnosti čije su prosječne vrijednosti dane u tablici 1.

Tablica 1. Prosječne vrijednosti sekantnih modula deformabilnosti lapora

$\sigma$ [MPa]	2,0	4,0
$E^{90}$ [GPa]	1,21	1,91
$E^{45}$ [GPa]	2,23	3,03
$E^{45}/E^{90}$	1,84	1,59

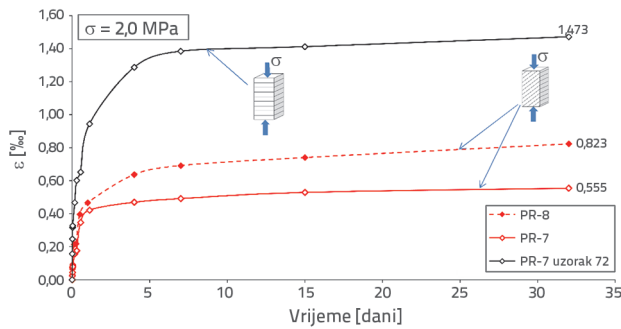


Slika 19. Rezultati testa puzanja serija prizmatičnih uzoraka PR-7 i PR-8. Usporedni dijagrami ukupnih aksijalnih deformacija pri naprezanjima od  $\sigma = 2,0$  MPa i  $\sigma = 4,0$  MPa

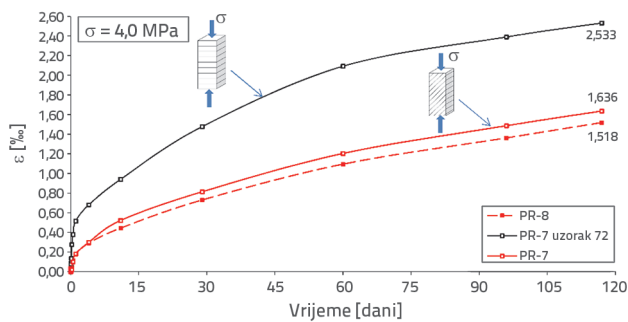
Usporedni dijagrami ukupnih aksijalnih deformacija (slika 19.) i deformacija puzanja (slike 20. i 21.) upućuju na razvoj primarnog i sekundarnog puzanja. Za obje razine aksijalnog naprezanja deformacije puzanja uzorka opterećenih pod kutom od 45 stupnjeva,  $\epsilon_a(45^\circ)$  u odnosu na prirodnu slojevitost su manje od deformacija puzanja uzorka opterećenog okomito na slojeve  $\epsilon_a(90^\circ)$ . Tako je za razinu naprezanja od 2,0 MPa nakon približno mjesec dana odnos prosječnih aksijalnih deformacija puzanja  $\epsilon_a(90^\circ) / \epsilon_a(45^\circ) = 2,15$ , a za razinu naprezanja od 4,0 MPa nakon četiri mjeseca taj odnos iznosi 1,61. S usporednih dijagrama prosječnih brzina deformacija puzanja prikazanih na slici 22. vidi se da su brzine primarnog i sekundarnog puzanja općenito veće za slučaj opterećenja okomito na slojevitost. Nakon 20 dana odnos brzina puzanja okomito na kut i pod kutom od 45



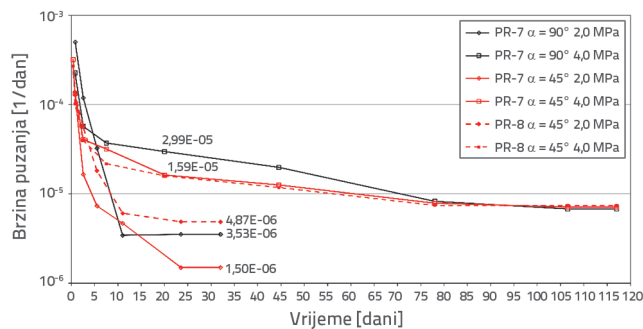
stupnjeva u odnosu na slojevitost iznosi 1,88 pri naprezanju puzanja od 4,0 MPa. Nakon približno dva i pol mjeseca od početka testa ovaj odnos je približno 1,00.



