

Janko LOGAR

asist.mag., dipl.gradb.inž., Univerza v Ljubljani, FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

Lara HUMAR

študent gradbeništva, Univerza v Ljubljani, FGG, Katedra za mehaniko tal z laboratorijem

## **DOLOČANJE MEJE ŽIDKOSTI S CASAGRANDEJEVO METODO IN S KONUSNIM PENETROMETROM**

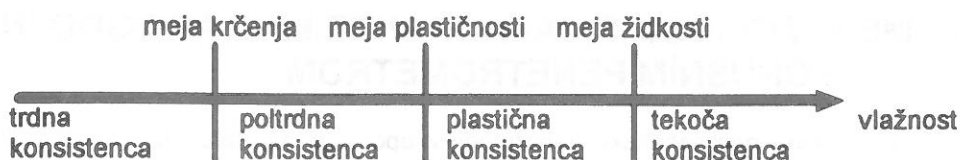
**POVZETEK:** V Sloveniji večina geomehanskih laboratorijev uporablja za določanje meje židkosti Casagrandejevo metodo, čeprav je že JUS standard omogočal tudi uporabo konusnega penetrometra. Pri tem je JUS kot prvo navajal Casagrandejevo metodo, ni pa eksplicitno dajal prednosti tej metodi. Novi Eurocode predpisi prav tako dovoljujejo uporabo obeh postopkov za določanje meje židkosti, pri čemer pa dajejo prednost metodi s konusnim penetrometrom. Ugotavljajo namreč, da daje ta metoda zlasti za zemljine nizke plastičnosti bolj zanesljive rezultate, poleg tega pa je rezultat preiskave manj odvisen od laboranta. Članek podaja kratek opis obeh preiskav in rezultate preiskav na tridesetih vzorcih, ki so bili preiskani vzporedno z obema metodama.

## **LIQUID LIMIT DETERMINATION BY CASAGRANDE AND FALL CONE METHOD**

**SUMMARY:** Most of the Slovenian soil mechanics laboratories use Casagrande method for the determination of liquid limit, although former Yugoslavian standards (JUS) enabled to use fall cone method, too. The first method mentioned by JUS standard was Casagrande method, however this method was not privileged regarding to fall cone method. According to the new Eurocode 7 standards both methods can be used, but the use of fall cone test is recommended. It was found out that for low plasticity soils the fall cone method gives more reliable results and in general test results depend less on operator. The paper gives short description of both test methods and the results obtained on thirty specimens by both methods.

## UVOD

Koherentne zemljine glede na vsebnost vode prehajajo iz trdne v poltrdno, iz poltrdne v plastično (gnetno) konsistenco in iz plastične v židko konsistenco. Lezne meje pomenijo vlažnost zemljine na prehodu med navedenimi konsistenčnimi stanji. Lezne meje določamo torej predvsem za ugotavljanje konsistenčnega stanja koherentnih zemljin in njihovo klasificiranje, strokovna literatura pa navaja tudi številne korelacije med nekaterimi najpomembnejšimi fizikalnimi karakteristikami za zemljine in leznimi mejami oz. indeksom plastičnosti, kar daje leznim mejam še dodaten pomen.



Slika 1: Lezne meje in konsistenca zemljin

Ko vzorcu določimo naravno vlago in lezne meje, lahko izračunamo indeks plastičnosti  $I_p$  in indeks konsistence  $I_c$ :

$$I_p = W_L - W_P, \quad I_c = (W_L - W_0) / I_p.$$

V prispevku se bomo posebej ukvarjali z mejo židkosti oziroma njenim določanjem v laboratoriju. Pri tem obravnavamo in primerjamo postopke, opisane v različnih standardih: JUS (Jugoslovanski, še veljavni pri nas), ASTM (Ameriški), BS (Britanski) in Eurocode (predlog novih evropskih standardov). Eurocode se sklicuje na postopke, ki jih je pripravil Evropski tehnični komite št. 5 (ETC-5) pri mednarodnem društvu za mehaniko tal in temeljenje (ISSMFE). Ker so postopki v grobem strokovni javnosti dobro poznani, jih ne opisujemo v celoti, navajamo pa zanimive razlike med posameznimi standardi.

## DOLOČANJE MEJE ŽIDKOSTI

Določanje meje židkosti v laboratoriju je sestavljeno iz naslednjih korakov:

- priprava vzorcev:
  - v naravnem stanju, če vsebujejo malo ali nič delcev, večjih od  $425 \mu\text{m}$ ,
  - z mokro sejnalno analizo in sedimentacijo frakcij pod  $425 \mu\text{m}$ , če vzorec vsebuje preveč delcev, večjih od  $425 \mu\text{m}$ , da bi jih odstranili ročno,
  - s suho sejnalno analizo, če vzorec vsebuje veliko delcev, večjih od  $425 \mu\text{m}$ .
- izvedba preizkusa:
  - s Casagrandejevim aparatom,
  - s konusnim penetrometrom,
- določitev vlažnosti preiskanega vzorca,
- izvedba vrednotenja rezultatov:
  - metoda ene točke,
  - metoda več točk.

