

PRIMIJENJENA MEHANIKA TLA

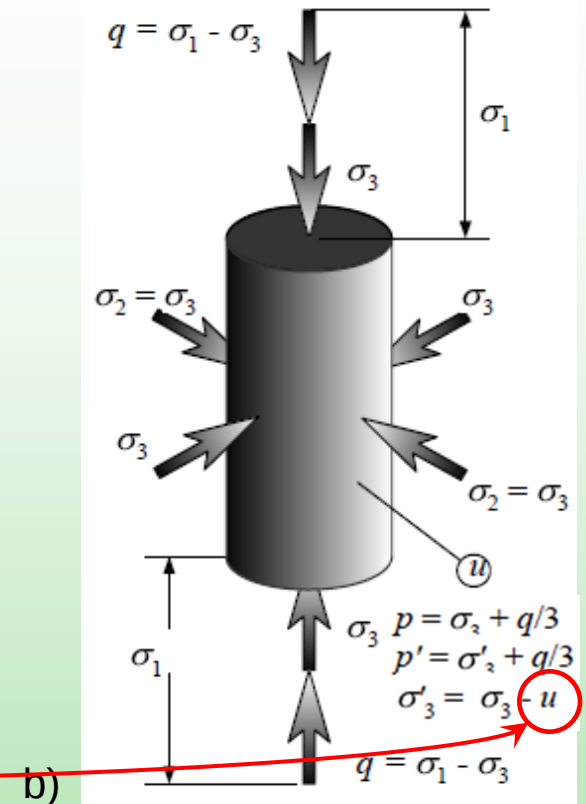
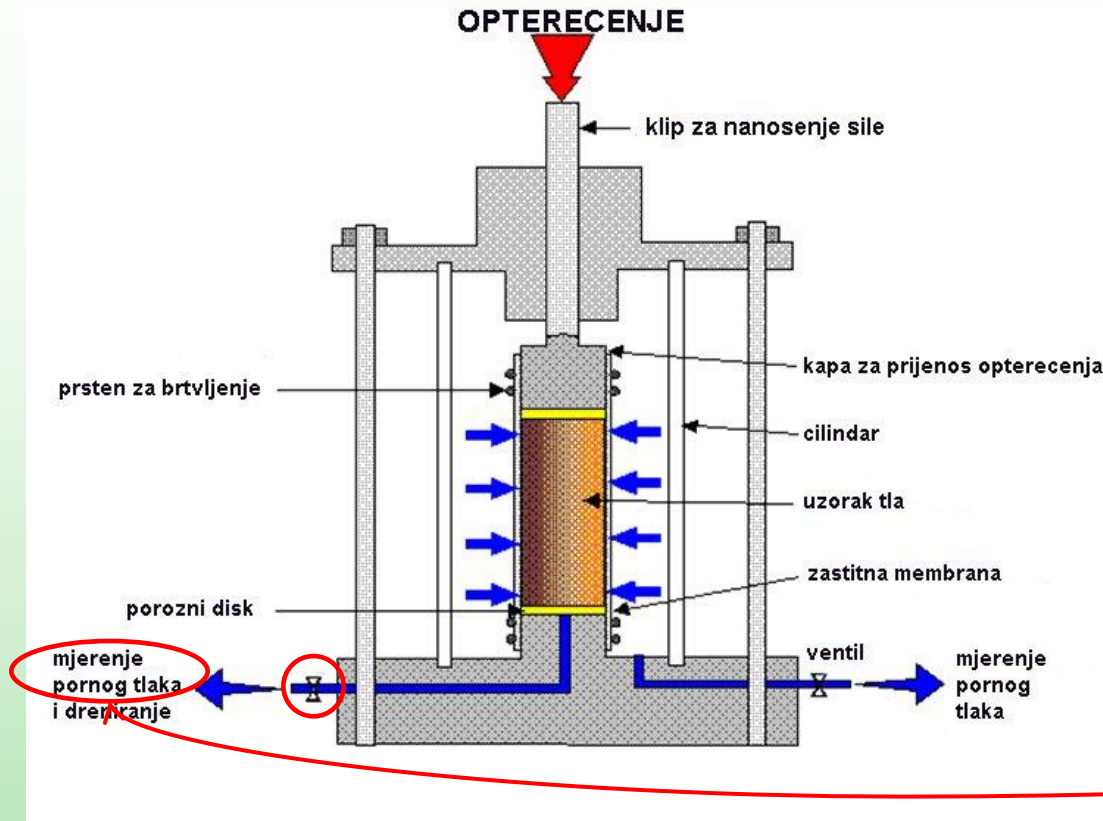
(III . predavanje)

SADRŽAJ

- nedrenirani konsolidirani troosni pokus CIU
- ponašanje pijeska u troosnom CIU pokusu
- kritično stanje – likvefakcija
- nedrenirana čvrstoća pijeska
- rezultati CIU pokusa za Erksak pijesak

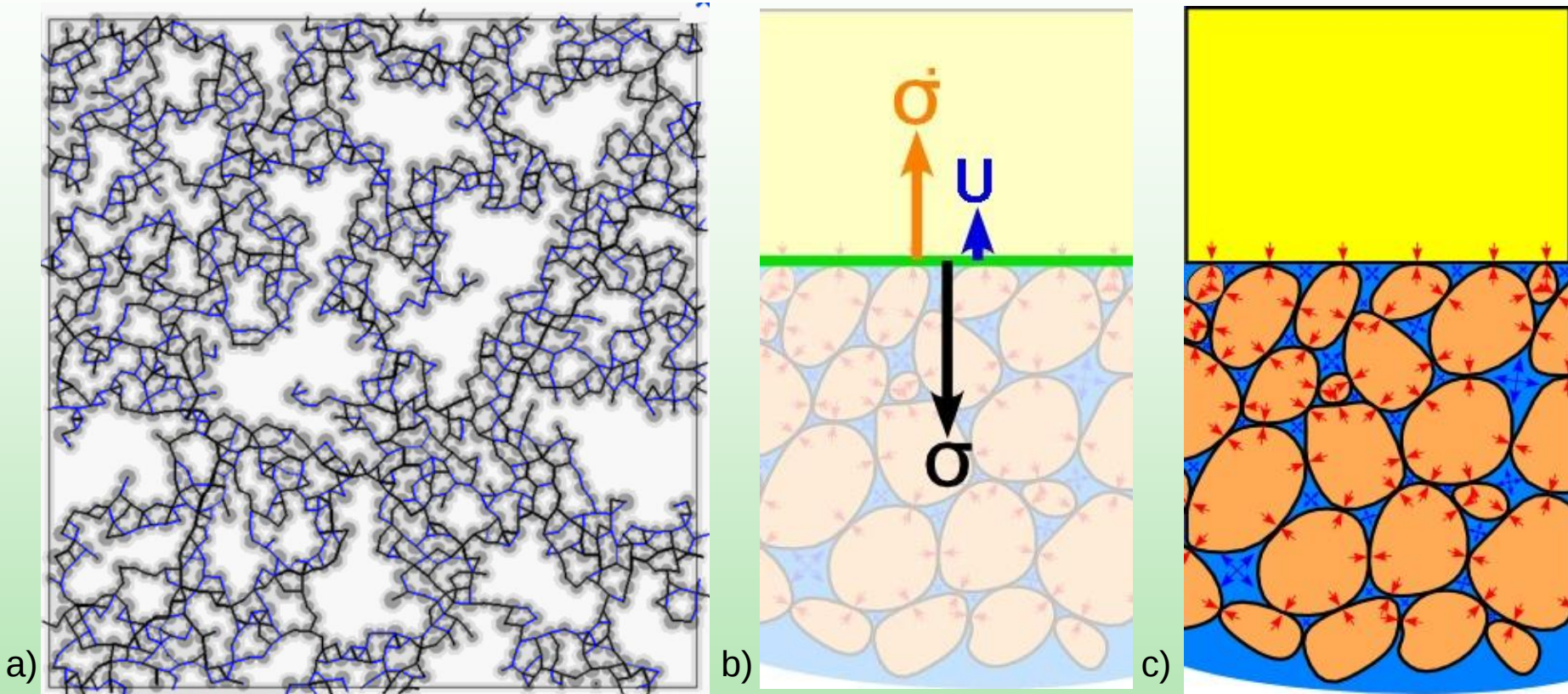


NEDRENIRANI TROOSNI POKUS - CIU



Izotropno konsolidirani nedrenirani troosni pokus (CIU) provodi se u dvije faze. Prva faza je izotropna konsolidacija u dreniranim uvjetima (isto kao u u CID pokusu). U drugoj fazi zatvara se ventil drena (spriječeno dreniranje uzorka) te se nameće vertikalno opterećenje do sloma uzorka. Prilikom pokusa se mjeri deformacija uzorka, vertikalno opterećenje te promjena pornog tlaka u uzorku. a) prikaz troosnog uređaja; b) stanje naprezanja u uzorku (princip efektivnih naprezanja).

NEDRENIRANI UVJETI U TLU



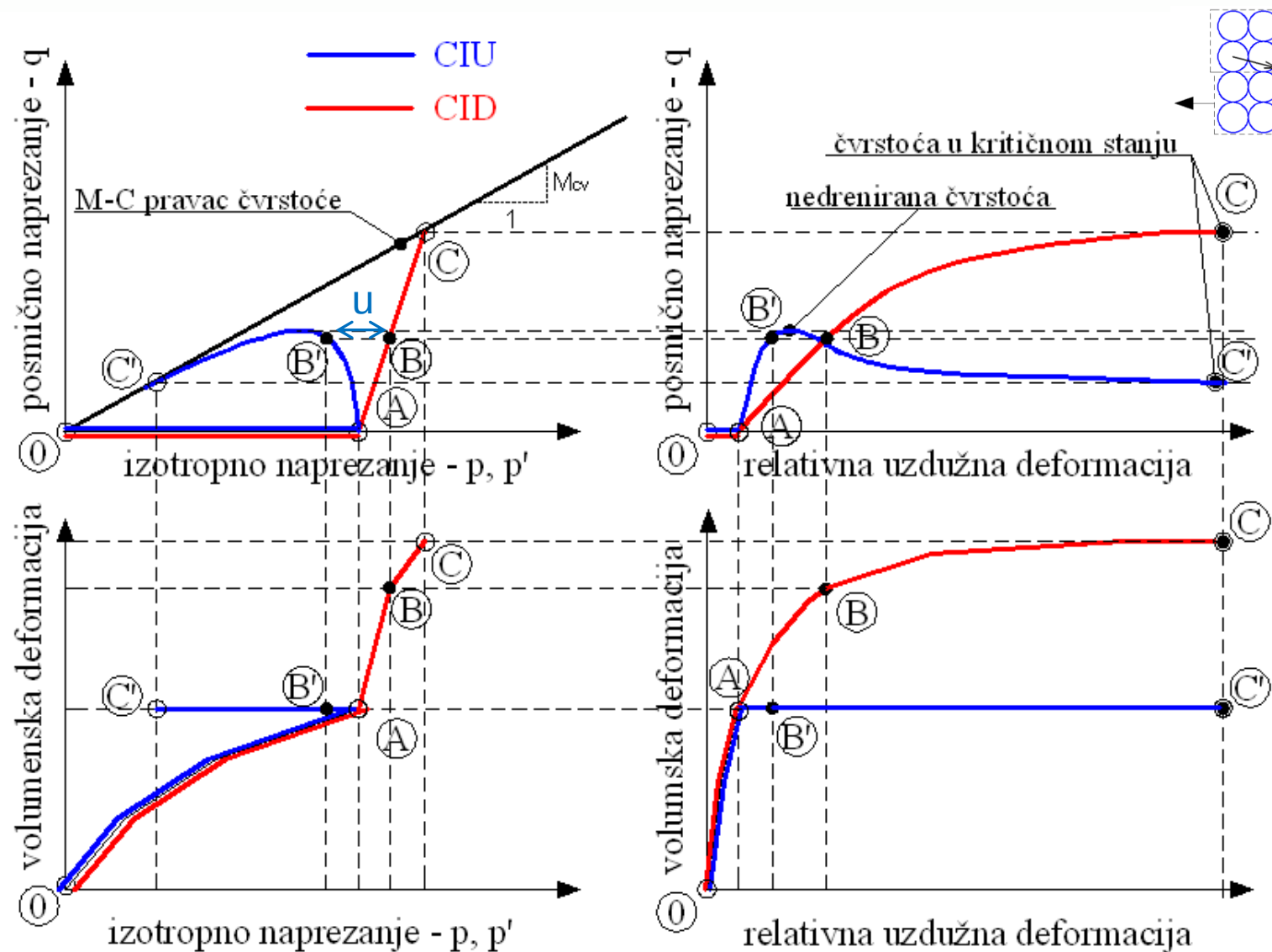
- a) Kompresija modela tla u dreniranim uvjetima (zrnata struktura – skelet tla;
b) princip efektivnih naprezanja: $\sigma' = \sigma - u$;
c) shematski prikaz stanja naprezanja u saturiranom tlu

