

Sveučilište u Zagrebu

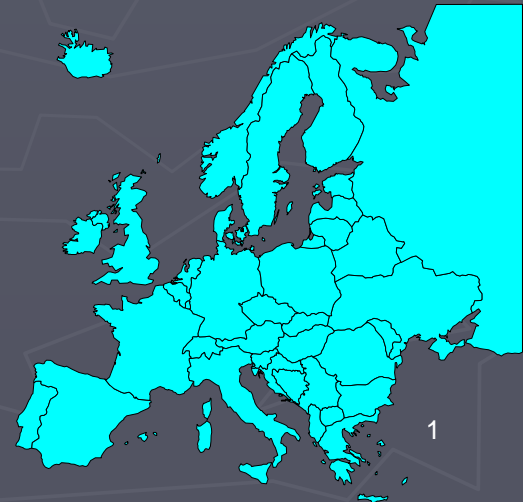
Diplomski sveučilišni studij

Građevinski fakultet

Smjer: **GEOTEHNIKA**

Nasipi i brane

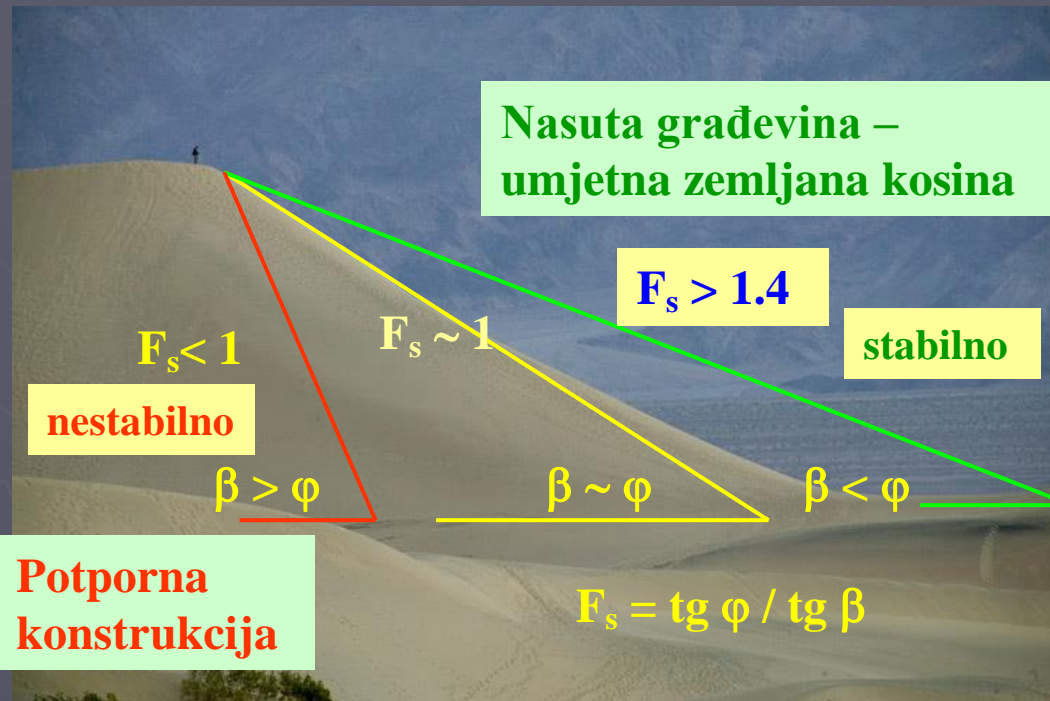
Prof. dr. sc. Tomislav Ivšić
Građevinski fakultet Zagreb



Nasute građevine

- ▶ Nasute građevine – geotehničke konstrukcije izvedene nasipavanjem prirodnih zemljanih materijala
- ▶ Izgradnja uključuje zemljane radove za velike volumene tla i osnovne aktivnosti: iskop u nalazištima, premještanje (transport) i kontrolirana ugradnja u nasip
- ▶ Načelno: nasipi i brane se grade iz pogodnih materijala koji su što bliže neposrednoj lokaciji građevine
- ▶ Ove građevine “izrastaju” iz tla i projektna rješenja se prilagođavaju sastavu temeljnog tla i materijalu tla od kojeg se gradi
- ▶ Nasip s temeljnim tlom čini konstrukciju koja mora zadovoljiti uvjete stabilnosti (GSN) i uporabivosti (GSU) za sebe i za građevine koje će se na njemu graditi - zahtjevi za čvrstoćom i krutošću nasipanog materijala

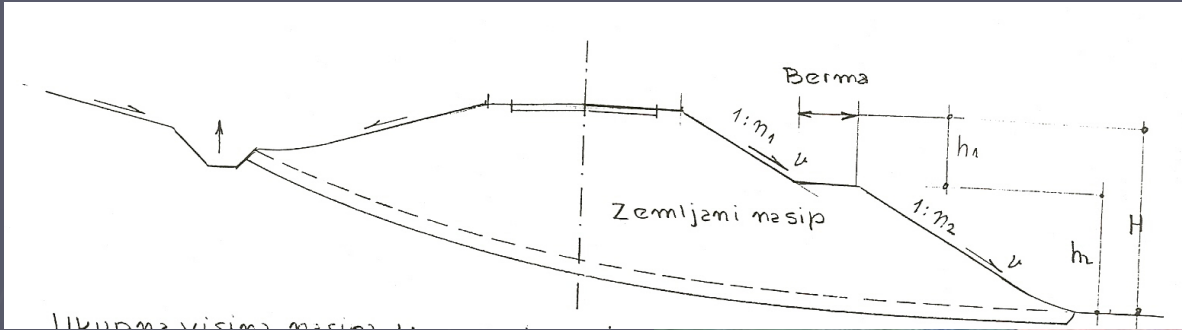
Nasute građevine



Vrste nasutih građevina

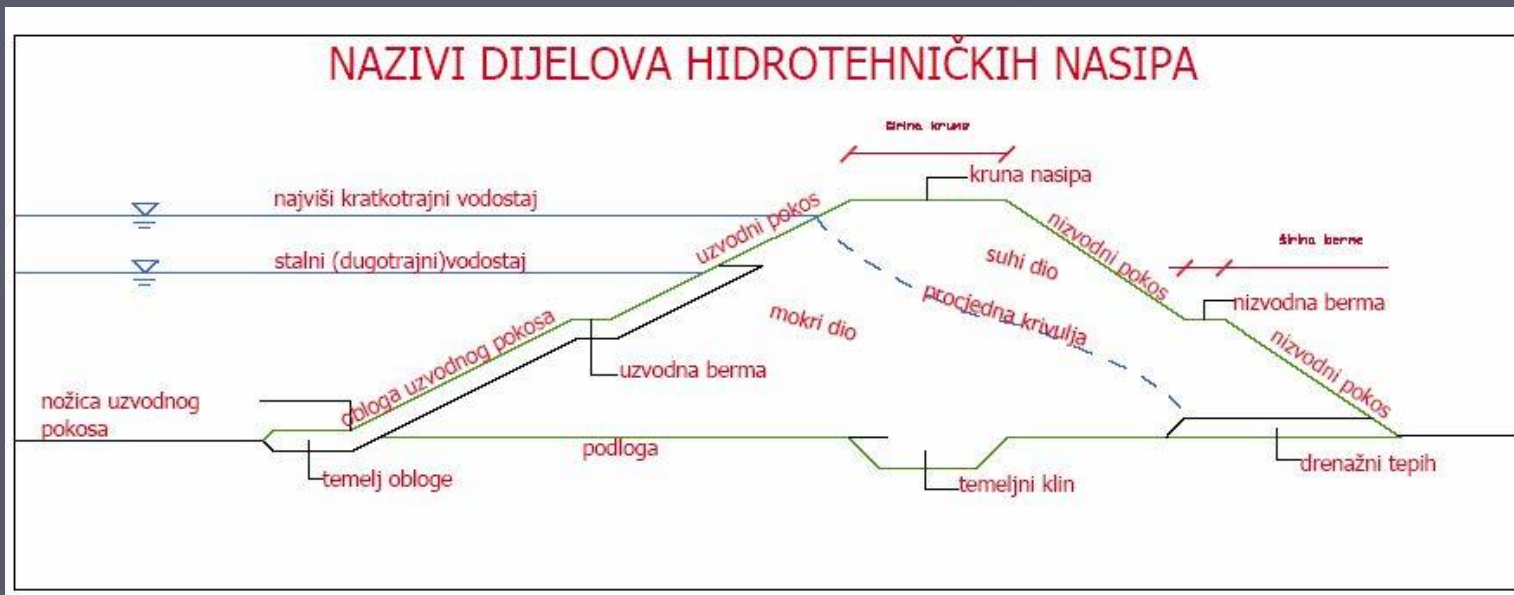
- ▶ Nasipi za prometnice (ceste, željeznice, aerodromi)
- ▶ Hidrotehnički nasipi (obrana od poplava, regulacije vodotoka)
- ▶ Brane (akumulacijska jezera, retencijski bazeni)
- ▶ Lukobrani
- ▶ Podloge i zasipi (ispod temeljnih konstrukcija, iza potpornih konstrukcija)
- ▶ Odlagališta otpada (komunalnog i industrijskog)
- ▶ Oblikovanja terena (pejzaž)