### Priprava vzorcev za določitev leznih mej

Vzorec ne sme vsebovati delcev, večjih od  $425 \mu\text{m}$ . Uporabimo ga lahko v naravnem stanju, ali pa ga pripravimo z mokro ali suho sejnalno analizo. Standard BS za določitev leznih mej priznava le uporabo vzorcev v naravnem stanju ali pripravljene z mokro sejnalno analizo, medtem ko ASTM standard dovoljuje tudi uporabo vzorcev, pripravljenih s suho sejnalno analizo. JUS standard in ETC-5 pa zahtevata uporabo vzorcev v naravnem stanju ali pripravljenih s suho sejnalno analizo. Vzorec, ki ne vsebuje več delcev večjih od  $425 \mu\text{m}$  pripravimo v konsistenci blizu meje židkosti, dobro

pregnetemo, da je vzorec homogen in ga za 24 ur zapremo v neprodušno zaprto posodo. Tik pred preiskavo vzorec še vsaj 10 minut gnetemo in po potrebi dodajamo destilirano vodo.

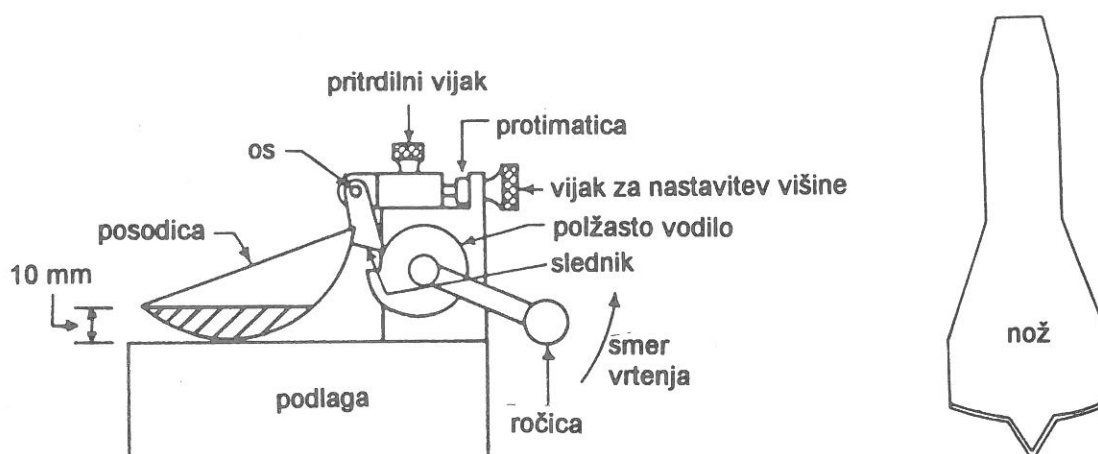
### Določanje naravne vlažnosti za drobnozrnate zemljine

Določanje vlage vzorca je pomemben sestavni del določanja leznih mej ter indeksov plastičnosti in konsistence. Zato ga posamezni standardi natančno opisujejo. Razlike med standardi so le v predpisanem času sušenja vzorca. Večina standardov predpisuje sušenje do stalne mase (razlika med dvema zaporednima tehtanjema v intervalu 4 ur ni večja od 0.1% začetne mase), JUS pa poleg tega postavi še minimalen čas sušenja na 24 ur.

### Izvedba preizkusa po Casagrandejevi metodi

Meja židkosti ali zgornja lezna meja je definirana kot odstotek vode v zemljini, pri kateri se raza širine 2 mm, napravljena v zemljini v posodici Casagrandejevega aparata, zapre na dolžini 12-13 mm, potem ko 25 krat prosto pade z višine 10 mm na podlago predpisane trdote.

Metodo je prvi razvil Casagrande leta 1932 in je bila 40 let edina po standardih priznana metoda za določitev meje židkosti. Danes jo ETC-5 in BS standard priznavata le kot nadomestno metodo, JUS standard jo priznava enakovredno metodi konusnega penetrometra, ASTM pa kot edino metodo.



Slika 2: Casagrandejev aparat za določitev meje židkosti

Po ETC-5 standardu (Eurocode) je postopek naslednji.

Osnovni pribor je Casagrandejev aparat, ki je sestavljen iz podlage iz vulkanizirane gume, posodice standardnih dimenzij, mehanizma za dvigovanje posodice in štetje padcev in noža za izdelavo raze v zemljini. Posodica je del krogle s polmerom  $54 \pm 0.5$  mm debeline  $2 \pm 0.5$  mm z nastavkom, ki služi za pritrjevanje na mehanizem za dvigovanje, ki omogoči maksimalen dvig posodice 10 mm. Nož standardnih oblik služi za poteg raze širine 2 mm in za preverjanje višine padca posodice.

Pripravljen vzorec take vlažnosti, da bo število padcev posodice blizu 50, vgradimo v spuščeno skodelico Casagrandejevega aparata tako, da je površina vzorca vzporedna s podlago. Debelina vzorca v sredini skodelice je tako 1.0 cm. Nato z nožem za izdelavo raze razdelimo zemljino na dva dela. Posodico dvigujemo in spuščamo s hitrostjo 2 padca na sekundo in pri tem štejemo udarce ob podlago. Raza se postopno zapira. Test je končan, ko se raza zapre na dolžini 12-13 mm, kar preverimo z ravnilom. Če se raza zapira neenakomerno, na primer na dveh mestih, pustimo, da ena od dolžin doseže vrednost 12-13 mm. Odčitamo število padcev. Postopek ponavljamo tolikokrat, da dasta dva zaporedna poskusa enako število udarcev. Odvzamemo zemljino za določitev vlažnosti vzorca. Ostali material vrnemo na stekleno ploščo, postopek ponovimo še trikrat in vsakič dodamo malo vode, in sicer v takih količinah, da je rezultat v intervalu 10-50 padcev. Vsakič orodje in posodico operemo in osušimo.

