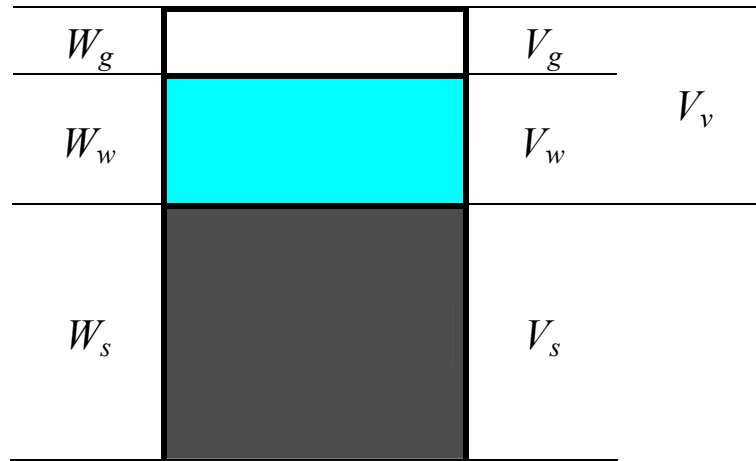


FIZIKALNE LASTNOSTI ZEMLJIN IN HRIBIN

I. ZEMLJINE



Dvofazni ali trofazni sistem

1. Poroznost:

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad , \quad e_w = \frac{V_w}{V_s} \quad , \quad e_g = \frac{V_g}{V_s} \quad , \quad e = e_w + e_g$$

e ... količnik por (realno od 4 do 0.4)

$$n = \frac{V_v}{V} \quad , \quad n_w = \frac{V_w}{V} \quad , \quad n_g = \frac{V_g}{V} \quad , \quad n = n_w + n_g$$

n ... delež por (teoretično od 1 do 0, realno od 0.8 do 0.3)

$$e = \frac{n}{1-n} \quad \Rightarrow \quad n = \frac{e}{1+e}$$

2.0 Zasičenost

$$S_r = \frac{V_w}{V_v} = \frac{e_w}{e} = \frac{n_w}{n}$$

S_r ... stopnja zasičenosti (v praksi 0 oziroma $\cong 1$ ali 0 oziroma 100%)

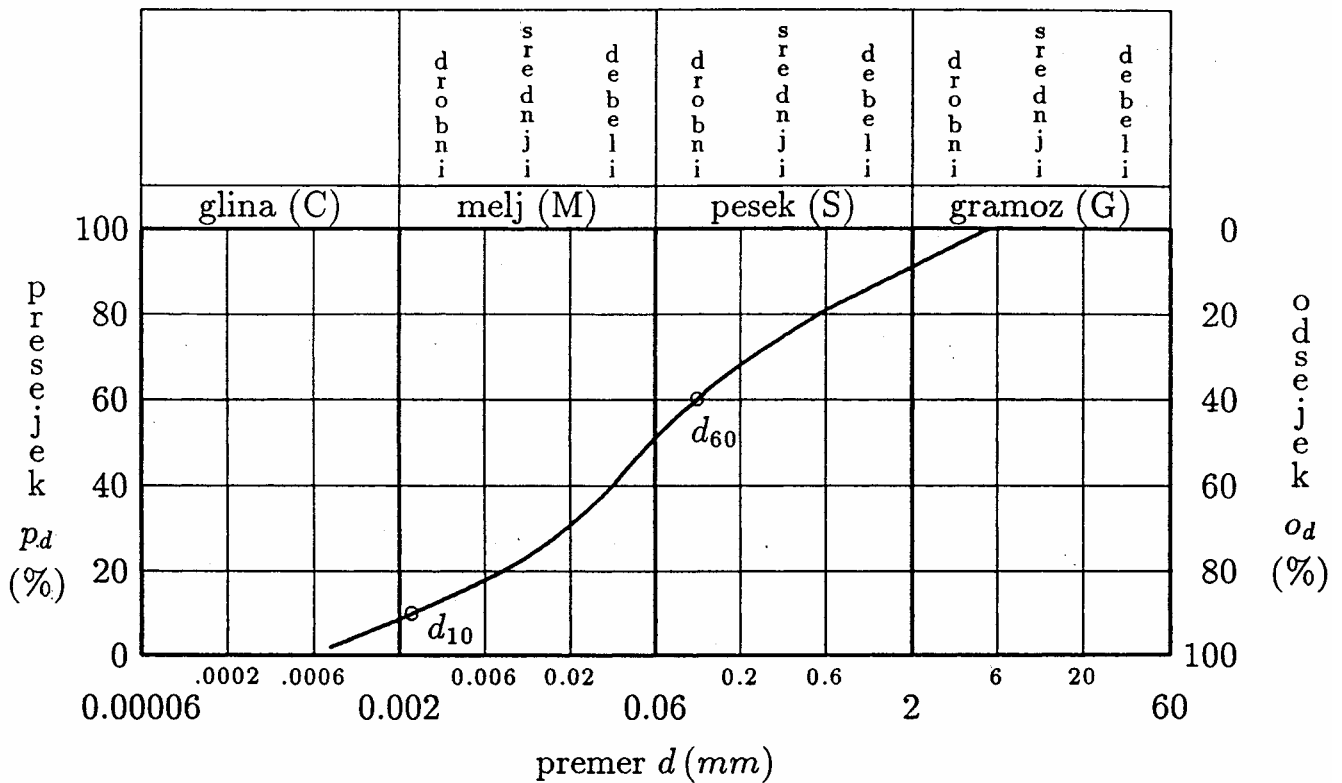
3.0 Zrnavost – granulometrični sestav

MIT Klasifikacija

od	do	vrsta zemljine	oznaka	delitev
60 mm	20	gramoz	G	debel
20	6			srednji
6	2			droben
2	0.6	pesek	S	debel
0.6	0.2			srednji
0.2	0.06			droben
0.06	0.02	melj	M	debel
0.02	0.006			srednji
0.006	0.002			droben
0.002	0.0006	glina	C	debela
0.0006	0.0002			srednja
0.0002	0.00006			drobna

Količnik enakomernosti: $C_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$

Količnik ukrivljenosti: $C_c = \frac{d_{30}^2}{d_{10} d_{60}}$



4. Vlažnost, konsistenca, lezne meje:

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} 100 = \frac{V_w \gamma_w}{V_s \gamma_s} 100 = e S_r \frac{\gamma_w}{\gamma_s} 100$$

w ... vlažnost zemljine (od 10 do 200 %)

$$\gamma_w \approx 10 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_s \approx 27 \text{ kN/m}^3$$

w_L ... meja židkosti

w_P ... meja plastičnosti

w_S ... meja krčenja

Indeks plastičnosti: $I_P (\%) = w_L - w_P$

Indeks konsistence:
$$I_C = \frac{w_L - w}{I_P} = \frac{w_L - w}{w_L - w_P}$$

$I_C < 0$... židko (ž.k.)
$I_C = 0$... na meji med židko in gnetno (plastično) konsistenco
$0 < I_C < \frac{1}{3}$... lahko gnetna (plastična) konsistenca (l.g.k.)
$\frac{1}{3} < I_C < \frac{2}{3}$... srednje gnetna (plastična) konsistenca (s.g.k.)
$\frac{2}{3} < I_C < 1$... težko gnetna (plastična) konsistenca (t.g.k.)
$I_C = 1$... na meji med gnetno (plastično) in poltrdno konsistenco
$I_C > 1$... poltrdna (p.k.) ali trdna (t.k.) konsistenca

5. Gostota:

$$\gamma = \frac{W}{V}, \quad \gamma = \frac{\gamma_s + \gamma_w e S_r}{1 + e}, \quad \gamma = \gamma_s (1 - n) + \gamma_w n S_r$$

γ ... prostorninska teža zemljine (od 15 do 23 kN/m³)

Količnik relativne gostote:

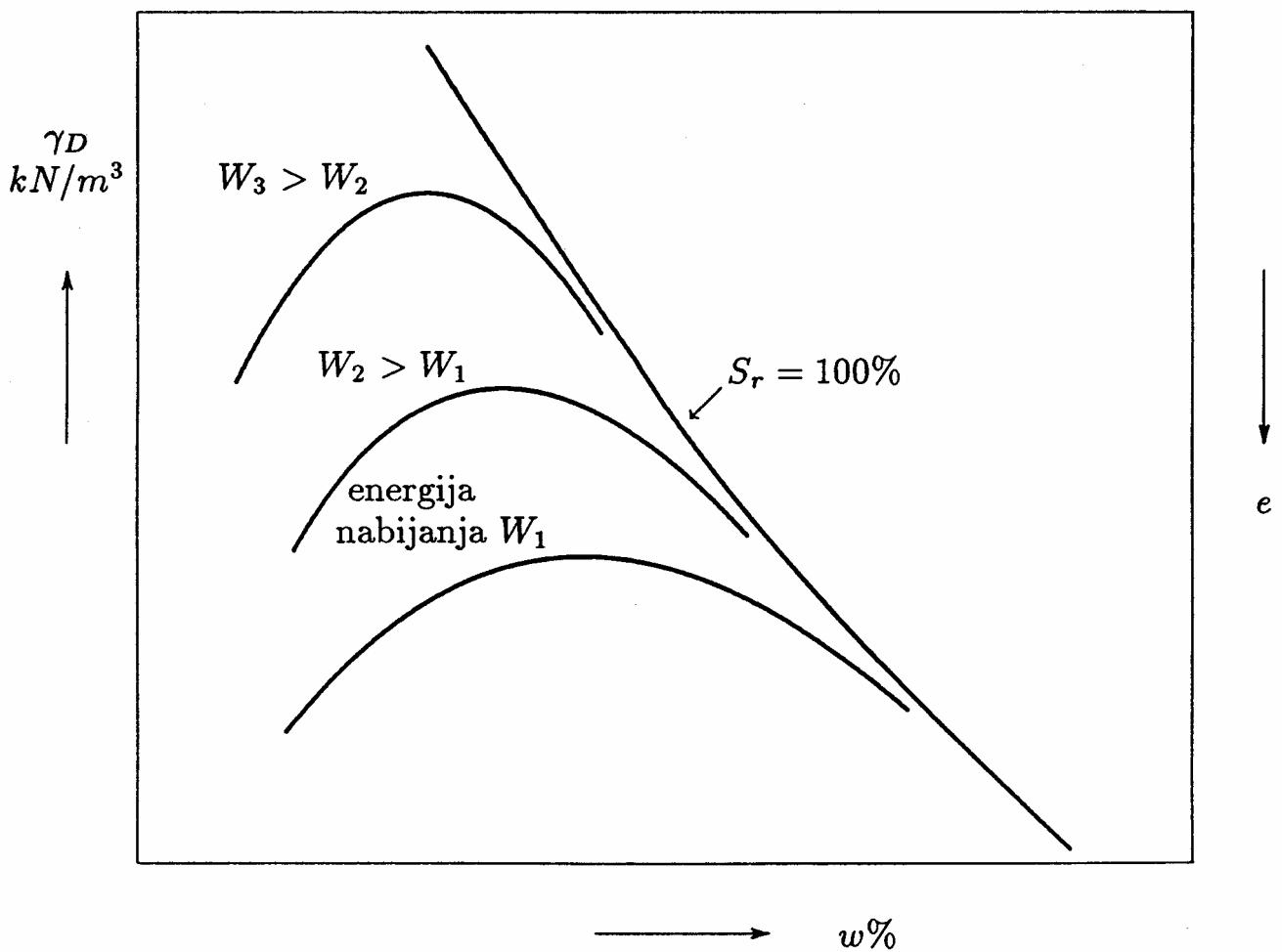
$$D_r = \frac{V_{\max} - V}{V_{\max} - V_{\min}} = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}, \quad 0 < D_r < 1$$

Suha prostorninska teža:

$$\gamma_D = \frac{W_s}{V} = \frac{W}{V(1 + w)}$$

$$w = \frac{W_w}{W_s} = \frac{V_w \gamma_w}{V_s \gamma_s} = e_w \frac{\gamma_w}{\gamma_s} = e S_r \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \Rightarrow e = \frac{w \gamma_s}{S_r \gamma_w}$$

$$\gamma = \frac{\gamma_s + w \gamma_s}{1 + \frac{w \gamma_s}{S_r \gamma_w}} \Rightarrow \gamma_D = \frac{\gamma_s}{1 + \frac{w \gamma_s}{S_r \gamma_w}}$$