Slika 20. Usporedni dijagrami aksijalnih deformacija puzanja pri razini aksijalnog naprezanja od 2,0 MPa prizmatičnih uzoraka serija PR-7 i PR-8



Slika 21. Usporedni dijagrami aksijalnih deformacija puzanja pri razini aksijalnog naprezanja od 4,0 MPa prizmatičnih uzoraka serija PR-7 i PR-8

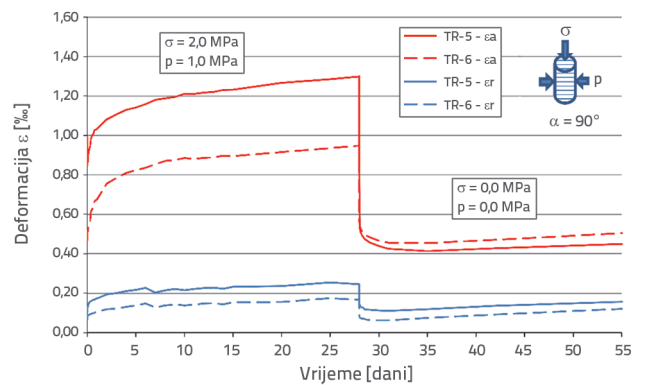


Slika 22. Usporedni dijagrami brzine puzanja za razine naprezanja puzanja od 2,0 MPa i 4,0 MPa

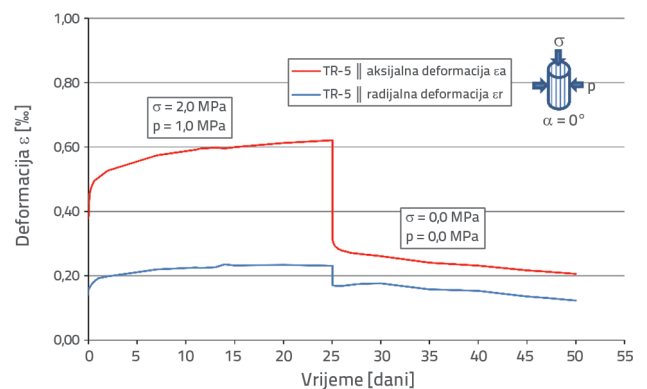
#### 4.2. Rezultati troosnih testova puzanja

U okviru troosnog testa puzanja ispitana su po dva uzorka s aksijalnim opterećenjem okomito na ravnine slojevitosti i paralelno njima. U prvoj fazi testa uzorci su bili izloženi konstantnom devijatoru naprezanja od 1,0 MPa (bočno naprezanje 1,0 MPa, aksijalno naprezanje 2,0 MPa) u razdoblju od 28 odnosno 25 dana. Nakon toga je izvršeno

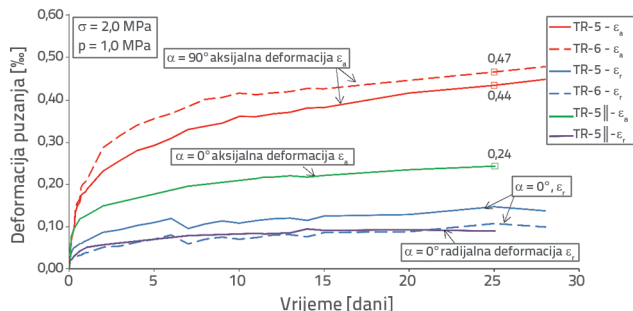
potpuno rasterećenje i mjerene povratne deformacije sljedećih 28 odnosno 25 dana. Na slici 23. prikazani su dijagrami ukupnih aksijalnih i radialnih deformacija tijekom vremena za uzorke opterećene aksijalnim naprezanjem okomito na slojevitost ( $\alpha = 90^\circ$ ), a na slici 24. paralelno sa slojevitošću ( $\alpha = 0^\circ$ ). Oblici dijagrama aksijalnih deformacija tijekom vremena upućuju na razvoj primarnog i sekundarnog puzanja. Dijagrami radialnih deformacija pokazuju sličnu tendenciju. Prosječna brzina sekundarnog puzanja u aksijalnom smjeru iznosi  $5,10 \cdot 10^{-6}$  / danu za aksijalno opterećenje okomito na slojeve, a  $2,67 \cdot 10^{-6}$  / danu za aksijalno opterećenje paralelno slojevima (odnos brzina 1,91). Odnos postignutih aksijalnih deformacije puzanja (slika 25.) u periodu od 25 dana  $\epsilon_{cr}(90^\circ) / \epsilon_{cr}(0^\circ)$  približno je 2. Odnos ukupnih radialnih i aksijalnih deformacija (slika 26.) je praktično konstantan tijekom testa puzanja za usvojeni  $\alpha$ . Međutim, prosječna vrijednost odnosa  $\epsilon_r / \epsilon_a$  je veća za  $\alpha = 0^\circ$  (0,38) nego za  $\alpha = 90^\circ$  (0,167) jer za  $\alpha = 0^\circ$  radialno naprezanje djeluje okomito na ravninu slojevitosti.



