

# Nasute građevine

---

**Roje-Bonacci, Tanja**

**Authored book / Autorska knjiga**

*Publication status / Verzija rada:* **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

*Publication year / Godina izdavanja:* **2015**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:910945>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-20**



*Repository / Repozitorij:*

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)

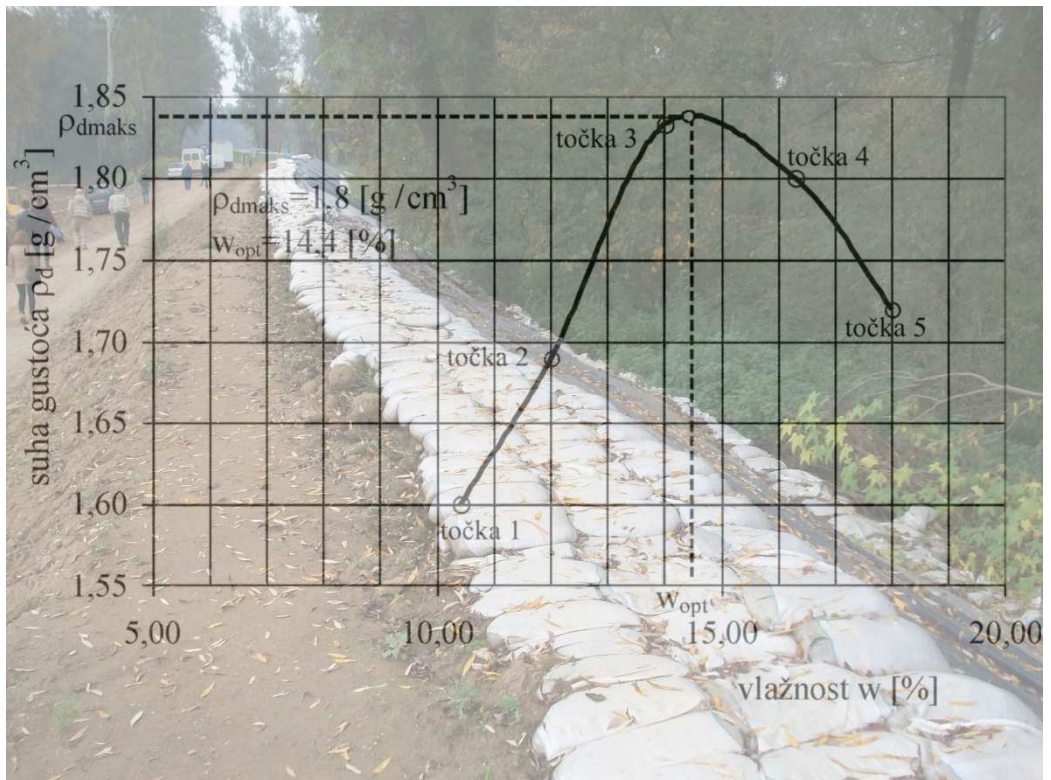


UNIVERSITY OF SPLIT

  
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Tanja Roje-Bonacci

# NASUTE GRAĐEVINE



SVEUČILIŠTE U SPLITU  
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I  
GEODEZIJE

SPLIT, 2015.



UDŽBENICI SVEUČILIŠTA U SPLITU  
MANUALIA UNIVERSITATIS STUDIORUM SPALATENSIS



***TISKANJE OVOG UDŽBENIKA POTPOMOGLI SU:***

SVEUČILIŠTE U SPLITU

MINISTARSTVO ZNANOSTI, OBRAZOVANJA I ŠPORTA REPUBLIKE HRVATSKE

HRVATSKE VODE, ZAGREB

HRVATSKO GEOTEHNIČKO DRUŠTVO, ZAGREB

HRVATSKA KOMORA INŽENJERA GRAĐEVINARSTVA, ZAGREB

SPEGRA, SPLIT

CEMEX, Hrvatska

Tanja Roje-Bonacci

# NASUTE GRAĐEVINE



SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

SPLIT, 2015.

**NAKLADNIK:**  
**Sveučilište u Splitu**  
**Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije**  
Matice hrvatske 15, 21000 SPLIT

**ZA NAKLADNIKA:**  
izv. prof. dr. sc. Boris Trogrlić

**RECENZENTI:**  
prof. dr. sc. Predrag Mišćević, Split  
doc. dr. sc. Nataša Štambuk-Cvitanović, Split  
izv. prof. dr.sc. Lidija Tadić, Osijek

**TEHNIČKO UREĐENJE, CRTEŽI I PRIJELOM TEKSTA:**  
prof. dr. sc. Tanja Roje-Bonacci

Objavljivanje ovog udžbenika odobrio je Senat Sveučilišta u Splitu Odlukom: klasa: 003-08/15-05/0019, Urbroj: 2181-202-03-01-15-0027, na svojoj sjednici održanoj 17. prosinca 2015. godine

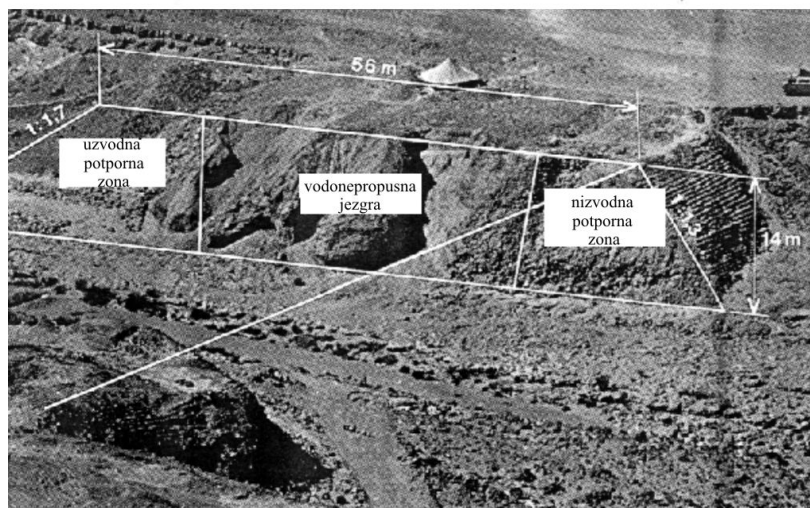
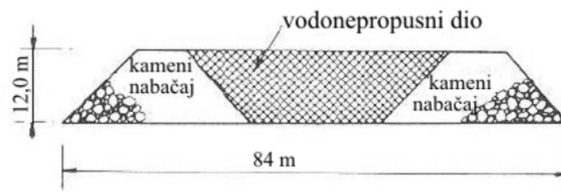
CIP – Katalogizacija u publikaciji Sveučilišna knjižnica u Splitu UDK 624.136(075.8) ROJE-Bonacci, Tanja Nasute građevine / Tanja Roje-Bonacci. – Split : Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije Sveučilišta, 2015. - (Udžbenici Sveučilišta u Splitu = Manualia Universitatis studiorum Spalatensis) Bibliografija. - Kazalo. ISBN 978-953-6116-67-6 I. Nasipi 160218024
--

Naklada: 500 primjeraka

## Predgovor

Ova knjiga svojim sadržajem popunjava prazninu u području geotehničkih građevina na hrvatskom jeziku. Uz do sada objavljene tekstove o potpornim građevinama, građevnim jamama, složenom temeljenju, poboljšanju podzemnog tla i zemljanim radovima, u području geotehničkih građevina ostaje prostor za nasute građevine.

Nasute građevine imaju zajedničko to što im je tlo gradivo, a svaka od njih ima svoje posebnosti. Neke od navedenih građevina mogu biti vrlo jednostavne, s malim zahtjevima, dok druge zahtijevaju veliku pažnju i složene proračune pri projektiranju. Spadaju u vrstu građevina bez očitih temelja, s tлом kao gradivom u kontroliranim i nekontroliranim uvjetima ugradnje. Nasute građevine su geotehničke građevine i kao takve zahtijevaju temeljita i sveobuhvatna geotehnička rješenja.



Brana Kafra 2600. prije Krista (gore Herle, 2004., dolje Schnitter, 1994.)

U nasute građevine spadaju građevine najrazličitijih namjena. Mogu biti projektirane i strogo kontrolirano građene, od strogo kontroliranog gradiva, a mogu biti i nagurane hrpe raznorodnog materijala od industrijskih ostataka, jalovine pa do komunalnog otpada. U svakom od ovih slučajeva primjenjuju se prikladna geotehnička rješenja. Način izvedbe nasute građevine ovisi o nizu čimbenika, od



namjene nasipa, gradiva od kojeg su izvedeni do prostora na kojem mogu biti izvedeni.

Nasute građevine za zadržavanje i usmjeravanje vode, gradile su se u svim poznatim davnim civilizacijama. Ovakvi su sustavi omogućili gospodarenje vodom u starim civilizacijama. To je bilo od presudne važnosti za njihov opstanak. Najbolji primjer je brana Marib u Jemenu. Nedavna arheološka istraživanja ukazuju na to da je jednostavna zemljana brana i mreža kanala, podignuta na tom mjestu, već daleke 2000. godine prije Krista. Brana, čiji ostaci postoje i danas, izgrađena je negdje 750 godine prije Krista. Tijekom vijeka korištenja bila je rekonstruirana i dograđivana. Imala je kamenom oblogom ojačani preljev. Negdje 570 godine doživjela je najteža oštećenja nakon poplave uslijed monsunskih kiša i nije više obnovljena. Trajala je preko 1000 godina. Nakon propasti brane iz regije se iselilo više od 50.000 ljudi.



Ostaci zidanih dijelova brane Marib (pod UNESCO-ovom zaštitom) oštećeni od strane Saudijske Arabije u ratu protiv Jemena 2015. godine

Namjena brana iskazana je u samom imenu. Pojam se povezuje sa zadržavanjem vode, odnosno stvaranjem umjetnih jezera, a često su i višenamjenske.

Nasipi, naročito oni za obranu od poplava, ne impresioniraju nikoga, ne otvaraju se svečano, neugledni su i bezimni, sve do trenutka dok ne dođu u funkciju, Tada vrlo često ne izdrže tu funkciju do kraja, tj. puknu. To nije samo slučaj s nasipima u Hrvatskoj. Primjera ima diljem svijeta: dolina Missisipija, istočna Austrija, Njemačka, Kina i drugdje.

Nasipi kao dijelovi građevina poznati su odavno. Služili su kao unutrašnjost piramida i raznih obrambenih građevina, s vanjskom kamenom oblogom. Na vojnim

zaštitnim utvrdama, kojima je osnova nasip, Coulomb je izučavao aktivni i pasivni pritisak tla. O rezultatima je 1773. godine izložio tezu pred Francuskom akademijom i time postao njezin član.

Nasute građevine za osiguranje određene visinske kote u prometnicama i sličnim građevinama, novijeg su datuma. Najzahtjevnije su oni koji se grade za potrebe autocesta. To su građevine novog doba, a prethodili su im nasipi za izgradnju trupa željezničkih pruga. Nasipima za željezničke pruge i ceste odnosno autoceste, zajednička je zadaća da omoguće, kotom svoje krune, nagibe koji će omogućiti nesmetano kretanje mehaniziranih vozila po voznoj površini koja se ugrađuje na kruni. Stoga su ovi nasipi vezani za razvoj mehaniziranog, željezničkog i automobilskeg prometa, koji su stari nešto više od 150 godina.

U tabeli koja slijedi, prikazani su dijelovi od kojih se nasipi sastoje i koja je njihova zadaća unutar takve građevine. Uočljiva je raznolikost potrebe ugradnje pojedinih sastavnica u nasipe, ovisno o njihovoj namjeni odnosno djelovanju u sklopu građevine. Neće svi nasipi imati sve dijelove prikazane u donjoj tabeli.

Tabela: Sastavnice nasipa i njihova namjena unutar njega (prema CIRIA C731, 2013.)