NEDRENIRANI UVJETI U TLU

UTJECAJ VODE U ZASIĆENOM (SATURIRANOM) TLU:

- Čestice tla su krute
- Skelet čestica je deformabilan (promjena volumena tla = promjena volumena pora)
- Voda je kruta s obzirom na promjenu volumena, a mekana s obzirom na promjenu oblika – smicanje
- Vrijedi princip efektivnih naprezanja
 - a) $\sigma' = \sigma - u; \tau' = \tau$ ili $p' = p - u; q' = q$
 - b) otpor deformaciji skeleta čestica su efektivna naprezanja!
- Stanje dreniranja ograničava promjenu volumena tla (jer ograničava promjenu volumena pora)

USPOREDBA CID I CIU TROOSNOG POKUSA



USPOREDBA CID I CIU TROOSNOG POKUSA

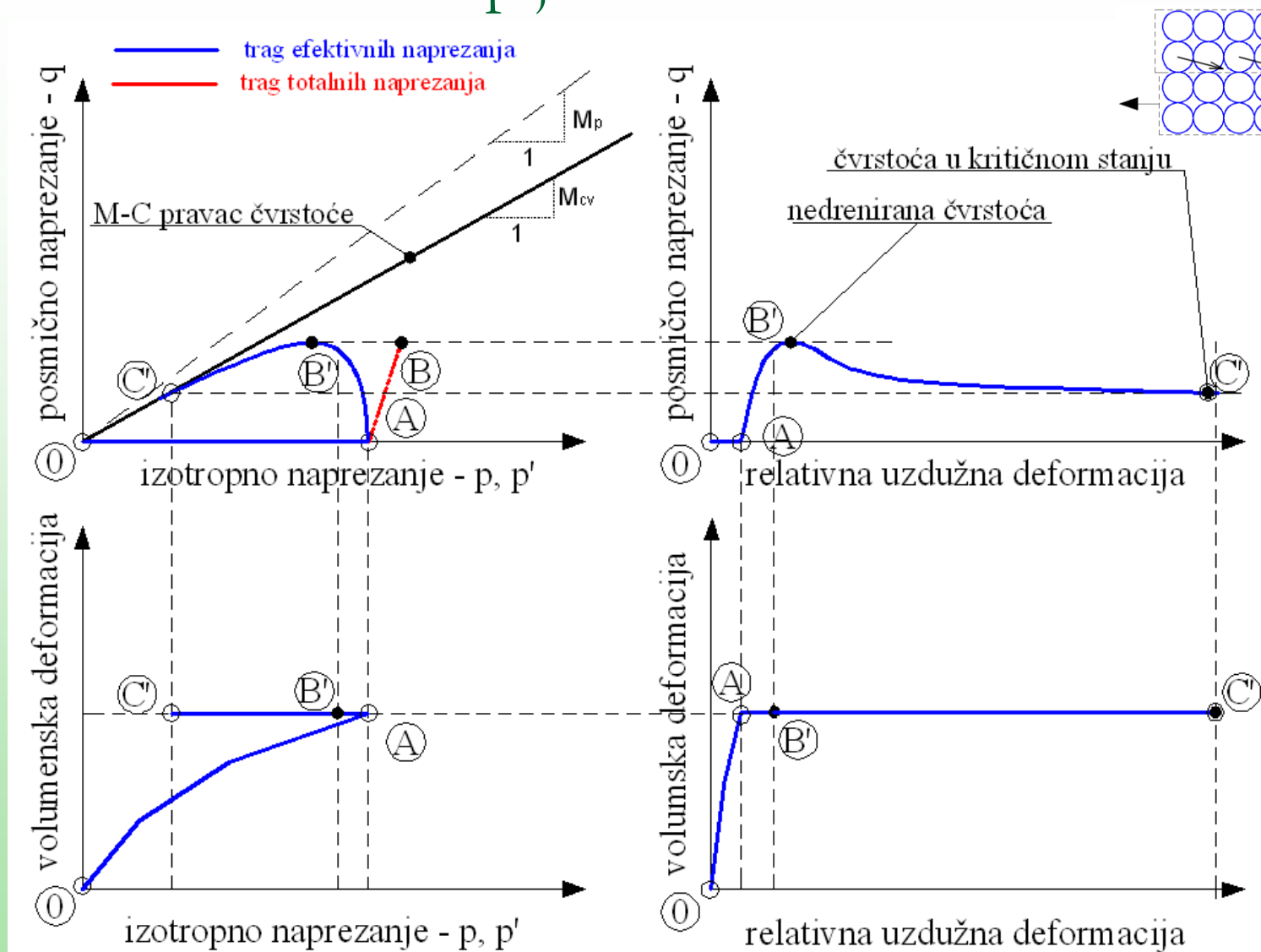
KARAKTERISTIKA	POKUS	
	CID	CIU
I. faza pokusa IZOTROPNA KONSOLIDACIJA	- izotropno naprezanje raste monotono do zadanog σ_{3c} $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ - dren otvoren tokom konsolidacije $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_{3c}$; $u = 0$ (u_b – povratni tlak)	
II. faza pokusa SMICANJE	CID	CIU
$\sigma_2 = \sigma_3$	konstantno	konstantno
ε_1 ; σ_1	raste ; raste	raste ; raste
dren	otvoren	zatvoren
porni tlak - u	$u = 0$ (ako je brzina smicanja dovoljno mala tako da je stupanj konsolidacije 100%)	općenito $u \neq 0$ (mjeri se tokom pokusa)
volumen (ε_v) σ'_1 ; $\sigma'_2 = \sigma'_3$	mijenja se $\sigma'_1 = \sigma_1$ $\sigma'_2 = \sigma'_3 = \sigma_2 = \sigma_3$	konstantan $\sigma'_1 = \sigma_1 - u$ $\sigma'_2 = \sigma'_3 = \sigma_2 - u = \sigma_3 - u$

USPOREDBA CID I CIU TROOSNOG POKUSA

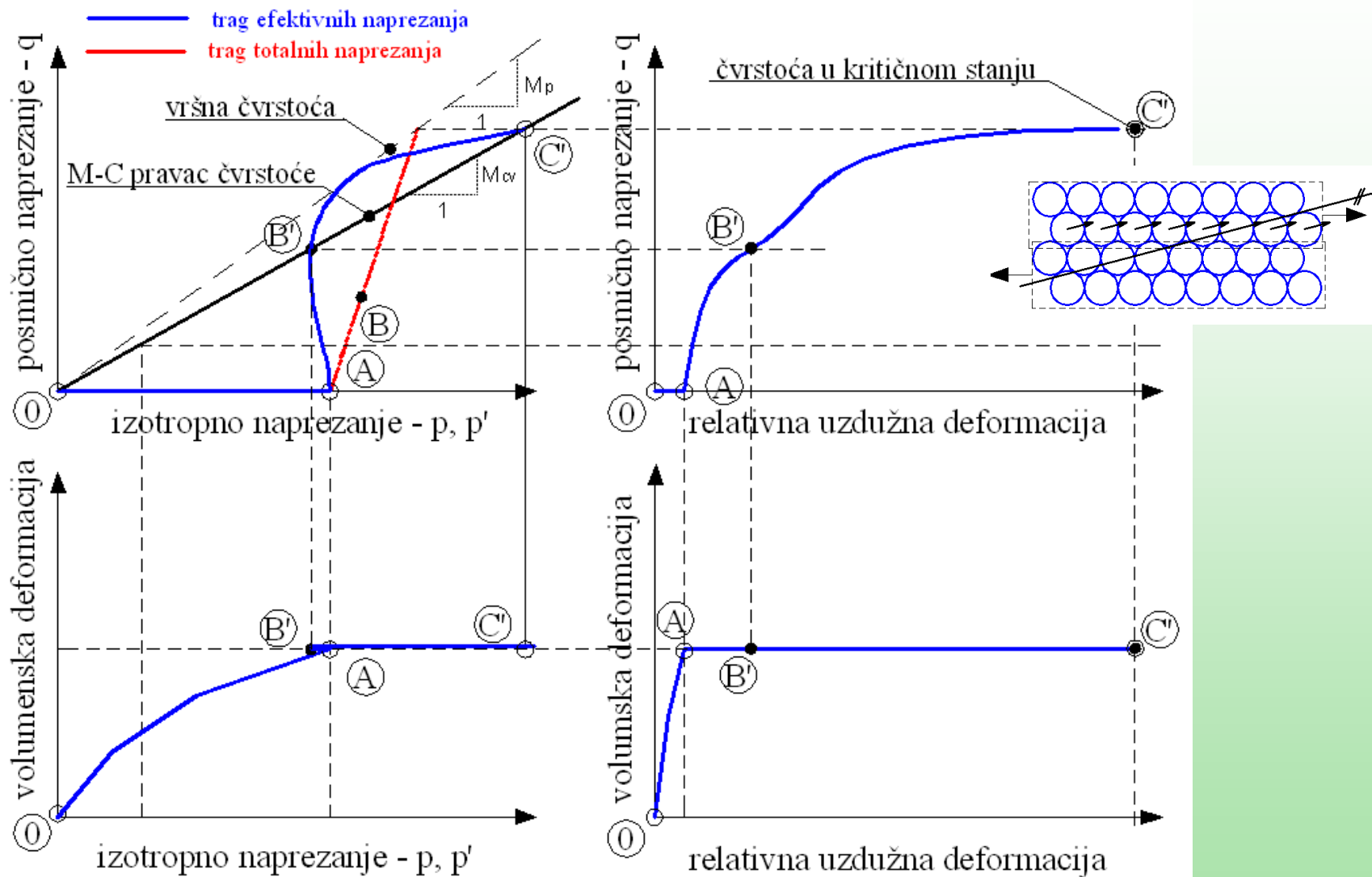
ZAKLJUČCI ZA FAZU SMICANJA U NEDRENIRANOM POKUSU:

- Ako u dreniranom pokusu uzorak smanjuje volumen, u nedreniranom će smanjivati efektivno izotropno naprezanje p' (raste porni pritisak - u), kako bi se ostvario uvjet konstantnog volumena ($\varepsilon_v = \text{konst.}$)
- Ako u dreniranom pokusu uzorak povećava volumen, u nedreniranom će povećavati efektivno izotropno naprezanje p' (smanjuje se porni pritisak - u), kako bi se ostvario uvjet konstantnog volumena ($\varepsilon_v = \text{konst.}$)
- Krutosti ($\delta q / \delta \varepsilon_1$ ili q / ε_1) u dreniranom i nedreniranom pokusu neće biti jednake. Ako u dreniranom pokusu uzorak smanjuje volumen u nedreniranom će pokusu krutost biti veća od one u dreniranim uvjetima. Obratno će vrijediti ako u dreniranim uvjetima uzorak povećava volumen.

