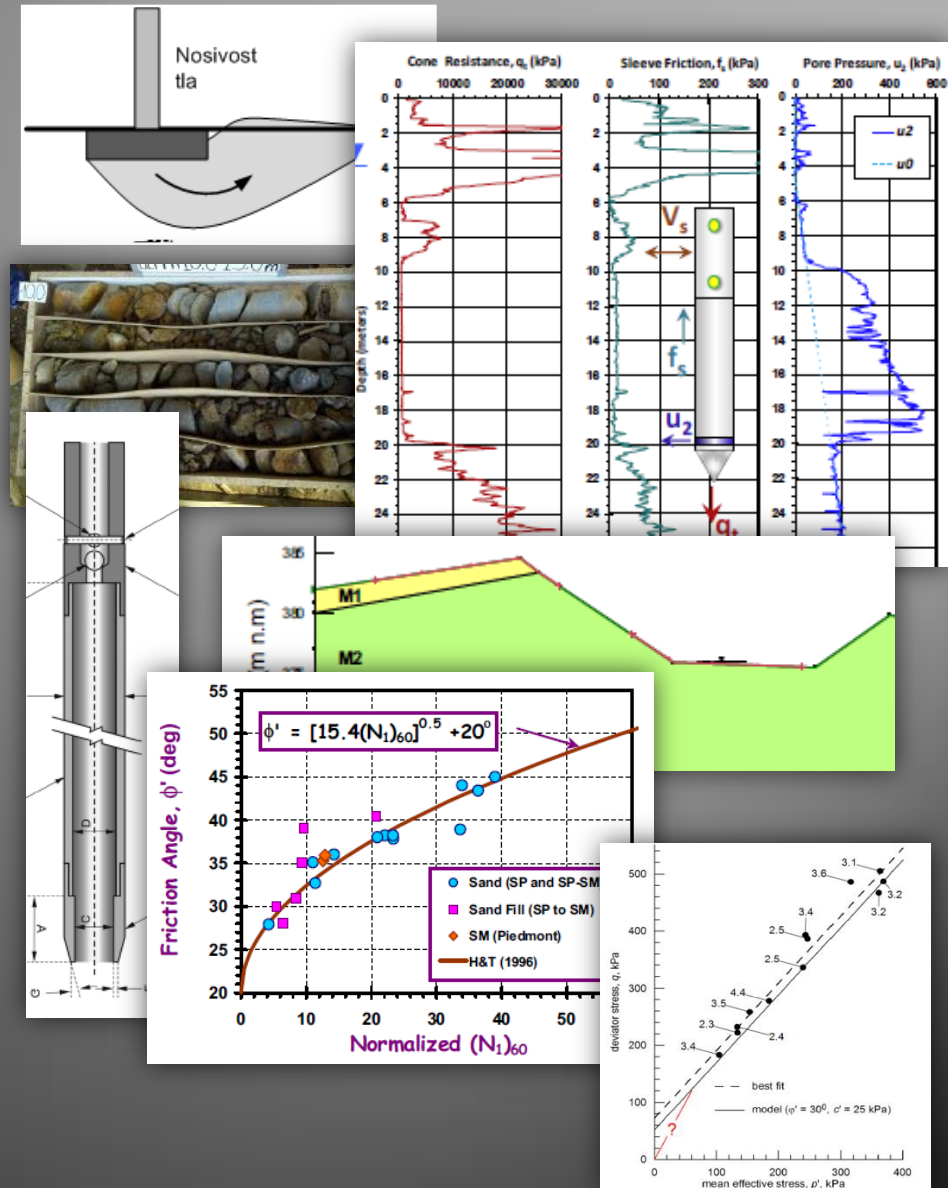


# Određivanje parametara tla u geotehničkom inženjerstvu

Dr. sc. Antun Szavits–Nossan  
ASN–GEO d.o.o., Zagreb

# Sadržaj

- Uvod
- Geotehnički zahvat, proračunske situacije, modeli i parametri
- Geološke podloge, laboratorijska i terenska ispitivanja, interpretacija
- Neposredne i izvedene veličine parametara tla
- Izbor karakterističnih vrijednosti parametara tla
- Primjeri s komentarima
- Zaključci
- Reference



# Uvod

- Izbor parametara tla važan je korak u računskom postupku dokazivanja mehaničke otpornosti i stabilnosti geotehničkog zahvata!
- Izbor parametara tla je složen postupak koji često traži široko znanje o ponašanju i ispitivanju tla. Primjerice:

Parametri tla ovise o:

Parametar	vrsti tla	uvjetima dreniranja	mehaničkom modelu tla	razini naprezanja	svojstvima konstrukcije
gustoća	+	-	-	-	-
vlažnost	+	-	-	-	-
čvrstoća	+	+	+	+	-
krutost	+	+	+	+	-
Winklerov modul reakcije podloge	+	+	+	+	+

i o mnogočemu drugome (brzini opterećenja, ...)!

(nastavak)

- ▶ Kvaliteta izbora vrijednosti parametara ovisi i o reprezentativnosti laboratorijskog uzorka, kvaliteti laboratorijskih ili terenskih ispitnih uređaja, kvaliteti provedenih pokusa (obučenost i savjesnost osoblja) i kvaliteti mjernih instrumenata.
- ▶ Kvaliteta ovisi i o ispravnosti vrednovanja svih raspoloživih relevantnih podataka (geološki podaci, podaci iz svih provedenih ispitivanja, pregled i opažanje relevantnih podataka na lokaciji, poznavanje karaktera i intenziteta opterećenja, ..., iskustvo, ...).
- ▶ Uza sve nabrojeno, današnja (dobra) praksa najveći dio odgovornosti za pravilan izbor parametara prebacuje na projektanta (Eurokod 7).
- ▶ Zbog svega nabrojanog, izbor parametara tla je i vrlo odgovoran zadatak.

# Geotehnički zahvat, proračunske situacije, modeli i parametri

## ▶ Proračunska situacija:

**jedan od mogućih kritičnih trenutaka u životu izgradnje i korištenja građevinske konstrukcije** (geotehničkog zahvata); obuhvaća grubu geometriju geotehničkog zahvata, raspored, intenzitet i brzine djelovanja, uslojenost i karakteristike tla, stanje podzemne vode, te mehanizam deformacija tla i konstrukcije (na primjer: slom zaštitne konstrukcije u građevnoj jami pri dugotrajnom opterećenju – drenirani uvjeti u tlu).

## ▶ Proračunski modeli i parametri:

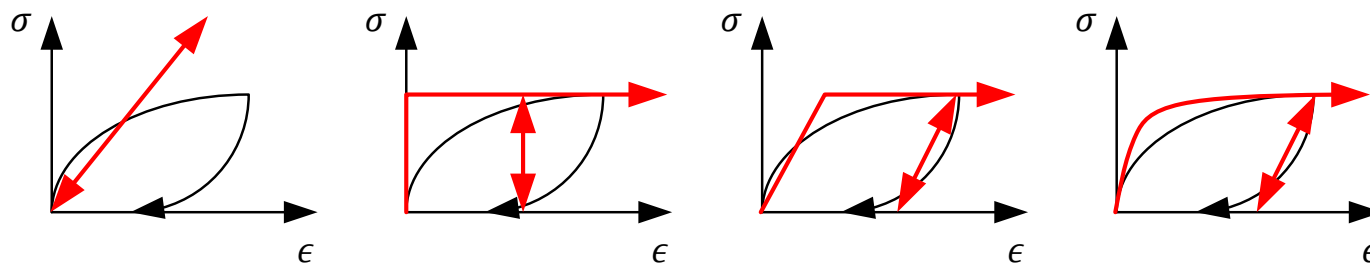
- **Modeli opisuju idealizirani mehanizam pojedine proračunske situacije;**
- **Geotehnički model** (konture geotehničkog zahvata, uslojenost temeljnog tla, stanje podzemne vode, proračunski model ponašanja tla u svim slojevima s pripadnim karakterističnim parametrima i djelovanjima;
- **Model ponašanja tla:** elastični, kruto-plastični (Mohr-Coulomb), elasto-plastični bez ili sa očvršćivanjem, ..., s pripadnim parametrima (sastavni dio geotehničkog proračunskog modela);
- **Većina mehaničkih parametara tla ima značenje samo u okviru pripadnog modela ponašanja tla.**

## (nastavak)

- Proračunski modeli ponašanja tla i pripadni proračunski parametri odnose se na pojedinu proračunsku situaciju i mogu se razlikovati među različitim situacijama.
- Slojevi tla u se jednom geotehničkom modelu mogu prema potrebi opisati međusobno različitim modelima ponašanja tla.
- Geotehnički model i pripadni modeli ponašanja tla moraju moći opisati mehanizme koji se procjenjuju bitnim u pojedinim proračunskim situacijama.
- Pri dokazivanju mehaničke otpornosti i stabilnosti geotehničkog zahvata mora se obuhvatiti sve kritične proračunske situacije (od kojih nema gore proračunske situacije s obzirom na mehaničku otpornost i stabilnost – Eurokod).