JUS standard zahteva interval rezultatov 15-30 padcev. Pri eni vlažnosti izvedemo samo en preizkus. Celoten postopek ponovimo pri različnih vlažnostih 3-5 krat, pri tem morajo biti vsaj tri točke točno na premici. Pribor in ostali del postopka se popolnoma sklada s standardom BS.

Izvedba preiskave po BS standardu je povsem identična izvedbi po standardu ETC-5.

Po ASTM standardu je guma podlage Casagrandejevega aparata nekoliko večje trdote kot po BS standardu, kar privzema tudi ETC-5 zaradi večje razširjenosti aparature po ASTM. Preizkus pri enaki vlažnosti po ASTM ponovimo le v primeru, če se razza zapre neenakomerno ali pa se polovici različno deformirata. Standard zahteva celotno ponovitev postopka pri različnih vlažnostih najmanj trikrat, interval rezultatov pa mora biti 15-35 padcev.

#### Izvednotenje rezultatov po Casagrandejevi metodi

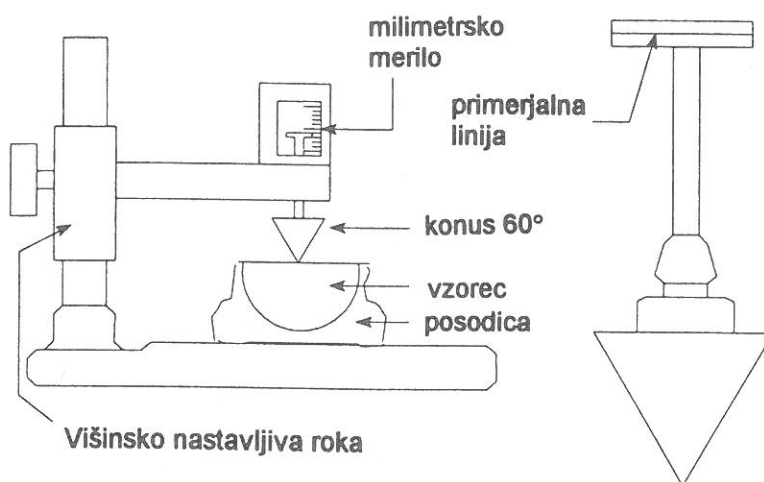
Vsakemu testnemu vzorcu, ki smo mu določili vlažnost in število padcev, pripada točka v diagramu, ki ima na absciso naneseno število padcev v logaritemskem merilu, na ordinati pa odstotek vlažnosti v linearnem merilu. S povezavo točk dobimo ravno črto. Mejo židkosti predstavlja odstotek vlažnosti, ki ustreza 25 padcem skodelice.

JUS, ASTM in BS standardi dovoljujejo tudi določitev meje židkosti s Casagrandejevim aparatom z meritvijo pri eni sami vlažnosti (metoda ene točke), ko imamo premalo materiala za metodo treh oziroma štirih točk. Rezultati so manj zanesljivi. Za zemljine z mejo židkosti večjo od 120% metoda ni primerna. ETC-5 ne omenja te metode.

Uporabimo samo okrog 100 g vzorca in pri gnetenju dodamo toliko vode, da bo število padcev čim bližje 25 ter ponavljamo test pri eni sami vlažnosti tolikokrat, da dobimo dva enaka rezultata. Tu se standardi razlikujejo le v zahtevanem intervalu padcev, in sicer JUS in ASTM standarda zahtevata 20-30 padcev, BS standard pa 15-35. Na delu vzorca določimo vlažnost  $w$ . Mejo židkosti  $w_L$  dobimo po enačbi  $w_L = k * w$ , v kateri je  $k = (N/25)^{0.092}$  po BS standardu in  $k = (N/25)^{0.121}$  po ASTM in JUS standardu.

#### Izvedba preizkusa s konusnim penetrometrom

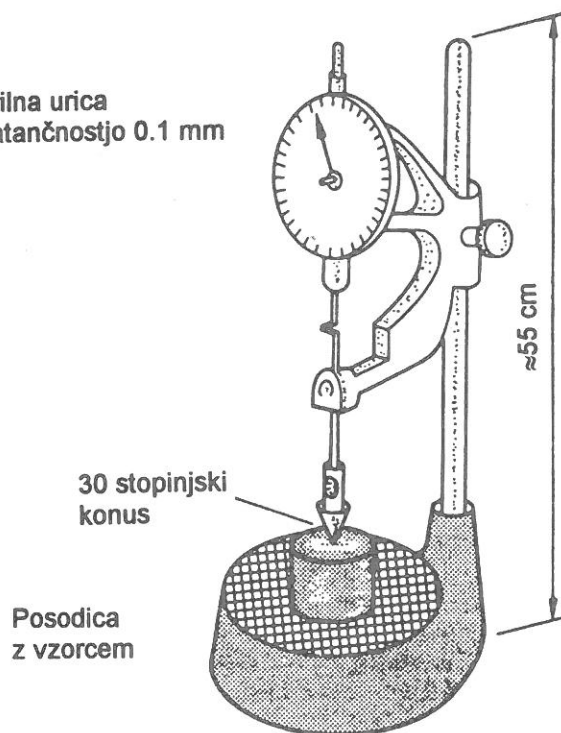
Po metodi konusnega penetrometra je meja židkosti definirana kot odstotek vode v zemljini, pri kateri konus točno določenih dimenzij in mase v časovnem intervalu  $5 \pm 1$  sek s prostim padom prodre v zemljino do predpisane globine.