Sastavnica nasipa	Potreba za sastavnicom	Djelovanje sastavnice				
		vanjska zaštita	stabilnost	nepropusnost	odvodnja	filtracija
temeljno tlo	uvijek	ne	uvijek	ponekad	ne	ponekad
nasip	uvijek	ne	uvijek	ponekad	ponekad	ponekad
nepropusna jezgra	ponekad	ne	ne	uvijek	ne	ne
nepropusni ekran	ponekad	ponekad	ponekad	uvijek	ne	ponekad
kruna	uvijek	uvijek	ne	ne	ponekad	ne
obloga (uzvodno)	ponekad	uvijek	ponekad	ponekad	ne	ponekad
obloga (nizvodno)	ponekad	uvijek	ponekad	ne	ponekad	ponekad
(uzvodna) berma	ponekad	ponekad	uvijek	ponekad	ne	ponekad
(nizvodna) berma	ponekad	ponekad	uvijek	ne	ponekad	ponekad
filtarski slojevi	ponekad	ne	ne	ne	ponekad	uvijek
sustav odvodnje	ponekad	ne	ne	ne	uvijek	ne
odteretni bunari	ponekad	ne	uvijek	ne	ne	ne
zaštita od procjeđivanja žmurjem i slično	ponekad	ne	ne	uvijek	ne	ne
zidovi	ponekad	ponekad	ponekad	ponekad	ne	ponekad

Ova se knjiga neće baviti velikim branama. One su vrlo složene građevine i zahtijevaju poseban pristup, opsežniji od opsega predviđenog za ovaj tekst.

Tekst sadrži dva dijela; dio I, Tlo kao gradivo i dio II, Nasipi. I dio bavi se vrstama tla, ispitivanjem, utjecajem zbijanja na svojstva tla i provjerom kakvoće ugrađenog tla. Dio II bavi se nasipima kao građevinama s naglaskom na hidrotehničke nasipe i male brane.

U nadi da ostavljam barem dio svog znanja mlađim kolegama, ovaj mi je tekst činio posebno zadovoljstvo.

Autor

P.S.

Velika hvala kolegama recenzentima na trudu da ova knjiga bude najbolje od najboljeg što imamo na hrvatskom jeziku o nasipima.

## SADRŽAJ

<b>DIO I.....</b>	<b>1</b>
<b>1 SVOJSTVA TLA KAO GRADIVA ZA NASIPE.....</b>	<b>3</b>
1.1 OPĆENITO.....	3
1.2 NASIPAVANJE.....	4
1.3 POZAJMIŠTE.....	6
1.3.1 Pozajmišta krupnozrnog tla.....	7
1.3.2 Pozajmište rastresitog (sitnozrnog) tla.....	9
1.3.3 Ispitivanje tla iz pozajmišta.....	11
<b>2 RAZREDBA TLA KAO GRADIVA ZA NASIPE.....</b>	<b>12</b>
2.1 OSNOVNA PODJELA.....	12
2.2 FIZIKALNA SVOJSTVA RASTRESITOG TLA.....	12
2.2.1 Fizikalna svojstva stijena.....	19
2.3 GEOTEHNIČKE RAZREDBE TLA.....	19
2.4 TERENSKA IDENTIFIKACIJA TLA.....	21
2.5 INDEKSNI POKAZATELJI.....	24
2.5.1 Atterbergove granice (granice plastičnosti).....	24
2.5.2 Granulometrijski sastav.....	29
2.6 AC RAZREDBA.....	33
2.7 UC JEDINSTVENA RAZREDBA (UNIFIED CLASSIFICATION).....	36
2.8 RAZREDBA TLA PREMA HRN EN ISO 14688-1:2008 I 14688-2:2008.....	38
<b>3 ZBIJANJE I ZBIJENOST.....</b>	<b>41</b>
3.1 O ZBIJANJU OPĆENITO.....	41
3.2 ISPITIVANJE ZBIJENOSTI U LABORATORIJU.....	46
3.2.1 Proctorov pokus.....	46
3.3 POSTUPCI ZBIJANJA PRI UGRADNJI NASIPA.....	51
3.3.1 Općenito.....	51
3.3.2 Nasipanje bez zbijanja.....	51
3.3.3 Nasipavanje sa zbijanjem.....	52
3.4 INDEKS GUSTOĆE ( $I_D$ ).....	55
3.4.1 Općenito.....	55
3.4.2 Kritički osvrt na indeks gustoće $I_D$ .....	57
<b>4 UTJECAJ ZBIJENOSTI NA FIZIČKO-MEHANIČKA SVOJSTVA TLA ...</b>	<b>62</b>

4.1	OPĆENITO .....	62
4.1.1	Čvrstoća na smicanje .....	66
4.1.2	Vodopropusnost .....	72
4.1.3	Stišljivost.....	73
<b>5</b>	<b>TERENSKA PROVJERA ZBIJENOSTI .....</b>	<b>74</b>
5.1	OPĆENITO .....	74
5.1.1	Sitnozrna tla .....	75
5.1.2	Sitna nekoherentna tla.....	77
5.1.3	Krupnozrna tla.....	78
5.2	STATISTIČKA OBRADA PODATAKA TEKUĆIH I KONTROLNIH ISPITIVANJA .....	82
5.2.1	Mogućnost greške .....	83
5.2.2	Pojam „inženjerskih granica“ .....	85
5.3	KONTROLNA ISPITIVANJA.....	89
5.3.1	Kontrolna ispitivanja tijekom građenja .....	89
5.3.2	Kriteriji kakvoće i kontrola nakon ugradnje .....	89
<b>DIO II.....</b>	<b>.....</b>	<b>91</b>
<b>6</b>	<b>OPĆENITO .....</b>	<b>93</b>
6.1	VRSTE NASIPA.....	94
6.1.1	Za prometnice .....	94
6.1.2	Za željeznicu: .....	95
6.1.3	Za hidrotehničke nasipe .....	95
6.1.4	Nasipi za posebne potrebe .....	98
6.2	NASIPI PREMA NAČINU IZRADE .....	98
6.2.1	Ovisno o tlu i mjestu .....	98
6.2.2	Prema načinu nasipavanja.....	99
6.3	NASIPI PREMA SLOŽENOSTI POPREČNOG PRESJEKA.....	100
6.3.1	Isključivo nasuti nasipi.....	100
6.4	DIJELOVI NASIPA .....	107
<b>7</b>	<b>PRORAČUNI .....</b>	<b>109</b>
7.1.1	Dopuna propisa EC 7 za nasipe za obranu od poplava .....	110
7.1.2	Odabir kote krune nasipa .....	112
7.1.3	Odabir širine krune nasipa.....	112
7.1.4	Analize stabilnosti pokosa nasipa .....	112
7.1.5	Proračun slijeganja.....	117

7.1.6	Proračun utjecaja potresa na nasipe.....	119
<b>8</b>	<b>HIDROTEHNIČKI NASIPI .....</b>	<b>131</b>
8.1	OPĆENITO.....	131
8.2	ODABIR KOTE KRUNE NASIPA .....	131
8.2.1	<i>Nadvišenje vodnog lica u krivini (<math>\Delta H</math>) .....</i>	<i>135</i>
8.3	ODABIR ŠIRINE KRUNE NASIPA .....	137
8.4	UTJECAJ TEČENJA U VODOTOKU NA NASIPE U KRIVINI.....	137
8.5	PROCJEĐIVANJE KROZ NASIP .....	140
8.5.1	<i>Općenito.....</i>	<i>140</i>
8.5.2	<i>Izlazni i kritični hidraulički gradijent.....</i>	<i>141</i>
8.5.3	<i>Proračun količine procjeđivanja.....</i>	<i>142</i>
8.5.4	<i>Utjecaj strujnog tlaka na stabilnost pokosa.....</i>	<i>144</i>
8.6	MOGUĆA OŠTEĆENJA HIDROTEHNIČKIH NASIPA USLIJED PROCJEĐIVANJA.....	146
8.6.1	<i>Općenito.....</i>	<i>146</i>
8.6.2	<i>Prvo punjenje .....</i>	<i>146</i>
8.6.3	<i>Cijevljenje ili koncentrirano procjeđivanje .....</i>	<i>148</i>
8.6.4	<i>Erozija uz građevine koje prolaze nasipom .....</i>	<i>152</i>
8.6.5	<i>Povratna erozija .....</i>	<i>155</i>
8.6.6	<i>Sufozija u nestabilnim tlima .....</i>	<i>159</i>
8.6.7	<i>Erozija na spoju slojeva različitog granulometrijskog sastava.....</i>	<i>163</i>
<b>9</b>	<b>SASTAVNICE PROJEKTA I IZVEDBE NASIPA .....</b>	<b>165</b>
9.1	TEMELJNO TLO.....	165
9.2	TIJELO NASIPA .....	166
9.3	NEPROPUSNO TIJELO.....	168
9.4	KRUNA NASIPA.....	169
9.4.1	<i>Mogući načini nadvišenja krune starih nasipa.....</i>	<i>171</i>
9.5	ZAŠTITA POKOSA.....	174
9.5.1	<i>Zaštita pokosa nasipa od miješanih i zemljanih tala.....</i>	<i>174</i>
9.6	BERME .....	179
9.7	FILTARSKI SLOJEVI.....	181
9.8	SUSTAVI ZA PRIKUPLJANJE PROCJEDNE VODE .....	184
9.9	DIJELOVI ZA OSIGURANJE OD PROLOMA I POVROTNE EROZIJE U NASIPU I ZAOBALJU.....	186
9.10	VODODRŽIVI DIJELOVI HIDROTEHNIČKIH NASIPA .....	187

<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAFIJA .....</b>	<b>I</b>
<b>11</b>	<b>KAZALO POJMVA.....</b>	<b>A</b>

**dio I**  
tlo kao gradivo



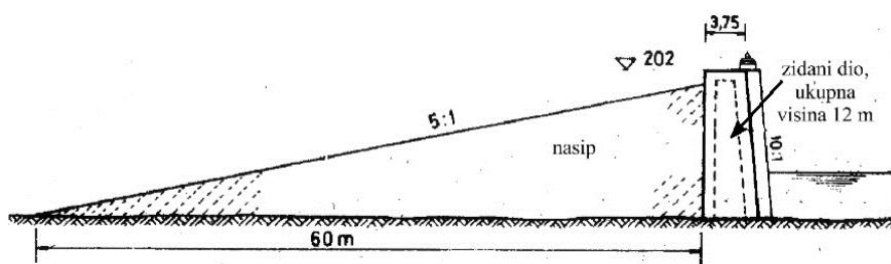


# 1 SVOJSTVA TLA KAO GRADIVA ZA NASIPE

## 1.1 OPĆENITO

Tlo je, uz drvo, služilo čovjeku kao prvo gradivo. Pod pojmom „tlo“ podrazumijeva se površinski pokrivač zemljine kore. U građevinskom smislu taj pokrivač sadrži rastresito, kvartarno tlo u obliku zrnatih slojeva od kamenih blokova, komada kamena, krupnog šljunka, različitog oblika zrna, do prašina i glina raznih plastičnosti. Unutar kvartarnog pokrivača, posebnu grupu tvore neraspadnuta i djelomično raspadnuta, organska tla, tresetišta i slične površine. Drugu grupu predstavljaju manje ili više čvrsta, gola stijenska masa različitih svojstava od mekih stijena podložnih rastrošbi (lapori, siltiti), stijena podložnih okršavanju (vapnenci i dolomiti), do vrlo čvrstih eruptivnih stijena (graniti i sl.).

