

## **VPLIV MINERALNE SESTAVE NA MEHANSKE LASTNOSTI ZASIČENIH GLIN**

**mag. Bojana Dolinar, univ.dipl.inž.geol.**

Univerza v Mariboru, Fakulteta za gradbeništvo

**Povzetek:** V prispevku je pojasnjeno razmerje med vsebnostjo vode, mineraloški lastnostmi in izbranimi fizikalnimi lastnostmi zasičenih glin. Ugotovitve, ki temeljijo na teoretični analizi, so bile potrjene eksperimentalno na monomineralnih vzorcih glin. Ugotovljeno je bilo, da je količina medzrnske vode, ki določa nedrenirano strižno trdnost glin, sestavljena iz proste porne vode in trdno adsorbirane vode na zunanje površine glinenih zrn. Količina proste porne vode je za različne zasičene gline pri enaki nedrenirani strižni trdnosti enaka, prav tako pa tudi debelina vodnega filma okoli glinenih zrn. Celotna količina trdno adsorbirane vode je odvisna od specifične površine glin. Rezultat tega dela je analitično podana odvisnost med vsebnostjo vode in nedrenirano strižno trdnostjo glin ob upoštevanju njihovih mineraloških značilnosti.

**Abstract:** This article explains the relationship between the water content, mineralogical properties and chosen physical properties of saturated clays. The findings are based on a theoretical analysis and were confirmed experimentally on monomineral clay samples. It was found that the quantity of intergrain water, which determines the undrained shear strength of clays, consisted of free pore water and firmly adsorbed water at the external surfaces of clay grains. The free water quantity is the same for different saturated clays at the same undrained shear strength, and likewise the water film thickness around the clay grains. The total quantity of firmly adsorbed water depends on specific surface of clays. The result of this work is a new analytical formulation that gives the relationship between the water content and the undrained shear strength of clays by taking into account their mineralogical characteristics.

### **UVOD**

Znano je, da so mehanske lastnosti vezljivih zemljin, ki se določajo v okviru geotehničnih raziskav, odvisne od količine vsebuječe vode, slednja pa od mineralne sestave in dejavnikov, ki jih pogojuje okolje. Ta razmerja doslej niso bila sistematično preiskana, znane so le posamezne ugotovitve. To je tudi razlog, da v tem času ni mogoče na osnovi podanih vplivnih dejavnikov napovedati fizikalnih lastnosti zemljin, zato se le te določajo neposredno s pomočjo različnih terenskih in laboratorijskih preiskav. Na tak način preiskane lastnosti so odraz trenutnega stanja in dogajanja v okolju, ni pa mogoče predvideti, kako se bodo spremenile v spremenjenih geotehničnih pogojih. Prav slednje pa je pri gradnji objektov ključnega pomena.

Opisana problematika bo zahtevala, zaradi svoje obsežnosti in kompleksnosti, obširne in sistematične študije. V prvem koraku bo potrebno ugotoviti, kako se posamezne mehanske lastnosti zemljin spreminjajo v odvisnosti od vsebnosti vode in mineralne sestave, v nadaljevanju pa tudi, kako na fizikalne lastnosti vplivajo posamezni dejavniki, ki izhajajo iz okolja. Mednje prištevamo temperaturo, teksturo zemljin, kemično sestavo porne vode, količino ter vrsto organskih primesi in geološki tlak.

Iz dostopne literature je razvidno, da je raziskav z opisanega področja zelo malo, zato so tudi spoznanja zelo skromna. Posamezni raziskovalci so izbrane fizikalne lastnosti zemljin sicer poskušali povezati z nekaterimi mineraloškimimi značilnostmi kot so vrsta mineralov v sestavi, velikost zrn in količina glinene frakcije, vendar so vse te odvisnosti zgolj približne in veljajo samo za preiskovane zemljine. Razlog je v tem, da doslej ni bilo ugotovljeno katere fizikalno kemične lastnosti mineralov v sestavi zemljin in na kakšen način vplivajo na količino vsebujoče vode.

V prispevku je opisan del raziskave, ki se je vršila v Laboratoriju za mehaniko tal na Fakulteti za gradbeništvo v Mariboru z namenom, da bi ugotovili katere lastnosti mineralov vplivajo na vsebnost vode pri nedrenirani strižni trdnosti zemljin. Na osnovi spoznanj, podanih v literaturi in lastnih predpostavk smo zasnovali model porazdelitve vode v zemljinah, predstavljen v obliki linearne funkcije. Z njim smo pokazati, kako je količina vode povezana z nedrenirano strižno trdnostjo in sestavo zemljin. Veljavnost modela in s tem pravilnost izbranih fizikalno kemičnih lastnosti mineralov, ki vplivajo na količino vsebujoče vode, smo preverili eksperimentalno, pri tem pa uporabili monomineralne glin.