Vrste nasutih građevina



Cestovni nasipi –
stabilnost, stišljivost

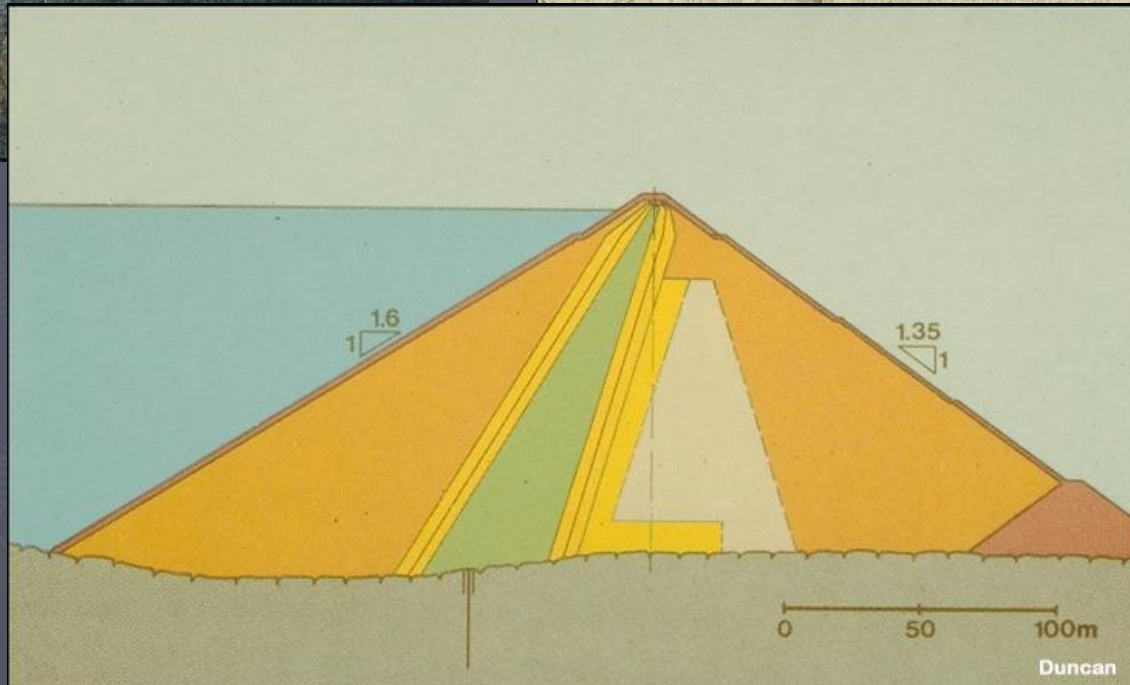
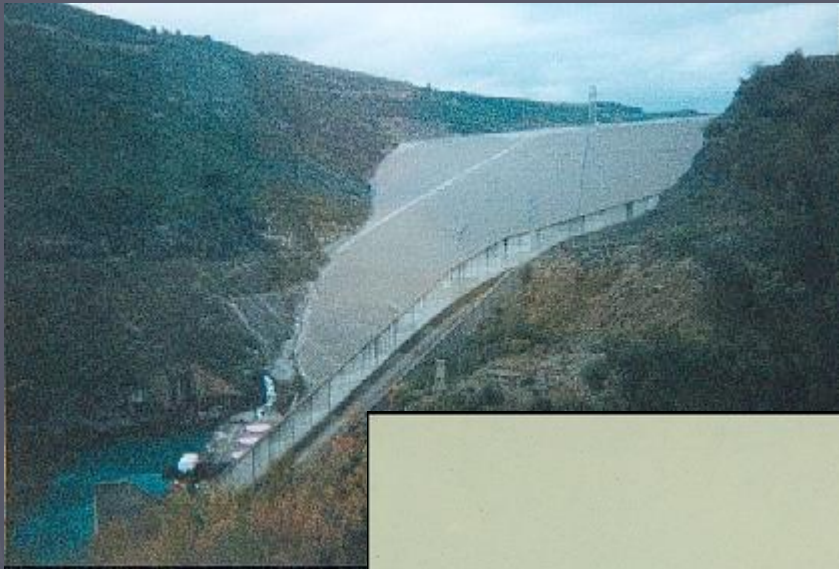
Vrste nasutih građevina



Hidrotehnički nasipi –
stabilnost,
vododrživost,
stišljivost

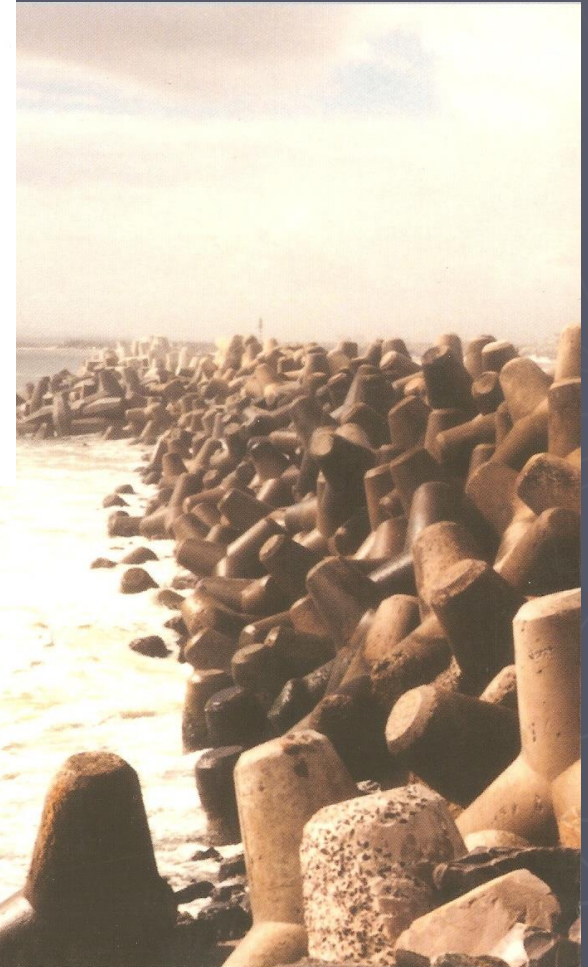
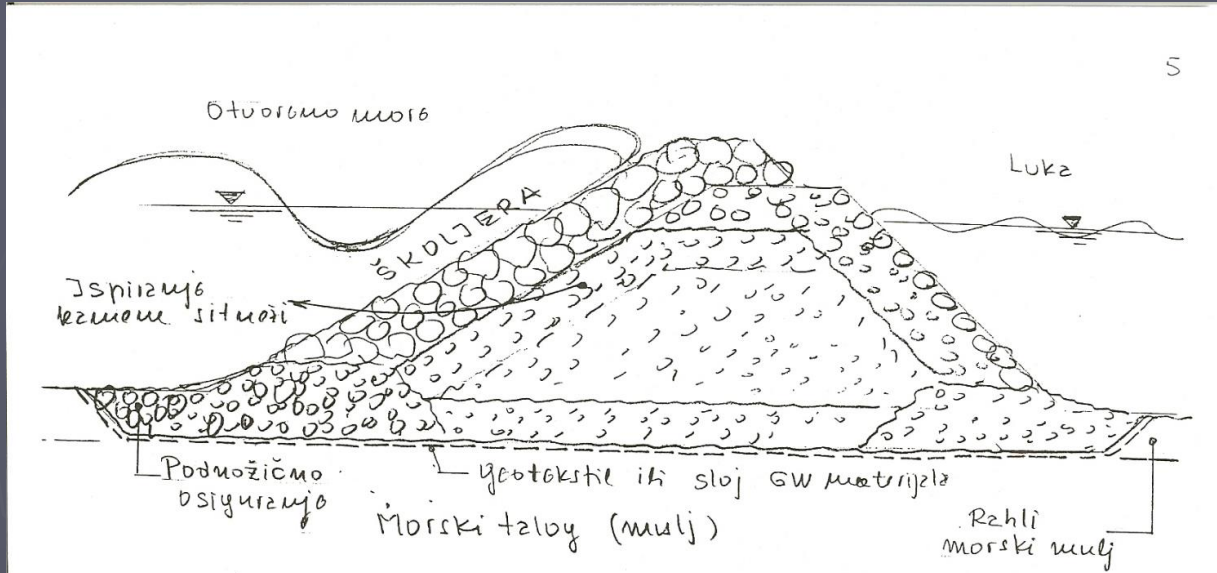


