

Sveučilište u Zagrebu

Građevinski fakultet

Diplomski sveučilišni studij

Smjer: **GEOTEHNIKA**

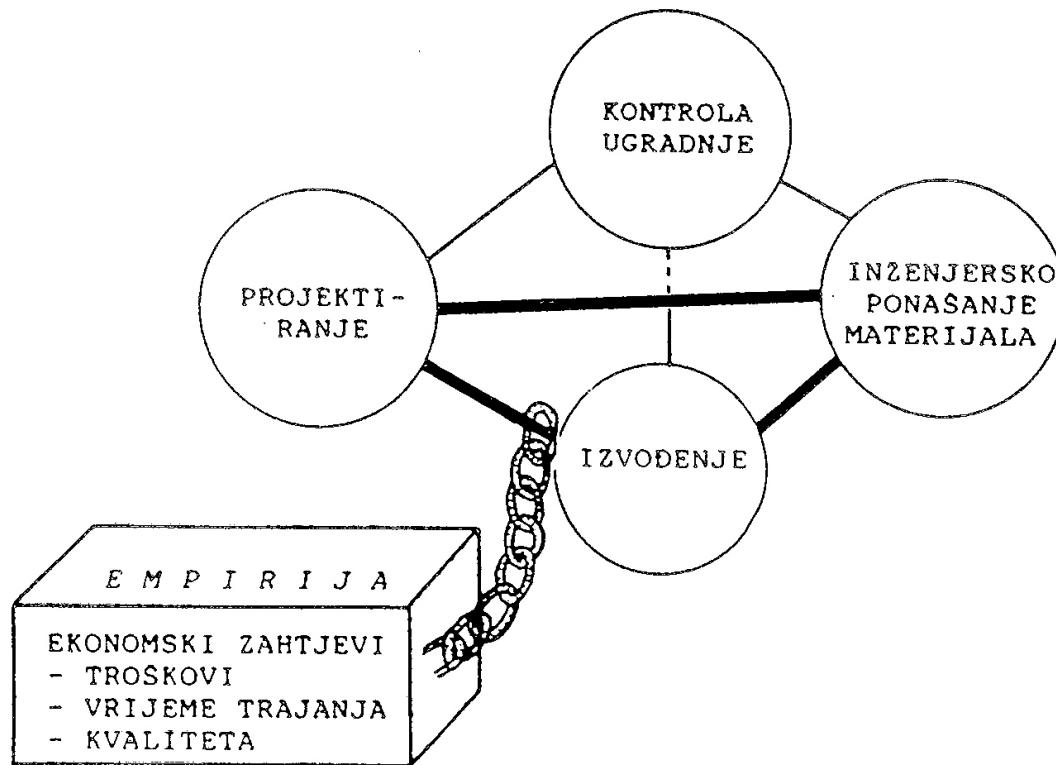
# Nasute i potporne građevine 4

Prof. dr. sc. Tomislav Ivšić  
Građevinski fakultet Zagreb

# Ugradnja zemljanih materijala

- Niz postupaka kojima se **prirodno tlo** premješta iz svog izvornog ležišta i odgovarajućom obradom (zbijanjem...) prerađuje u zemljani **materijal s novim svojstvima** i istovremeno oblikuje **zemljana konstrukcija**

# Organizirana ugradnja zemljanih materijala



Slika 1. Prikaz osnovnih elemenata ugradbe zemljanih materijala

# Organizirana ugradnja zemljanih materijala

Ekonomski zahtjevi - osnovna premla: postizanje traženog cilja uz minimalne troškove u optimalnom vremenu

## Smjernice:

- materijal što bliže mjestu ugradnje - transport
- korištenje materijala u zatečenom stanju granulacije i vlažnosti
- priprema materijala za ugradnju
- što manji broj prijelaza vozila uz lagan promet - energija uložena za zbijanje
- brzina i efikasna kontrola ugradnje - zastoji, korektivne akcije
- ugradnja u raznim klimatskim uvjetima - produženje sezone

# Organizirana ugradnja zemljanih materijala

**“Projektiranje”** čini niz postupaka kojima se predviđa, propisuje i planira proces ugradnje kako bi se postigli traženi projektni ciljevi. Zadatak projektiranja je i koordinacija preostala tri elementa sistema i uvažavanje ekonomskih zahtjeva.

Traženi ciljevi - tehnički siguran objekt i razumni troškovi

**“Inženjersko ponašanje materijala”** predstavlja skup saznanja o mehaničkom ponašanju materijala tla prilikom ugradnje i eksploatacije.

Ta saznanja služe projektiranju tehnički sigurnog objekta i predstavljaju realno, fizikalno ograničenje optimalizacije procesa ugradnje zadanoj materijala.

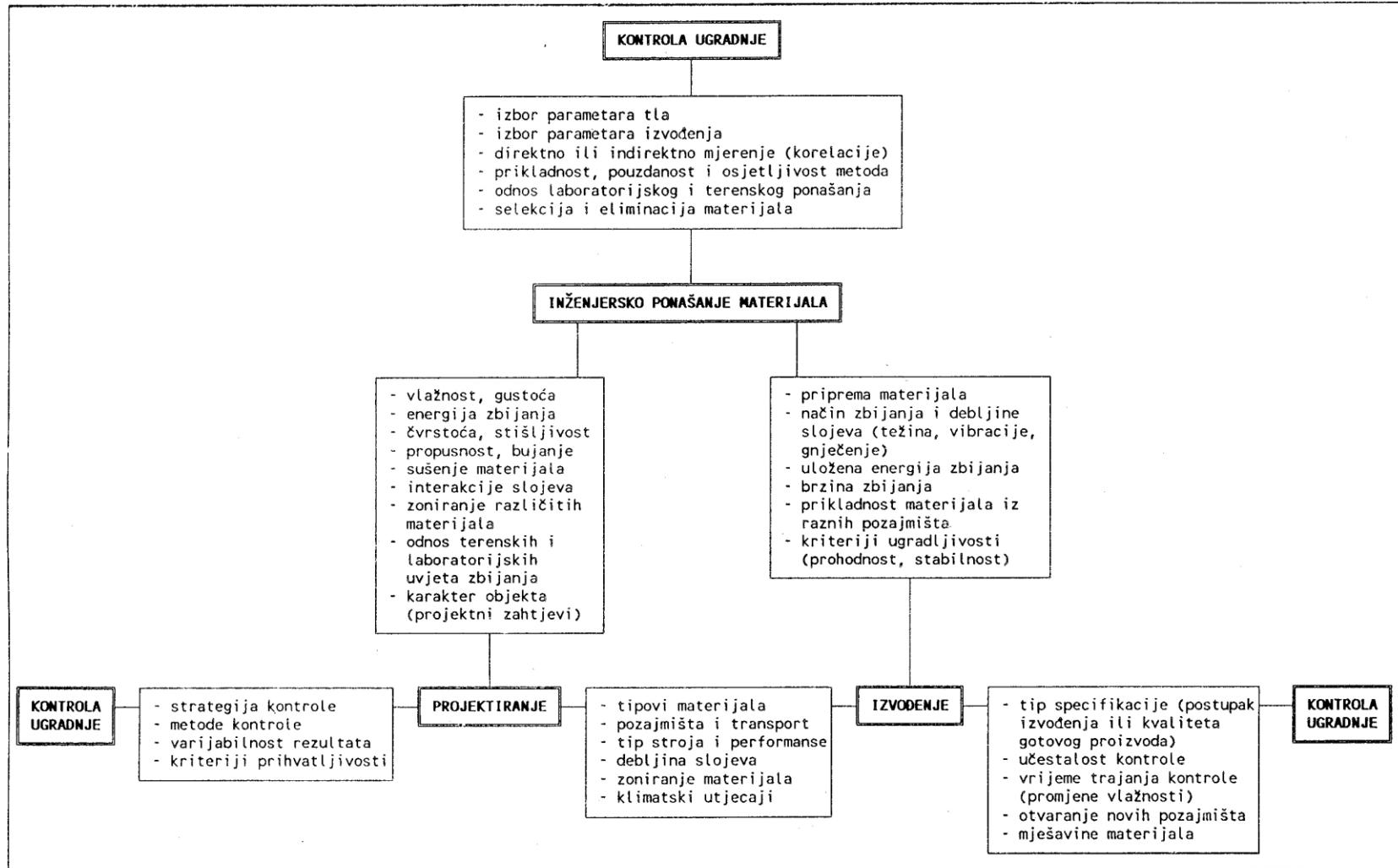
# Organizirana ugradnja zemljanih materijala

**"Izvođenje"** se sastoji od vađenja i transporta materijala iz prikladnog nalazišta, ugradnje u slojevima, te zbijanja odgovarajućom opremom. Ukoliko materijal iz nalazišta ne odgovara u potpunosti specifikacijama, provode se korekcije vlažnosti (vlaženjem ili sušenjem) ili, po potrebi odgovarajuća selekcija granulacije ili miješanje različitih materijala.