(nastavak)

## ► Proračunski modeli ponašanja tla



elastični

kruto-plastični

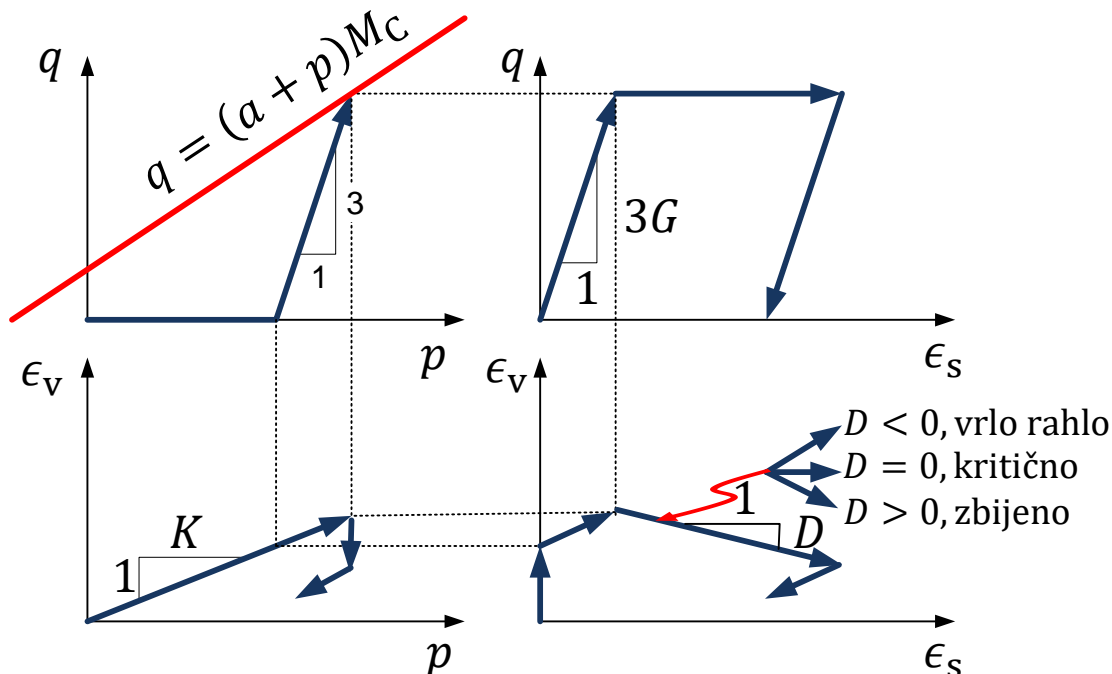
linearno  
elasto-  
plastični

elasto-  
plastični s  
očvršćivanjem

(nastavak)

## Mohr-Coulombov model, MC (linearno elasto-plastični)

Tro-osno drenirano smicanje (CID):



Variable (tlak pozitivan)

$$q = \sigma_1 - \sigma_3$$

$$p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$$

$$\epsilon_v = \epsilon_1 + 2\epsilon_3$$

$$\epsilon_s = 2(\epsilon_1 - \epsilon_3)/3$$

Parametri

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

$$a = \frac{c}{\tan \varphi}, \quad M_c = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi}$$

$$D_c = \frac{6 \sin \psi}{3 - \sin \psi} = -\frac{d\epsilon_v}{d\epsilon_s} \text{ (dilatancija)}$$

Nedrenirani uvjeti (bez efektivnih napreznja) – oznaka bez crtice ( $E$ ), drenirani uvjeti (s efektivnim napreznjima) – oznaka s crticom ( $E'$ ); Za zasićena tla u nedreniranim uvjetima:  $\nu \approx 0,5$ ;  $\varphi = \psi = 0$



(nastavak)

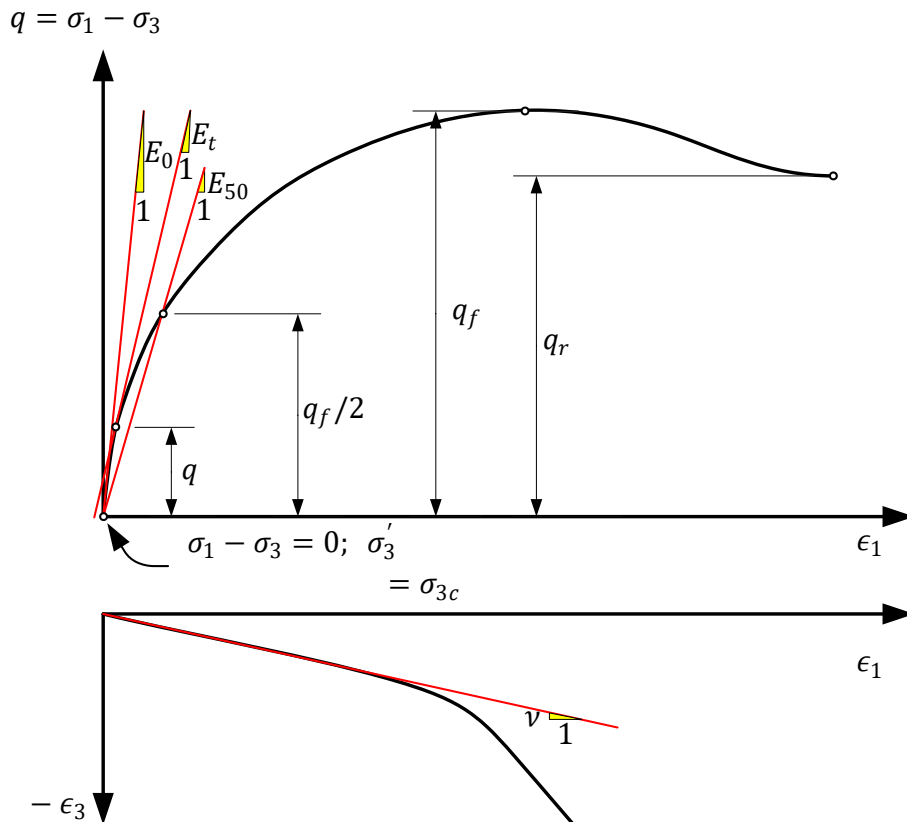
## Parametri Mohr–Coulombovog elasto–plastičnog modela

parametar	dimenzija	vrsta deformacija	oznaka – drenirani uvjeti	oznaka – nedrenirani uvjeti
Youngov modul	kPa, MPa	elastična	$E'$	$E_u$
Poissonov omjer	–	elastična	$\nu'$ ( $0 \leq \nu' < 0,5$ )	$\nu_u$ (= 0,5 za $S_r = 1$ )
Kut trenja	stupnjevi	plastična	$\varphi'$	$\varphi_u$ (= 0 za $S_r = 1$ )
kohezija	kPa, MPa	plastična	$c'$	$c_u$
kut dilatancije	stupnjevi	plastična	$\psi'$	$\psi_u$ (= 0 za $S_r = 1$ )

$S_r$  je stupanj zasićenja tla vodom

(nastavak)

Izbor proračunskih parametara MC modela ovisi o očekivanom rasponu napreznja



Youngovi moduli:

$E_0$  – početni tangentni, sekantni

$E_t$  – tangentni pri nekom  $q$

$E_{50}$  – sekantni pri 50% od  $q_f$

Poissonov omjer:

$\nu = -\epsilon_3/\epsilon_1$  – „drenirani”

(„nedrenirani” = 0.5)

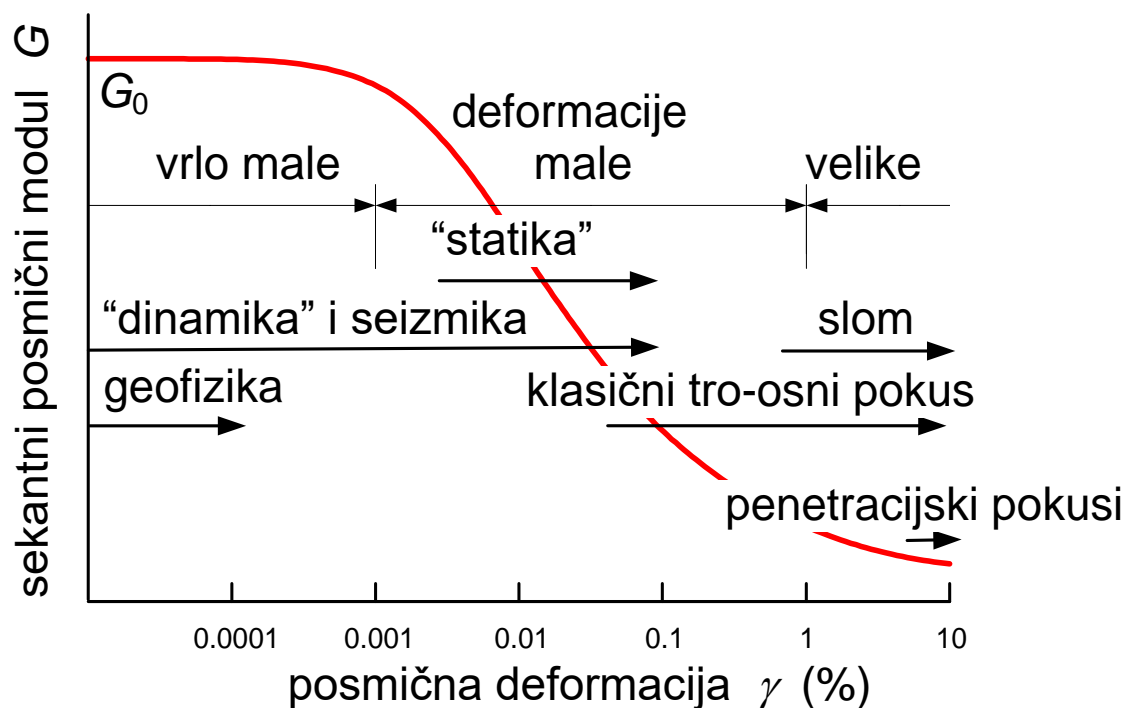
Čvrstoća:

$q_f$  – vršna, „drenirana” ili „nedrenirana

$q_r$  – rezidualna

(nastavak)

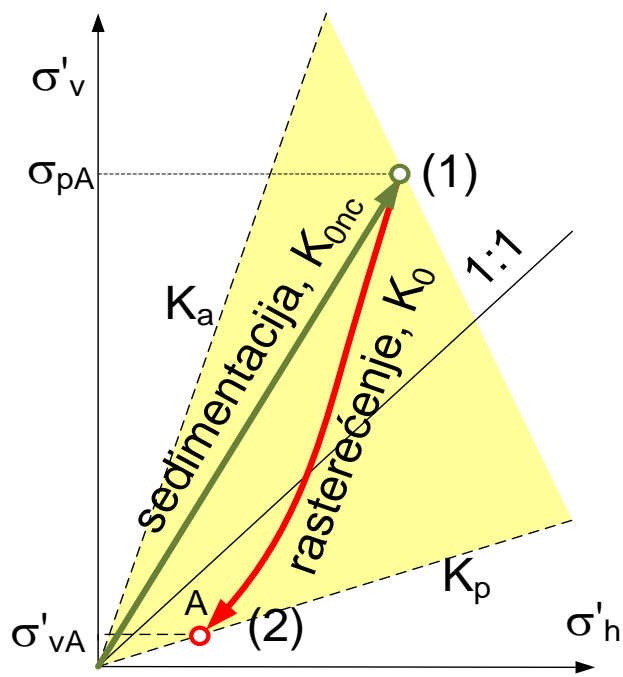
Izbor proračunskih parametara MC modela ovisi o očekivanom rasponu deformacija