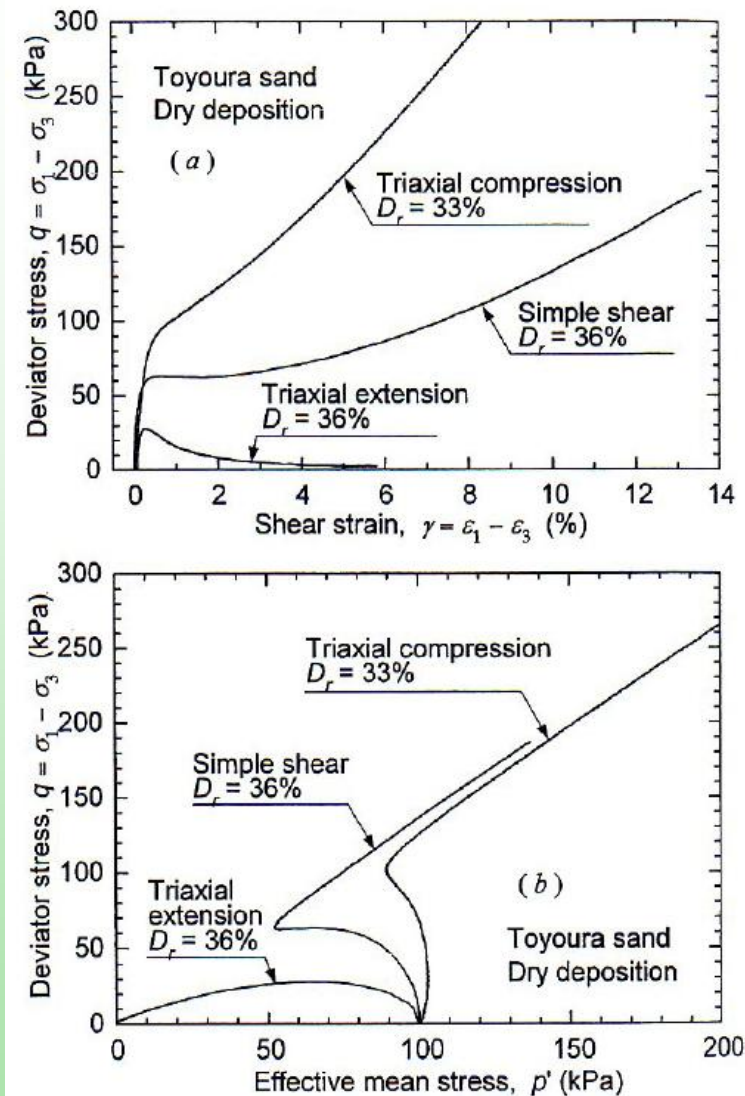
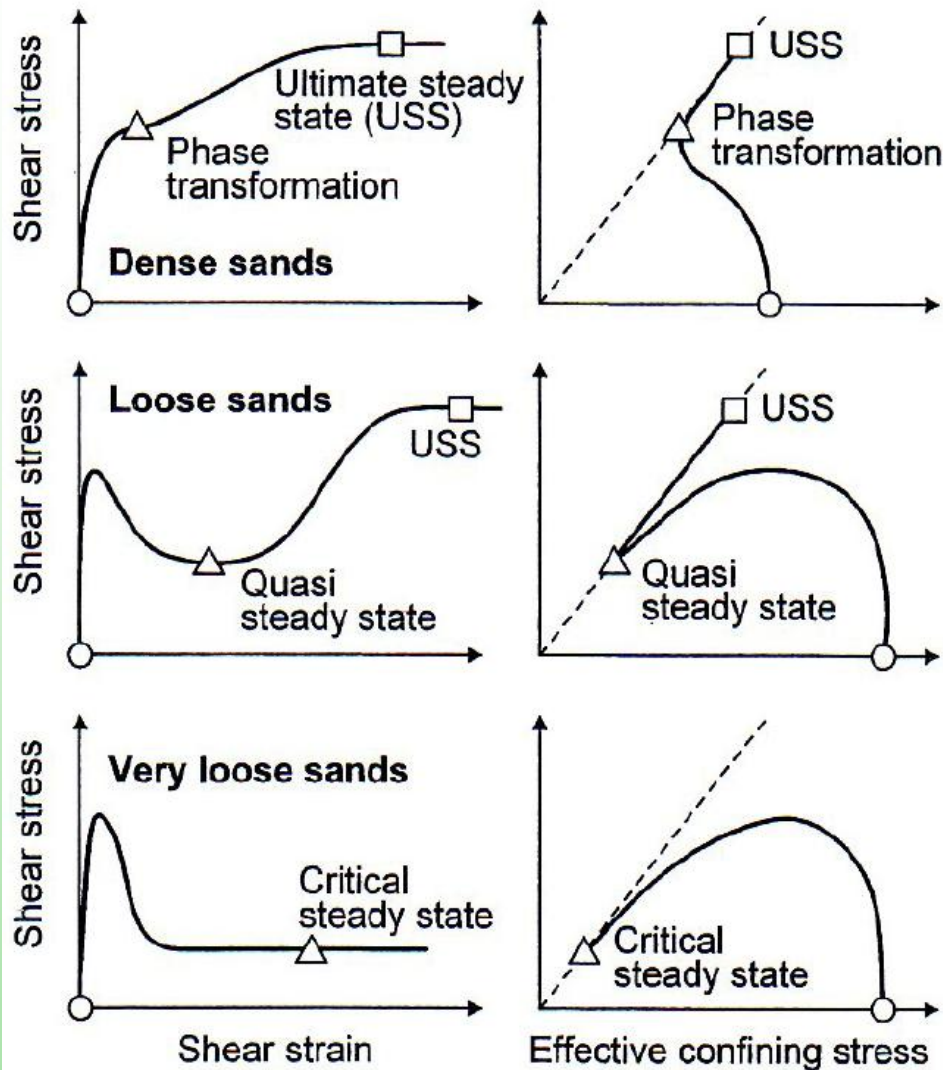
CIU POKUS – rahli pijesak



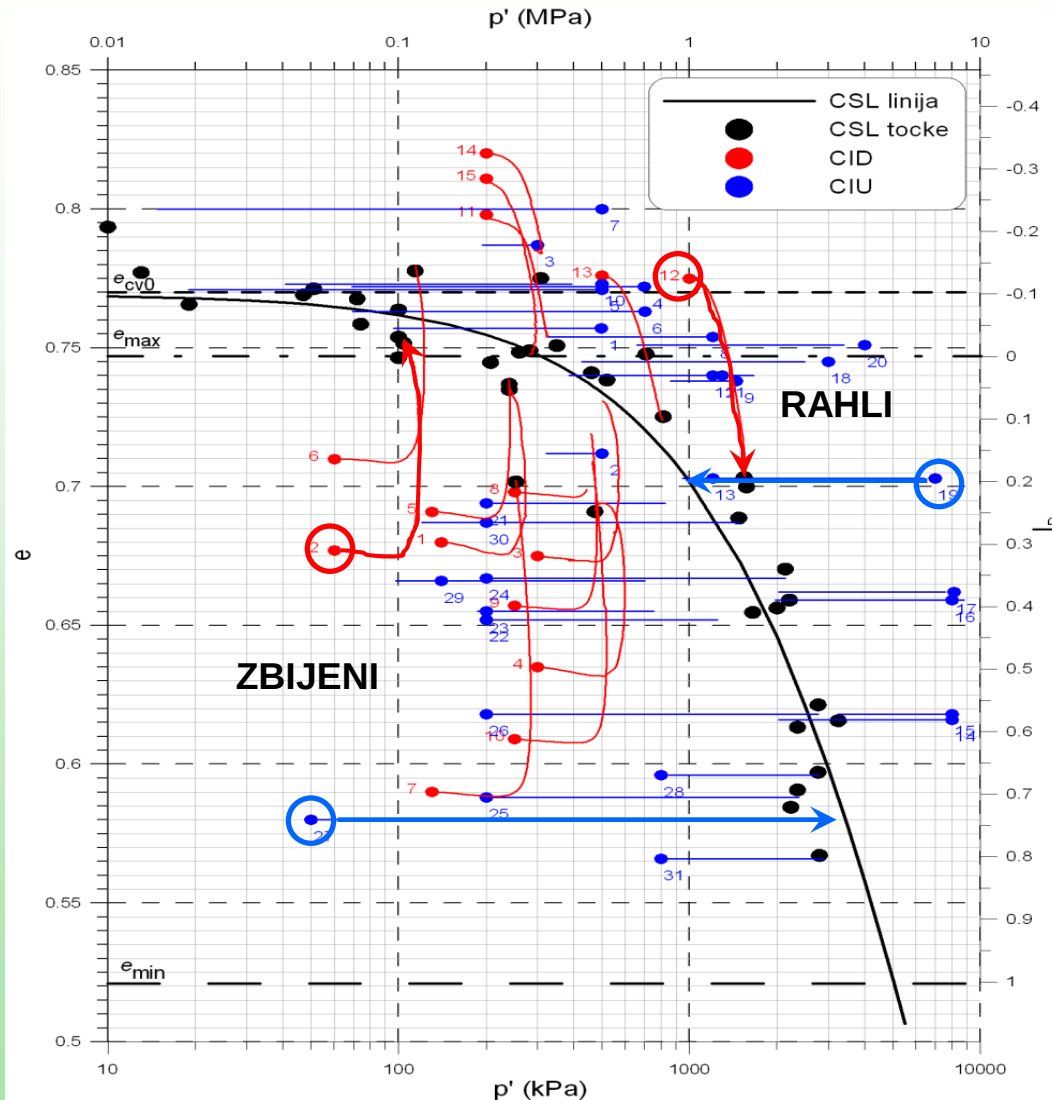
CIU POKUS – zbijeni pijesak



CIU POKUS – uzorci različite početne zbijenosti



SMICANJE U CID I CIU POKUSU – dijagram $\log p'/e$



SMICANJE U TROOSNOM POKUSU:

ZBIJENI UZORCI PIJESKA:

Prilikom smicanja zbijenih uzoraka pijeska u troosnom pokusu:

- u dreniranim uvjetima (CID pokus) uzorak povećava volumen (dilatira)
- u nedreniranim uvjetima (CIU) raste efektivno izotropno naprežanje p' (raste čvrstoća)

RAHLI UZORCI PIJESKA:

Prilikom smicanja rahlih uzoraka pijeska u troosnom pokusu:

- u dreniranim uvjetima (CID pokus) uzorak smanjuje volumen (kontrakcija)
- u nedreniranim uvjetima (CIU) smanjuje se efektivno izotropno naprežanje p' (opada čvrstoća)

PONAŠANJE PIJESKA – CID pokus

Osnovni elementi ponašanja pijeska u nedreniranim uvjetima prikazani su na prethodnim stranama. Na dijagramu promjene efektivnog izotropnog naprezanja idi se da kod rahlih uzoraka opada naprezanja p' (raste potrni tlak u), dok je kod zbijenih uzoraka obrnuto. Zbog promjene efektivnog naprezanja dolazi do promjene čvrstoće (rahli uzorci smanjuju čvrstoću, a zbijeni povećavaju), te uzorak postepeno teži u kritično stanje. Pri tome je volumen uzorka konstantan.

