

## **DOLOČEVANJE MEJE ŽIDKOSTI IN MEJE PLASTIČNOSTI S KONUSNIM PENETROMETROM**

**POVZETEK:** Pri določevanju meje židkosti kohezivnih zemljin se vse bolj uveljavlja postopek s konusnim penetrometrom. Z isto metodo se lahko določi tudi mejo plastičnosti. To omogoča ugotovljena odvisnost med količino vode v zemljinah in globino ugrezka konusa. Ta odvisnost je sicer nelinearna, vendar postane v primeru logaritemske ponazoritve linearna, kar omogoča preprosto določitev parametrov funkcije. Globino ugrezka konusa pri meji plastičnosti zemljin se lahko izračuna iz znanega razmerja med nedrenirano strižno trdnostjo in penetracijsko globino ob upoštevanju ugotovitve, da je nedrenirana strižna trdnost na meji plastičnosti zemljin sto krat večja kot na meji židkosti.

## **LIQUID LIMIT AND PLASTIC LIMIT DETERMINATION BY FALL CONE TEST**

**SUMMARY:** The cone penetrometer method is being increasingly used for the determination of the liquid limit of cohesive soils. The same method can be used to determine the plastic limit according to the known relationship between soil moisture content and depth of cone penetration. This dependence is non-linear, yet it becomes linear by logarithmic presentation, which results in a simple determination of adequate soil dependent parameters. The depth of cone penetration can be calculated from the known relation between undrained shear strength and penetration depth taking into account that the undrained shear strength at the plastic limit is about hundred times the undrained shear strength at the liquid limit.

## UVOD

Preiskava konsistenčnih mej po Atterbergu je v mehaniki zemljin osnovnega pomena, saj na zelo enostaven način določa rezultate interakcije trdne in tekoče faze v zemljinah in s tem daje možnost razvrstitve le teh v skupine s podobnimi mehanskimi lastnostmi. Rezultati teh preiskav nudijo v večini primerov zelo dobro osnovo za napovedovanje ostalih lastnosti kot so stisljivost, nabrekljivost, hidravlična prepustnost in trdnost zemljin, kar kaže na to, da so osnovni dejavniki, ki vplivajo na vrednosti konsistenčnih mej in ostalih mehanskih lastnosti enaki.

Za določevanje meje židkosti se vse bolj uveljavlja metoda s konusnim penetrometrom. Priporočajo jo tako Britanski (BS 1377:pt2:1990), Švedski (SS 027120:1990), Kanadski standardi (CAN/BNQ 2501-092-M-86) kot Evropski predstandard (prENV 1997-2). Velika prednost preiskave s konusnim penetrometrom je predvsem v večji zanesljivosti in preprostejši izvedbi.

Meja židkosti je pri metodi s konusnim penetrometrom definirana kot odstotek vode v zemljini, pri katerem konus točno določenih dimenzij in mase s prostim padom prodre v zemljino do predpisane globine v časovnem intervalu  $5 \pm 1$  sek. Znani sta dve vrsti konusa. Švedski konus, ki je v uporabi že od leta 1915, je dolg 20 mm s kotom konice  $60^\circ$  in mase 60 g. Britanski konus je dolg 35 mm, ima kot konice  $30^\circ$  in maso 80 g. Različne so tudi posodice z vzorcem zemljine. Švedski standard predpisuje porcelanasto ali plastično posodo krogelne oblike premera 60 mm in globine 30 mm. Britanski standard zahteva valjasto posodico premera 55 mm in globine 40 mm. Eurocode dovoljuje uporabo obeh konusov.

Pri preiskavi meje židkosti je potrebno zamesiti vzorec s takšno količino vode, da je globina penetracije konusa v območju 7 – 15 mm pri Švedskem konusu oziroma 15 – 25 mm pri Britanskem konusu. Rezultate meritev se v prvem primeru nanese na diagram v pollogaritemskem merilu tako, da je vlažnost zemljin podana na abscisi v linearnem merilu. Pri Britanskem konusu se tako vsebnost vode kot globina penetracije nanese v linearnem merilu. Na premici, ki se točkam najbolje prilaga se nato odčita vlažnost zemljin pri globini penetracije 10 mm (Švedski konus) oziroma 20 mm (Britanski konus), kar označuje mejo židkosti.