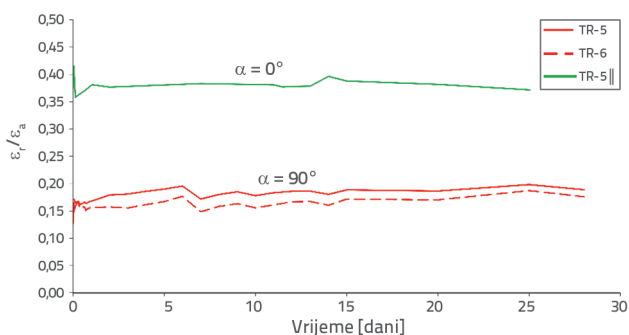
Slika 23. Ukupne aksijalne i radialne deformacije izmjerene u troosnom testu puzanja na uzorcima opterećenim okomito na ravnine slojevitosti



Slika 24. Ukupne aksijalne i radialne deformacije izmjerene u troosnom testu puzanja na uzorcima opterećenim paralelno ravninama slojevitosti



Slika 25. Usporedni prikaz aksijalnih i radijalnih deformacija puzanja za  $\alpha = 90^\circ$  i  $\alpha = 0^\circ$



Slika 26. Odnos ukupnih radijalnih i aksijalnih deformacija tijekom testa puzanja

### 5. Konstitutivni model materijala

Kratkotrajni deformacijski odgovor lapora se može opisati sekantnim modulom deformabilnosti. Eksperimentalni dokazi (poglavlje 3) upućuju na nelinearno ponašanje i ovisnost sekantnog modula o razini aksijalnog, razini bočnog napreznja i kuta  $\alpha$  kao što je prikazano na slici 27.a za  $p = 3.0$  MPa. Za fiksiranu vrijednost bočnog pritiska, ovisnost sekantnog modula o kutu  $\alpha$  i odnosa  $\sigma/p$  se može aproksimirati funkcijom:

$$E(\sigma/p, \alpha) = k_1(\sigma/p)\alpha^2 + k_2(\sigma/p)\alpha + k_3(\sigma/p) \tag{1}$$

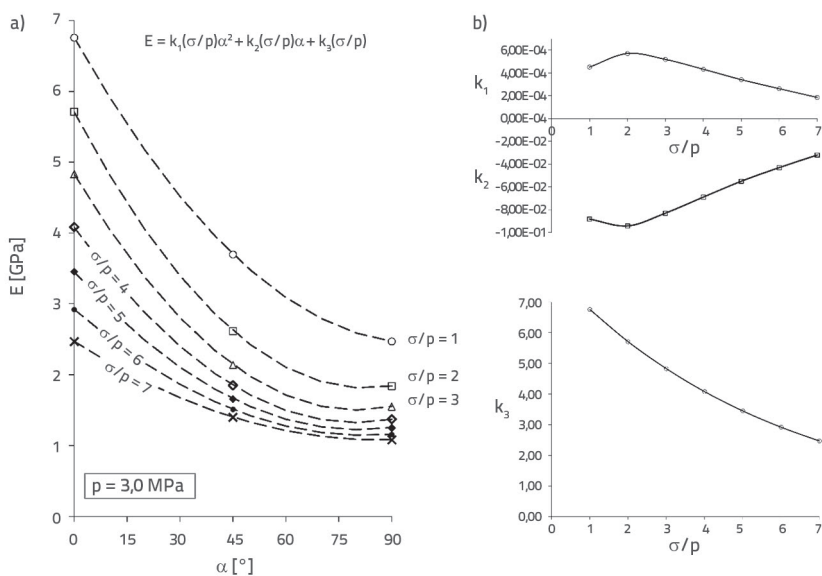
Funkcije  $k_1(\sigma/p)$ ,  $k_2(\sigma/p)$ ,  $k_3(\sigma/p)$  su interpolirane polinomima 6-tog stupnja u intervalu  $\sigma/p$  od 1 do 7, tablica 2., slika 27.b. Dijagrami funkcije E prema izrazu (1) prikazani su isprekidanim linijama na slici 27.a.