Prema Simons & Menzies (2000)

(nastavak)

► Početno stanje naprezanja

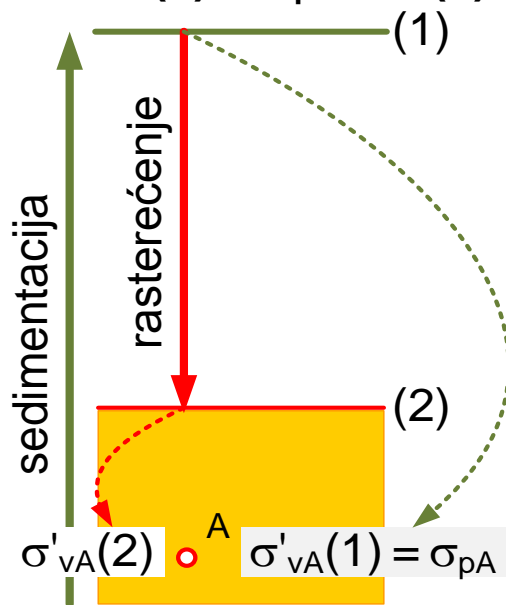


$$K_{0nc} \approx 1 - \sin \varphi'$$

$$K_0 \approx K_{0nc} \quad OCR^{\sin \varphi'} \approx K_{0nc} \quad OCR^{0.5} \leq K_p$$

$$OCR_A(1) = 1$$

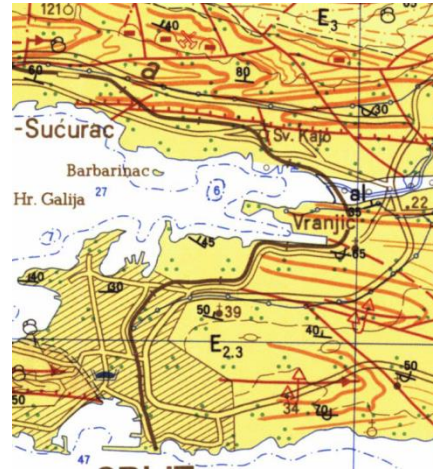
$$OCR_A(2) = \sigma_{pA} / \sigma'_{vA}(2)$$



- $\sigma'_v$  – vertikalno efektivno naprezanje
- $\sigma'_h$  – horizontalno efektivno naprezanje
- $\sigma_p$  – pritisak prekonsolidacije
- $K_0$  – koeficijent horizontalnog naprezanja
- $K_{0nc}$  –  $K_0$  za „normalno konsolidirano tlo
- $OCR = \sigma_p / \sigma'_v$  – omjer prekonsolidacije
- $K_a, K_p$  – koeficijent aktivnog tlaka, pasivnog otpora

# Geološke podloge, laboratorijska i terenska ispitivanja, interpretacija

## ▶ Geološke podloge



## ▶ Laboratorijska indirektna ispitivanja

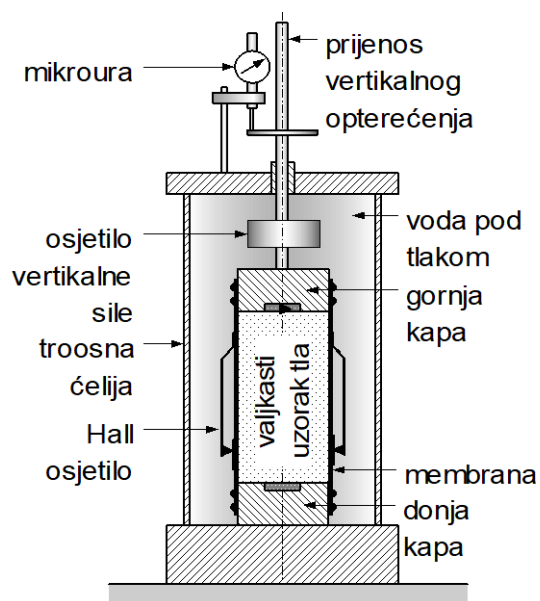


granica tečenja i granica plastičnosti,

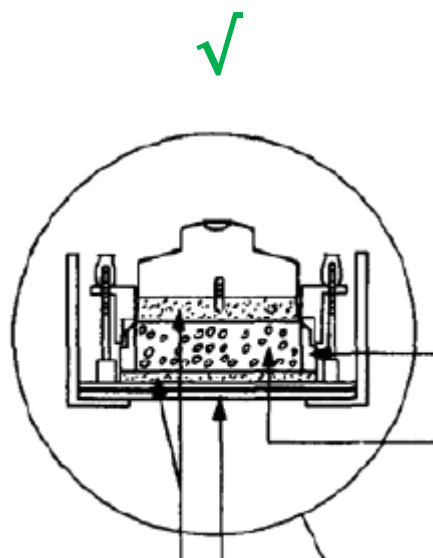
granulometrija

(nastavak)

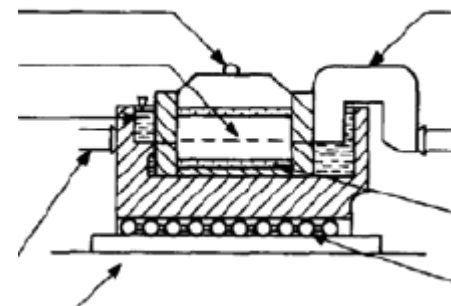
## ► Laboratorijska direktna ispitivanja



tro-osni uređaj



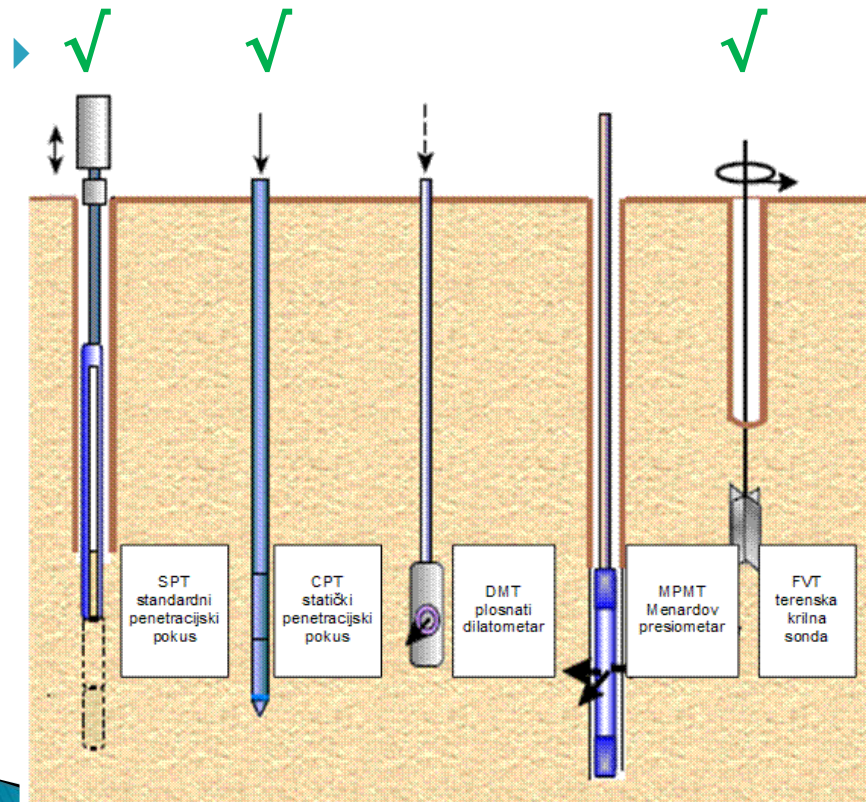
edometar



direktno smicanje

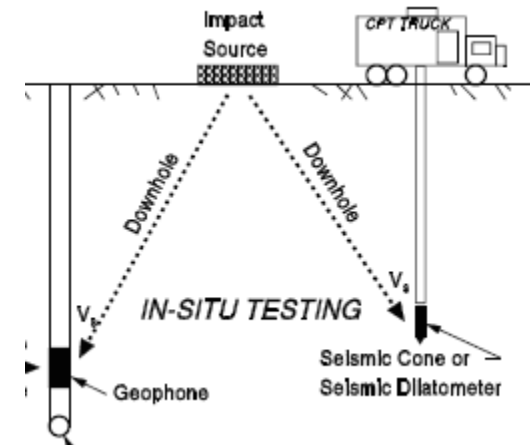
(nastavak)

▶ Terenska ispitivanja  
Penetracijska



prema Mayne i dr. (2001)

Geofizička



prema Mayne i dr. (2000)

**Mjerenje brzine** uzdužnih ( $v_p$ ) i **poprečnih valova** ( $v_s$ ): crosshole, downhole, SASW, MASW, seizmička refrakcija ( $G_0 = \rho v_s^2$ )

(nastavak)

Važno je sve laboratorijske i terenske pokuse voditi u skladu s prihvaćenim europskim normama za geotehnička istraživanja i ispitivanja (vidi Tehnički propis za projektiranje građevinskih konstrukcija, Narodne novine RH, br. 17 iz 2017. godine).

