



## Matej Maček

Univerza v Ljubljani  
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Katedra za mehaniko tal

Matej Maček se je rodil leta 1982 v Ljubljani. Osnovno šolo je obiskoval na Vodmatu in se leta 1996 vpisal na Gimnazijo Šentvid v Ljubljani. Leta 2000 je maturiral in se v istem letu vpisal na univerzitetni študij gradbeništva Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, ki ga je leta 2006 končal z diplomskim delom "Sukcija zemljin", izdelanim pod mentorstvom prof.dr. Bojana Majesa. Za diplomsko delo je prejel tudi fakultetno Prešernovo nagrado.

Novembra 2006 se je zaposlil na Katedri za mehaniko tal z laboratorijem UL FGG kot strokovni sodelavec, leta 2008 pa je postal mladi raziskovalec na isti katedri. Po končanem stažu mladega raziskovalca se je leta 2012 ponovno zaposlil na Katedri za mehaniko tal z laboratorijem UL FGG kot strokovni sodelavec, leta 2013 pa kot asistent z doktoratom. Kot asistent vodi vaje pri predmetih Mehanika tal in inženirska geologija ter Geotehnične gradnje.

Oktobra 2012 je zagovarjal doktorsko delo "Vpliv matrične sukcije na pomike plazu Slano blato", ki ga je izdelal pod mentorstvom prof.dr. Bojana Majesa.

V svojem raziskovalnem delu se ukvarja z laboratorijskimi preiskavami zemljin, gibanjem vode v tleh in s sukcijo zemljin. Je avtor ali soavtor 6 člankov v recenziranih domačih in tujih revijah ter 14 člankov, objavljenih v zbornikih tujih in domačih znanstvenih konferenc.

Matej Maček je član Slovenskega geotehničnega društva in mednarodnega društva ISSMGE.

Matej Maček was born in Ljubljana in 1982. He attended elementary school in Vodmat, Ljubljana and in 1996 he started high school at Gimnazija Šentvid, Ljubljana, which he finished in 2000. In the same year he started a university study at the Faculty of Civil and Geodetic Engineering of the University of Ljubljana. In 2006 he graduated with diploma work "Soil suction" under supervision of Prof. Dr. Bojan Majes and for this work he was awarded with a Prešern award for students by Faculty of Civil and Geodetic Engineering.

In July 2006 he was employed at the Chair for soil mechanics with laboratory at the Faculty of Civil and Geodetic Engineering as technical employee. From 2008 to 2012 he was a young researcher at Chair for soil mechanics with laboratory, founded by the Slovenian Research Agency. From 2012 he was again technical employee and from January 2013 he is teaching assistant at the Chair for soil mechanics with laboratory.

He completed doctoral study at the Faculty of Civil and Geodetic Engineering in November 2012 under supervision of Prof. Dr. Bojan Majes with the PhD thesis „The influence of matric suction on the movements of Slano Blato landslide“.

His major research interests are laboratory testing, water flow in soils and soil suction.

He published 6 scientific papers as author or co-author in peer-reviewed international and domestic journals and 14 papers in proceedings of international and domestic conferences.

He is a member of SloGeD and ISSMGE.



**Matej MAČEK**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, Ljubljana  
e-naslov: matej.macek@fgg.uni-lj.si

## **VPLIV SUKCIJE NA STABILNOST PLAZU SLANO BLATO**

**POVZETEK:** Varnost plitvih plazov je močno odvisna od velikosti pozitivnih in/ali negativnih pornih tlakov. Ti se sezonsko spreminjajo v odvisnosti od vremena in drugih zunanjih vplivov, na primer vegetacije. Da bi ovrednotili dejavnike, ki vplivajo na spreminjanje faktorja varnosti plazov Slano blato, smo v plitvi površinski coni, do globine 3,5 m, plaz opremili z merilniki sukcije. Meritve sukcije na terenu smo vrednotili v povezavi s podatki meritev na vremenski postaji ter z geodetskimi meritvami premikov površine. V laboratoriju smo merili vpliv sukcije na deformacije plazovine zaradi lezenja. Na osnovi podatkov meritev smo izdelali materialni model, ki opisuje opazovanja na plazov.

## **INFLUENCE OF SOIL SUCTION ON STABILITY OF SLANO BLATO LANDSLIDE**

**ABSTRACT:** Safety of shallow landslides is strongly dependent on pore pressures, either positive or negative. The pore pressures changes in the near surface zone are influenced by weather conditions and other external influences as vegetation, human activities, etc. At Slano Blato landslide the soil suction or negative pore pressure is measured at the depths up to 3,5 m to characterize the important factors that influence its factor of safety and may cause its instability. The suction measurements were complemented by the measurements of the weather conditions on the site and by the geodetic survey of the surface movements. In the laboratory the soil creep was studied for different vertical and shear stresses and different suctions. The material model was developed, which was based on the measurements, and the results of the model predictions were compared to the field measurements.

## UVOD

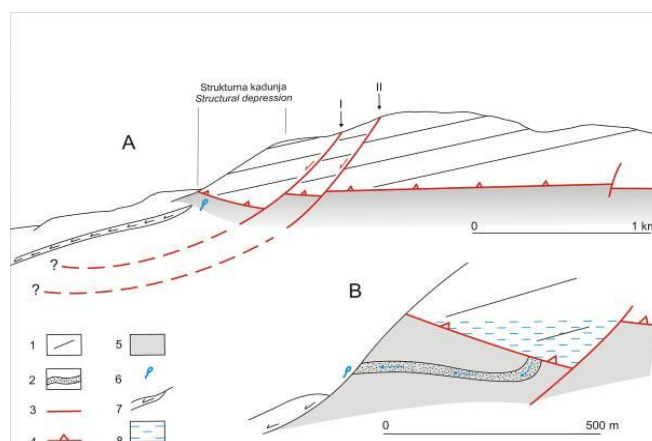
Plaz Slano blato je eden izmed največjih plazov v Sloveniji in le eden izmed večjih plazov v Vipavski dolini. Zaradi kompleksne narave obnašanja in periodične ponovljivosti plazenja je bil obsežno raziskan, o čemer priča tudi veliko število znanstvenih člankov. Zaradi ogroženosti vasi Lokavec so leta 2004 pričeli v zgornjem delu plazu z gradnjo vodnjakov, ki so močno izboljšali stanje na plazu (Pulko et al., 2012). Leta 2006 je Petkovškova v svoji doktorski nalogi opozorila na ugodne vplive sukcije na strižno trdnost zemljin in na morebitno plitvo pripovršinsko drsenje plazu Slano blato zaradi upada sukcije (Petkovšek, 2006). Do tega spoznanja so jo pripeljale laboratorijske meritve in podatki terenskih opazovanj plazu, ki so kazali, da se plaz lahko giblje kot blatni tok tudi v času, ko ni bilo padavin. Da bi preverili ugoden vpliv sukcije na stabilnost plazu, je bil plaz leta 2007 opremljen z merilniki sukcije.

V obdobju 2008-2012 so se sukcije pogosto približale vrednostim, pri katerih plaz po ocenah iz leta 2007 (Petkovšek et al., 2007) naj ne bi izkazoval zadostne varnosti in bi moral drseti. Vendar velikih površinskih pomikov video nadzorni sistem ni zaznal. Da bi preverili velikost pomikov in povezavo med pomiki in sukcijo, smo plaz v letu 2011 opremili z geodetskimi točkami, hkrati pa smo v laboratoriju izvedli preiskave strižnega lezenja zemljin ob različnih velikostih sukcije in strižne obremenitve. Na podlagi laboratorijskih meritev smo naredili model obnašanja plazine in rezultate modela primerjali s terenskimi opazovanji.

## PREDSTAVITEV PLAZU SLANO BLATO

### Geološki opis plazu Slano blato

Plaz Slano blato se nahaja na narivnem kontaktu mezozojskih karbonatnih kamnin Trnovskega gozda na eocenski fliš Vipavske doline. Flišne kamnine so močno nagubane in razpokane, vpad plasti flišnega peščenjaka pa je  $10^\circ$  v pobočje plazu. Na območju začetnega zdrsa plazu se nahaja tudi približno 20 m širok tektonski prelom z vpadom  $55^\circ$ – $75^\circ$  proti severozahodu (Kočevar in Ribičič, 2002a). Pobočja okoli nariva so prekrita s podornimi bloki in melišči, na flišni kamnini pa se nahajajo tudi večji splazeli bloki karbonatov iz roba Trnovskega gozda (Placer et al., 2008). Tudi sam masiv Male Gore je zdrsnil in ustvaril strukturno kadunjo, ki je sposobna zadrževati vodo (slika 1). Ob deževju se kadunja zapolni z vodo, ki se preko tektonskih razpok in prepustnejših flišnih peščenjakov preceja v območje plazu. Posledica precejanja vode je večje število izvirov ob narivnem kontaktu in močvirnatih izravnav, ki so se nahajale na tem mestu pred splazitvijo plazu leta 2000. Pred splazitvijo so bili na lokaciji blatnega jezera zaznani tudi arteški tlaki (Kočevar in Ribičič, 2002b).



Slika 1. Shematski geološki profil preko Velikega Modrasovca in Male Gore ter detajl strukturne kadunje (Placer et al., 2008). 1- lezika v mezozojskih karbonatih; 2- eocenski apneni peščenjak; 3- plazina (zdrсна ploskev); 4- meja Trnovskega pokrova; 5- eocenski fliš; 6- solzila; 7- plaz; 8- strukturno zajetje.

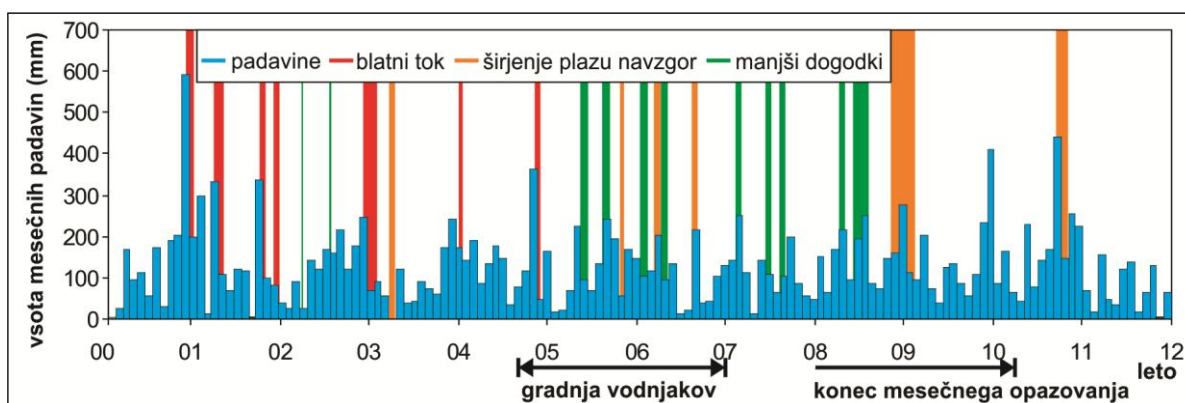
Plaz Slano blato je kompleksen plaz in ga lahko po Ribičiču (2002) razdelimo na naslednja glavna območja: zgornji del plazu, kjer so se v letih 2004-2007 zgradili vodnjaki, zgornji kanal med vodnjaki in

pregrado, blatno jezero, kjer je teren skorajda horizontalen in spodnji kanal. V zgornjem delu plazu so se prožili rotacijski drsi, ki so se ob deževju spremenili v blatni tok, stekli po zgornjem kanalu in se začasno ustavili na blatnem jezeru. Ko se je v blatnem jezeru akumulirala zadostna količina materiala, so se iz blatnega jezera sprožili blatni tokovi, ki so lahko dosegli vas Lokavec.