To tlo služi u raznim oblicima za izgradnju najrazličitijih građevina od prapovijesti do danas. Najtrajniji oblik tla kao gradiva je kamen. Obrađuje se prema potrebi, ovisno o vrsti građevine za koju se koristi. Tu se može pratiti raspon od suhozida, vidljivog i danas u mnogim zemljama Mediterana, ali i u drugim starim civilizacijama, pa do palača, tvrđava, crkvi, slavoluka, mostova, akvadukata i td. Ovakve građevine spadaju u zidane, te ovdje nisu predmet izučavanja. Kamen u prerađenom obliku, klesan, pritesan ili zdrobljen, gradivo je za različite nasute građevine, podloge za temelje, drenaže i niz drugih građevina. Susreće se i kombinacija zidanih i nasutih građevina (slika 1.1).



Slika 1.1 Brana Prosperina 1-2 stoljeće Španjolska, za vodoopskrbu, u funkciji

Rastresito tlo, koje je predmet ovog rada, može biti prirodno i umjetno (zdrobljena i usitnjena stijena). Prirodno, krupnozrno tlo je heterogena nakupina mineralnih zrna različitog promjera, koja međusobno nisu vezana ili su slabo ili djelomično vezana. Pri projektiranju i izvođenju nasutih građevina bitno značenje imaju svojstva kao što su propusnost, čvrstoća na smicanje, stišljivost i ponašanje u dodiru s vodom. Sva ova svojstva ovise o vrsti tla, o gustoći nasipa, odnosno zbijenosti tla u ugrađenom stanju.

Sitnozrno tlo je služilo kroz stoljeća za izradu različitih opekarskih proizvoda i za proizvodnju posuđa. Mješavina gline i sjeckane slame, oblikovane u pravilne oblike i sušene na suncu, predstavlja proizvod za zidanje (čerpić) i danas u nekim područjima gdje to klimatski uvjeti dozvoljavaju.

Švedski kemičar A. Atterberg (1911.), izučavao je gline čestica  $<0,002$  mm, za potrebe industrije porculana. Utvrdio je svojstva koja su poznata pod nazivom Atterbergove granice. Pokuse za dio Atterbergovih granica, koje se danas koriste za razredbu sitnozrnih tala, standardizirao je A. Casagrande (1948.). Njegov prijedlog razredbe (AC razredba) ušao je u službenu uporabu u SAD-u 1952. godine i zadržao se, s manjim izmjenama u uporabi do 1986. kada je uvedena UC razredba.

Kvartarne naslage u svim prethodno nabrojenim oblicima, služe kao gradivo za različite vrste nasipa.

## **1.2 NASIPAVANJE**

Nasipavanje, kao građevinski zahvat je širok pojam. Služi u najrazličitije svrhe, a može se izvoditi uz kontrolirano zbijanje, ili bez zbijanja. Nasipavanje služi za izravnanje terena, kada je potrebno postići velike ravne površine (lučki platoi, parkirališta, aerodromska infrastruktura i sl.). Služi za zamjenu loših slojeva tla ispod temelja, boljim, kontrolirano ugrađivanim slojevima. Služi za zasipavanje prostora između potpornih građevina i sraslog terena i za još niz drugih građevinskih zahvata. Nasipavanje služi za izradu građevina poznatih pod imenom „**nasip**“ koja u građevinarstvu ima dosta preciznu definiciju. Služi za različite namjene u hidrotehnici. Pri izgradnji trupa prometnica služi za postizanje projektirane kote nivelete.

U ovom tekstu težište je na nasipima ograničene širine, visine do 15 metara, koji se izvode od odabranog gradiva poznate, propisane i provjerene kakvoće i koji se ugrađuju prema važećim propisima i pravilima struke. Visina od 15 metara je pri izgradnji prometnica približna granica, do koje se izvode nasipi, a zatim se prelazi na vijadukte i/ili mostove. U hidrotehnici se do visine od 15 metara podrazumijevaju nasipi i male brane, a hidrotehnički nasipi iznad te visine spadaju u velike brane, za koje vrijede posebni propisi i drugi, stroži uvjeti u svim koracima njihovog ostvarenja.

Rastresito gradivo, koje služi za izradu nasipa, može biti iz iskopa dijela građevine koji se izvodi u sklopu građenja ili može biti dopremljeno iz pozajmišta. Nasipi se, osim od prirodnog gradiva, mogu izvoditi od drobljenog kamena razne krupnoće,

prema zahtjevima iz projekta i od raznih industrijskih ostataka, šljake, ljevaoničkog pijeska, jalovine i sličnih tvari (Roje-Bonacci, 2006.).

Gradivu, od kojeg se gradi nasip, treba utvrditi fizikalno-mehanička svojstva, koja isti mora imati nakon ugradnje, da bi mogao biti propisno projektirana i izvedena građevina.

Prema Eurocode 7, dio 1.: opća pravila, stavak 5.3.2, načelo (3) „Pri izboru gradiva za nasipavanje, u obzir se mora uzeti sljedeće:

- granulometrijski sastav,
- otpornost na drobljenje;
- mogućnost zbijanja;
- propusnost;
- plastičnost;
- čvrstoću temeljnog tla ispod nasipa;
- sadržaj organskih tvari;
- kemijsku agresivnost;
- učinke onečišćenja;
- topljivost;
- podložnost promjenama obujma (gline osjetljive na bujanje i tla podložna urušavanju skeleta);
- niske temperature i podložnost smrzavanju;
- otpornost na trošenje;
- učinke iskopa, prijevoza i ugradnje;
- mogućnost vezivanja nakon ugradnje (na pr. šljaka visoke peći)“,

i načelo (4) „Ako lokalni materijali nisu u svom prirodnom stanju prikladni za nasipavanje, može se pokazati nužnim usvajanje jednog od sljedećih postupaka:

- prilagodba vlažnosti;
- miješanje s cementom, vapnom ili drugim vezivima;
- drobljenje, prosijavanje, ispiranje;
- zaštita primjerenim tvarima;
- uporaba drenažnih slojeva.“

Nasipi, bilo koje vrste, moraju imati stabilan oblik. Ne smije se dozvoliti naknadno klizanje nastalih kosina, naknadno slijeganje treba predvidjeti i svesti na najmanju moguću mjeru, a nasipi koji privremeno, povremeno ili stalno dolaze u

jednostrani dodir s vodom, moraju biti i odgovarajuće vodonepropusni. Iz toga je jasno da je za potrebe projektiranja nasipa potrebno odrediti čvrstoću na smicanje gradiva za nasip, njegovu stišljivost i vodopropusnost. Sva ova svojstva ovise o **zbijenosti tla** nakon ugradnje, stoga je istu potrebno propisati, osigurati ispravnom ugradnjom i provjeriti nakon završetka zbijanja.

HRN EN 1997-1:2012, (Eurocode 7) obrađuje nasipe u poglavlju 5 i u poglavlju 12. Poglavlje 5 sadrži opće odredbe za nasipavanje, ali i za odvodnju, poboljšanje temeljnog tla i ojačanje temeljnog tla, kada se time postižu „prikladni uvjeti u temeljnom tlu“. U poglavlju 12, koje se vezuje na poglavlje 5, daju se odredbe koje se odnose na „male brane i infrastrukturu“.

OTU (2001.), “Opći tehnički uvjeti za radove na cestama“, Knjiga II, (2001.) predviđa izgradnju nasipa od „zemljanih materijala, miješanih materijala i kamenitih materijala“.

OTU (2010.), „Opći tehnički uvjeti za radove u vodnom gospodarstvu“ ne razmatraju nasipe kao građevine već ih dijele prema svrsi kojoj služe i tamo detaljno opisuju pojedinu građevinu.

### **1.3 POZAJMIŠTE**

Tlo – gradivo, dobiva se iskapanjem, rezanjem i/ili miniranjem unutar gradilišta kod izduženih građevina (ceste, kanali, željeznica), ili iz **pozajmišta**: kamenolomi, gliništa, šljunčare unutar riječnih terasa, površinski kopovi šljunka i pijeska, vađenjem pijeska iz riječnih naplavina u koritima rijeka i na njihovim ušćima u more. Iskorištavanje tla u svrhu građenja, podliježe zakonima o iskorištavanju mineralnih sirovina. Postoje vrlo stara pozajmišta, kamenolomi, na pr. na otoku Braču, odakle je korišten kamen za izgradnju Dioklecijanove palače u Splitu i nova, otvarana za potrebe pojedinih značajnih građevina (autoputova, nasutih brana, dugih nasipa i td.).

Kada se za nasipavanje koristi tlo iz iskopa na istom gradilištu, tada se na trasi provode ista ispitivanja, bitna za mogućnost vrsne ugradnje tog tla u nasipe, kao kada se radi o bilo kojem pozajmištu. Kada se koriste pozajmišta nevezano od gradilišta, potrebno je osim kakvoće, utvrditi količine gradiva koje stoje na raspolaganju. Ispitivanja se vrše uglavnom istražnim jamama, rjeđe sondažnim bušenjem ili geofizičkim postupcima, kojima se može utvrditi debljina odgovarajućeg sloja i njegova rasprostranjenost. U nekim slučajevima količine su uglavnom poznate i obnovljive. Obnavljaju se količine šljunaka i pijesaka u riječnim koritima do trenutka dok rijeke nisu uređene i pregrađene za različite potrebe iskorištavanja vode.

Najčešće ograničene količine imaju sitnozrna tla (glina i prašine) koja u potpunosti kakvoćom zadovoljavaju postavljene zahtjeve. Ova je tla mnogo teže poboljšati do mjere da zadovolje zahtjeve nakon ugradnje, u usporedbi sa krupnozrnim tlom.

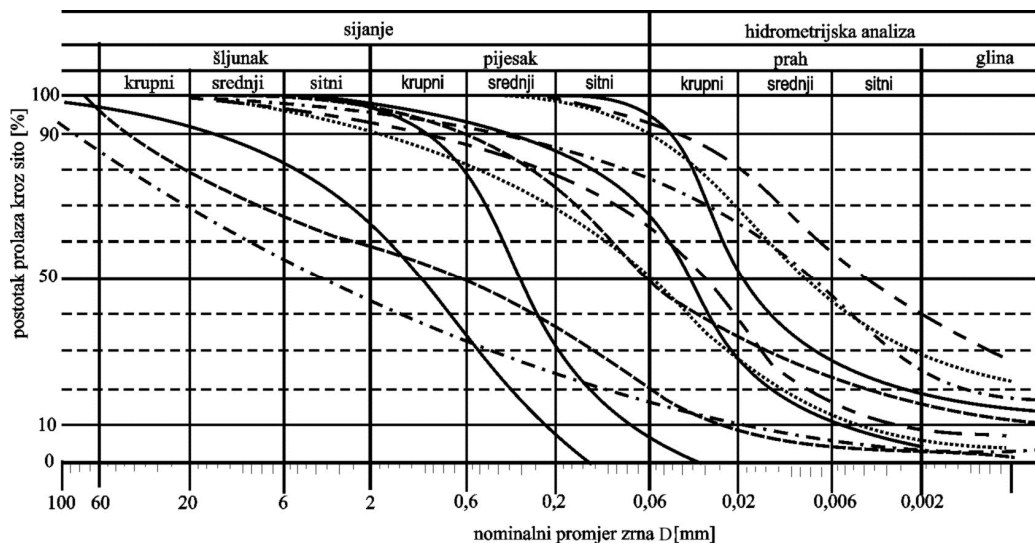
Iskop pozajmišta spada u široki iskop i izvodi se strojno. Pri otvaranju pozajmišta potrebno je skinuti humus do dubine za koju se može utvrditi da više ne sadrži štetne količine organskih tvari.

Količina iskopa u pozajmištu računa se na osnovi količine nasipa u zbijenom stanju izrađenog od gradiva iz pozajmišta prema načelu da je jedan prostorni metar nabijenog nasipa jednak jednom prostornom metru iskopa u pozajmištu. Može se odrediti i pomoću „specifične zapremine“, kako će nastavno biti objašnjeno. Rastresitost (povećanje zapremine), koja nastaje iskopom, utovarom, prijevozom i razastiranjem gradiva, uzima se u obzir samo ako se posebno obračunava prijevoz.