Vrste nasutih građevina



Brane –
stabilnost,
vododrživost

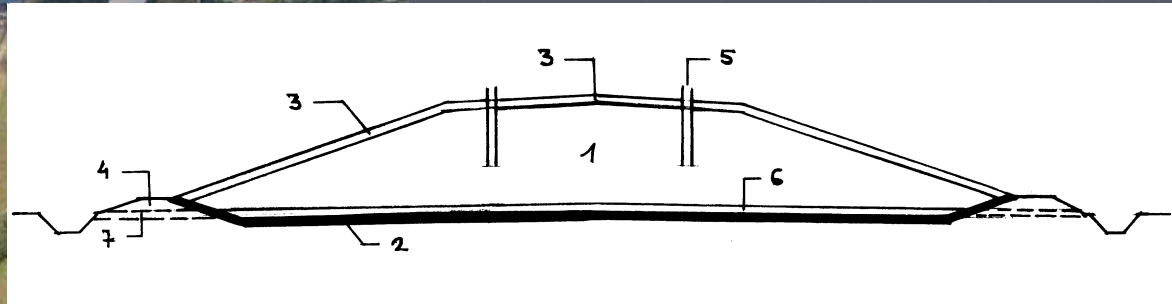
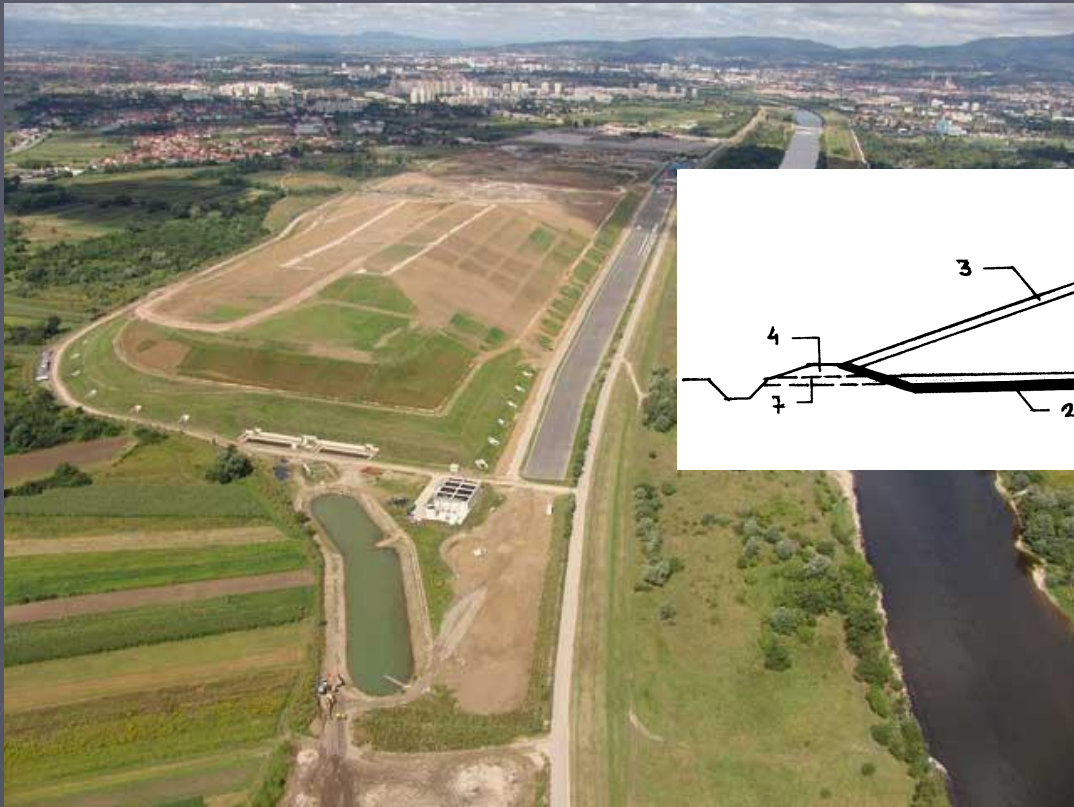
Vrste nasutih građevina



Lukobrani – stabilnost na djelovanja valova (zajedno s podlogom)

Vrste nasutih građevina

Odlagališta otpada - stabilnost



- 1Otpad
- 2Donji brtveni sloj
- 3Pokrovni sloj
- 4Obodni nasip
- 5Zdenci za otplinjavanje
- 6Drenažni tepih (plošni dren)
- 7Odvod vode iz plošnog drena

Iskop, prijevoz, nasipanje i zbijanje tla

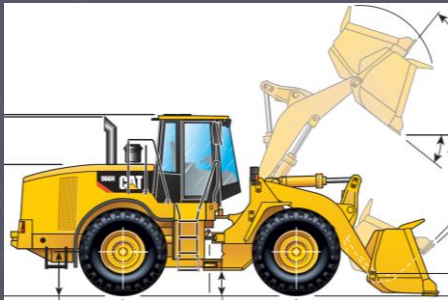
(a)



(d)



(e)



(b)



(c)



(f)



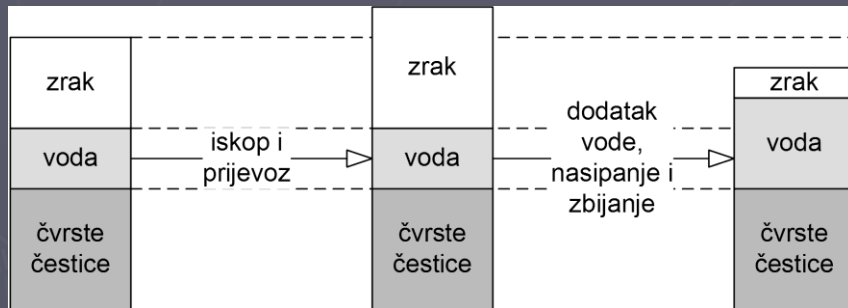
(g)

Slika 7-1 Tipični strojevi za zemljane radove: (a) bageri za iskop i utovar, (b) utovarivač za utovar iskopanog 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

Zbijanje tla

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



Slika 7-2 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)

Zbijanje tla u laboratoriju

Utjecaj vlažnosti na mogućnost zbijanja

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{\rho}{1 + w}$$

$$\rho_d = \frac{G_s S_r}{S_r + w G_s} \rho_w$$

$$\rho_d = \frac{G_s (1 - A)}{1 + w G_s} \rho_w$$

m_s i V masa čvrstih čestica odnosno volumen uzorka tla,

$\rho = m/V$ i $w = m_w/m_s$ su gustoća odnosno vlažnost uzorka tla

$m = m_s + m_w$, m i m_w su masa uzorka odnosno masa vode

$G_s = \rho_s/\rho_w$ je relativna gustoća čvrstih čestica,

ρ_s i ρ_w su gustoća čvrstih čestica odnosno gustoća vode

$S_r = V_w/V_V$ je stupanj zasićenosti

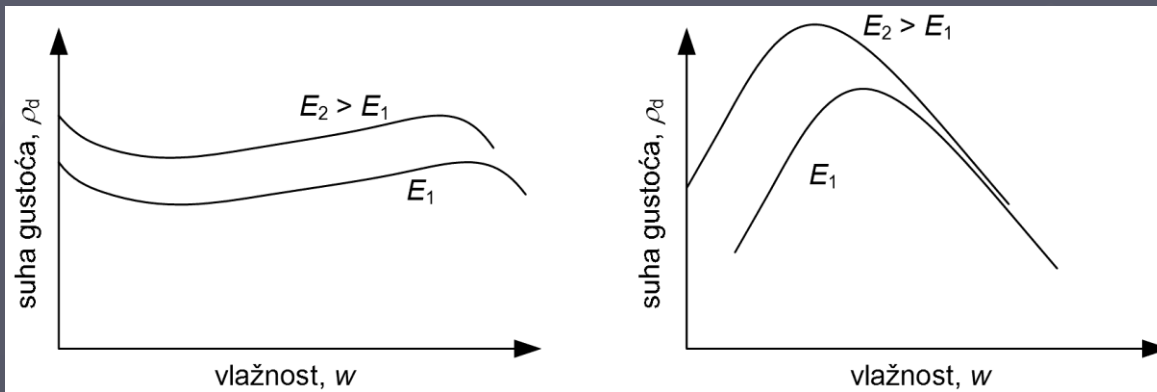
V_w i V_V su volumen vode odnosno volumen pora

$A = V_a/V$ je udio zraka u uzorku,

V_a je volumen zraka u uzorku.

Zbijanje tla u laboratoriju

Utjecaj vlažnosti na mogućnost zbijanja



(a)

(b)

Slika 7-3 Krivulje zbijanja: utjecaj vlažnosti tla na postignutu zbijenost, izraženu kroz suhu gustoću tla, pri nekoj energiji zbijanja (E); razlika između tipičnih krivulja za krupnozrna (a) i sitnozrna tla (b).

$$\rho_d = \frac{G_s}{1 + wG_s} \rho_w$$

Puni oblik za različite S_r :

$$\gamma = \rho * g$$

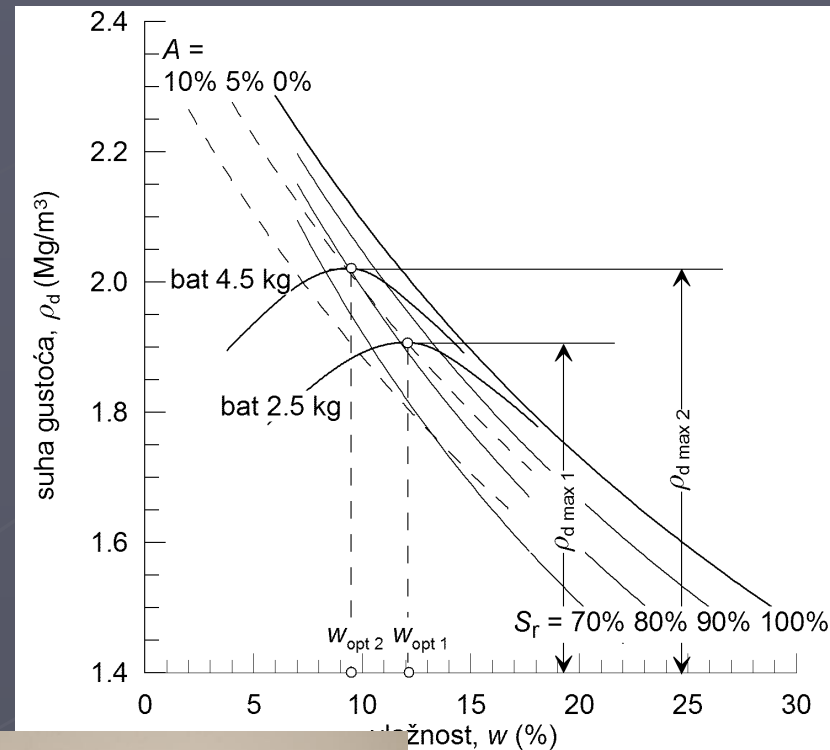
$$\gamma_d = \gamma_s \gamma_w S_r / (\gamma_s w + \gamma_w S_r)$$

Zbijanje tla u laboratoriju

Proctorovi pokusi i najveća zbijenost sitnozrnih tla

Tablica 7-1 Osnovne karakteristike standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa prema standardima SAD (ASTM)