V predpisanem območju globine penetracije konusa vsebujejo zemljine takšno količino vode, da je njihovo gnetenje in vgrajevanje v posodico enostavno. Pri majhni vsebnosti vode pa to ni več mogoče, kar je tudi razlog, da ta metoda ni primerna za določevanje meje plastičnosti. Vendar pa novejša raziskava kažejo, da se lahko rezultati preiskav s konusnim penetrometrom, pridobljeni pri preiskavah meje židkosti, uporabijo tudi za določevanje količine vode pri meji plastičnosti. Slednje omogoča ugotovitev (Feng, 2000), da je razmerje med vsebnostjo vode  $w$  in globino penetracije konusa  $h$  točno določeno in podano z izrazom:

$$w = c \cdot h^m \quad (1)$$

V enačbi sta  $c$  in  $m$  parametra, odvisna od vrste zemljin. Ker je razmerje med vlažnostjo  $w$  (%) in penetracijsko globino  $h$  (mm) v logaritemskem merilu linearno, predstavlja  $c$  (%) vsebnost vode v zemljini pri globini penetracije  $h = 1$  mm in  $m$  naklon funkcije. Parametra  $c$  in  $m$  se tako lahko določita z nekaj meritvami globin penetracije v območju vlažnosti zemljin, ki še omogoča njihovo gnetenje in vgrajevanje v posodico.

Globino penetracije konusa  $h$  na meji plastičnosti zemljin se izračuna iz vrednosti nedrenirane strižne trdnosti  $c_u$  na meji plastičnosti z izrazom (Hansbo, 1957):

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

V enačbi je  $K$  konstanta, odvisna od vrste uporabljenega konusa in  $W$  masa konusa. V primeru Britanskega konusa je teoretično določena vrednost konstante  $K = 1.33$  (Koumoto et al., 2001) 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. Ker je na meji plastičnosti zemljin

nedrenirana strižna trdnost sto krat večja od tiste na meji židkosti (Skempton et al., 1953), je globina penetracije konusa na meji plastičnosti  $h = 2$  mm.

V primeru uporabe Britanskega konusa se tako meja plastičnosti  $PL_{100}$  izračuna z izrazom:

$$PL_{100} = c \cdot 2^m \quad (3)$$

Iz opisanih postopkov določevanja meje židkosti po metodi več točk in meje plastičnosti je razvidno, da je privzeto razmerje med vlažnostjo zemljin in globino penetracije konusa različno. V primeru Britanskega konusa je ta odvisnost v območju globine penetracije konusa  $h = 15 - 25$  mm podana z enačbo premice medtem ko izraz (1) kaže, da je razmerje med količino vode in penetracijsko globino v celotnem območju plastičnega stanja zemljin nelinearno. Interpretacija rezultatov preiskav je tako pri obeh opisanih postopkih določevanja konsistenčnih mej neskladna.

V prispevku so prikazani rezultati preiskav s konusnim penetrometrom, s katerimi smo preizkusili uporabnost predlaganega postopka določitve meje plastičnosti zemljin. Podana metoda, ki se je po podatkih avtorja izkazala kot zanesljiva, bi lahko poenostavila postopek določevanja obeh konsistenčnih mej in predvsem omogočila boljše rezultate preiskav meje plastičnosti. Obstoječa standardizirana metoda z izdelavo svaljkov je zelo odvisna od subjektivne presoje izvajalca in zato manj zanesljiva. Preverili smo tudi, kako se pri preiskovanih zemljinah količina vode na meji židkosti spremeni v odvisnosti od izbrane metode določevanja. Vsebnost vode na meji židkosti smo določili skladno z Britanskim standardom in nato še z izrazom (1) po predhodni določitvi parametrov  $c$  in  $m$  iz linearnega razmerja  $\log w - \log h$  z metodo najmanjših kvadratov

## REZULTATI PREISKAV

### Vzorci

Pri laboratorijskih raziskavah smo uporabili monomineralne glin in njihove zmesi z neglinenimi primesmi. Gline pripadajo dobro kristaliziranemu kaolinitu (KGa-1), slabo kristaliziranemu kaolinitu (KGa-2) in 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 glin 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 dopolnjevanje rezultatov predhodnih študij. Podatki o kemični sestavi, mineralni sestavi, strukturi zgradbi, kationski izmenjalni kapaciteti, specifični površini in drugih lastnostih so za omenjene glin objavljeni v literaturi (Constanzo, Gugenheim, 2001; Van Olphen, Fripiat, 1979). Pri vzorcih z oznakami KS in MS smo glinenima mineraloma KGa-1 in SAz-1 dodali 20 % in 50 % kremenovega peska velikosti 0.08 – 0.40 mm z namenom ugotovitve vpliva neglinenih primesi na vrednosti parametrov  $c$  in  $m$ .