Rezultati provedenih testova puzanja pokazuju da se vremenski ovisan odgovor lapora sastoji od deformacije primarnog i sekundarnog puzanja, što je slučaj kada je razina napreznja ispod granice popuštanja ( $\sigma < \sigma_p$ , slika 28.a). U tom slučaju, ukupna deformacija je suma elastične deformacije i deformacije primarnog i sekundarnog puzanja:

$$\varepsilon = \varepsilon^{el} + \varepsilon^p + \varepsilon^s \tag{2}$$

gdje su:

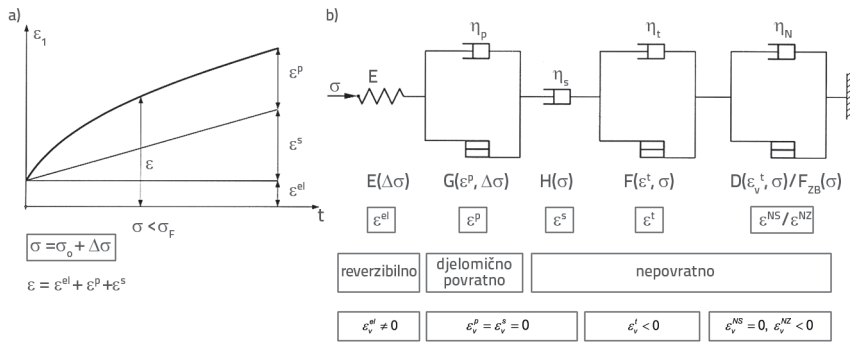
- $\varepsilon^{el}$  - elastična deformacija (izazvana promjenom napreznja)
- $\varepsilon^p$  - deformacija primarnog puzanja (zakašnjela elastičnost)
- $\varepsilon^s$  - deformacija sekundarnog puzanja



Slika 27. Aproksimacija sekantnog modula deformabilnosti

Tablica 2. Interpolacijski polinomi funkcija a, b, c

a	$-0,000249+1,2525833 \cdot 10^{-3}x-7,3844444 \cdot 10^{-4}x^2+2,214375 \cdot 10^{-4}x^3-3,7923611 \cdot 10^{-5}x^4+3,4791667 \cdot 10^{-6}x^5-1,3194444 \cdot 10^{-7}x^6$
b	$-0,018632-0,13109243x+0,082728169x^2-0,025330938x^3+4,3864653 \cdot 10^{-3}x-4,40462917 \cdot 10^{-4}x^5+1,5365278 \cdot 10^{-5}x^6$
c	$8,14-1,6546667x+0,35652778x^2-0,098541667x^3+0,018402778x^4-0,0017916667x^5-6,9444444e \cdot 10^{-5}x^6$
gdje je $x = \sigma/p$	



Slika 28. a) Vremenski ovisne deformacije nakon opterećenja, kada je naprezanje ispod granice popuštanja; b) Modificirani Wallnerov reološki model

naprezanja. Ovisno o realnom deformacijskom odgovoru stijene koji se modelira, može se koristiti modul elastičnosti ili promjenjivi modul deformabilnosti za linearno neelastičan materijal.

Paralelna veza viskozno tijela i klizača predstavlja primarno puzanje (zakašnjela elastičnost) tj. viskoplastičnu deformaciju s deformacijskim ojačanjem. Ova komponenta je istog znaka kao i trenutna deformacija i ovisi o promjeni naprezanja. Deformacija primarnog puzanja je djelomično povratna. Razina naprezanja pri kojoj se aktivira viskozni element ispod granice popuštanja (plastičnosti).

Newtonov viskozni fluid opisuje sekundarno puzanje. Ova komponenta deformacije ovisi o trenutnom stanju naprezanja i nepovratna je.