### Zgodovina plazu Slano blato

Plaz Slano blato se nahaja nad vasjo Lokavec pri Ajdovščini. V ljudskem izročilu vasi obstaja zgodba o premiku gradbenega materiala med gradnjo cerkve sv. Urbana, kar bi lahko bila posledica plazenja (Benko, 2011), prvi znanstveni zapis plazenja na tem območju pa opisuje dogodke iz leta 1786 (Hacquet, 1789). V začetku 20. stoletja so bila na plazu opravljena regulacija vodotoka in druga sanacijska dela, ki so sledila velikim poplavam in blatnim tokovom v letih 1885, 1888 in 1902 (Benko, 2011).

Plaz se je ponovno sprožil po obdobju obilnih padavin v novembru leta 2000. Odlomni rob plazu je bil na višini približno 600 m n.m., zdrsele mase pa so stekle v obliki blatnih tokov s hitrostjo 60-100 m/s do kote 460 m n.m.v.. Na zgornjem in stranskih odlomnih robovih so se prožili rotacijski zdrsi, ki so širili območje plazu navzgor proti naravnemu robu (Mali gori), ob večjih padavinah pa so se na plazu prožili blatni tokovi, ki so dosegli vas Lokavec. Ker se je območje plazu pospešeno širilo in so blatni tokovi ogrožali vas Lokavec, se je leta 2002 pričelo z interventnimi deli na plazu Slano blato, izgradilo se je pregrado za zadržanje blatnih tokov, med leti 2004 in 2007 pa se je v zgornjem delu plazu zgradilo vodnjake za zajem podzemne vode, ki hkrati delujejo tudi kot strižna ojačitev v plazini (Pulko et al., 2012). Po izgradnji vodnjakov se stanje na plazu umirja, kar je razvidno iz slike 2, ki prikazuje mesečne padavine in masne premike v obdobju 2000-2012. V obdobju po izgradnji vodnjakov je prišlo do večjih pomikov le v zgornjem delu, kjer se plaz še zmeraj širi navzgor.



Slika 2. Mesečne padavine in masni premiki plazu Slano blato v obdobju 2000-2012.

### Terenske raziskave

Terenske raziskave plazu Slano blato lahko razdelimo v dva ločena tematska sklopa: na začetne raziskave, izvedene za potrebe razumevanja geoloških in geotehničnih razmer in načrtovanje sanacijskih ukrepov ter na opazovanje plazu za vzpostavitev nadzora nad gibanjem plazu in učinkovitostjo izvedenih sanacijskih ukrepov.

Prvotni opazovalni sistem so sestavljali inklinometri, piezometri in geodetske točke, ki pa so bili zaradi velikih premikov kmalu porušeni (Fifer Bizjak in Zupančič, 2009). Zato se je, predvsem po zaslugi poveljnika CZ Ajdovščina g. Igorja Benka, leta 2005 pomike pričelo opazovati s 4 video nadzornimi kamerami, pomike plazu pa je enkrat mesečno do leta 2008 popisoval tudi dežurni geolog.

Leta 2007 se je zgornji del plazu in zgornji kanal dvakrat premerilo z LIDAR skeniranjem (osebni arhiv dežurnega geologa Marka Kočvarja, Kogoj et al., 2007). Na podlagi meritev se je izdelala detajlna karta plastnic, 3D model plazu, karta naklonov, ocena pomika ploskve terena ter pomikov značilnih objektov na plazu. Premike značilnih točk se je ocenilo na mestu flišne skale na zgornjem odlomnem robu plazu, na

jašku pod vodnjaki ter na mestu izgradnje pregrade na dnu zgornjega kanala. Na skali se je ugotovilo pomike do 70 cm, na jašku približno 25 cm ter na mestu pregrade 54 cm. Video nadzorne kamere so v tem obdobju ravno tako zaznale pomike, konec leta 2008 pa tudi popolno porušitev flišne skale na zgornjem odlomnem robu plazu in kasnejši zemeljski tok. Pomik pregrade pa je bil posledica gradnje pregrade in ne pomika plazu. Obe meritvi sta izkazovali, da je plaz kljub izvedenim sanacijskim delom še vedno aktiven.

### Posebnosti plazu Slano blato

Med terenskim opazovanjem plazu Slano blato je bilo v letih 2003 in 2004 opaženo mehčanje fliša v globino. Eden izmed razlogov hitrega mehčanja fliša je mikrorazpokanost. V mikrorazpokah se pojavi kapilarni ses, ki hitro vsrka vodo v flišni lapor in razmehča lapor ob mikrorazpoki. Zaradi pospešenega mehčanja flišnega laporja ob cikličnem sušenju in vlaženju flišni lapor razpada, še preden se ekvilibrira celoten volumen laporja (Petkovšek, 2006). Dodatno na razpadanje fliša vplivajo tudi soli v hribini/zemljini. Opazen je zlasti povečan delež sulfatov (sadra, thenardit, melanterit, alunit, jarosit) (Petkovšek, 2006).

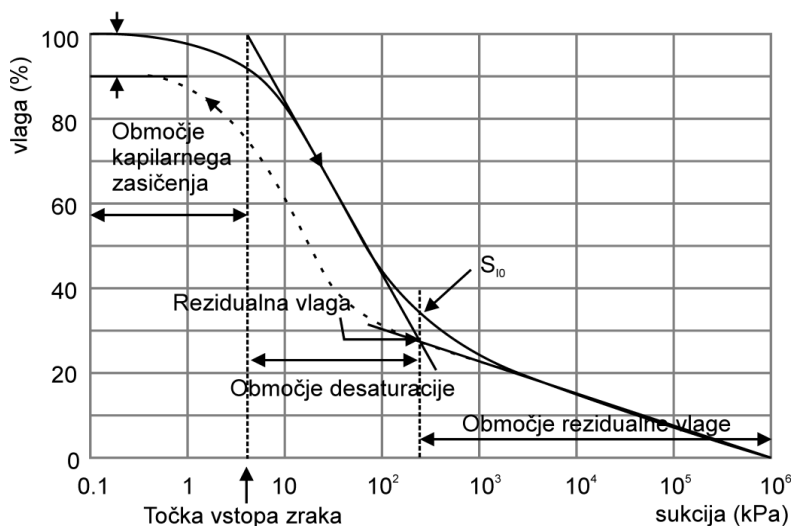
## PLAZ SLANO BLATO IN MEHANIKA NEZASIČENIH ZEMLJIN

### Mehanika nezasičene zemljine

Nezasičena zemljina je sestavljena iz treh faz: trdnih delcev, vode in zraka. Količina vode in zraka v zemljini je odvisna od sukcije zemljine. Zvezo med količino vode v zemljini in sukcijo opišemo z retencijsko krivuljo (slika 3), količino vode opišemo kot volumetrično vlago, gravimetrično vlago ali stopnjo zasičenosti. Retencijsko krivuljo razdelimo na tri tipična območja (Bardner, 1965):

- območje kapilarnega zasičenja, kjer je saturacija zemljine 100%,
- območje desaturacije, kjer je stopnja zasičenosti odvisna od sukcije,
- območje rezidualne vlage, kjer se zemljino suši le s transportom vodne pare (difuzijo).

Ločnica med prvim in drugim območjem je točka vstopa zraka, med drugim in tretjim pa točka rezidualne vlage oziroma rezidualne sukcije.



Slika 3. Retencijska krivulja (prirejeno po Fredlund in Xing, 1994, Sillers et al., 2001).

Retencijsko krivuljo zemljine opišemo z empiričnimi enačbami, ki jih podajo različni avtorji (Brooks in Corey, 1964, van Genuchten, 1980, Fredlund in Xing, 1994, itd.). Enačbe za opis retencijske krivulje se razlikujejo po številu potrebnih parametrov za opis in po območjih na retencijski krivulji, ki jih opisujejo. Za opis retencijske krivulje smo v našem primeru izbrali Brooks in Coreyevo (1964) enačbo, ki opisuje retencijsko krivuljo v območju kapilarnega zasičenja in v območju desaturacije (enačba 1).

$$Se = \min \left( 1, \left[ \frac{\alpha_{BC}}{(u_a - u_w)} \right]^{\lambda_{BC}} \right) \quad (1)$$

$$Se = \frac{Sr - Sr_r}{Sr_s - Sr_r} \quad (2)$$

V enačbah 1 in 2 je  $Se$  efektivna stopnja zasičenosti,  $Sr$  stopnja zasičenosti,  $Sr_r$  rezidualna stopnja zasičenosti,  $Sr_s$  stopnja zasičenosti zasičene zemljine (100%),  $\alpha_{BC}$  sukcija pri točki vstopa zraka,  $(u_a - u_w)$  matrična sukcija zemljine,  $\lambda_{BC}$  oblikovni parameter,  $u_a$  zračni tlak in  $u_w$  tlak vode.

Zaradi zmanjšanja stopnje zasičenja v tleh se zmanjša koeficient vodoprepustnosti zemljine, sukcija pa poveča efektivne napetosti v tleh, kar vpliva na strižno trdnost zemljine. Klasični mehaniki zasičene zemljine je najbližji zapis vpliva sukcije na strižno trdnost popravek efektivnih napetosti po Bishopu (1959):

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w), \quad (3)$$

kjer je  $\sigma'$  efektivna napetost,  $\sigma$  totalna napetost in  $\chi$  koeficient popravka efektivne napetosti povezan s stopnjo zasičenosti zemljine. Parameter  $\chi$  je enak 1 za zasičene zemljine in enak 0 za zemljine pri rezidualni vlagi. Za deloma zasičene zemljine pa koeficient  $\chi$  opišemo s potenčno funkcijo.

Z znanim popravkom efektivne napetosti lahko izpeljemo enačbo za faktor varnosti brezkrajnega pobočja:

$$FS = \frac{c' + (\gamma H \cos^2 \beta + U) \tan \varphi'}{\gamma H \sin \beta \cos \beta} \quad (4)$$

$$U = \begin{cases} -u_w \\ \chi(u_a - u_w) \end{cases}$$

kjer je  $FS$  faktor varnosti,  $H$  debelina sloja,  $\beta$  naklon pobočja,  $U$  prispevek tlaka vode ali sukcije,  $\gamma$  prostorninska teža zemljine,  $c'$  kohezija in  $\varphi'$  strižni kot.

Iz enačbe 4 vidimo, da pozitivni vodni tlak znižuje stabilnost pobočja, sukcija pa ga povečuje. Ob predpostavki zanemarljive kohezije lahko iz enačbe 4 razberemo, da je stabilni naklon pobočja s pozitivnimi tlaki vode na drsni ploskvi vedno manjši od strižnega kota zemljine, obratno pa za pobočja s sukcijo na drsni ploskvi velja, da je naklon pobočja vedno večji od strižnega kota zemljine.

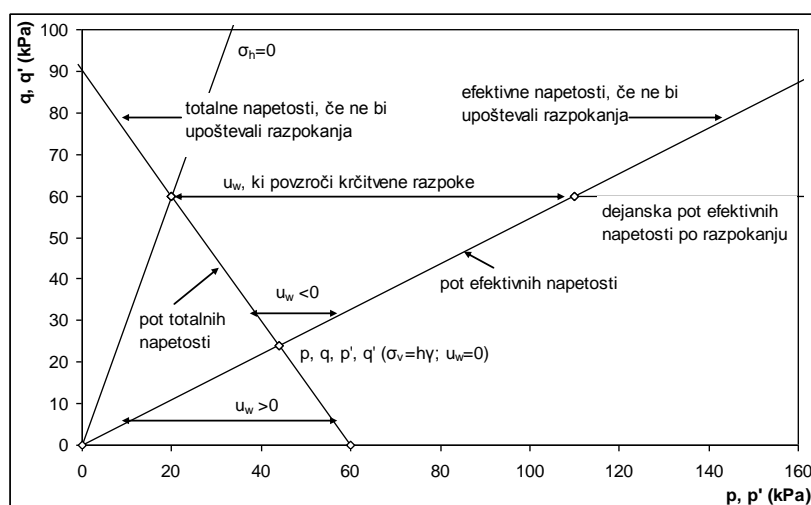
### Krčitvene razpoke

Enačba 3 kaže vpliv sukcije na povečanje efektivnih napetosti v temeljnih tleh. Ob zadosti visoki sukciji lahko postane horizontalna komponenta totalne napetosti enaka 0, zemljina pa počni (Znidarčič, 2007). Po pojavu razpoke je kljub nadaljnjemu naraščanju sukcije totalna napetost ob razpoki vedno enaka 0, zato moramo popraviti enačbo za horizontalne napetosti v tleh, tako kot je v enačbi:

$$\sigma_h = 0 = \sigma_h' + u_w = k_0 \sigma_v + (1 - k_0) u_w \quad (5)$$

kjer je  $\sigma_v$  totalna vertikalna napetost,  $\sigma_h$  totalna horizontalna napetost in  $k_0$  koeficient mirnega zemeljskega pritiska.