Slika 3: Švedski konusni penetrometer

Znani sta dve izvedbi: Švedski konus (Švedski to metodo uporabljajo že od leta 1915) in Britanski konus. Švedski konus je dolg 20 mm s kotom konice  $60^\circ$  in težak 60 g (slika 3). Britanski konus je dolg 35 mm, s kotom konice  $30^\circ$  in teže 80 g (slika 4). Tudi posodice z vzorcem zemljine so različnih dimenzij: Švedski standard predpisuje porcelanasto ali plastično posodo krogelne oblike premera 60 mm in globine 30 mm. Britanski standard pa zahteva valjasto posodico premera 55 mm in globine 40 mm. Eurocode (ETC-5) dovoljuje uporabo obeh konusov.

Merilna urica  
z natančnostjo 0.1 mm



Slika 4: Britanski konusni penetrometer

Osnovni pribor je konusni penetrometer, ki ga sestavljajo osnovno ogrodje, konus, merilna urica penetracije in priprava za merjenje časa, ki hkrati avtomatsko sprosti in ustavi konus, posodica za vzorec in pribor za pripravo vzorca ter za določanje vlažnosti.

Pripravljen vzorec take vlažnosti, da bo penetracija ustrezala podatkom iz preglednice 1, vgradimo v posodico tako, da ne ustvarjamo zračnih žepov. Z nožem zgladimo površino vzorca in položimo skodelico z zemljino pod konus. Konus spustimo prav do površine vzorca, tako da bi najmanjši premik skodelice vstran povzročil sled konusne konice. Odčitamo začetno vrednost na merilni urici. Nato sprostim konus in sprožimo štoparico. Po petih sekundah konus ustavimo, spustimo steblo merilne urice do držala konusa in odčitamo vrednost končnega odčitka. Razlika končnega in začetnega odčitka je globina penetracije konusa v vzorec. Konus nato dvignemo iz zemljine, ga očistimo, dodamo še malo zemljine, zopet zgladimo površino in opravimo še en preizkus. Preizkus ponavljamo tako dolgo, dokler ne dobimo dveh zaporednih penetracij z razliko manjšo od tiste iz preglednice 1.

Del vzorca vzamemo za določitev vlažnosti, ostali del pa vrnemo na stekleno ploščo in postopek ponovimo še trikrat. Vsakič dodamo malo vode, tako da dobimo pri različnih vlažnostih različne vrednosti penetracij, ki morajo biti v intervalu, podanem v preglednici 1.

Opisan postopek je povzet po navodilih ETC-5. ASTM te metode ne predvideva, JUS in BS standarda predvidevata le uporabo Britanskega konusa in se razlikujeta v postopku določanja penetracije pri določeni vlažnosti: če se dve penetraciji razlikujeta za manj kot 0.5 mm, potem kot rezultat vzamemo povprečje obeh penetracij. Če je razlika od 0.5 do 1.0 mm, opravimo še tretji preizkus. Razlika med najmanjšo in največjo penetracijo je lahko največ 1.0 mm in rezultat je v tem primeru povprečje treh penetracij. V nasprotnem primeru ponovimo celoten postopek še enkrat.

Preglednica 1: Ključne značilnosti preiskav s konusnim penetrometrom

	Britanski konus	Švedski konus
Zahtevana začetna penetracija	≈15 mm	≈7 mm
Območje penetracije	15 do 25 mm	7 do 15 mm
Največja dovoljena razlika med dvema zaporednima penetracijama	0.5 mm	0.4 mm
$w_c$ je definiran pri penetraciji	20 mm	10 mm

#### Iz vrednotenja rezultatov preiskave s konusnim penetrometrom

Pri britanskem konusu nanesimo na absciso vlažnosti vzorcev, na ordinato pa penetracije v linearnem merilu. Narišemo premico, ki se točkam najbolje prilega in kot mejo židkosti zabeležimo vlažnost pri penetraciji 20 mm.



Pri švedskem konusu nanesimo na absciso vlažnosti vzorcev v linearnem merilu, na ordinato pa penetracije v logaritmичnem merilu. Narišemo premico, ki se točkam najbolje prilaga in kot mejo židkosti zabeležimo vlažnost pri penetraciji 10 mm.

Tudi pri testiranju s konusnim penetrometrom je mogoče uporabiti metodo ene točke. Metodo sta predlagala Clayton in Jukes leta 1978 kot pomožno metodo namesto metode štirih točk. Metodo uporabimo, če imamo premalo materiala za metodo več točk. Uporabna je le takrat, ko so sprejemljivi manj točni rezultati. Pri zemljinah, ki imajo mejo židkosti večjo od 120%, metoda ni primerna. Dovoljuje jo le BS standard in sicer po naslednjem postopku: Pri pripravi vzorca dodamo toliko vode, da dobimo rezultat penetracije čim bližje vrednosti 20 mm. Preizkus penetracije ponavljamo, dokler ne dobimo dveh penetracij z razliko manj kot 0.5 mm. Del vzorca uporabimo za določitev vlažnosti. Mejo židkosti  $w_L$  izračunamo tako, da določeno vlažnost  $w$  pomnožimo s tabelarično podanim korekcijskim faktorjem  $k$ , ki je odvisen od globine penetracije  $z_p$  in indeksa plastičnosti zemljine  $I_p$ .