### 1.3.1 Pozajmišta krupnozrnog tla

#### 1.3.1.1 Prirodno tlo

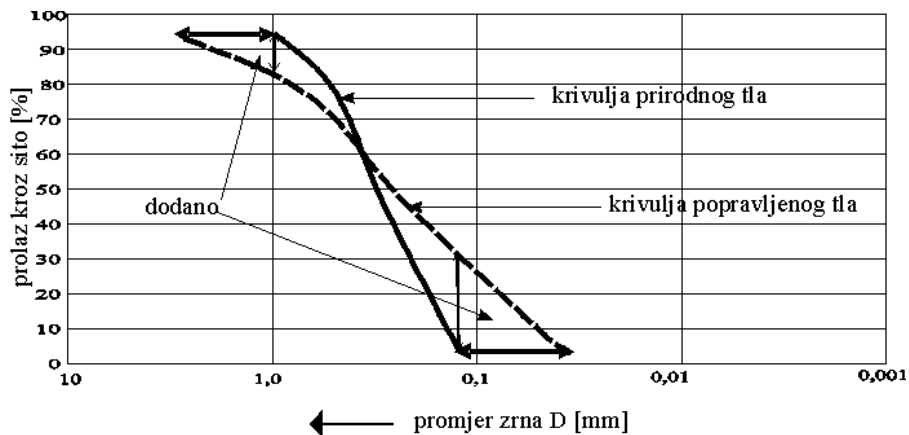
Krupnozrno tlo može biti prirodno sastava (slika 1.2), kada se vadi iz riječnih naplavina ili sipara. Pojedina područja iz kojih se vadi šljunak i pijesak mogu imati vrlo velike naslage ovog gradiva pa nema poteškoća s količinama, ostaje jedino pitanje udaljenosti do mjesta ugradnje.



Slika 1.2 Granulometrijske krivulje prirodnih gradiva korištenih za nasipe (Strigler i Werner, 1969.)

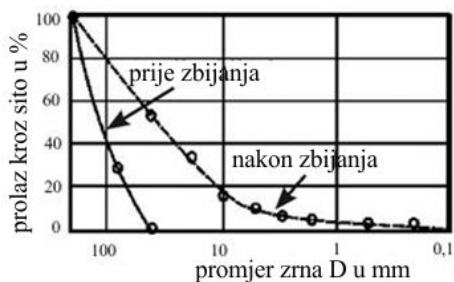
Kod prirodnih pozajmišta bitno je utvrditi granulometrijski sastav, lomljivost zrna i prisustvo organskih tvari. Granulometrijski se sastav može popraviti sijaanjem, za

odstranjivanje viška sitnih čestica i miješanjem odgovarajućih frakcija u propisanu mješavinu kao na slici 1.3 (Bonacci, Mladineo, 1981.).



Slika 1.3 Način popravljivanja granulometrijske krivulje dodavanjem potrebnih frakcija (Roje-Bonacci, 2012.)

Kod određenih vrsta krupnozrnog tla koje će se ugrađivati u nasipe, naročito ako se radi o mekim stijenama, bitno je utvrditi lomljivost zrna. Ona bitno mijenja konačni granulometrijski sastav u odnosu na onaj prije ugradnje i zbijanja, a time i ostala svojstva ugrađenog tla u nasip. Ovo je kod većine gradiva jednostavno utvrditi ispitivanjem granulometrijskog sastava prije i nakon zbijanja. Poteškoću čine meke stijene, koje mijenjaju svojstva u dodiru s vodom. Neke od njih se vrlo brzo raspadaju, ali i to može biti značajan podatak za ugradljivost ovog gradiva (slika 1.4).



Slika 1.4 Promjena granulometrijskog sastava prilikom zbijanja mekih stijena uslijed drobljenja zrnja (Narita, K., 2000.)

Kod miješanih gradiva, kada se koriste prirodne mješavine koje su pogodne za ugradnju u nasipe, potrebno je tijekom korištenja pozajmišta, pratiti vrijednosti prirodne vlažnosti ( $w_0$ ) sitnozrne sastavnice o kojoj često ovisi ugradivost ovog tla. Za masovnu ugradnju u nasipe uglavnom se koristi ovo prirodno tlo.

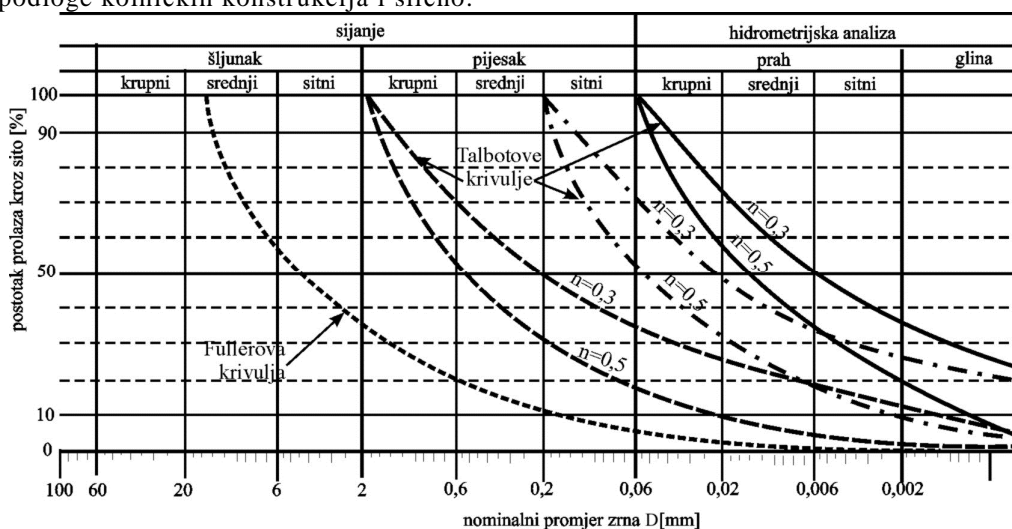
Krupnozrna tla se mogu vaditi i iz vode (slika 1.5).



Slika 1.5 Pozajmište šljunka

### 1.3.1.2 Drobljeni kamen

Potrebne količine krupnozrnog tla dobivaju se u kamenolomima iz kojih se dobiva drobljenac različite krupnoće. Miješanjem pojedinih frakcija u određenim omjerima dobiva se krupnozrno tlo programiranog granulometrijskog sastava (slika 1.5). Koristi se prvenstveno za spravljanje betona, podloge za temelje, filtarske i drenažne slojeve, podloge kolničkih konstrukcija i slično.



Slika 1.6 Granulometrijske krivulje mješavina drobljenog kamena kao gradivo za nasipe prema Talbotu i Fulleru (Stiegler, Werner, 1969.)

### 1.3.2 Pozajmište rastresitog (sitnozrnog) tla

Kod pozajmišta sitnozrnih tala bitno je izvršiti razredbene pokuse da bi se utvrdilo o kakvoj se vrsti tla radi. Potrebno je ispitati sljedeća temeljna svojstva:

- gustoću čvrstih čestica ( $G_s$ );
- Atterbergove granice plastičnosti ( $w_s$ ,  $w_p$ ,  $w_L$ );
- granulometrijski sastav;



- prirodnu vlažnost ( $w_0$ );
- sadržaj organskih tvari,

i sve pripadne izvedenice; indeks plastičnosti  $I_p$ , indeks konzistencije  $I_c$ , suhu prostornu gustoću ( $\rho_d$ ). Na taj se način može izvršiti precizna razredba tla. Ona je potrebna da bi se utvrdilo koliko je prirodno tlo uopće pogodno za ugradnju u nasipe.

Za sitnozrno tlo, koje će se koristiti za kontroliranu ugradnju u nasip, potrebno je stalno provjeravati vlažnost ( $w_0$ ) i prije ugradnje uspoređivati s optimalnom vlažnosti dobivenom pokusom u laboratoriju ( $w_{opt}$ ).

Površini pozajmišta sitnozrnog tla, potrebno je osigurati dobru odvodnju. Iskop i odvoz treba osigurati tako da se preostalo tlo u pozajmištu što manje remeti prolazom vozila. Prelazom vozila tlo postaje zagađeno, jako poremećeno, teško ugradljivo do neupotrebljivo zbog zagađenja.

Kapacitet iskopa u pozajmištu mora biti usklađen s mogućnostima prijevoza i ugradnje, posebno, ako je tlo osjetljivo na atmosferilije. Odvodnja pozajmišta, kao i nagibi pokosa u upotrebi, moraju biti u skladu s danim uvjetima za iskope u zemljanim tlima (kategorije C prema OTU, 2001.).

U skladu s načelima očuvanja okoliša, pozajmište bi po završetku iskorištavanja trebalo odgovarajuće urediti. Na slici 1.7 je pozajmište miješanog tla za nasip.



Slika 1.7 Iskop tla na pozajmištu za autocestu Zagreb-Karlovac (Celmić, 1974.)

### 1.3.3 Ispitivanje tla iz pozajmišta

Svako tlo koje se koristi za građenje mora zadovoljiti određene propisane uvjete. U tu se svrhu tlo ispituje prije (prethodna ispitivanja) iskorištavanja, tijekom građenja (tekuća i kontrolna ispitivanja) i nakon ugradnje (tekuća i kontrolna ispitivanja), kao i svako drugo gradivo. U tom se postupku tlo može, do određene mjere, mijenjati i prilagođavati potrebama i zahtjevima građevine.

Prethodno su navedena ispitivanja tla iz pozajmišta koja se odnose na krupnozrna, prirodna tla, na umjetna krupnozrna tla i na sitnozrna tla.

Za sva ispitivanja postoje propisani postupci koje je potrebno poštivati i uvjeti koje rezultati moraju zadovoljiti. Postupci su prilagođeni vrstama tla, pa tako postoje posebni propisi za kamen, drobine, šljunke, pijeske, prašine, gline, organska tla i razne njihove mješavine. Dio ovih odredbi potrebno je naglasiti u projektnoj dokumentaciji potrebnoj za nasute građevine.

Da bi se utvrdila pogodnost tla kao gradiva, mogućnost njegovog korištenja u izgradnji određene nasute građevine i način ugradnje, treba utvrditi sljedeće:

- vrstu tla pomoću razredbenih postupaka;
- indeksne pokazatelje tla;
- moguću gustoću nakon zbijanja tj. zbijenost;
- inženjerska svojstva tla nakon zbijanja.

Svi ovi postupci biti će nastavno prikazani.

Za ugrađena tla, postoje propisi o načinu provjere količine, oblika i kakvoće ugrađenog gradiva.



Slika 1.8 Napušteno pozajmište

## 2 RAZREDBA TLA KAO GRADIVA ZA NASIPE

### 2.1 OSNOVNA PODJELA

Tlo kao gradivo se može podijeliti u tri vrste (Schroeder, 1975.).

**Rastresita tla**, u koja spadaju sva tla koja se mogu kopati bez prethodnog razaranja. Tu spadaju:

- **Humus**, sitnozrno, uglavnom koherentno tlo, s prekomjerno organskih tvari. Tlo je podložno truljenju, kemijskim i fizikalnim promjenama i promjeni konzistencije ovisno o vlažnosti. Ovo tlo je vrlo loše i mora se odstraniti.
- **Sitnozrno**, koherentno tlo, gline i prašine kao i njihove mješavine te mješavine sa sitnim pijescima. Svojstvo ovog tla je plastičnost. Plastičnost je svojstvo mogućnosti promjene konzistentnog stanja (plastičnosti) ovisno o sadržaju vlage.
- **Krupnozrno**, nekoherentno tlo, pijesci i šljunci i sve njihove mješavine koje ne pokazuju ni najmanje svojstvo plastičnosti.
- **Mješavine** sitnozrnih i krupnozrnih tala neovisno o međusobnim odnosima pojedinih frakcija.