Shematsko so napetostne poti ob sušenju zemljine prikazane na sliki 4.



Slika 4. Razlaga pojava krčitvenih razpok (Znidarčič, 2007).

### Lezenje zemljin

Številne raziskave so pokazale (Majes et al. 2002, Petkovšek et al. 2007, Fifer Bizjak in Zupančič, 2009), da je strižna trdnost plazine Slano blato v osrednjem delu skoraj dvakrat manjša od naklona pobočja, zato smo sklepali, da so lahko pomiki ne samo posledica izgube stabilnosti, ampak tudi posledica lezenja zemljine. V nadaljevanju podajamo osnovne načine zapisa reoloških lastnosti tal.

Za opis reoloških lastnosti zemljine potrebujemo zvezo, ki bo povezovala časovni razvoj deformacij z napetostmi v tleh. Ta zveza je lahko fizikalno-mehanska ali pa fenomenološka. Fizikalno-mehanski modeli so običajno sestavljeni iz osnovnih reoloških modelov (preglednica 1) ali iz sestavljenih reoloških modelov, ki jih dobimo z vzporednim ali zaporednim združevanjem preprostejših reoloških modelov. Kateri model uporabimo je odvisno od pričakovanega obnašanja zemljine.

Preglednica 1: Osnovni reološki modeli.

telo	grafični prikaz	enačba telesa
Newtonova tekočina - (Newtonov viskozni element)		$\sigma = \eta \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t}$
Hookovo telo		$\sigma = E \varepsilon_e$
Saint Venantovo telo		$\varepsilon=0$ če $\sigma < \sigma_y$ $\varepsilon=\infty$ , sicer
Togo telo		$\varepsilon=0$
Pascalova tekočina (idealna tekočina)		$\eta=0$

Kjer je  $E$  elastični modul,  $\varepsilon$  deformacije,  $\varepsilon_v$  viskozne deformacije,  $\varepsilon_e$  elastične deformacije,  $\eta$  viskoznost,  $\sigma$  napetost,  $\sigma_y$  meja tečenja in  $t$  čas.

Binghamov reološki model na primer sestoji iz vzporedno vezanega Saint Venantovega telesa in Newtonovega viskoznega elementa. Dokler napetost na Saint Venantovem telesu ni prekoračena, so

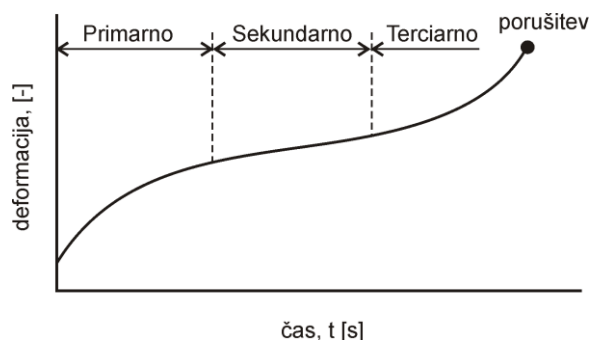
deformacije nične (togo telo), nato pa pričnejo naraščati zvezno s časom (viskozna tekočina). Enačbo za opis Binghamovega reološkega modela lahko zapišemo kot:

$$\sigma = \sigma_y + \eta \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (6)$$

Takšen model pogosto uporabljamo za opis drobirskih ali blatnih tokov, kjer so začetne deformacije bistveno manjše od plastičnih in jih lahko zanemarimo. Binghamov reološki model pa lahko uporabimo tudi za oceno pomikov plazov (Van Asch et al., 2009) ali za napoved pojava blatnih tokov (Van Asch in Malet, 2009).

Burgerjev reološki model je bolj kompleksen, saj je sestavljen iz zaporedno vezanega Hookovega telesa, Newtonovega viskoznega elementa (Maxwellov reološki model) in vzporedno vezanega Hookovega telesa in Newtonovega viskoznega elementa (Kelvin in Voigtov reološki model). Burgerjev reološki model se pogosto uporablja za oceno razvoja pomikov plazov in je bil uporabljen tudi za modeliranje blatnega toka na plazju Slano blato (Fifer Bizjak in Zupančič, 2009).

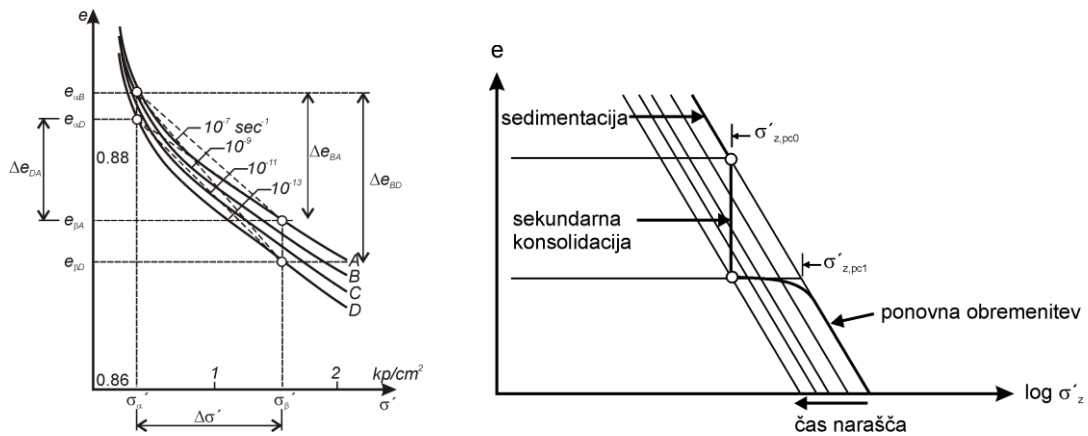
Poleg fizikalno-mehanskih modelov opisanih zgoraj, se probleme lahko opiše tudi s fenomenološkimi reološkimi modeli (Maslov, 1968). Če smo pri fizikalno-mehanskih modelih opisali problem z merljivimi fizikalnimi količinami (modul elastičnosti, viskoznost), pa pri fenomenoloških modelih opisujemo samo dogajanje v zemljini. Pri fenomenoloških modelih problem razdelimo na 3 značilne faze (slika 5). V primarni fazi se hitrost prirasta deformacij zmanjšuje s časom, v sekundarni fazi je hitrost konstantna, v terciarni fazi pa se hitrost prirasta deformacij prične povečevati, dokler ne dosežemo porušitve.



Slika 5. Prikaz primarne, sekundarne in terciarne faze lezenja v fenomenološkem modelu.

Primarna konsolidacija zemljin je opisana fenomenološko in se je preko preurejanja enačb spremenila v fizikalno-mehanski model, kot ga poznamo danes (Terzaghi in Frohlich, 1936). V primeru sekundarne konsolidacije je Šuklje (1969) vpeljal izotahe, krivulje, ki povezujejo efektivno napetost s količnikom por za določeno hitrost deformacij (slika 6, levo). Bjerrum (1967) pa je vpeljal pojem izohron, krivulj, ki povezujejo efektivno napetost s količnikom por v enakem času po pričetku konsolidacije (slika 6, desno). Oba modela sekundarne konsolidacije sta čista fenomenološka modela brez direktne fizikalne povezave. Obe fazi konsolidacije pa sta v primarni fazi reološkega problema.

Za strižno lezenje ni razvitega splošnega modela, zato strižno lezenje opisujemo s pomočjo bolj ali manj zapletenih fizikalno-mehanskih (npr. Binghamov in Burgerjev model) in fenomenoloških reoloških modelov. Vsem modelom je skupno, da so razviti za točno določen problem, pogosto pa se uporabi tudi različne modele za različne faze lezenja (Meschyan, 1995).



Slika 6. Izotahe (Šuklje, 1969) (levo) in izohrone (Bjerrum, 1967) (desno).

Za opis strižnega lezenja zemljin bomo uporabili fenomenološki model, ki ga podajata spodnji enačbi (Meschyan, 2006):

$$\gamma = \omega(t) f(\tau, \sigma_n) \quad (7)$$

$$f(\tau, \sigma_n, t) = \alpha_M(\sigma_n, t) \tau + \beta_M(\sigma_n, t) \tau^{n(\sigma_n)}, \quad (8)$$

kjer je  $\gamma$  inženirska strižna deformacija,  $\omega$  merilo strižnih deformacij, ko je  $\tau=1$ ,  $f$  funkcija strižne napetosti sestavljena iz linearnega ( $\alpha_M$ ) in nelinearnega dela ( $\beta_M$ ),  $\sigma_n$  normalna in  $\tau$  strižna napetost v tleh.

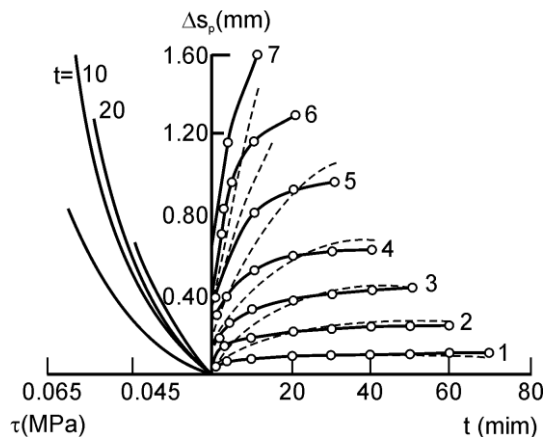
Enačbo 7 pogosto pretvorimo v obliko, kjer nastopa razmerje med strižno napetostjo in strižno trdnostjo  $\tau/\tau_{max}$  (stopnja strižne obremenitve). Funkcijo  $\omega$  pogosto aproksimiramo z eksponentno, logaritemsko ali potenčno funkcijo, funkcijo  $f$  pa samo z neko nelinearno funkcijo:

$$\gamma = A t^m (\tau / \tau_{max})^n \quad (9)$$

$$\gamma = (a + b \log t) (\tau / \tau_{max})^n \quad (10)$$

Tu so  $A$ ,  $m$ ,  $n$ ,  $a$  in  $b$  oblikovni parametri.

Na sliki 7 prikazujemo primerjavo med modelno napovedjo (enačba 9) in meritvami za primer Kijevske gline (Meschyan, 2006).