AC Klasifikacija zemljin

Debelozrnate zemlj.		Koherentne zemljine			Šota
gramozi	peski	melji	organske	gline	
GW	SW	ML	OL	CL	P _t
GP	SP	MI	OI	CI	
GU	SU	MH	OH	CH	
GC	SC				
GF _c	SF _c				
GF _s	SF _s				

Debelozrnate zemlj.		Koherentne zemljine			Šota
gramozi	peski	melji	organske	gline	
GW	SW	ML	OL	CL	P _t
GP	SP	MH	OH	CH	
GC	SC				
GM	SM				

Osnova za klasifikacijo nekoherentnih (debelozrnatih ali sipkih) zemljin je granulometrični sestav:

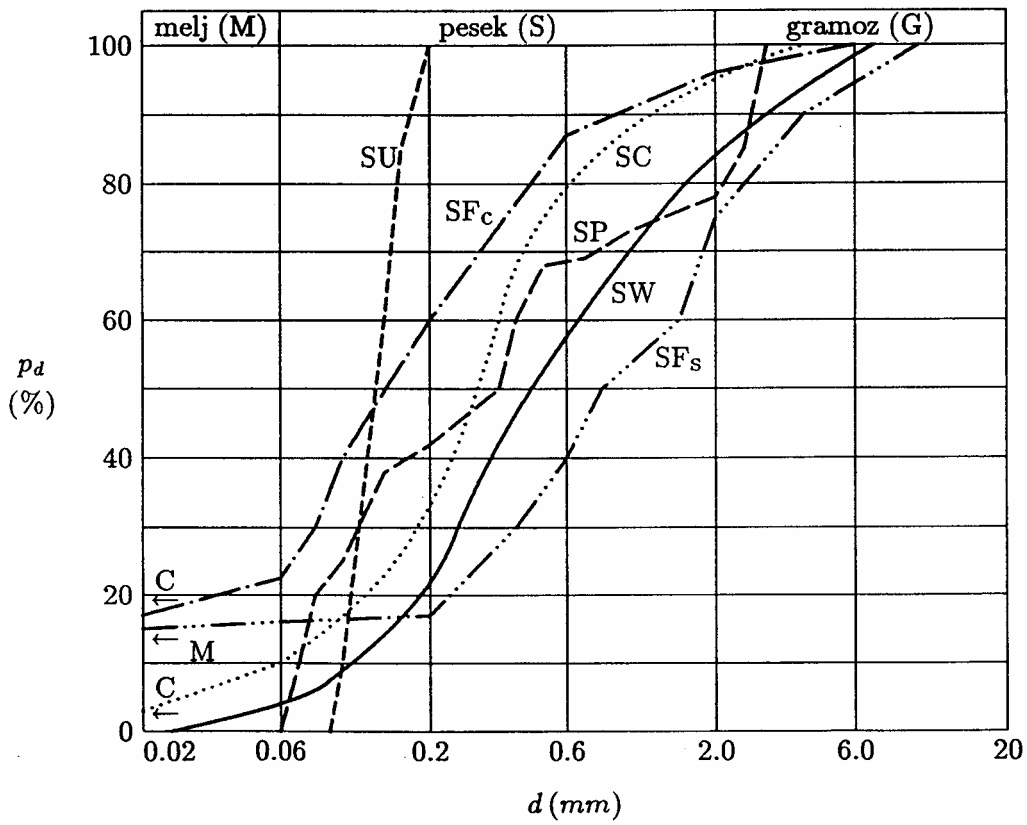
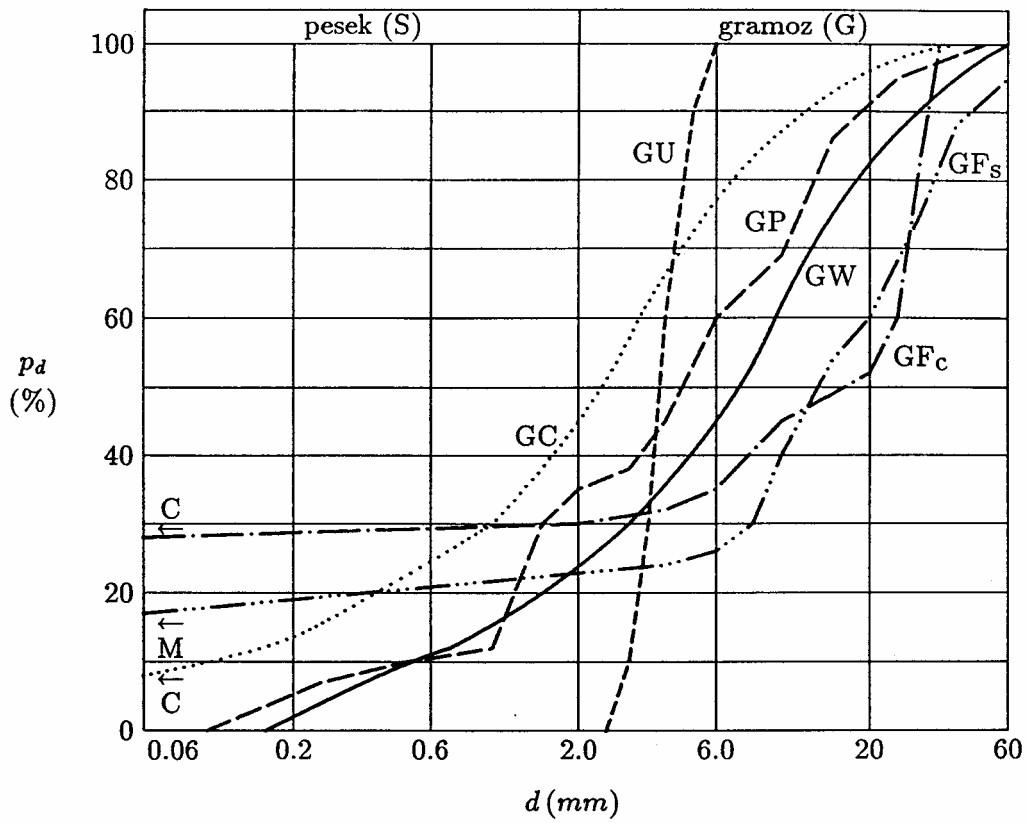
čisti peski ali gramozi (SW, SP, SU in GW, GP, GU) so, če je $p_{0.06} < 5\%$,

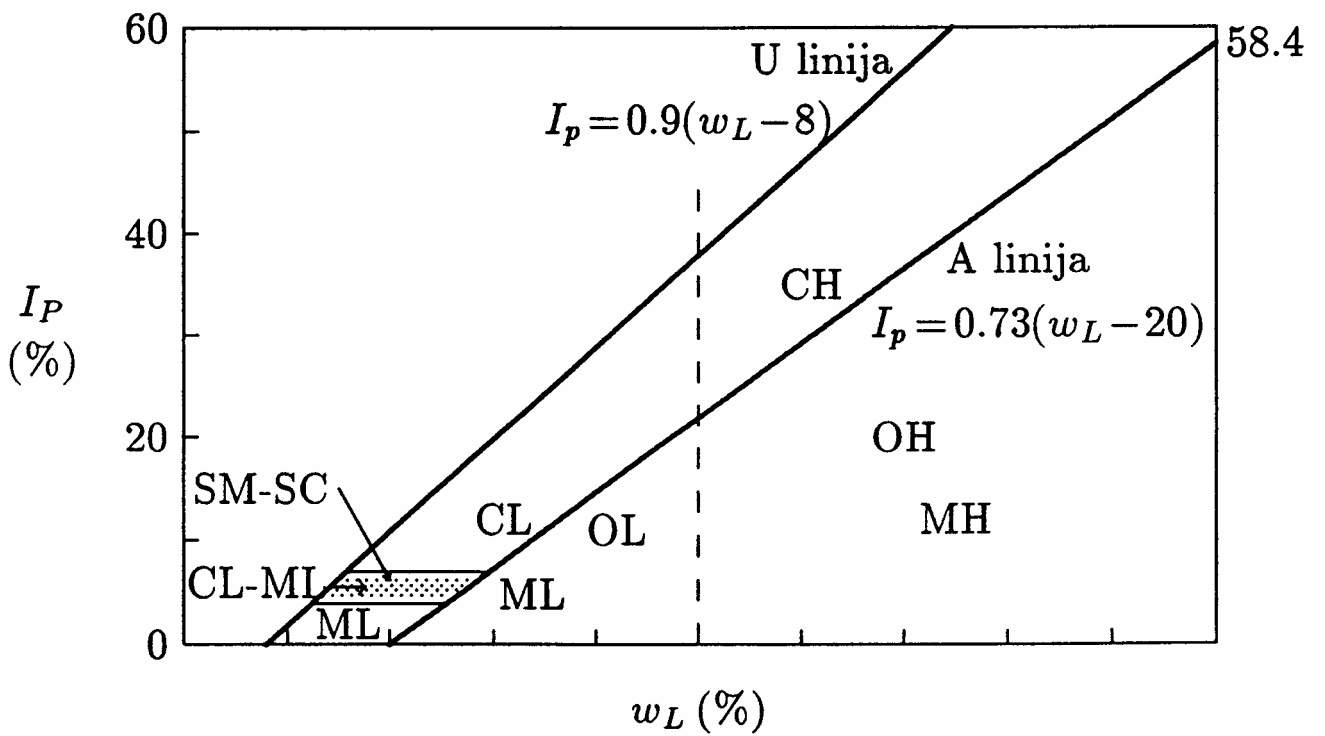
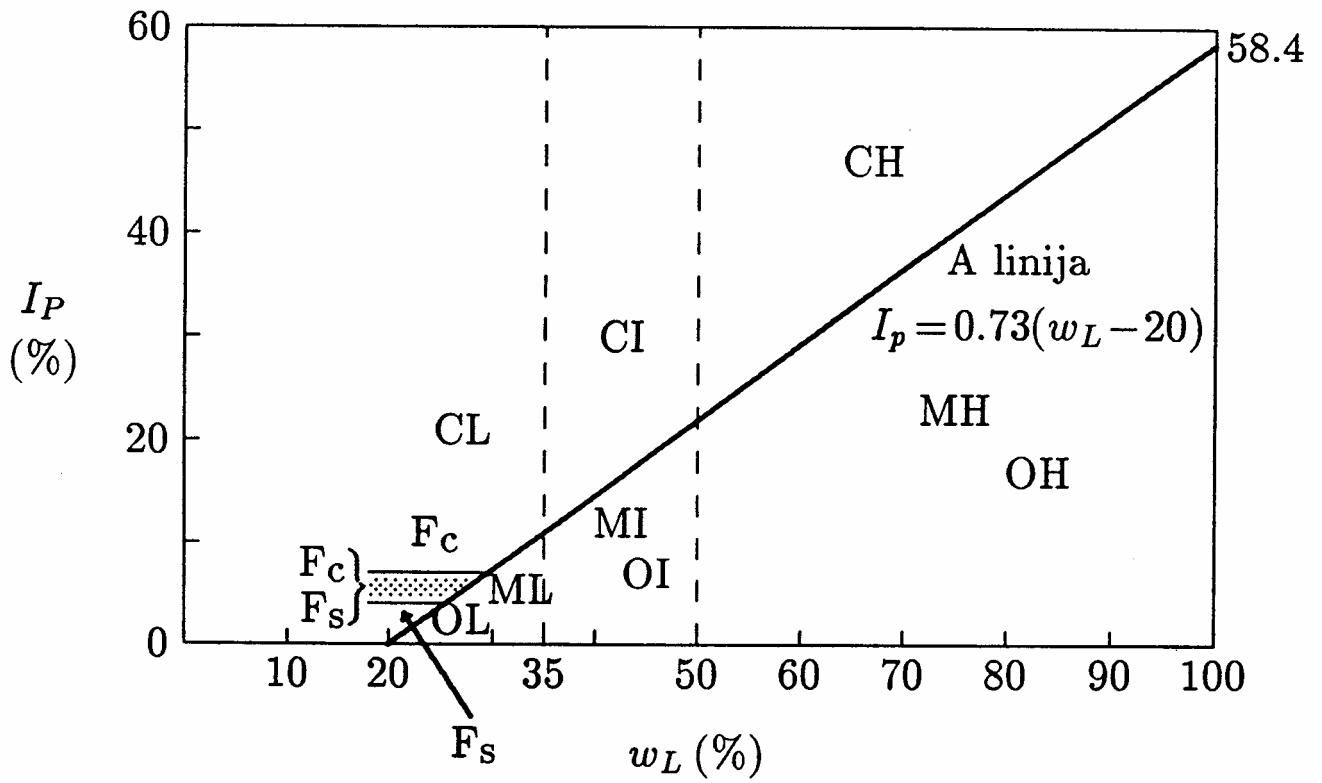
dobro granulirani gramozi (GW) so, če je $1 < C_c < 3$ in $C_u > 4$,

dobro granulirani peski (SW) so, če je $1 < C_c < 3$ in $C_u > 7$,

vrsti GC in SC, če je glinasto vezivo v zmerni količini (5 do 12%).

