

## Primerjava materialnih lastnosti drobirskih tokov iz plazov Stože, Slano blato in Strug

### The comparison of material properties of debris flows from Stože, Slano blato and Strug landslides

Bojan MAJES<sup>1</sup>, Ana PETKOVŠEK<sup>2</sup> & Janko LOGAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem, Jamova 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

<sup>2</sup> TIG ZRMK, Dimičeva 12, 1000 Ljubljana, Slovenija

*Ključne besede:* drobirski tok, laboratorijske preiskave, viskoznost  
*Key words:* debris flow, laboratory testing, viscosity

#### Kratka vsebina

V Sloveniji so bili v zadnjih letih trije veliki plazovi, ki neposredno ogrožajo prebivalstvo in infrastrukturo, razmeroma dobro geološko in geomehansko raziskani. Ena od skupnih značilnosti vseh treh plazov je pojav hitrih tokov grušča in mulja. Del geomehanskih raziskav je bil zato usmerjen v spoznavanje lastnosti materialov, ki so ob določenih pogojih prešli v viskozni blatni tok. Poleg standardnih geomehanskih raziskav smo izvajali preiskave teh materialov tudi v viskozimetru, kar je novost pri preiskavah zemljin. V članku primerjamo rezultate vseh izvedenih preiskav za navedena plazišča. Rezultati preiskav v viskozimetru so za dva materiala pokazali skladnost obnašanja v naravi z obnašanjem pri preiskavi.

#### Abstract

The three large landslides that occurred in Slovenia in past few years and threaten the population and infrastructure were relatively well investigated geologically and geomechanically. One of common characteristics of all three landslides is the occurrence of fast debris flows. One part of laboratory investigations was therefore focused into the study of materials that under given circumstances transform into debris flow. In addition to standard geomechanical investigations their behaviour was tested also in rheometer. In the paper the results of all laboratory tests are compared for the mentioned three landslides. The results of rheometer tests showed a consistency between test results and material behaviour on site for two tested materials.

#### Uvod

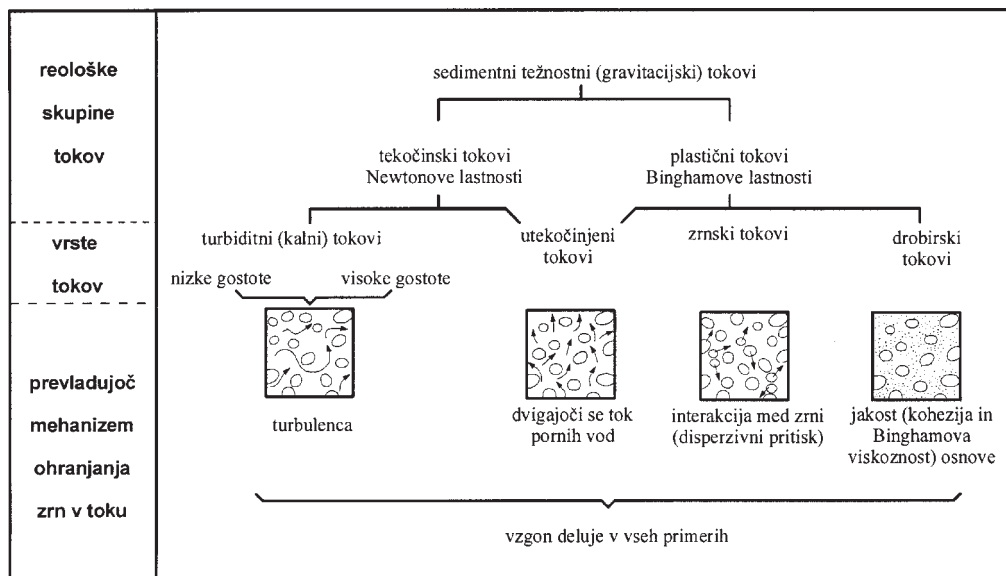
Zemeljski plazovi so v Sloveniji zaradi naravnih danosti pogost pojav. Pojav drobirskih tokov pa je bil tudi v strokovni javnosti deležen manj pozornosti. Ne moremo reči, da tovrstnih pojavov pri nas nismo poznali. Večina njih je bila po obsegu omejena in po lokaciji toliko oddaljena od naseljenih krajev, da ti pojavi niso bili natančneje obravnavani. Zadnji dogodki pa so sprožili za tovrstne pojave tudi veliko zanimanje stroke. Pri tem je v začetku prihajalo tudi do terminoloških razhajanj (hudourniška lava, murasti tok, drobirski tok), kar pa je v veliki meri uredil Skaberne (2001); slika 1.