### Laboratorijska ispitivanja

Serija HRN EN ISO 17892-1 do HRN EN ISO 17892-12

### Geohidraulička ispitivanja

Serija HRN EN ISO 22282-1 do HRN EN ISO 22282-6

### Metode uzorkovanja i mjerenja podzemne vode

Serija HRN EN ISO 22475-1 do HRN EN ISO 22475-3

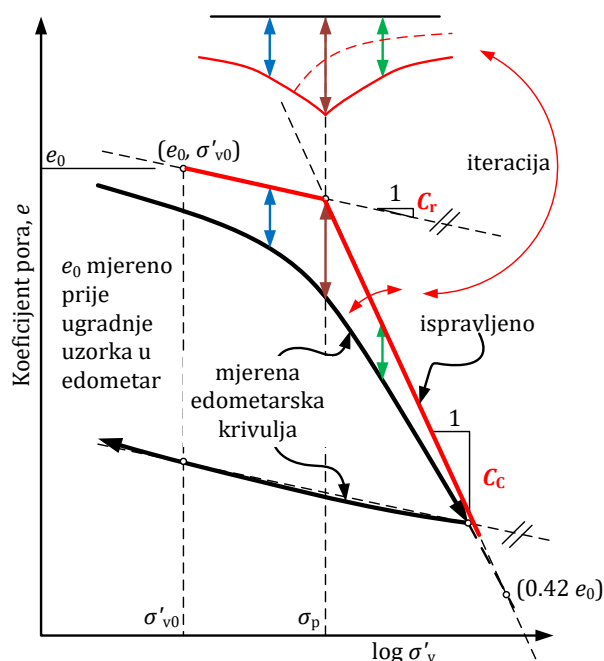
### Terenska ispitivanja

Serija HRN EN ISO 17892-1 do HRN EN ISO 17892-12



(nastavak)

- ▶ Ispravci mjerenih veličina
- ▶ Ispravak edometarske krivulje zbog poremećenja uzorka gline (Schmertmann 1953)



Iteracijski postupak određivanja pritiska prekonsolidacije  $\sigma_p$ : postizavanje simetričnog vertikalnog razmaka ispravljene i mjerene edometarske krivulje oko pretpostavljenog pritiska prekonsolidacije

Ulazne veličine za ispravak: mjerena edometarska krivulja, koeficijent pora  $e_0$  pretpostavljeno jednak onome u tlu na dubini iz koje je vađen „neporemećeni” uzorak tla za edometarski pokus te vertikalno efektivno naprezanje  $\sigma'_{v0}$  na dubini iz koje je vađen uzorak tla.

Rezultat ispravka:

$C_r$  – indeks rasterećenja

$C_c$  – indeks stišljivosti

$\sigma_p$  – pritisak prekonsolidacije

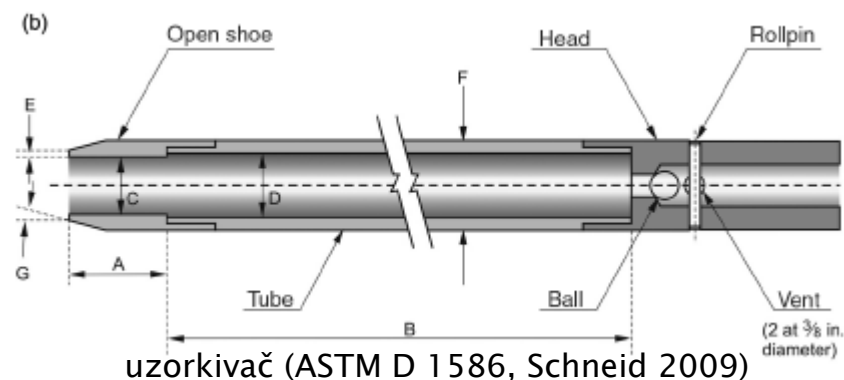
## (nastavak)

### ► Edometarski modul iz edometarske krivulje

veličina	formula	napomena
$E_{oed}$	$E_{oed} = \frac{d\sigma'}{d\epsilon}$	edometarski tangenti modul ( $\sigma'$ je vertikalno efektivno naprežanje na edometarskom uzorku, a $\epsilon$ je vertikalna deformacija edometarskog uzorka)
$E_{oed}$	$E_{oed} = \frac{2,3(1+e)}{c} \sigma'_v$	$C = C_c$ za opterećenje normalno konsolidirane gline $C = C_r$ za opterećenje ili rasterećenje prekonsolidirane gline
$E'_t$	$E'_t = E_{oed} \frac{(1+\nu')(1-2\nu')}{1-\nu'}$ $0,7E_{oed} \leq E'_t \leq E_{oed}$ za $0 \leq \nu' \leq 0,3$	odnos između tangenti edometarskog ( $E_{oed}$ ) i tangenti Youngovog modula ( $E'_t$ )

## (nastavak)

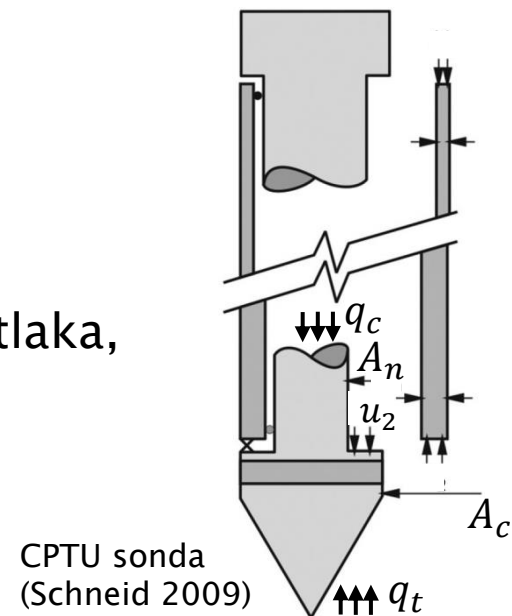
- ▶ Ispravci mjerenja standardnim penetracijskim pokusom (SPT)



veličina	formula	napomena
$N_{SPT}$	–	broj udaraca utega od 0,623 kN koji pada s visine od 0,76 m i zabija uzorkivač 30 cm
$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60} = E_r N_1$	normalizirani broj udaraca na standardnu energiju udara i vertikalno efektivno naprežanje od 100 kPa
$E_r$	$E_r = E_{SPT} / E_{60}$	omjer udarne energije koja se prenese na uzorkivač u odnosu na standardnu udarnu energiju koja iznosi 60% teoretske ( $E_{SPT}$ se može mjeriti te time baždariti oprema)
$N_1$	$N_1 = C_N N_{SPT}$	normalizirani broj udaraca na standardno vertikalno efektivno naprežanje od 100 kPa
$C_N$	$C_N = \sqrt{\frac{100}{\sigma'_v [kPa]}}$	ispravak na vertikalno efektivno naprežanje, $\sigma'_v$ , od 100 kPa (Liao i Whitman, 1985)

## (nastavak)

- ▶ Ispravak mjerenja statičkim penetracijskim ispitivanjem (CPT – uređaj bez mjerenja tlaka podzemne vode, CPTU – uređaj s mjerenjem tlaka,  $u_2$ , u poroznom prstenu iza šiljka, izazvanog prodiranjem sonde u tlo)

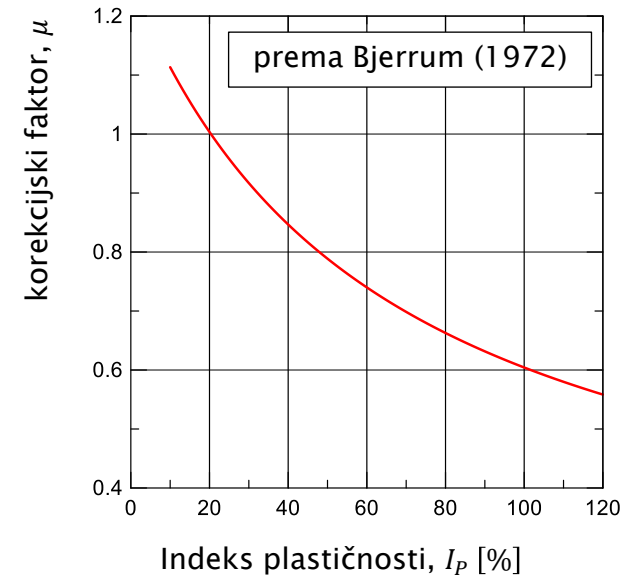


veličina	formula	napomena
$q_c$	–	mjereni otpor prodiranja sonde (sila otpora podijeljena s površinom baze šiljka $A_c$ ) izražen u kPa ili Mpa; šiljak sonde ima vršni kut od $60^\circ$ i površinu baze $A_c = 10 \text{ cm}^2$ ; brzina prodiranja sonde u tlo je 2 cm/s
$q_t$	$q_t = q_c + (1 - a)u_2$	otpor šiljka (ispravljeni, stvarni pritisak na šiljak s njegove donje strane); $a = A_n/A_c < 1$ je odnos površine presjeka kružne nosača šiljka i baze šiljka (vidi sliku), a $u_2$ je tlak podzemne vode, a sastoji se od hidrostatskog tlaka i dodatnog tlaka uzrokovanog utiskivanjem sonde u tlo; $u_2$ se mjeri preko filtarskog kamena neposredno iza baze šiljka; veličina $a$ se mora utvrditi baždarenjem, a obično iznosi između 0,75 i 0,9 )
$q_n$	$q_n = C_N q_t$	normalizirani efektivni otpor šiljka na vertikalno naprezanje od 100 kPa; $C_N$ kao i za SPT

## (nastavak)

- ▶ Ispravak mjerenja krilnom sondom (FVT) za nasipe i iskope na mekom koherentnom tlu

*In situ* vrijednosti nedrenirane čvrstoće dobivene su interpretacijom mehanizma klizanja na stvarnim klizištima. Razlika nastaje od stvarne anizotropije čvrstoće i različitih brzina klizanja.



veličina	formula	napomena
$c_{u, in situ}$	$c_{u, in situ} = \mu c_{u, FVT}$	nedrenirana čvrstoća na terenu dobivena ispravkom iz nedrenirane čvrstoće $c_{u, FVT}$ mjerene FVT-om
$\mu$	$\mu \approx 0,18 + \frac{70}{I_p[\%]+65}$	korekcijski faktor mjerene nedrenirane čvrstoće ovisan o indeksu plastičnosti izraženim u postocima; prema Bjerrum (1972), vidi dijagram

# (nastavak)

- ▶ Primjenjivost pojedinih laboratorijskih i terenskih ispitivanja obzirom na vrstu tla i kvalitetu uzoraka (HRN Eurokod 7-2:2012, tablice 3.1, 2.2, 2.3 i 2.1)