Osnova za klasifikacijo koherentnih (drobnozrnatih) zemljin sta meja židkosti in indeks plastičnosti, pri organskih zemljinah pa še barva (črna) in vonj (smrad).





PREPUSTNOST ZEMLJIN

k (cm/s) ... koeficient vodoprepustnosti

Meja med manj in bolj prepustnimi zemljinami je pri $k = 10^{-7}$ cm/s

Edometer \Rightarrow preizkus s spremenljivim hidravličnim padcem:

$$k = \frac{A_0 h}{A \Delta t} \ln\left(\frac{H_1}{H_2}\right) \eta_{10}$$

Permeameter \Rightarrow preizkus s konstantnim hidravličnim padcem:

$$k = \frac{\Delta Q h}{\Delta t A \Delta H} \eta_{10}$$

$$\eta_{10} = 1.25 - 0.025 \frac{T}{T_1}, \quad T_1 = 1^\circ C$$

Zrnavost \Rightarrow Hazen ali USBR:

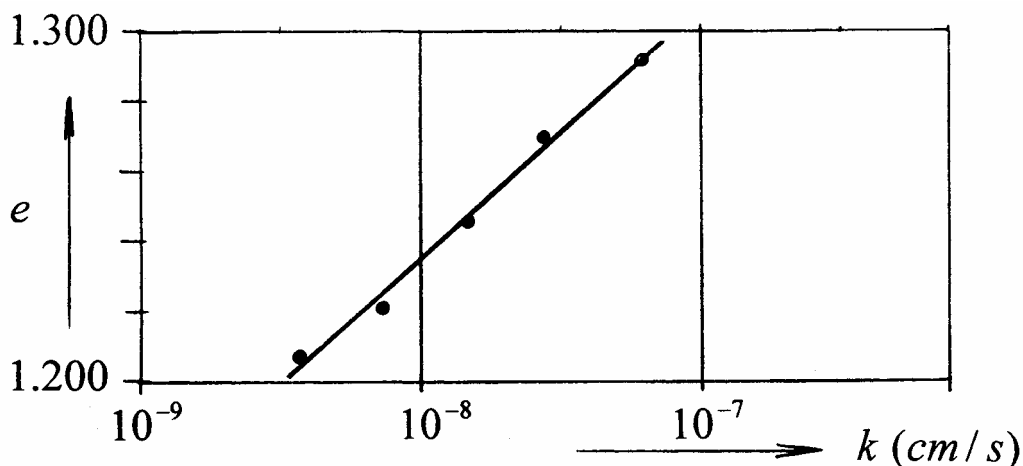
$$k(\text{cm/s}) = 1.16 d_{10}^2 (\text{mm}) \quad \text{ali} \quad k = 0,36 d_{20}^{2.3}$$

Približne vrednosti koeficienta prepustnosti:

vrsta zemljine	k v cm/s
čisti gramoz	100 – 1
debel pesek, peščeni gramoz	1 – 10^{-2}
drobni peski, peščeni melji	10^{-2} – 10^{-3}
melji, zaglinjeni melji	10^{-3} – 10^{-5}
gline	$< 10^{-6}$

V koherentnih zemljinah se vodoprepustnost spreminja v odvisnosti od spremembe efektivnih napetostnih stan oziroma s spremembo poroznosti zemljin. Pogosto velja naslednja sovisnost:

$$k = k_1 \exp(k_2 e)$$



Koeficient vodoprepustnosti določamo tudi na terenu s črpalnimi preizkusi (v tleh pod nivojem talne vode), z nalivalnimi preizkusi (v plasteh nad talno vodo) in z disipacijskimi preizkusi pri CPT raziskavah.

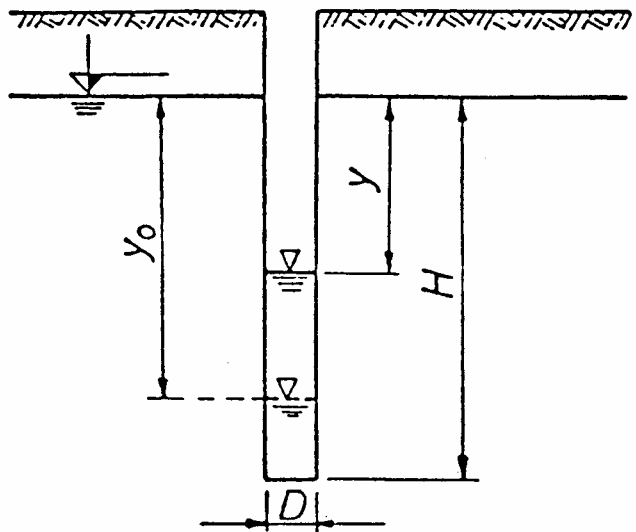
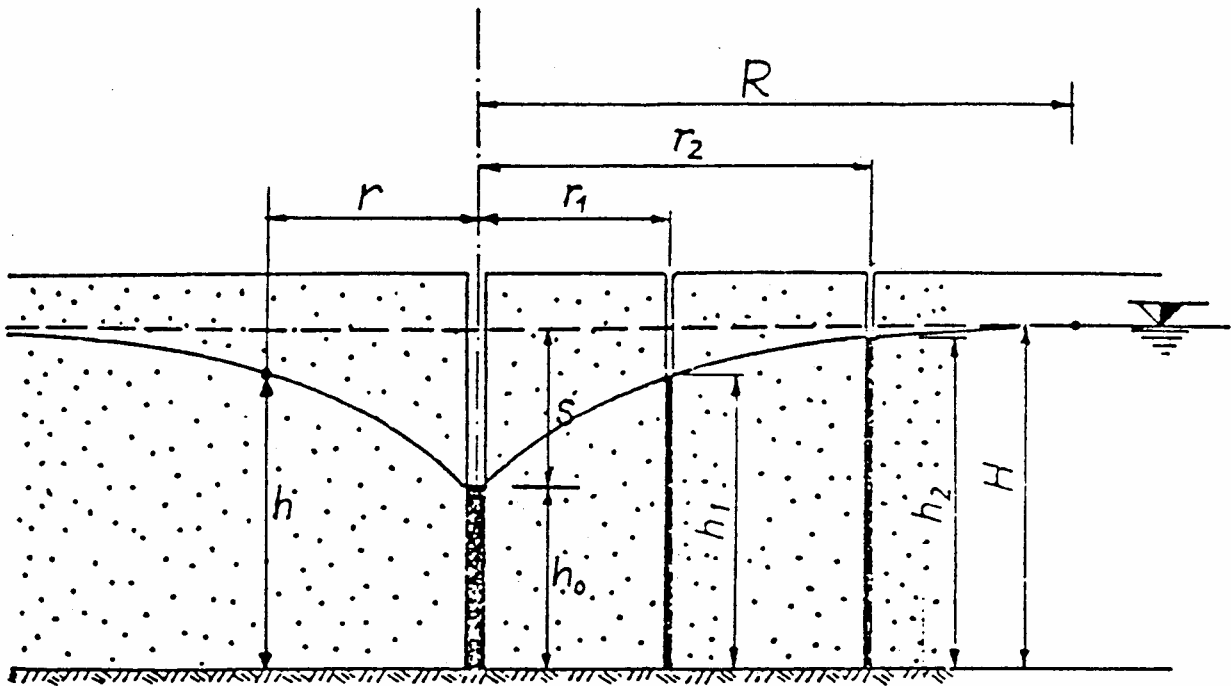
(a) črpalni preizkusi:

Enačba Dupuita:

$$Q = k\pi \frac{H^2 - h_0^2}{\ln R - \ln r_0} \Rightarrow k = \frac{Q (\ln r_2 - \ln r_1)}{\pi (h_2^2 - h_1^2)}$$

Empirični obrazec Dissersensa:

$$k = \frac{A}{t} \ln \frac{y_0}{y} = A f(t, y) \quad , \quad A = 0.0625 \frac{D^2}{H}$$

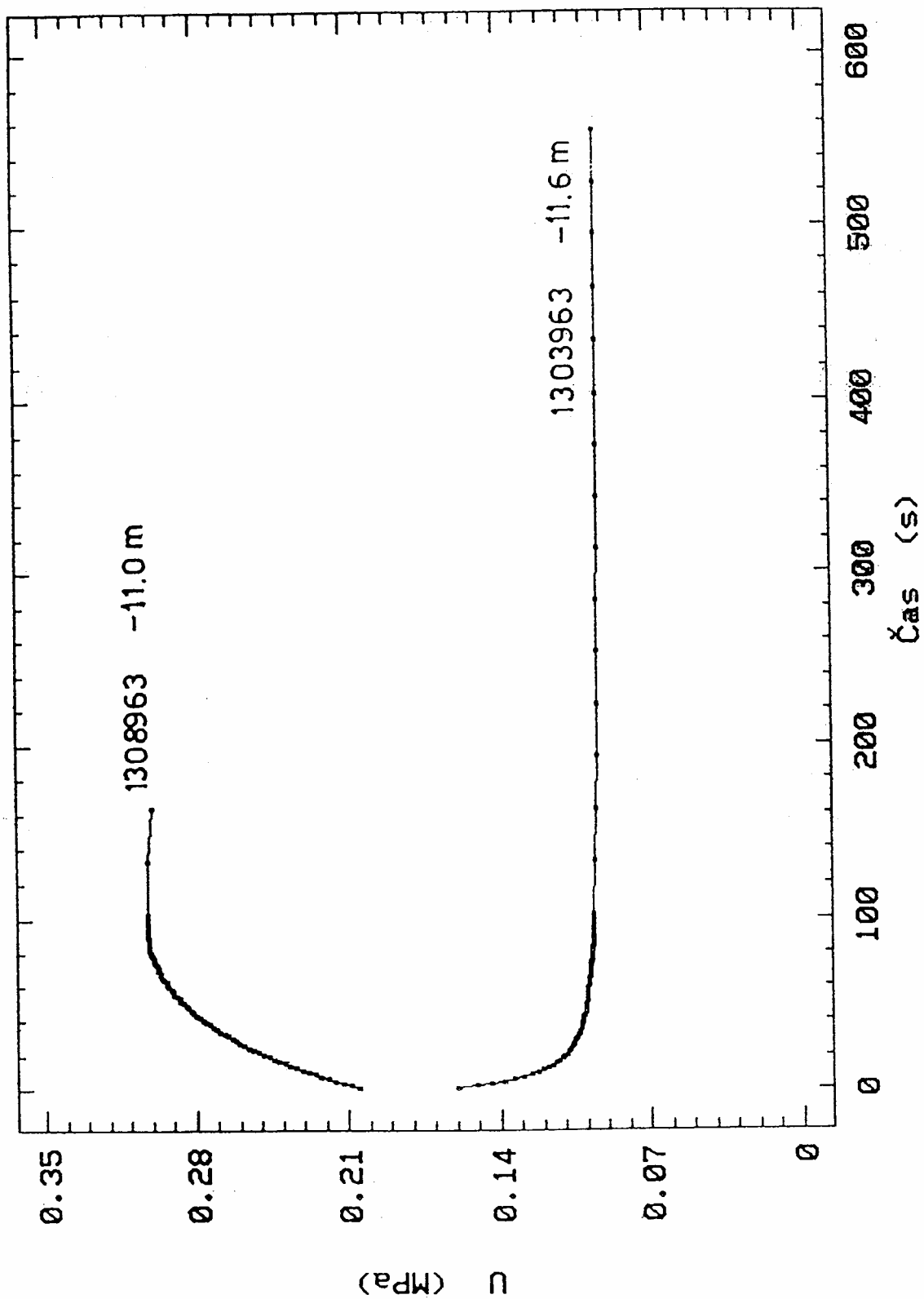


(b) nalivalni preizkusi:

$$k = \frac{0.423Q}{H^2} \log \frac{4H}{D}, \quad \frac{H}{D} > 25$$

$$k = \frac{D}{4(t_2 - t_1)} \left[\ln \left(H_1 + \frac{D}{4} \right) - \ln \left(H_2 + \frac{D}{4} \right) \right]$$