Drobirski tok, ki je s pobočja pod Stožjem dosegel in delno porušil Log pod Mangrtom je tako postavil pred stroko mnogo vprašanj.

Še prav posebno zato, ker sta se istočasno sprožila še plazova Slano blato nad Lokavcem v Vipavski dolini in Strug nad vasjo Koseč nad Kobaridom. Ali se lahko usoda, ki je doletela Log pod Mangrtom, ponovi v Lokavcu in Koseču? Ali če postavimo vprašanje bolj splošno: kakšne lastnosti mora imeti zemljina, da se v določenih pogojih prelevi v hiter viskozen blatni tok?

Predvsem mora najprej nastopiti statično ali dinamično neravnovesje, torej premik (plazenje) zemeljske gmote, ki je praktično povsem zasičena z vodo. Gibanje nato vzdolž drsine povzroči dodatno povečanje pornih tlakov, kar vpliva na redukcijo trdnosti in posledično na intenzivnejše gibanje, v določenih pogojih pa lahko tudi nastanek viskoznega blatnega toka.

Zato smo raziskave zemljin s treh večjih



Slika 1: Sedimentno težnostni tokovi in prevladujoči mehanizmi ohranjanja zrn v toku (privzeto iz Skaberne, 2001).

plazov razdelili v raziskave, ki pojasnjujejo nastanek »klasičnega« zemeljskega plazju in v raziskave obnašanja plastičnega toka.

Za računsko analiziranje zemeljskih plazov s stabilnostnimi analizami potrebujemo naslednje podatke:

- sestava tal,
- razpored pornih tlakov v tleh (nivo podtalnice)
- prostorninska teža,
- strižna trdnost,
- prepustnost (ko računamo razpored pornih tlakov v pobočju),
- deformabilnost (pri napetostno deformacijskih analizah).

Preiskave, s katerimi te parametre določamo, sodijo že dalj časa v rutinski del geotehnične stroke, zato natančneje teh preiskav ne opisujemo.

Drugače je z računskim modeliranjem plastičnih zemeljskih tokov, kjer potrebujemo drugačne podatke:

- profil podlage (korita) po kateri teče tok,
- koncentracijo suspenzije trdnih delcev in vode, ki predstavlja tok,
- gostoto toka,
- viskoznost toka,
- mejno strižno trdnost toka.

Načelno je možno vse naštete parametre določati s terenskimi in laboratorijskimi

analizami. Pri obravnavi tovrstnih dogodkov pa se vselej poslužujemo tudi povratnega analiziranja plazju ali toka, kar omogoča večjo zanesljivost podatkov. Laboratorijske meritve tokovnih lastnosti suspenzije zemljine in vode z viskozimetri (reometri) so mogoče le na drobni frakciji zemljin do 80  $\mu\text{m}$ . Tako je jasno, da taki podatki ne morejo biti neposredno uporabni za numerične modele tokov, v katerih najdemo celoten spekter velikosti zrn od gline do skal in debela dreves. Ker pa je vendarle drobna frakcija tista, ki lahko tvori stabilno suspenzijo, je spoznavanje njenih reoloških lastnosti lahko pomembno za razpoznavanje tokovnih lastnosti posameznih zemljin.

### Lastnosti drobirskih tokov

Na obnašanje drobirskega toka vplivajo štirje glavni vplivni faktorji (Jan & Shen, 1997):

- viskoznost
- turbulenca,
- drsenje delcev med seboj
- medsebojni trki delcev.