## **TEORETIČNE OSNOVE**

V vezljivih zemljinah se pojavljajo tako glineni kot neglineni minerali. Znano je, da minerali glin kot tudi voda niso kemično inertni, zato med njimi prihaja do interakcije. Nasprotno pa imajo neglineni minerali precej manjšo sposobnost vezanja vode in manjšo specifično površino, zato je mogoče predpostaviti, da je pretežno vsa voda v zemljinah vezana prav na glinena zrna [9]. To predpostavko potrjujejo tudi rezultati preiskav podani v [12], ki so pokazali, da je količina vode na meji židkosti pri enakih glinenih mineralih linearno odvisna od količine neglinenih primesi.

Znano je, da imajo vezljive zemljine z različno sestavo pri količini vode na meji židkosti enako nedrenirano strižno trdnost [5] in enako hidravlično prepustnost [10], kar pomeni, da mora biti enaka tudi povprečna efektivna velikost por med posameznimi zrn ali agregati. Pri vsebnosti vode na meji židkosti je enak tudi podtlak vpivanja porne vode [11]. Glede na podobno strukturno zgradbo različnih glinenih zrn je pričakovati, da so sile interakcije med njihovimi površinami in adsorbirano vodo enake. To pomeni, da je enaka tudi količina adsorbirane vode na enoto površine zrn, ki ustreza podtlaku vpivanja porne vode 6 kPa [9]. Ker tudi na meji plastičnosti zemljine izkazujejo enako nedrenirano strižno trdnost, smo predpostavili, da imajo prav tako enako povprečno efektivno velikost por med posameznimi zrn ali agregati in enako količino adsorbirane vode na enoto površine zrn. Pričakovati je, da te predpostavke veljajo tudi za ostale vrednosti nedrenirane strižne trdnosti, ki se pojavljajo pri količinah vode znotraj plastičnega stanja zemljin [4].

V zemljinah, ki vsebujejo nabreklije glinene minerale se poleg medzrnske vode pojavlja tudi medpaketna voda. Adsorbirana je na notranje površine glinenih zrn in izmenjalne katione. Kadar so slednji dvo- ali več valentni povezujejo pakete med seboj tako močno, da njihova cepitev ni mogoča in tako tudi ne iztiskanje ali dodatno adsorbiranje medpaketne vode. Njena vsebnost je ne glede na količino medzrnske vode stalna. Iz podanih dejstev sklepamo, da medpaketna voda ne more vplivati na mehanske lastnosti zemljin. Pri standardizirani metodi določevanja vlažnosti zemljin se, zaradi sušenja pri temperaturi 105<sup>0</sup> C, vedno določa skupna količina tako medzrnske kot medpaketne vode.

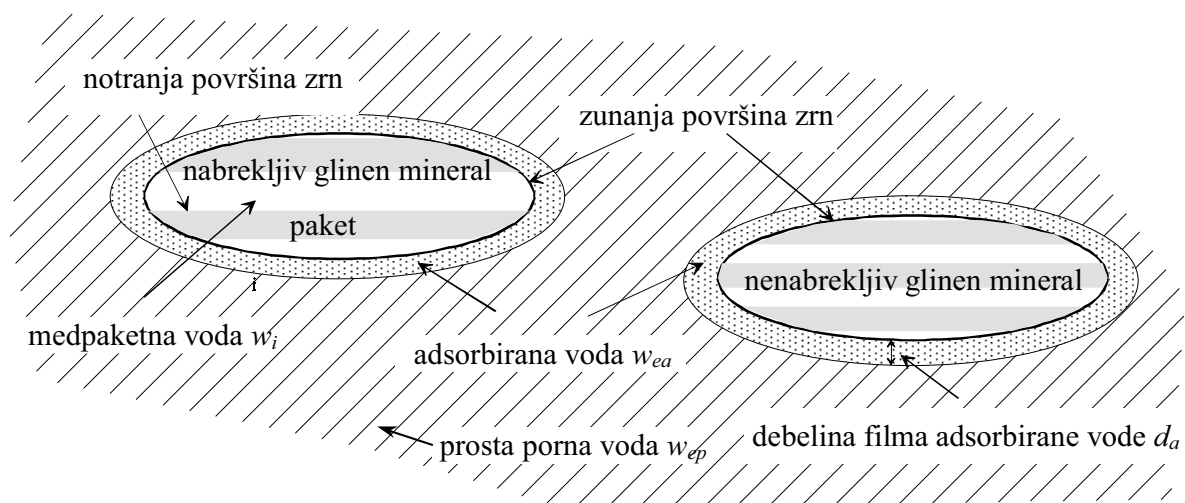
S sintezo naštetih ugotovitev in predpostavk smo oblikovali naslednje zaključke:

- *Voda je v vezljivih zemljinah vezana samo na glinena zrna.*
- *Nedrenirana strižna trdnost zasičenih zemljin je odvisna samo od količine medzrnske vode.*
- *Skupna količina medzrnske vode je sestavljena iz deleža, ki je adsorbiran na glinena zrna in deleža proste porne vode.*
- *Količina proste porne vode je pri enaki nedrenirani strižni trdnosti različnih zemljin glede na delež glinenih zrn enaka. Njena količina se spreminja linearno z deležem neglinenih primesi.*
- *Debelina plasti trdno adsorbirane vode na glinena zrna je pri enaki nedrenirani strižni trdnosti različnih zemljin enaka, skupna količina adsorbirane vode pa odvisna od površine glinenih zrn v sestavi zemljin.*

Podane zaključke je mogoče izraziti v analitični obliki

$$w_e = p (w_{ep} + d_a A_{SC}), \quad (1)$$

kjer je  $w_e$  [ $\text{cm}^3$  vode /g suhe gline] količina medzrnske vode pri enaki nedrenirani strižni trdnosti različnih zasičenih vezljivih zemljin,  $p$  je masni delež glinenih zrn v sestavi zemljin ( $0 \leq p \leq 1$ ),  $w_{ep}$  [ $\text{cm}^3$  vode /g suhe gline] je količina proste porne vode,  $d_a$  [nm] je debelina plasti trdno adsorbirane vode in  $A_{SC}$  [ $\text{m}^2$ /g suhe gline] je specifična površina glinenih zrn ( $A_{SC} = A_S/p$ ;  $A_S$  [ $\text{m}^2$ /g suhe zemljine] je specifična površina zemljine). Ker sta  $w_{ep}$  in  $d_a$  v izrazu (1) konstanti, je na tak način opredeljena odvisnost med količino medzrnske vode  $w_e$  in tistimi lastnostmi mineralov, ki jo določajo. Razporeditev vode v glinah je ponazorjena na sliki 1, povzeti iz [3].



**Sika 1.** Grafičen prikaz razporeditve vode v zasičenih glinah.

## PODATKI O PREISKOVANIH VZORCIH ZEMLJIN

Pri preiskavah smo uporabili tri vzorce monomineralnih glin, ki pripadajo dobro in slabo kristaliziranemu kaolinu (KGa-1, KGa-2) ter montmorillonitu s Ca izmenljivim kationom

(SAz-1). Izhajajo iz nahajališč v ZDA. Njihovo pridobivanje in pripravo vodi združenje Clay Mineral Society v okviru projekta Source Clays, dostopne pa so vsem raziskovalcem. Pri izkopavanju in pripravi glin se uporabljajo takšni postopki, ki zagotavljajo nespremenjene lastnosti teh materialov. Ker se sestava naravnih glin na različnih delih nahajališč nekoliko spreminja, so gline za raziskovalne namene pripravljene tako, da se velike količine materiala predhodno homogenizirajo in shranijo. Tak način omogoča dolgoletne različne raziskave popolnoma enakega materiala in s tem primerjanje in dopolnjevanja rezultatov predhodnih študij.

## **METODE IN REZULTATI LABORATORIJSKIH PREISKAV**

Na vsebnost vode v zemljinah vplivajo poleg mineralne sestave tudi dejavniki, ki so pogojeni z okoljem. Razmerje med mehanskimi in mineraloški lastnostmi zemljin je zato lahko vidno le v primeru, ko so ti vplivni dejavniki enaki. Pri laboratorijskih analizah smo zato uporabili destilirano vodo in porušene vzorce glin brez organskih primesi in s paralelno orientacijo zrn. Raziskave so potekale pri temperaturi približno 20°C.

Pri vzorcih so bile preiskane njihove mineraloške značilnosti, kemična sestava, določeni meja židkosti in meja plastičnosti, velikost zrn in nedrenirana strižna trdnost pri različnih vlažnostih v območju plastičnega stanja zemljin. Podatke o mineraloških značilnostih in kemični sestavi monomineralnih vzorcev smo povzeli iz podatkov predhodnih študij drugih raziskovalcev, objavljenih v [16]. Fizikalno mehanske lastnosti teh materialov smo določili v Laboratoriju za mehaniko tal na Fakulteti za gradbeništvo Univerze v Mariboru.

### **Mineraloške značilnosti**

#### **Specifična površina**

Specifična površina zrn je opredeljena kot površina zrn na enoto mase. Izraža se v kvadratnih metrih na gram suhe snovi ( $m^2/g$ ).

Površina zrn je ločnica snovi različne sestave ali agregatnega stanja. V zemljinah, kjer so atomi vezani v trodimenzionalno strukturo, se zaradi prekinitve vezi na površini pojavi neizravnana vezna energija. Njen dejanski vpliv je odvisen od relativne teže atomov in molekul in je za delce velikosti proda ali peska zanemarljiv. Nasprotno pa se z manjšanjem velikosti zrn ta vpliv povečuje in je lahko v primeru koloidnih delcev prevladujoč dejavnik, ki vpliva na njihove lastnosti.