Dissipacijski test
AC vozilisce Pesnica

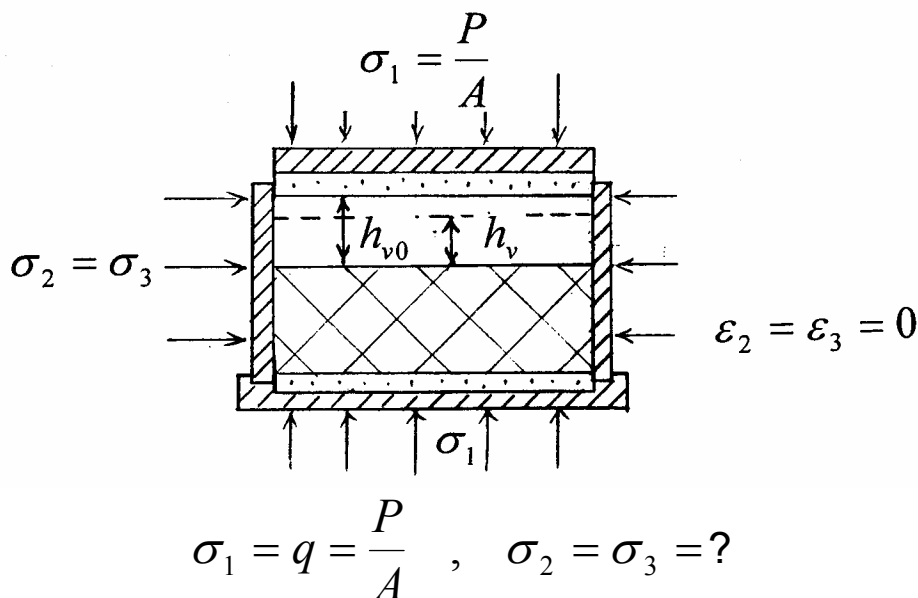


DEFORMABILNOST ZEMLJIN

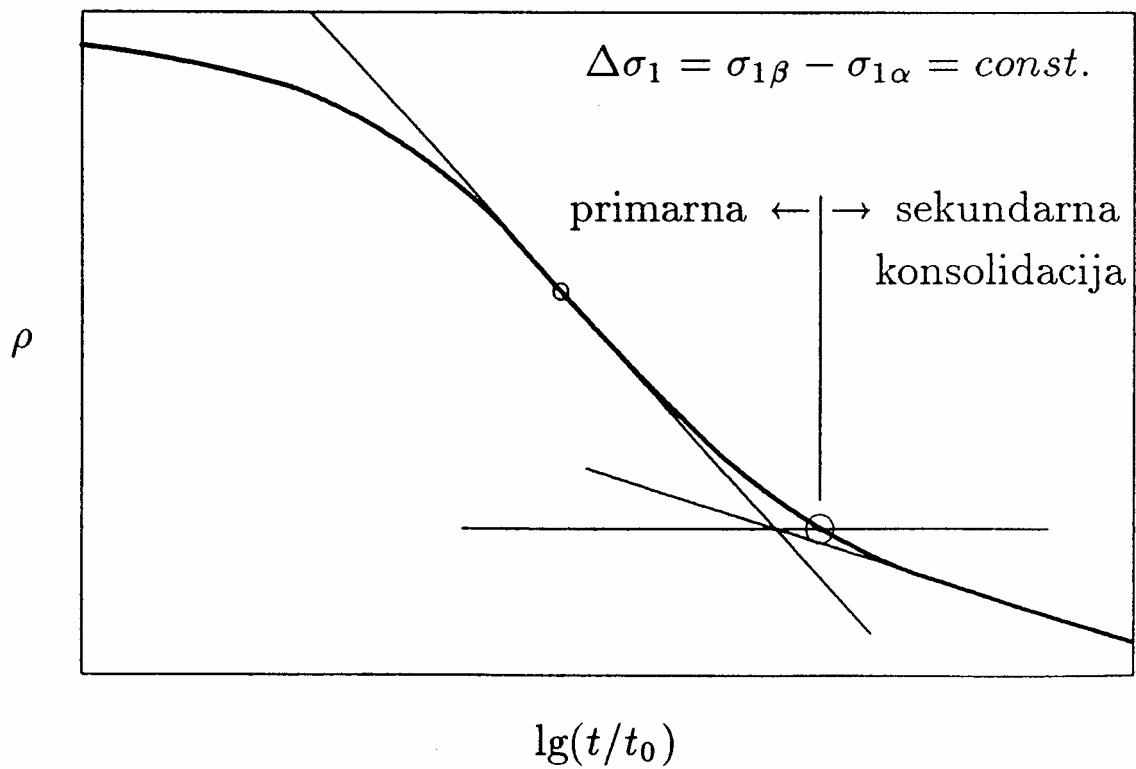
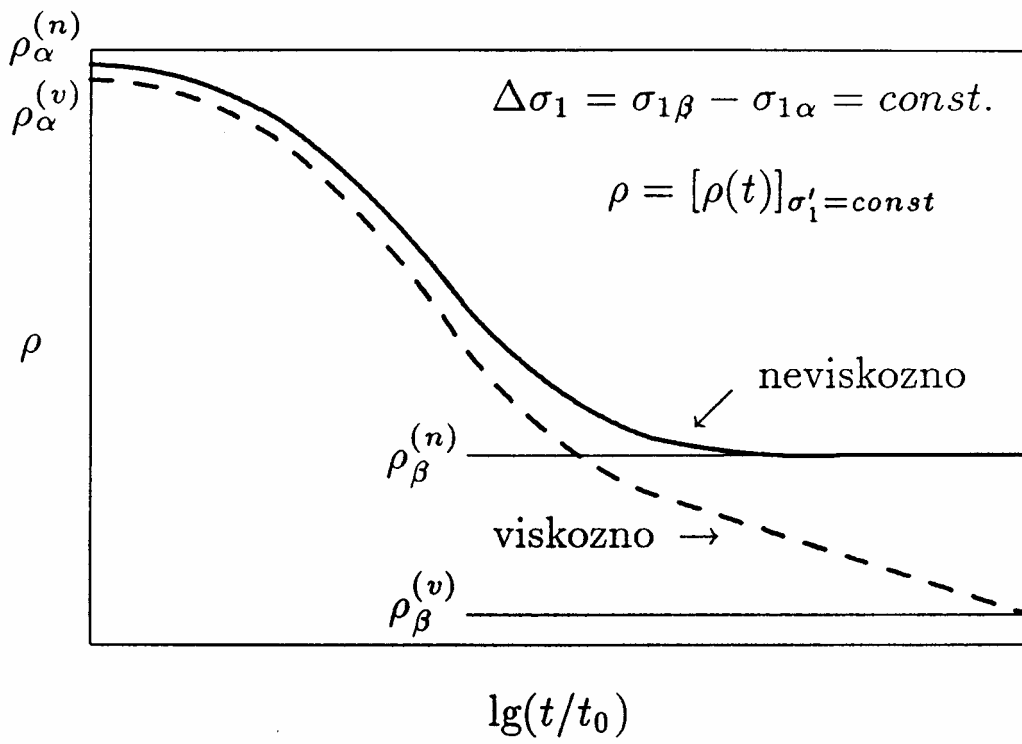
Edometer \Rightarrow **Modul stisljivosti M_v ali E_{oed} :**

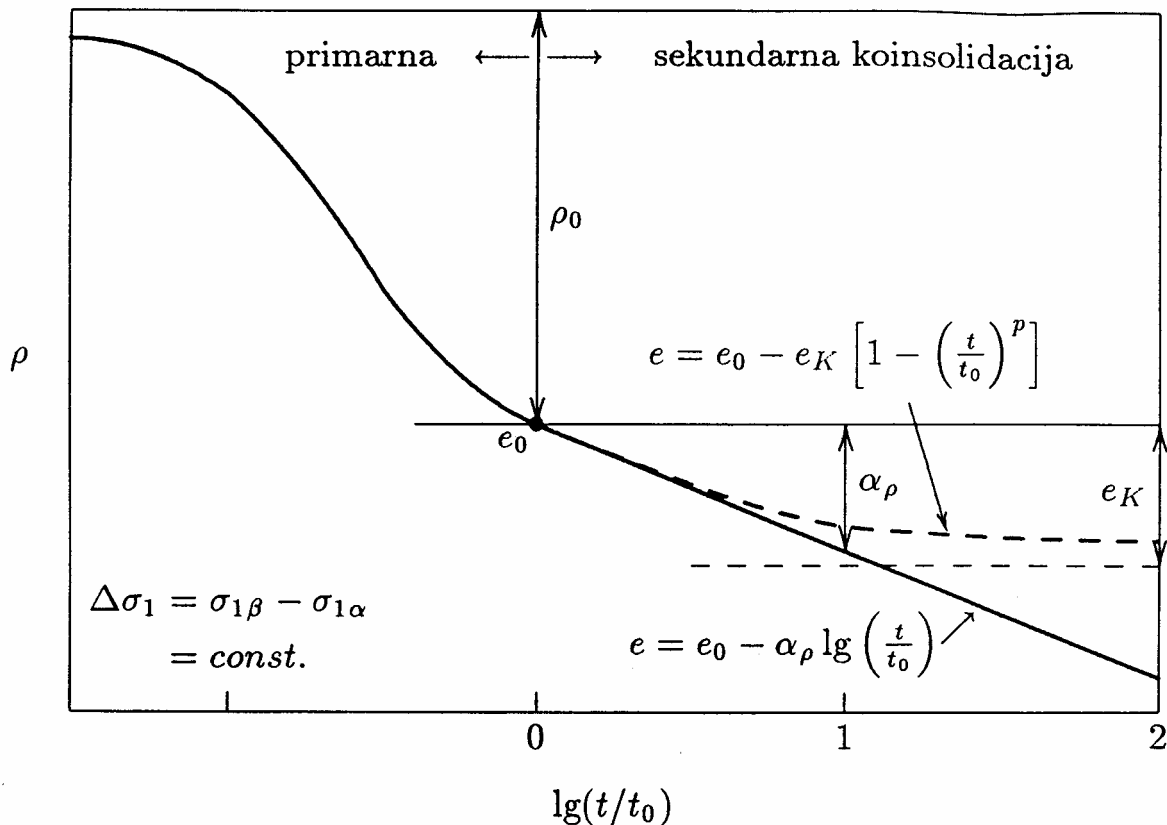
Valjasti vzorec višine cca 2 cm in premera cca 10 cm je v edometru oklenjen z jeklenim obročem, zgoraj in spodaj je omejen s prepustno porozno ploščo. Vertikalna obremenitev vzorca povzroča stiskanje vzorca (izcejanje vode).

Konstrukcija takšnega aparata omogoča raziskavo odnosov med napetostmi in deformacijami v posebnih pogojih. Napetostno stanje je osnosimetrično, deformacijsko pa linearno (preprečene bočne deformacije):



Pri vsaki bremenski stopnji, ki je praviloma za faktor dva večja od predhodne, opazujemo časovno spremembo višine vzorca (posedek ρ ali specifično vertikalno deformacijo ϵ_1 ali poroznost e) valjastega vzorca do sekundarne faze konsolidacije (časovna sovisnica mora preiti v logaritmično premico).