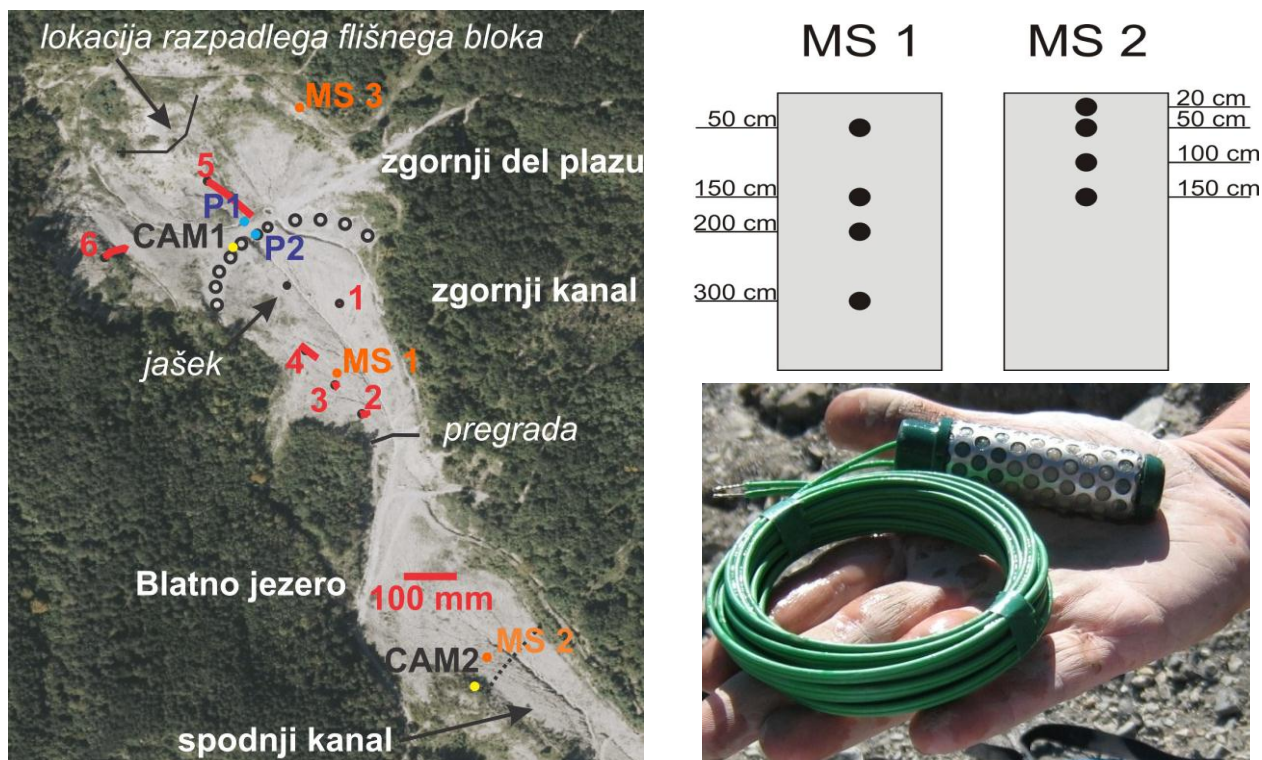


Slika 7. Primeri krivulj strižnega lezenja gline (Meschyan, 2006).

## TERENSKÉ RAZISKAVE IN OPAZOVANJA PLAZU SLANO BLATO

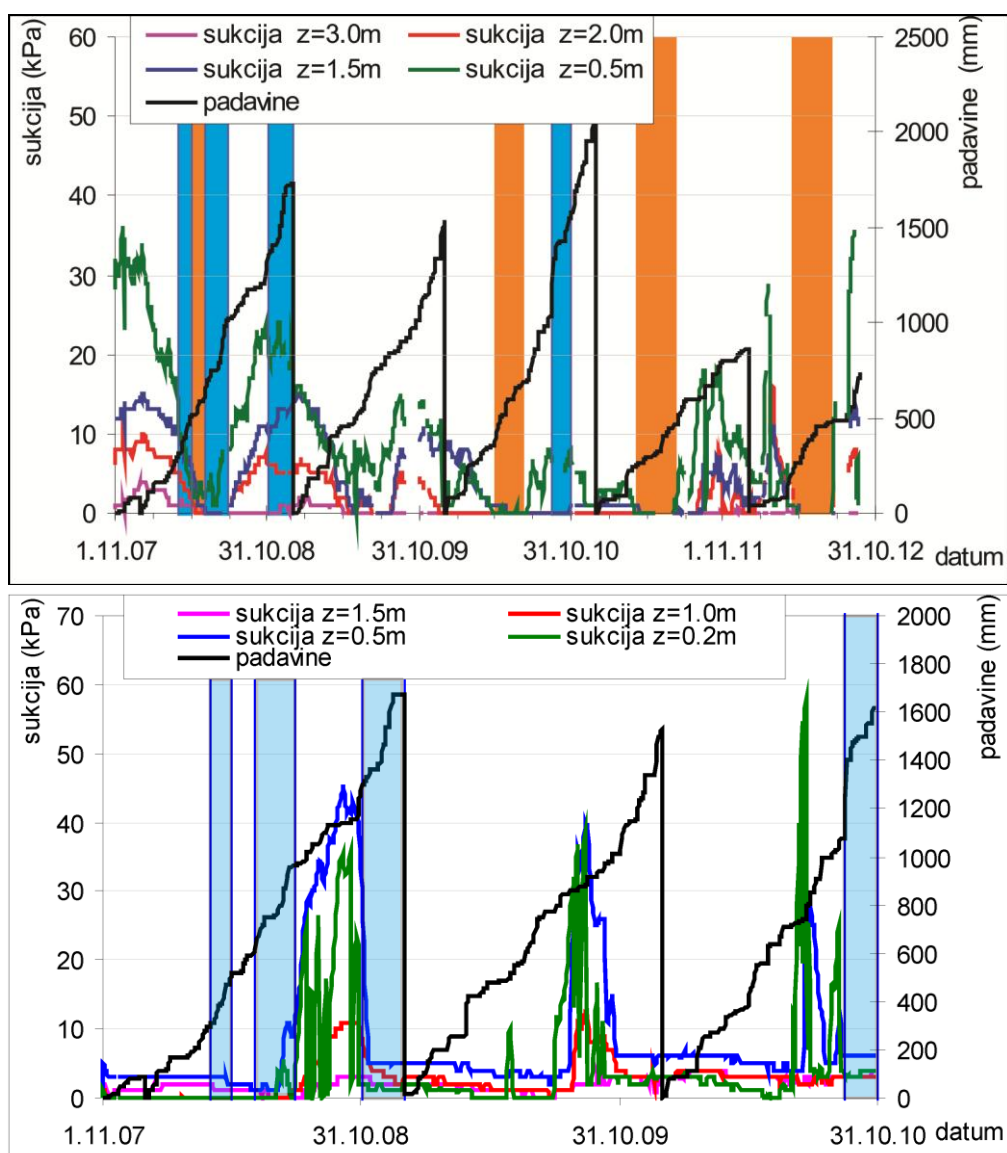
Leta 2006 je dr. Ana Petkovšek v svoji doktorski disertaciji z laboratorijskimi raziskavami pokazala na ugoden vpliv sukcije na strižno trdnost zemljin in posledično na stabilnost pobočij ter na možnost, da so površinski premiki plazov lahko posledica upada sukcije. Do tega spoznanja so jo pripeljali podatki terenskih opazovanj, ki so kazali, da se plaz giblje kot blatni tok tudi v času, ko ni bilo padavin. Leta 2006 na UL FGG še ni bilo primerne merilne opreme, s katero bi lahko neposredno merili vplive sukcije na drenirano strižno trdnost zemljine, zato se je vplive sukcije ocenjevalo posredno, preko meritev nedrenirane strižne trdnosti in meritev na nepreplavljenih preizkušancih v direktnem strižnem aparatu (Petkovšek et al., 2007). Že takrat je bil ugotovljen vpliv totalne napetosti na retencijsko krivuljo in na nedrenirano strižno trdnost, kar je nakazovalo na nujnost razvoja novih smeri raziskav nezasičene zemljine skupaj z direktnimi meritvami strižne trdnosti.

Da bi potrdili ugodne vplive sukcije na stabilnost plazov Slano blato, se je leta 2007 pričelo z inštrumentacijo plazov z merilniki sukcije. Za merjenje sukcije se je izbralo Watermark merilnike sukcije, ki so gibki in omogočajo meritve kljub predvidenim večjim pomikom. S tem se je omogočila daljša življenjska doba merskega sistema, kar je bila poglobilna slabost prejšnjih klasičnih opazovanj z inklinometri in piezometri. Z izbranimi merilniki sukcije so se konec leta 2007 in v začetku leta 2008 opremili trije karakteristični profili. Prva točka (MS1) se nahaja v območju zgornjega kanala, kjer je naklon pobočja približno 15°, debelina plazov pa med 7 in 9 m. Merilnike sukcije se je vgradilo na različne globine do 3,0 m, kar je bila ocenjena globina podzemne vode v času vgradnje. Druga točka (MS2) se nahaja na območju blatnega jezera, kjer so se odložili blatni tokovi v skoraj vodoravni ravnini, zemljina pa ima načeloma manj gramoznih zrn. Na blatnem jezeru je bil ob vgradnji višji nivo podzemne vode, zato se je vgradilo merilnike sukcije le do globine 1,5 m. Tretjo točko (MS3) se je vgradilo v odlomni rob plazov in se ne nahaja v plazovini, temveč v flišni kamnini. Lokacije merskih točk in globine posameznih merilnikov so prikazane na sliki 8.



Slika 8. Merska mesta MS1, MS2 in MS3, lokacije video kamer CAM1 in CAM2, piezometrov P1 in P2 in geodetskih točk 1 – 6 z nakazanimi pomiki (levo), globine merilnikov sukcije v profilih MS1 in MS2 (zgoraj desno) ter Watermark merilnik sukcije (spodaj desno).

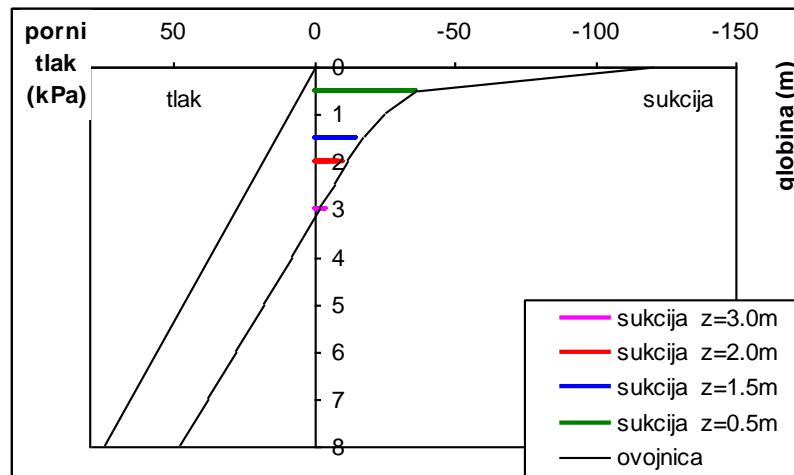
Rezultati meritev sukcije na lokacijah MS1 in MS2 so predstavljeni na sliki 9. Opazno je nihanje sukcije v odvisnosti od letnega časa in precejšnja razlika med merskima profiloma. Obdobja z nizko sukcijo niso nujno v zimskem obdobju, ampak so pogojena tudi z razporeditvijo padavin. Iz slike 9 opazimo tudi zakasnitev med padavinami in spremembami sukcije v zemljini, spremembe so počasne in so bolj pogojene z daljšim trajanjem padavinskega dogodka kakor s samo intenziteto padavin. Večje spremembe sukcije so tudi v merilnikih, ki so bližje površini, na MS2 pa opazujemo tudi, da je sukcija na globini 0,2 m pogosto nižja od sukcije na globini 0,5 m, njen upad pa je lahko skoraj hipen. Hipen upad je lahko posledica krčitvenih razpok na površini blatnega jezera in toka vode v krčitvene razpoke v času padavin. Na sliki 9 vidimo tudi odvisnost med maksimalno sukcijo in količino padavin v določenem letu, saj se je maksimalna sukcija v obdobju oktober 2007 - december 2010 konstantno zmanjševala, v letu 2011 pa je ponovno pričela naraščati.



Slika 9. Meritve sukcije na lokaciji MS1 (zgoraj) in MS2 (spodaj). Z modro so označena obdobja masnih premikov na plazu Slano blato, z oranžno pa obdobja z gladino vode manjšo od 0,5 m in s faktorjem varnosti manjšim 1.