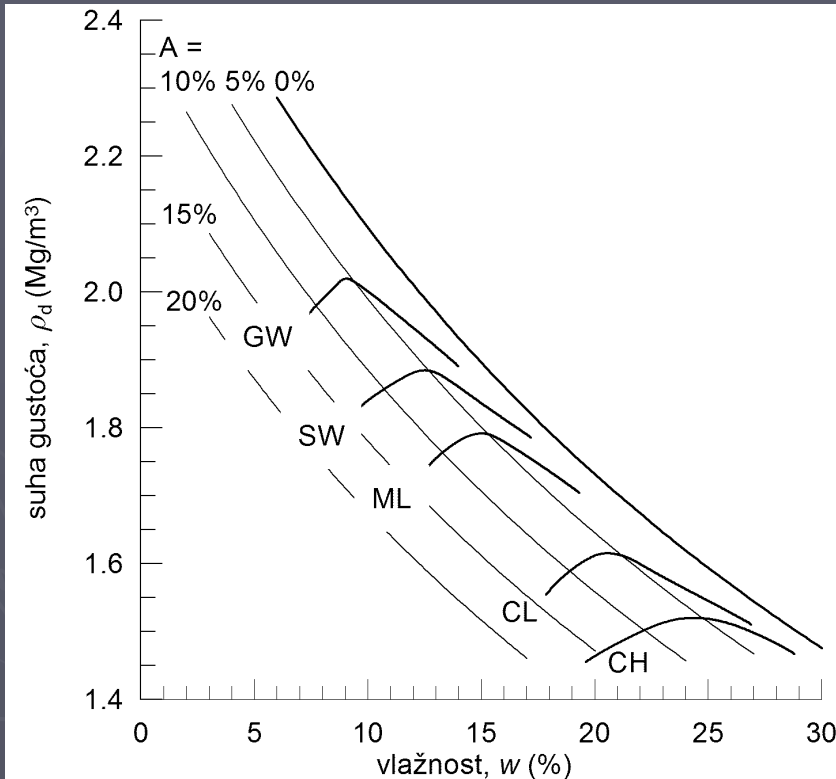
Pokus	broj slojeva tla	masa bata, kg	visina pada bata, m	Broj padova po sloju	Ukupna energija, kNm/m ³	standard
Standardni Proctorov pokus	3	2.49	0.305	25	592.7	ASTM D698 (1980)
Modificirani Proctorov pokus	5	4.54	0.457	25	2693	ASTM D1557 (1980)



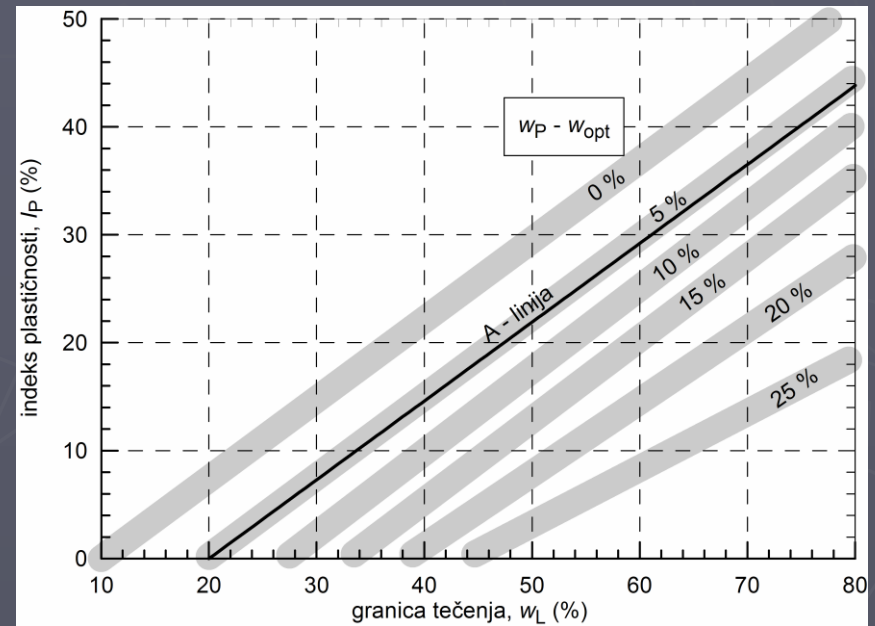
ve suhe gustoće pri zbijanju u
2.5 kg) i
bat 4.5 kg) za isto sitnozrno tlo

Zbijanje tla u laboratoriju

Proctorovi pokusi i najveća zbijenost sitnozrnih tla



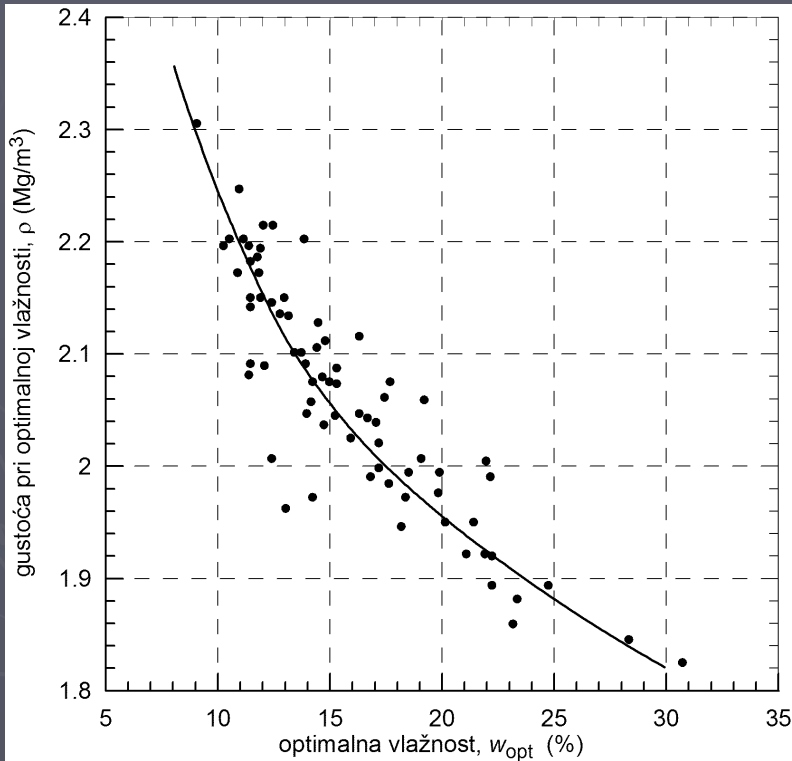
Slika 7-5 Tipične krivulje zbijenosti prema standardnom Proctorovom pokusu za različite vrste sitnozrnih tla



Slika 7-6 Približne razlike između granice plastičnosti i optimalne vlažnosti za standardni Proctorov pokus za sitnozrna tla

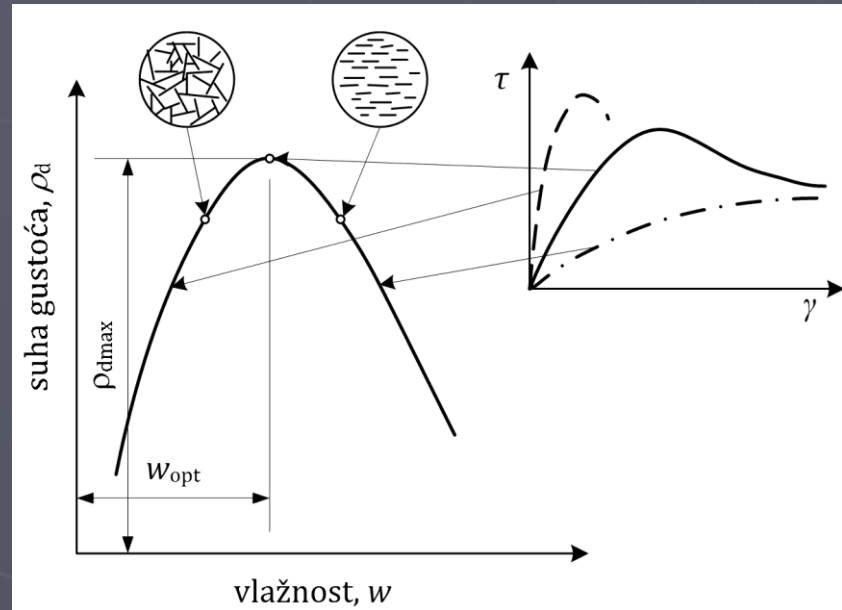
Zbijanje tla u laboratoriju

Proctorovi pokusi i najveća zbijenost sitnozrnih tla



Slika 7-7 Odnos gustoće tla pri optimalnoj vlažnosti prema standardnom Proctorovom pokusu i optimalne vlažnosti za niz različitih sitnozrnih tla

Utjecaj zbijanja na strukturu, čvrstoću, krutost i vodopropusnost sitnozrnog tla



Slika 7-8 Utjecaj relativnog odnosa vlažnosti i optimalne vlažnosti na strukturu, posmičnu čvrstoću, krutost i duktilnost tla

Zbijanje tla u laboratoriju

Indeks gustoće krupnozrnih tla

$$I_D(\%) = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 = \frac{\rho_{d \max}}{\rho_d} \frac{\rho_d - \rho_{d \min}}{\rho_{d \max} - \rho_{d \min}} \times 100$$

gdje su e_{\max} i $\rho_{d \min}$ te e_{\min} i $\rho_{d \max}$ koeficijenti pora i suhe gustoće koji odgovaraju nekoj standardiziranoj⁵ minimalnoj odnosno maksimalnoj zbijenosti krupnozrnog tla

Tablica 7-2 Osnovne značajke pokusa za određivanje najmanje i najveće zbijenosti krupnozrnog tla (vidi i: Schroeder i dr., 2004)