Z materialnega vidika so drobirski tokovi trifazni sistemi, sestavljeni iz trdne faze, zraka in vode. V trdni fazi so zastopane pred-

vsem zemljine, prisotna pa so tudi drevesa, korenine in različni materiali, ki jih tok na svoji poti poruši in odnaša s seboj. Če predpostavimo, da so lastnosti vode in zraka konstantne, je značaj toka odvisen od:

- relativne zastopanosti posameznih faz (sestave in koncentracije toka),
- porazdelitve velikosti trdne faze (zrnastostne sestave trdne faze),
- lastnosti posameznih sestavnih delov trdne faze, med katerimi je zelo pomembna plastičnost drobnih delcev.

Navedene lastnosti direktno vplivajo na dinamiko toka. V osnovi pa se moramo pri načrtovanju raziskav za določitev materialnih lastnosti zavedati, da je vsak drobirski tok enkrat in neponovljiv v svoji sestavi in gibanju in da intaktnega, reprezentativnega vzorca iz toka ni možno dobiti. Na verjetno sestavo že sproženega drobirskega toka lahko sklepamo posredno in sicer iz:

- geoloških in geotehničnih podatkov o sestavi materialov na izvornem mestu,
- iz podatkov raziskav materialov, ki so se odložili iz toka vzdolž poti in na razlivnem območju,
- iz razpoložljivih podatkov o hitrosti toka,
- iz opazovanja sledov, ki jih je tok pustil vzdolž svoje poti.

Le pri počasnih, homogenih drobnozrnatih viskozni tokovih lahko vzorčujemo »kvazi intakten« material iz toka med premikanjem, merimo hitrost gibanja in tako določimo njegove realne reološke lastnosti. Tako pridobljeni in-situ podatki, so vrhunske vrednosti. Strokovnjaki, ki so prvi poklicani na kraj dogodka, so žal največkrat preobremenjeni z drugimi, v tistem trenutku pomembnejšimi skrbmi, tako da tokovi pogosto odtečejo v dolino, ne da bi uspeli zabeležiti nekatere zelo pomembne podatke.

### **Kratek opis posameznih plazišč in odvzem vzorcev za raziskave**

#### ***Plaz Stože***

S pobočja na nadmorski višini 1200 do 1600 m se je 15. in 17. novembra 2000 sprožilo preko 1 milijon kubičnih metrov pobočnega grušča in tila, ki je kot drobirski tok stekel po strugi Mangrtskega potoka, Predelice in Koritnice ter na svoji poti uničil cesto na Mangrt, dva mostova na cesti Bovec - Predel ter del Gorenjega Loga, ob tem po-

škodoval še dve manjši hidroelektrarni in zahteval sedem življenj. Večina splazele mase se je ustavila v območju vasi Log pod Mangrtom in tako trajno spremenila njeno podobo.

Na plazišču smo lahko tudi kasneje opazovali miniaturne drobirske tokove. Na terenu in v vrtinah smo lahko ločili sivkasti zaglinjeni in svetlo peščeno meljasti til. Predvsem slednjemu je bila posvečena naša pozornost in smo ga podrobneje preučevali v laboratoriju.

#### ***Plaz Slano blato***

Plaz Slano blato se je sprožil okrog 20. novembra 2000, na flišnem pobočju pod naravnim robom Trnovskega gozda pod Čavnom, kot večji zemeljski usad nekje na meji med pobočnim gruščem in flišno preperino. Hitro se je pokazalo, da je na tem mestu močnejši dotok podzemne vode, ki je intenzivno razmakal in mehčal flišne zemljine, te pa so se spreminjale v židko blato, ki je počasi lezlo proti dolini. Večje blatno jezero se je v različnih obdobjih ustvarilo na dveh mestih, nazadnje nad »Slapom« to je naravna pregrada, skoraj vertikalna plast kal-karenita, ki pa ni dolgo zdržala pritiska blatne gmote. Da bi zaščitili vas, so večji del plazine odpeljali na deponijo, za zaščito pred morebitnimi hitrimi tokovi blata pa so v strugi potoka Grajščka postavili 8 m visoko kamnito pregrado. Hitri tokovi blata so se dejansko pojavljali, a le v manjših količinah. Celotna plazina je v obdobju bolj intenzivnih padavin napredovala z največjo hitrostjo 30 m/dan, v sušnih obdobjih pa tudi več mesecev mirovala.