Niz rutinskih i robustnih postupaka ponavlja se tisućama puta do završetka izgradnje

**"Kontrola ugradnje"** predstavlja skup postupaka koji utvrđuju da li materijali iz nalazišta kao i ugrađeni, zbijeni materijali zadovoljavaju kriterije specificirane u projektu

# Organizirana ugradnja zemljanih materijala – pregled pojmova



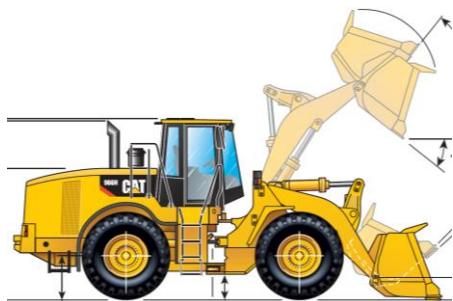
# Iskop, prijevoz, nasipanje i zbijanje tla

(a)



(d)

(e)



(b)



(c)



(f)



(g)

Tipični strojevi za zemljane radove: (a) bageri za iskop i utovar, (b) utovarivač za utovar iskovanog tla, (c) dumper za prijevoz tla, (d) dozer za razastiranje s plugom za pluženje, (e) skrejper za grubo ravnjanje i razastiranje, (f) grejder za fino ravnjanje, (g) valjak sa stopama za gnječenje i zbijanje sitnozrnog tla

# Inženjersko ponašanje materijala

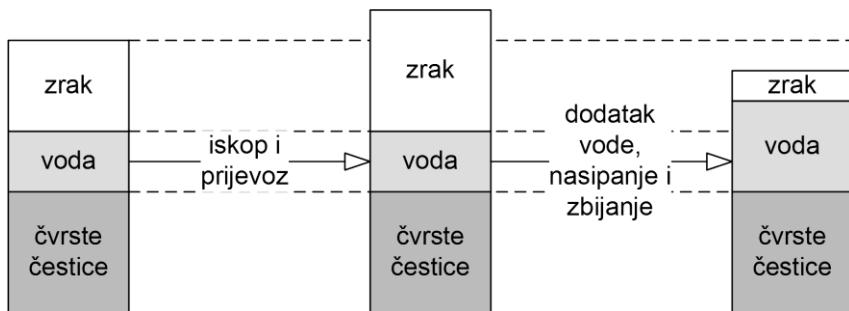
Proces ugradnje zemljanih materijala obuhvaća: izbor povoljnih materijala, iskop, utovar, transport, istovar i zbijanje u slojevima

- Tradicionalna iskustva
- moderna saznanja : oko 1920., Terzaghi, Proctor
- tehnološki razvoj: građevinski strojevi, razvoj teoretskih i eksperimentalnih saznanja, zahtjevi za ekonomskom racionalizacijom

# Zbijanje tla – opažanja i pojavnost

Zbijenost (gustoća) – relativni odnos volumena čvrstih čestica u ukupnom volumenu tla

Referentna gustoća – povoljno izabrana gustoća koja se može postići i kontrolirati uobičajenim postupcima na terenu



Od iskopa do ugradnje: tipične promjene volumena pojedinih komponenti tla pri iskopu i prijevozu (povećanje volumena) te ugradnji i zbijanju (smanjenje volumena)

Porast zbijenosti – povećanje krutosti, čvrstoće, pa i vododrživosti tla

Povećanje gustoće – nabijanje, gnječenje, vibriranje (statičko opterećenje – može, ali nije efikasno)

Na terenu – izbor strojeva

- Priprema (vlaženje, sušenje)
- debljina slojeva (što tanji)

# O teoriji zbijanja zemljanih materijala

- R. R. Proctor uvodi oko 1920. u praksu laboratorijski pokus koji prati osnovne značajke procesa zbijanja:

- vlažnost
- suha gustoća
- energija zbijanja
- vrsta tla

- Dodatni elementi simulacije terenskog procesa:

- zbijanje u slojevima
- način zbijanja (udarno-dinamičko, statičko, zbijanje gnječenjem)

# Proctorov pokus

## PROCTOROV POKUS

NAČIN ZBIJANJA	STANDARDNI	MODIFICIRANI
Promjer kalupa (cm)	10	10
Visina kalupa (cm)	11.4	11.4
Težina bata (N)	25	45
Visina pada (cm)	30.3	45.5
Broj slojeva	3	5
Broj udaraca po sloju	25	25
Rad zbijanja (kNm/m <sup>3</sup> )	610	2750

Ovisnost suhe zapreminske težine ( $\gamma_d$ ) o vlažnosti (w) i stupnju zasićenja (Sr) određuje se iz sljedećih izraza:

$$\gamma = (1-n) \gamma_s + n Sr \gamma_w$$

$$\gamma_d = (1-n) \gamma_s$$

$$w = M_w / M_s = W_w / W_s = n Sr \gamma_w / \gamma_d$$

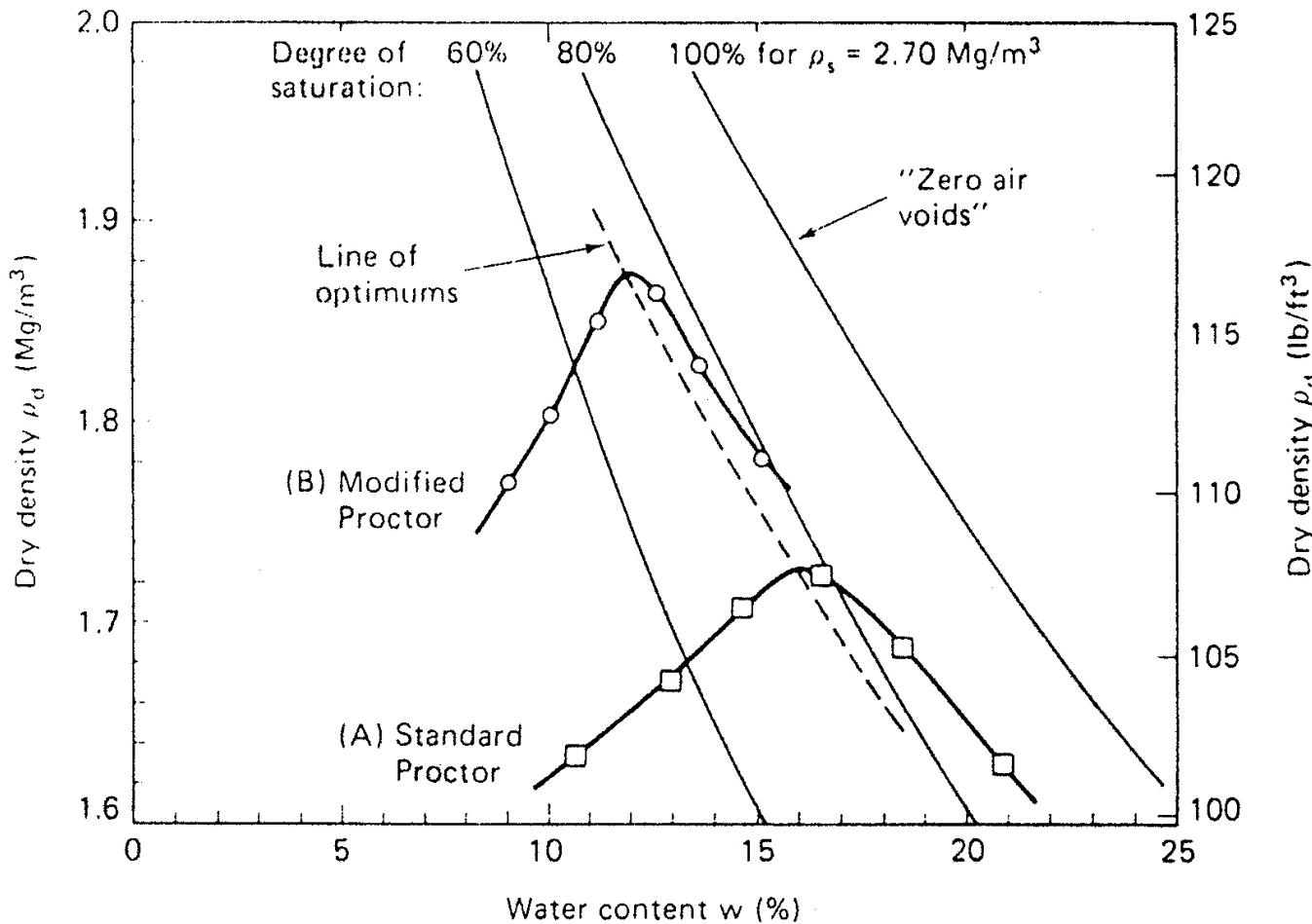
$$\gamma_d = n Sr \gamma_w / w , \quad n = 1 - (\gamma_d / \gamma_s)$$