Modificirani Wallnerov model za jednoosno stanje naprezanja može biti predstavljen:

$$\epsilon = \frac{1}{E(\sigma_1)} \sigma_1 + \frac{3}{2} \left( \frac{\Delta\sigma_1}{E_p} \right)^m \cdot \left( 1 - e^{-\frac{2E_p t}{3\eta_p}} \right) + a(\sigma_1)^n t \quad (3)$$

gdje su:

$E(\sigma_1)$  - sekantni modul deformabilnosti lapora

$\sigma_1$  - aksijalno naprezanje

$\Delta\sigma_1$  - razlika naprezanja

$E_p$  - modul deformacijskog ojačanja

$\eta_p$  - viskoznost (za primarno puzanje)

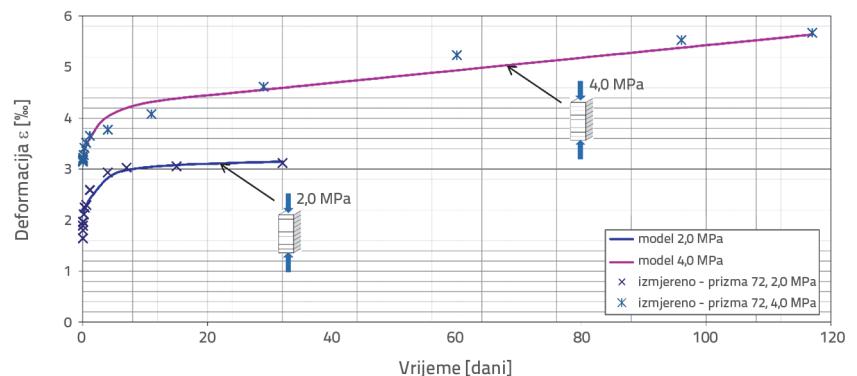
$m$  - eksponent naprezanja (za primarno puzanje)

$a$  - parametar puzanja

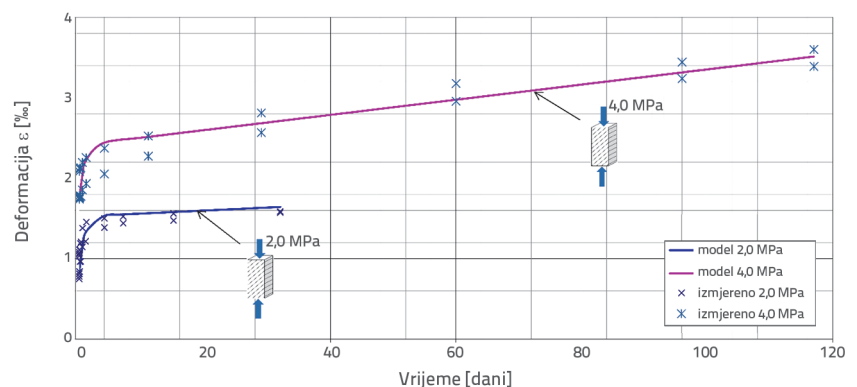
$n$  - normalizirani eksponent naprezanja (za sekundarno puzanje)

Prvi član izraza (3) opisuje elastičnu deformaciju, drugi član se odnosi na deformaciju primarnog puzanja, a treći član označava deformaciju sekundarnog puzanja.

Parametri materijala vezani za puzanje  $E_p$ ,  $m$ ,  $\eta_p$ ,  $a$  i  $n$  su definirani primjenom metode najmanjih kvadrata. Potprogram Excel Solver je upotrijebljen za minimizaciju sume kvadrata. U navedenom postupku su primijenjene vrijednosti sekantnih modula defomabilnosti prikazane u tablici 4. Dobivene vrijednosti parametara modela za slučaj opterećenja okomito i pod kutom od 45 stupnjeva u odnosu na ravnine prirodne slojevitosti prikazane su u tablici 3. Ukupne aksijalne deformacije izmjerene tijekom testova puzanja i odgovarajuće teoretske krivulje prema modificiranom Wallnerovom modelu prikazane su na slikama 29. i 30.



Slika 29. Ukupne deformacije prizmatičnih uzoraka lapora ( $\alpha = 90^\circ$ ) izmjerene tijekom testa puzanja pri vrijednostima naprezanja od 2,0 i 4,0 MPa i teorijske krivulje deformacija lapora prema modificiranom Wallnerovom modelu (pune linije)



Slika 30. Ukupne deformacije prizmatičnih uzoraka lapora ( $\alpha = 45^\circ$ ) izmjerene tijekom testa puzanja pri vrijednostima naprezanja od 2,0 i 4,0 MPa i teorijske krivulje deformacija lapora prema modificiranom Wallnerovom modelu (pune linije)

**Tablica 3. Vrijednosti parametara materijala lapora za primarno i sekundarno puzanje nakon rasterećenja**

Parametri	Primarno puzanje			Sekundarno puzanje	
	$E_p$ [MPa]	$\mu_p$ [MPa·d]	m	a [1/d]	n
Opterećenje okomito na slojevitost	500	600	0,065	0,00120	1,75
Opterećenje pod kutom od 45° u odnosu na slojevitost	700	400	0,010	0,00145	1,35