Vzorci razmočene plazine za laboratorijske preiskave so bili odvzeti v bližini cerkvice Sv. Urbana.

#### ***Plaz Strug***

Od vseh treh obravnavanih plazov je plaz Strug najbolj kompleksen. V vrhnjem delu je prišlo do kamnitega podora scaglije. Več deset tisoč kubičnih metrov skal in grušča je v vznožju podora oblikovalo melišče, ki je obremenilo fosilni plaz, ta pa se je po flišni podlagi ponovno premaknil. Premiki zemeljskih mas so onemogočili nemoten tok potoku Brusniku, kar je predstavljalo potencialno nevarnost za nastanek večjih količin razmočenih mas, ki bi kot drobirski tok po strugi Brusnika lahko stekle do vasi Koseč in ga

zaradi ozke struge in nizkega mostu lahko ogrozile.

Vzorec, katerega lastnosti opisujemo v tem članku, smo odvzeli na čelu plazuz v potoku Brusnik, ker se je v času odvzema zdelo, da je ta material najpoglavitejša komponenta morebitnega drobirskega toka. Material je flišnega izvora. Kasneje so se res začeli prožiti drobirski tokovi, vendar ne iz te lokacije, zato ga moramo uvrstiti med materiale, ki niso zelo občutljivi za nastanek hitrega drobirskega toka.

### Skupne lastnosti vseh treh plazov

Čeprav je vsak od plazov zelo poseben, kar se vidi že iz gornjih kratkih opisov, pa lahko vendarle ugotovimo nekaj skupnih točk, vezanih predvsem na hidrogeološke pogoje. V vseh treh primerih so v zaledju ali neposredni okolici karbonatne kamnine, iz katerih lahko v plazino dotekajo večje količine vode. Prav tako je v podlagi vseh treh plazov slabo prepustna podlaga. Že pred nastankom plazov so bili na vseh treh lokacijah prisotni površinski vodotoki.

## Rezultati raziskav

### Zrnavost

Na vzorcih z vseh treh plazov je bila določena porazdelitev velikosti trdne frakcije. Preiskanih je bilo večje število vzorcev. Na sliki 2 so prikazane le značilne krivulje, ki orišejo porazdelitev zrnavosti za posamezno plazino. Vidimo lahko, da je največji delež drobnih frakcij pod  $63 \mu\text{m}$ , celo do 60 %, v materialu iz plazuz Slano blato, sledi material s plazuz Stože z 20 – 35 %, izjemoma na

enem od prikazanih vzorcev celo preko 40 % drobne frakcije, najmanj, pod 15 %, pa je te frakcije v materialu iz potoka Brusnik, kar pripisujemo naravnemu izpiranju drobne frakcije.

### Plastičnost

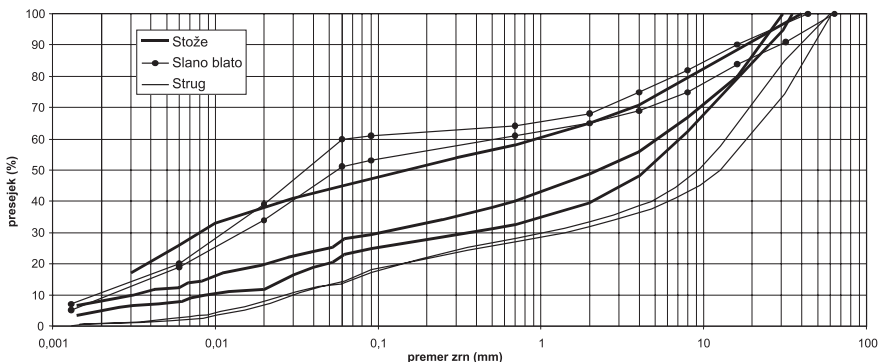
Preglednica 1 predstavlja lezne meje, določene na drobni frakciji plazine (pod  $63 \mu\text{m}$ ) z vseh treh plazov. Hitro vidimo, da sta si materiala s plazuz Slano blato in Strug sorodna in ju lahko uvrstimo med srednje do visoko plastične zemljine, izrazito pa odstopa drobna frakcija iz plazuz Stože, ki je nizko plastična. To zaradi karbonatnega izvora ni presenetljivo.