Parametar	Glinovito tlo		
	Vrsta ispitnog uzorka		
	Neporemećen	Poremećen	Pre-gnječ
Geološki opis i razredba tla	X	X	X
Sadržaj vode	X	(X)	(X)
Ukupna gustoća mase	X	(X)	(X)
Najmanja i najveća gustoća mase	—	—	—
Atterbergove granice (gran. konzistencije)	X	X	X
Granulometrijski sastav	X	X	X
Nedeterminirana posmična čvrstoća	X	—	—
Propusnost	—	—	—
Osjetljivost	X	—	—

X = obično se određuje  
(X) = moguće odrediti, nije nužno reprezentativno  
— = nije primjenjivo  
NAPOMENA: Za neke vrste tla smiju se u obzir uzeti organskih materija, gustoće mase zna i aktivnosti

Geotehnički parametar	Vrsta tla	
	Uzorkovanje	Moguće dobivanje rezultata
Edometarski modul (E <sub>50</sub> ) indeks stišljivosti (C <sub>v</sub> ) jednodimenzijnska stišljivo Youngov modul (E) modul posmaka (G)	Tlo	Terenska ispitivanja
	Stijena	
Drenirana (efektivna) posm čvrstoća (c'), (φ) Rezidualna posmična čvrst (c <sub>u</sub> ), (φ <sub>u</sub> ) Nedeterminirana posmična čvr (c <sub>v</sub> )	Kategorija A	CPT & CPTU
	Kategorija B	Preslomčasti <sup>1)</sup>
Ukupna gustoća mase (ρ) Koeficijent konsolidacije (C <sub>α</sub> )	Kategorija C	ROT
	Kategorija D	Savijeni dilatometar
Propusnost (k)	Kategorija E	SPT <sup>2)</sup>
	Kategorija F	DPL/DFM
Skracenoje laboratorijskih i određivanje uku ispitivanje terari edometarsko ispi ispitivanje propi ispitivanje posm kružni posmik (i ispitivanje posm indek granulometrijska troosno ispitivan ispitivanje propusnosti sa stalnom razlikom hidrauličkog potencijala u troosnoj celiji (ili uređaj za mjerjenje propusnosti sa savitljivom opnom )	Kategorija G	DPH/DPH
	Kategorija H	WST
= nije primjenjivo ( ) = samo djelomično pri	Kategorija I	FVT
	Kategorija J	DMT
Svojstva tla / razred kvalitete	Kategorija K	PLT
	Kategorija L	Otvoreni stub
Nepromijenjena svojstva tla veličina čestica sadržaj vode gustoća mase, indeks zbijenosti, po stišljivost, posmična čvrstoća	Kategorija M	Zatvoreni stub
	Kategorija N	
Svojstva koja se mogu odrediti slijed slojeva granice slojeva – široke granice slojeva – uske Atterbergove granice, gustoća mase sadržaj vode gustoća mase, indeks zbijenosti, po stišljivost, posmična čvrstoća	Kategorija O	
	Kategorija P	
Kategorija uzorkovanja prema nom	Kategorija Q	
	Kategorija R	

<sup>1)</sup> glavne grupe tla „Jupnozmatari“ i „stinozmatari“ u skladu s normom ISO 14688-1  
NAPOMENA: Ovisno o uvjetima u terenskoj bu (kao što je vrsta tla, podzemna voda) i planiranom proračunu, odabir metoda  
Ispitivanja da se izmjeri i može odabrati od ove tablice.

# Neposredne i izvedene veličine parametara tla

- ▶ Sitnozrna tla (gline, prašine), meka do srednja

parametar	formula	napomena
Youngov modul, vrlo male deformacije, $E_{u0}$ , nedrenirani uvjeti ( $\nu_u = 0,5$ )	$E_{u0} = 3G_0 = 3\rho v_s^2$	$v_s$ iz geofizičkih mjerenja ili laboratorijskog pokusa s rezonantnim stupcem na neporemećenim uzorcima ( $\rho$ je gustoća tla)
Edometarski modul (drenirani uvjeti) $E_{oed}$	$E_{oed} = \frac{2,3(1+e)}{c} \sigma'_v$	$C$ iz edometarskih parametara $C = C_c$ ili $C = C_r$ ovisno o omjeru prekonsolidacije $OCR = \sigma_p / \sigma'_{v0}$ (vidi ranije) i predznaku opterećenja; edometarski pokusi iz neporemećenih uzoraka visoke kvalitete (na pr. vađenih iz očišćenih bušotina pomoću tankostijenog cilindra sa ili bez nepomičnog klipa); najbolja metoda
Poissonov broj, nedrenirani, $\nu_u$ , i drenirani uvjeti, $\nu'$	$\nu_u = 0,5$ $0,1 < \nu' \leq 0,35$	manja vrijednost $\nu'$ (0,1 do 0,2) za prekonsolidirana tla i rasterećenje, veća (0,25 do 0,35) za normalno konsolidirana tla pri opterećenju
Youngov tangenti modul $E'_t$ , drenirani uvjeti	$E'_t (\approx E'_{50}) = E_{oed} \frac{(1+\nu')(1-2\nu')}{1-\nu'}$	$0,6E_{oed} \leq E'_t (\approx E'_{50}) \leq E_{oed}$ za $0 \leq \nu' \leq 0,35$

(nastavak)

## ► Sitnozrna tla, meka do srednja (nastavak 1)

parametar	formula	napomena
nedrenirana čvrstoća, $c_u$	–	<ul style="list-style-type: none"><li>– iz troosnih pokusa na neporemećenim uzorcima visoke kvalitete; najbolja metoda</li><li>– iz krilne sonde (FVT); najbolja metoda</li></ul>
nedrenirana čvrstoća, $c_u$	$c_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}}$	iz statičkog penetracijskog pokusa (CPTU) uz $12 \leq N_{kt} \leq 15$ (uobičajeno $N_{kt} = 14$ ); Lunne i dr. (1997)
pritisak pre-konsolidacije, $\sigma_p$	$\sigma_p = 0.33(q_t - \sigma_{v0})$	iz statičkog penetracijskog pokusa (CPTU) ili bolje iz edometra na kvalitetnom neporemećenom uzorku; gruba procjena (Kulhawy & Mayne 1990, Mayne 2005)
omjer pre-konsolidacije, $OCR$	$OCR \approx \left( \frac{c_u / \sigma'_{v0}}{\left( \frac{c_u}{\sigma_p} \right)_{nc}} \right)^{1,25}$	$c_u$ je nedrenirana čvrstoća tla, a $\left( \frac{c_u}{\sigma_p} \right)_{nc}$ je omjer nedrenirane čvrstoće i vertikalno efektivnog naprezanja za normalno konsolidirano tlo i može se procijeniti iz izraza $\left( \frac{c_u}{\sigma_p} \right)_{nc} = \left( \frac{c_u}{\sigma'_{v0}} \right)_{nc} \approx 0,11 + 0,0037I_p [\%]$ (Skempton, 1957), ili $\left( \frac{c_u}{\sigma'_{v0}} \right)_{nc} = 0,2$ do $0,3$ (Jamiolkowski i dr., 1985); gruba procjena



(nastavak)

## ► Sitnozrna tla, meka do srednja (nastavak 2)

parametar	formula	napomena
Edometarski modul, $E_{oed}$	$E_{oed} = 8.25(q_t - \sigma_{v0})$	gruba procjena (Kulhawy & Mayne 1990)
Indeks kompresije $C_c$ i rasterećenja $C_r$ (sva sitnozrna tla)	$C_c \approx 0,009(w_L[\%] - 10)$ $C_c \approx I_p/74$ $C_r \approx C_c/5 = I_p/370$	Terzaghi & Peck (1967) Kulhawy & Mayne (1990) Kulhawy & Mayne (1990)
Efektivni kut unutrašnjeg trenja, $\varphi'$	$\frac{c_u}{\sigma'_{v0}} = \frac{1}{2} \sin \varphi' OCR^{1-\frac{c_s}{c_c}} \approx$ $\frac{1}{2} \sin \varphi' OCR^{0,8} \approx$ $0,23OCR^{0,8}$	teoretska veza efektivnog kuta unutrašnjeg trenja, nedrenirane čvrstoće pri stanju čistog smicanja, parametara edometarske krivulje i odnosa prekonsolidacije prema Cam-Clay modelu (Wroth 1984, Jamiolkowski 1985)
Posmični modul kod vrlo malih deformacija, $G_0$	$G_0 = \rho v_s^2$	iz terenskih geofizičkih mjerenja ili pokusa rezonantnim stupcem na neporemećenom uzorku; Vrijedi za sve vrste tla
Posmični modul kod vrlo malih deformacija, $G_0$	$G_0 = (1000 \text{ do } 2500)c_u$	Gazetas, G. (1991)

(nastavak)

## ► Sitnozrna tla, meka do srednja (nastavak 3)

nedrenirana čvrstoća, $c_u$	$\frac{c_u}{\sigma_{v0}'} \approx 0,11 + 0,0037I_P [\%]$	procjena za normalno konsolidirana sitnozrna tla (Skempton, 1957)
nedrenirana čvrstoća, $c_u$	$c_u [kPa] \approx 1,7 \times 10^{2I_c}$	$I_c = \frac{w_L - w}{w_L - w_P}$ (Mitchell, 1976), gdje su $w$ , $w_P$ i $w_L$ prirodni sadržaj vlage (vlažnost), granica plastičnosti te granica tečenja; vrijedi za pregnječena sitnozrna tla (kompatibilno s opažanjem da je za vlažnost pri granici tečenja $c_u \approx 1,7 kPa$ , a za vlažnost na granici plastičnosti $c_u \approx 170 kPa$ , neovisno o vrsti sitnozrnog tla;

(nastavak)