Trag efektivnih naprezanja kod rahlih uzoraka dostiže maksimalnu nedreniranu čvrstoću, nakon čega ona postepeno opada, dok se kod zbijenog uzorka javlja pojava očvršćivanja materijala. Oblik traga efektivnog naprezanja usko je povezan sa pojavom dilatacije pijeska koja se javlja uslijed smicanja.

Pojava smanjenja čvrstoće pijeska u nedreniranim uvjetima može dovesti do vrlo nepovoljnih događaja kao što su: rušenje pokosa brana, slom temeljnog tla, aktiviranje klizišta i sl. Navedene pojave javljaju se pri brzoj promjeni opterećenja (potresno opterećenje, nailaženje vodenog vala i sl.). Posljedice mogu biti katastrofalne, jer nakon dosizanja vršne čvrstoće, dolazi do naglog sloma i progresivnog smanjenja čvrstoće do vrlo niskih vrijednosti u kritičnom stanju. Navedena pojava naziva se Likvefakcija.

KRITIČNO STANJE - likvefakcija



Japan Earthquake - Liquefaction in Makuhashi_2.mp4

KRITIČNO STANJE - likvefakcija



[Liquefaction.mp4](#)

KRITIČNO STANJE – dinamička likvefakcija

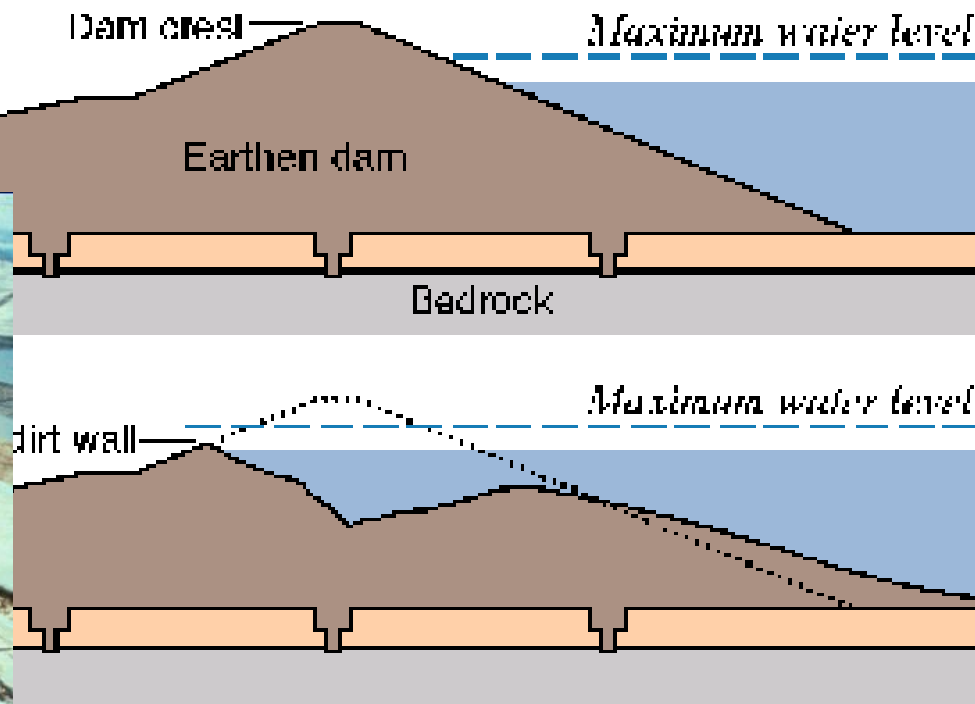
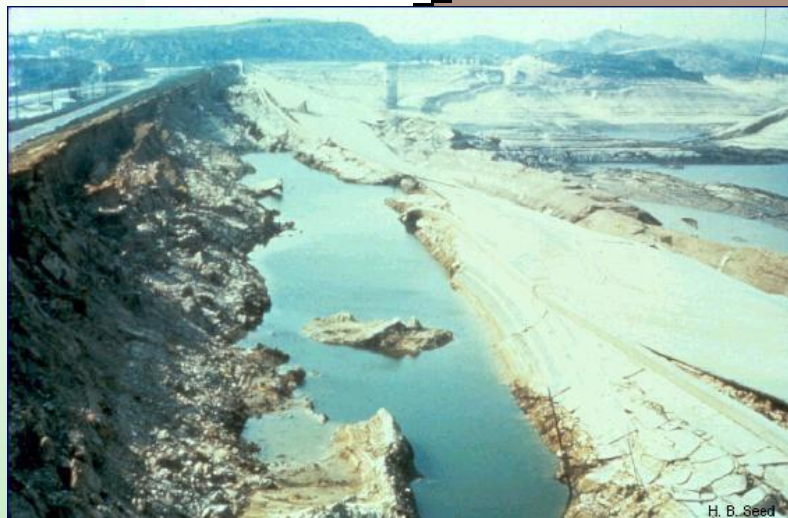


Potres koji se dogodio u Niigati 1964 god. oštetio je veliko područje na zapadnoj obali Japana. Epicentar potresa bio je udaljen oko 35 km od središta rada, a snage 7.3 prema Richterovoj skali. Grad Niigata leži na obalama rijeke Shinano, na njenom ušću u more. Geotehnički profil tla ispod grada sadrži oko naslage finog aluvijalog pijeska debljine oko 30 m. Oštećenja na objektima rezultat su pojave likvefakcije u plićim zonama tla.

Do dinamičke likvefakcije je došlo uslijed djelovanja dinamičkih sila/pomaka potresa, pri čemu se u tlu generiraju izlazni porni pritisci (excess pore pressure). Uslijed povećanja pornih pritisaka dolazi do smanjenja efektivnih naprezanja, a time i čvrstoće tla, te konačno dolazi do sloma u kritičnom stanju.

KRITIČNO STANJE – statička likvefakcija

BEFORE 1971 EARTHQUAKE



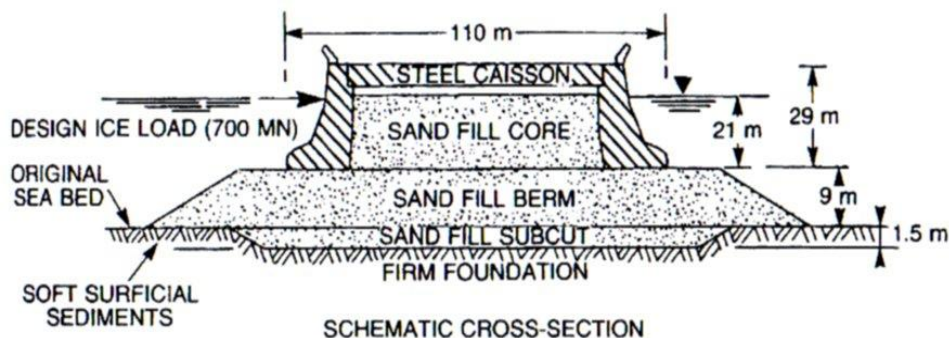
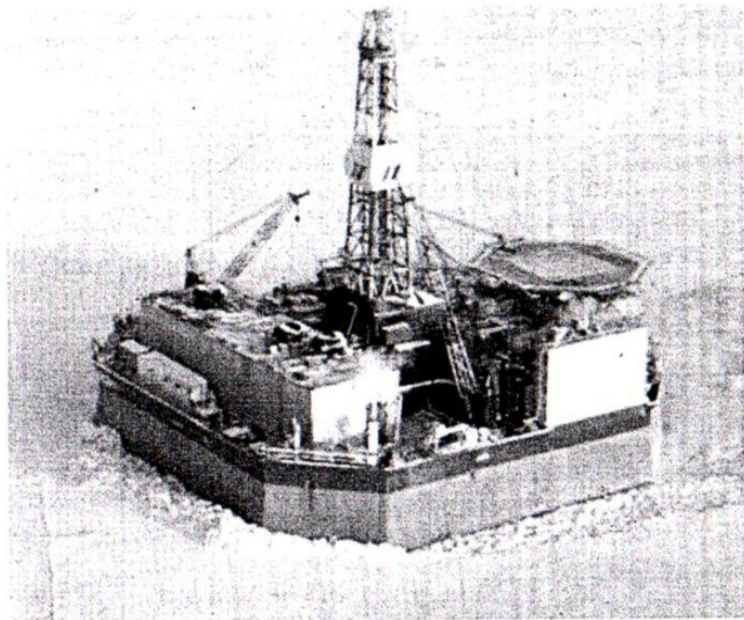
Brana Fort Peck. Urušavanje bokova brane Fort Peck predstavlja klasičan primjer pojave statičke likvefakcije (likvefakcija koja nije uzrokovana dinamičkim djelovanjem kao kod potresa, već nastaje postepenim smicanjem pijeska koji dolazi u kritično stanje). Brana visine 60 m izgrađena je hidrauličkim nasipavanjem pijeska, šljunka i praha, a do urušavanja je došlo uskoro nakon izgradnje brane 1938 god. Zbijenost tla iznosila je oko 45-50%, početni nagibi pokosa 1:4, a nagib pokosa nakon sloma 1:20. Nakon brane Fort Peck, u praksu je uvedeno zbijanje nasipa brana od pijeska.

KRITIČNO STANJE – ‘statička’ likvefakcija



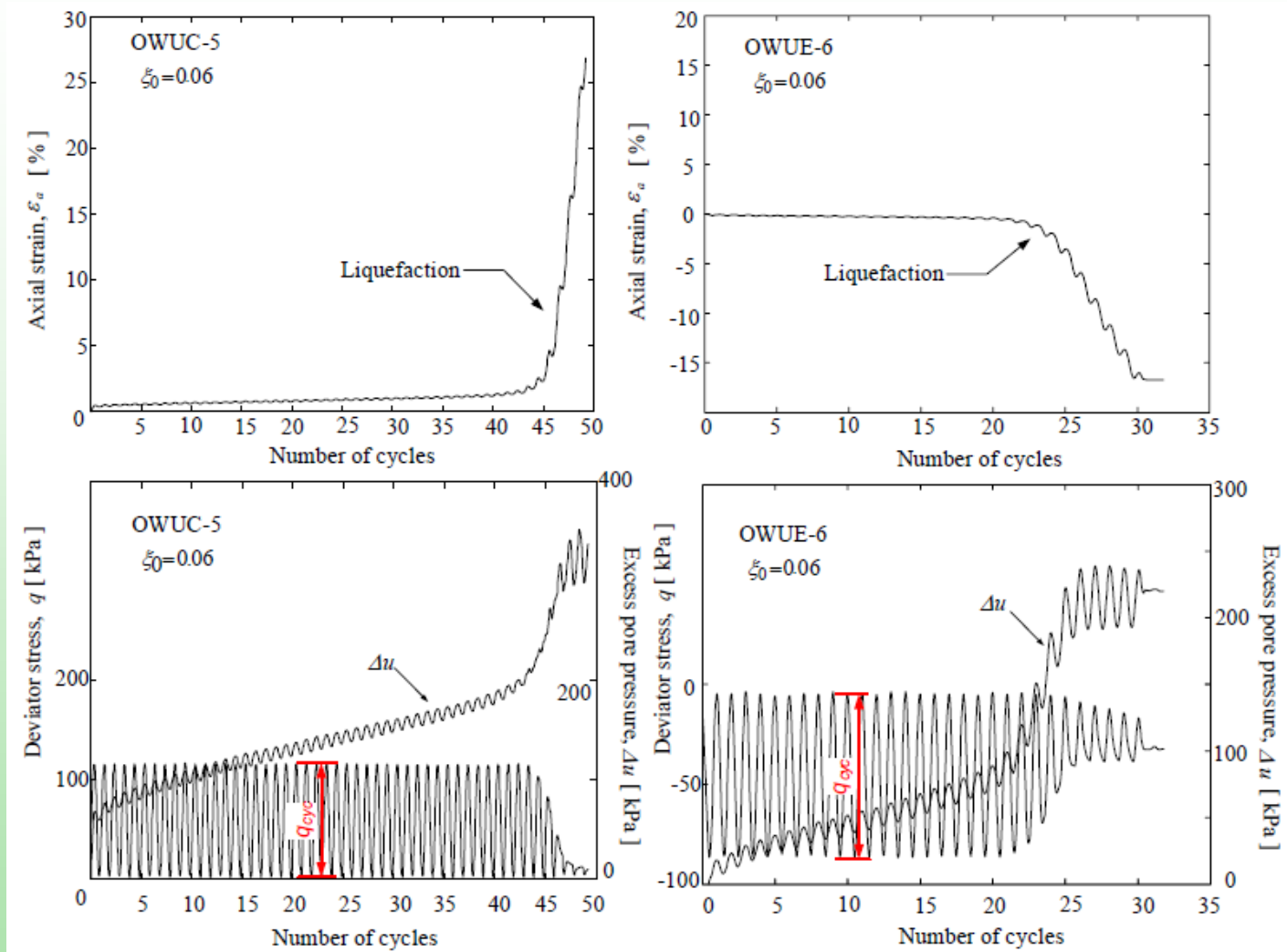
Lower San Fernando Dam. Brana San Fernando visine 43 m predstavlja glavni terminal sustava akvadukta za grad Los Angeles. Nakon potresa 1971 došlo je do urušavanja pokosa sa strane akumulacije u visini od cca. 10 m. Oštećenje je predstavljalo potencijalnu opasnost za rušenje brane čime bi bili ugroženi životi 80.000 ljudi, u dolini nizvodno od brane. Tragedija je spriječena naglim pražnjenjem akumulacije. Specifičnost mehanizma rušenja je da je do sloma došlo zbog pojave statičke likvefakcije nakon potresa, a uslijed disipacije izlaznih pornih pritisaka.