Preglednica 1: Lezne meje

	Stože	Slano blato	Strug
$w_p$ (%)	13	21	19
$w_L$ (%)	25	48	50
$I_p$ (%)	12	27	31

### Efektivna strižna trdnost

Rezultati triosnih konsolidiranih nedreniranih preiskav, s katerimi smo ugotavljali efektivne strižne parametre zemljin s plazuz Stože, Slano blato in Strug so prikazani v preglednici 2. Preiskali smo dve vrsti vzorcev. Najprej smo pripravili vzorce, ki so jim bila odstranjena zrna večja od  $4,75 \text{ mm}$ , drugi pa vzorce iz zrn manjših od  $80 \mu\text{m}$  (razen za plazuz Strug). Tudi tu je opazna razlika in sicer pomembno večji strižni kot materiala s plazuz Stože v primerjavi s flišno zemljino iz plazuz Slano blato ali Strug. Nekoliko višji strižni kot zemljine s plazuz Strug v primerjavi s plazino iz Slanega blata lahko pripisemo drugačni zrnavostni sestavi.



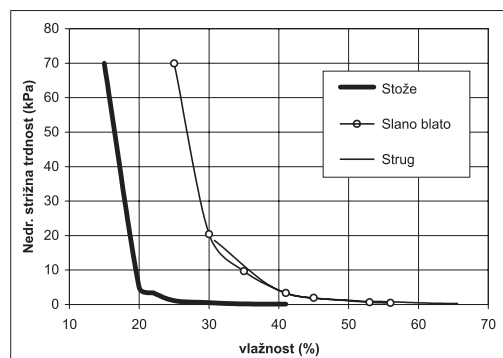
Slika 2: Krivulje zrnavosti za plazine iz plazov Stože, Slano blato in Strug

Preglednica 2: Efektivna strižna trdnost

	Stože	Slano blato	Strug
$\phi'$ ( $^{\circ}$ ) [<4,75 mm]	40	28	30
$\phi'$ ( $^{\circ}$ ) [<80 $\mu$ m]	36	26	-

### Nedrenirana strižna trdnost

Na vzorcih drobne frakcije pod 63  $\mu$ m smo merili tudi nedrenirano strižno trdnost v odvisnosti od vlažnosti. Za meritve smo uporabljali laboratorijski konusni penetrometer in laboratorijsko krilno sondo. Za vse tri materiale so rezultati primerjalno prikazani na sliki 3. Zopet se pokaže, da imata materiala flišnega izvora s plazov Slano blato in Strug zelo podobne lastnosti, medtem ko material s plazu Stože močno odstopa. Prva očitna razlika je v vlažnosti, pri kateri nedrenirana strižna trdnost pade na zamenljive vrednosti. Zaradi pomembne razlike v meji židkosti je ta razlika pričakovana. Bolj zanimiva in značilna je razlika v ukrivljenosti diagrama: materialu s plazu Stože se pri majhni spremembi vlažnosti zelo hitro zmanjša trdnost. Za flišna materiala je upad nedrenirane strižne trdnosti z naraščajočo vlažnostjo manj intenziven. Tudi ta ugotovitev je lahko posledica razlike v plastičnosti. Majhen indeks plastičnosti namreč pomeni, da majhna sprememba vlažnosti povzroči hitro spremembo konsistenčnega stanja in s tem trdnosti materiala. Meje plastičnosti materiala so lahko eden od zanesljivih indeksnih pokazateljev o tem kako hitro lahko material pridobi lastnosti viskoznega blatnega toka.