## ► Sitnozrna tla, kruta

parametar	formula	napomena
Youngov modul, nedrenirani uvjeti, $E_u$ , ili efektivni, $E'$ , efektivni kut trenja, $i$ efektivna kohezija, $c'$ , te nedrenirana čvrstoća, $c_u$	–	iz troosnih pokusa na neporemećenim uzorcima (izvađenih iz jezgre bušačeg pribora s duplom sržnom cijevi) – ispitivanja po mogućnosti provedena s posebnim mjernim instrumentima za mjerenje malih deformacija za određivanje krutosti tla – bez toga moduli znatno podcijenjeni; Ispitivanja efektivnog kuta trenja $\varphi'$ i efektivne kohezije $c'$ moguće provesti i u uređaju za direktno smicanje
Youngov modul, nedrenirani uvjeti, $E_{u50}$	$E_{u50} \approx 0,9N_{60} [MPa]$	Korelacija s rezultatom SPT pokusa (Clayton 1995); $E'_{50}$ procjenom: $E'_{50} \approx 0,8E_{u50}$ (uz pretpostavku $\nu' = 0,2$ )
Poissonov broj – efektivni, $\nu'$ , ili nedrenirani, $\nu_u$	$\nu' \approx 0,2; \nu_u = 0,5$	

## (nastavak)



parametar	formula	napomena
Nedrenirana čvrstoća, $c_u$	$c_u = (4,5 \text{ do } 10)N_{60} [kPa]$	Korelacija s rezultatom SPT pokusa uz $\varphi_u = 0$ (Clayton 1995)
Nedrenirana čvrstoća, $c_u$	$c_u \approx \frac{q_a}{2}$	procjena iz mjerene osne (aksijalne) čvrstoće $q_a$ ; vrlo gruba procjena
Edometarski modul, $E_{oed}$	–	iz edometarskog pokusa (obično vrlo podcijenjeni rezultati zbog pogreška oko nalijeganja neravne površine uzorka na porozni kamen edometra)
Posmični modul kod vrlo malih deformacija, $G_0$	$G_0 = (1000 \text{ do } 2500)c_u$	Gazetas (1991)

Napomena: oprez kod određivanja efektivnih parametara čvrstoće slabo propusnih sitnozrnih tla, bilo mekih bilo krutih, u uređaju za direktno smicanje – zbog nedovoljne konsolidacije (prebrzog smicanja), izmjereni efektivni kut trenja bit će manji, a efektivna kohezija veća od stvarne!

(nastavak)

## ► Krupnozrna tla (pijesci, šljunci)

parametar	formula	napomena
Youngov modul, drenirani uvjeti, $E'$	-	iz troosnih pokusa nepouzđano obzirom na poteškoće oko dobavljanja neporemećenih uzoraka
Youngov modul, drenirani uvjeti, $E'$	$E' \approx N_{60} [MPa]$ $E' \approx 2N_{60} [MPa]$	(Clayton 1995): normalno konsolidirani pijesci prekonsolidirani pijesci
Edometarski modul, $E_{oed}$ , normalno konsolidirani pijesci	$E_{oed} = 4q_c$ $q_c < 10 MPa$ $E_{oed} [MPa] = 2q_c + 20$ ; $10 < q_c < 50 [MPa]$ $E_{oed} [MPa] = 120$ $q_c > 50 MPa$	Lunne & Christoffersen (1983), Schneid (2009)
Edometarski modul, $E_{oed}$ , pre-konsolidirani pijesci	$E_{oed} = 5q_c$ $q_c < 50 MPa$ $E_{oed} [MPa] = 250$ $q_c > 50 MPa$	Lunne & Christoffersen (1983), Schneid (2009); gotovo svi, osim geološko vrlo mladih pijesaka, su prekonsolidirani
$\nu'$	$\nu' \approx 0,1$ do $0,2$	

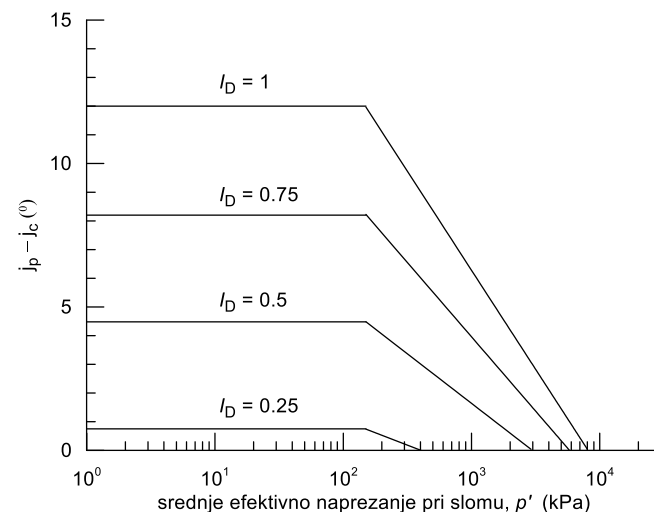
(nastavak)

## ► Krupnozrna tla (nastavak 1)

parametar	formula	napomena
Efektivni vršni kut unutrašnjeg trenja, $\varphi'$	$\varphi' = 20^\circ + \sqrt{15.4(N_1)_{60}}$	Korelacija s rezultatom SPT pokusa (Hatanaka & Uchida 1996); $c' = 0$
Efektivni vršni kut unutrašnjeg trenja, $\varphi'$	$\varphi' = \arctan \left[ 0,1 + 0,38 \log \frac{q_t}{\sigma'_{v0}} \right]$	Korelacija s rezultatom CPT pokusa (Mayne 2005, Schneid 2009); $c' = 0$ ;
Posmični modul kod vrlo malih deformacija, $G_0$	$G_0 = \rho v_s^2$	iz terenskih geofizičkih mjerenja; vrijedi za sva tla
Posmični modul kod vrlo malih deformacija, $G_0$	$G_0 = (450 \text{ do } 1200)^3 \sqrt[3]{N_{60} \sigma'_{v0} p_a^2}$ $G_0 = (200 \text{ do } 450)^3 \sqrt[3]{N_{60} \sigma'_{v0} p_a^2}$	cementirani pijesci ( $p_a = 100 \text{ kPa}$ ) necementirani pijesci (Schneid 2009)
Posmični modul kod vrlo malih deformacija, $G_0$	$G_0 = (110 \text{ do } 280)^3 \sqrt[3]{q_c \sigma'_{v0} p_a}$	necementirani do cementirani pijesci ( $p_a = 100 \text{ kPa}$ ); (Schneid 2009)

(nastavak)

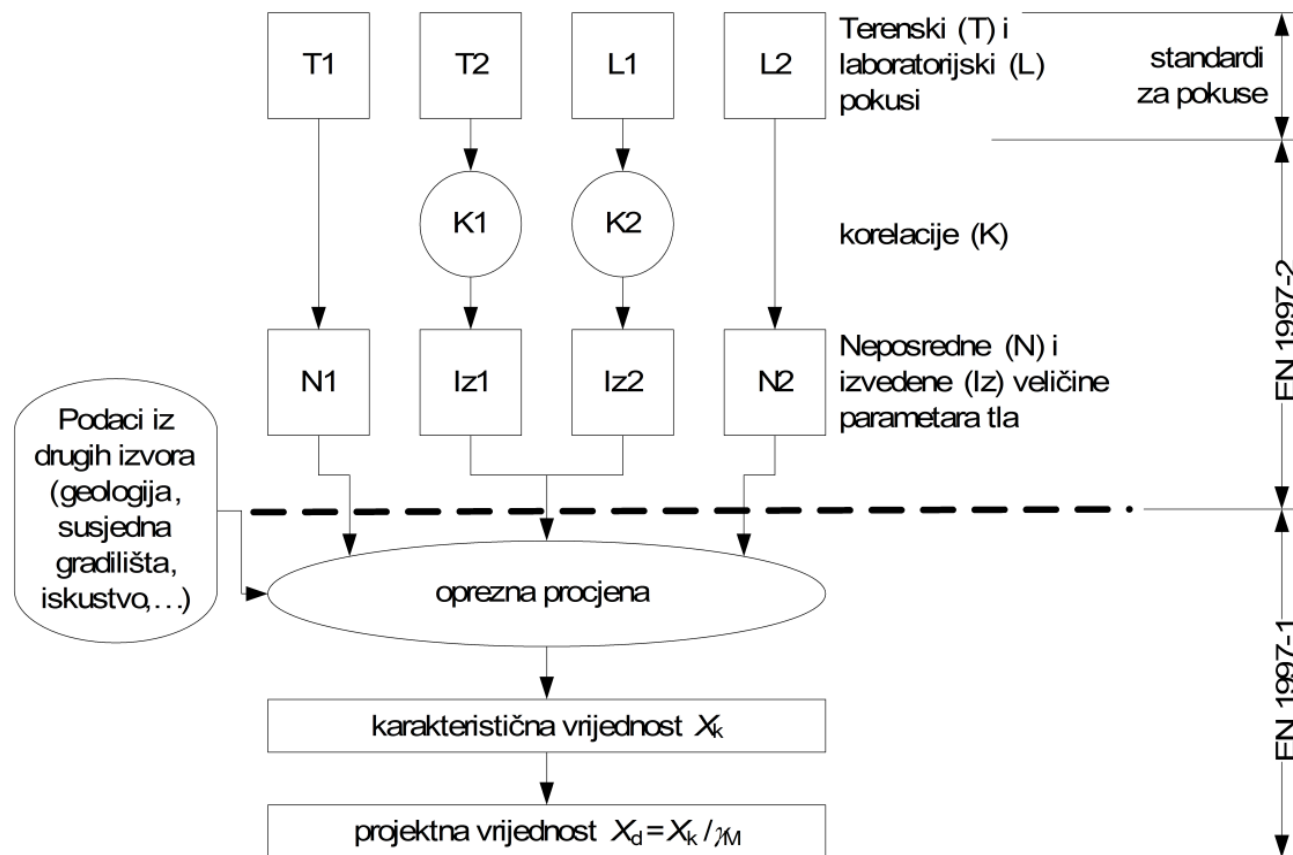
## ► Krupnozrna tla (nastavak 2)



parametar	formula	napomena
Indeks zbijenosti (relativna zbijenost), $I_D$ [%]	$I_D = \sqrt{\frac{(N_1)_{60}}{60}}$ $I_D = \sqrt{\frac{(q_c/(\sigma'_{v0}))}{300(OCR)^{0,2}}}$	Skempton (1986) $I_D = \frac{e_{max} - e_0}{e_{max} - e_{min}}$ ; $e_{min} \approx 0,571e_{max}$ (Poulos, 1988) Mayne et al., 2001)
Kut trenja (efektivni) pri kritičnom stanju, $\varphi_c$	$\varphi_c = 42^\circ - 17R$	$R$ je zaobljenost zrna, $R = 0,1$ za uglata zrna, a $R = 0,9$ za dobro zaobljena zrna (Santamarina & Cho, 2004); $\varphi_c$ se najčešće kreće oko $30^\circ$ .
se kreće najčešće oko Efektivni vršni kut trenja, $\varphi'_p$	$\varphi'_p = \varphi_c + (\varphi'_p - \varphi_c)$	$(\varphi'_p - \varphi_c)$ treba izabrati u ovisnosti o $I_D$ prema gornjem dijagramu (Bolton, 1986); na dijagramu je $p' = \frac{1}{3}(1 + 2K_0)\sigma'_{v0}$ ; za $K_0 \approx 0,5$ slijedi $p' \approx 0,7\sigma'_{v0}$
Kut dilatancije, $\psi'$	$\psi' \approx 1,25(\varphi' - \varphi_c)$	(Bolton, 1986); u praksi se najčešće zanemaruje ili se pretpostavi $\psi' = 0$