Vrednost specifične površine zrn narašča obratno sorazmerno z velikostjo zrn, kar pomeni, da so najvišje prav pri koloidnih delcih, ki jih zastopajo predvsem glineni minerali. Pri tem je potrebno upoštevati tudi dejstvo, da imajo glineni delci na površju, zaradi izomorfni kationskih izmenjav, negativni električni naboj. Nezasičene vezi in neuravnotežen naboj skupaj povzročita, da postane površina zelo sprejemljiva za različne kemične reakcije, ki posledično določajo fizikalne lastnosti zemljin.

Različni glineni minerali imajo različne specifične površine, njene vrednosti so 10–120  $m^2/g$ . Enake vrste mineralov nimajo enakih specifičnih površin, velja pa, da so najnižje pri mineralih kaolinitne skupine, večje pri illitih in največje pri mineralih montmorillonitne skupine.

Pri opredelitvi specifične površine zrn je potrebno ločiti zunanjo (primarno) in notranjo (sekundarno) površino. Prva je značilna za minerale kaolinitne in illitne skupine, pri kateri ne more priti do ločevanja paketov. Sekundarna površina se določa pri mineralih montmorillonitne skupine, to je mineralih ki nabrekajo. Zanje je značilno, da vsled šibkih vezi med paketi, mednje prodrejo tuji ioni in polarne tekočine. To pomeni, da je aktivna tudi notranja površina zrn. Ta je v primerjavi z zunanjo precej večja. V primerih, ko pride do intenzivnega razmikanja paketov znotraj posameznih zrn, se lahko pojavi cepitve delcev na velikost osnovne celice. V tem primeru vrednost specifične površine naraste do približno 800 m<sup>2</sup>/g.

Specifična površina preiskovanih glin je prikazana v preglednici 1.

**Preglednica 1.** Specifična površina  $A_s$ .

Vzorec	$A_s$ [m <sup>2</sup> /g]
KGa-1	10.05 ± 0.02
KGa-2	23.50 ± 0.02
SAz-1	97.42 ± 0.58

#### Ionska izmenjalna kapaciteta

V primeru nadomeščanja centralnih kationov z nižje valentnimi, postanejo glineni delci rahlo negativno nabiti. Negativni naboj paketa se delno izravna tako, da v plasti niso zasedena vsa oktaedersko koordinirana mesta. V primeru trovalentnih kationov sta zasedeni le dve tretjini razpoložljivih mest (dioktaedrična vrsta) medtem ko dvovalentni kationi zasedejo vsa oktaederska mesta (trioктаedrična vrsta). Električna nevtralnost delcev pa s tem še ni dosežena, saj še vedno ostane približno 0.66 valence na osnovno celico nezasičene. Negativni naboj se izravna z adsorbicijo tujih kationov iz raztopin med pakete in na površine ter robove zrn. Mnogo od teh kationov je izmenljivih, kajti lahko se, v primeru spremenjenih pogojev, nadomestijo z drugimi kationi. Zamenjave so odvisne od valence, velikosti in količine prisotnih kationov v raztopinah. V splošnem manjši kationi nadomeščajo večje. Pomembno je tudi, da so kationi z višjo valenco vezani trdneje kot tisti z nižjo, kar otežuje nadomeščanje. Izmenjujejo se vedno le kationi, ki so adsorbirani na površine elektrostatično. Količina kationov, ki se lahko izmenjuje, je opredeljena kot kationska izmenjalna kapaciteta in se izraža se v miliekvivalentih na 100 g suhe gline. Za glinene minerale so te vrednosti 1-150 miliekv./100g. Odvisne so od vrste glinenih mineralov, vendar za posamezne niso stalne. Vrsta izmenjalnih kationov v glinenih mineralih je zelo pomembna. Lastnosti le teh so namreč pri različnih adsorbiranih kationih zelo različne, kar je pomembno predvsem pri montmorillonitih. Poleg kationske obstaja tudi anionska izmenjalna kapaciteta, ki pa je precej manjša in zato manj pomembna.

Vrednosti kationske izmenjalne kapacitete preiskovanih vzorcev glin so prikazane v preglednici 2.

**Preglednica 2.** Kationska izmenjalna kapaciteta  $\omega$ .

Vzorec	$\omega$ [miliekv./100 g]
KGa-1	2.0
KGa-2	3.3
SAz-1	120

## Mineralna sestava

Mineralna sestava glin je bila preiskana z rentgenskim difraktometrom (preglednica 3).

**Preglednica 3.** Mineralna sestava.

Vzorec	Mineralna sestava						
	KAO	Ca M	KRE	PLA	MIK	AN	CR
KGa-1	96					3	1
KGa-2	96					3	1
SAz-1		98	1	< 1	< 1		

### LEGENDA

KAO	kaolinit	MIK	mikroklin
Ca M	Ca–montmorillonit	AN	anataz
KRE	kremen	CR	crandallit
PLA	plagioklazi		

## Kemična sestava

Podatki o kemični sestavi, strukturni formuli in električnih nabojih tetraederskih in oktaederskih plasti monomineralnih vzorcev zemljin so podani v preglednici 4.