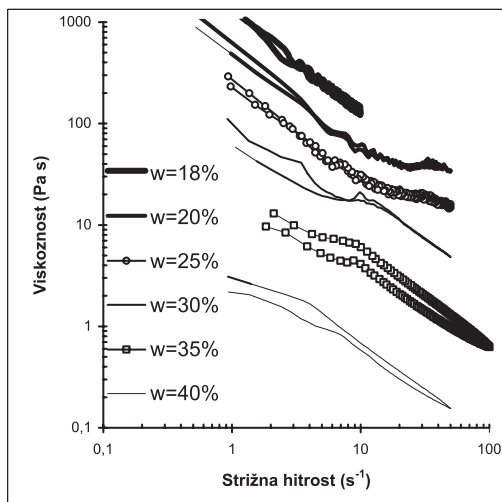
Slika 3: Nedrenirana strižna trdnost kot funkcija vlažnosti

### Meritve v viskozimetru

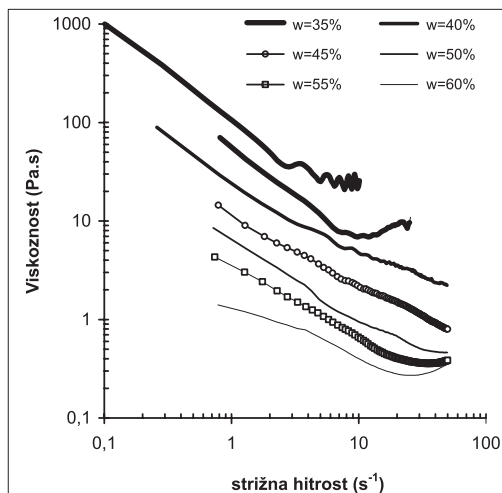
V viskozimetru smo merili le reološke lastnosti drobne frakcije pod 63  $\mu$ m s plazov Stože in Slano blato. Viskozimeter omogoča meritve viskoznosti suspenzije po osnovni definiciji, ki pravi, da je viskoznost razmerje med strižno napetostjo in spremembo hitrosti pri relativnem premiku dveh ploskev, med katerima je viskozna tekočina. Pri povečevanju hitrosti običajno opazujemo upadanje viskoznosti, ko začnemo hitrost zmanjševati pa viskoznost ponovno narašča. Takšno obnašanje izkazuje material s plazu Stože (slika 4).

Na slikah 4 in 5 je prikazanih več meritev za različne vlažnosti suspenzije. Razumljivo je, da najvišje viskoznosti pripadajo suspenzijam z nižjo vlažnostjo in obratno. Material s plazu Slano blato je na prvi pogled izkazoval podobno obnašanje. Zlasti pri vzorcu najvišje vlažnosti pa lahko hitro ugotovimo, da je že med povečevanjem hitrosti (hitrost nad 20 s<sup>-1</sup>) pričela viskoznost naraščati. Poročilo o teh raziskavah ta pojav pripisuje posedanju delcev v suspenziji. Zato na sliki 5 ni prikazano obnašanje vzorcev pri zmanjševanju hitrosti v viskozimetru.