KRITIČNO STANJE – likvefakcija zbog cikličkog opt.



Platforma Amauligak I-65, Beaufort Sea. Platforma Amauligak izgrađen je od kesona ispunjenog pijeskom, koji je temeljen na nasipu od pijeska izgrađenom na morskom dnu (konstrukcija Molikpaq). U proljeće 1986 god. došlo je do oštećenja konstrukcije (slijeganje površine terena na istočnoj strani platforme za cca. 1.5 m) zbog cikličkog opterećenja uzrokovano pritiskom sante leda na bok konstrukcije. Ledena ploča dimenzija 1 x 2 km, uzrokovala je pritisak od cca 500 MN i frekvencije 0.5 do 2.0 Hz, u trajanju od 14 min (cca 900 ciklusa opterećenja). Uslijed cikličkog opterećenja došlo je do generiranja izlaznih pornih pritisaka i pojave likvefakcije u nasipu / ispuni od pijeska.

KRITIČNO STANJE – likvefakcija zbog cikličkog opt.



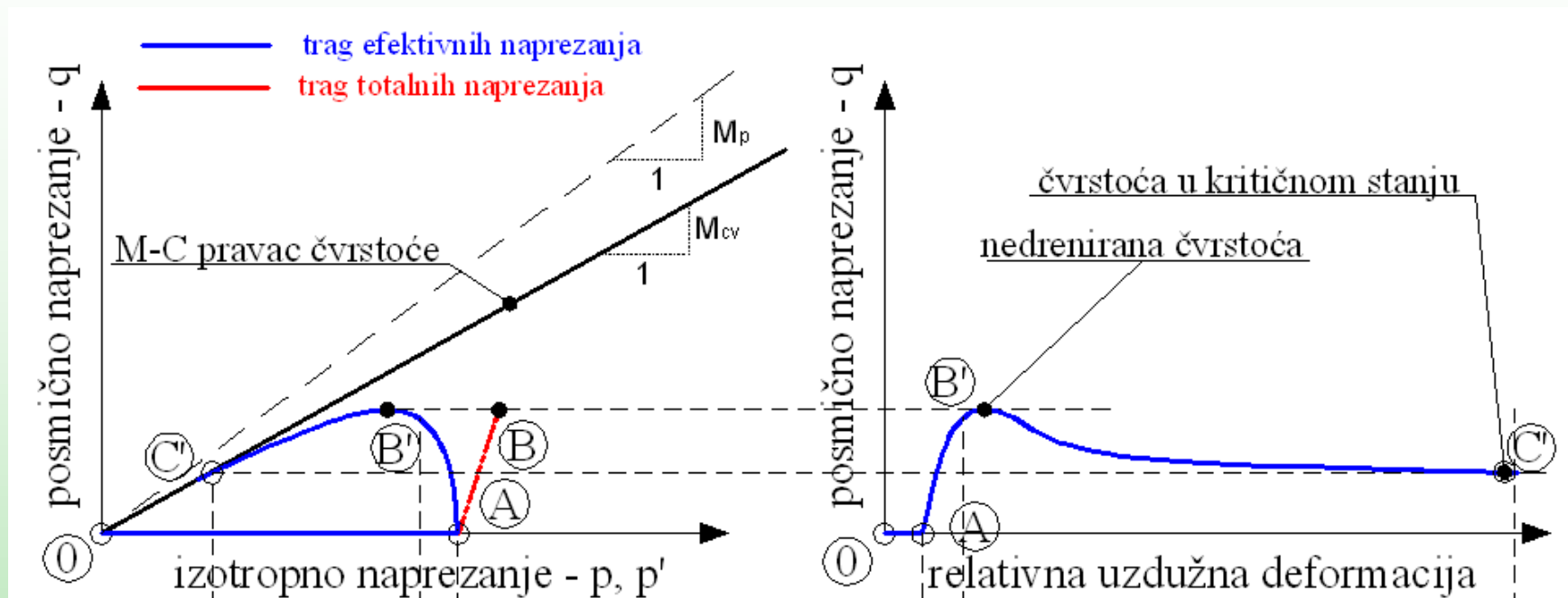
Ciklički CIU pokus (Portaway pijesak): uzdužna deformacija i porni pritisci za cikluse opterećenja

KRITIČNO STANJE – likvefakcija na deponijama



Deponija otpada iz rudnika u Aberfanu. 1966 god. došlo je do odrona na deponiji otpadnog materijala iz rudnika (jalovina) u Južnom Welsu. Posljedice su bile kobne za stanovnike naselja Aberfan u podnožju deponije, od kojih je 144 izgubilo život. Do sloma je došlo zbog pojave likvefakcije, koja je potaknuta arteškim pritiskom vode iz slojeva pješčenjaka u podlozi deponije te dinamičkim djelovanjem željeznice pri vrhu deponije. Slom tla (klizište) formirao se u podnožju padine nakon čega se u kratkom vremenu (cca 2 sata) proširio progresivno na uzbrežnoj strani. Ukupna količina materijala klizišta iznosio je oko 107.000 m³. Materijal je transportiran brzinom i do 30 km/sat. Jedinična težina jalovine iznosila je oko 15 do 17 kN/m³, a kut trenja za kritično stanje oko $\varphi_{cv}=39.5^\circ$.

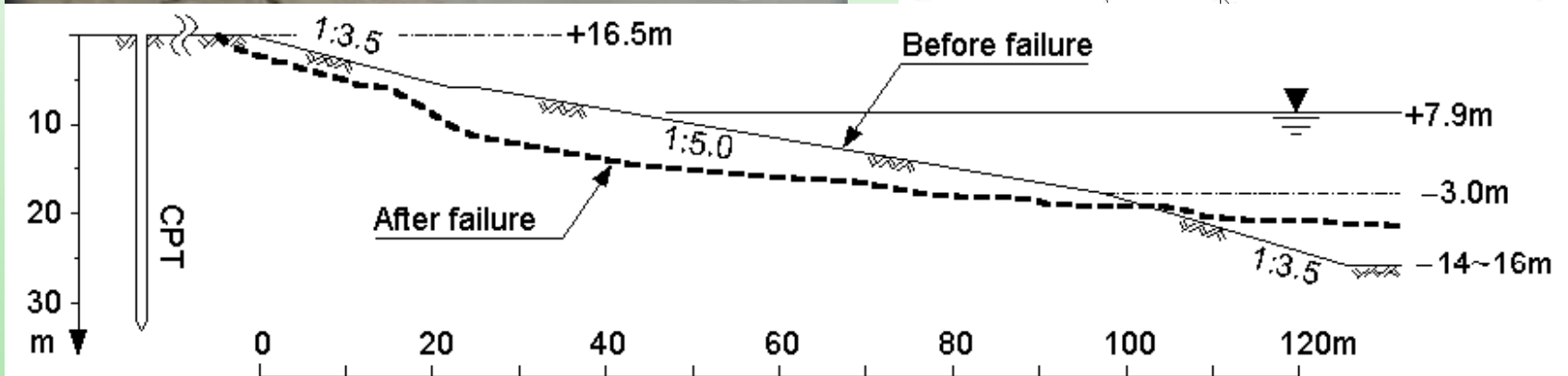
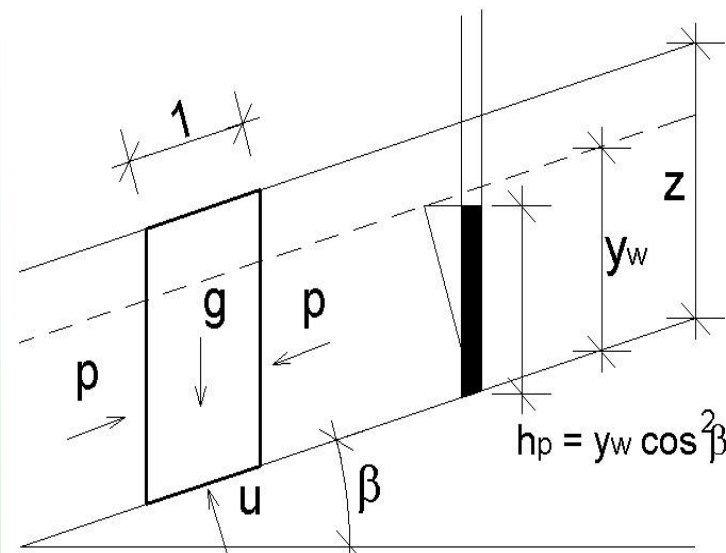
NEDRENIRANA ČVRSTOĆA PIJESKA



q_u – maksimalno devijatorsko naprezanje koje se ostvari uslijed smicanja rahlog uzorka pijeska u nedreniranim uvjetima, za početno stanje naprezanje nakon izotropne konsolidacije

$c_u = q_u / 2$ – **nedrenirana čvrstoća pijeska** za uzorak koji se smiče iz početnog stanja (p'_0, e_0)