# Izbor karakterističnih vrijednosti parametara tla

Prema Eurocode 7-2 (HRN EN 1997-2)





(nastavak)

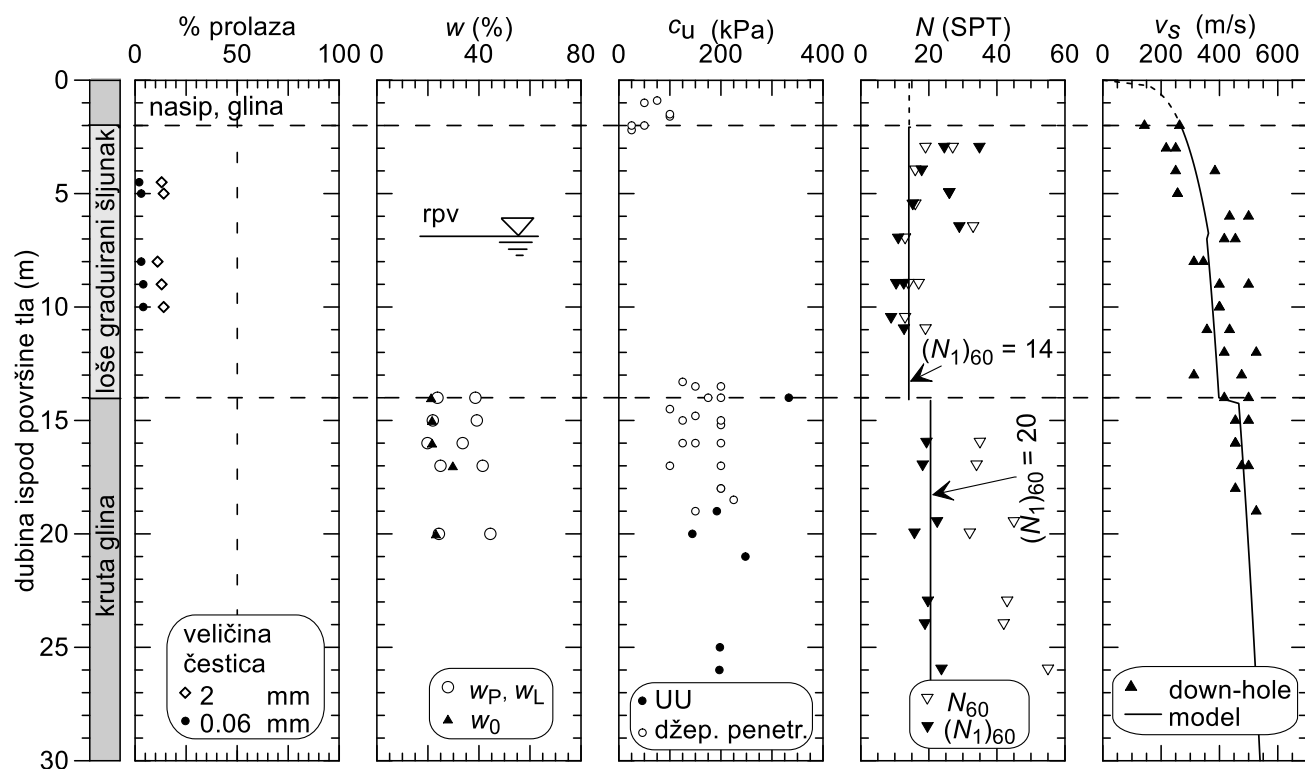
- ▶ Karakteristične ( $X_k$ ) i srednje ( $X_s$ ) vrijednosti parametara tla (Orr & Farell 1999)

Parametar tla ( $X$ )	simbol	$X_k/X_s$
tangens efektivnog kuta trenja	$\tan \varphi'$	0,95
Efektivna kohezija	$c'$	0,80
Nedrenirana čvrstoća	$c_u$	0,85
Edometarski modul	$E_{oed}$	0,80
gustoća	$\rho$	1,00

- ▶ **Poželjna redundantnost** u ispitivanjima svojstava temeljnog tla: bitne parametre poželjno je procijeniti iz barem dvije nezavisne vrste ispitivanja!

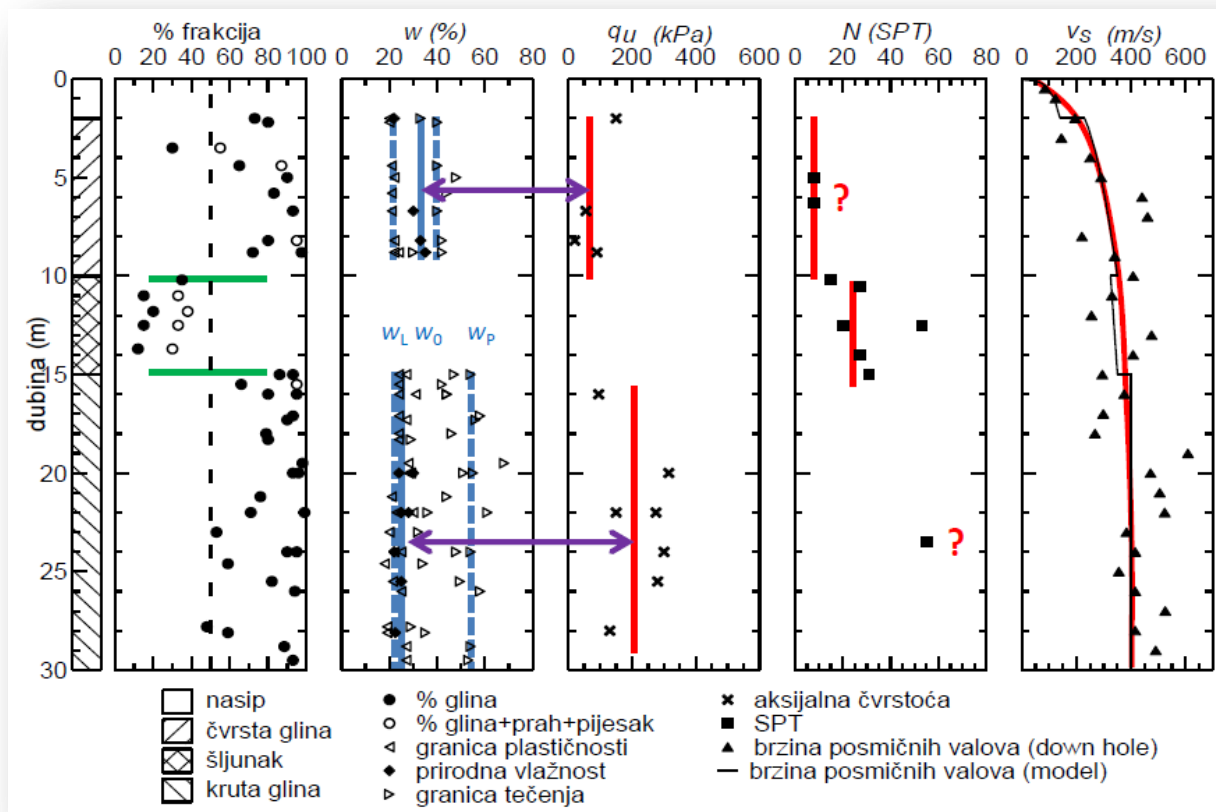
# Primjeri s komentarima

- Građevne jame (prema Szavits–Nossan, 2008; Szavits–Nossan et al., 2009)