$$\gamma_d = \gamma_s \gamma_w Sr / ( \gamma_s w + \gamma_w Sr )$$

# Proctorov pokus



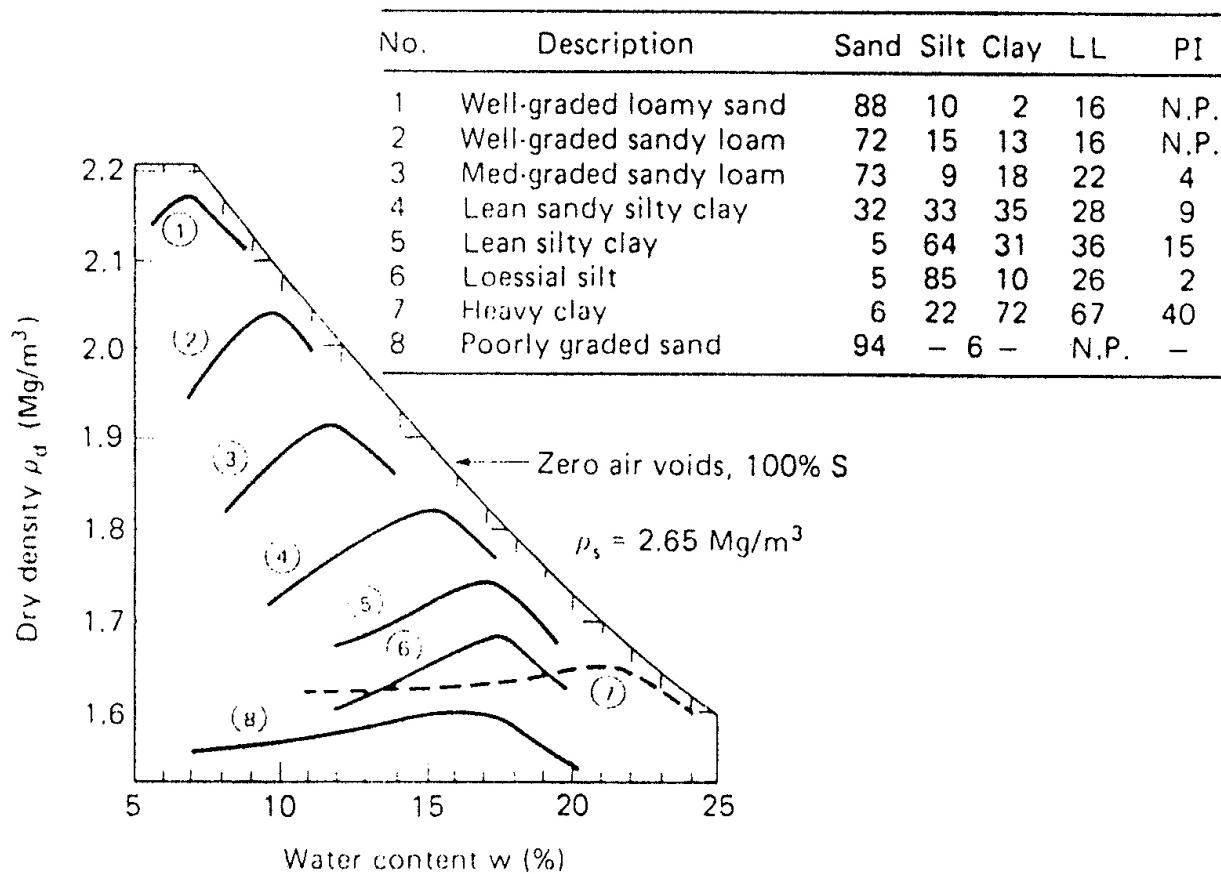
# Proctorov pokus



Tipične krivulje standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa

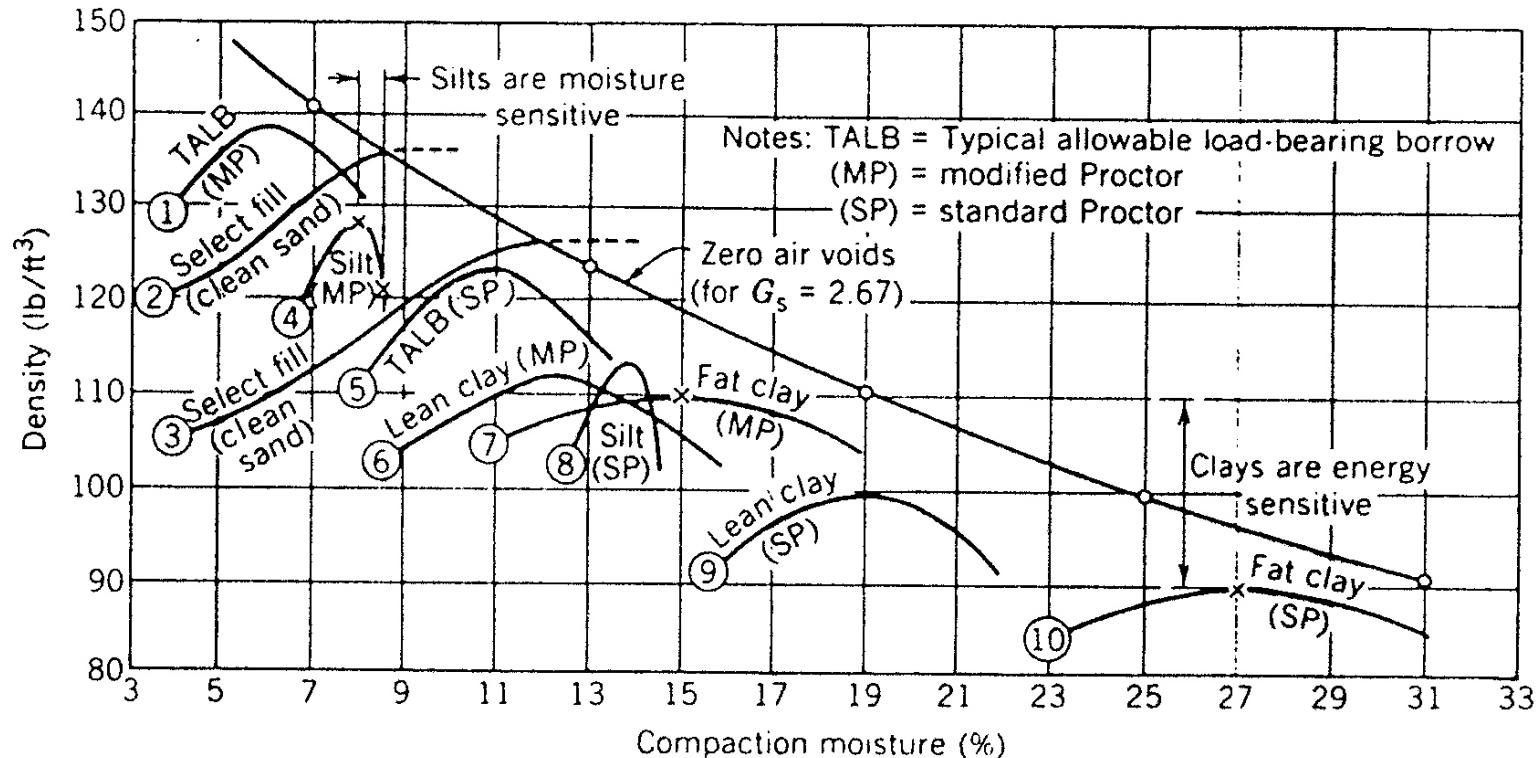
# Proctorov pokus

Soil texture and plasticity data



Tipične krivulje  
Proctorovog  
pokusa za  
različita tla

# Proctorov pokus



Krivulje standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa za razna tla

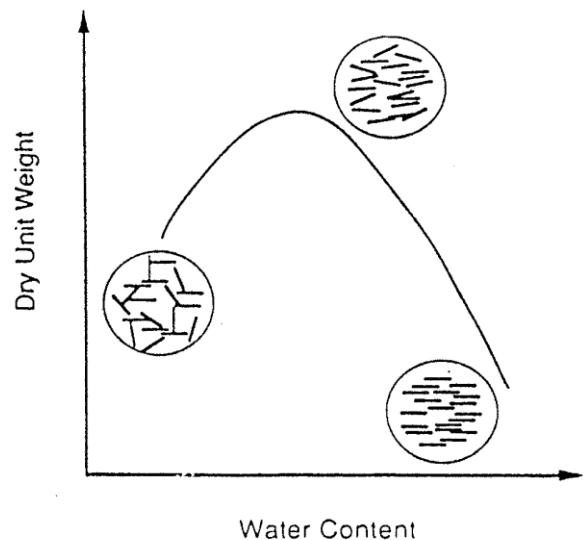
## Proctorov pokus

*Fizikalni model* kojim bi se objasnio proces zbijanja, odnosno oblik krivulje Proctorovog pokusa još uvijek **nije do kraja formuliran**, iako postoji više pokušaja da se objasne barem globalni efekti.

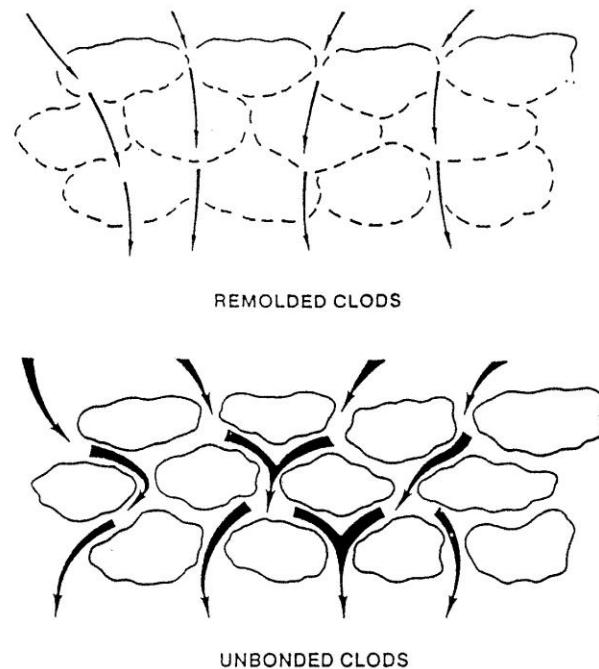
Prividno simetrična krivulja vlažnosti - gustoće rezultat je simultanog djelovanja više fizikalnih procesa i fenomena.

Razna istraživanja pokazuju da sveukupno djelovanje uključuje kapilarne pritiske, histerezno ponašanje, pritisak zraka u porama, pritisak porne vode, propusnost, površinske fenomene, osmotske pritiske, te koncept efektivnih naponu, posmičnu čvrstoću i kompresibilnost tla.

# Pojavnost – eksperimentalni rezultati

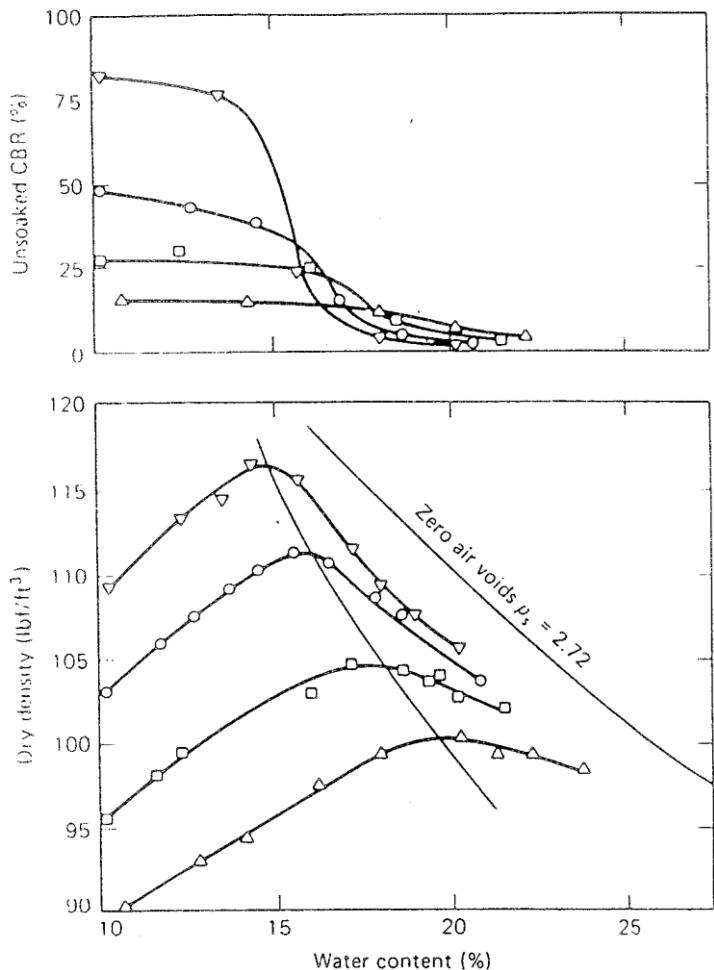


slika 15. Raspored čestica tla prilikom zbijanja



slika 16. Zatvaranje makropora između gruda gline prilikom zbijanja ( Elsborg i dr,1990 )