V opazovanem obdobju je bila sukcija pogosto enaka 0 kPa, verjetno pa je bil na mestu merilnika sukcije celo pozitivni porni tlak, a ga vgrajeni merilniki ne merijo. Na sliki 10 prikazujemo ovojnico pornih tlakov izmerjenih v letih 2007-2012, ki upošteva možnost pozitivnih tlakov v zemljini.

Iz slike 9 vidimo, da je v opazovanem obdobju 2007-2012 sukcija pogosto upadla pod prag porušitve po ocenah UL FGG iz leta 2007, vendar do večje porušitve (blatnega toka) plazu ni prišlo. V tem obdobju so bili zaznani le pomiki zaradi lezenja in masni premiki v zgornjem delu plazu. Kljub vsemu pa je vidna povezava med območji z nizko sukcijo in zaznanimi dogodki na plazju Slano blato. Dogodek konec novembra 2008 je že prej omenjeni razpad flišne skale na zgornjem odlomnem robu plazju, ki ga ne moremo povezati s stanjem zemljine.



Slika 10. Ovojnica pornih tlakov na lokaciji MS1.

Da bi povezali pojave nestabilnosti oziroma pomike plazju Slano blato z obdobji nizkih sukcij, smo na površino plazju v letu 2011 vgradili 6 geodetskih točk, pomike pa smo v obdobju junij 2011 - julij 2012 opazovali 4 krat s pomočjo GNSS (Global Navigation Satellite System) meritev z milimetrsko natančnostjo. Štiri merske točke se nahajajo v območju zgornjega kanala (slika 8), kjer je naklon terena približno 15°, dve pa se nahajata na zgornjem delu plazju, kjer je naklon pobočja približno 23°. V obdobju junij 2011 - julij 2012 izkazuje točka 3, ki se nahaja ob MS1, pomik 6 mm, točka 2 pomik velikosti 11 mm, točki 1 in 4 pa sta bili v novembru 2011 poškodovani. Točki 5 in 6 izkazujeta 107 in 46 mm pomikov, kar je pričakovano, saj je pobočje zaradi večjega naklona bolj podvrženo plazenju. Vsi pomiki so bolj ali manj usmerjeni po padnici pobočja, razen pomikov v točki 3, ki so od padnice zamaknjeni za ca 15°.

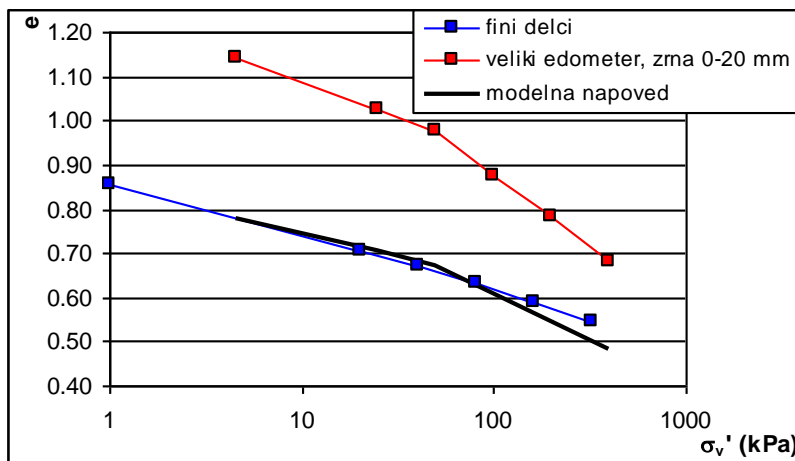
## LABORATORIJSKE MERITVE IN REZULTATI

Zemljina iz plazju Slano blato je pusta do mastna glina z gramozom in vsebuje približno 60% finih delcev ( $D < 0,063$  mm), naravna vlaga zemljine je med 10 in 20%, meja židkosti finih delcev je približno 50%, meja plastičnosti pa približno 20%. Če preračunamo posamezne frakcije na volumenske deleže, je delež finih delcev nekje med 65-75%, kar po modelu bloka v matrici (block-in-matrix) pomeni, da lahko vpliv gramoznih zrn na strižno trdnost zanemarimo (Medley 1994 po Adam et al. 2012). Zaradi zanemarljivega vpliva gramoznih delcev lahko vse preiskave izvajamo izključno na finih zrnih, pravilnost trditve pa smo dodatno preverili na preiskavi stisljivosti v velikem edometru iz leta 2002 (Majes et al., 2002) (slika 11).

Za potrebe izdelave modela gibanja vode v nezasičeni zemljini je bilo potrebno določiti naslednje parametre:

- preiskave stisljivosti za določitev volumenskega obnašanja zemljine (parametri  $\lambda$ ,  $\kappa$ , in  $\Gamma$ ) določene v edometru
- preiskave efektivnih strižnih parametrov ( $\varphi'$ ,  $c'$ ) določene v direktnem strižnem aparatu in/ali triosni celici

- preiskave vodoprepustnosti zasičene zemljine  $k_s$  pri različnih gostotah, določene v edometru in ocenjene iz linije konsolidacije
- preiskave retencijske krivulje zapisane v obliki  $S_r-(u_a-u_w)$  določene v napravi Hyprop, potenciometru WP4-T s sočasnim merjenjem gostote in v sukcijem edometru.

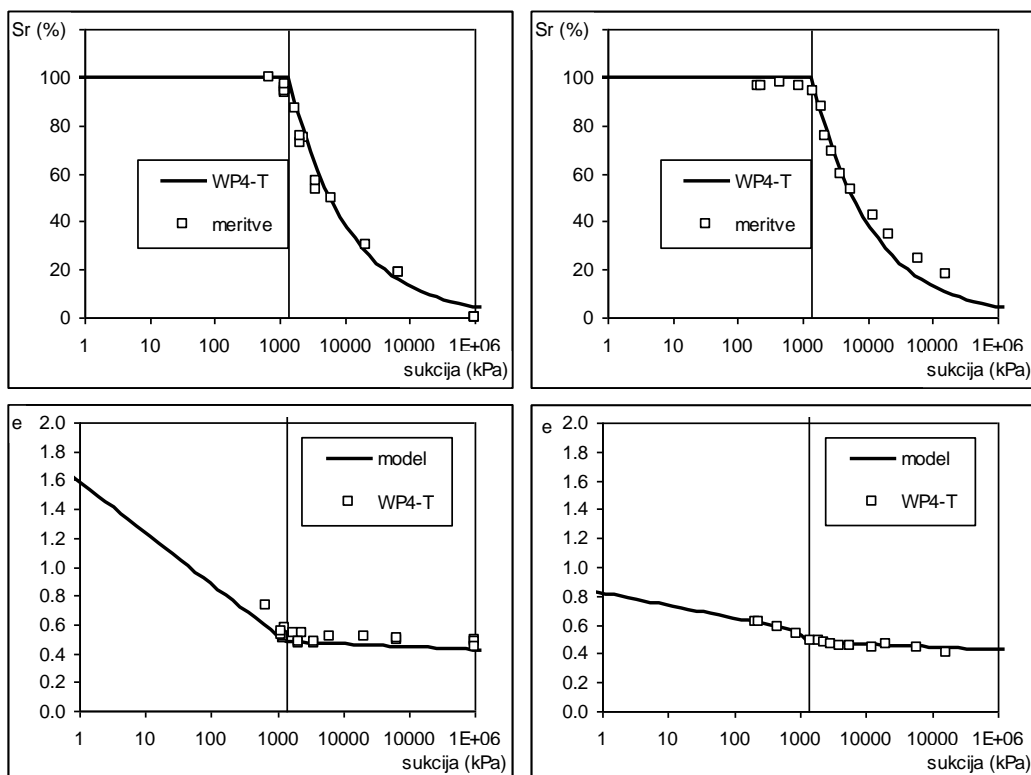


Slika 11. Meritve stisljivosti v edometru na finih delcih in na zrnivosti 0-20 mm ter modelna napoved bloka v matrici na podlagi obnašanja stisljivosti finih delcev.

Postopke in rezultate preiskav za potrebe izdelave modela gibanja vode so detajlno opisani v Maček et al., (2012) skupaj z numeričnim modelom in primerjavo modelnih napovedi in laboratorijskih ali terenskih meritev. V preglednici 2 povzemamo inženirske lastnosti zemljine, na sliki 12 pa podajamo retencijsko krivuljo dveh na začetku preiskave različno gostih preizkušancev. Med preiskavo so se vzorci do točke vstopa zraka močno krčili, nato pa so se pričeli desaturirati ob praktično nezmanjšanem volumnu. Točka vstopa zraka za preiskovano zemljino je približno 1300-1400 kPa, retencijska krivulja v obliki stopnja zasičenosti – sukcija pa identična za oba preizkušanca. Iz slednjega lahko sklepamo, da ima material eno samo retencijsko krivuljo v obliki stopnja zasičenosti – sukcija in je popolnoma zasičen do točke vstopa zraka pri sukciji približno 1360 kPa. Do točke vstopa zraka je koeficient popravka efektivne napetosti  $\chi$  enak 1, vse spremembe vlage v zemljini pa se zgodijo zaradi volumenskih sprememb zemljine. Ker imamo na plazju sukcije manjše od točke vstopa zraka, lahko sukcijo upoštevamo kakor porni tlak v zasičeni zemljini, a z nasprotnim predznakom.

Preglednica 2. Podatki modela za primer finih zrn in celotne zemljine (Maček et al., 2012)

količina	enota	fini delci	celotna zemljina
$\phi'$	°	27,0	27,0
$c'$	kPa	0,0	0,0
$\Gamma$		2,59	2,00
$\lambda$		0,154	0,092
$\kappa$		0,038	0,023
$G_0$	kPa	17	23
$p_0$	kPa	1	1
$\alpha_{BC}$	kPa	1360	1360
$\lambda_{BC}$		0,473	0,473
$S_{rs}$		1,00	1,00
$S_{rf}$		0,00	0,00
$\kappa_\chi$		2	2
$a$		-13,95	-11,93
$b$		2,33	3,88
$k_0$	m/s	1	1



Slika 12. Retencijski krivulji za dva preizkušanca, ki sta bila ob pričetku preiskave različno zgoščena; levo –  $\rho_d=0,88 \text{ t/m}^3$  in desno  $\rho_d=1,68 \text{ t/m}^3$  (Maček et al., 2012).

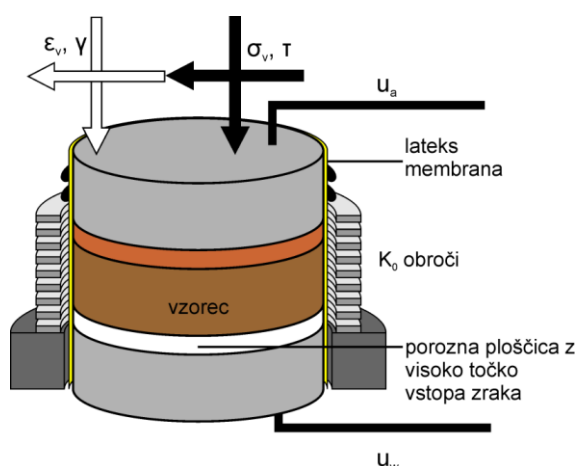
### Meritve strižnega lezenja

Da bi opisali pomike plazu Slano blato smo v sukcijem enostavnem strižnem aparatu (SESA) (slika 13) izvedli serijo preiskav strižnega lezenja zemljin ob konstantni strižni napetosti (horizontalni sili). Pregnetene preizkušance v lahkognetnem stanju smo vgradili v napravo SESA in jih postopno obremenili do želene vertikalne napetosti, nato pa še do želene sukcije. Po končani obremenilni stopnji s sukcijo smo preizkušane obremenili z eno ali več bremenskimi stopnjami s konstantno horizontalno silo in spremljali horizontalne pomike s časom. Trajanje posamezne obremenitve je bilo od 8 ur do 10 dni.