### Meja plastičnosti

Mejo plastičnosti smo preiskali s standardiziranim postopkom z izdelavo svaljkov in izračunali z izrazom (3) po predhodni določitvi parametrov  $c$  in  $m$ . Slednja smo izračunali iz razmerja med vlažnostjo zemljin  $w$  in globino penetracije konusa  $h$ . Ta odvisnost je v primeru logaritemskega prikaza linearna, kar omogoča enostavno določitev obeh parametrov. Pri tem smo upoštevali vse meritve, izvedene v območju globin penetracije  $h = 9 - 26$  mm.

Rezultati preiskav so prikazani v preglednici 1, kjer je  $w_p$  količina vode na meji plastičnosti, določena z izdelavo svaljkov in  $PL_{100}$  vsebnost vode na meji plastičnosti, izračunana z izrazom (3). V preglednici so podane tudi vrednosti parametrov  $c$  in  $m$  in specifične površine  $A_s$  vzorcev, ki so za

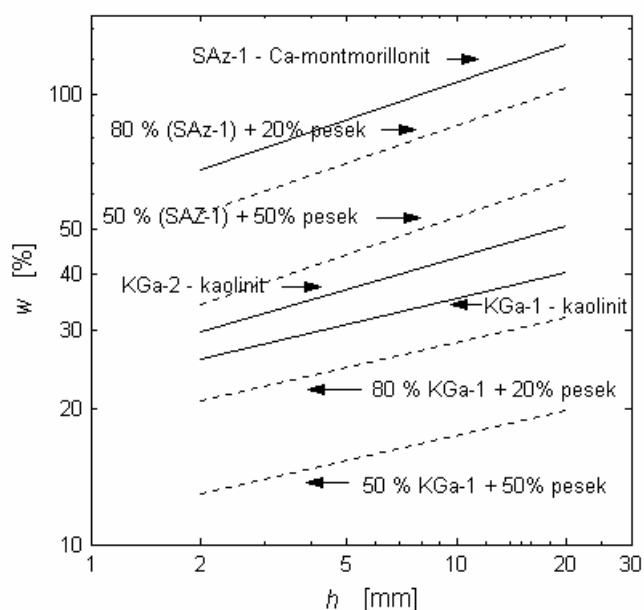
minerale glin povzete iz citirane literature, za njihove zmesi z neglinenimi primesmi pa izračunane iz linearnega razmerja med deležem glinene in neglinene frakcije.

**Preglednica 1.** Rezultati preiskav meje plastičnosti  $w_p$ ;  $PL_{100}$ , parametra  $c$  in  $m$  in specifična površina vzorcev  $A_s$ .

Vzorec	Mineralna sestava	$A_s$ (m <sup>2</sup> /g)	$w_p$ (%)	$PL_{100}$ (%)	$c$ (%)	$m$
KGa-1	Kaolinit–dobro kristaliziran	10.05	26.7	25.9	22.71	0.189
KGa-2	Kaolinit–slabo kristaliziran	23.50	30.4	29.7	25.22	0.235
SAz-1	Ca-montmorillonit	97.42	67.3	68.2	56.26	0.277
KS-1	80 % KGa-1 + 20 % pesek	8.04	21.2	20.8	18.32	0.184
KS-2	50 % KGa-1 + 50 % pesek	5.02	13.1	12.9	11.33	0.188
MS-1	80 % SAz-1 + 20 % pesek	77.93	53.9	54.6	45.06	0.277
MS-2	50 % SAz-1 + 50 % pesek	48.71	33.5	34.1	28.14	0.277

Rezultati preiskav kažejo, da je količina vode pri meji plastičnosti, določena po obeh postopkih zelo podobna, razlikuje pa se v vseh primerih za manj kot 1 %. Zaradi majhnega števila preiskanih vzorcev ti podatki še ne pomenijo, da so rezultati obeh metod primerljivi in postopek dovolj zanesljiv. Kljub temu pa so raziskave pokazale, da je metoda določevanja meje plastičnosti s konusnim penetrometrom v primeru, da se na tak način določi tudi mejo židkosti, razmeroma enostavna in manj odvisna od vpliva človeškega faktorja. Ustreznost podane metode potrjujejo tudi rezultati preiskav vlažnosti in penetracijskih globin, ki se zelo dobro ujemajo s funkcijo (1), kar omogoča razmeroma točno določitev obeh materialnih parametrov.