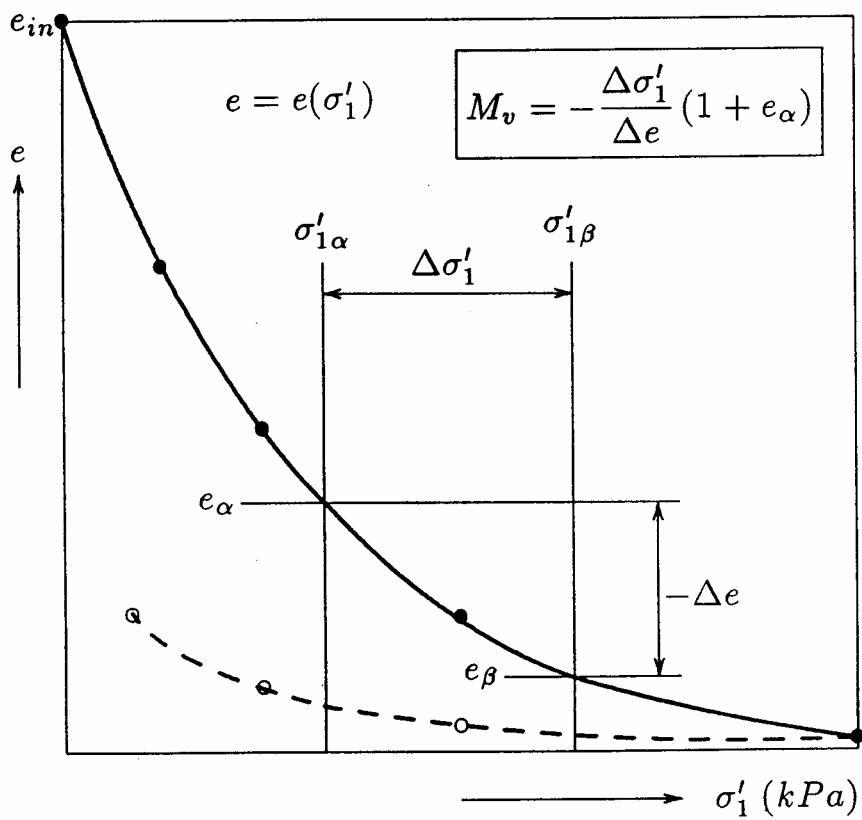
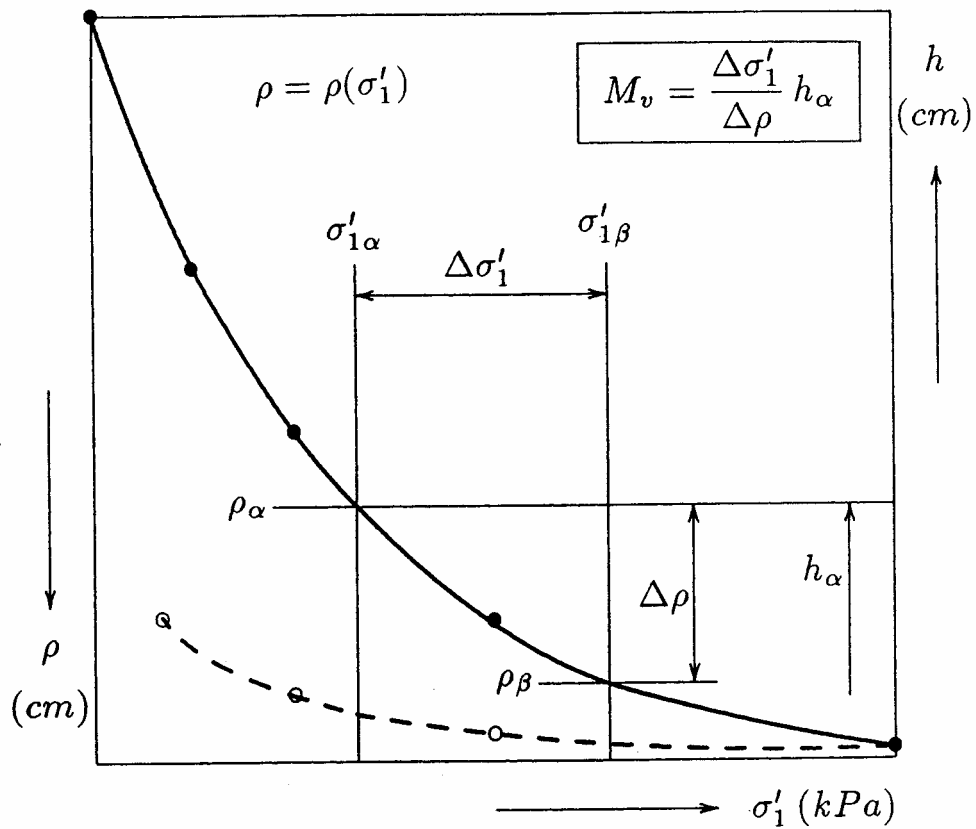


Preiskati moramo obnašanje vzorca za vsa pričakovana napetostna stanja v temeljnih tleh (nično \Rightarrow prvotno \Rightarrow pričakovano; za naraščanje in po potrebi za zmanjševanje obtežbe temeljnih tal).

Rezultat edometrske preiskave je krivulja stisljivosti $\rho = \rho(\sigma')$ oziroma $e = e(\sigma')$, iz katere lahko izračunamo za pričakovano spremembo vertikalnih efektivnih napetosti v temeljnih tleh modul stisljivosti.

$$\Delta\sigma'_z = \sigma'_{zz\beta} - \sigma'_{zz\alpha} \Rightarrow M_v \equiv E_{oed} = \frac{\Delta\sigma'}{\Delta h} h_\alpha = -\frac{\Delta\sigma'}{\Delta e} (1 + e_\alpha)$$

Modul stisljivosti v gramoznih in peščenih zemljinah ocenimo iz rezultatov terenskih raziskav (SPP, CPT, presiometer) ali tudi posredno iz količnika relativne gostote D_r .



Triosna drenirana preiskava \Rightarrow Kompresijski in strižni modul (K in G)

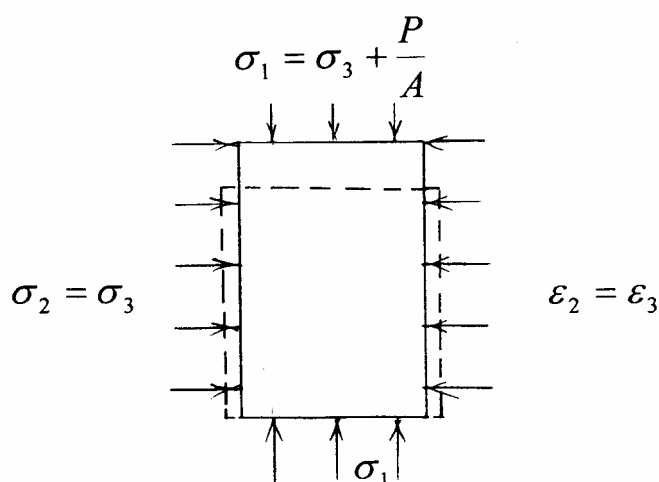
Preiskava odnosov med napetostmi, deformacijami in časom na vsaj 3 prizmatičnih vzorcih (pravi triosni aparati) ali na vsaj 3 valjastih vzorcih (klasični triosni aparati).

V klasičnih triosnih aparatih tlačno obremenjujemo valjaste vzorce (premera $d = 3.6$ cm in višine $h \cong 7$ cm ali premera $d = 10$ cm in višine $h \cong 20$ cm) s tlakom kapljevine in še dodatno v smeri osi vzorca. Napetostno in deformacijsko stanje v vzorcu je osnosimetrično. Pri izbranemu napetostnem stanju opazujemo vertikalne premike (skrčke) vzorca in spremembo prostornine vzorca toliko časa, da je dosežena primarna faza konsolidacije.

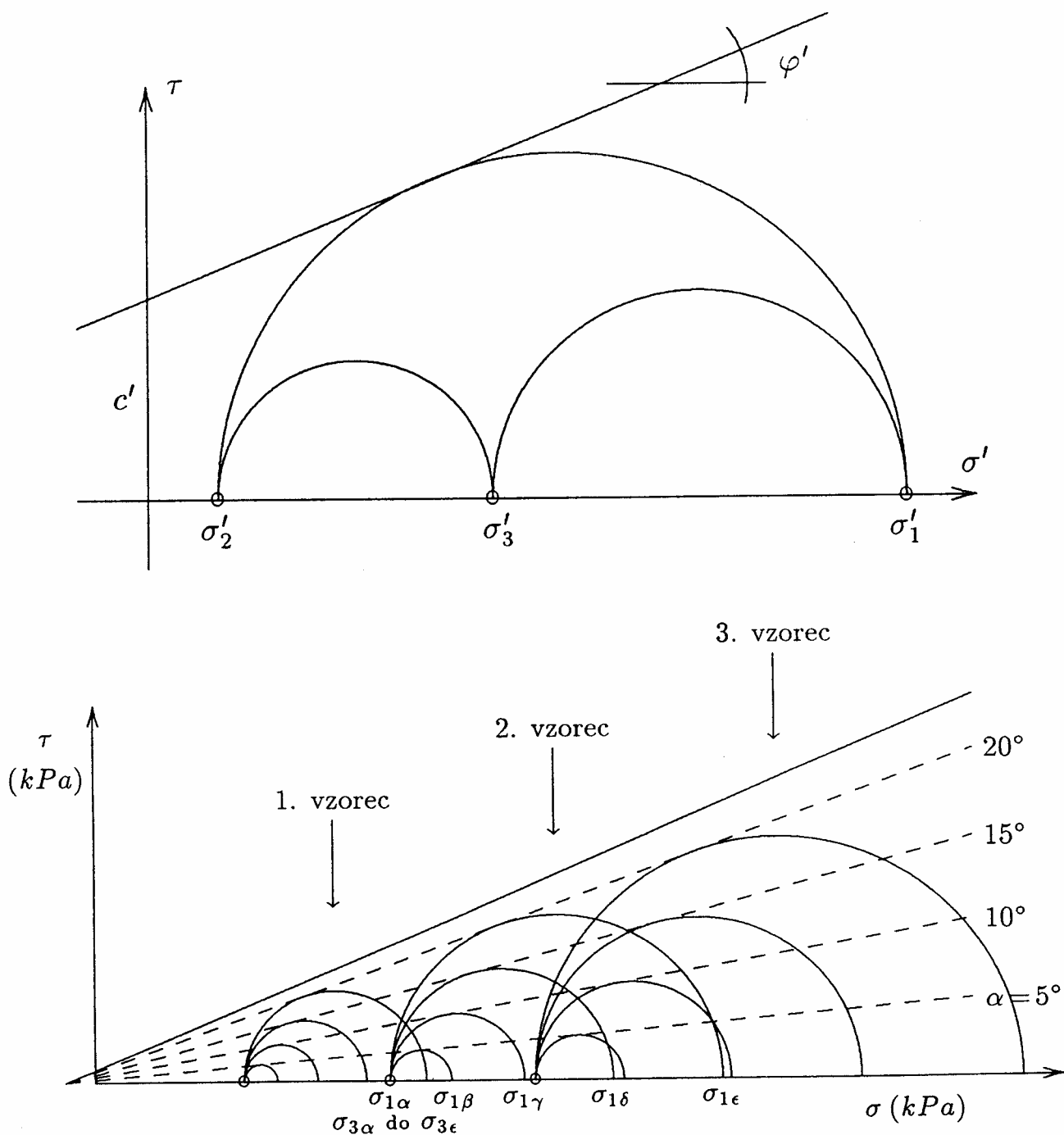
$$\sigma_1 = \frac{P}{A} + \sigma_3 \quad , \quad \sigma_2 = \sigma_3$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \quad , \quad \varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} \quad , \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 \quad ,$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_3 = \frac{\varepsilon_v - \varepsilon_1}{2}$$



Preiskati moramo obnašanje vzorcev za vsa pričakovana napetostna stanja v temeljnih tleh (nično \Rightarrow prvotno \Rightarrow pričakovano; za naraščanje in po potrebi za zmanjševanje obtežbe temeljnih tal).