**Preglednica 4.** Kemična sestava, strukturna formula in naboji oktaederskih in tetraederskih plasti.

Kemična sestava	Vzorec		
	KGa-1	KGa-2	SAz-1
[%]			
SiO <sub>2</sub>	44.2	43.9	60.4
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	39.7	38.5	17.6
TiO <sub>2</sub>	1.39	2.08	0.24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.13	0.98	1.42
FeO	0.08	0.15	0.08
MnO	0.002	sledi	0.099
MgO	0.03	0.03	6.46
CaO	sledi	sledi	2.82
Na <sub>2</sub> O	0.013	< 0.005	0.063
K <sub>2</sub> O	0.05	0.065	0.19
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.034	0.045	0.020
<i>Strukturna formula</i>	(Mg <sub>0.2</sub> Ca <sub>0.1</sub> Na <sub>0.1</sub> K <sub>0.1</sub> ) [Al <sub>3.86</sub> Fe(III) <sub>0.2</sub> Mn <sub>sl.</sub> Ti <sub>0.11</sub> ][Si <sub>3.83</sub> Al <sub>0.17</sub> ]O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	(Ca <sub>sl.</sub> K <sub>sl.</sub> )[Al <sub>3.66</sub> Fe(III) <sub>0.07</sub> Mn <sub>sl.</sub> Mg <sub>sl.</sub> Ti <sub>0.16</sub> ][Si <sub>4.0</sub> ]O <sub>10</sub> (OH) <sub>8</sub>	(Ca <sub>0.39</sub> Na <sub>0.36</sub> K <sub>0.2</sub> ) [Al <sub>2.71</sub> Mg <sub>1.11</sub> Fe(III) <sub>0.1</sub> 2Mn <sub>0.1</sub> Ti <sub>0.03</sub> ][Si <sub>8.0</sub> ]O <sub>20</sub> (OH) <sub>4</sub>
<i>Naboj</i>			
Oktaederska plast	+ 0.11	+ 0.16	- 1.08
Tetraederska plast	- 0.17	0.00	0.00
Medpaketni naboj	- 0.06	+ 0.16	- 1.08

## Fizikalne lastnosti

### Meja židkosti in meja plastičnosti

Mejo židkosti  $w_L$  smo določili skladno z Britanskim standardom [2]. Uporabljen je bil konusni penetrometer z dolžino konusa 35 mm, kotom konice  $30^\circ$  in maso konusa 80 g. Posodica z vzorcem ima premer 55 mm in globino 40 mm. Količino vode na meji plastičnosti  $w_p$  smo preiskali z izdelavo svaljkov skladno z [1]. Rezultati meritev mej židkosti in mej plastičnosti ter indeksov plastičnosti so podani v preglednici 5.

**Preglednica 5.** Meja židkosti  $w_L$ , meja plastičnosti  $w_p$  in indeks plastičnosti  $I_p$ .

Vzorec	$w_L$ [%]	$w_p$ [%]	$I_p$ [%]
KGa-1	40.1	25.9	14.2
KGa-2	51.0	29.7	21.3
SAz-1	129.0	68.2	60.8

### Velikost in oblika glinenih zrn

Podatke o velikosti in obliki zrn kaolinitnih vzorcev KGa-1 in KGa-2 smo povzeli iz predhodnih analiz [14]. Podane lastnosti zrn so bile preiskane s pomočjo AFM metode (atomic force microscopy). V preglednici 6 so prikazane tudi povprečne debeline zrn (\*), ki smo jih izračunali iz števila in debelin paketov v zrnih posameznih glinenih mineralov.

**Preglednica 6.** Velikost in oblika zrn kaolinitnih vzorcev.

Lastnosti	Vzorec	
	KGa-1	KGa-2
Premer zrn [nm]	109 - 3586	78 - 1811
Povprečen premer zrn [nm]	785	447
Debelina zrn [nm]	11 - 143	10 - 174
Povprečna debelina zrn [nm]	58 / 71*	42 / 30*
Oblika robov	ravna	zaobljena
Mikromorfologija	heksagonalna	zaobljena heksagonalna

### Nedrenirana strižna trdnost

Nedrenirano strižno trdnost lahko pri različnih vsebnostih vode določimo s preiskavo s konusnim penetrometrom. Slednje omogoča ugotovitev [7], da je nedrenirana strižna trdnost zemljin  $c_u$  obratno sorazmerna kvadratu globine penetracije  $h$ .

$$c_u = K \frac{W}{h^2} \quad (2)$$

V izrazu je  $K$  konstanta, odvisna od vrste uporabljenega konusa in  $W$  masa konusa. V primeru Britanskega konusa je teoretično določena vrednost konstante  $K = 1.33$  [8] in masa konusa  $W = 80$  g. Tako je pri globini penetracije konusa  $h = 20$  mm, ki označuje vlažnost

zemljin na meji židkosti, nedrenirana strižna trdnost  $c_u = 2.66$  kPa. Pri količini vode na meji plastičnosti, kjer je globina penetracije konusa  $h = 2$  mm je  $c_u = 266$  kPa. Ugotovitev [13], da je nedrenirana strižna trdnost na meji plastičnosti sto krat večja od tiste na meji židkosti, omogoča na tak način določitev globine penetracije konusa tudi pri količini vode na meji plastičnosti.