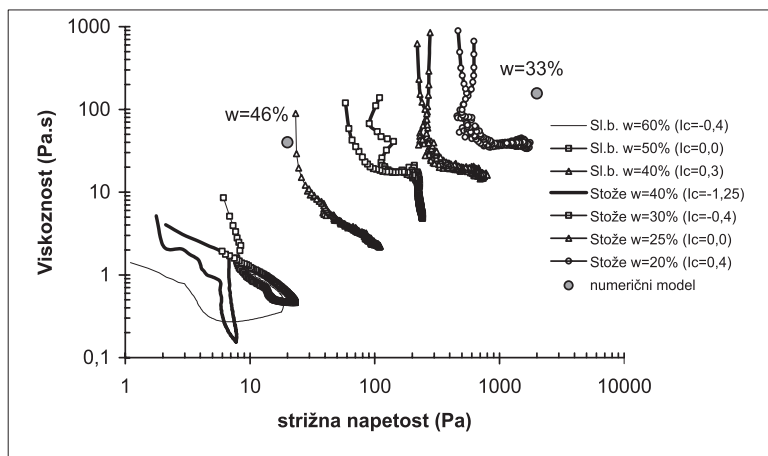
Iste rezultate prikazuje v diagramom viskoznosti v odvisnosti od strižne napetosti slika 6. Na isti sliki so prikazani rezultati za vzorce obeh materialov pri različnih vlažnostih. Lepo je vidno, da večja vlažnost pomeni manjšo viskoznost in nižje strižne napetosti ter obratno. Pomembna razlika pa je v poteku krivulj. Če si podrobneje ogledamo le krivulji za vzorca največjih vlažnosti za oba materiala (slika 7), lahko ugotovimo, da material s plazu Stože pri zmanjševanju hitrosti viskozimetra daje viskoznosti, ki so nižje kot v obremenjevanju (tikotropna zanka), medtem ko material s plazu Slano blato daje pri zmanjševanju hitrosti izrazito višje viskoznosti (anti tikotropna zanka). Kot že rečeno, je ta pojav pripisati posedanju delcev med preiskavo. Z drugimi besedami: gibanje suspenzije iz materiala Stože vzdržuje suspenzijo stabilno, delci lebdijo v njej. Delci v suspenziji s plazu Slano blato pa se kljub gibanju suspenzije usedajo. V naravi bi za tak material pričakovali manjšo možnost pojava hitrega drobirskega toka ali pa kvečjemu pojav hitrega toka v manjšem obsegu. In vsaj na tem osamljenem primeru je res tako. Ali je tovrstna preiskava lahko ključ do razpoznavanja materialov, ki lahko ali



Slika 4: Rezultati viskozimetra: frakcija do 63 mm s plazu Stože



Slika 5: Rezultati viskozimetra: frakcija do 63 mm s plazu Slano blato



Slika 6: V viskozimetru ugotovljen odnos med viskozno in strižno napetostjo za materiala s plazov Stože in Slano blato ter podatka, dobljena s povratno numerično analizo drobirskih tokov 15. in 17. 11. 2002 izpod Stožja.

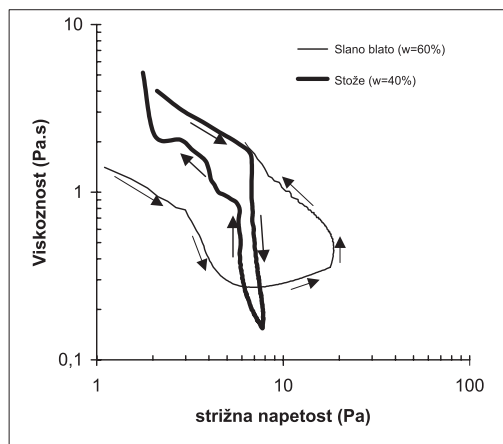
pa ne morejo steči v obliki hitrega viskoznega blatnega toka, bodo morale pokazati nadaljnje raziskave. Prav tako bo potrebno poiskati materialni razlog za tako obnašanje, ki verjetno tiči predvsem v obliki zrn s čimer je mišljeno razmerje med površino in volumnom zrn.

Na sliki 6 sta predstavljeni s točkama tudi lastnosti obeh drobirskih tokov s plazu Stože (15. in 17.11.2002), dobljena s povratno analizo drobirskega toka. Prvem u je vlažnost ocenjena na 33 %, drugemu na 46 %. Jasno je, da se te vrednosti ne ujemajo z vred-

nostmi, dobljenimi v viskozimetru, saj gre v enem primeru za material celotnega drobirskega toka vključno z velikimi zrni, v drugem pa le za eksperiment na drobni frakciji istega materiala.

Mejne strižne napetosti dobljene v viskozimetru so na sliki 8 prikazane v odvisnosti od vlažnosti. Podobno kot za nedrenirano strižno trdnost lahko ugotovimo, da materialu s plazu Stože zelo hitro upade mejna strižna trdnost z naraščajočo vlažnostjo. Material s plazu Slano blato pa je tudi tu nekoliko »bolj počasen«.