## PRIKAZ REZULTATOV IN RAZPRAVA

BS in Eurocode standardi dajejo pri določitvi meje židkosti prednost metodi s konusnim penetrometrom in to utemeljujejo s tem, da daje po izkušnjah test s konusnim penetrometrom bolj konsistentne rezultate, ki so manj odvisni od laboranta, in je nenazadnje nekoliko preprostejši za izvedbo. Preizkus s konusom je po naravi statičen, zlasti v primerjavi s Casagrandejevim, ki je izrazito dinamičen, zato na rezultate vpliva tudi obnašanje materiala pri dinamični obtežbi. S tem v zvezi je dokazan velik vpliv trdote podlage na rezultat Casagrandejeve metode. Omenjena standarda dajeta izključno prednost konusni metodi v primeru, ko pri postopku s Casagrandejevim aparatom ne moremo urezati enakomere gladke raze v zemljino, kar je značilno za zemljine z nizkim indeksom plastičnosti, in takrat, ko med udarjanjem posodice Casagrandejevega aparata ob podlago vzorec drsi po dnu skodelice, namesto da bi se deformacije pojavljale znotraj vzorca.

S stališča zanesljivosti rezultatov BS standard pojasnjuje prednost konusne metode pred Casagrandejevo s tem, da naj bi bile razlike med rezultati testov pri zemljinah z mejo židkosti pod 100% zanemarljive in vsekakor manjše od variiranja rezultatov pri sami Casagrandejevi metodi. Pri zemljinah z mejo židkosti nad 100% pa naj bi preizkus s konusnim penetrometrom dal nižje vrednosti od preizkusa s Casagrandejevim aparatom (Littleton in Farnilo, 1977).

Pri našem praktičnem delu smo se prepričali, da je pri Casagrandejevi metodi res večji vpliv človeškega faktorja kot pri konusni metodi. Že priprava vzorca v skodelici Casagrandejevega aparata je zahtevnejša, saj moramo površino zgladiti tako, da je najgloblji del vzorca 1 cm in vrezati razo s standardnim nožem, kar je nedvomno zahtevnejše kot z nožem potegniti po robovih skodelice konusnega penetrometra. Pri konusni metodi nam preostane samo še nastavitev konusa na površino vzorca, ves ostali postopek opravimo s pritiskom na gumb in odčitkom rezultata. Pri testu s Casagrandejevim aparatom je velikokrat težko presoditi, ali se med udarjanjem skodelice ob podlago vzorec pravilno deformira in nato določiti konec testa, saj se raza velikokrat zapre na veliki dolžini (>13 mm) zaradi enega dodatnega udarca. Konusna metoda je po naših izkušnjah tudi nekoliko hitrejša od Casagrandejeve, predvsem zato, ker smo morali preizkus s Casagrandejevim aparatom velikokrat ponavljati zaradi različnih vzrokov (raza se ni zapirala le na enem mestu, raza se dolgo ni zaprla, potem pa sta se obe polovici vzorca združili naenkrat na dolžini večji od 13 mm, polovici vzorca sta se neenakomerno deformirali, rezultat je bil večkrat izven območja).

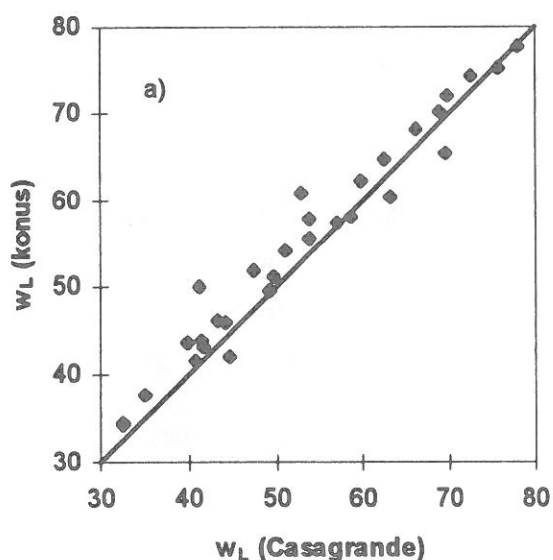
S praktičnega stališča se tako zdi konusna metoda lažje izvedljiva, natančnejša in hitrejša v primerjavi s Casagrandejevo metodo določanja meje židkosti.

Predstavljamo rezultate preiskav meje židkosti na 30 vzorcih iz različnih lokacij. V preglednici 2 smo prikazali mejo židkosti po Casagrandejevi metodi ( $w_{L,C}$ ) in po konusni metodi ( $w_{L,K}$ ), srednjo vrednost obeh mej židkosti ( $w_{L,pov}$ ), mejo plastičnosti ( $w_p$ ), naravno vlago ( $w_0$ ), indeks plastičnosti ( $I_p$ ) in indeks konsistence ( $I_C$ ), v zadnjih dveh stolpcih pa še lezni meji po Casagrandejevi in konusni metodi, izvrednoteni po metodi ene točke ( $w'_{L,C}$ ) in ( $w'_{L,K}$ ). Razlike med rezultati meje židkosti po Casagrandejevi in konusni metodi smo prikazali kot absolutno napako  $E$  in relativno napako  $\varepsilon$ . Pri tem pozitivna vrednost pomeni, da je rezultat pri testu s konusnim penetrometrom večji od rezultata pri Casagrandejevem preizkusu. Uporabljali smo britanski konusni penetrometer.