Za spremembo napetostnega stanja:

$$\Delta\sigma'_1 = \sigma'_{1\beta} - \sigma'_{1\alpha} \quad \text{in} \quad \Delta\sigma'_3 = \sigma'_{3\beta} - \sigma'_{3\alpha}$$

izračunamo modula K in G po enačbah:

$$3K = \frac{\Delta\sigma'_1 + 2\Delta\sigma'_3}{\Delta\varepsilon_v} = \frac{\Delta\sigma^o}{\Delta\varepsilon^o} = \left[\frac{\partial\sigma^o}{\partial\varepsilon^o} \right]_{\tau^o = \text{const}}$$

$$G = \frac{\Delta\sigma'_1 - \Delta\sigma'_3}{3\Delta\varepsilon_1 - \Delta\varepsilon_v} = \frac{\Delta\tau^o}{\Delta\gamma^o} = \left[\frac{\partial\tau^o}{\partial\gamma^o} \right]_{\sigma^o = \text{const}}$$

S krogci so označene oktaedrske napetosti in deformacije.

$$\sigma^o = \frac{\sigma_1 + 2\sigma_3}{3}, \quad \tau^o = \frac{\sqrt{2}}{3}(\sigma_1 - \sigma_3)$$

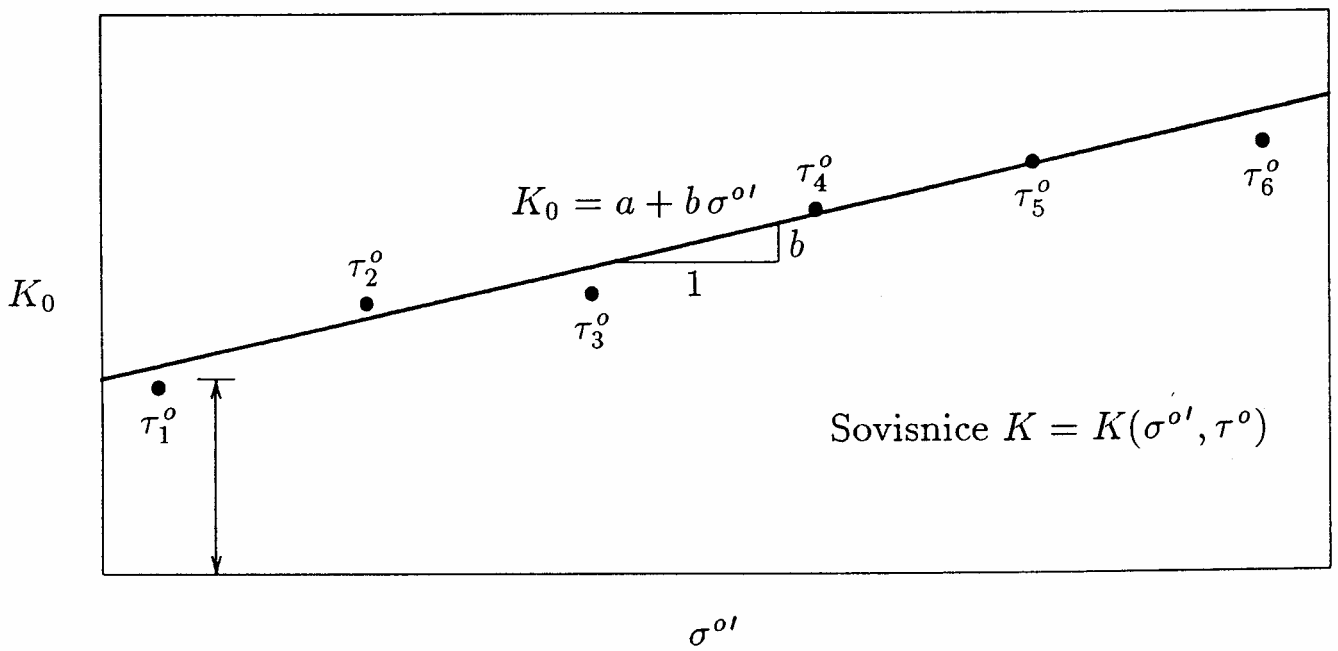
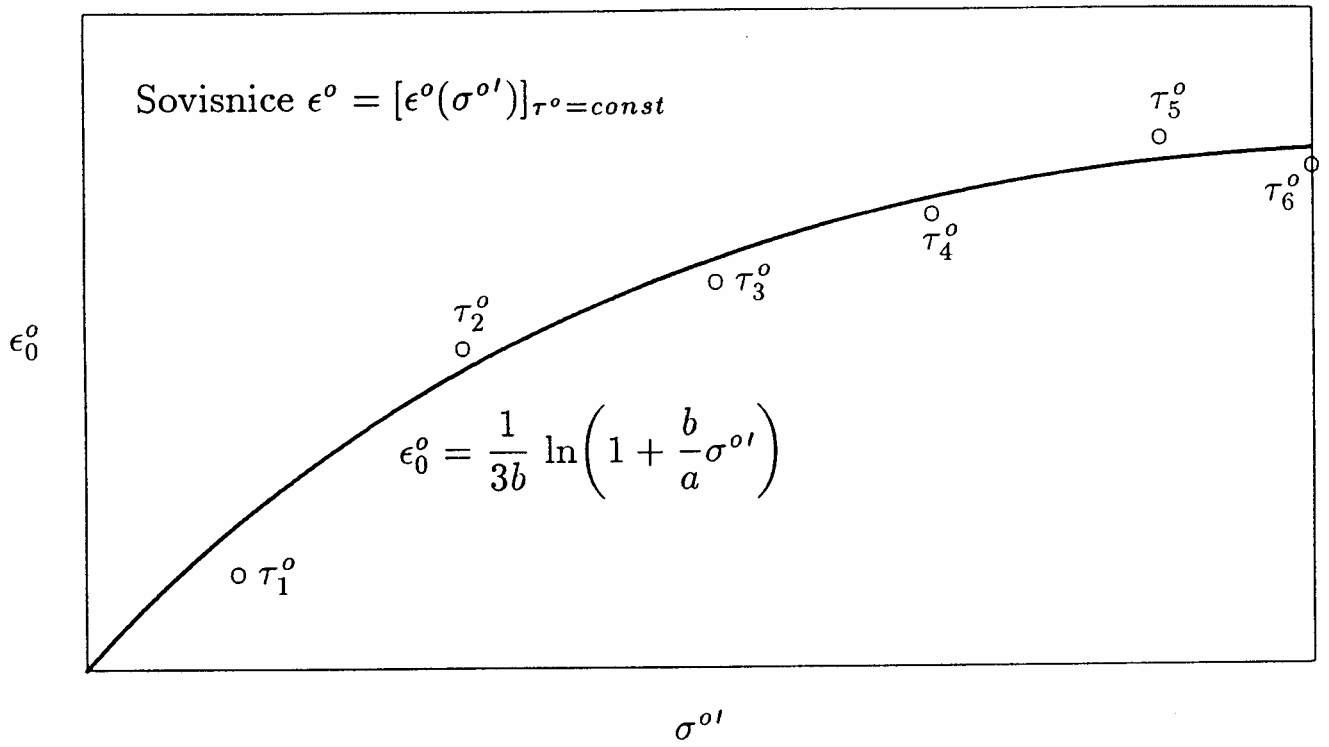
$$\sigma^o = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3},$$

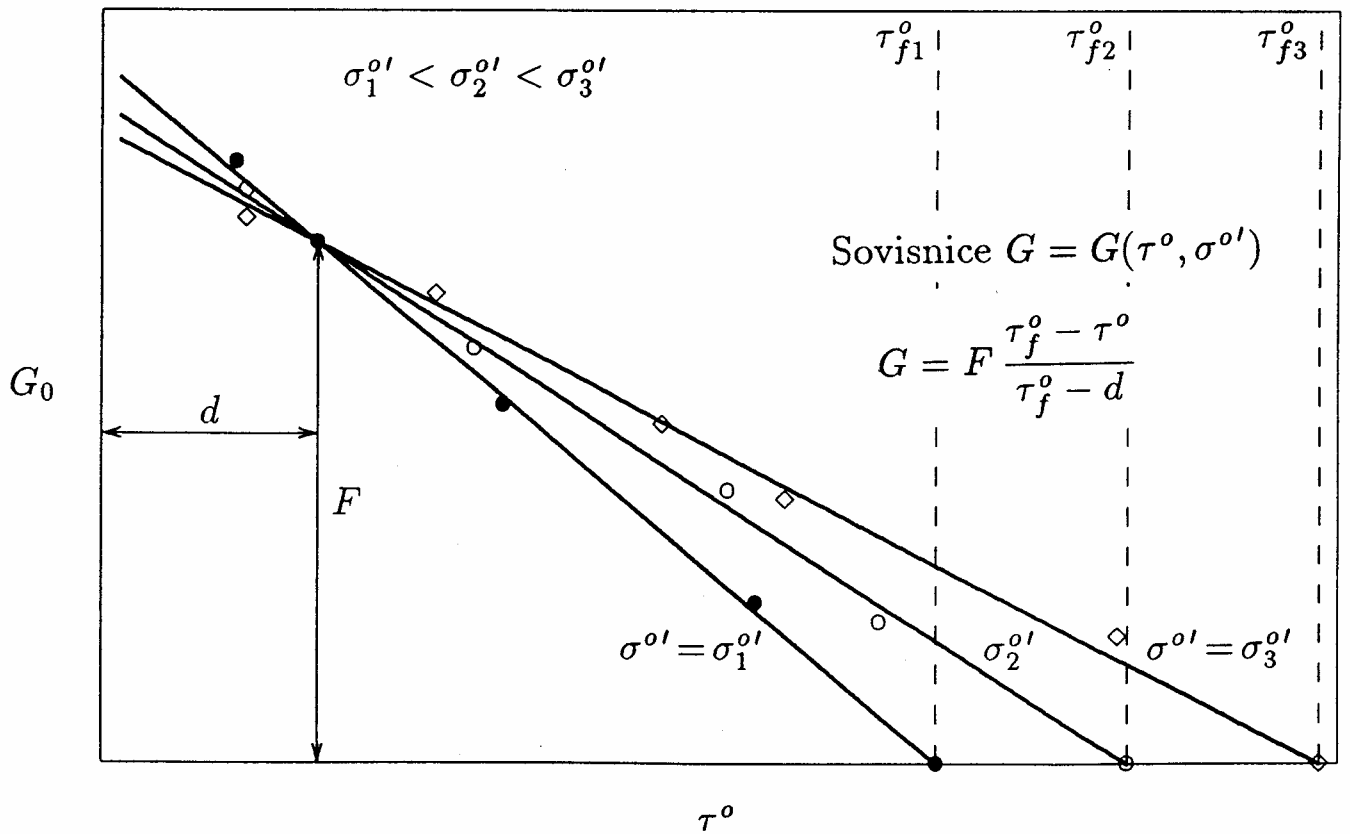
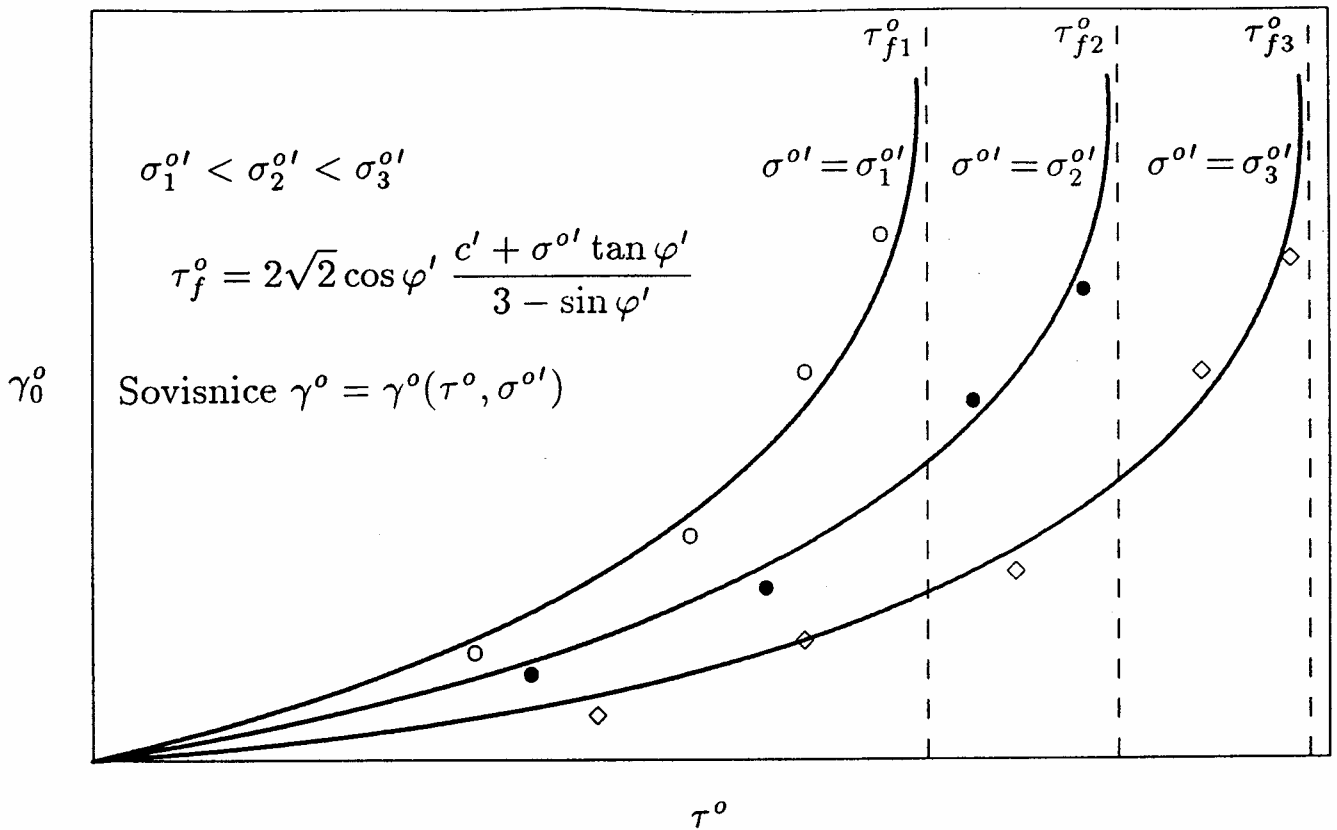
$$\tau^o = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + 6(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)}$$