# Pojavnost – eksperimentalni rezultati



## CBR – mjera čvrstoće

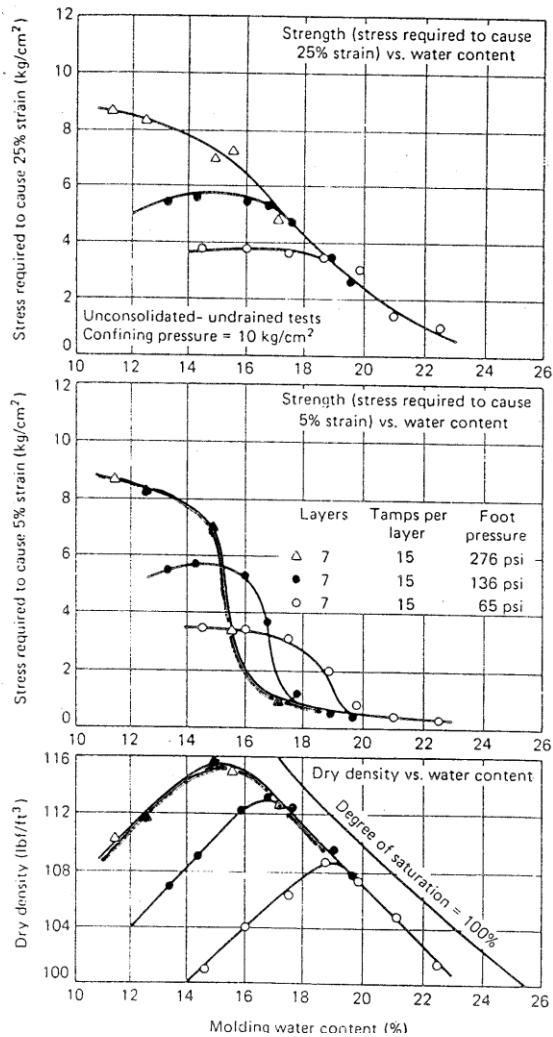
### Legend

- ▽ 55 blows per layer
- 26 blows per layer
- 12 blows per layer
- △ 6 blows per layer

Note: 10 lb hammer, 18" drop  
(modified Proctor)

slika 9. Krivulje zbijanja i rezultati CBR pokusa za prašinasti materijal - tlo B ( Holtz i Kovacs, 1981 )

# Pojavnost – eksperimentalni rezultati



## Nedrenirana čvrstoća

slika 22 | Nedrenirana čvrstoća za različite energije zbijanja ( prema Holtz i Kovacs, 1981 )

# Pojavnost – eksperimentalni rezultati

vodopropusnost

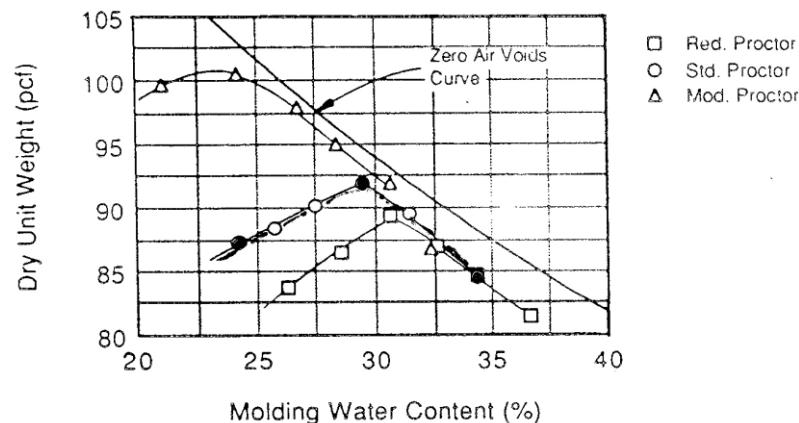
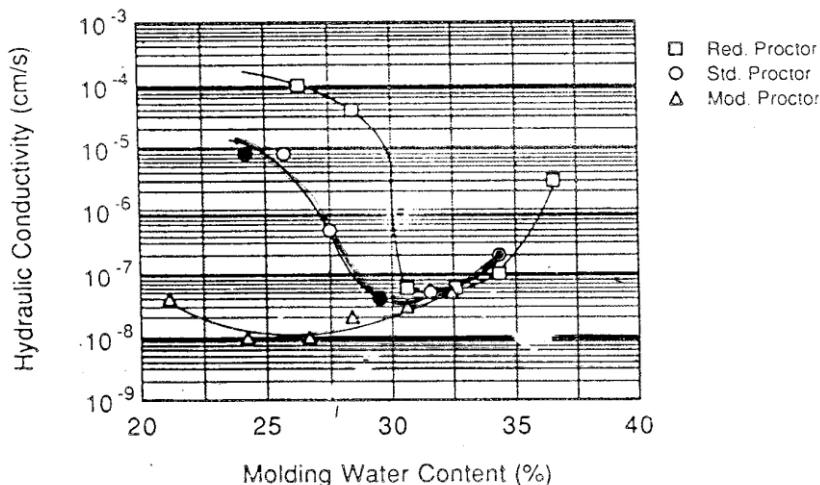
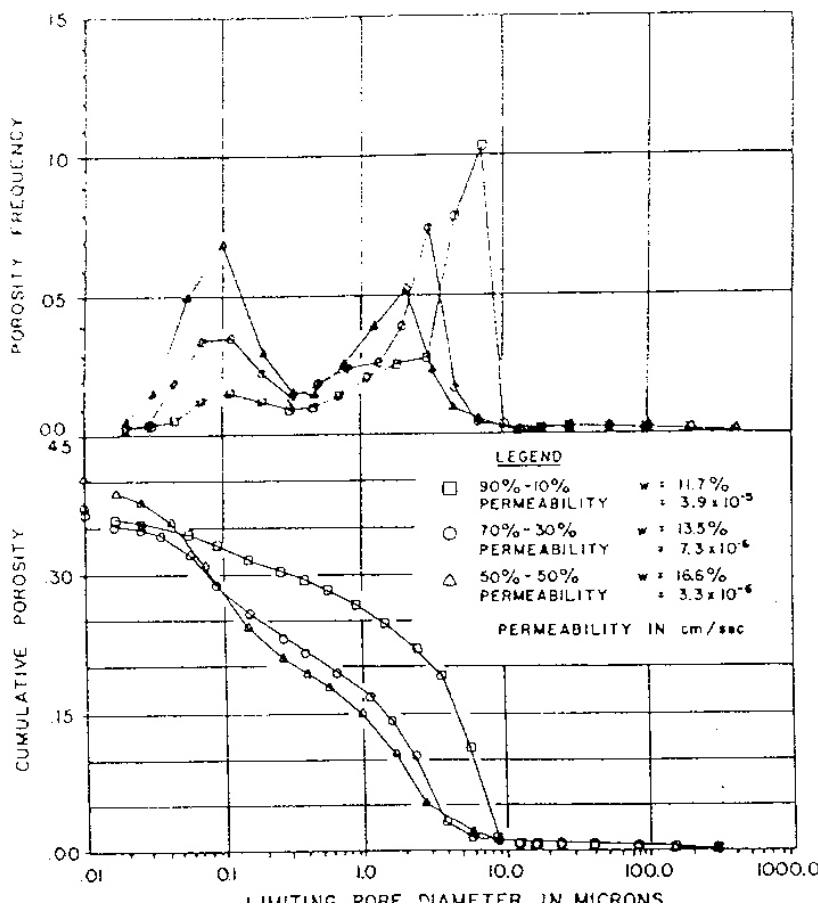


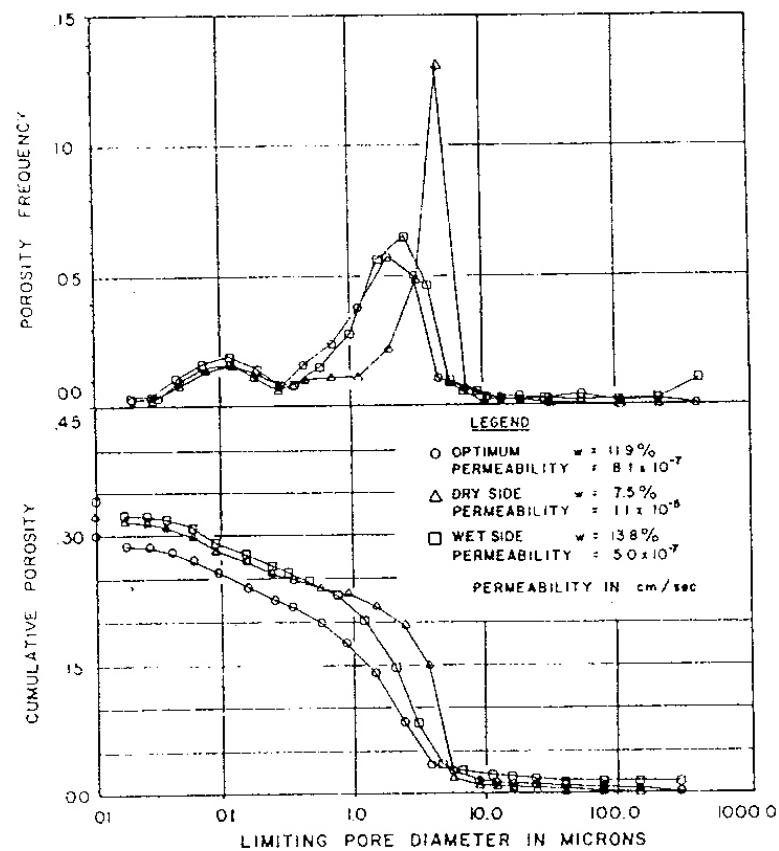
FIG. 9. Compaction Curves for Type A Soil from East Borrow Area (1 pcf = 0.157 kN/m<sup>3</sup>)