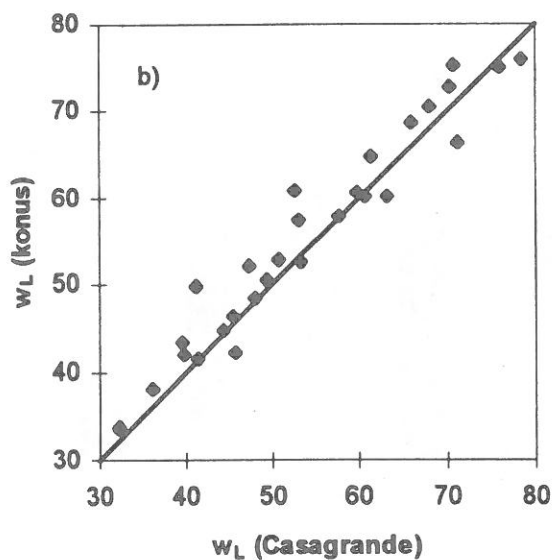
Velikost absolutne napake znaša od 0.2% do 9.0%, velikosti relativne napake od 0.3% do 21.8%. Najverjetnejša vrednost (mediana) absolutnih napak je 2.2% in relativnih 4.4%.

Preglednica 2: Rezultati preiskav

VZO rec	$w_0$ [%]	$w_p$ [%]	$w_{L,C}$ [%]	$w_{L,K}$ [%]	$w_{L,pov}$ [%]	$I_p$ [%]	$I_c$ [%]	$E$ [%]	$\varepsilon$ [%]	$w'_{L,C}$ [%]	$w'_{L,K}$ [%]
1	48,2	26,7	63,2	60,4	61,8	35,1	0,39	2,8	4,4	63,1	60,1
2	52,6	25,0	58,6	58,1	58,4	33,4	0,17	0,5	0,9	60,5	60,1
3	34,0	20,3	44,6	42,2	43,4	23,1	0,41	2,4	5,4	45,7	42,4
4	38,5	23,6	49,6	51,3	50,4	26,9	0,44	1,7	3,3	49,3	50,6
5	27,3	20,5	32,4	34,3	33,3	12,8	0,47	1,9	5,7	32,3	33,9
6	29,8	27,9	51,0	54,2	52,6	24,7	0,92	3,2	6,3	50,8	52,8
7	47,4	29,1	68,7	70,2	69,5	40,4	0,55	1,5	2,2	68,0	70,3
8	35,2	27,2	43,3	46,3	44,8	17,6	0,54	3,0	6,8	45,5	46,5
9	50,1	33,9	75,7	75,3	75,5	41,6	0,61	0,4	0,5	75,8	75,0
10	29,2	20,4	41,7	43,2	42,4	22,1	0,60	1,6	3,7	41,4	41,6
11	32,7	19,8	39,9	43,8	41,9	22,1	0,42	3,9	9,8	39,7	43,5
12	33,3	21,0	59,6	62,3	60,9	39,9	0,69	2,7	4,5	59,6	60,7
13	19,8	20,1	49,1	49,6	49,4	29,2	1,01	0,5	1,0	48,0	48,5
14	26,0	28,5	53,7	57,9	55,8	27,3	1,09	4,2	7,9	53,0	57,4
15	12,7	16,1	35,1	37,9	36,5	20,3	1,17	2,8	7,8	36,2	38,2
16	22,4	16,8	32,6	34,5	33,6	16,8	0,66	1,9	5,8	32,2	33,6
17	28,5	22,4	62,4	64,7	63,5	41,1	0,85	2,3	3,7	61,3	64,7
18	28,2	23,3	66,1	68,2	67,2	43,9	0,89	2,1	3,2	65,9	68,5
19	16,8	15,0	41,4	44,0	42,7	27,7	0,93	2,6	6,4	39,5	43,4
20	25,2	20,4	53,7	55,6	54,7	34,2	0,86	1,9	3,5	53,4	52,5
21	18,7	14,9	44,1	46,0	45,1	30,2	0,87	1,9	4,3	44,3	44,9
22	43,5	29,8	78,0	77,8	77,9	48,2	0,71	0,2	0,3	78,5	75,9
23	43,9	23,9	69,5	65,4	67,5	43,5	0,54	4,1	5,9	71,2	66,3
24	30,4	22,1	47,3	51,9	49,6	27,5	0,70	4,6	9,6	47,3	52,2
25	36,8	29,2	69,7	72,1	70,9	41,7	0,82	2,4	3,4	70,1	72,6
26	30,5	23,5	41,1	50,1	45,6	22,1	0,68	9,0	21,8	41,2	49,9
27	30,7	24,7	52,9	60,9	56,9	32,2	0,81	8,0	15,1	52,7	60,8
28	38,7	28,8	72,5	74,2	73,4	44,6	0,78	1,7	2,3	70,6	75,1
29	41,9	26,0	57,1	57,4	57,2	31,2	0,49	0,3	0,5	57,6	57,8
30	26,7	20,6	40,7	41,7	41,2	20,7	0,70	1,0	2,5	39,8	42,0