**Tablica 4. Vrijednosti sekantnog modula deformabilnosti lapora za definiranje parametara primarnog i sekundarnog puzanja**

Karakteristično naprezanje [MPa]	2,0	4,0
E [GPa]	0,98	1,27
$E_{45}$ [GPa]	2,45	2,35

Linearnom interpolacijom vrijednosti iz tablice 3. se mogu dobiti izrazi za promjenu parametara modela vezanih za puzanje u intervalu kuta  $\alpha$  od 45 do 90 stupnjeva:

$$\begin{aligned}
 E_p &= 4.44\alpha + 300 \\
 m &= 0.001222\alpha - 0.045 \\
 \eta_p &= -4.44\alpha + 800 \\
 a &= -5.55556 \cdot 10^6 \alpha + 0.0017 \\
 n &= -0.00889\alpha + 2.15
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Primjenom izraza (1) i (4), izraz (3) se može napisati u obliku:

$$\varepsilon = \frac{1}{E(\sigma_1 / p, \alpha)} \sigma_1 + \frac{3}{2} \left( \frac{\Delta\sigma_1}{E_p(\alpha)} \right)^{m(\alpha)} \left( 1 - e^{-\frac{2E_p(\alpha)}{3\eta_p(\alpha)} t} \right) + a(\alpha) \sigma_1^{n(\alpha)} t \tag{5}$$

Primjena izraza (5) je ograničena na interval kuta  $\alpha$  od 45 do 90 stupnjeva. Ograničenje je vezano za opseg provedenog eksperimentalnog istraživanja. Međutim, prema ovdje izloženoj metodologiji, moguće je za jednoosno stanje naprezanja, na osnovi tri jednoosna testa puzanja na tri različita orijentirana uzorka (npr. za vrijednosti  $\alpha$  od 0, 45 i 90 stupnjeva) interpolacijom rezultata utvrditi ovisnosti tipa (4) za cijeli interval  $\alpha$  od 0 do 90 stupnjeva. Slično, na osnovi tri kratkotrajna testa za  $p = 0$  je moguće utvrditi ovisnosti sekantnog modula tipa izraza (1). Uključenje utjecaja bočnog naprezanja kako na kratkotrajni i vremenski ovisan odgovor zahtijeva provedbu većeg broja troosnih kratkotrajnih i testova puzanja ovisno o prethodno utvrđenom opsegu bočnih naprezanja koja su važna za konkretan problem. To podrazumijeva i primjenu izraza (6) i (7) za troosno stanje naprezanja:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_1^e + \varepsilon_1^p + \varepsilon_1^s = \frac{\sigma_1}{E_1} + \frac{3}{2} \left( \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{E_p} \right)^m \left( 1 - e^{-\frac{4E_p}{3\eta_p} t} \right) + a(\sigma_1 - \sigma_3)^n t \tag{6}$$

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_3^e + \varepsilon_3^p + \varepsilon_3^s = -\frac{\sigma_3}{E_3} - \frac{3}{2} \left( \frac{\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)}{E_p} \right)^m \left( 1 - e^{-\frac{4E_p}{3\eta_p} t} \right) - a(\sigma_1 - \sigma_3)^n t \tag{7}$$

## 6. Zaključak

U ovom radu prikazani su odabrani rezultati eksperimentalnog istraživanja kratkotrajnog i vremenski ovisnog deformacijskog odgovora neogenog lapora kao predstavnika mekih sedimentnih stijena. U okviru eksperimentalnog istraživanja provedeni su jednoosni i troosni kratkotrajni i dugotrajni testovi na uzorcima lapora s različitim orijentacijom ravnine slojevitosti u odnosu na smjer opterećenja.

Rezultati eksperimentalnog istraživanja pokazuju izrazit utjecaj inherentne anizotropije na deformacijski odgovor meke stijene, kako kratkotrajni tako i vremenski ovisan. Uzimajući u obzir nelinearnost materijala, za opis kratkotrajnog deformacijskog odgovora lapora odabran je sekantni modul deformabilnosti. Rezultati provedenih kratkotrajnih testova upućuju na opadajući trend sekantnih modula deformabilnosti s porastom kuta između opterećenja i ravnina prirodne slojevitosti ( $\alpha$ ). Interpolacijom rezultata kratkotrajnih ispitivanja utvrđena je parabolična ovisnost sekantnog modula o kutu  $\alpha$  u intervalu od 0 do 90 stupnjeva.