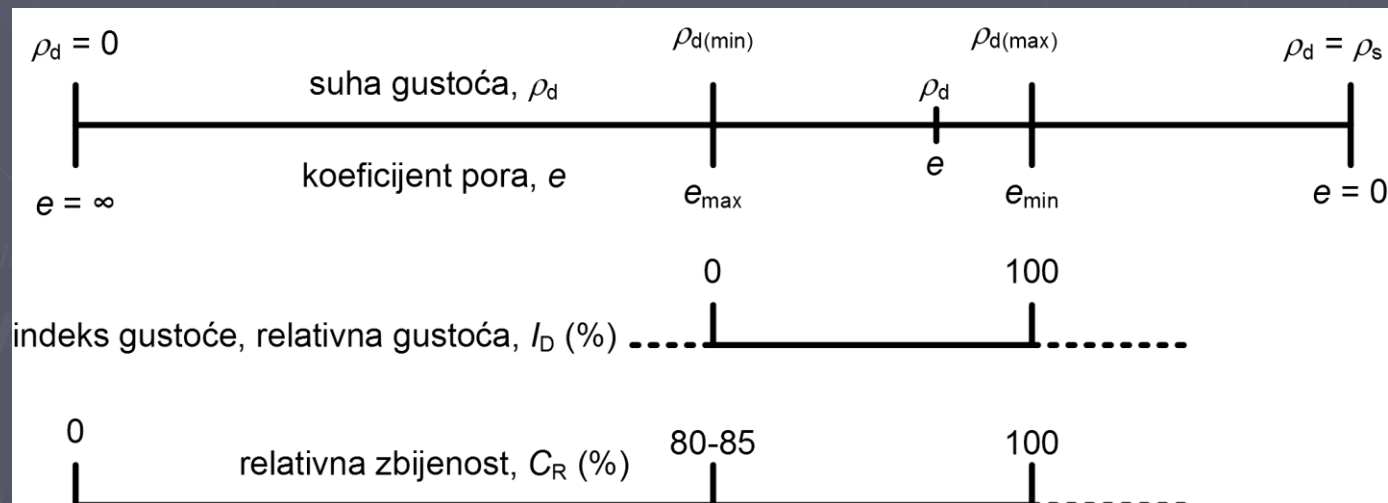
pokus	oznaka	postupak formiranja uzorka	standard
najmanja zbijenost	e_{\max} ili $\rho_{d \min}$	sipanje osušenog pijeska u posudu poznatog volumena kroz lijevak donjeg otvora promjera oko 1.3 cm s visinom pada pijeska od oko 1.3 cm; 3 puta ponoviti pokus	ASTM D4253
najveća zbijenost	e_{\min} ili $\rho_{d \max}$	vibriranje osušenog pijeska u šupljem cilindru, pod opterećenjem utega od oko 12.5 N koje se prenosi preko krute ploče na površinu pijeska, na vibro-stolu 10 min pri frekvenciji od 50 do 60 Hz; ponavljati pokus dok gustoće ne variraju unutar 2 %	ASTM D4254

Zbijanje tla u laboratoriju

Relativna zbijenost

$$C_R(\%) = \frac{\rho_d}{\rho_{d \max}} \times 100$$

ρ_d gustoća zbijenog tla, a $\rho_{d \max}$ najveća suha gustoća određena standardnim ili modificiranim Proctorovim pokusom



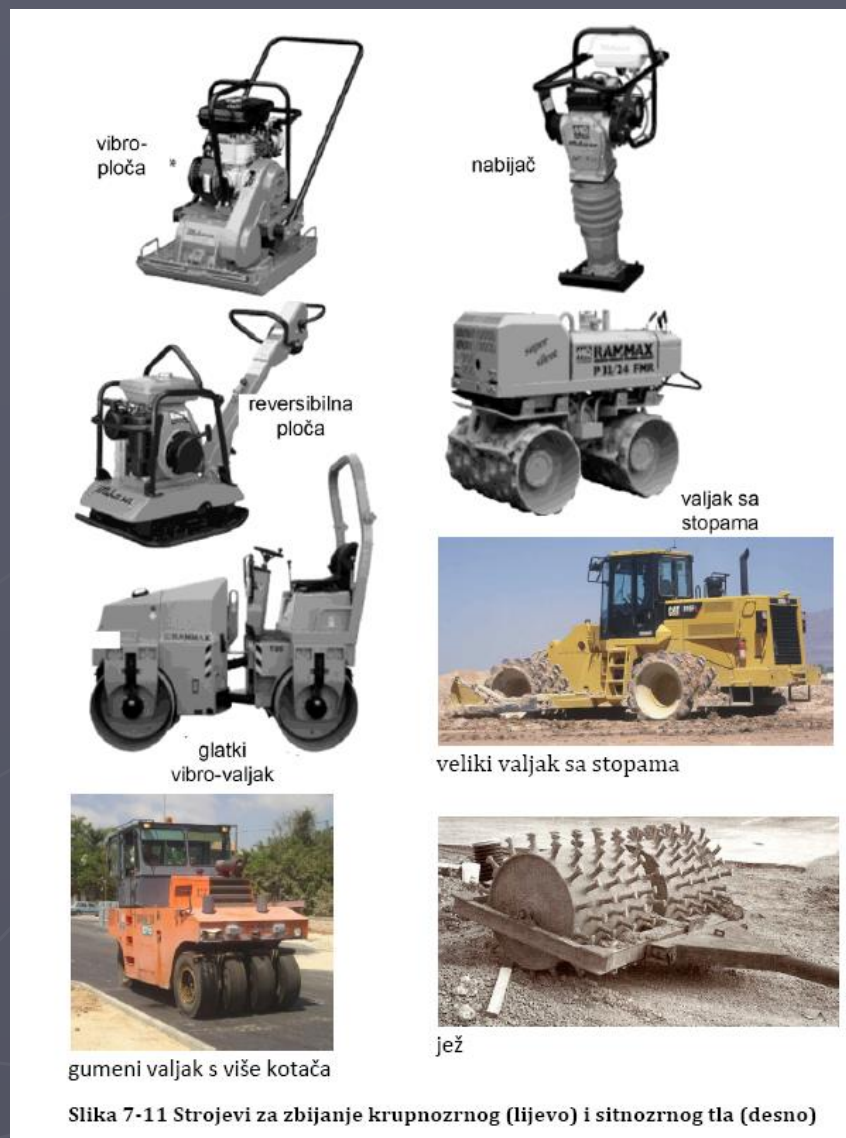
Slika 7-9 Međusobni odnosi različitih mjera zbijenosti nasutog i zbijenog tla

Zbijanje tla na terenu

Strojevi za zbijanje



Slika 7-10 Primjenjivost pojedinih vrsta strojeva za zbijanje u odnosu na granulometrički sastav tla (prerađeno prema Coduto, 1999)

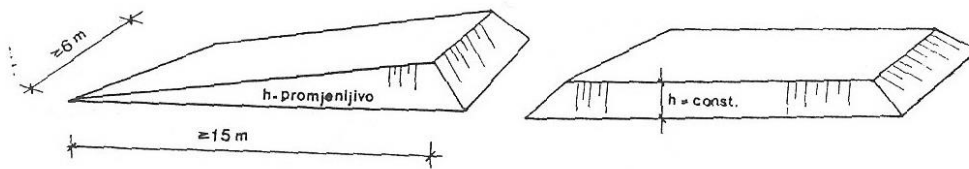


Slika 7-11 Strojevi za zbijanje krupnozrnog (lijevo) i sitnozrnog tla (desno)

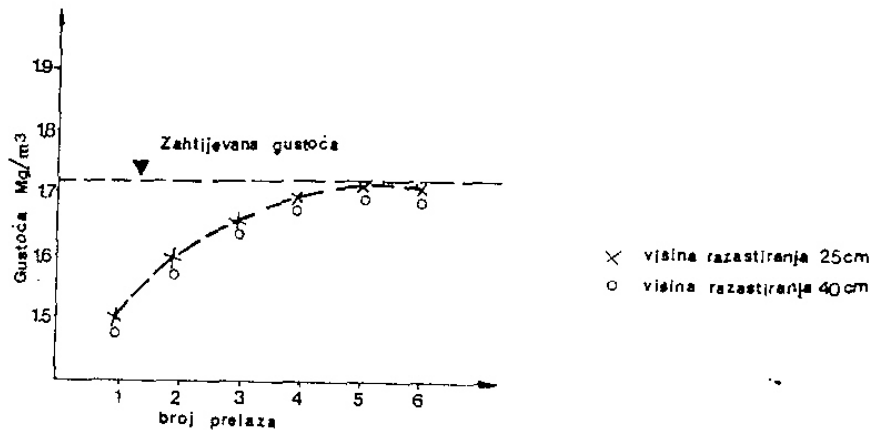
Zbijanje tla na terenu

Kontrola zbijenosti

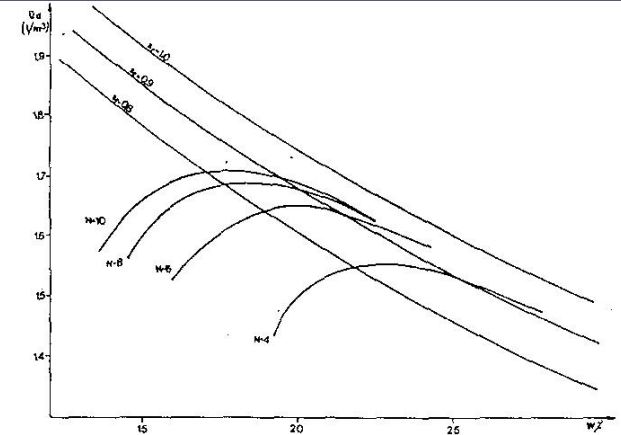
PROBNO POLJE



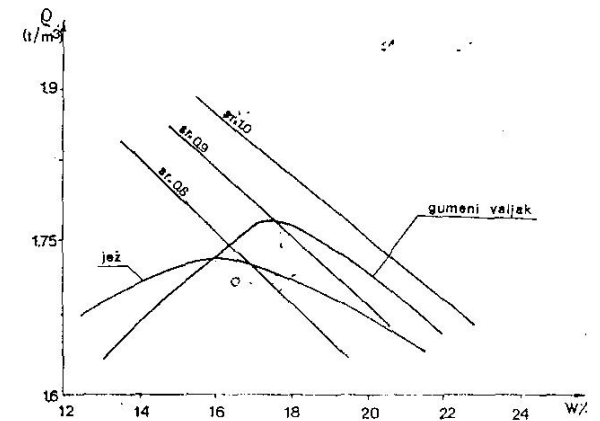
Sl. 6 Probno polje za koherentni materijal