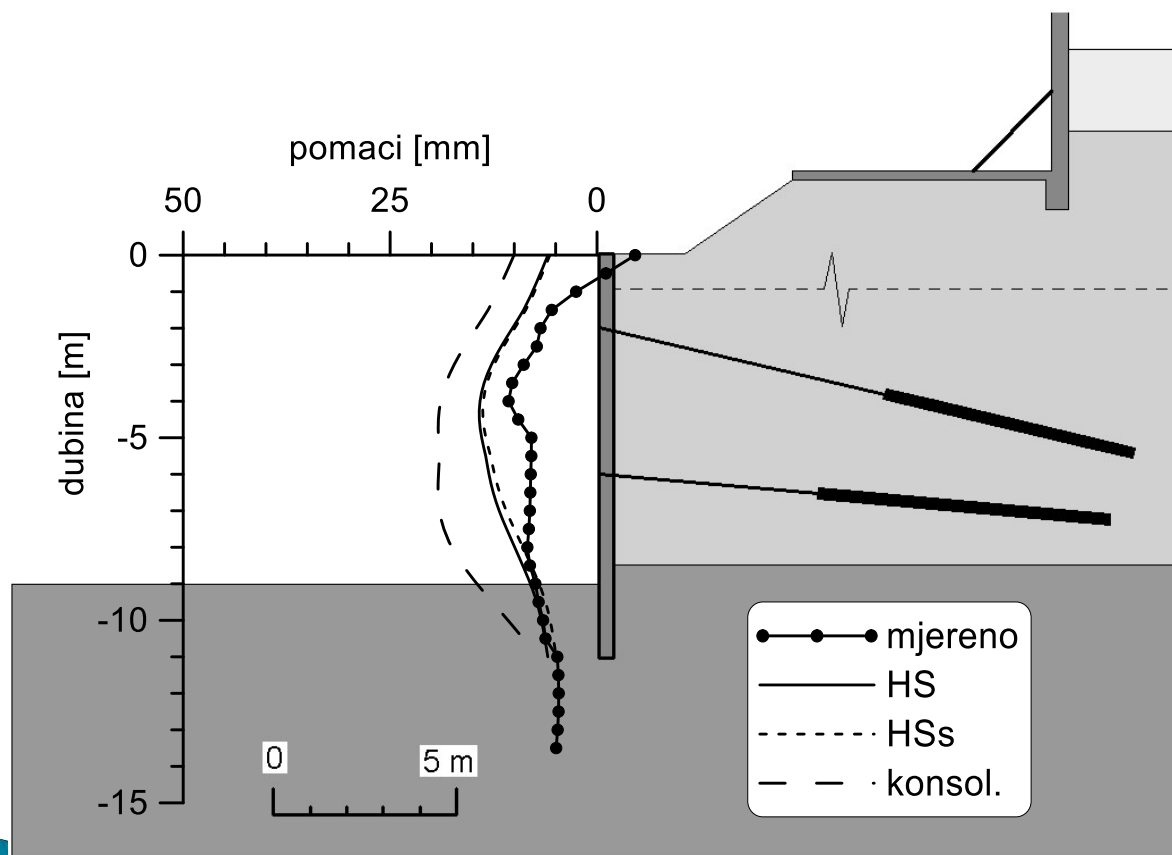
(nastavak)

► Građevna jama (nastavak 1)



(nastavak)

► Građevna jama (nastavak 2)



Potvrđena ranija korelacija za parametre krutosti  $H_s$ -small modela iz programa Plaxis na tri izvedene i opažane građevne jame u Zagrebu:

$$E_{50}^{ref} [MPa] = 5(N_1)_{60}$$
$$G_0^{ref} [MPa] = 15(N_1)_{60}$$

(nastavak)

► Nova Zagrebačka obala u luci Rijeka

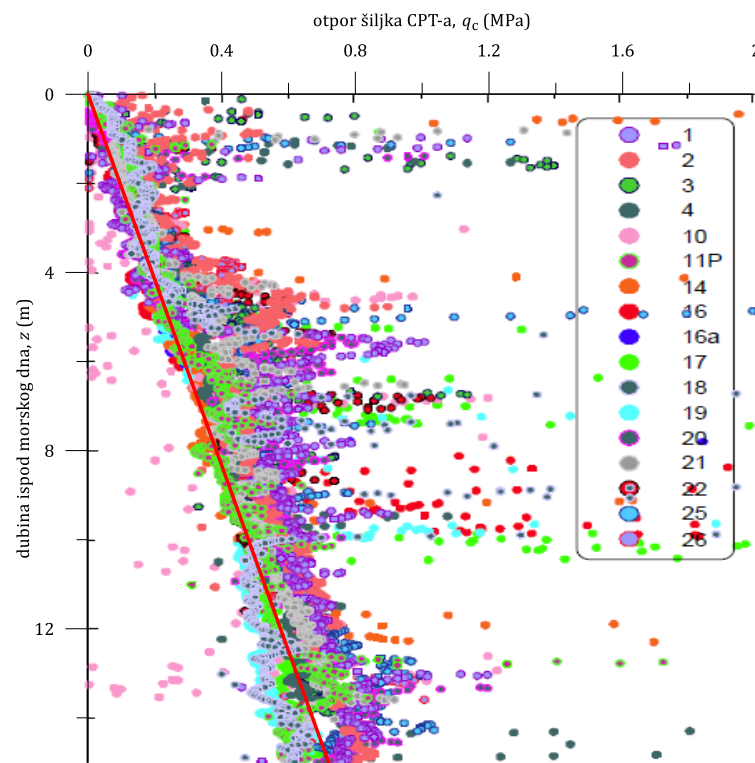


Vrlo mekana do mekana prašinsta do  
pjeskovita glina niskoplastična glina

$$q_c [MPa] = 0,048 z [m]$$

$$\sigma'_{v0} [MPa] \approx 0,02 z [m]$$

$$c_u [MPa] = \frac{q_c - \sigma'_{v0}}{N_k} = 0,002 z [m] ; N_k = 14$$



Faza 1 CPT podaci (Lankelma, prema GCG-UK 2010, Sl. 11.1.3)

—  $q_c \text{ (MPa)} = 0.048 z \text{ (m)}$



# Zaključci

- ▶ Metodologija – Eurokod 7
- ▶ Praksa u Hrvatskoj, ali i šire, ne slijedi nažalost uvijek tu metodologiju!
- ▶ Posljedice uzrokovane nedostatnim i neodgovarajućim istražnim radovima te isto takvom njihovom interpretacijom mogu biti vrlo skupe!
- ▶ Velika odgovornost geotehničkih projektanata da se izbere za ispravan pristup!

# Reference

- Bjerrum, L. (1972). Embankments on soft ground. *Proc. ASCE Speciality Conf. on Performance of Earth and Earth Supported Structures*, Purdue University, USA, 2:1–54.
- Bolton, M.D. (1986). The strength and dilatancy of sands. *Géotechnique*, 36(1): 65–78.
- Clayton, C.R.I. (1995). *The standard penetration test (SPT): Methods and use*. Report 143, CIRIA, London. 144 p.
- Gazetas, G. (1991). Foundation Vibrations. In: *Foundation Engineering Handbook*, 2nd Edition, (Ed.: H.–Y. Fang). Chapman–Hall, New York. 553–593.
- Hatanaka, M., Uchida, (1996). Empirical correlation between penetration resistance and effective friction angle for sandy soils. *Soils and Foundations*, 36(4): 1–9.
- HRN EN 1997–2:2012. Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 2. dio: Istraživanje i ispitivanje temeljnog tla. 165 str.
- Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., & Lancellotta, R. (1985). New developments in field and laboratory testing of soils. Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1. Rotterdam, the Netherlands: A. A. Balkema. 57–153.
- Kulhawy, F.H., Mayne, P.W. (1990). Manual on estimating soil properties for foundation design. *Report EPRI EL–6800*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, 306. p.
- Liao, S.S.C., Whitman, R.V. (1985). Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(3):373–377 .
- Lunne, T., Robertson, P.K., Powell, J.J.M. (1997). *Cone penetration testing in geotechnical practice*. Blackie Academic & Professional, London. 332 p.
- Mayne, P. (2000). Enhanced geotechnical site characterization. Forth International Geotechnical Conference, Cairo University, 95–120.
- Mayne, P.W. (2005). Integrated ground behaviour: In-situ and lab tests. In Proceedings of the International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, Lyon, France, 22–24 September 2005, (eds.: Benedetto et al.). Taylor & Francis Group, London. 2:155–177.
- Mayne, P.W. (2006). Undisturbed sand strength from seismic cone tests. The 2nd James Mitchell Lecture. *Jour. Geomech and Geoengng*, 1(4): 239–258.
- Mayne, P.W. (2014). KN2: Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests. *Proceedings, 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing (CPT'14, Las Vegas)*, ISSMGE Technical Committee TC 102, Ed. Robertson P.K. and Cabal, K.I.: 47–73.
- Mayne, P.W. (2016). Evaluating effective stress parameters and undrained shear strength of soft–firm clays from CPT and DMT. *Australian Geomechanics Journal* 51(4): 27–55.
- Mayne, P., Christopher, B.R., DeJong, J. (2001). Manual of Subsurface Investigation. National Highway Institute, FHWA Publication No. FHWA NHI–01–031, Washington, DC, 305. p.
- Mitchell, J.K. (1976). *Fundamentals of soil behaviour*. John Wiley & Sons, New York.
- Orr, T. L. L., Farrell, E. R. (1999). Geotechnical Design to Eurocode 7. Springer, London.
- Poulos, S.J. (1988). Compaction control and the index unit weight. *ASTM Geotechnical Testing Journal*, 11(2): 100–108.
- Robertson, P.K. (2009). Interpretation of cone penetration test – a unified approach. *Canadian Geotechnical Journal* 46:1337–1355.
- Sabatini, P.J., Bachus, R.C., Mayne, P.W., Schneider, J.A., Zettler, T.E. (2002). *Geotechnical Engineering Circular No. 5 – Evaluation of Soil and Rock Properties*. Report No. FHWA–IF–02–034. Federal Highway Administration, Washington, DC. 386 p.
- Santamarina, J. C., Cho, G. C. (2004). Soil behaviour: The role of particle shape. *Advances in Geotechnical Engineering: The Skempton Conference*. Thomas Telford, London, Vol. 1, 604–617.
- Schmertmann, J. H. (1953). Estimating the true consolidation behaviour of clay from laboratory test results. *Trans. ASCE*, 79, Separate No. 311.
- Schneid, F. (2009). *In situ testing in geomechanics – the main tests*. Taylor & Francis, Oxon, UK. 329 p.
- Simons, N., Menzies, B. (2001). *A short course in foundation Engineering*. Thomas Telford, London. 352 p.
- Skempton, A.W. (1957). Discussion. *Proceedings, Institution of Civil Engineers*, 7:305–307.
- Skempton, A.W. (1986). SPT procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, aging, and overconsolidation. *Géotechnique*, 36(3): 425–447.
- Szavits–Nossan, A. (2008). Advances and uncertainties in the design of anchored retaining walls using numerical modelling. *Acta Geotechnica Slovenica*, 5(1): 4–19.
- Szavits–Nossan, A., Sokolić, I., Plepelić, G. (2009). Design of anchored retaining structures by numerical modelling. *Proc. XVII ICSMGE*, Alexandria, Egypt. (M. Hamza et al. Eds.). IOS Press: 1381–1384.
- Terzaghi, K, Peck, R.B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd Edition, Wiley, New York.
- Wroth, C.P. (1984). The interpretation of in situ soil tests. *Géotechnique*, 34(4): 449–489.