Vsebnost vode  $w$  pri globinah penetracije konusa  $h = 2$  mm, 5 mm, 10 mm in 20 mm, ki ustrezajo nedrenirani strižni trdnosti  $c_u = 266$  kPa, 42.5 kPa, 10.6 kPa in 2.66 kPa, so prikazane v preglednici 7.

**Preglednica 7:** Vsebnost vode pri različnih vrednostih nedrenirane strižne trdnosti.

Vzorec	KGa-1				KGa-2				SAz-1			
$c_u$ [kPa]	2.66	10.6	42.5	266	2.66	10.6	42.5	266	2.66	10.6	42.5	266
$w$ [%]	40.0	35.0	30.8	25.8	50.9	43.3	36.8	29.8	129.0	105.4	86.9	68.2

### Izračun količine medpaketne vode

Količina vode, ki jo določimo s sušenjem zemljin pri temperaturi  $105^\circ$  C, je pri nenabreklih glinenih mineralih (KGa-1, KGa-2) enaka količini medzrnske vode  $w_e$ . Pri vzorcu montmorillonitne glin se poleg medzrnske pojavlja tudi medpaketna voda  $w_i$ , vezana na notranje površine glinenih zrn. Za opredelitev razmerja med posameznimi mehanskimi lastnostmi in vsebnostjo medzrnske vode je potrebno v nabreklih glinah celotno količino vode zmanjšati za delež medpaketne vode.

V strukturi montmorillonita se pojavljata dve tetraederski plasti in vmesna oktaederska plast. Tako sestavljen paket se nadaljuje v smeri kristalografskih osi  $a$  in  $b$  in nalaga eden na drugega v smeri  $c$  osi. Medpaketna razdalja (razdalja med središčema dveh paketov), ki je za popolnoma suh kalcijev montmorillonit (sušen pri  $105^\circ$  C)  $d_1 = 0.96$  nm, se po adsorpciji vode poveča na razdaljo  $d_2 = 1.54$  nm. Volumen vode med paketi  $V_{wi}$  se lahko v tem primeru izračuna skladno s [6] z enačbo

$$V_{wi} = \frac{A_{Si} (d_2 - d_1)}{2} = 0.1817 \quad (3)$$

kjer je  $A_{Si}$  notranja specifična površina zrn Ca-montmorillonita. Določena je bila iz razlike med celotno specifično površino enega grama gline  $A_{St}$  in merjeno zunanjo specifično površino  $A_S$ .

Notranja specifična površina zrn Ca-montmorillonita  $A_{Si}$  je enaka razliki med celotno specifično površino enega grama gline  $A_{St}$  in zunanjo specifično površino  $A_S$ .

$$A_{Si} = A_{St} - A_S \quad (4)$$

Celotno specifično površino smo izračunali skladno s [15] z izrazom



$$A_{St} = \frac{1}{m} N_A 2 s_w s_l = 724.22 \text{ m}^2/\text{g}, \quad (5)$$

kjer je  $m = 762$  izračunana relativna molekulska masa osnovne celice,  $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}/\text{mol}$  je Avogadrovo število,  $s_w = 0.515 \text{ nm}$  je širina osnovne celice in  $s_l = 0.89 \text{ nm}$  je dolžina osnovne celice.

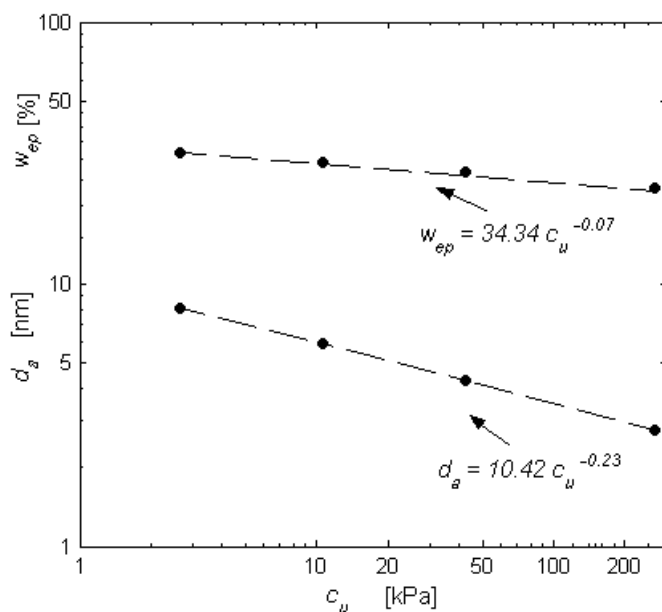
## DOKAZ VELJAVNOSTI TEORETIČNIH PREDPOSTAVK