Razmerje med količino vode  $w$  in globino penetracije konusa  $h$  je za preiskane vzorce prikazano v logaritmskem merilu na sliki 1. Iz slike in preglednice je razvidno, da se vrednosti parametra  $m$  večajo z naraščanjem specifične površine zrn  $A_s$  in da ostajajo nespremenjene v primeru, ko se pri vzorcih z enakim glinenim mineralom spremeni utežni delež  $p$  glinene frakcije. V tem primeru se ta sprememba odraža na vrednosti parametra  $c$ , ki na tak način pokaže delež glinenih mineralov v zemljini.



**Slika 1.** Količina vode  $w$  kot funkcija penetracijske globine  $h$  (logaritmsko merilo).

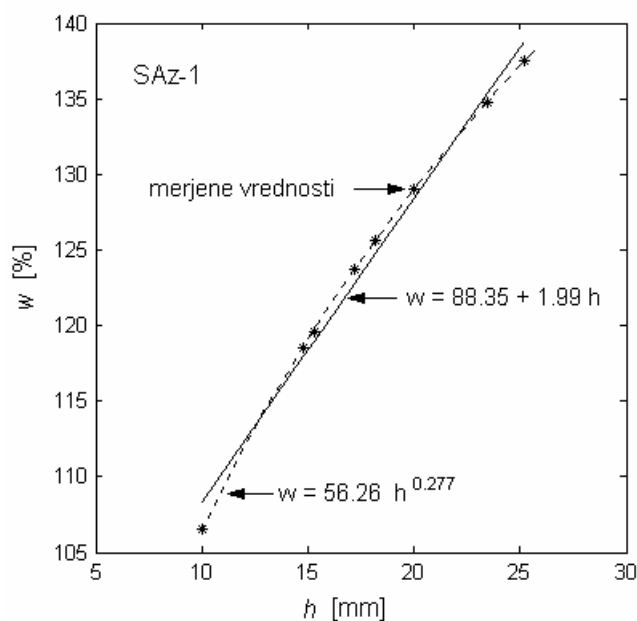
## Meja židkosti

Mejo židkosti smo določili z Britanskim konusom skladno z BS. Reultate meritev v območju globine penetracije  $15 \text{ mm} < h < 25 \text{ mm}$  smo aproksimirali s premico po metodi najmanjših kvadratov. Pri posameznih vlažnostih glin smo, zaradi čim bolj točnih rezultatov, opravili več preizkusov, upoštevali pa le tiste meritve, kjer je bila razlika med globinami penetracije konusa manjša od 0.3 mm (dovoljeno 0.5 mm). Mejo židkosti smo nato izračunali še z izrazom (1) pri  $h = 20 \text{ mm}$  ob upoštevanju predhodno določenih parametrov  $c$  in  $m$ . Rezultati preiskav so podani v preglednici 2, kjer je  $w_L$  količina vode na meji židkosti, določena skladno z BS in  $WL$  meja židkosti, izračunana z izrazom (1).

**Preglednica 2.** Rezultati preiskav meje židkosti.

Vzorec	Mineralna sestava	$w_L$ (%)	$WL$ (%)
KGa-1	Kaolinit–dobro kristaliziran	40.0	40.0
KGa-2	Kaolinit–slabo kristaliziran	48.9	50.9
SAz-1	Ca-montmorillonit	128.6	129.0
KS-1	80 % KGa-1 + 20 % pesek	31.4	31.8
KS-2	50 % KGa-1 + 50 % pesek	19.1	19.9
MS-1	80 % SAz-1 + 20 % pesek	102.9	103.3
MS-2	50 % SAz-1 + 50 % pesek	64.1	64.5