$$\varepsilon^o = \frac{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3}{3} = \frac{\varepsilon_v}{3}, \quad \gamma^o = \frac{\sqrt{2}}{3}(3\varepsilon_1 - \varepsilon_v)$$

$$\varepsilon^o = \frac{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz}}{3},$$

$$\gamma^o = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy})^2 + (\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz})^2 + (\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx})^2 + 6(\varepsilon_{xy}^2 + \varepsilon_{yz}^2 + \varepsilon_{zx}^2)}$$





Triosna nedrenirana preiskava \Rightarrow Strižni distorzijski modul (G_d)

Preiskava poteka na podoben način, kot poteka drenirana preiskava. Bistvena razlika med nedrenirano in drenirano preiskavo je, da so v primeru nedrenirane preiskave preprečene volumenske deformacije vzorca (zaprte drenaže) in da je takšna preiskava bistveno hitrejša.

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} + \sigma_3 \quad , \quad \sigma_2 = \sigma_3$$

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta h}{h_0} \quad , \quad \varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V_0} = 0 \quad , \quad \varepsilon_2 = \varepsilon_3 \quad ,$$

$$\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 = 0 \quad \Rightarrow \quad \varepsilon_3 = -\frac{\varepsilon_1}{2}$$

Za spremembo napetostnega stanja:

$$\Delta\sigma_1 = \sigma_{1\beta} - \sigma_{1\alpha} \quad \text{in} \quad \Delta\sigma_3 = \sigma_{3\beta} - \sigma_{3\alpha}$$

izračunamo modula K_d in G_d po enačbah:

$$3K_d = \frac{\Delta\sigma_1 + 2\Delta\sigma_3}{(\Delta\varepsilon_v = 0)} = \frac{\Delta\sigma^o}{(\Delta\varepsilon^o = 0)} \quad \Rightarrow \quad \infty$$

$$G_d = \frac{\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3}{3\Delta\varepsilon_1} = \frac{\Delta\tau^o}{\Delta\gamma^o} = \left[\frac{\partial\tau^o}{\partial\gamma^o} \right]_{\sigma^o = \text{const}}$$

Relacije med posameznimi deformacijskimi parametri:

$$E = \frac{9KG}{3K + G} \quad , \quad \nu = \frac{3K - 2G}{2(3K + G)}$$

$$E_d = 3G_d \quad , \quad \nu_d = 0.5$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad , \quad G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$$G_d = G \quad , \quad E_d = \frac{3E}{2(1 + \nu)}$$

$$M_\nu \equiv E_{oed} = \frac{4G}{3} + K = \frac{E(1 - \nu)}{(1 - 2\nu)(1 + \nu)}$$

TRDNOST ZEMLJIN

Coulombov strižni zakon:

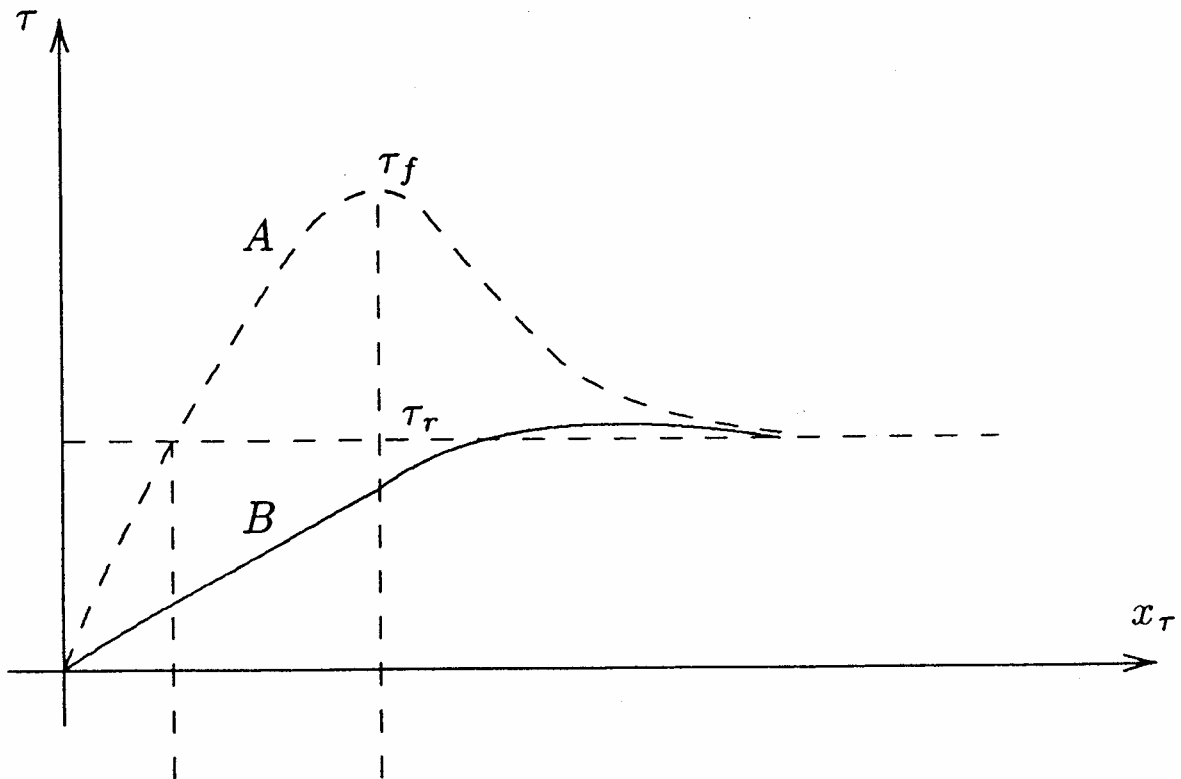
$$\tau = c + \sigma \tan \varphi$$

Vrhunska strižna odpornost:

$$\tau_f = c_f + \sigma \tan \varphi_f$$

Rezidualna strižna odpornost:

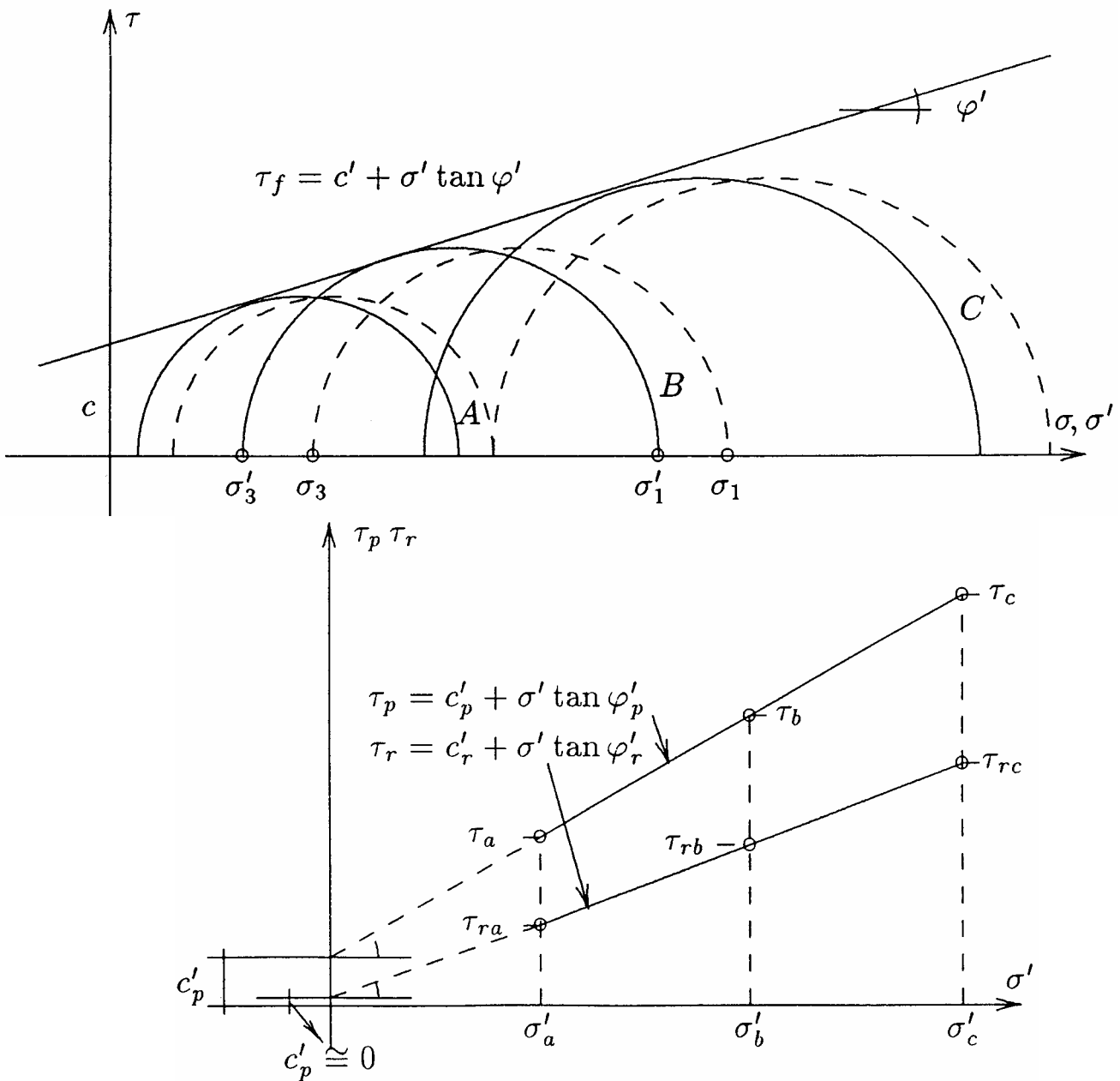
$$\tau_r = c_r + \sigma \tan \varphi_r$$



Drenirana strižna trdnost:

$$\tau = c' + \sigma' \tan \varphi'$$

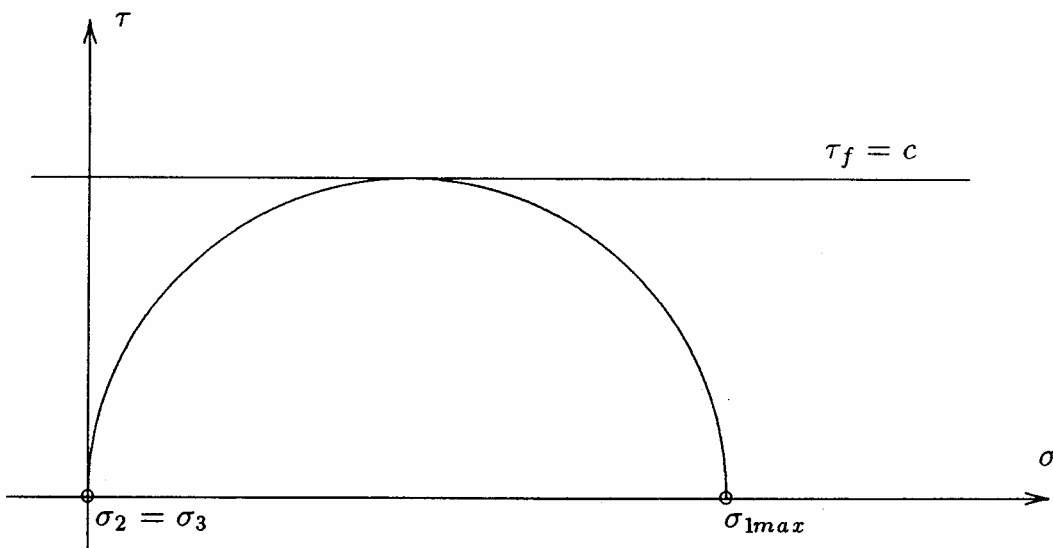
Določamo jo z direktnimi strižnimi preiskavami (translatorni oziroma rotacijski aparati), s hitro konsolidirano triosno preiskavo in na terenu (SPP, CPT).