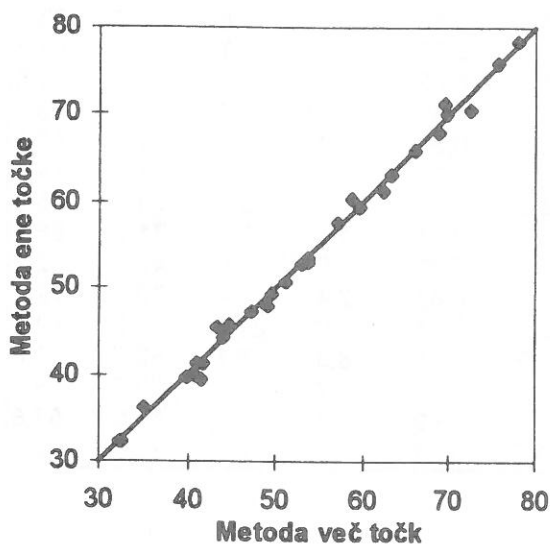
Slika 4: Rezultati preiskav: metoda več točk



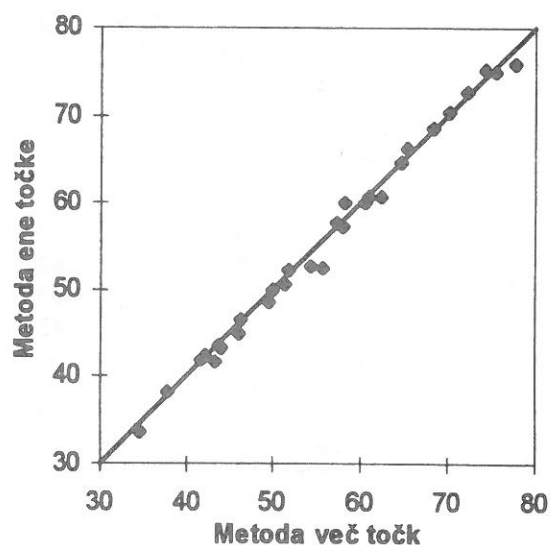
Slika 5: Rezultati preiskav: metoda ene točke

S slik 4 in 5 lahko razberemo, da daje večinoma konusni penetrometer nekoliko višjo mejo židkosti od Casagrandejevega aparata, kar je zlasti izrazito na območju  $w_L < 60\%$ . Nad to vrednostjo so rezultati bližje črti, ki označuje enakost obeh rezultatov ( $w_{L,C} = w_{L,K}$ ). Če skozi eksperimentalno določene točke povlečemo regresijsko premico, ugotovimo, da seče simetralo v diagramu pri  $w_L = 78\%$ . Do te vrednosti daje glede na naše preiskave konusni penetrometer po britanskem standardu višje vrednosti meje židkosti, za večje vrednosti  $w_L$  pa bi torej lahko pričakovali rezultate, ki so nižji od Casagrandejeve metode. Žal v tej seriji rezultatov nismo imeli takšnih vzorcev. Vendar literatura navaja, da daje pri materialih z  $w_L > 100\%$  konusni penetrometer nižje vrednosti od Casagrandejevega aparata. Farrell (1995) je zbral rezultate več raziskovalcev, ki so primerjali obe metodi. Ugotovitev iz zbranih podatkov je, da daje švedski konus pri  $w_L > 40\%$  nekoliko nižje rezultate od Casagrandejeve metode, nasprotno pa britanski konus nekoliko višje, kar potrjujejo tudi naši rezultati.

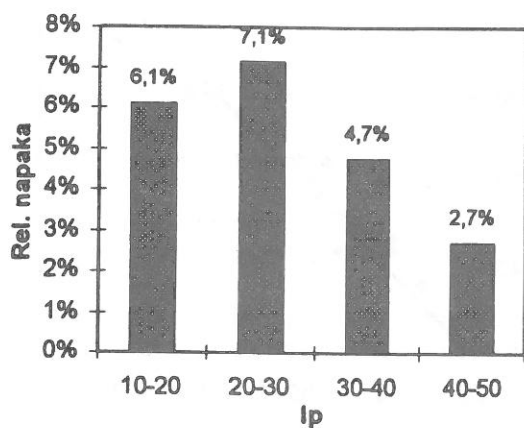
Sliki 4 in 5 sta si precej podobni, kar pomeni, da razlike med metodo več točk in metodo ene točke niso velike. Da bi to še nazameje pokazali, smo pripravili sliki 6 in 7, kjer primerjamo metodo ene in več točk na istem diagramu za posamezno metodo preiskave. Za metodo ene točke smo uporabili kar prvi rezultat iz serije meritev po metodi več točk, ki je bil znotraj območja, ki ga dovoljuje standard. Sliki dejansko kažeta, da velikih odstopanj ni. Seveda je serija 30 preiskav na vzorcih, ki ne pokrivajo celotnega intervala meje židkosti niti intervala indeksa plastičnosti, premajhna, da bi mogli z zanesljivostjo sprejemati zaključke. Lahko pa se pridružimo mnenju, da je v primeru, ko so sprejemljivi manj natančni rezultati, metoda sprejemljiva, pa še hitrejša je.