# Pojavnost – eksperimentalni rezultati

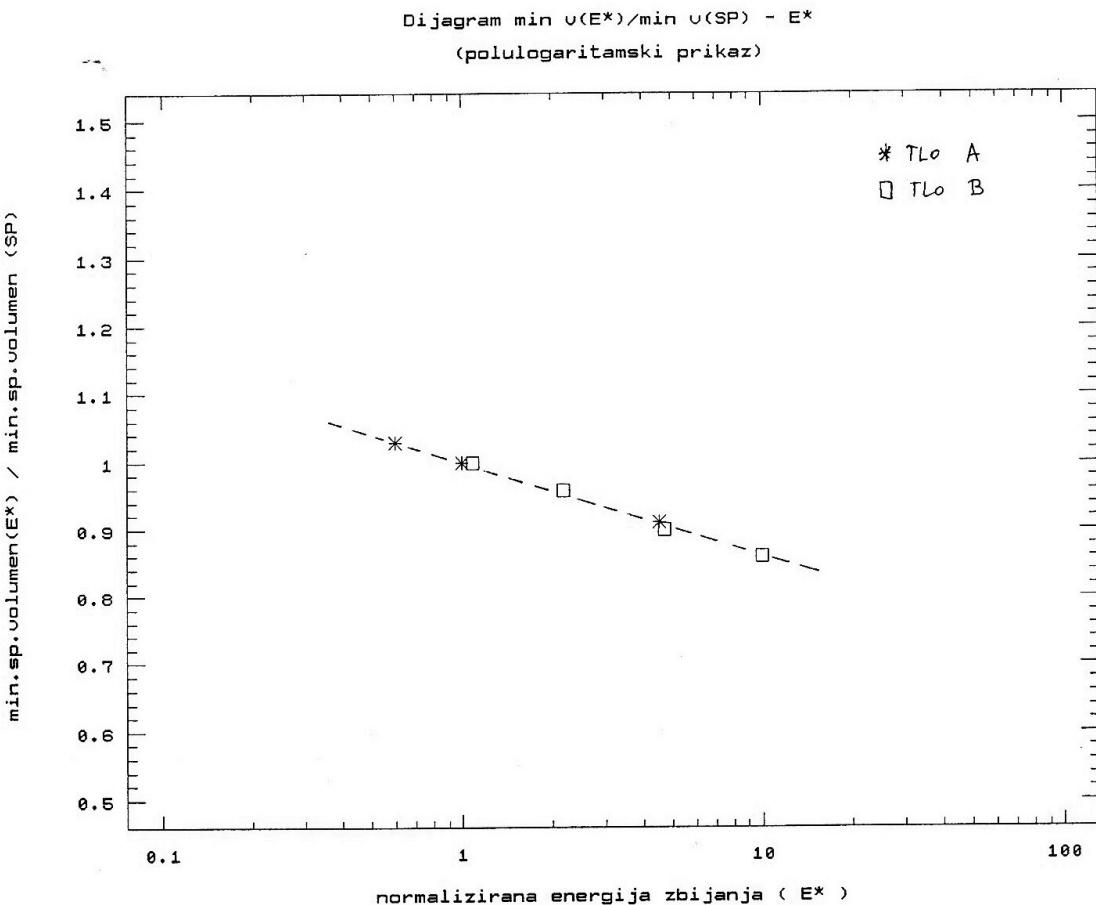


Distribucija pora za mješavine praha i gline na suhoj strani optimuma  
( Garcia-Bengocea i dr, 1979 )



Distribucija pora za mješavinu 90%prah – 10%glina pri različitim vlažnostima  
( Garcia-Bengocea i dr, 1979 )

# Pojavnost – eksperimentalni rezultati



Ovisnost zbijenosti o  
energiji uloženoj u  
zbijanje

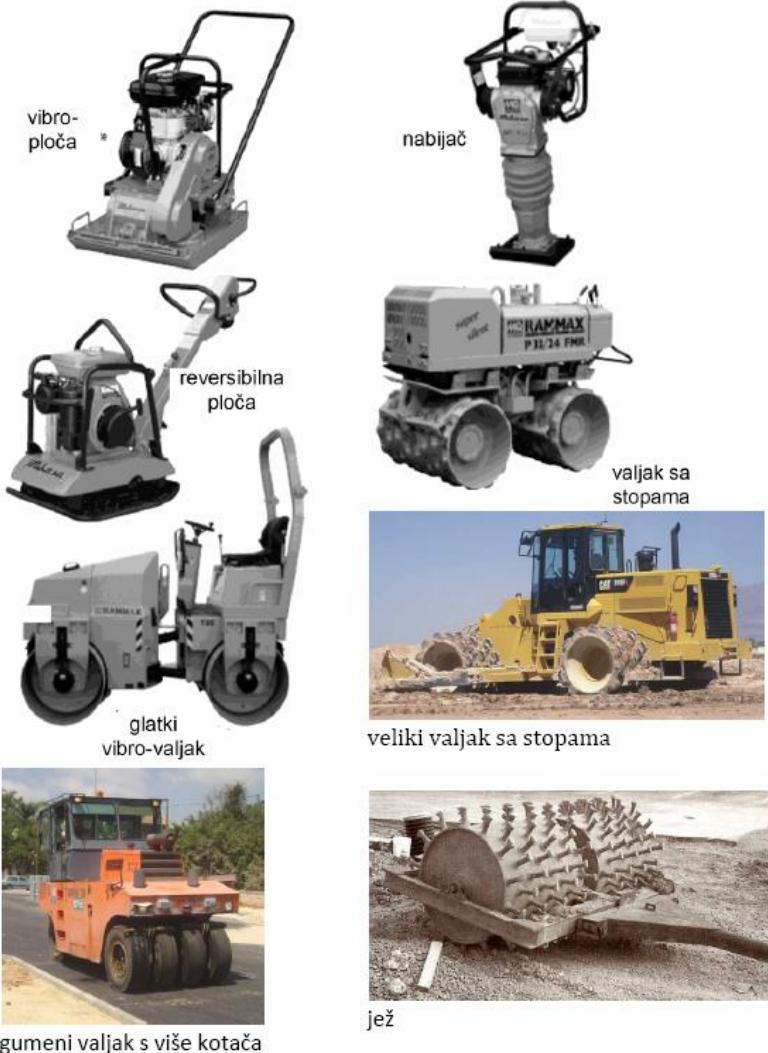
# Pojavnost – eksperimentalni rezultati

## Sumarni prikaz

SUHA STRANA OPTIMUMA	VLAŽNA STRANA OPTIMUMA
FIZIKALNE POJAVE	
<ul style="list-style-type: none"><li>- makropore</li><li>- veća propusnost zraka</li><li>- slobodno istjecanje zraka</li><li>- flokulasta struktura</li><li>- veći kapilarni tlak</li><li>- manji porni pritisci</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- mikropore</li><li>- propusnost zraka = 0</li><li>- zrak zatvoren u porama</li><li>- dispergirana struktura</li><li>- beznačajan kapilarni tlak</li><li>- veći porni pritisci</li></ul>
MEHANIČKA OBILJEŽJA	
<ul style="list-style-type: none"><li>- veća nedrenirana čvrstoća ovisna prvenstveno o energiji zbijanja</li><li>- manja stišljivost</li><li>- veća vodopropusnost</li><li>- veće bujanje</li><li>- nagla promjena volumena pri potapanju kod malih napona (kolapsibilnost)</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>- nedrenirana čvrstoća naglo opada s povećanjem vlažnosti</li><li>- veća stišljivost</li><li>- mala vodopropusnost</li><li>- manje bujanje</li><li>- promjene volumena slične zasićenim materijalima</li></ul>

# Zbijanje tla na terenu

## Strojevi za zbijanje



Primjenjivost pojedinih vrsta strojeva za zbijanje u odnosu na granulometrički sastav tla (prerađeno prema Coduto, 1999)

Slika 7-11 Strojevi za zbijanje krupnozrnog (lijevo) i sitnozrnog tla (desno)

# Uspostavljanje veze terenskih i laboratorijskih uvjeta

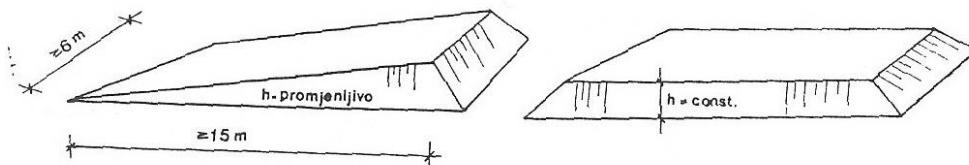
## Probna polja

- izbor ili provjera mehanizacije, debljine slojeva, broja prijelaza
- “prepoznavanje” terenskih krivulja zbivanja među laboratorijskim
- Korelacija s mehaničkim svojstvima i kriteriji prihvatljivosti

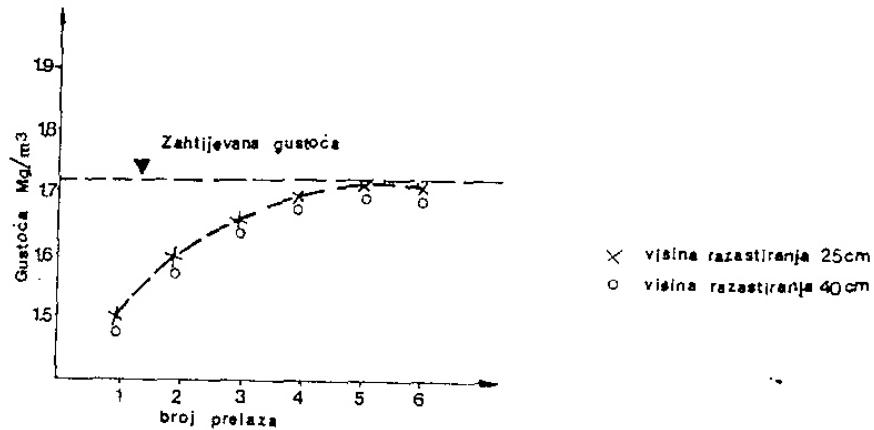
# Zbijanje tla na terenu

## Kontrola zbijenosti

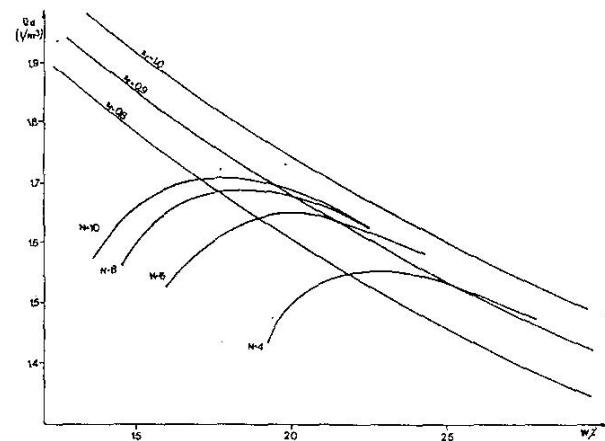
### PROBNO POLJE



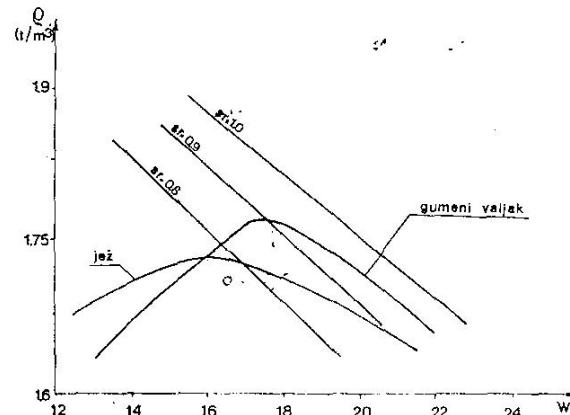
Sl. 6 Probno polje za koherentni materijal