Rezultati jednoosnih testova puzanja pokazuju da brzine primarnog i sekundarnog puzanja imaju rastući trend s porastom kuta  $\alpha$ . Sličan trend pokazuju brzine sekundarnog puzanja izmjerene u troosnom testu puzanja, pri čemu je odnos ukupnih radialnih i aksijalnih deformacija gotovo konstantan tijekom testa za fiksiranu vrijednost kuta  $\alpha$ . Vremenski ovisan deformacijski odgovor opisan je utvrđivanjem ovisnosti parametara modificiranog Wallnerovog modela o kutu  $\alpha$  u intervalu od 45 do 90 stupnjeva na osnovi rezultata provedenih testova puzanja.

Ograničenja ovim istraživanjem predloženog modela vezana su za opseg provedenog eksperimentalnog istraživanja. Za daljnju verifikaciju predloženog modela, prema izloženoj metodologiji, moguće je za jednoosno stanje naprezanja, na osnovi tri jednoosna testa puzanja na tri različita orijentirana uzorka interpolacijom rezultata utvrditi ovisnosti tipa (4) za cijeli interval  $\alpha$  od 0 do 90 stupnjeva. Slično, na osnovi tri kratkotrajna testa,



za fiksiranu vrijednost bočnog tlaka moguće je utvrditi ovisnosti sekantnog modula tipa jednadžbe (1). Uključenje utjecaja bočnog naprezanja zahtijeva provedbu većeg broja troosnih testova i

kratkotrajnih testova puzanja, ovisno o prethodno utvrđenom opsegu bočnih naprezanja koja su važna za konkretan problem i/ili primarno stanje naprezanja