**Stjenovita tla:**

- **Polučvrsta** stjenovita tla u koja spadaju meke stijene i rastrošene odnosno okršene površine čvrstih i vrlo čvrstih stijena.
- **Čvrsta** stjenovita tla, sve sedimentne, metamorfne i eruptivne stijene srednje čvrstoće i značajne vidljive uslojenosti i raspucanosti.
- **Vrlo čvrsta** stjenovita tla, monolitna, velike čvrstoće. Ne mogu se kopati bez upotrebe znatne količine eksploziva.

**Posebna tla:**

- **Tla opasna i neupotrebljiva u građevinarstvu**, tresetišta, morski mulj, svježe jezerske taložine i slična tla velike stišljivosti i male ili nikakve nosivosti.

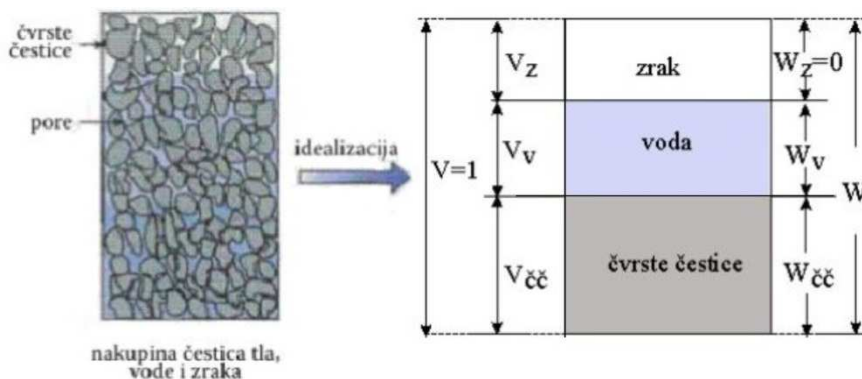
### 2.2 FIZIKALNA SVOJSTVA RASTRESITOG TLA

Pri utvrđivanju fizikalnih svojstava rastresitog tla treba objasniti neke osnovne pojmove:

- masu, kao nepromjenjivu količinu tvari koju sadrži neki predmet, bez obzira na promjenu temperature, oblika ili ostalih fizikalnih svojstava. Ona ne ovisi o lokalnoj gravitaciji niti o položaju predmeta u Svemiru. Rezultat vaganja je masa, a ne težina. Izražava se u [g] ili [kg],
- gustoću, kao masu jedinice zapremine. Oznaka za gustoću je malo grčko slovo „rho“ ( $\rho$ ). Jedinica je megagram po kubnom metru [ $\text{Mg}/\text{m}^3$ ] ili gram po kubnom centimetru [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ],
- težinu, kao silu koja nastaje pod utjecajem gravitacije na neki predmet. Jedinica za težinu jednaka je jedinici za silu, Newton [N],

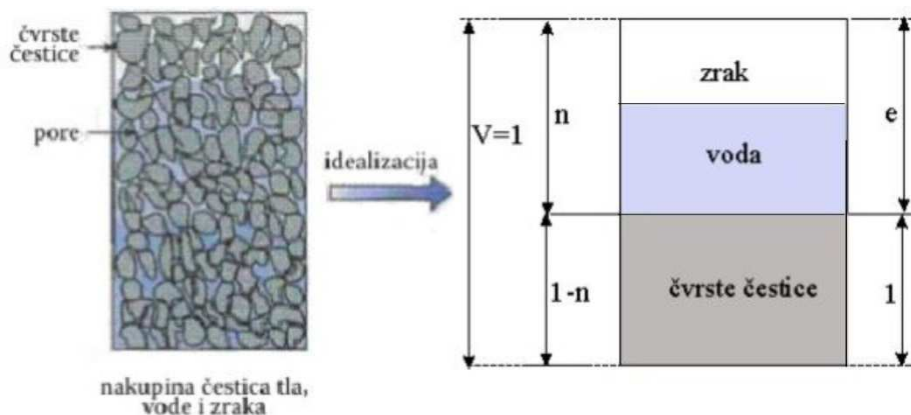
- jediničnu težinu, kao težinu po jedinici zapremine. Oznaka za jediničnu težinu je malo grčko slovo „gama“ ( $\gamma$ ). Jedinica za jediničnu težinu je  $[\text{kN}/\text{m}^3]$ .

**Rastresito tlo** je nakupina čvrstih čestica između kojih se nalaze pore. Pore mogu biti djelomično ili potpuno ispunjene vodom. U prirodi se vrlo rijetko nailazi na potpuno suho tlo osim možda nakon dugog sušnog razdoblja u površinskim slojevima. Tlo i njegova idealizacija prikazani su na slikama 2.1 i 2.2.



Slika 2.1 Idealizirani model tla prikazan pomoću zapremina ( $V$ ) i težina ( $W$ )

Idealizirano tlo se može prikazati pomoću odnosa čvrstih čestica i pora, pomoću pojmova „porozitet“ ( $n$ ) i „koeficijent pora“ ( $e$ ).



Slika 2.2 Idealizirani model tla prikazan pomoću poroziteta ( $n$ ) i ( $e$ )

Da bi se moglo koristiti teorijska saznanja pri projektiranju i izgradnji nasutih građevina, potrebno je objasniti osnovne pojmove koji se u teorijskim rješenjima pojavljuju.

Temeljem prikaza na slikama 2.1 i 2.2 mogu se odrediti veze koje slijede (prema Budhu, 2011.).

Ukupna zapremina ( $V$ ) je zbroj zapremine čvrstih čestica ( $V_{\text{čč}}$ ), zapremine vode ( $V_v$ ) i zapremine zraka ( $V_z$ ):

$$V = V_{\text{čč}} + V_v + V_z = V_{\text{čč}} + V_p \quad (2.1)$$

pri čemu je  $V_v + V_z = V_p$ , gdje je ( $V_p$ ), zapremina pora, djelomično ispunjena vodom.

Odnos se može izraziti i pomoću težina kako slijedi.

$$W = W_{\text{čč}} + W_v \quad (2.2)$$

pri čemu je ( $W$ ) težina tla, ( $W_{\text{čč}}$ ) težina čvrstih čestica, a ( $W_v$ ) težina vode u porama.

Ključna veličina, koja je bitna za nasute građevine, je **vlažnost** tla ( $w$ ). Određena je kao omjer mase vode ( $m_v$ ) i mase čvrstih čestice ( $m_{\text{čč}}$ ), izražena u postocima.

$$w = \frac{m_v}{m_{\text{čč}}} * 100 [\%] \quad (2.3)$$

Sljedeća bitna veličina je **koeficijent pora** ili relativni porozitet ( $e$ ), koji se može odrediti kao omjer zapremine pora ( $V_p$ ) i zapremine čvrstih čestica ( $V_{\text{čč}}$ ).

$$e = \frac{V_p}{V_{\text{čč}}} \quad (2.4)$$

Nadalje se može odrediti **specifična zapremina** ( $V'$ ) kao omjer ukupne zapremine ( $V$ ) u odnosu na zapreminu čvrstih čestica ( $V_{\text{čč}}$ ).

$$V' = \frac{V}{V_{\text{čč}}} = 1 + e \quad (2.5)$$

Ova veličina može korisno poslužiti za **proračune količina koje treba uzeti iz pozajmišta**, da bi se zadovoljila potrebna količina tla ( $V'_2$ ), koja će biti ugrađena u nasip uz zadane uvjete. Uvjet se zadaje preko koeficijenta pora ( $e$ ). Pri tom je potrebno poznavati porozitet prirodnog, sraslog tla na pozajmištu ( $e_1$ ) i raspolagati s traženim porozitetom ugrađenog tla ( $e_2$ ). Iz pozajmišta treba uzeti količinu ( $V'_1$ ) prema izrazu koji slijedi.

$$\frac{V'_1}{V'_2} = \frac{1+e_1}{1+e_2} \Rightarrow V'_1 = V'_2 \frac{1+e_1}{1+e_2} \quad (2.6)$$

Sljedeća veličina koja se često pojavljuje je **porozitet** ili apsolutni porozitet ( $n$ ). To je odnos zapremine pora ( $V_p$ ) prema ukupnoj zapremini ( $V$ ).

$$n = \frac{V_p}{V} \quad (2.7)$$

Postoji veza između poroziteta (n) i koeficijenta pora (e), koja se može objasniti pomoću oznaka na slici 2.2.

$$n = \frac{e}{1+e} \quad (2.8)$$

Ovaj je odnos moguće dokazati sljedećom jednadžbom:

$$n = \frac{V_p}{V} = \frac{V_p}{V_{\check{c}\check{c}} + V_p} = \frac{\frac{V_p}{V_{\check{c}\check{c}}}}{\frac{V_{\check{c}\check{c}}}{V_{\check{c}\check{c}}} + \frac{V_p}{V_{\check{c}\check{c}}}} = \frac{e}{1+e} \quad (2.9)$$

Obujam zraka,  $V_z$ , je zanemaren jer se radi isključivo sa zasićenim primjercima.

Tabela 2.1 Vrijednosti poroziteta, n, i koeficijenta pora, e, za neke vrste tla \*

Vrsta tla	n [%]	e
kreda	8-45	0,09-0,82
pješčenjak	2-40	0,02-0,67
pijesak kvartarni, aluvijalni	38-42	0,61-0,72
pijesak prašinst (jura)	41-45	0,7-0,82
pijesak zbijeni (kreda)	31-38	0,45-0,61
les i lesna pjeskovita glina	38-60	0,61-1,5
glinoviti pijesak (kreda)	39-43	0,64-0,75
pjeskovita glina kvartarna, aluvijalna	36-44	0,56-0,79
pjeskovita glina kvartarna, morenska	26-38	0,35-0,61
glina kvartarna dolinska	40-60	0,67-1,5
glina kvartarna morenska	36-46	0,56-0,85
glina laporovita (karbonska)	28-43	0,39-0,75
glina laporovita jurska	49-52	0,96-1,08
mulj	60-90	1,5 -9

Sljedeće svojstvo koje treba poznavati je **specifična težina** ( $G_s$ ), bez-dimenzionalna veličina koja predstavlja relativnu gustoću čvrstih čestica u odnosu na vodu ili omjer težine čvrstih čestica ( $W_{\check{c}\check{c}}$ ) naprama težini iste zapremine vode ( $V_{\check{c}\check{c}} \cdot \gamma_v$ ), gdje je:

---

\* Ova i sljedeće tabele preuzete su iz Maslov i dr. (1975.)

$\gamma_v = \rho_v * g = 9,81 \text{ [kN/m}^3\text{]}$ ; ( $\rho_v = 1 \text{ [g/cm}^3\text{]} = 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ , gustoća vode, a  $g = 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$  gravitacija) u standardiziranim, laboratorijskim uvjetima.

$$G_s = \frac{W_{\check{c}\check{c}}}{V_{\check{c}\check{c}} * \gamma_v} \quad (2.10)$$

Tabela 2.2 Specifična težina čvrstih čestica,  $G_s$  (Maslov i dr. 1975.)