Preiskave smo opravili pri različnih vertikalnih napetostih (25, 50, 100 in 200 kPa), pri različnih sukcijah (0, 50, 100 kPa) in pri različnih stopnjah strižne obremenitve  $\tau/\tau_{\max}$ . Pri raziskavah lezenja smo se omejili le na območje sukcije manjše od sukcije, ki povzroči nastanek krčitvenih razpok. Pri takšnih vrednostih sukcije imamo napetostno stanje podobno stanju v zasičeni zemljini, teste pa lahko medsebojno primerjamo. Glede na potek preiskave lahko razdelimo preiskave v tri skupine:

- preiskave strižnega lezenja z enkratnim nanosom horizontalne sile,
- preiskave strižnega lezenja s postopnim nanosom horizontalne sile in
- preiskave strižnega lezenja z nanosom horizontalne sile ter z zmanjšanjem sukcije.

Zadnji sklop preiskav najbolj ponazarja stanje v naravi, s tem, da tudi te preiskave ne posnemajo dejanskega stanja v naravi, saj na plazu ne prihaja do hipne obremenitve, ampak do počasnega večanja strižne obremenitve zaradi gibanja vode oziroma spreminjanja pornih tlakov.



Slika 13. Shematik sukcijskega enostavnega strižnega aparata – SESA (Maček et al., 2012).

Na sliki 14 prikazujemo rezultate 14 preizkušancev, obremenjenih z enkratnim nanosom horizontalne sile. Na zgornjem diagramu so prikazane hitrosti prirasta strižnih deformacij, na spodnjem diagramu pa je za izbrane preizkušance narisana časovna odvisnost strižne deformacije. Stopnja strižne obremenitve je izračunana brez upoštevanja prispevka sukcije na grafu desno zgoraj in z upoštevanjem prispevka sukcije (enačba 3) levo zgoraj.

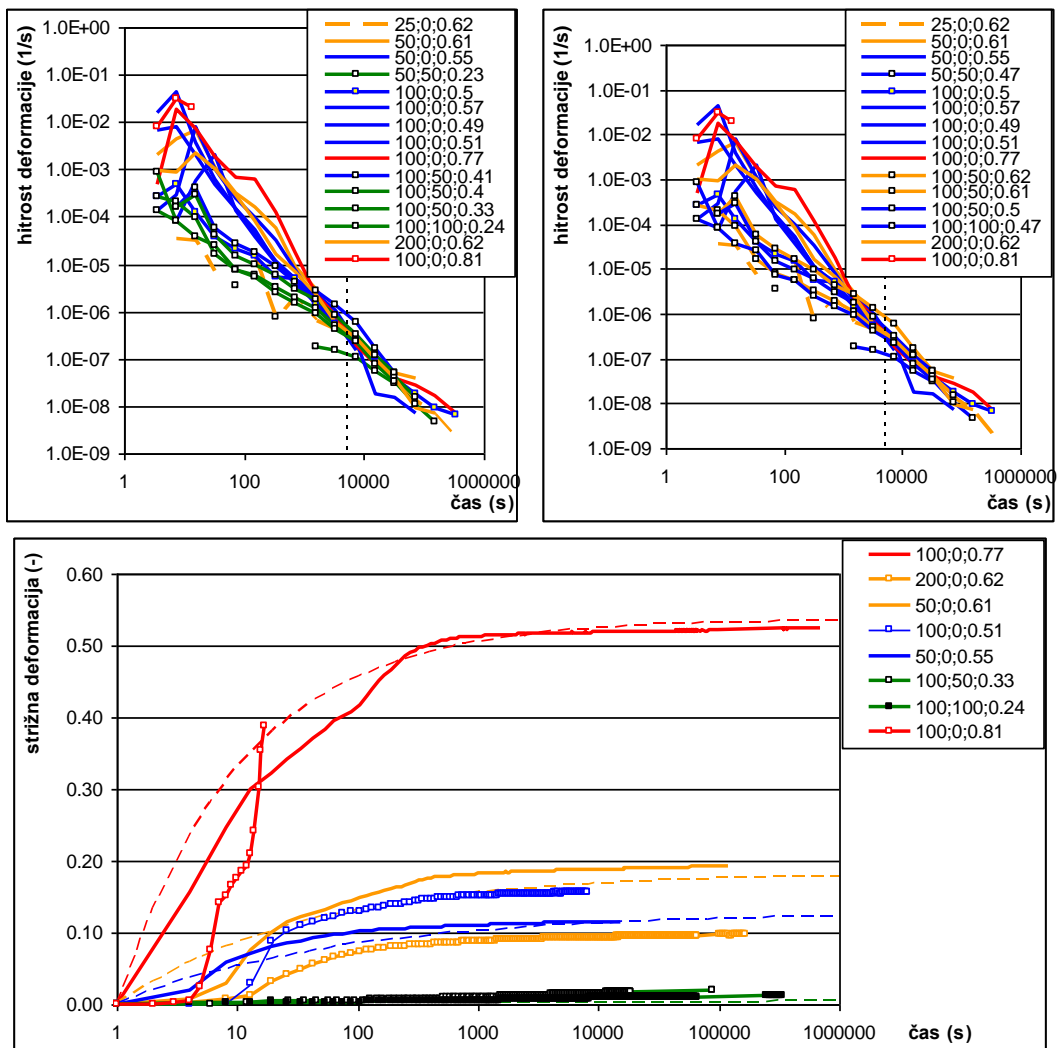
Če upoštevamo prispevek sukcije, ima preizkušanec, obremenjen z vertikalno obtežbo 50 kPa, s sukcijo 50 kPa ter stopnjo strižne obremenitve 0,25 enako horizontalno silo kot preizkušanec obremenjen z vertikalno obtežbo 50 kPa, s sukcijo 0 kPa ter s stopnjo strižne obremenitve 0,5.

S slike 14 vidimo, da so se preizkušanci s sukcijo počasneje in manj deformirali, kot preizkušanci brez sukcije, če primerjamo le razmerje strižna napetost – totalna napetost (desno zgoraj). Sukcija ima tako ugoden vpliv na velikost deformacij pri enakih strižni in totalni vertikalni napetosti.

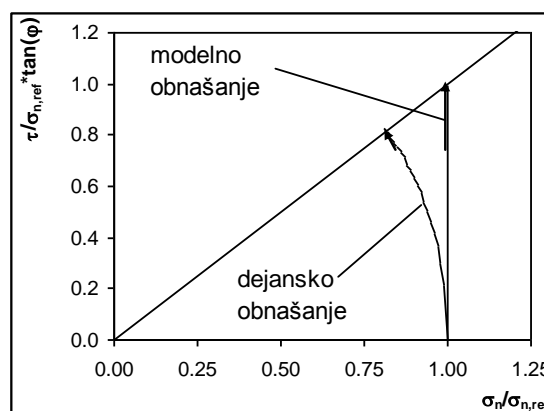
Če pa enako primerjavo naredimo pri stopnji strižne obremenitve izračunane z upoštevanjem popravka efektivnih napetosti, vidimo, da je hitrost prirasta strižnih deformacij odvisna od stopnje strižne obremenitve. Vidimo tudi, da je maksimalna dosegljiva stopnja strižne obremenitve z upoštevanjem sukcije 0,77, za višje stopnje pa je prišlo do hipne porušitve. V izračunu nismo upoštevali presežnih pornih tlakov, sicer bi bila stopnja strižne obremenitve večja ali enaka 1. Razlog za znižanje dosegljive maksimalne stopnje strižne obremenitve je bilo povečanje napetosti v temeljnih tleh, posledična generacija presežnih pornih tlakov in zmanjšanje efektivne napetosti (slika 15). Izjema v obnašanju je tudi preizkušanec obremenjen z vertikalno napetostjo 25 kPa, za katerega smo ugotovili, da je bil ob nanosu obtežbe še zmeraj prekonsolidiran, vpliv presežnih pornih tlakov pa je bil zaradi različnega obnašanja zemljine zmanjšan. Nenavadno obnašanje smo zaznali tudi pri preizkušancu obremenjenem z vertikalno napetostjo 100 kPa, brez sukcije in s stopnjo strižne obremenitve 0,50. Deformacije v tem preizkušancu so bile približno 6x manjše kakor pri preizkušancih, obremenjenih s podobno stopnjo strižne obremenitve izražene v efektivnih napetostih.

Za izbrane meritve smo razvili reološki model podoben enačbi 9, ki upošteva ugoden vpliv sukcije (enačba 11). Napovedi modela prikazujemo na spodnjem grafu na sliki 14 s črtkano črto. Vidimo dokaj dobro ujemanje med modelno napovedjo in merjenimi pomiki za nekatere primere, hkrati pa opazimo tudi precejšnja odstopanja v drugih primerih. Model tako opiše predvsem generalno obnašanje zemljine, ne napove pa dejanske strižne deformacije zemljine.

$$\gamma = \frac{1.05}{0.21 - 0.81\tau / \tau_{\max}} (t + 1)^{0.21 - 0.81\tau / \tau_{\max}} (\tau / \tau_{\max})^{5.95} \quad (11)$$



Slika 14. Hitrost prirasta strižne deformacije z upoštevanjem vpliva sukije (zgoraj levo) in brez upoštevanja sukije (zgoraj desno) ter časovna odvisnost strižne deformacije (spodaj). V legendi je prva vrednost vertikalna napetost, druga sukija in tretja stopnja strižne obremenitve. Z zeleno so prikazane stopnje strižne obremenitve do 0,4, z modro do 0,6, z oranžno do 0,7 in z rdečo nad 0,7.

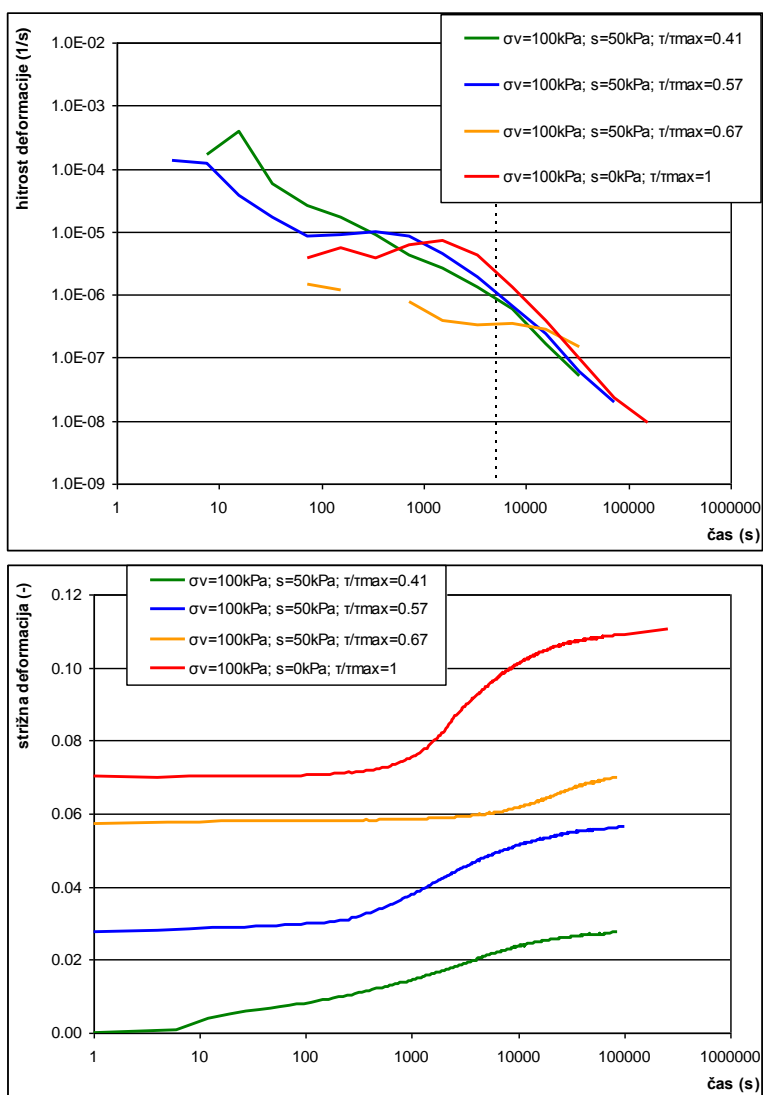


Slika 15. Zmanjšanje stopnje strižne obremenitve zaradi generiranja presežnih pornih tlakov.