## LITERATURA

- [1] Xu, G., He, C., Chen, Z., Yang, Q.: Transversely isotropic creep behavior of phyllite and its influence on the long-term safety of the secondary lining of tunnels, *Engineering Geology*, 278 (2020), 105834, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105834>.
- [2] Casagrande, A., Carillo, N.: *Shear Failure of Anisotropic Materials*, J. Boston Soc. Civ. Eng., 31 (1944) 4, pp. 78-87.
- [3] Oka, F., Kimoto, S., Kobayashi, H., Adachi, T.: Anisotropic behavior of soft sedimentary rock and a constitutive model, *Soils and Foundations*, 42 (2002) 5, pp. 59-70.
- [4] Barla, G.: *Rock Anisotropy: Theory and Laboratory Testing (Chapter )*, *Rock Mechanics*, ed. L. Müller, Springer-Verlag, New York, pp. 131-169, 1972.
- [5] Niandou, H., Shao, J.F., Henry, J.P., Fourmaintraux, D.: Laboratory investigation of the mechanical behaviour of tournemire Shale, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34 (1997) 1, pp. 3-16.
- [6] Cazacu, O., Cristescu, N.D., Shao, J.F., Henry, J.P.: A new anisotropic failure criterion for transversely isotropic solids, *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 3 (1998), pp. 89-103.
- [7] Saroglou, H., Tsiambao, S. G.: A modified Hoek-Brown failure criterion for anisotropic intact rock, *Int J Rock Mech Min Sci.*, 45 (2008), pp. 223-234.
- [8] Khanlari, G., Rafiei, B., Abdilor, Y.: Evaluation of strength anisotropy and failure modes of laminated sandstones, *Arab J Geosci.*, 8 (2015) 5, pp. 3089-3102.
- [9] Singh, M., Samadhiya, N.K., Kumar, A., Kumar, V., Singh, B.: A nonlinear criterion for triaxial strength of inherently anisotropic rocks, *Rock Mech Rock Eng*, 48 (2015) 4, pp. 1387-1405.
- [10] Aliabadian, Z., Zhao, G., Russell, A.: Failure, crack initiation and the tensile strength of transversely isotropic rock using the Brazilian test, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 122 (2019), 104073, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmm.2019.104073>.
- [11] Amadei, B., Savage, W.Z., Swolfs, H.S.: Gravitational stresses in anisotropic rock masses, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1 (1987) 24, pp. 5-14, [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(87\)91227-7](https://doi.org/10.1016/0148-9062(87)91227-7).
- [12] Nasser, M., Rao, K.M., Ramamurthy, T.: Anisotropic strength and deformational behavior of Himalayan schists, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40 (2003), pp. 3-23.
- [13] Meng, L., Li, T., Liao, A. et al.: Anisotropic Mechanical Properties of Sandstone Under Unloading Confining Pressure at High Temperatures, *Arab J Sci Eng*, 43 (2018), pp. 5283-5294, <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3100-y>.
- [14] Jin, Z., Li, W., Jin, C., Hambleton, J., Cusatis, G.: Anisotropic elastic, strength, and fracture properties of Marcellus shale, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 109 (2018), pp. 124-137.
- [15] Naumann, M., Hunsche, U., Schulze, O.: Experimental investigations on anisotropy in dilatancy, failure and creep of Opalinus Clay. *Phys. Chem. Earth.*, 8-14 (2007) 32, pp. 889-895.
- [16] Sone, H., Zoback, M.D.: Mechanical Properties of Shale Gas Reservoir Rocks - Part 2: Ductile Creep, Brittle Strength, and Their Relation to the Elastic Modulus, *Geophysics*, 5 (2013) 78, pp. D393-D402, <https://doi.org/10.1190/geo2013-0051.1>.
- [17] Wu, C., Chen, Q., Basack, S., Xu, R., Shi, Z.: Biaxial creep test study on the influence of structural anisotropy on rheological behavior of hard rock, *J. Materials Civil. Eng.*, 10 (2016) 28, 04016104, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001571](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001571).
- [18] Khosravi, E., Ghassemi, A.: Influence of Temperature and Anisotropy on Creep Behavior of Mancos Shale, 51<sup>st</sup> U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium, 25-28 June, San Francisco, California, USA, 2017.
- [19] Trzeciak, M., Sone, H., Dąbrowski, M.: Long-term creep tests and viscoelastic constitutive modeling of lower Paleozoic shales from the Baltic Basin, N Poland, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 112 (2018), pp. 139-157.
- [20] Zhang C.L., Armand G., Conil N., Laurich B.: Investigation on anisotropy of mechanical properties of Callovooxfordian claystone, *Engineering Geology*, 251 (2019), pp.128-45.
- [21] Li, Z., Nguyen, T.S., Su, G., Labrie, D., Barnichon, J.D.: Development of a viscoelastoplastic model for a bedded argillaceous rock from laboratory triaxial tests, *Canadian Geotechnical Journal*, 54 (2017), pp. 359-372, <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0100>.
- [22] Wang, Z., Zong, Z., Qiao, L., Li, W.: Transversely Isotropic Creep Model for Rocks, *International Journal of Geomechanics*, 6 (2018) 18, (04018033), 04018033, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001159](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001159).
- [23] Krstić, N., Krsmanović, R., Čadenović, D., Mirković, M., Pulejković, D., Dodiković, S., Potkonjak, B.: Condition of accumulations and the age of the coal and cement marl in the Potrice deposit-Pljevlja. *Radovi Geoinstituta*, 29 (1994), pp. 105-120.
- [24] Pettijohn, F.J.: *Sedimentary Rocks*, 2nd Revised edition, Joanna Cotler Books, 1957.
- [25] ISRM, Commission on Standardization of Laboratory and Field Test (1981) Suggested Methods for the Rock Characterization, Testing and Monitoring, E.T. Brown (editor), Pergamon Press, Oxford, UK, 211p.
- [26] Zivaljevic, S., Tomanovic, Z.: Experimental research of the effects of preconsolidation on the time-dependent deformations—creep of marl, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 19 (2015) 1, <https://doi.org/10.1007/s11043-014-9250-8>.
- [27] Lu, Y., Wang, L.: Effect of water and temperature on short-term and creep mechanical behaviors of coal measures mudstone, *Environmental Earth Sciences*, 76 (2017) 17, pp. 1-15.
- [28] Wallner, M.: Stability calculation concerning a room and pillar design in rock salt. In: *International Congress for Geotechnics*, Melbourne (1983)
- [29] Tomanovic, Z.: Rheological model of soft rock based on test on marl, *Int. J. Mechanics of Time-Dependent Materials*, 2 (2006) 10, pp. 135-154.
- [30] Tomanovic, Z.: The stress and time dependent behaviour of soft rock, *GRAĐEVINAR*, 12 (2012) 64, pp. 993-1007.