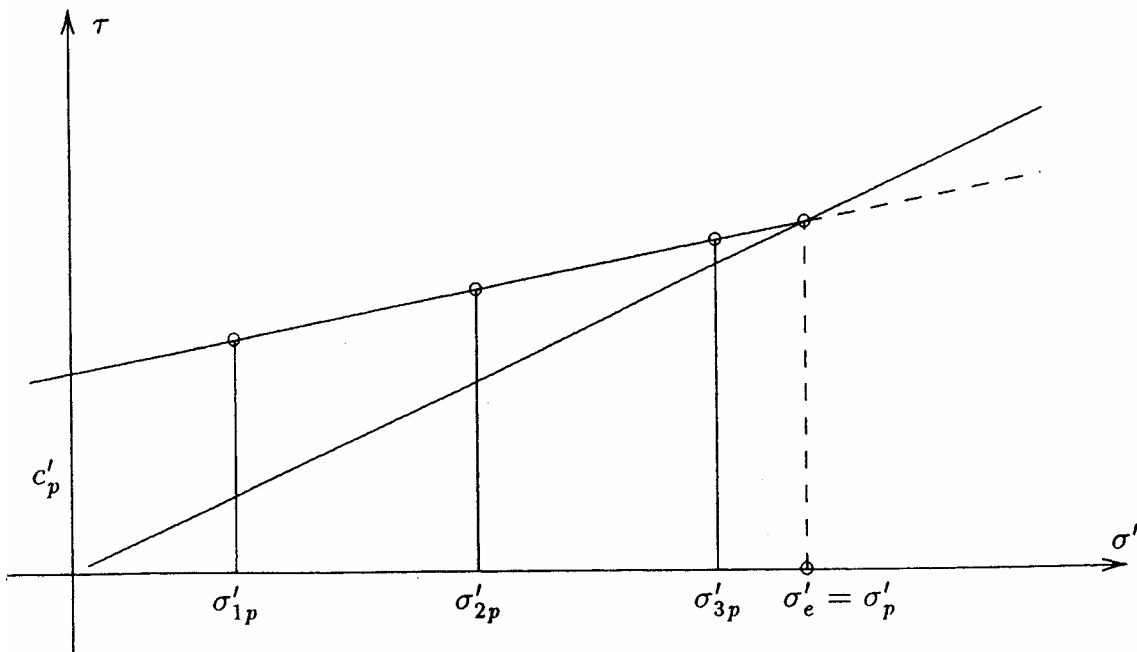
Nedrenirana strižna trdnost:

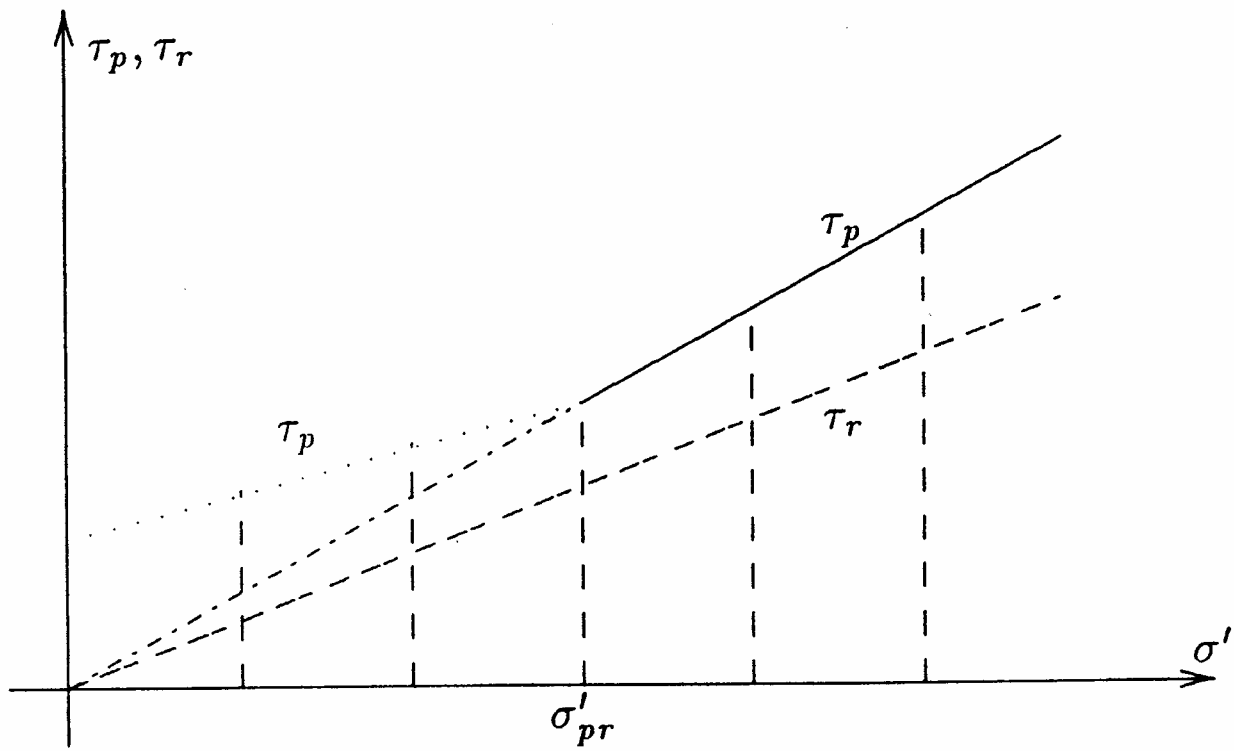
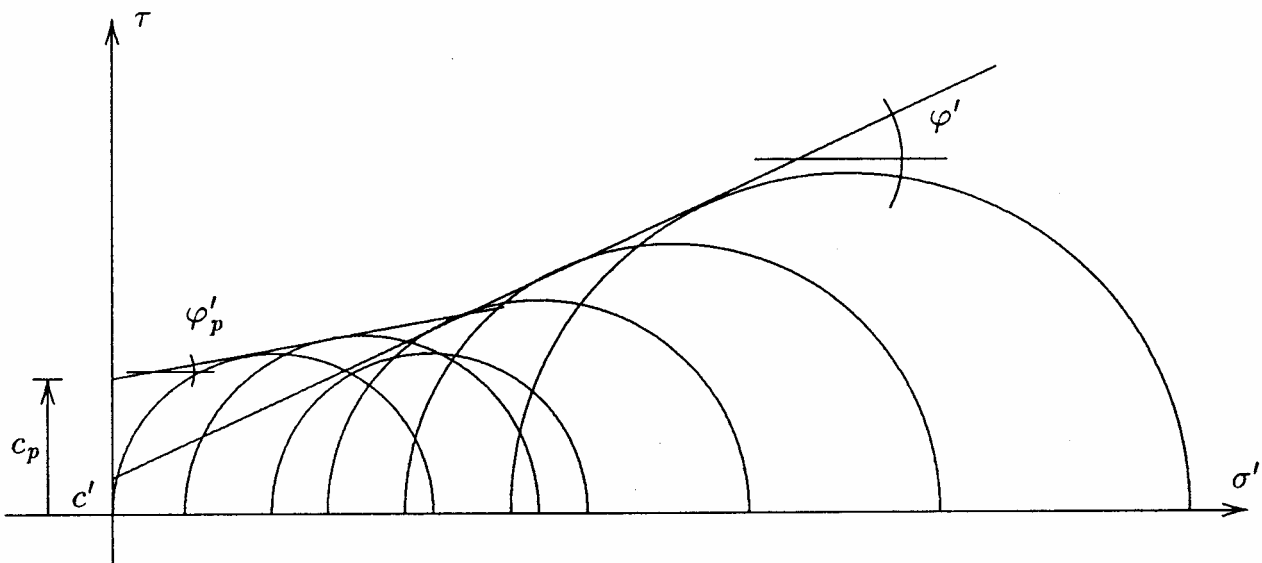
$$\tau_u = c_u + \sigma \tan \varphi_u \quad , \quad \varphi_u = 0 \Rightarrow \tau_u = c_u$$

Določamo jo z enoosnimi tlačnimi preiskavami, z nedrenirano konsolidirano triosno preiskavo, s krilno sondo in na terenu (SPP, krilna sonda, CPT).



Vpliv prekonsolidacije na strižno odpornost:





Kje, kdaj in kako uporabljamo podatke o fizikalnih lastnostih zemljine?

Deformacijski parametri:

izračun napetostnih stanj v temeljnih tleh in zemljinskih objektih,
izračun posedkov temeljnih tal oz. objektov,
(začetni ali distorzijski, konsolidacijski ali volumenski (sferni),
končni, absolutni ter diferenčni)

Prepustnost:

časovni razvoj posedkov (konsolidacija),
znižanje talne vode

Trdnostni parametri:

mejna napetostna stanja v temeljnih tleh in zemljinskih objektih,
stabilnostne analize (vkopi, nasipi, deponije, ...),
dopustna obtežba temeljnih tal,
nosilnost temeljnih tal,
(v začetnih – nedreniranih pogojih, po končani konsolidaciji –
drenirani pogoji)
zemeljski pritiski (aktivni, pasivni, mirni) – obtežba na podporne
konstrukcije,
nosilnost zemeljskih sider

Vse fizikalne lastnosti (poroznost, konsistenca, gostota, ...
deformacijski, prepustnostni in trdnostni parametri) se časovno
spreminjajo v odvisnosti od sprememb napetostnih stanj v temeljnih
tleh oziroma zemljinskih objektih. So spremenljivke, niso konstantne
vrednosti. Praviloma so fizikalne lastnosti zemljin definirane na
efektivna napetostna stanja (medzrnski tlaki), le izjemoma na
totalna napetostna stanja.

ZVEZE MED DEFORMACIJSKIMI PARAMETRI

	E	ν	K	G	E_{oed}
E, ν	E	ν	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{E}{2(1+\nu)}$	$\frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$
E, K	E	$\frac{1}{2} - \frac{E}{6K}$	K	$\frac{3EK}{9K-E}$	$\frac{3K(E+3K)}{9K-E}$
E, G	E	$\frac{E}{2G} - 1$	$\frac{EG}{3(3G-E)}$	G	$\frac{G(4G-E)}{3G-E}$
ν, K	$3K(1-2\nu)$	ν	K	$\frac{3K(1-2\nu)}{2(1+\nu)}$	$3K \frac{(1-\nu)}{(1+\nu)}$
ν, G	$2G(1+\nu)$	ν	$\frac{2G(1+\nu)}{3(1-2\nu)}$	G	$\frac{2G(1-\nu)}{(1-2\nu)}$
ν, E_{oed}	$\frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)} E_{oed}$	ν	$\frac{1+\nu}{3(1-\nu)} E_{oed}$	$\frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} E_{oed}$	E_{oed}
K, G	$\frac{9KG}{3K+G}$	$\frac{3K-2G}{2(3K+G)}$	K	G	$K + \frac{4}{3}G$
K, E_{oed}	$\frac{9K(E_{oed}-K)}{3K+E_{oed}}$	$\frac{3K-E_{oed}}{3K+E_{oed}}$	K	$\frac{3}{4}(E_{oed}-K)$	E_{oed}
G, E_{oed}	$\frac{G(3E_{oed}-4G)}{E_{oed}-G}$	$\frac{2G-E_{oed}}{2(G-E_{oed})}$	$E_{oed} - \frac{4}{3}G$	G	E_{oed}