Če se omejimo samo na območje po končani konsolidaciji (ca. 5000 s – črtkana črta na sliki 14 zgoraj levo in desno) in s tem izločimo vpliv presežnih pornih tlakov, vidimo, da so hitrosti prirasta strižne deformacije neodvisne od velikosti strižne obremenitve. Kaže pa se tudi precejšen raztros hitrosti pri enakem času.

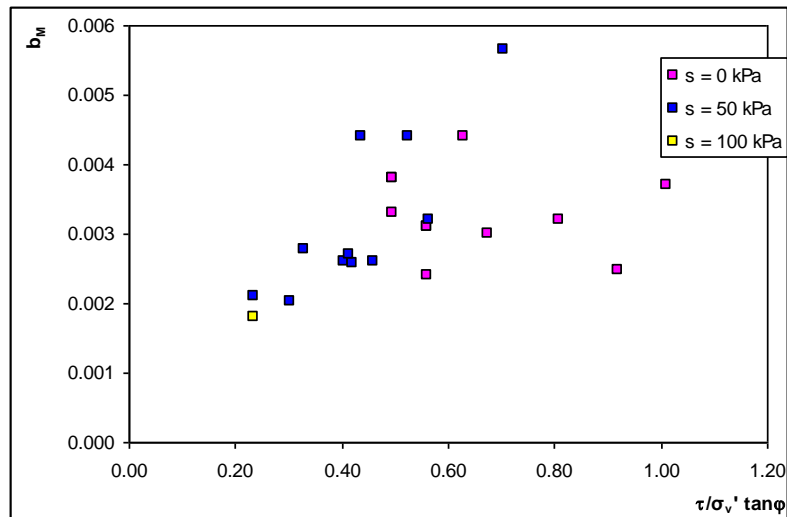
Da bi dosegli višje stopnje strižne obremenitve in zmanjšali vpliv presežnih pornih tlakov, smo preizkušance obremenjevali postopoma (4 preizkušanci). Pri teh preizkušancih so bile hitrosti bolj ali manj enake, značilen pa je bil tudi začetni del, kjer razvoj deformacij ni bil tako strm (spodnja grafa slika 14 in 16). Opazne so tudi znatno nižje strižne deformacije, oblika prirasta strižne deformacije s časom pa spominja na konsolidacijsko linijo. V tem primeru ne moremo govoriti o odvisnosti strižnih deformacij od stopnje strižne obremenitve, saj so si hitrosti podobne. Zaključimo lahko, da so bile različne hitrosti prirasta deformacije pri enkratni strižni obremenitvi predvsem posledica pornih tlakov.

Da bi se popolnoma znebili vpliva pornih tlakov, smo se odločili iz vrednotiti naklone logaritemske premice strižnega lezenja le za čase večje od 10000 s (slika 17). Iz dobljenih rezultatov ne moremo sklepati na vpliv stanja strižne obremenitve na hitrost lezenja, saj je raztros rezultatov prevelik. Ocenimo pa lahko zgornjo in spodnjo mejo hitrosti strižnega lezenja ( $b=0,02-0,06$ ).

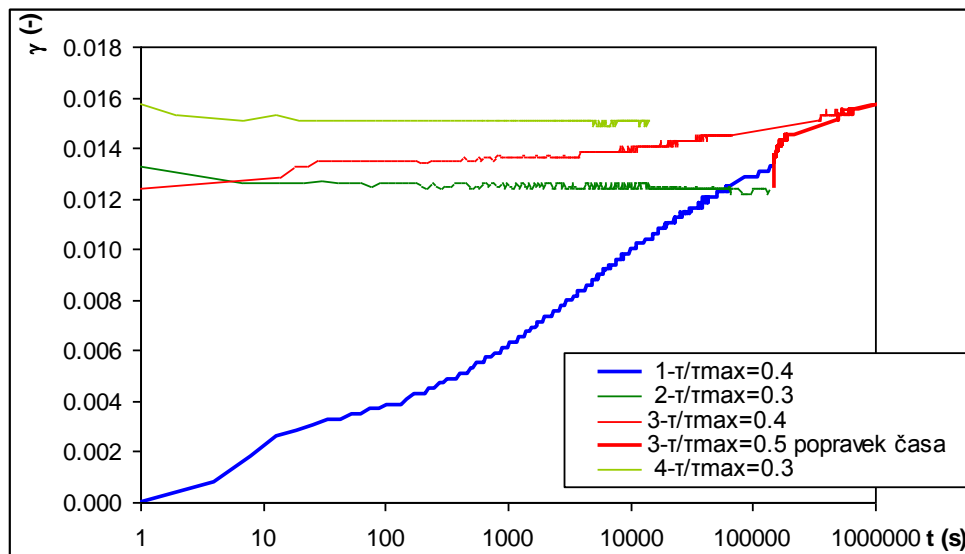


Slika 16. Hitrost prirasta strižne deformacije za preizkušane obremenjen s postopnim nanosom obtežbe (zgoraj) in časovna odvisnost strižne deformacije za isti preizkušane (spodaj).

Na plazu Slano blato ne bo prišlo le do enosmernega obremenjevanja zemljine, ampak do nihanja pornih tlakov kot posledice vremenskih vplivov oziroma do spreminjanja sukcije zemljine. Nihanje obremenjevanja in razbremenjevanja smo simulirali v enostavnem strižnem aparatu (slika 18). Opazili smo, da se lezenje ustavi že pri manjšem zmanjšanju strižne obremenitve, ob še večjem zmanjšanju pa se prične zemljina relaksirati (leži nazaj). Za primer na sliki 18 smo strižno napetost variirali med 27 in 21 kPa. Opazili smo, da je pri ponovnem obremenjevanju hitrost lezenja manjša in da lahko upoštevamo seštevek časa vseh bremenskih stopenj z najvišjo stopnjo strižne obremenitve (slika 18).



Slika 17. Naklon logaritemske premice strižnega lezenja za različne stopnje strižne obremenitve.



Slika 18. Primarna strižna obremenitev in ponovna strižna obremenitev za primer preizkušanca obremenjenega s stopnjo strižne obremenitve 0,4, razbremenjenega na stopnjo strižne obremenitve 0,3 ter ponovno obremenjenega in razbremenjenega.

### Ocena pomikov plazu Slano blato

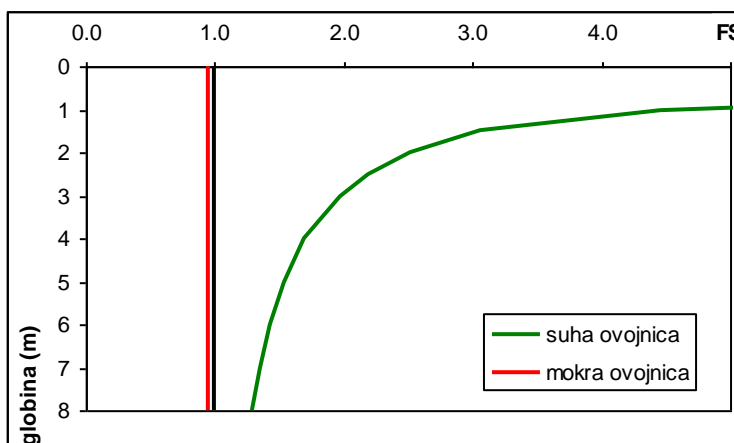
Pri oceni pomikov plazu Slano blato si bomo pomagali z ovojnico vodnih tlakov v zemljini (slika 10) in izračunanimi razporeditvami sukcije (Maček et al., 2012). V izračunih bomo plaz upoštevali kot brezkraino pobočje debeline 8 m z naklonom  $15^\circ$ , faktor varnosti pa bomo izračunali za mokro in suho ovojnico s

pomočjo enačbe 4 (slika 19) in za vmesna stanja ob predpostavljenih hidrostatičnih pornih tlakih (preglednica 3). Iz preglednice 3 vidimo, da je plaz nestabilen samo, če se voda dvigne povsem do površine terena. Za zadostno varnost ( $FS=1,25$ ), pa mora biti voda na globini 2-3 m, kar ustreza le najbolj suhim obdobjem.

Izračun faktorja varnosti je pomemben tudi za oceno strižnega lezenja ( $FS=\tau_{max}/\tau$ ), saj je stopnja strižne napetosti ( $\tau/\tau_{max}$ ) inverzna vrednost faktorja varnosti. Za začetni čas si bomo izbrali november 2004, ko se je na plazu sprožil zadnji blatni tok, pomike pa bomo izračunali za časovno obdobje junij 2011-julij 2012, ko smo tudi dejansko merili pomike plazau.

Preglednica 3.: Faktor varnosti v odvisnosti od globine podzemne vode.

h (m)	globina podzemne vode (m)					
	0	0.5	1	1.5	2	3
0	0.95	48.5	96.0	143	191	286
0.5	0.95	1.90	2.85	3.80	4.75	6.66
1	0.95	1.43	1.90	2.38	2.85	3.80
1.5	0.95	1.27	1.58	1.90	2.22	2.85
2	0.95	1.19	1.43	1.66	1.90	2.38
2.5	0.95	1.14	1.33	1.52	1.71	2.09
3	0.95	1.11	1.27	1.43	1.58	1.90
4.0	0.95	1.07	1.19	1.31	1.43	1.66
5.0	0.95	1.05	1.14	1.24	1.33	1.52
6.0	0.95	1.03	1.11	1.19	1.27	1.43
7.0	0.95	1.02	1.09	1.15	1.22	1.36
8.0	0.95	1.01	1.07	1.13	1.19	1.31



Slika 19. Faktorji varnosti, izračunani za mokro in suho stran ovojnice vodnih tlakov.

Če upoštevamo ugodne vplive sukcije, imamo problem, saj ne znamo ugotoviti vpliva spremembe sukcije na hitrost lezenja. Za primer uporabe Burgerjevega modela bi ugotovili, da Maxwelllovo reološko telo povzroči hipno spremembo deformacij in ima konstantno hitrost lezenja. Kelvinovo in Voightovo telo pa bi počasi povzročilo relaksacijo, po daljšem času (odvisno od parametrov modela) pa ne bi več doprineslo k deformacijam. Takšen model se nam ni zdel primeren, saj ne povzema rezultatov preiskav, ekstrapolacija deformacij na daljše časovno obdobje pa je vprašljiva. Zato smo se raje odločili za fenomenološki model.

Če upoštevamo enačbo 11, ki opisuje fenomenološki problem lezenja zemljine ob enkratni hipni obremenitvi, bi za mokro stran ovojnice izračunali pomik v opazovanjem obdobju 0,01 mm, za suho stran pa 0,35 m. Takšna razlika je pretirana in je posledica ekstrapolacije rezultatov. Problematična sta člena A

in  $m$ , ki sta v našem primeru odvisna od stopnje strižne obremenitve. Naše meritve smo opravili pri stopnji strižne obremenitve 0,23-0,77, na terenu pa imamo stopnjo strižne obremenitve med 0 in 1. Pri laboratorijskih meritvah stopnje strižne obremenitve nad 0,77 zaradi generacije presežnih pornih tlakov niso bile dosegljive. S slike 14 lahko tudi razberemo, da je naklon potenčne krivulje bolj strm za višje stopnje strižne obremenitve in bolj položen za nizke stopnje strižne obremenitve. Naše meritve v laboratoriju smo prenesli iz območja časa 0-10 dni v območje 2400-2800 dni, kar predstavlja precejšno ekstrapolacijo. Zaradi vseh ekstrapolacij modelnega obnašanja dobimo za rezultat popolnoma različni napovedi med suho in mokro ovojnico, ki verjetno nista najbolj realni. Poleg tega vemo, da na plazju nismo izvršili enkratne obremenitve, vendar je do obremenjevanja prišlo zaradi nihanja podzemne vode, zato lahko sklepamo, da s takšnim modelom ne moremo napovedati pomikov plazju Slano blato.