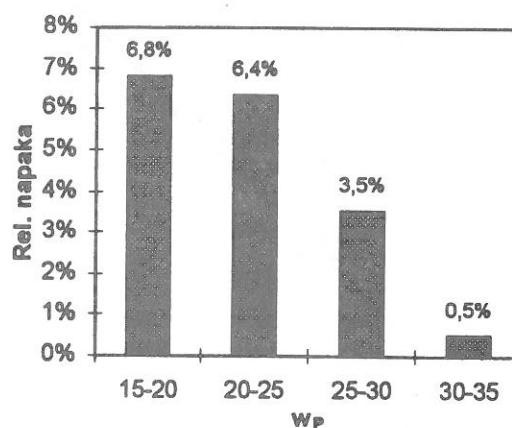
Slika 6: Rezultati Casagrandejeve metode



Slika 7: Rezultati preiskav z britanskim konusom



Slika 8: Relativna napaka v odvisnosti od indeksa plastičnosti



Slika 9: Relativna napaka v odvisnosti od meje plastičnosti



Vzorci, na katerih smo izvedli meritve, so imeli interval indeksa plastičnosti od 12.8% do 48.3%. Na sliki 8 smo prikazali vrednost povprečne relativne napake za posamezne intervale indeksa plastičnosti. Pri tem smo upoštevali absolutno velikost napake, ne pa tudi predznaka. Pri večjih indeksih plastičnosti smo dobili manjše vrednosti napak. Izjema je prvi interval, ki ga predstavljajo le tri meritve. V splošnem naše meritve potrjujejo navedbe iz literature, da je z naraščanjem indeksa plastičnosti razlika med rezultati obeh metod manjša.

Slika 9 prikazuje tudi očiten trend upadanja napake z naraščajočo mejo plastičnosti ( $w_p$ ). Upadanje razlike med rezultati obeh metod v odvisnosti od meje židkosti pa je razvidna že s slike 4.

## ZAKLJUČEK

Po štirih standardih (ASTM, BS, JUS in Eurocode) smo pregledali in povzeli postopke za določanje meje židkosti in se zlasti pomudili pri razlikah med njimi. Na 30 vzorcih koherentnih zemljin z različnih lokacij smo izvedli primerjalne teste po dveh metodah: s Casagrandejevim aparatom in s konusnim penetrometrom po britanskem standardu. Podali smo naše izkušnje pri delu z obema aparaturama in povzeli tudi tuje. Prav tako smo z navedbami literature primerjali naše ugotovitve glede razlik med meritvami z eno oziroma drugo napravo. Če povzamemo:

- pri Casagrandejevem aparatu je priprava vzorca zamudnejša, včasih tudi neuspešna (ni mogoče izdelati gladke raze vzdolž cele posodice), medtem ko pri konusnem penetrometru s pripravo vzorca ni težav,
- pri Casagrandejevem aparatu se je včasih težko odločiti, kdaj sta se polovici vzorca združili na razdalji 13 mm, dogaja se tudi, da se polovici ne deformirata enakomerno, zaradi česar je potrebno preiskavo večkrat ponavljati pri enako vlažnem vzorcu,
- ponavljanje preiskave pri eni vlažnosti je manj zamudno pri konusnem penetrometru,
- pri preizkusu s Casagrandejevim aparatom je bilo potrebnih več ponovitev tudi zato, ker smo iz vrednotili preiskavo po JUS standardu, ki zahteva, da je število udarcev med 15 in 30, kar je bistveno strožji pogoj od tistega, ki ga britanski standard postavlja za globino penetracije pri preizkusu s konusnim penetrometrom (15 do 25 mm),
- neizkušen laborant lažje in hitreje obvlada preiskavo s konusnim penetrometrom,
- rezultati britanskega konusnega penetrometra so na območju, ki smo ga lahko obravnavali ( $30% < w_L < 80%$ ), nekoliko nad rezultati Casagrandejevega aparata, kar se sklada s podatki iz literature,
- razlika med mejo židkosti se po obeh metodah v obravnavanem območju manjša z naraščajočo mejo židkosti, z naraščajočo mejo plastičnosti in z naraščajočim indeksom plastičnosti,
- metoda ene točke se je pri naši seriji preiskav izkazala za korektno, saj je maksimalna absolutna napaka med metodo več točk in metodo ene točke 2.2% pri Casagrandejevi metodi in 3.1% pri konusnem penetrometru, ustrezni povprečni napaki pa sta 0.68% in 0.75%, kar je manj kot znaša razlika med rezultati obeh metod,
- serija rezultatov (30 vzorcev) je premajhna, da bi lahko zaključke razglasili za splošno veljavne, ker pa se naše ugotovitve skladajo z ugotovitvami drugih avtorjev, dopolnjujejo in potrjujejo že znane zakonitosti.

Na osnovi povedanega menimo, da je metoda konusnega penetrometra primernjša od Casagrandejeve metode in predlagamo, da se v Sloveniji sprejme, kot to predlaga predlog Eurocode predpisov, za prednostno metodo določanja meje židkosti.

## LITERATURA

- (1) Farrell, E (1995), Workshop: Liquid and plastic limits, Proc. XI ECSMFE, Copenhagen, Vol. 10, 161-168.
- (2) Farrell, E., Larsson, R., Schuppener, B. (1995), Determination of Atterberg limits, Workshop 2, Standardisation of laboratory testing, Report prepared by ETC 5 in connection with XI ECSMFE, Copenhagen, 63-74.
- (3) Head, K. H. (1992), Manual of Soil Laboratory Testing, Volume 1: Soil classification and compaction tests, Second edition, Pentech Press, London.
- (4) BS 1377 : Part 2 : 1990, Soils for civil engineering purposes, Classification tests, 1990.

- (5) 1989 Annual book of ASTM standards, Section 4 Construction. Volume 04.08 Soil and Rock, Building Stones, Geotextiles, D 4318-84, 579-589, 1989.
- (6) JUS U.B1.020, Geomehanske preiskave. Določanje konsistence zemljin. Atterbergove meje, 1980.
- (7) ENV 1997 - 2. Eurocode 7 Geotechnical design. Part 2. Geotechnical design assisted by testing. Laboratory testing. CEN/TC 250/SC 7, N 166, 1995.