Preiskus pravilnosti predpostavk, podanih v poglavju 2 smo izvedli tako, da smo količino medzrnske vode pri vrednostih nedrenirane strižne trdnosti  $c_u = 2.66 \text{ kPa}$ ,  $10.60 \text{ kPa}$ ,  $42.50 \text{ kPa}$  in  $266 \text{ kPa}$  skladno z izrazom (1) razdelili na delež proste porne vode  $w_{ep}$  in delež trdno adsorbirane vode  $w_{ea} = d_a A_{SC}$ . Pri tem je moral biti izpolnjen pogoj, da sta pri različnih glinah in enaki nedrenirani strižni trdnosti  $d_a$  in  $w_{ep}$  konstanti.

Iz preglednice 8 je razvidno, da je količino medzrnske vode res mogoče razdeliti na posamezne deleže tako, da so v celoti izpolnjeni podani pogoji. Rezultati tudi kažejo, kako se količina proste porne vode  $w_{ep}$  [%] in debelina plasti trdno adsorbirane vode  $d_a$  [nm] spreminjata v odvisnosti od vrednosti nedrenirane strižne trdnosti  $c_u$  [kPa]. Ti razmerji sta linearni (slika 2), kadar sta spremenljivki prikazani v logaritemskem merilu, zato veljata izraza (6) in (7).

$$w_{ep} = f_p c_u^{-g_p}; \quad f_p = 34.34 \text{ in } g_p = 0.07 \quad (6)$$

$$d_a = f_a c_u^{-g_a}; \quad f_a = 10.42 \text{ in } g_a = 0.23 \quad (7)$$



**Slika 2.** Količina proste porne vode  $w_{ep}$  in debelina plasti trdno adsorbirane vode  $d_a$  kot funkciji nedrenirane strižne trdnosti  $c_u$ .

Skladno z enačbami (1), (6) in (7) je mogoče vsebnost medzrnske vode  $w_e$  [%] pri enaki nedrenirani strižni trdnosti  $c_u$  [kPa] različnih zemljin podati z izrazom

$$w_e = p (34.34 c_u^{-0.07} + 10.42 c_u^{-0.23} A_{SC}), \quad (8)$$

kjer je  $p$  masni delež glinenih mineralov v sestavi zemljin in  $A_{SC}$  [m<sup>2</sup>/g] specifična površina gline.

Količina medzrnske vode je tako pri meji židkosti  $w_{eL}$  [%], kjer je pri uporabi Britanskega konusa  $c_u = 2.66$  kPa in pri meji plastičnosti zemljin  $w_{eP}$  [%], kjer je  $c_u = 266$  kPa enaka

$$w_{eL} = p (32 + 0.8 A_{SC}) \quad (9)$$

$$w_{eP} = p (23 + 0.3 A_{SC}) \quad (10)$$

**Preglednica 8.** Specifična površina glinenih zrn  $A_{SC}$ , količina medzrnske vode  $w_e$ , količina proste porne vode  $w_{ep}$ , debelina plasti trdno adsorbirane vode  $d_a$  in količina trdno adsorbirane vode  $w_{ea}$  pri izbranih vrednostih nedrenirane strižne trdnosti  $c_u$ .

Vzorec	KGa-1	KGa-2	SAz-1
$A_{SC}$ [m <sup>2</sup> /g]	10.05	23.50	97.42
$c_u$ [kPa]		$w_e$ [%]	
2.66	40.0	50.9	110.8
10.6	35.0	43.3	87.2
42.5	30.8	36.8	68.7
266	25.8	29.8	50.0
		$w_{ep}$ [%]	
2.66	31.9	31.9	31.9
10.6	29.1	29.3	29.1
42.5	26.5	26.7	26.9
266	23.1	23.3	23.1
		$d_a$ [nm]	
2.66	8.1	8.1	8.1
10.6	5.9	5.9	5.9
42.5	4.3	4.3	4.3
266	2.7	2.7	2.7
		$w_{ea} = d_a A_{SC}$ [%]	
2.66	8.1	19.0	78.9
10.6	5.9	14.0	58.1
42.5	4.3	10.1	41.8
266	2.7	6.5	26.9

## ZAKLJUČEK

Znano je, da je nedrenirana strižna trdnost zemljin odvisna od količine vsebujoče vode. Pri postavitvi kriterija, ki omogoča njeno določitev na osnovi mineraloških značilnosti, pa je bila ključnega pomena ugotovitev, da je nedrenirana strižna trdnost odvisna le od količine medzrnske vode. Ta je enaka količini celotne vode v zemljinah, ki vsebujejo samo nenabrekljive minerale. V primeru prisotnosti nabrekljivih mineralov se poleg medzrnske pojavlja tudi medpaketna voda. Ker se količina vode po standardizirani metodi v mehaniki zemljin določa s sušenjem vzorcev pri temperaturi 105<sup>0</sup> C, pri kateri se izloči tudi medpaketna voda, se na tak način vedno določi celotno vsebnost vode. To je bil najverjetneje tudi razlog, zaradi katerega doslej ni bilo mogoče najti splošno veljavnih odvisnosti med količino vsebujoče vode, fizikalnimi in mineraloškimi lastnostmi zemljin.