Tlo	$G_s$
granit	2,6-2,7
vapnenac	2,62-2,95
pješčenjak	2,5-2,9
kvarcni pijesak	2,65-2,67
glinoviti, aluvijalni pijesak	2,65-2,69
les	2,66-2,77
pjeskovita glina, aluvijalna	2,65-2,68
pjeskovita glina, morenska	2,68-2,71
glina aluvijalna	2,68-2,71
glina, morenska	2,68-2,72
glina jurska	2,6-2,87
treset	0,5-0,8

Koristeći specifičnu težinu čvrstih čestice  $G_s$ , moguće je odrediti **jediničnu težinu čvrstih čestica**  $\gamma_s$ , kao:

$$\gamma_s = G_s * \gamma_v \quad (2.11)$$

Sada je moguće odrediti **stupanj zasićenja** ( $S_r$ ). On se kreće od 100%, za potpuno zasićeno tlo do 0%, za potpuno suho tlo.

$$S_r = \frac{V_v}{V_p} = \frac{\frac{V_v}{V_{\check{c}\check{c}}}}{\frac{V_p}{V_{\check{c}\check{c}}}} = \frac{\frac{W_{\check{c}\check{c}} * W_v}{\gamma_v * V_{\check{c}\check{c}} * W_{\check{c}\check{c}}}}{e} = \frac{w * G_s}{e} \quad (2.12)$$

odnosno:

$$S_r * e = w * G_s \quad (2.13)$$

**Jedinična težina** ( $\gamma$ ) je odnos težine ( $W$ ) i pripadajuće zapremine tla ( $V$ ).

$$\gamma = \frac{W}{V} = \left( \frac{G_s + S_r * e}{1 + e} \right) \gamma_v \quad (2.14)$$

Ista se veličina može izraziti i pomoću poroziteta ( $n$ ) koristeći odnose na slikama 2.1 i 2.2 kao:

$$\gamma = (1 - n) \gamma_s + S_r * n * \gamma_v \quad (2.15)$$

U posebnim slučajevima javljaju se **suha** ( $\gamma_d$ ) i **potpuno zasićena** ( $\gamma_{zas}$ ) jedinična težina.

$$\gamma_d = \frac{W_{\check{c}\check{c}}}{V} = \left( \frac{G_s}{1+e} \right) \gamma_v = \frac{\gamma}{1+w} \quad (2.16)$$

odnosno:

$$\gamma_d = (1-n) \gamma_s \quad (2.17)$$

i

$$\gamma_{zas} = \left( \frac{G_s + e}{1+e} \right) \gamma_v \quad (2.18)$$

odnosno:

$$\gamma_{zas} = (1-n) \gamma_s + n \cdot \gamma_v \quad (2.19)$$

vrijedi kada je  $S_r=1$ , tj. tlo je potpuno zasićeno.

**Efektivna ili uronjena** težina je težina zasićenog tla okruženog vodom, po jedinici zapremine tla.

$$\gamma' = \gamma_{zas} - \gamma_v = \left( \frac{G_s - 1}{1+e} \right) \gamma_v \quad (2.20)$$

odnosno:

$$\gamma' = (1-n) \gamma_s + n \cdot \gamma_v - \gamma_v = (1-n) (\gamma_s - \gamma_v) \quad (2.21)$$

Tabela 2.3 Jedinične težine tla u zavisnosti o specifičnoj težini čvrstih čestice  $G_s$ , vlažnosti,  $w$  i porozitetu,  $n$ . (Maslov i dr. 1975.)

Specifična težina	Vlažnost	Jedinična težina, $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] pri porozitetu, $n$ [%]				
		$G_s$	$w$ [%]	$n=35$ [%]	$n=40$ [%]	$n=45$ [%]
2,6	0		16,9	15,6	14,3	13,0
	50		18,6	17,6	16,5	15,5
	100		20,4	19,6	18,8	18,0
2,64	0		17,1	15,8	14,5	13,2
	50		18,8	17,8	16,7	15,7
	100		20,5	19,9	19,0	18,2
2,68	0		17,4	16,1	14,7	13,4
	50		19,2	18,1	17,0	15,9
	100		20,9	20,0	19,2	18,4
2,72	0		17,7	16,3	15,0	13,6
	50		19,5	18,3	17,2	16,1
	100		21,1	20,3	19,5	18,6
2,76	0		17,9	16,5	15,2	13,8
	50		19,7	18,6	17,4	16,3
	100		21,4	20,6	19,7	18,8



Za tlo kao gradivo, potrebno je odrediti još neke vrijednosti. Terzaghi je (1925.) odredio pojam **kapaciteta zbijanja** ( $D'$ ) kao:

$$D' = \left( \frac{e_{\text{maks}} - e_{\text{min}}}{e_{\text{min}}} \right) \quad (2.22)$$

koji ovisi isključivo o vrsti nekoherentnog tla.

**Indeks gustoće**  $I_D$  (u starijoj literaturi  $D_r$ ) ovisi o koeficijentu pora tla u prirodnom stanju zbijenosti ( $e$ ) i određuje se kao:

$$I_D = \left( \frac{e_{\text{maks}} - e}{e_{\text{maks}} - e_{\text{min}}} \right) \quad (2.23)$$

Indeks gustoće,  $I_D$ , je pokazatelj zbijenosti krupnozrnog tla.

Tabela 2.4 Vrijednosti koeficijenta pora,  $e$ , za pijeske pri različitim zbijenostima

Pijesak	Vrijednosti koeficijenta pora, $e$ , za pijeske		
	zbijeno	srednje zbijeno	rahlo
šljunkovit, krupan i srednji	< 0,55	0,55 - 0,7	> 0,7
sitan	< 0,6	0,6 - 0,75	> 0,75
prašinst	< 0,6	0,6 - 0,8	> 0,8

Mehanička svojstva čistih, krupnozrnih tala mnogo više ovisi o zbijenosti nego o vlažnosti. Ovo se tlo samo u iznimnim uvjetima može ugrađivati u laboratorijske uređaje za ispitivanje fizičko-mehaničkih osobina pa indeks gustoće ostaje kao jedan od rijetkih raspoloživih pokazatelja svojstava ovih tala.

Tabela 2.5 Zbijenost pijeska u odnosu na broj udaraca,  $N$ , standardnog penetracijskog pokusa (Maslov i dr. 1975.)

Broj udaraca $N$ potreban za prodiranje penetrometra na dubinu 30 cm	Indeks gustoće pijeska $I_D$	Pijesak
1 - 4	0,2	vrlo rahli
5 - 9	0,2 - 0,33	rahli
10 - 29	0,33 - 0,66	srednje zbijen
30 - 50	0,66 - 1	zbijen
> 50	$\cong 1$	vrlo zbijen

Tabela 2.6 Zbijenost pijeska u odnosu na otpor prodiranja šiljka pri statičkoj penetraciji,  $q_c$  (Maslov i dr. 1975.)

Pijesak	Vrijednost specifičnog otpora prodiranja šiljka statičkog penetrometra, $q_c$ , u [kPa] pri dubini od		Zbijenost
	5 m	10 m	
krupan	> 1,5 1,54 – 1,0	>2,0 2,20 – 1,50	zbijeno srednje zbijeno
srednji	> 1,0 1,0 – 0,6	> 1,5 1,5 – 0,9	zbijeno srednje zbijeno
sitan	>0,6 0,6 – 0,3	>0,9 0,9 – 0,4	zbijeno srednje zbijeno

### 2.2.1 Fizikalna svojstva stijena

Razredba čvrstih stijenskih masa zajedno s načinom ispitivanja i opažanja, razrađena je u odrednicama ISRM-a (1981.). U slučaju kada je stijenska masa gradivo, koje će se usitniti za potrebe ugradnje u nasipe, ispituje se kao krupnozrno, nekoherentno tlo. Kako se ono dobiva iz kamenoloma to je moguće programirati granulometrijski sastav prema potrebama građevine kojoj je namijenjeno.

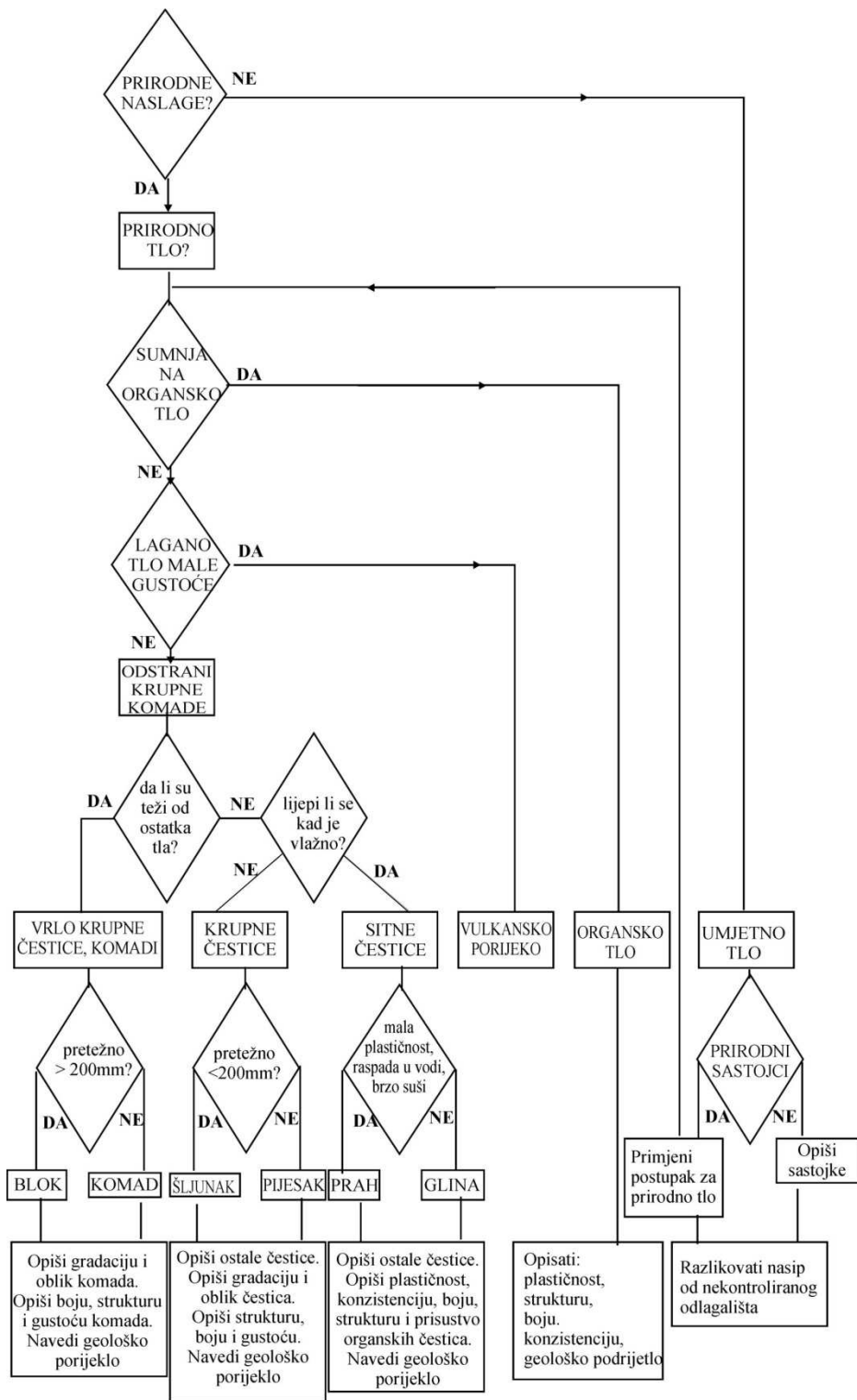
Od fizikalnih osobina potrebno je odrediti gustoću ( $\rho$ ), porozitet ( $n$ ) i vlažnost ( $w$ ), upijanje vlage, bujanje i još neka svojstva, bitna za ovo gradivo prilikom ugradnje.

## 2.3 GEOTEHNIČKE RAZREDBE TLA

Geotehničke razredbe tla se koriste za određivanje svojstava tla općenito, a posebno kada je tlo građevinski materijal. Koriste se za rastresita tla, šljunke, pijeske, prašine i gline.

Za razredbu tla potrebno je učiniti dva koraka. Prvi se korak sastoji od niza jednostavnih pokusa koji se izvode na terenu prilikom pregleda istražnih jama ili izvađene jezgre. Nazivaju se „identifikacijski pokusi“. Za potpunu razredbu potrebno je izvesti nekoliko jednostavnih laboratorijskih pokusa kojima je moguće tlo preciznije opisati i svrstati u određene razrede. Ti pokusi spadaju u grupu pokusa kojima se određuju indeksni pokazatelji pojedine vrste tla. Na slici 2.3 prikazan je dijagram toka kojim se vrši identifikacija tla na terenu, kao prvi korak u razredbi.