7. Rezultati mjerjenja na probnom polju za koherentni materijal



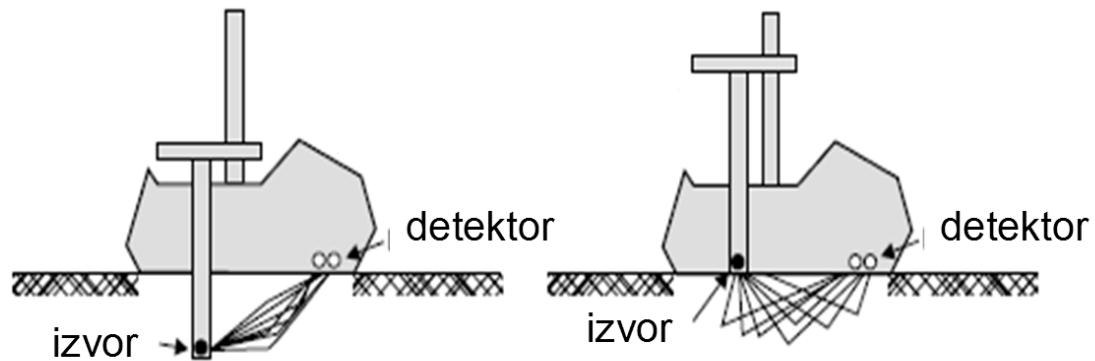
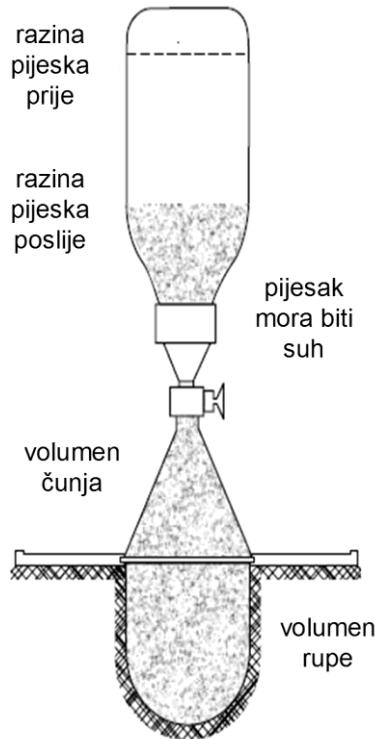
9. Odnos između broja prelaza vibracijskog ježa mase 9t i postignute jedinične težine ugradene gline CH



10. Usporedba rezultata zbijanja gumenim valjkom i ježom za prašinastu glinu

# Zbijanje tla na terenu

## Kontrola zbijenosti na terenu



Slika 7-13 Nuklearni densimetar za posredno mjerene gustoće i vlažnosti ugrađenog tla (ASTM D2922)

Pokus pješčanog stošca za određivanje volumena iskopane rupe, a time i gustoće zbijenog tla (ASTM D 1556)

# Zbijanje tla na terenu

## Kontrola zbijenosti na terenu



Photo by: Allan Breitenbach  
Available by the Geoengineer Website  
<http://www.geoengineer.org>

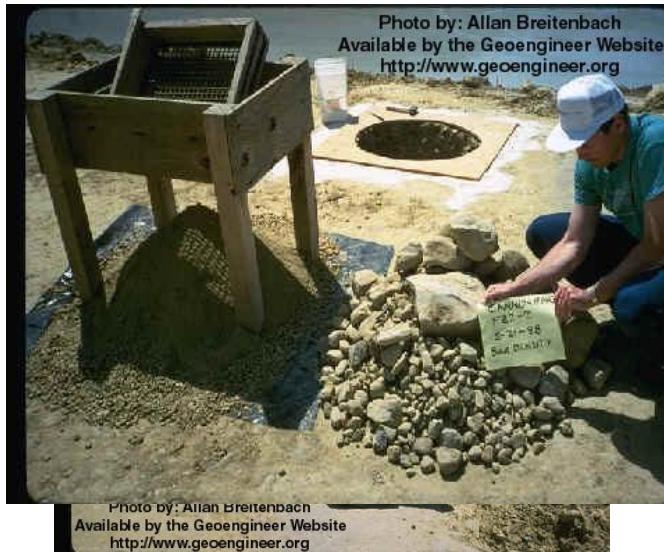
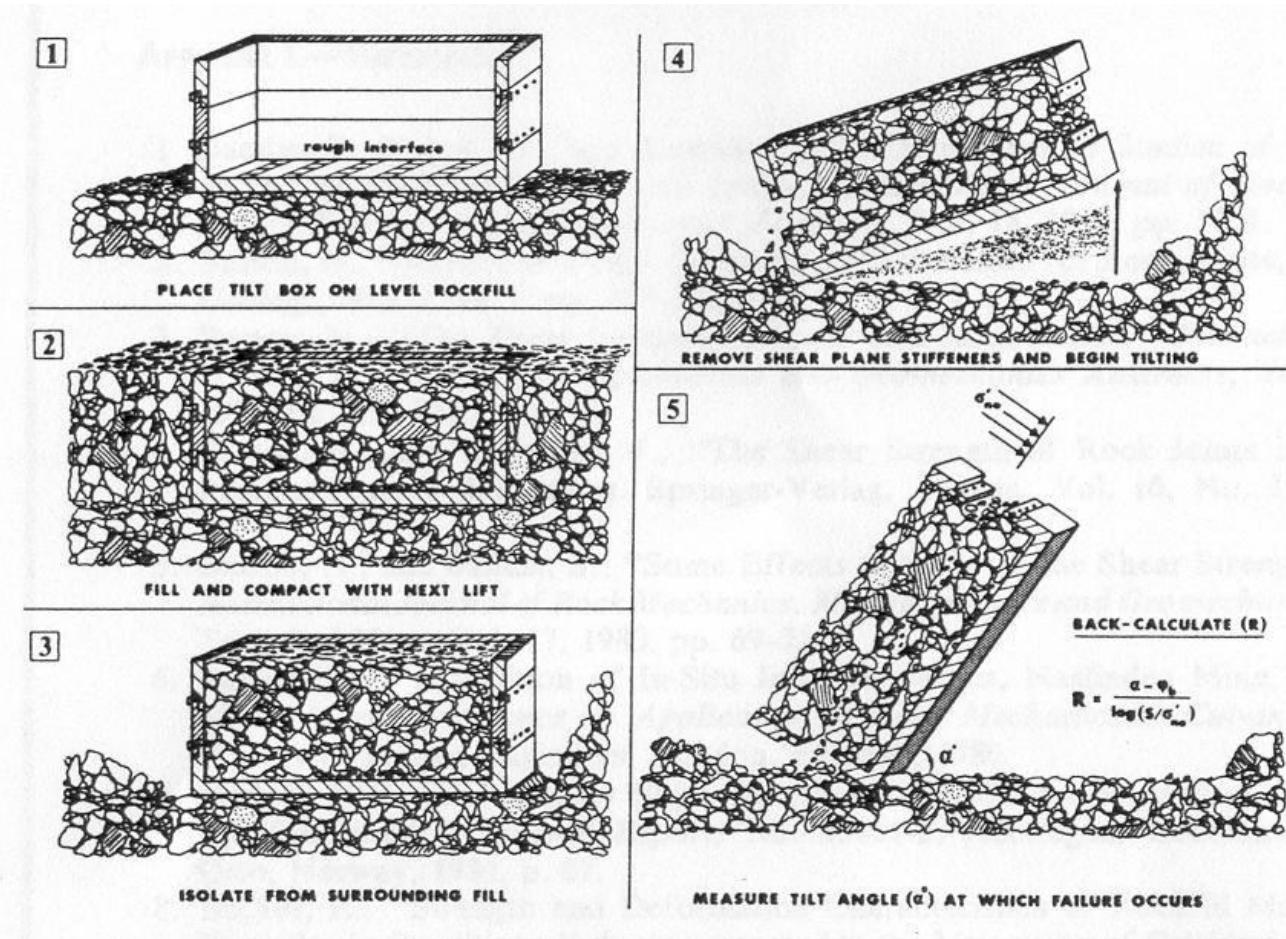


Photo by: Allan Breitenbach  
Available by the Geoengineer Website  
<http://www.geoengineer.org>

Pokus vodom u kamenom materijalu za određivanje volumena iskopane rupe, a time i gustoće zbijenog tla (ASTM D 1556)

# Primjer ispitivanja posmične čvrstoće kamenog materijala na terenu



# Zbijanje tla na terenu

## Kriteriji zbijenosti

Tablica 7-3 Uobičajeni kriteriji zbijanja nasipa

karakteristika		krupnozrna tla	sitnozrna tla
relativna zbijenost $C_R(\%)$ prema modificiranom Proctorovom pokusu	granično moguće zbijanje	98 % ( $I_D \sim 90 \%$ )	96 % - 97 %
	granica mogućeg zbijanja bez posebnih problema	95 %	95 %
	nasipanje suho bez zbijanja	88 % - 91 %	-
	nasipanje vlažno bez zbijanja	80 % - 85 %	-
	potrebno za većinu nasipa (za brane se često traže nešto veće vrijednosti)	90 % - 92 %	93 %
	potrebno za prevenciju likvefakcije	95 % ( $I_D \sim 70 - 75 \%$ )	-
obično dopustivi raspon vlažnosti oko optimalne		-	$\pm 2 \%$ ( $< \pm 1.5 \%$ teško postići)
kontrola zbijenosti		suha gustoća	suha gustoća i vlažnost
utjecaj vlažnosti na mogućnost zbijanja		mali	veliki
utjecaj strukture tla nakon zbijanja na čvrstoću, krutost i vodo-propusnost		mali	veliki
strojno zbijanje		glatki vibro-valjci	valjci sa stopama ili ježevi (bolje, ali skuplje)
„ručno“ zbijanje		vibro-ploče, reverzibilne ploče	nabijači
tipične visine nasipanja slojeva (okvirni rasponi, ovisi o vrsti i težini stroja, broju „prelaza“, amplitudi i frekvenciji vibracija)	dobro zbijanje, uobičajeno	15 - 30 cm	15-20 cm
	dobro zbijanje, vrlo teški strojevi	do 60 cm (do 150 cm za kameni nasip)	do 30 cm
	srednje zbijanje	-	do 45 cm
	ručno zbijanje	15 cm	15 cm
	dozvoljena veličina najvećeg zrna	1/3 visine sloja	