V primeru preiskovanih zemljin smo kot nabrekljiv mineral izbrali montmorillonit s Ca izmenljivim kationom, ki pripada skupini mineralov z omejenim nabrekanjem. Prikazan način izračuna količine medpaketne vode je splošno uporaben za vse nabrekljive minerale.

V prispevku je opisan postopek ugotavljanja tistih lastnosti mineralov, ki vplivajo na količino vsebujoče vode pri nedrenirani strižni trdnosti vezljivih zemljin. Na osnovi spoznanj, podanih v literaturi in lastnih predpostavk smo zasnovali model porazdelitve vode v zemljinah, predstavljen v obliki linearne funkcije. Z njim smo pokazali, kako je količina vode povezana z nedrenirano strižno trdnostjo in sestavo zemljin. Veljavnost modela in s tem pravilnost izbranih fizikalno kemičnih lastnosti mineralov, ki vplivajo na količino vsebujoče vode, smo preverili eksperimentalno, pri tem pa uporabili vzorce monomineralnih glin.

Ugotovili smo, da je pri enaki nedrenirani strižni trdnosti glin količina proste porne vode enaka, prav tako pa tudi debelina filma adsorbirane vode. Skupna količina adsorbirane vode je odvisna od velikosti glinenih zrn kar pomeni, da lahko skupno količino medzrnske vode izrazimo v odvisnosti od specifične površine gline.

## LITERATURA

- [1] American Society for testing and materials: *Standard test methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of soils*, D4318-98, Annula Book of Standards, Philadelphia, 1995.
- [2] British Standards Institution: *Methods of test for soils for civil engineering purposes*, BS 1377, London, 1990.
- [3] Dolinar, B., Trauner, L. (2003). Mehanske lastnosti vezljivih zemljin v odvisnosti od količine vode in mineralne sestave. *Geologija*, 46/2, 307-312.
- [4] Dolinar, B., Trauner, L. (2003). Undrained shear strength in dependance on the quantity of free water and firmly adsorbed water in fully saturated clays. *Academic open internet journal*, iss.10 <http://www.acadjournal.com/2002/v8/part8/p1/index.html>
- [5] Casagrande A. (1932). Research on the Atterberg limits of soils, Public Roads.
- [6] Fink, D.H., Nakayama, F.S. (1972). Equation for describing the free swelling of montmorillonite in water. *Soil Science*, Vol. 114, No. 5, 355-358.
- [7] Hansbo, S. (1957). A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test. *R. Swedish Geotech. Inst. Proc.* No.14, 7-47.
- [8] Koumoto, T., Houlsby, G.T. (2001). Theory and practice of the fall cone test. *Geotechnique*, Vol. LI, No. 8, 701-712.

- [9] Mitchell, J.K. *Fundamentals of Soil Behaviour*. John Wiley & Sons, New York, 1993.
- [10] Nagaraj, T.S., Pandian, N.S., Narasimha Raju, P.S.R. (1991). An approach for prediction of compressibility and permeability behaviour of sand-bentonite mixes. *Indian Geotechnical Journal*, Vol.21, No.3, 271-282.
- [11] Russell, E.R., Mickle, J.L. (1970). Liquid limit values of soil moisture tension, *Journal of soil mechanics and Foundations Division*, A.S.C.E., Vol. 96, 967-987.
- [12] Seed, H.B, Woodward, R.J., Lundgren, R. (1964). Clay mineralogical aspects of Atterberg limits. *Journal of Soil Mechanics and Foundations Division*, A.S.C.E., Vol. 90, No. SM 4, 107-131.
- [13] Skempton, A., Northey, R.D. (1953). The sensitivity of clays. *Geotechnique* 3, No.1, 30-53.
- [14] Sutherland, S.H., Maurice, P.A., Zhou, Q. (1999). Dissolution of well and poorly crystallized kaolinites: Al speciation and effects of surface characteristics. *American Mineralogist*, Vol. 84, 620-628.
- [15] Van Olphen, H. *An Introduction to Clay Colloid Chemistry*. Wiley Interscience, New York, 1977.
- [16] Van Olphen, H., Fripiat, J.J. *Data handbook for clay minerals and other non-metallic materials*. Pergamon press, 1979.