Če upoštevamo enačbo 10 in naklone logaritemske premice prikazane na sliki 17, lahko izračunamo pomike plazju brez upoštevanja ugodnih vplivov sukcije. Ocenjena zgornja in spodnja meja pomikov je 1 do 3 mm, najbolj verjetna vrednost pa 1,5 mm. Meritve pomikov v točki 3 in 4 pa izkazujejo v istem obdobju pomike 6 in 11 mm, kar je 5-10 krat več od ocenjenih pomikov.

Dodatno smo opravili analizo, pri kateri smo upoštevali, da prirast sukcije za 25 kPa ustavi lezenje zemljine. Podobno stanje smo ugotovili tudi z laboratorijskimi meritvami v napravi SESA (slika 18). Prav tako smo upoštevali, da lahko seštejemo samo čas s trajanjem obremenitve, ki povzroči lezenje zemljine. Pri takšnem modelu moramo odšteti vse dneve, v katerih je sukcija za 25 kPa večja od minimalne izmerjene, saj le najbolj mokri dnevi povzročijo strižno lezenje zemljine. Takšen model je zelo grob a nam bo pomagal pri oceni pomikov. Rezultat modela z upoštevanjem ugodnih vplivov sukcije je pokazal na praktično enake pričakovane pomike (0,8 do 2,6 mm). Eden izmed razlogov za praktično nespremenjeno oceno pomikov je popravek časa obremenitve, saj sukcija zmanjšuje skupni čas obremenitve, kar pa povečuje hitrost strižnega lezenja v času, ko zemljina leze.

Kot vidimo z lezenjem ne moremo pojasniti pomikov plazju Slano blato. Za isto obdobje smo upoštevali še možnost izgube ravnotežja (rdeča črta na sliki 19, oranžno območje na sliki 9). Za izračun pomikov smo uporabili Binghamov model (enačba 6). V opazovanem obdobju smo ocenili, da je maksimalno 90 dni takšnih, ko bi na plazju lahko prišlo do izgube statičnega ravnovesja s faktorjem varnosti 0,95. Da bi dobili v opazovanem obdobju pomike med 6 in 11 mm, bi morala biti viskoznost zemljine med  $5 \times 10^9$  do  $1 \times 10^{10}$  kPa-s. Ocena viskoznosti je podobna ocenam viskoznosti podanih v članku Van Asch et al. (2009). Velika razlika med viskoznostjo, izmerjeno v Logar et al. (2005) in Fifer Bizjak in Zupančič (2009) in našo oceno, je posledica obnašanja zemljine kot ne Newtonske tekočine in veliko manjših hitrosti deformacije.

## ZAKLJUČKI

Z meritvami v laboratoriju smo pokazali ugoden vpliv sukcije na faktor varnosti pobočja in na razvoj deformacij, če preiskave vrednotimo v totalnih napetostih. Prav tako pa lahko preiskave vrednotimo v efektivnih napetostih. V tem primeru se preizkušanci s sukcijo obnašajo podobno kakor zasičeni preizkušanci v podobnih efektivnih napetostih. Navidezno ni razlike med obnašanjem zasičene in nezasičene zemljine, vendar se moramo zavedati, da smo ugodni vpliv sukcije upoštevali s povečanjem efektivne napetosti.

Med preiskavami strižnega lezenja z enkratno strižno obremenitvijo smo zaznali vpliv prekonsolidacije zemljine in generacije presežnih pornih tlakov na končne deformacije. Presežni porni tlaki, ki jih nismo merili, pa so omejili maksimalno stopnjo strižne napetosti podane na začetno stanje efektivnih napetosti na 0,77. Opazili smo tudi znaten raztros med posameznimi preizkušanci. S postopnim obremenjevanjem smo zmanjšali vpliv presežnih pornih tlakov, a so meritve hkrati izkazovale zanemarljiv vpliv strižne obremenitve na lezenje zemljine.

S fenomenološkimi modeli smo pokazali na probleme ekstrapolacije rezultatov tako v smislu časa kakor napetosti. Na podlagi rezultatov laboratorijskih meritev pa ocenjujemo, da so pomiki zaradi strižnega lezenja zemljine plazju Slano blato v velikosti 1-2 mm/leto. Večje pomike bi lahko povzročila izguba stabilnosti, saj vsako leto sukcija na globini 0,5 m upade na 0 kPa, možni pa so tudi pozitivni porni pritiski, ki pa jih s trenutnim opazovalnim sistemom ne moremo meriti. Z uporabo Binghamovega reološkega

modela in z ocenjenim številom dni, ki povzročijo izgubo stabilnosti, smo izračunali potrebno viskoznost zemljine, s katero bi dobili pomike podobne pomikom plazu Slano blato (točka 3 in 4). Izračunana viskoznost je podobna izračunanim viskoznostim drugih avtorjev in jo ocenjujemo za smiselno.

Zaključimo lahko, da so pomiki plazu Slano blato malo verjetno posledica strižnega lezenja zemljine in bolj verjetno posledica izgube stabilnosti in visokih viskoznih učinkov. Pomiki so verjetno posledica zadostnega dviga podzemne vode. Plazina na plazju je malo prepustna, zato se sukcija kljub majhnim spremembam vlage počasi spreminja, s tem pa se upočasnjeni dvig podzemne vode ter stabilizira pobočje.

## ZAHVALA

Za tehnično in znanstveno pomoč pri nastajanju članka se avtor zahvaljuje doc. dr. Ani Petkovšek in prof. dr. Bojanu Majesu in sodelavcem KMTal. Raziskave opisane v tem članku so bile opravljene v sklopu doktorskega dela, ki je bilo financirano s strani ARRS (št. pogodbe 10000-08-310068).

## VIRI

- Adam, D., Markiewicz, R., Brunner, M., 2012. Block-in-Matrix Structure and Creeping Slope: Tunneling in Hard Soil and/or Weak Rock. *Geotechnical and Geological Engineering* (published on web): 1-10. doi 10.1007/s10706-012-9591-5
- Bardner, L. 1965. Consolidation of compacted and unsaturated clays. *Geotechnique* 15, 3: 267-286.
- Benko, I. 2011. Zgodovinski pregled intervencij na plazju Slano blato. v: Petkovšek, A. (ur.), Klopčič, J. (ur), Zbornik referatov 12. Šukljatovi dni, Ajdovščina, 30. september 2011. Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo: 53-63.
- Bishop, A. W. 1959. The principle of effective stress. *Teknisk ukeblad* 106, 39: 859-863.
- Bjerrum, L. 1967. Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlements of buildings. *Geotechnique* 17, 2: 83-118.
- Brooks, R. H., Corey, A. T. 1964. Hydraulic properties of porous media, *Hydrology Papers* 3, Fort Collins, Colorado State University: 27.
- Fifer Bizjak, K., Zupančič, A. 2009. Site and laboratory investigation of the Slano blato landslide. *Engineering Geology* 105, 3-4: 171-185.
- Fredlund, D. G., Xing, A., 1994. Equations for the Soil-Water Characteristic Curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31, 3: 521-532.
- Hacquet B., 1789. *Oryctographia carniolica*, Leipzig
- Kočevar, M. 2011. Problem stabilnosti terena ob naravnem robu mezozojskih karbonatnih kamnin na eocenske fliše v jugozahodni Sloveniji. v: Petkovšek, A. (ur.), Klopčič, J. (ur), Zbornik referatov 12. Šukljatovi dni, Ajdovščina, 30. september 2011. Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo: 53-63.
- Kočevar, M., Ribičič, M. 2002. Geološke, hidrogeološke in geomehanske raziskave plazju Slano blato. *Geologija* 45, 2: 427-432.
- Kočevar, M., Ribičič, M. 2002. Plaz Slano blato nad Lokavcem pri Ajdovščini. *Ujma* 15: 122-129.
- Kogoj, D., Kosmatin Fras, M., Grigillo, D., Ribičič, M., Ambrožič, T., Marjetič, A., Gvozdanovič, T., Smole, D., Ranfl, U., Krivec, M., Vezočnik, R., Balon, M. 2007. Raziskovalno razvojni projekt CRP »Znanje za varnost in mir 2006-2010« Mobilna enota za hitri zajem prostorskih podatkov v primeru zemeljskih plazov; Priloga 2; Geopodatki; 4. delno poročilo. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 85.
- Logar, J., Fifer Bizjak, K., Kočevar, M., Mikoš, M., Ribičič, M., Majes, B. 2005. History and present state of the Slano Blato landslide. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5, 3: 447-457.
- Maček, M., Majes, B., Petkovšek, A. 2012. Gibanje vode v plazju Slano blato. v: Petkovšek, A. (ur.), Klopčič, J. (ur.) Razprave 6. posvetovanja slovenskih geoteknikov: 249-262.
- Majes, B., Petkovšek, A., Logar, J. 2002. Primerjava materialnih lastnosti drobirskih tokov iz plazov Stože, Slano blato in Strug. *Geologija* 45, 2: 457-463.
- Maslov, N., 1968. Long-term stability and displacements of retaining structures. *Energiya*, Moskva: 160.
- Medley, E. 1994. The Engineering Characterization of Melanges and Similar Block-in-Matrix Rocks (Bimrocks). Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley, PhD dissertation.

- Meschyran, S. 1995. Experimental rheology of clayey soils (Geotechnika) Rotterdam, Balkema: 448.
- Meschyran, S. 2006. Law governing shear - induced creep of clayey soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering* 43, 5: 168-175.
- Petkovšek, A., 2006. Vpliv matrične sukcije na trdnostno deformacijske lastnosti zemljin, Doktorska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 213.
- Petkovšek, A., Maček, M., Majes, B., 2007. L-28-07; Poročilo o geomehanskih laboratorijskih preiskavah zemljine iz plazu Slano blato. UL FGG: 6.
- Placer, L., Jež, J., Atanackov, J. 2008. Strukturni pogled na plaz Slano blato. *Geologija* 51, 2: 229-234.
- Pulko, B., Majes, B., Mikoš, M., 2013. Reinforced concrete shafts for the structural mitigation of large deep-seated landslides: an experience from the Macesnik and the Slano blato landslides (Slovenia). *Landslides*. (published on web):1 - 11, doi: 10.1007/s10346 - 012 - 0372 - 2.
- Ribičič, M. 2002. Izračun volumnov in sanacija plazu Slano blato nad Loakvcem pri Ajdovščini. *Ujma* 16: 335-345.
- Sillers, W. S., Fredlund, D. G., Zakerzadeh, N. 2001. Mathematical attributes of some soil-water characteristic curve models. *Geotechnical and geological engineering* 19, 3-4: 243-283.
- Šuklje, L. 1969. Rheological aspects of soil mechanics. London, Wiley: 571.
- Terzaghi, K., Fröhlich, O.K., 1936. *Theorie der Setzung von Tonschichte*, Leipzig, Franz Deuticke: 166.
- van Asch, T. W. J., Malet, J.-P. 2009. Flow-type failures in fine-grained soils: an important aspect in landslide hazard analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9, 6:1703-1711.
- van Asch, T. W. J., Malet, J.-P., Bogaard, T. A. 2009. The effect of groundwater fluctuations on the velocity pattern of slow-moving landslide. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9, 3:739-749.
- van Genuchten, M. T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44, 5: 892-898.
- Znidarčič, D., 2007. Soil and water: the essence of soil mechanics. *Zbornik 8. Šukljetovih dni*, Ljubljana, Slovensko geotehniško društvo: 3-21.