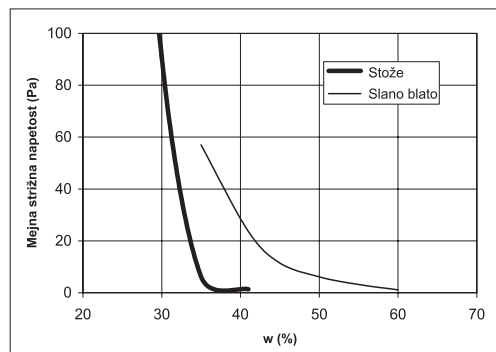




Slika 7: Podrobnejši prikaz rezultatov viskozimetra s slike 6 za najbolj vlažna vzorca iz plazov Stože in Slano blato. Prvi izkazuje tiksotropne, drugi pa anti tiksotropne lastnosti.

### Zaključek

Predstavljene so nekatere osnovne lastnosti materialov s plazuz Stože, Slano blato in Strug. S plazuz Stože je bil preiskan material, ki je kot hiter drobirski tok stekel v dolino. Za preiskane materiale s plazuz Slano blato in Strug pa se je v naravi izkazalo, da se hitri drobirski tokovi niso pojavljali ali pa so se pojavljali v zelo omejenem obsegu. Tako majhno število preiskanih materialov seveda ne omogoča, da bi ugotovili kateri materialni parametri govorijo o tem ali do pojava hitrega plastičnega toka lahko pride ali ne. Na osnovi tega skromnega števila preiskav pa bi lahko sklepali, da je za nastanek hitrega drobirskega toka zemljine poleg vode potrebna prisotnost preko 15 % drobne frakcije pod  $63 \mu\text{m}$  in da so temu pojavu bolj podvržene drobne frakcije nizke plastičnosti. Preiskave v viskozimetru pa obetajo nov vpogled v obnašanje drobnih frakcij zemljin v pogojih gibanja, česar s klasičnimi geomehanskimi raziskavami ne moremo simulirati, je pa za obravnavanje zemljinskih plastičnih tokov pomembno.



Slika 8: V viskozimetru določena mejna strižna trdnost v odvisnosti od vlažnosti za materiala s plazuz Stože in Slano blato

### Literatura in viri

- Jan, C.D. Shen H.V., 1997: Review of dynamic modelling of debris flows. – Recent developments on debris flows, 93-115, Springer verlag, Kagoshima.
- Skaberne, D. 2001: Predlog slovenskega izrazoslova pobočnih premikanj – pobočnega transporta. – *Geologija* 44/1, 89 – 100, Ljubljana.
- Geološko geotehnični elaborati in poročila o raziskavah plazuz Stože. GEOT. 2001.
- Poročilo o geomehanskih laboratorijskih preiskavah zemljin iz plazuz Slano blato nad Lokavcem. FGG – KMTal, Univerza v Ljubljani, št. p. 061-1-02. April 2002.
- Poročilo o geomehanskih laboratorijskih preiskavah zemljin iz plazuz Strug nad vasjo Koseč. FGG – KMTal, Univerza v Ljubljani, št. p. 066-1-02. April 2002.
- Poročilo o geomehanskih raziskavah in raziskavah tokovnega obnašanja zemljin iz območja plazuz Stože. FGG – KMTal, Univerza v Ljubljani, št. p. 115-1-01. Julij 2001.
- Poročilo o geomehanskih raziskavah vzorcev iz vrtn na plazuz Stože. ZAG Ljubljana, št. p. 733/01-740-1. Julij 2001.
- Poročilo o preiskavi strižnih lastnosti splazele mase plazuz Stože. ZAG Ljubljana, št. p. 121/01-650. Julij 2001.
- Program in načrt izvedbe raziskav za določitev mejnih napetostnih stanj gruščnatega toka na plazuz Stože. GI – ZRMK Ljubljana, št. p. 321103/01. Maj 2001.
- Tokovno obnašanje suspenzij zemljin. Poročilo FKKT Univerze Ljubljana. Julij 2001.
- Zaključni elaborat laboratorijskih raziskav zemljin iz območja plazuz Stože. Geot Ljubljana, št. p. 321070/01-2. Julij 2001.