U Hrvatskoj se danas koristi modificirani, nešto složeniji sustav za identifikaciju i razredbu prema HRN EN ISO 14688-1, HRN EN ISO 14688-2, HRN EN ISO 14689-1, koji još nije do kraja zaživio u praksi.



Slika 2.3 Dijagram toka za identifikaciju tla (EN ISO 14688-1:2002)

Navedeno je da je A. Atterberg (1911.), za potrebe utvrđivanja svojstava sitnozrnog tla, glina, izvodio određene pokuse, kojima se moglo odrediti neka svojstva glina i prašina po kojima su se pojedine vrste tih sitnozrnih tala bitno razlikovale. Tek kasnije, 1952. godine (prema Earth Manual 1998.), je Casagrande, na temelju inženjerskih svojstava i istraživanja za potrebe izgradnje aerodromskih pista u II svjetskom ratu, predložio cjelovitu razredbu tla pod nazivom „jedinstveni sustav terenske razredbe“ (USCS, Unified Soil Classification System). Sustav razredbe je između 1952. i 1986. godine doživio manje preinake kao kod nas poznati AC sustav za razredbu tla. Ovo je jednostavan i lako razumljiv sustav s lako uočljivim svojstvima pojedinih grupa tala. Temelji se na vizualnom pregledu, nekoliko jednostavnih identifikacijskih pokusa i nekoliko standardiziranih laboratorijskih pokusa.

Geotehnička razredba započinje terenskom identifikacijom tla kojom je moguće grubo razvrstati tlo. Kako je ovaj postupak vrlo bitan za opis tla iz pozajmišta, ovdje će biti detaljno opisan.

## **2.4 TERENSKA IDENTIFIKACIJA TLA**

Terenska se identifikacija tla sastoji od niza jednostavnih radnji kojima se tlo može dosta precizno svrstati u razredbene skupine bez korištenja laboratorijskih pokusa. Sve radnje je moguće izvesti na terenu tijekom iskopa sondažnih jama odnosno pregleda jezgre. Ti postupci su vrlo važni pri ispitivanju tla u pozajmištu.

### **Početne radnje**

Prvo razvrstavanje prirodnog tla je prema krupnoći zrna. Izrazito krupnozrno tlo i ljepljivo, sitnozrno tlo je lako razlučiti. Njihovo opisivanje je jednostavno. Kada nema mogućnosti pogledom i opipom odrediti pripadnost tla određenoj skupini, najjednostavniji je pokus močenje u vodi. Kod sitnozrnih tala može se približno odrediti plastičnost kao niska ili visoka.

Svježe tlo neugodnog mirisa ukazuje na sadržaj organskih tvari. Treset je tamne do crne boje, male gustoće i vlaknaste strukture. Amorfni treset je kašaste strukture. Na površini se može očekivati humus, koji se može nalaziti i ispod nasipa na divljim odlagalištima.

### **Krupnoća zrna**

Krupnozrnom tlu se odredi promjer najvećeg zrna, približan postotak krupnih, srednje krupnih i sitnih čestica i oblik zrna (tabele 2.7 i 2.8).

Tabela 2.7 Identifikacija tla prema krupnoći čestica

Opis			Nominalni promjer zrna* [mm]	Tlo prema razredbi	
zrna	kamen		više od 60	krupnozrno, nekoherentno tlo	
	krupna	šljunak	krupan		60-20
			srednji		20-6
			sitan		6-2
	pijesak		krupan		2-0,6
			srednji		0,6-0,2
			sitan	0,2-0,06	
	sitna	prah	krupan	0,06-0,02	sitnozrno, koherentno tlo
			srednji	0,02-0,006	
			sitan	0,006-0,002	
glina		manje od 0,002			

\*nominalni promjer je vrijednost otvora na situ kada se granulometrijski sastav određuje sisanjem (Burmister, 1938.).

Procijeni se radi li se o jednoliko, dobro ili loše graduiranom tlu. Svojstva sitnozrnog tla manje ovise o krupnoći čestica. Krupnoću sitnozrnog tla je moguće odrediti tek u laboratoriju. Prema krupnoći čestica može se odrediti prvi korak u razredbi.

### Oblik zrna

Kod krupnozrnog tla oblik zrna pokazuje način njegovog nastanka. Obla zrna prešla su dug put, kotrljajući se nošena vodom. Uglata zrna ukazuju na sipare i slične naslage kratkog puta do mjesta odlaganja. Mogući oblici zrna dani su u tabeli 2.8.

Tabela 2.8 Mogući oblici zrna kod krupnozrnog tla (Roje-Bonacci, 2012.)

Značajka	Oblik zrna
zaobljenost zrna	izrazito uglata, uglata poluuglata, poluzaobljena zaobljena, izrazito zaobljena
oblik zrna	kockast, plosnat izdužen
izgled površine	hrapav, gladak

### Boja

Boja tla je određena mineraloškim sastavom sitnih čestica. Boju treba odrediti na svježe presječenj jezgri. Najčešće boje nabrojene su u tabeli 2.9.

Tabela 2.9 Moguće boje tla (Roje-Bonacci, 2012.)

Osnovna boja	Nijanse i druga obilježja
bijela	prljavo i slično
siva	svijetla
zelena	tamna
žuta	mješavina:
smeđa	-mramorna
narančasta	-zrnasta
crvena	-preljeva se
plava	
crna	

### **Suha čvrstoća**

Određuje vrstu sitnozrnog tla. Ispituje se na osušenom komadiću tla koji se pokušava zdrobiti prstima. Može biti:

- mala, niska, kada se osušeni komadić lagano zdrobi među prstima u prah;
- srednja, kada se komad zdrobi nešto većim pritiskom među prstima u manje grudice (prašinate gline);
- visoka, osušeni se komad ne može zdrobiti, može se razbiti kamenom ili čekićem (visokoplastična tla).

### **Reakcija na potresanje**

Grumen tla se položi na dlan koji se potresa drugim dlanom. Prati se ispuštanje vode iz vlažnog grumena. Reakcija može biti brza (prašine i vrlo sitni pijesci), spora (prah i niskoplastične gline) i nikakva (visokoplastična tla).

### **Plastičnost**

Provjerava se pomoću valjanja valjčića do debljine od 3 mm, na glatkoj podlozi. Nakon što se valjčić uvalja, preoblikuje se prstima u grudicu i ponovo valja. Postupak se ponavlja dok se daje uvaljati valjčić od 3 mm, bez pukotine. Prašine se neće dati valjati više od jednom, veze su slabe, dok će se visokoplastične gline moći valjati u više navrata. Razlikuje se niska i visoka plastičnost.

### **Konzistentno stanje**

Konzistentno stanje se određuje kod koherentnih tala da bi se opisalo njihovo stanje vlažnosti ( $w_0$ ) u prirodi. O toj vlažnosti ovise mnoga svojstva tla koja su važna kod ugradnje tla u nasipe. Detaljno se može odrediti u laboratoriju pomoću granica plastičnosti i prirodne vlažnosti što podrazumijeva da uzorak za laboratorijsko ispitivanje zadrži **prirodnu vlažnost**. Konzistenciju se približno može odrediti ovisno

o broju udaraca prilikom izvođenja standardnog penetracijskog pokusa (SPP). Veza konzistentnog stanja, indeksa konzistencije i broja udaraca SPP-a dana je u tabeli koja slijedi.

Tabela 2.10 Moguća konzistentna stanja tla i veza s brojem udaraca SPP-a

Konzistentno stanje	Ponašanje uzorka tla	$I_c$	SPP
čvrsto	tlo se mrvi, gotovo se ne može prignječiti	$>1$	$>32$
polučvrsto	tlo se može prignječiti ali se mrvi i raspada	0,75-1	16-32
teško gnječivo	mogu se uvaljati valjčići do 3 mm debljine, ali ne tanji jer se raspadaju.	0,5-0,75	8-16
lako gnječivo	može se uvaljati valjčić tanji od 3 mm	0,25-0,5	2-8
žitko	tlo se ne može oblikovati u valjčiće; stisne li se grumen u šaci prolazi kroz prste kao gusta tekućina	$<0,25$	$<2$

## 2.5 INDEKSNI POKAZATELJI

Indeksni pokazatelji sadrže niz svojstava tla po kojima se ona mogu razlikovati. Određuju se propisanim pokusima u laboratoriju. Neka od ovih svojstava služe za razredbu tla, a neka služe za utvrđivanje pogodnosti tla za ugradnju. Temeljem nekih od ovih pokazatelja propisuju se svojstva tla, koja ono mora zadovoljiti nakon ugradnje. O ovim posljednjim svojstvima ovisit će i mehanička svojstva ugrađenog tla kao što su: čvrstoća na smicanje, vodopropusnost i stišljivost.

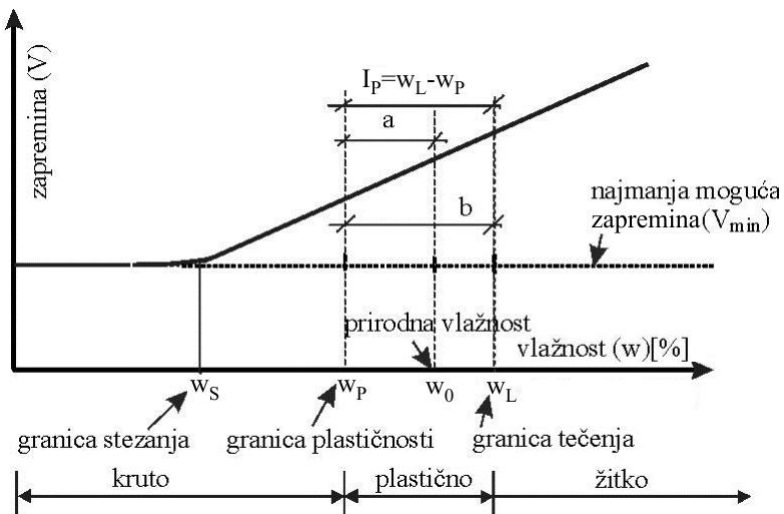
Bitni indeksni pokazatelji za AC i UC razredbu tla su Atterbergove granice i granulometrijski sastav, sa svim pripadnim svojstvima.

### 2.5.1 Atterbergove granice (granice plastičnosti)

Za koherentna, sitnozrna tla, grupe i podgrupe se određuju Atterbergovim granicama. Granice plastičnosti su **vlažnosti** ( $w_x$ ) pri kojima tlo mijenja konzistentno stanje.

Od čitavog niza „granica“ koje je svojim pokusima utvrdio Atterberg, u svrhu razredbe tla, koristi se njih nekoliko. To su granica stezanja ( $w_s$ ), granica plastičnosti ( $w_p$ ) i granica tečenja ( $w_L$ ). Pri određivanju ovih granica, potrebno je odrediti i prirodnu vlažnost tla ( $w_0$ ), pomoću koje se propisanim proračunom utvrđuje konzistentno stanje tla u prirodnim uvjetima, znatno preciznije nego postupcima identifikacije, kako je prethodno opisano. Pri određivanju vlažnosti, za sušenje se

koristi postupak grijanja uzoraka u sušioniku tijekom 24 sata na 105 °C. Granice plastičnosti grafički su prikazane na slici 2.4.