7. Rezultati mjerenja na probnom polju za koherentni materijal



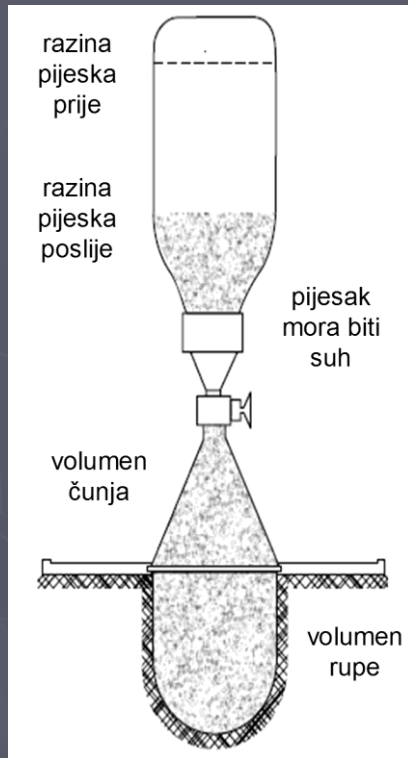
9. Odnos između broja prelaza vibracijskog ježa mase 9t i postignute jedinične težine ugrađene gline CH



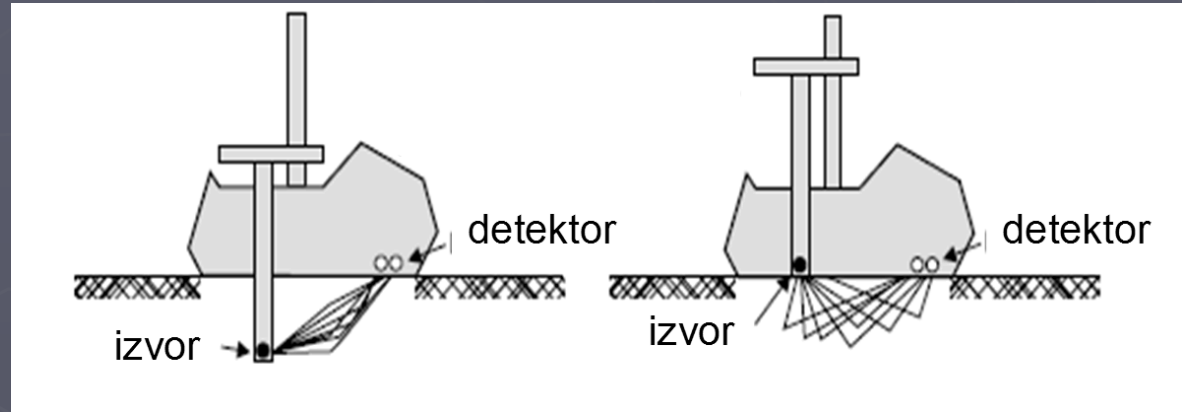
10. Usporedba rezultata zbijanja gumenim valjkom i ježom za prašinstu glinu

Zbijanje tla na terenu

Kontrola zbijenosti na terenu



Slika 7-12 Pokus pješčanog stošca za određivanje volumena iskopane rupe, a time i gustoće zbijenog tla (ASTM D 1556)



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

Zbijanje tla na terenu

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		-	± 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	

Kriteriji zbijenosti

Zbijanje tla na terenu

Kriteriji zbijenosti

Tablica 7-4 Kriteriji zbijanja nasipa prema OTU (2001)

Karakteristika	zemljani materijali (gline, prašine, glinoviti pijesci i slični materijali osjetljivi na prisutnost vode)	miješani materijali (glinoviti šljunci, zaglinjene kamene drobine, trošne stijene-škrljci, lapor, flišni materijali i slično - manje osjetljivi na djelovanje vode)	kameni materijali (materijal dobiven miniranjem stijene, kamena drobina i šljunci)
visina sloja za zbijanje (cm)	30-50	30-60	50-100
strojevi za zbijanje	ježevi, glatki valjci na kotačima s gumama, vibro ploče	valjci	vibro valjci, vibro nabijači, kompaktori
granulacija, $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$	veći od 9	veći od 9	veći od 4
najveće zrno	-	-	½ debljine sloja, ne veće od 40 cm
sadržaj organskih tvari	do 6 %	-	-
najveća optimalna vlažnost (po standardnom Proctorovom pokusu)	manja od 25 %	-	-
najmanja suha gustoća	naspi do 3 m: veća od 1.5 Mg/m ³ naspi viši od 3 m: veća od 1.55 Mg/m ³	-	-
najviša granica tečenja	65 %	-	-
najviši indeks plastičnosti	30 %	-	-
najveće bubrenje pod vodom nakon 4 dana	4 %	-	-
raspon vlažnosti oko optimalne (po standardnom Proctorovom pokusu)	±2 %	-	-
najmanja relativna zbijenost (C_R) u odnosu na standardni Proctorov pokus ili sljedeće	donji dio nasipa: 95 % gornjih 2 m nasipa: 100 %	donji dio nasipa: 95 % gornjih 2 m nasipa: 100 %	donji dio nasipa: 95 % gornjih 2 m nasipa: 100 %
ili najmanji edometarski modul određen probnom pločom promjera 30 cm	donji dio nasipa: 20 MPa gornjih 2 m nasipa: 25 MPa	donji dio nasipa: 35 MPa gornjih 2 m nasipa: 40 MPa	donji dio nasipa: 40 MPa gornjih 2 m nasipa: 40 MPa
kontrolna ispitivanja	na svakih 2 000 m ² površine ugrađenog sloja		