# Pogodnost tla za ugradnju u nasipe

**Karta relativne inženjerske uporabivosti pojedinih vrsta tla za nasipanje i zbijanje (NAVFAC, 1982)**

Simbol	Vrsta tla	Relativna pogodnost (1 = najbolje, 14 = najlošije)									
		Nasute brane		Kanali		Temelji		Prometnice		Nasipi	
		Homogeni nasip	Jezgra	Potporna zone	Otpornost na eroziju	Zbijena zemljana obloga	Procjedivanje bitno	Procjedivanje nije bitno	Moguće smrzavanje	Nije moguće smrzavanje	Površinski sloj
Šljunci	GW	Dobro graduirani šljunak, malo sitnih čestica	-	-	1	1	-	-	1	1	1
	GP	Slabo graduiran šljunak, malo sitnih čestica	-	-	2	2	-	-	3	3	3
	GM	Prašinasti šljunak	2	4	-	4	4	1	4	4	9
	GC	Zaglinjeni šljunak	1	1	-	3	1	2	6	5	5
Pijesci	SW	Dobro graduirani pjesak, malo sitnih čestica	-	-	3	6	-	-	2	2	2
	SP	Slabo graduirani pjesak, malo sitnih čestica	-	-	4	7	-	-	5	6	4
	SM	Prašinasti pjesak	4	5	-	8	5**	3	7	6	10
	SC	Zaglinjeni pjesak	3	2	-	5	2	4	8	7	6
Sitnozrna tla Masna	ML	Nisko plastične prašine	6	6	-	-	6**	6	9	10	11
	CL	Neorganske nisko plastične gline	5	3	-	9	3	5	10	9	7
	OL	Organska tla niske plastičnosti	8	8	-	-	7	7	11	11	12
	MH	Visoko plastične prašine	9	9	-	-	-	8	12	12	13
	CH	Visoko plastične gline	7	7	-	10	8***	9	13	13	8
	OH	Organska tla visoke plastičnosti	10	10	-	-	-	10	14	14	14

# Projektiranje

- Ustroj građevine, presjeci, profili
- Laboratorij
- Geotehnički proračuni
- Ekonomski analize

- Veza teren-laboratorij
- Kriteriji prihvatljivosti

- Kriteriji za izbor opreme
- Nadzor i kontrola izvođenja
- Utjecaj i važnost varijabilnosti parametara

- Prilagodba specifičnim uvjetima
- Modifikacije i dopune projekta

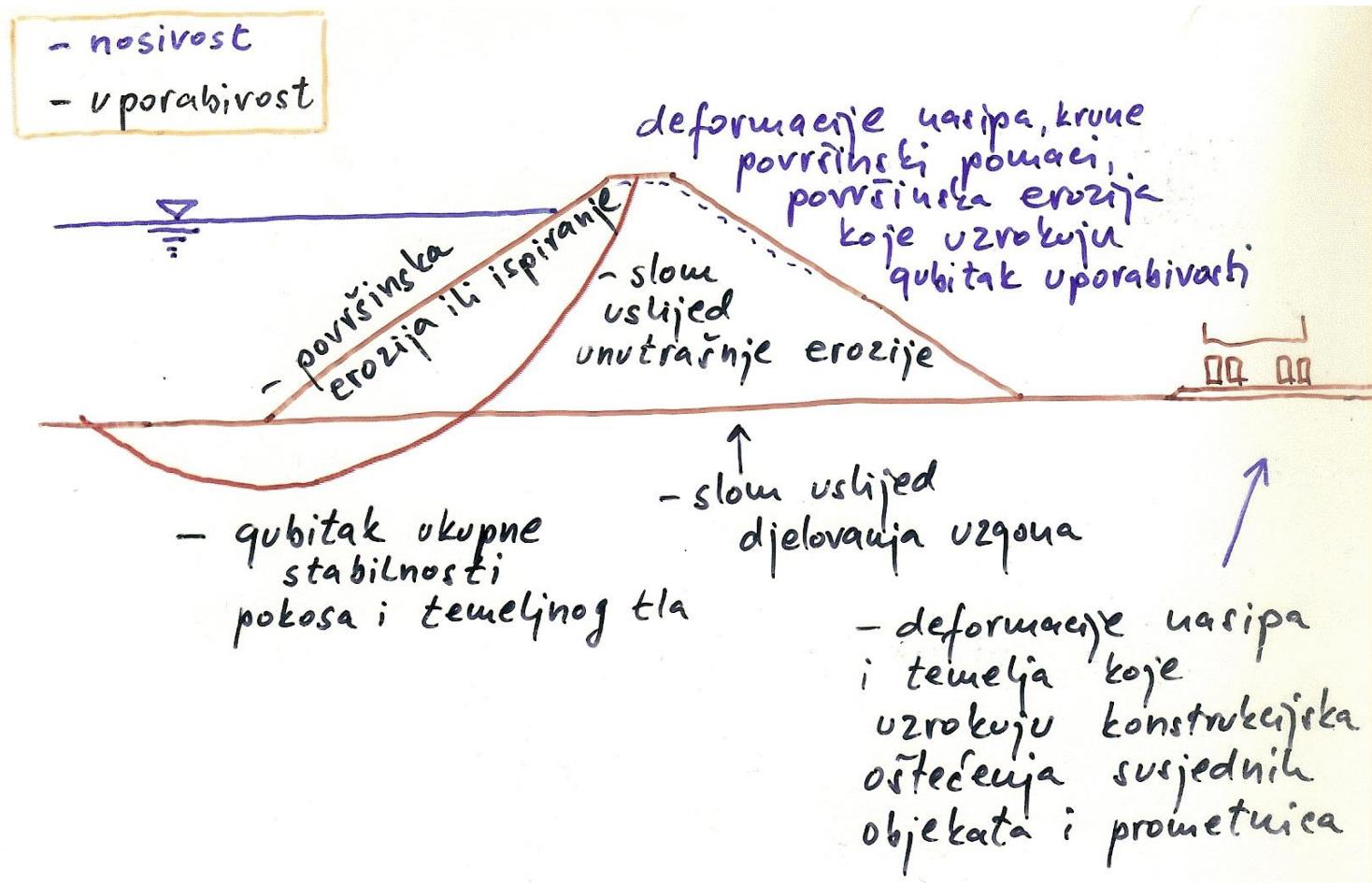
- monitoring
- Održavanje
- Upute investitoru

# Sprega proračuna i mjeranja

- Prilagodba specifičnim uvjetima
- Racionalno korištenje klasičnih ili novih tehnologija
- “transparentnost” veza materijalnih svojstava i zahtjeva konstrukcije
- Brze procjene značaja varijabilnosti parametara
- Kompjuterizacija na terenu, brži i cjelovitiji pregled napredovanja
- Kriteriji za izbor izvođača ili opreme
- Lakša komunikacija svih sudionika

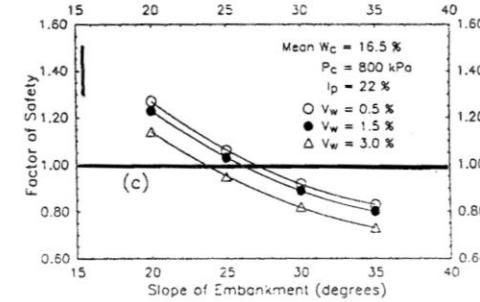
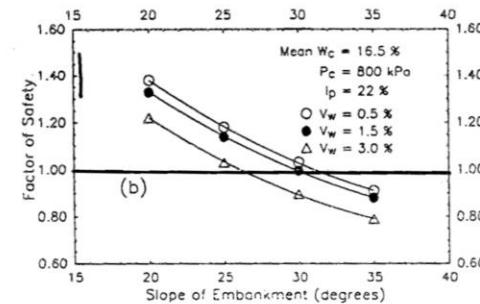
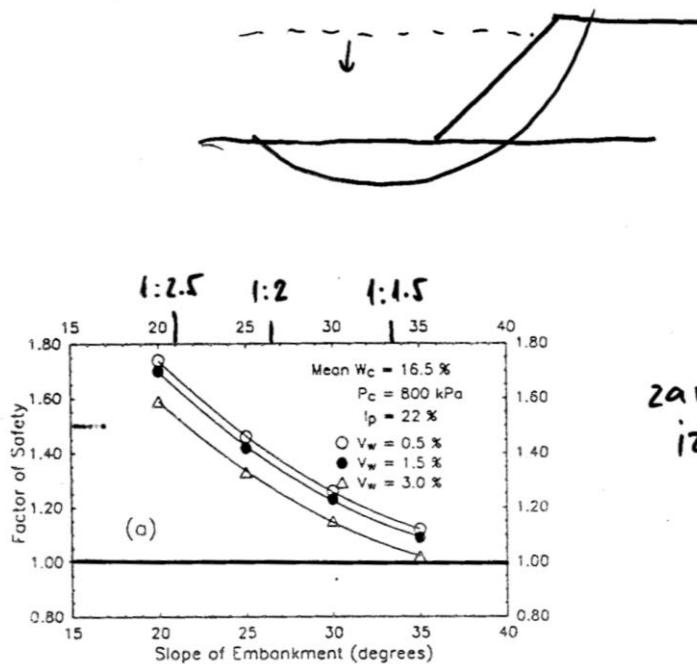
# Sprega proračuna i mjerena