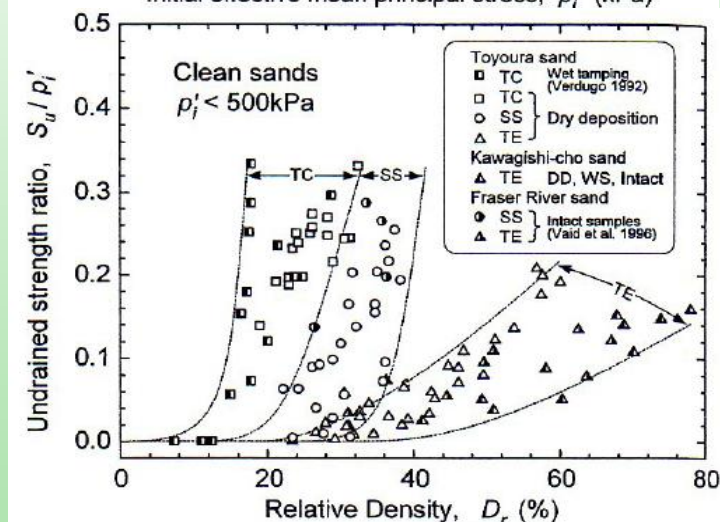
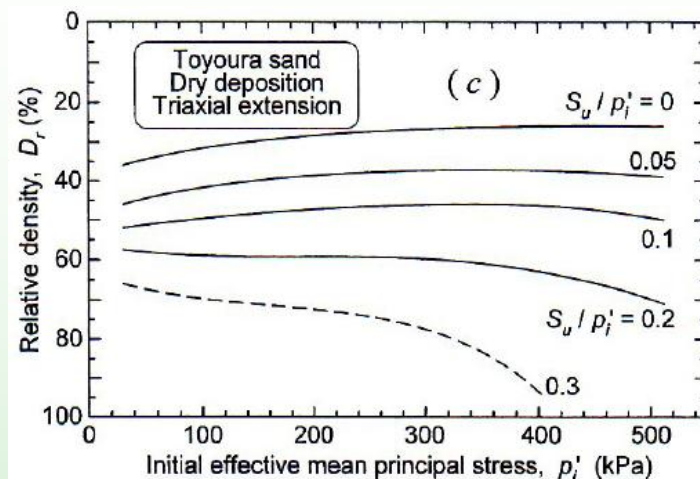
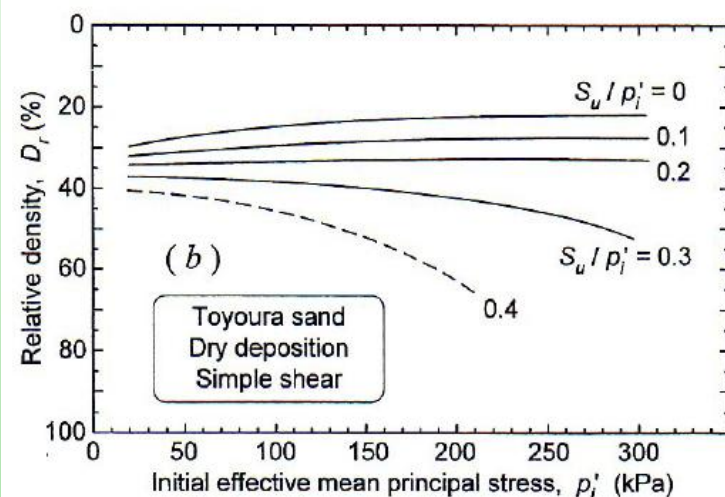
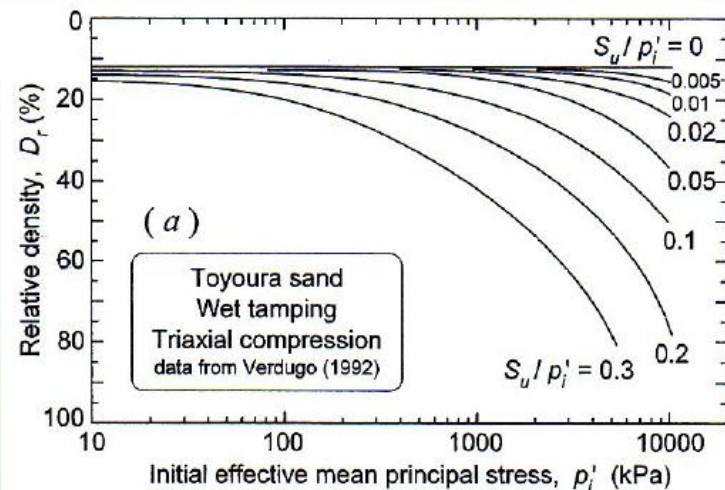
NEDRENIRANA ČVRSTOĆA PIJESKA



Nestabilnost nasipa od pijeska (Jamuna bridge). Nedrenirana čvrstoća pijeska c_u pri kojoj dolazi do urušavanja / klizanja ja pokosa može se procijeniti prema izrazu:

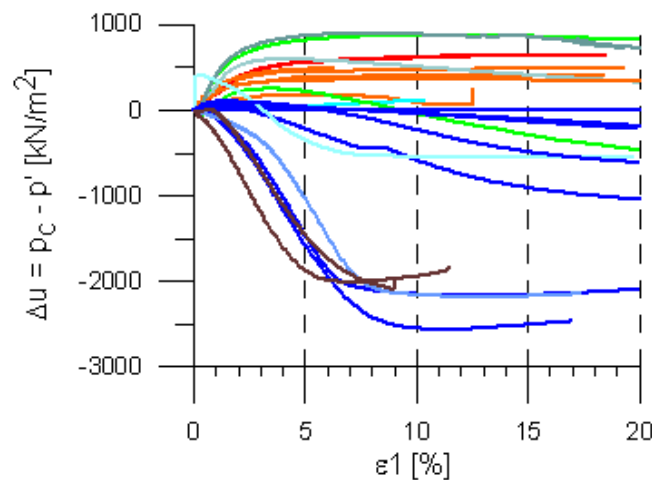
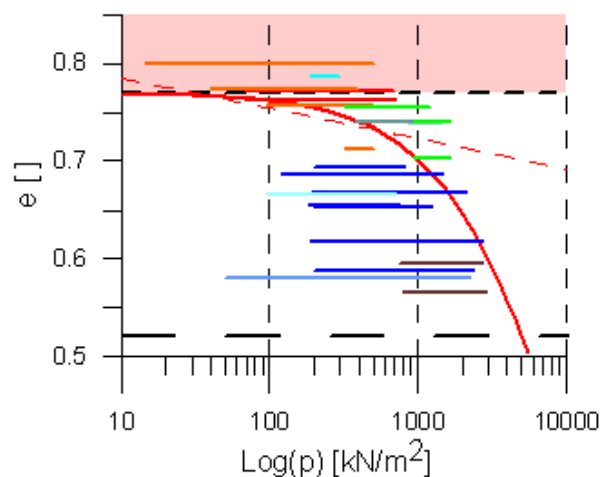
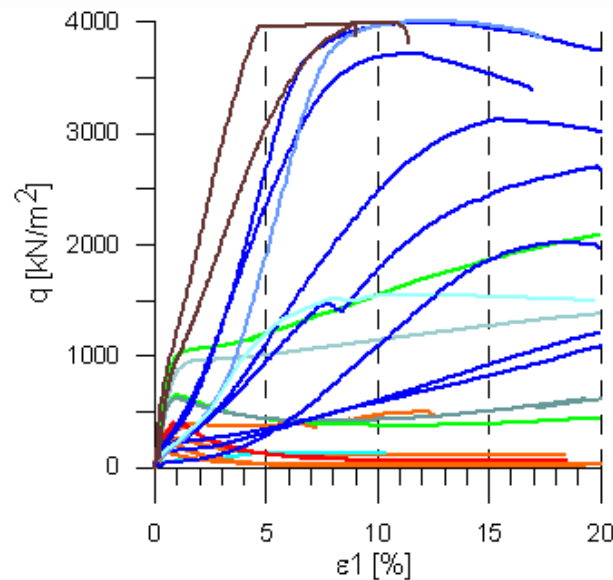
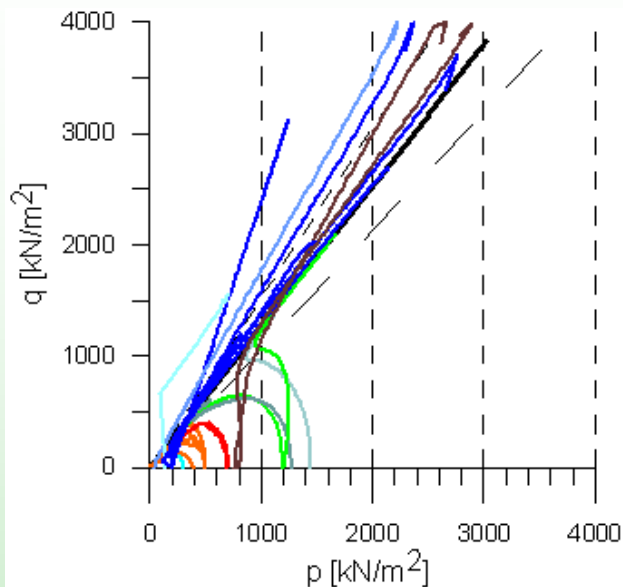
$$\frac{c_u}{\sigma'_{vi}} = \frac{\gamma}{\gamma'} \sin \beta \cos \beta$$

NEDRENIRANA ČVRSTOĆA PIJESKA



Dijagrami za određivanje nedrenirane čvrstoće pijeska u ovisnosti o zbijenosti D_r i početnom stanju naprezanja p'_i ; te ovisno o načinu ugradnje uzorka i tragu naprezanja u CIU pokusu.

CIU POKUSI – Erksak pijesak



Erksak pijesak

opseg ispitivanja:
- 32 CIU pokusa

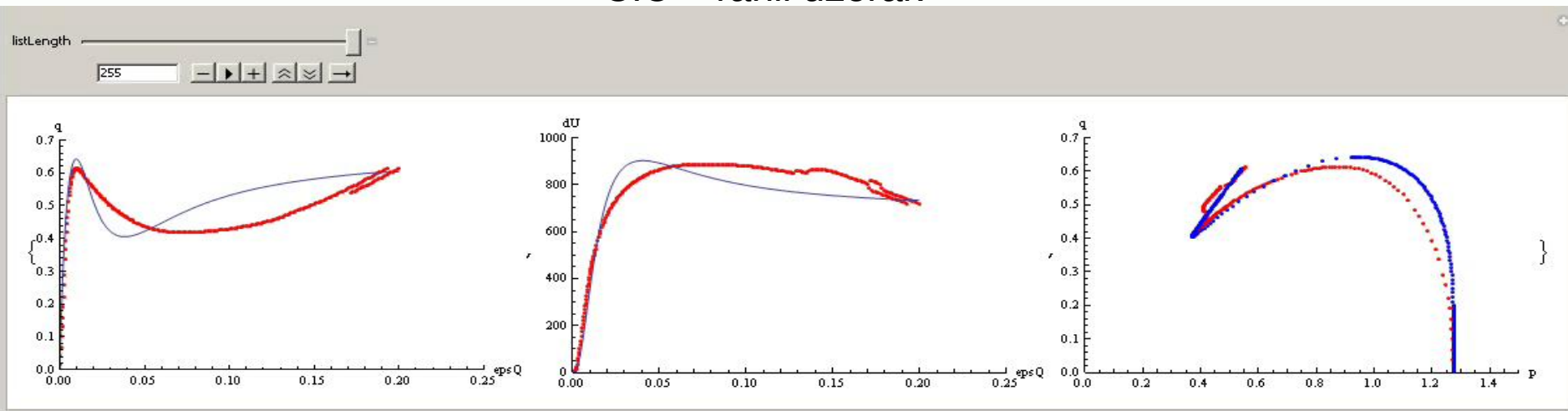
raspon ispitivanja:
- $p = 50$ do 3000 kPa
- $I_D = -20$ do 100 %
- $\varepsilon_1 =$ do 25 %

indeks zbijenosti:

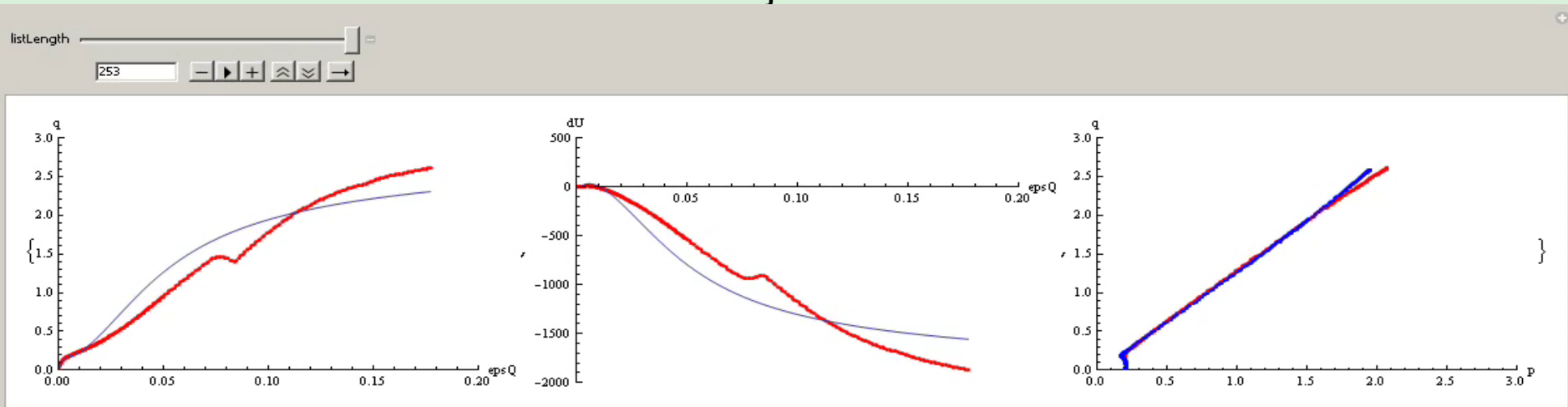
$$I_D = \frac{e - e_{\min}}{e_{\max} - e_{\min}}$$

CID POKUSI – Erksak pijesak

CIU – rahli uзорak

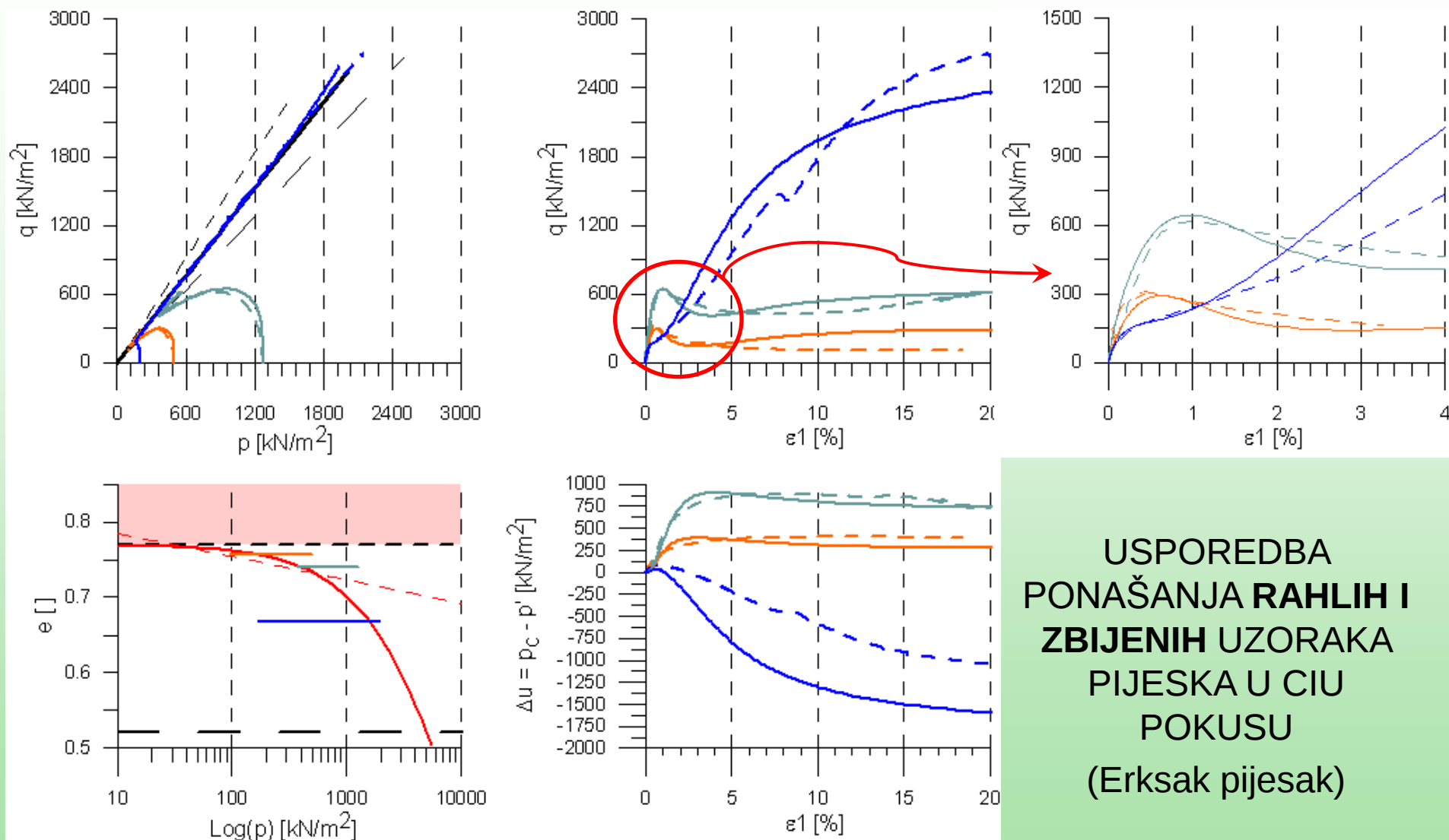


CIU – zbijeni uзорak



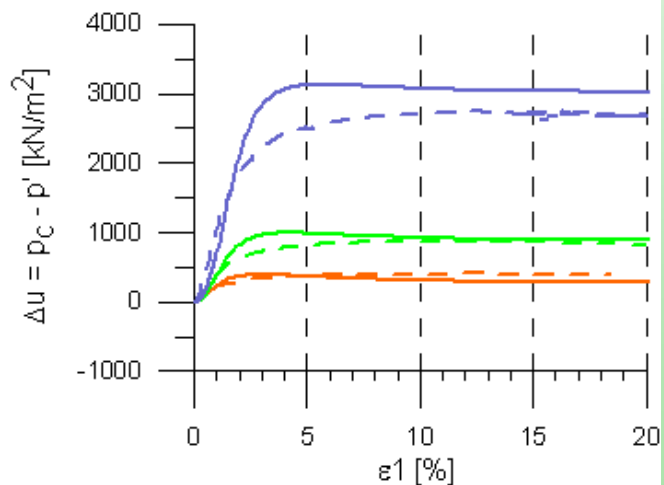
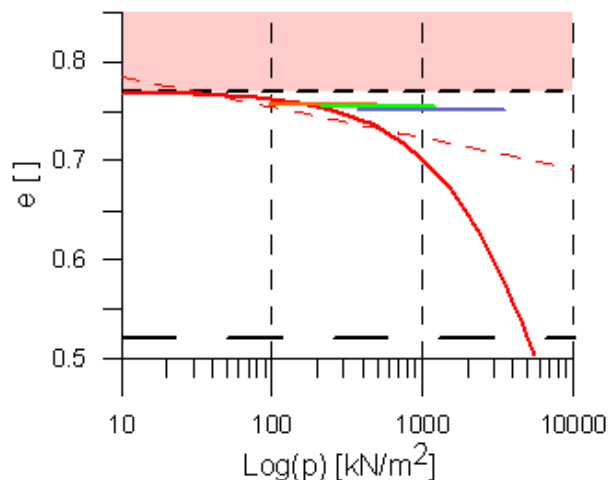
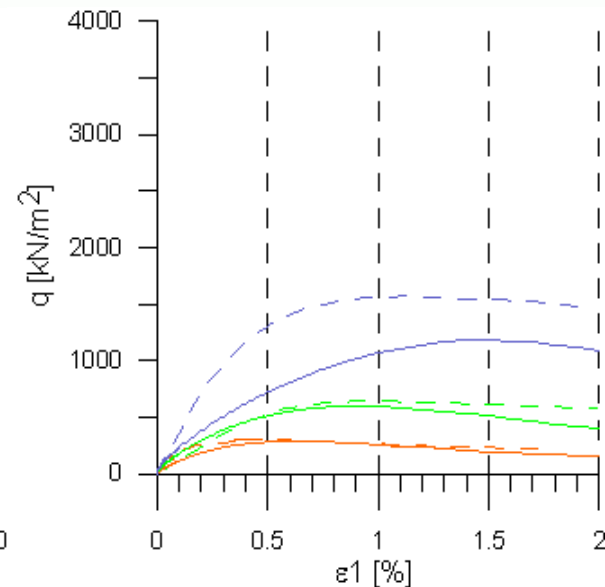
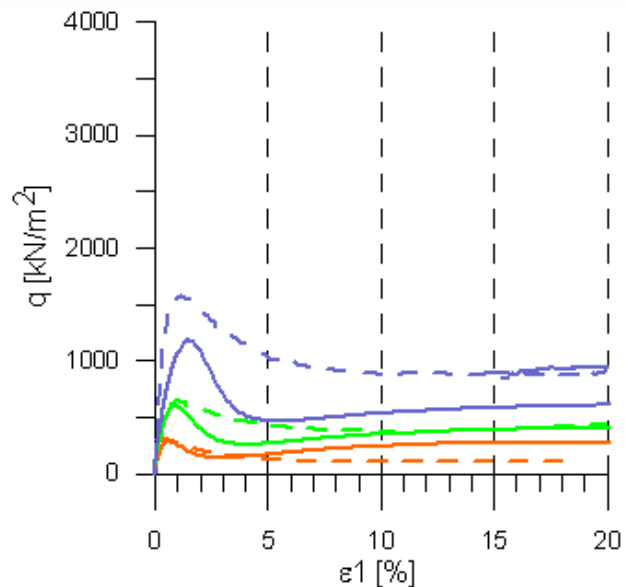
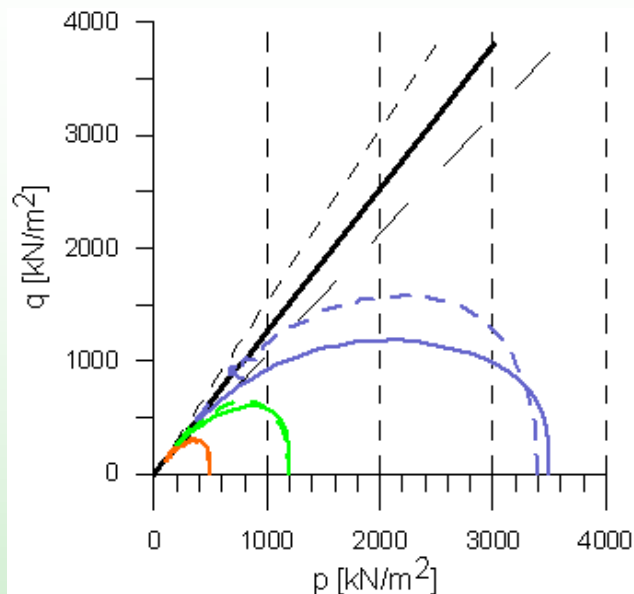
Simulacije CIU pokusa Erksak pijesak (dijagrami: $q-\epsilon_q$; $u-\epsilon_q$; $q-p'$): **pokus** ; **simulacija**