V primeru, da se bo opisana metoda določevanja meje plastičnosti zemljin s konusnim penetrometrom uveljavila v praksi, bo potrebno tudi mejo židkosti izračunati iz razmerja v enačbi (1) in ne iz linearnega razmerja  $w-h$  oziroma  $w-\lg h$ , kot predpisujeta Britanski in Švedski standard. Razlike, ki se pojavijo pri obeh postopkih določevanja meje židkosti niso velike, ker se upošteva le rezultate meritev v razmeroma ozkem območju globine penetracije konusa, kjer je razlika med potekom obeh krivulj majhna. Primer je podan za meritve, izvedene pri vzorcu montmorillonitne gline SAz-1. Merjene vrednosti, aproksimirane z enačbo premice po metodi najmanjših kvadratov, so prikazane s strjeno črto na sliki 2. Prekinjena linija označuje funkcijo (1) pri  $c = 56.26 \%$  in  $m = 0.277$ . Iz slike je razvidno, da točke merjenih vrednosti veliko bolj sovpadajo s krivuljo, podano z enačbo (1) kot s premico. Enaki zaključki veljajo za vse preiskane vzorce zemljin.



**Slika 2.** Količina vode  $w$  kot funkcija penetracijske globine  $h$  (linearno merilo).

## ZAKLJUČEK

Preiskava s konusnim penetrometrom je eksperimentalna metoda modeliranja, s katero se izmeri odvisnost  $w = f(h)$ , kjer  $w$  predstavlja količino vode v zemljini in  $h$  globino ugrezka konusa standardizirane oblike in teže. Ugotovljeno je bilo, da je rezultate preiskave mogoče opisati s funkcijo  $w = c \cdot h^m$ , kjer sta  $c$  in  $m$  prosta parametra, ki morata biti za različne zemljine določena tako, da se funkcija ujema z rezultati penetracijske preiskave. Parametra  $c$  in  $m$  sta odvisna od sestave zemljin.

Podana funkcija omogoča izračun količine vode na meji židkosti in meji plastičnosti zemljin po predhodni določitvi parametrov  $c$  in  $m$ . Slednja se za vsako zemljino določita eksperimentalno. Globina penetracije konusa se pri meji plastičnosti izračuna iz znanega razmerja med nedrenirano strižno trdnostjo in penetracijsko globino, pri tem pa upošteva, da je nedrenirana strižna trdnost na meji plastičnosti zemljin sto krat večja od tiste na meji židkosti.

Pri preiskusu opisanega postopka določevanja konsistenčnih mej s konusnim penetrometrom smo uporabili umetno pripravljene vzorce. Materialne parametre smo določili pri globini penetracije konusa  $h = 9 - 26$  mm. Količino vode na meji plastičnosti in meji židkosti zemljin smo nato izračunali pri globini ugrezka konusa  $h = 2$  mm in  $h = 20$  mm (Britanski konus). Za primerjavo smo mejo plastičnosti zemljin določili z izdelavo svaljkov in mejo židkosti s preiskavo s konusnim penetrometrom skladno z BS po metodi več točk. Rezultati preiskav so pokazali, da je količina vode na meji plastičnosti zemljin, določena po obeh postopkih, zelo podobna. Tudi vsebnost vode na meji židkosti vzorcev je pri obeh opisanih postopkih skoraj enaka, kar pa je iz prikazanega poteka krivulj pričakovano.

## LITERATURA

- (1) British Standards Institution (1990). Methods of test for soils for civil engineering purposes. British Standards Institution, BS 1377, London.
- (2) Canadian Standards Association and Bureau de normalisation du Quebec (1986). Soil-Determination of liquid limit by the Swedish fall cone penetrometer method and determination of plastic limit. CAN/BNQ 2501-092-M-86.
- (3) Constanzo, P.M. & Gugenheim, S. (2001). Clay minerals Society Source Clays. Clays and Clay minerals, Vol. 49, No. 5, 371-453.
- (4) European Committee for Standardization (1997). Eurocode 7: Geotechnical design-Part 2: Design assisted by laboratory testing. European Committee for Standardization, PrENV 1997-2, Brussels.
- (5) Feng, T. W. (2000). Fall-cone penetration and water content relationship of clays. Geotechnique 50, No. 2, 181-187.
- (6) 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.
- (7) Koumoto, T., Houlsby, G.T. (2001). Theory and practice of the fall cone test. Geotechnique, Vol. LI, No. 8, 701-712.
- (8) Swedish Standards Commission (1990). Geotechnical tests-cone liquid limit. Swedish Standards Commission, SS 027120, Stockholm.
- (9) Van Olphen, H., Fripiat, J.J. (1979). Data handbook for clay minerals and other non-metallic materials. Pergamon press, 346 p.