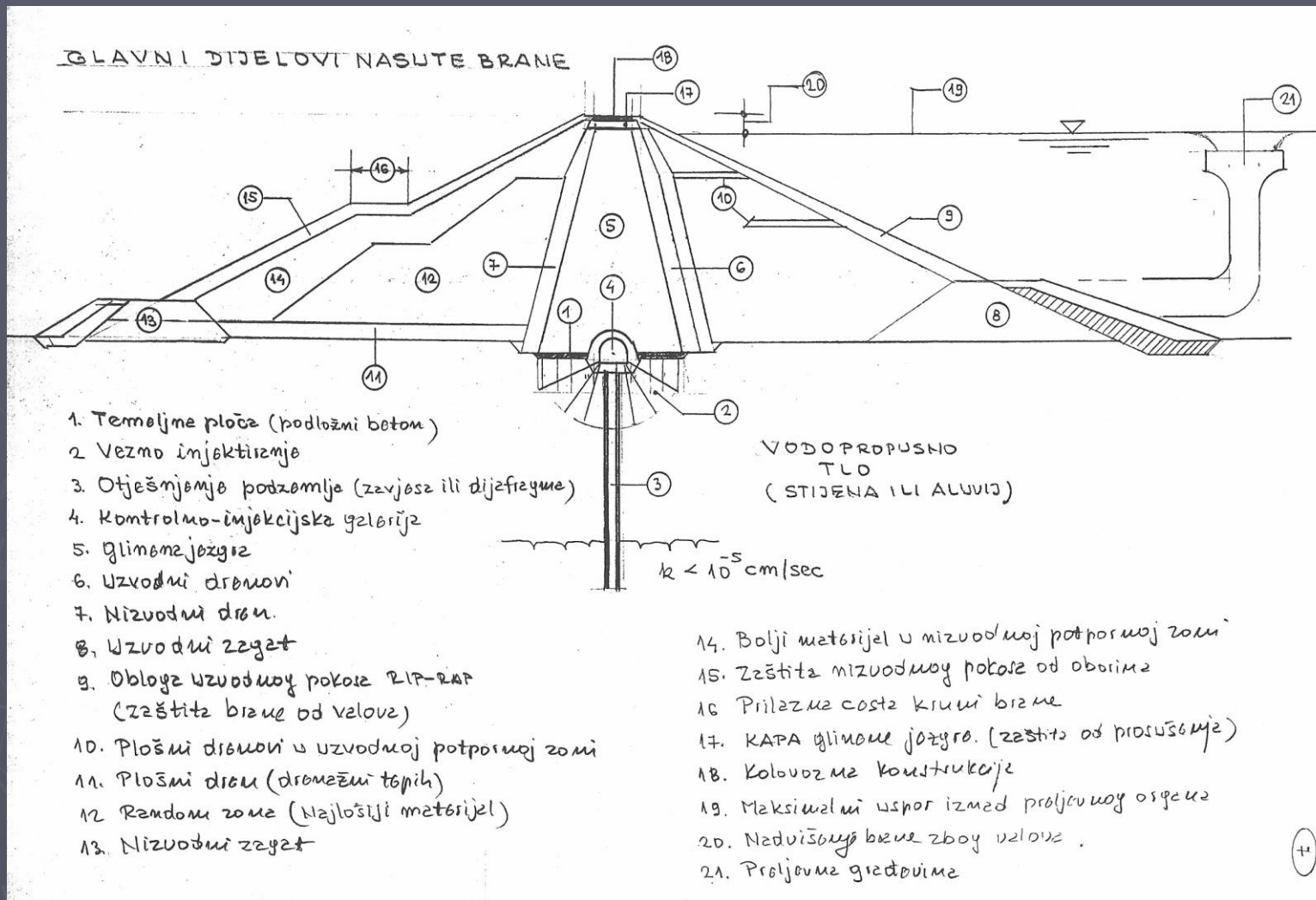
Pogodnost tla za ugradnju u nasipe

Simbol		Vrsta tla ** erozija kritična ... promjena volumena kritična - neprimjereno	Relativna pogodnost (1 = najbolje, 14 = najlošije)										
			Nasute brane		Kanali		Temelji		Prometnice				
			Homogeni nasip	Jezgra	Potporne zone	Otpornost na eroziju	Zbijena zemljana obloga	Procjeđivanje bitno	Procjeđivanje nije bitno	Nasipi		Površinski sloj	
							Moguće smrzavanje	Nije moguće smrzavanje					
Šljunci	GW	Dobro građirani šljunak, malo sitnih čestica	-	-	1	1	-	-	1	1	1	3	
	GP	Slabo građirani šljunak, malo sitnih čestica	-	-	2	2	-	-	3	3	3	-	
	GM	Prašinasti šljunak	2	4	-	4	4	1	4	4	9	5	
	GC	Zaglinjeni šljunak	1	1	-	3	1	2	6	5	5	1	
Pijesci	SW	Dobro građirani pijesak, malo sitnih čestica	-	-	3	6	-	-	2	2	2	4	
	SP	Slabo građirani pijesak, malo sitnih čestica	-	-	4	7	-	-	5	6	4	-	
	SM	Prašinasti pijesak	4	5	-	8	5**	3	7	6	10	6	
	SC	Zaglinjeni pijesak	3	2	-	5	2	4	8	7	6	2	
Sitnozrna tla	Mršava	ML	Nisko plastične prašine	6	6	-	-	6**	6	9	10	11	-
		CL	Neorganske nisko plastične gline	5	3	-	9	3	5	10	9	7	7
		OL	Organska tla niske plastičnosti	8	8	-	-	7	7	11	11	12	-
	Masna	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	-

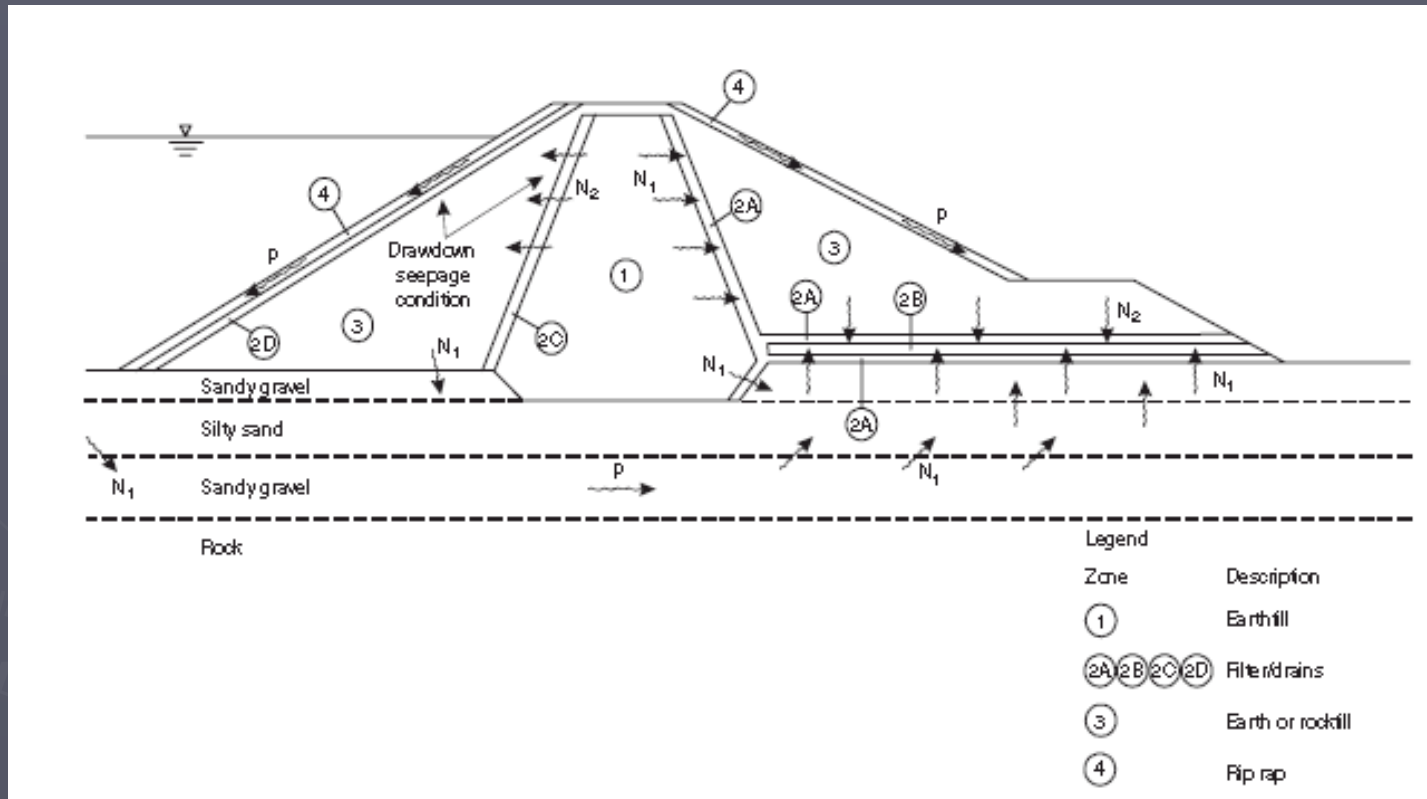
Tablica 7-5 Karta relativne inženjerske uporabivosti pojedinih vrsta tla za nasipanje i zbijanje (NAVFAC, 1982)

Nasute brane

Primjeri, dijelovi i oblikovanje brana



Projektni kriteriji za filtere

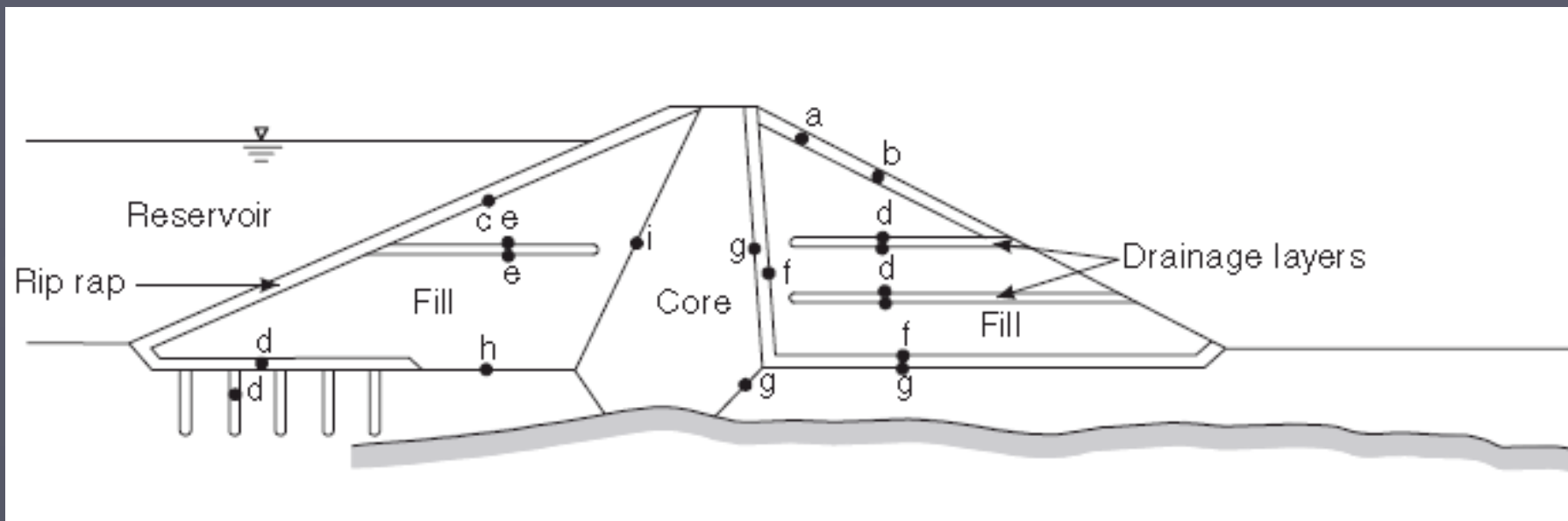


Uvjeti tečenja vode u odnosu na filtere:

- N1 – tečenje okomito na sučelje tlo – filter, visoki gradijenti, velika erozivna naprezanja
- N2 – tečenje okomito na sučelje tlo – filter – niski gradijenti, manja erozivna naprezanja

P – tečenje paralelno sa sučeljem osnovnog tla i filtera, kontaktna erozija

Projektni kriteriji za filtere



- Kritični filteri – zakazivanje dovodi do interne erozije (iznošenja sitnijih čestica materijala, stvaranja cjevčica (piping) i potencijalnog proloma brane – tečenje N1 , oznaka ‘g ‘. **NAJSTROŽI KRITERIJI ZA IZBOR MATERIJALA**
- Nekritični filteri - manje vjerojatna erozija, mogući popravci (‘a’, ‘b’, ‘c’) ili važni samo tijekom izgradnje (‘d’, ‘e’) – tečenje N2 ili P
- Filteri ‘f’, ‘i’ - kritični za ponašanje brane, ali u N2 režimu tečenja
- Filteri ‘d’ i ‘h’ – mogu biti kritični ako se može pojaviti erozija nasipa u temeljno tlo

Nasute brane

Filtri i filterska pravila

Svrha filtra je da spriječi pronos sitnih čestica kroz pore krupnozrnog tla.