CID POKUSI – Erksak pijesak



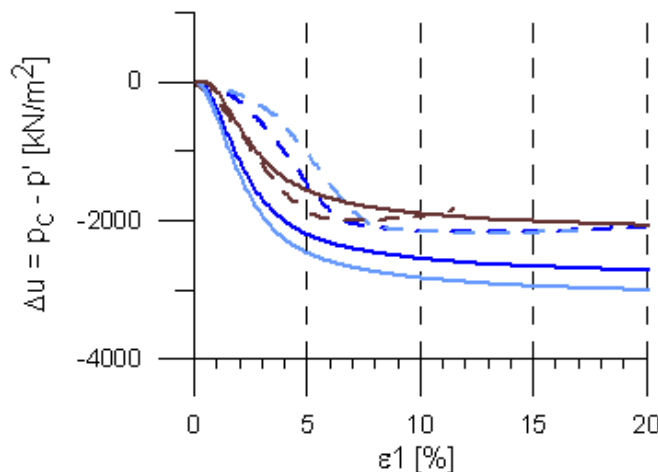
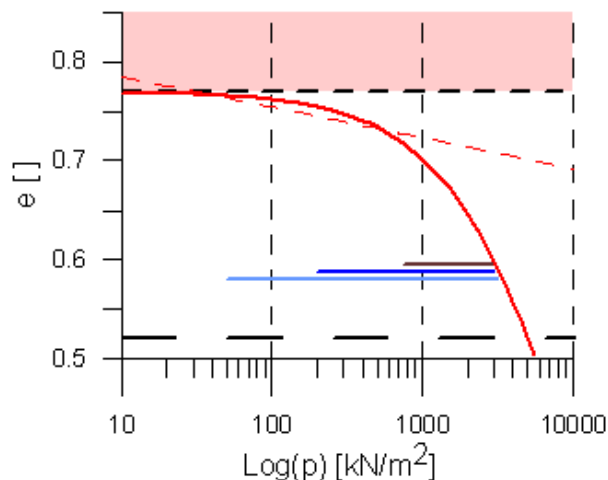
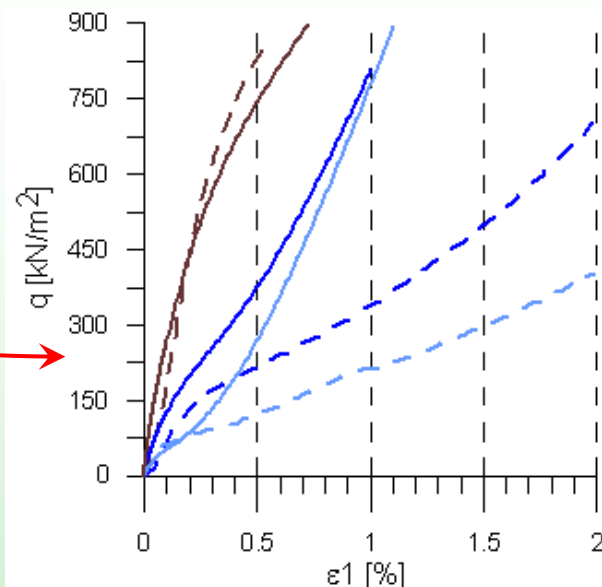
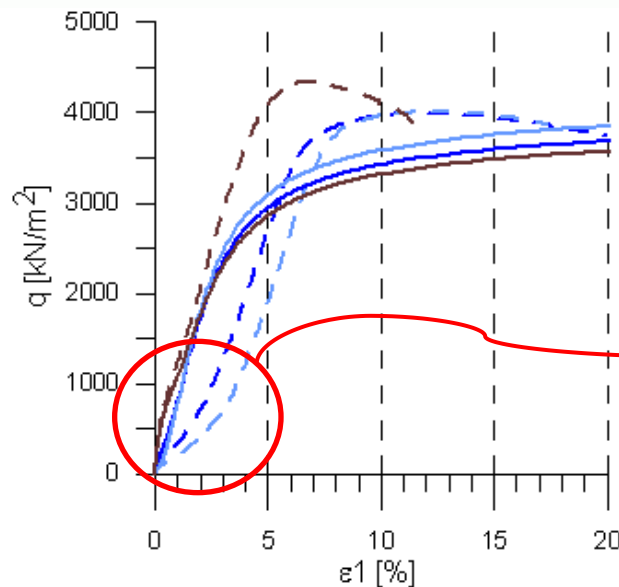
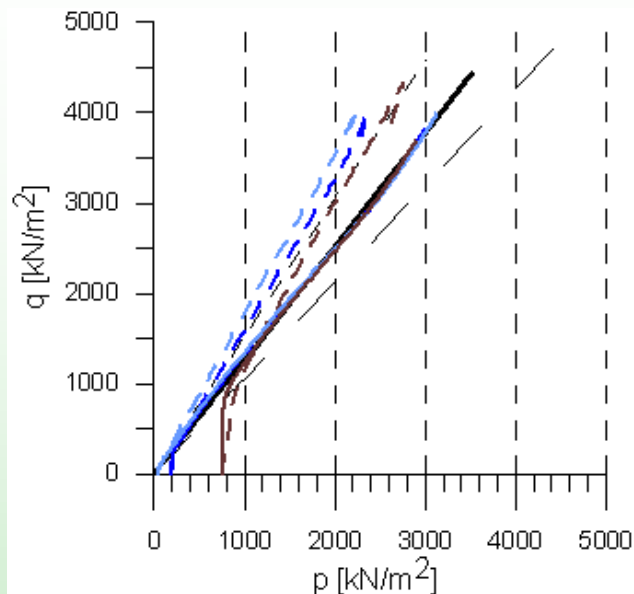
**USPOREDBA
PONAŠANJA RAHLIH I
ZBIJENIH UZORAKA
PIJESKA U CIU
POKUSU
(Erksak pijesak)**

CID POKUSI – Erksak pijesak



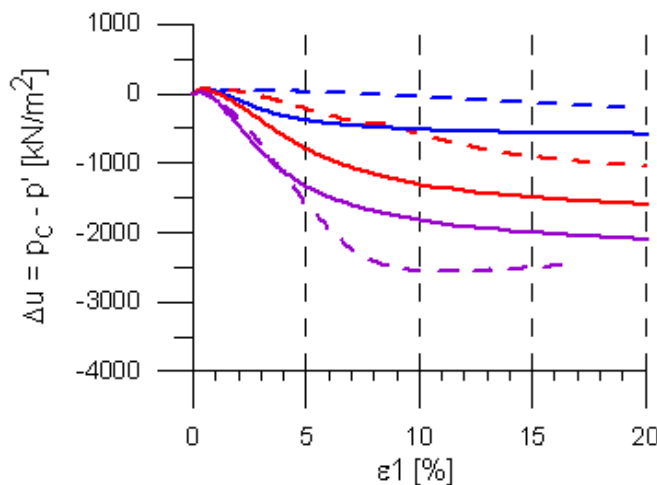
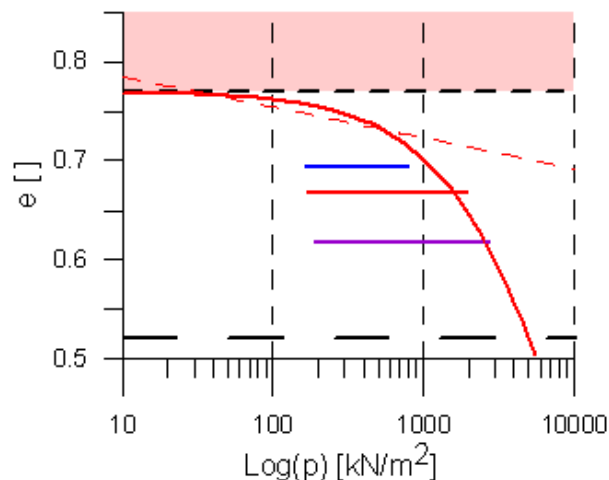
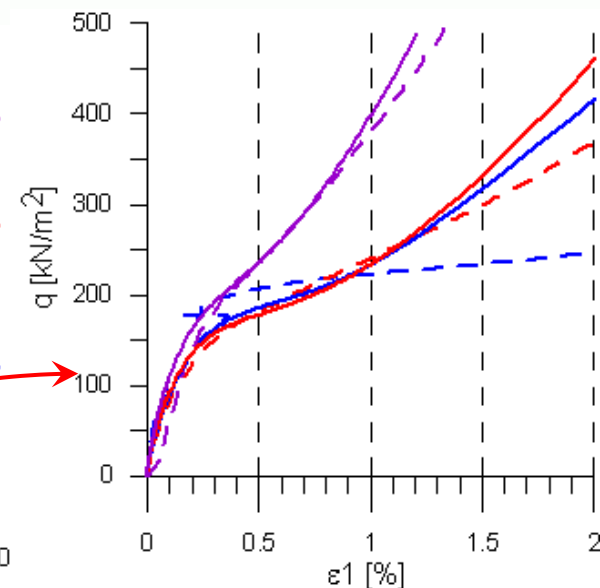
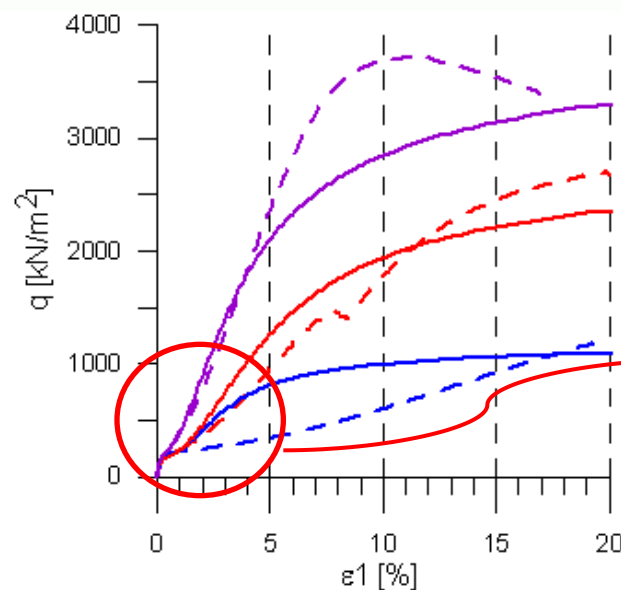
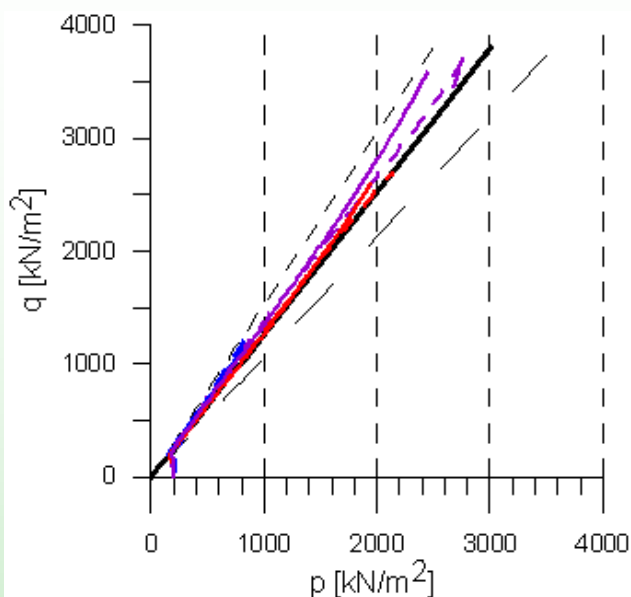
**UTJECAJ STANJA
NAPREZANJA NA
PONAŠANJE PIJESKA
U CIU POKUSU
(Erksak pijesak - rahli)**

CID POKUSI – Erksak pijesak



**UTJECAJ STANJA
NAPREZANJA NA
PONAŠANJE PIJESKA
U CIU POKUSU
(Erksak pijesak - zbijeni)**

CID POKUSI – Erksak pijesak



**UTJECAJ STANJA
ZBIJENOSTI NA
PONAŠANJE PIJESKA
U CIU POKUSU
(Erksak pijesak)**