## KONSTRUKCIJA – granična stanja EC7



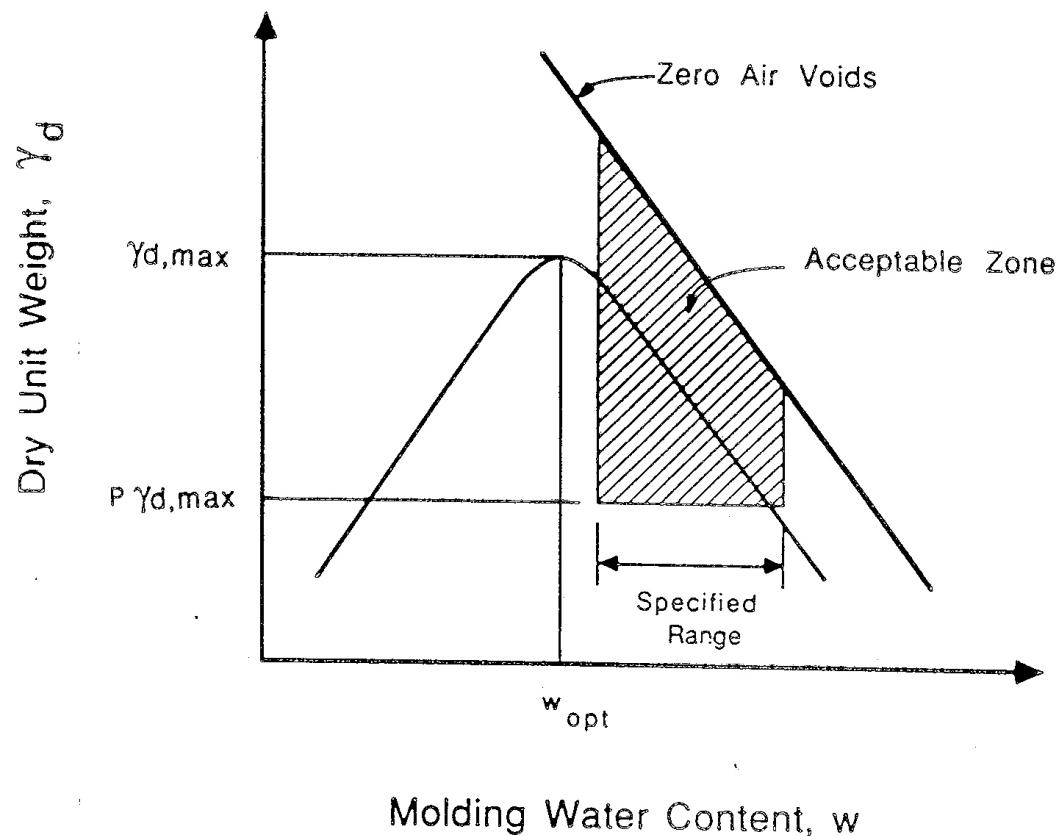
# Sprega proračuna i mjerena

## KONSTRUKCIJA – granična stanja EC7



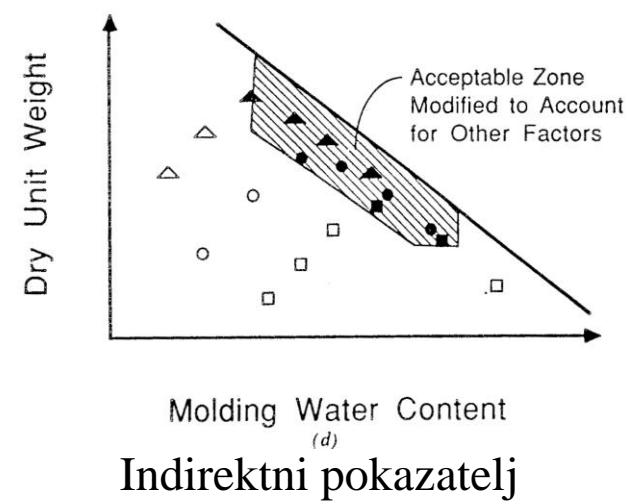
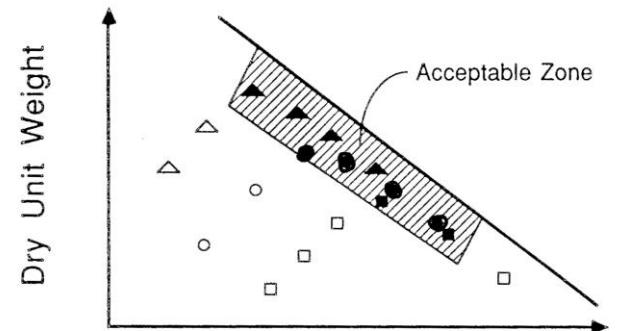
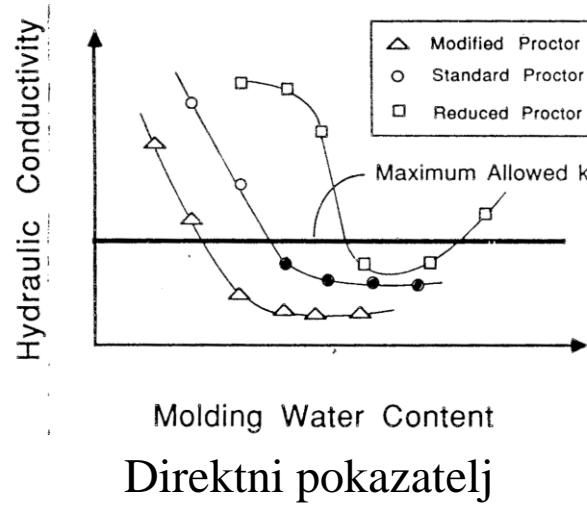
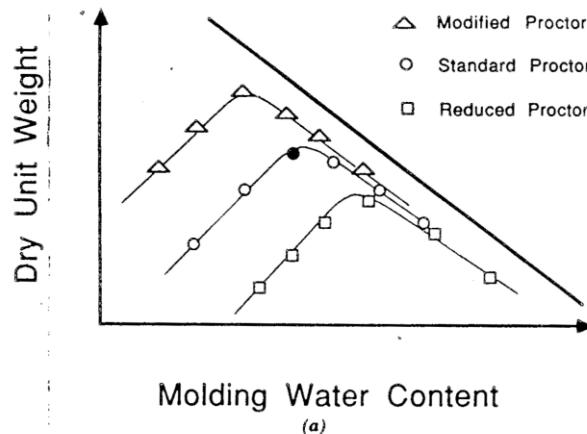
# Sprega proračuna i mjerena

## Kriteriji prihvatljivosti – tradicionalni pristup



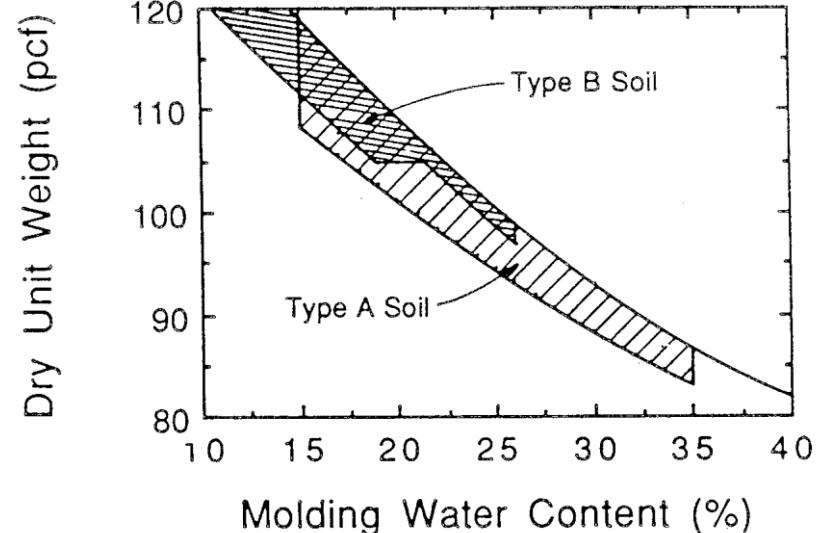
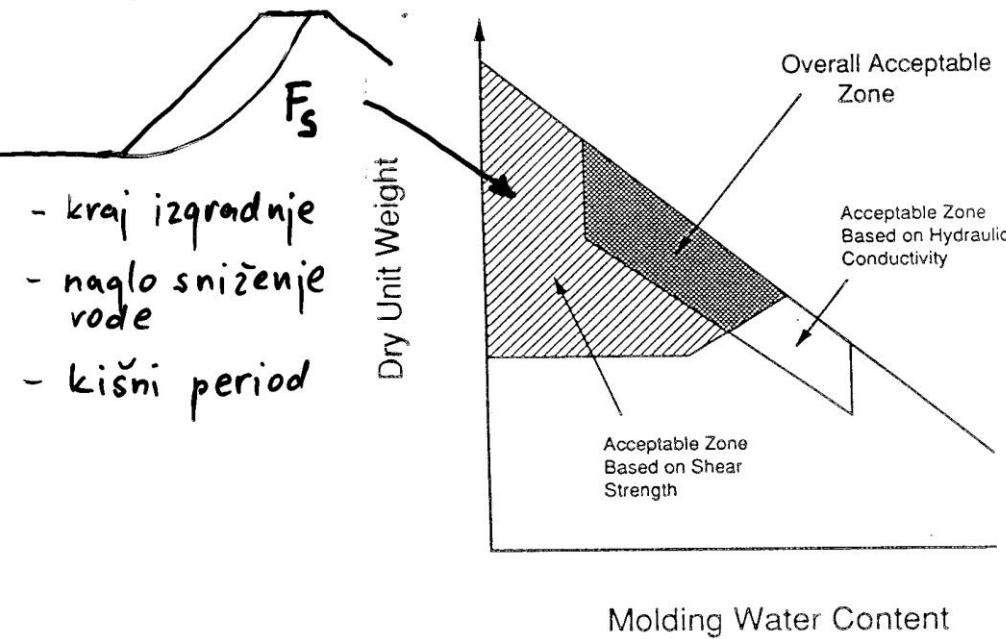
# Sprega proračuna i mjerena

Kriteriji prihvatljivosti – prema rezultatima mjerena i proračuna



# Sprega proračuna i mjerena

Kriteriji prihvatljivosti – prema rezultatima mjerena i proračuna



# Preporučeni dijagram toka geotehničkog projektiranja ugradnje zemljanih materijala