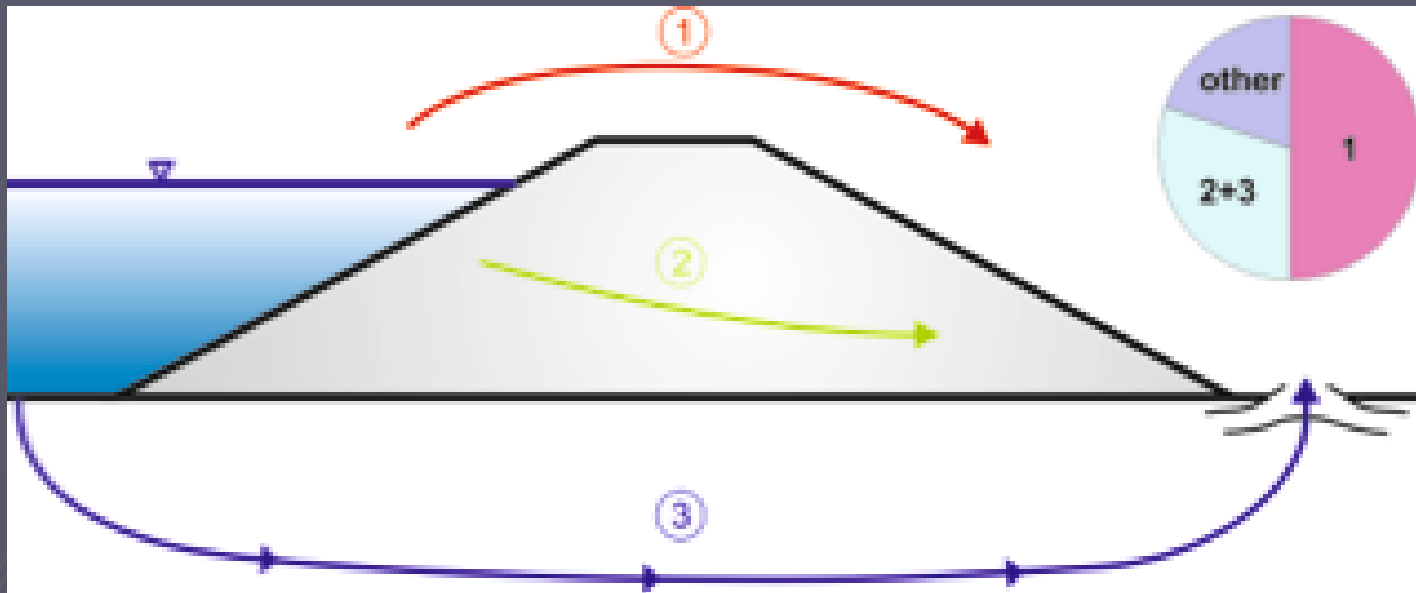
- prema potrebi višeslojni filtri

Tablica 7-6 Projektni kriteriji za filtere (Sherard i dr. 1984a, 1984b, 1985, 1989; SCS, 1986; vidi i Coduto, 1999)

Grupa tla	Opis tla	Projektni kriterij
1	Fine prašine i gline s više od 85% čestica manjih od 0.075 mm	$D_{15} \leq 9 d_{85}$ ali ne manje od 0.2 mm
2	Prašnasti i glinoviti pijesci i pjeskovite prašine i gline s 40-85% manjih od 0.075 mm	$D_{15} \leq 0.7 \text{ mm}$
3	Prašnasti glinoviti pijesci i šljunci s 15-39 % čestica manjih od 0.075 mm	$D_{15} \leq \frac{40-A}{25} (4d_{85} - 0.7 \text{ mm}) + 0.7 \text{ mm}$
4	Prašnasti i glinoviti pijesci i šljunci s manje od 15% čestica manjih od 0.075 mm	$D_{15} \leq 4d_{85}$

Legenda: D = promjer zrna filtra, d = promjer zrna tla koje se štiti od erozije, A = težinski postotak frakcije zrna promjera manjeg od 0.075 mm koju treba štiti

Uzroci rušenja nasipa i brana



Osnovni uzroci oštećenja i rušenja nasipa i brana:

1. Preljevanje krune nasipa - slom erozijom nizvodne kosine
2. Procjeđivanje kroz tijelo nasipa – unutrašnja erozija, klizanje (slom) kosine nasipa
3. Procjeđivanje ispod nasipa – unutrašnja erozija, hidraulički slom, sloma temeljnog tla

Uzroci rušenja nasipa i brana



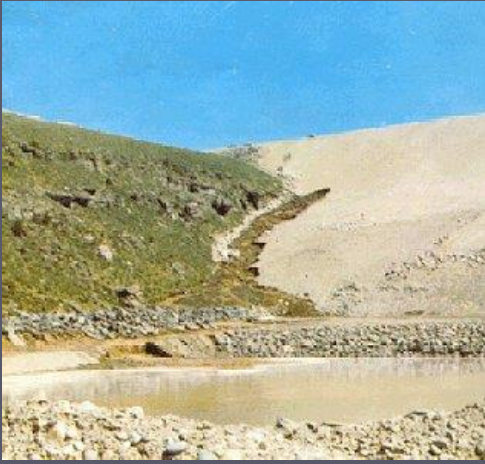
Procjeđivanje kroz tijelo željezničkog nasipa (piping)



Procjeđivanje daleko izvan tijela nasipa i mjere za stabilizaciju - podizanje 'zidova' i izrada 'bunara'

Nasute brane

Pouke iz rušenja nasutih brana

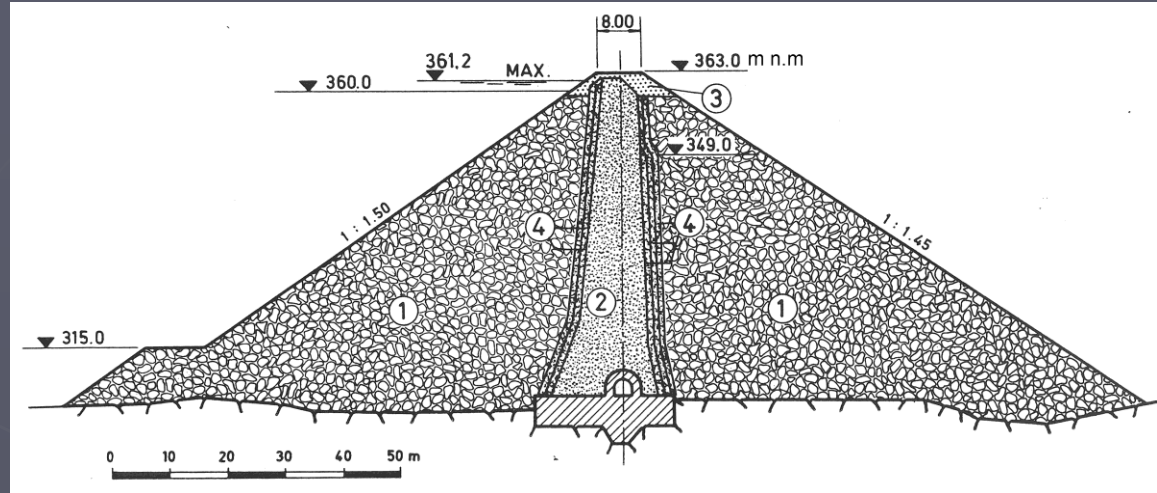
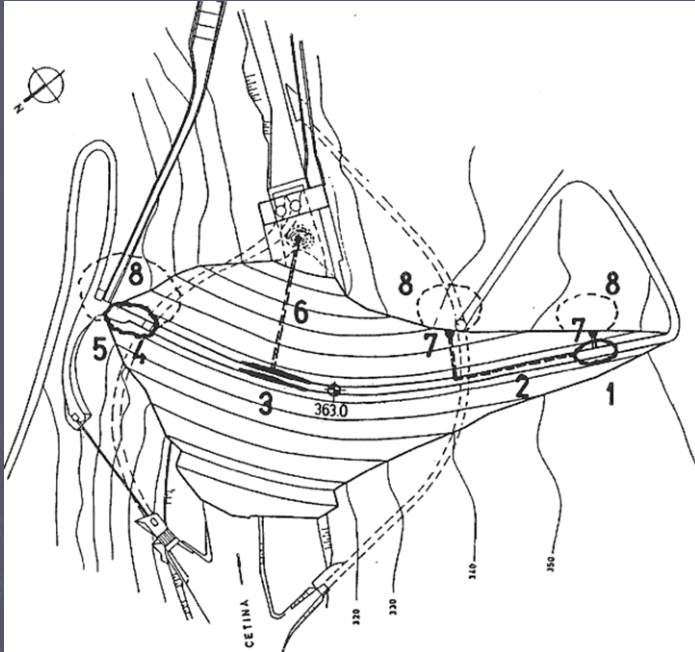


Brana San Fernando , nakon potresa 1972

Slika 7-17 Prodor vode iz akumulacije u desnom boku brane Teton, Idaho, SAD 1972. godine: prva pojava vodenog toka (lijevo) i prodor vode u punoj snazi nekoliko trenutaka kasnije (desno)

Nasute brane

Brana Peruća



Legenda:

- 1 potporne zone od lomljenog nasutog kamena,
- 2 glinena jezgra,
- 3 kruna brane,
- 4 višeslojni filtri

Slika 7-14 Situacija i presjek nasute brane Peruća na Cetini kod Hrvaca prije rekonstrukcije zbog rušenja u domovinskom ratu

Brana Peruća - nakon rušenja 1993.



* Detaljniji prikaz rušenja i sanacije brane Peruća je u sklopu kolegija 'Nasute i potporne građevine'