Slika 2.4 Atterbergove granice plastičnosti i određenje indeksa plastičnosti

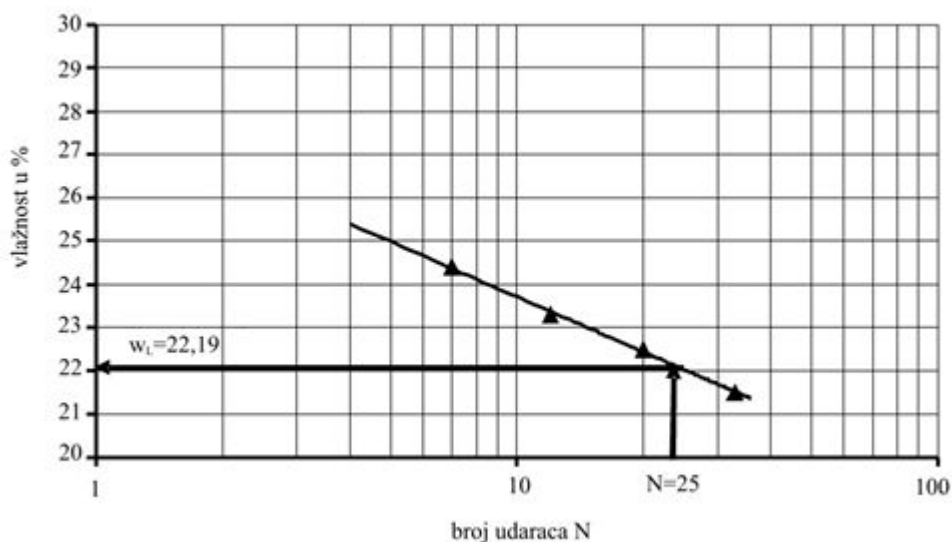
**Granica stezanja ( $w_s$ )** je ona vlažnost, sa smanjenjem koje uzorak više ne gubi na zapremini. Zapremina V, osušenog uzorka se određuje uranjanjem u živu. Rijetko se ispituje.

**Granica plastičnosti ( $w_p$ )** je ona najniža vrijednost vlažnosti, kod koje se valjčić uzorka tla promjera 3 mm još može preoblikovati tako da na površini ne nastanu pukotine. Nakon što se izradi nekoliko takvih valjčića odredi se vlažnost. Standardno se ispituje za potrebe razredbe sitnozrnog tla.

**Granica tečenja ( $w_L$ )** je ona najniža vrijednost vlažnosti, kod koje se, pri malom poremećaju, tlo počne ponašati kao žitka masa ili vrlo gusta tekućina. Ispituje se u standardiziranom uređaju, Casagrandeovoj treskalici. U posudicu se stavi u nekoliko (četiri) navrata uzorak tla različite vlažnosti ( $w_{1-n}$ ). Kroz uzorak se napravi zarez standardiziranim nožem. Broji se broj udaraca potreban da se zarez spoji na dužini od 13 mm. Povećanjem vlažnosti potrebni broj udaraca se smanjuje.

Prema propisu, vlažnost na granici tečenja je ona koju uzorak ima kada se zarez spoji nakon 25 udaraca. Rezultat se očitava grafički s pripadnog dijagrama (slika 2.5). Rezultati su podložni slobodnoj procjeni osoblja u laboratoriju, te ih valja pomno provjeriti. Nastavno je prikazan dijagram s pripadnim rezultatima i način određivanja vlažnosti na granici tečenja.





Slika 2.5 Dijagram za određivanje vlažnosti na granici tečenja tj. pri 25 udaraca Casagrandeove treskalice

Da bi se skratio postupak može se provesti ispitivanje pomoću jedne točke. Pri tom je poželjno da vlažnost bude što bliže granici tečenja. Ovo izlazi iz spoznaje da je prikaz granice tečenja u polu logaritamskom mjerilu pravac koji se može izraziti jednadžbom:

$$w = a * N^{-tg\beta} \quad (2.24)$$

Pri tom je a, parametar ovisan o plastičnosti gline, a  $tg\beta$ , konstanta ovisna o razini granice tečenja.

Određivanje granice tečenja metodom jedne točke prema Head-u (1984.) priznato je u njemačkim, britanskim i francuskim standardima, a izražava se jednadžbom:

$$w_L = w_N * \left[ \frac{N}{25} \right]^{tg\beta} \quad (2.25)$$

gdje je N, broj udaraca treskalice pri vlažnosti  $w_N$ ;  $w_N$  vlažnost pri N udaraca;  $tg\beta$ , eksponent– konstanta.

Prosječna vrijednost eksponenta, prema navedenim standardima je  $tg\beta=0,121$  uz preporuku da se za tlo s  $w_L > 60\%$  koristi  $tg\beta=0,1$ , a za tla s  $w_L < 40\%$ ,  $tg\beta=0,14$ .

Prema analizama hrvatskih glina, vrijednost parametra  $tg\beta$  iznosi između 0,065 i 0,09 (Roje-Bonacci, 1993.). Sličan rezultat dobio je laboratorij IGH-ST u razdoblju 2003.-2006., a iznosi;  $tg\beta=0,095$  za nisko plastične gline, 0,104 za srednje plastične

gline, a 0,097 za visokoplastične gline. Za prašine iznosi od 0,091 za niskoplastične do 0,102 za visokoplastične (Štambuk-Cvitanović, 2015.).

Druga je mogućnost određivanje ove granice pomoću padajućeg stošca (Houlsby, 1982.). Mjeri se dubina utiskivanja standardiziranog stošca u tlo određene vlažnosti smješteno u valjkastu posudu visine 4,0 mm i promjera 55 mm. Stožac težine 80 g, nagiba vrha 30°, dodiruje tlo u posudi. Mjeri se dubina prodiranja šiljka uslijed vlastite težine, u tlo za vrijeme od 5 sekundi. Granica tečenja je ona vlažnost, pri kojoj će stožac za vrijeme od 5 sekundi utonuti u uzorak točno 20 mm. Metoda je standardizirana i prihvaćena, ali se u praksi češće koristi Casagrandeova treskalica.

Na slici 2.4 obilježena su područja različitih konzistencija, koje mogu biti: kruta, plastična i žitka. Unutar krute konzistencije razlikuje se čvrsta (kada se ne mijenja zapremina) i polučvrsta, unutar raspona vlažnosti od granice stezanja do granice plastičnosti. Unutar plastične konzistencije razlikuje se teško gnječiva, bliže granici plastičnosti i lako gnječiva, bliže granici tečenja. Ovo se određuje usporedbom s vrijednošću prirodne vlažnosti ( $w_0$ ). Pri vlažnosti većoj od one na granici tečenja, tlo se nalazi u žitkom konzistentnom stanju.

Pomoću ovih obilježja mogu se odrediti slijedeći indeksni pokazatelji:

- indeks plastičnosti,  $I_P = w_L - w_P$ ; raspon vlažnosti unutar koje se tlo ponaša kao plastična tvar;
- indeks konzistencije,  $I_C = \frac{w_L - w_0}{I_P}$ ; odnos razlike granice tečenja ( $w_L$ ) i prirodne vlažnosti ( $w_0$ ) prema indeksu plastičnosti ( $I_P$ ) i
- indeks tečenja,  $I_L = \frac{w_0 - w_P}{I_P}$ ; odnos razlike prirodne vlažnosti ( $w_0$ ) i granice plastičnosti ( $w_P$ ) prema indeksu plastičnosti ( $I_P$ ).

Indeks tečenja,  $I_L$ , ima vrijednost od 0, za tlo s vlažnošću na granici plastičnosti,  $w_P$ , do 1, za tlo s vlažnošću na granici tečenja,  $w_L$ .

Za izrazito suho tlo, indeks tečenja može biti  $I_L < 0$  (negativan), a za tlo s prirodnom vlažnošću  $w > w_L$ , može biti  $I_L > 1$ . Tla s prirodnom vlažnošću  $w_0 > w_L$  su vrlo rijetka. To mogu biti potpuno nekonsolidirana, žitka, sitnozrna, svježe istaložena tla.

U tablicama koje slijede dane su vrijednosti granica plastičnosti i indeksa tečenja.

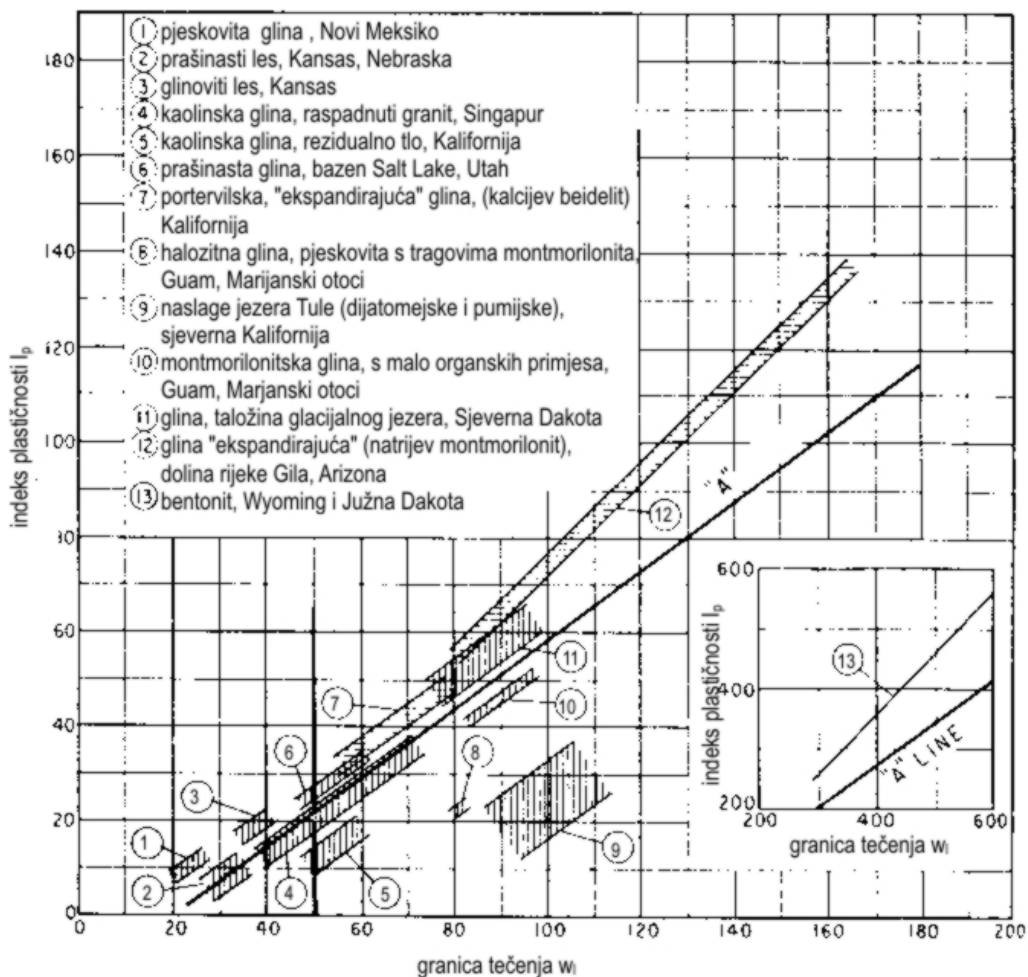
Tabela 2.11 Vrijednosti granica plastičnosti nekih vrsta glina

Tlo	Granica tečenja $w_L$ [%]	Granica plastičnosti $w_p$ [%]	Indeks plastičnosti $I_p$ [%]
glina kvartarna:			
pokrovna	34 – 41	18 – 22	17 – 25
aluvijalna	37 – 64	34 – 49	17 – 35
glina podinska:			
jura	61-88	19 – 37	33 – 61
laporovita (karbon)	38 – 53	19 – 24	19 – 29
glina pjeskovita, kvartarna:			
aluvijalna	19 – 31	11 – 20	8 – 16
lesna (pridnjeparska)	28 – 34	14 – 20	12 – 17
lesna (altajska)	21 – 23	14 – 16	7 – 9
morenska	23 – 32	10 – 17	10 – 17
glina pjeskovita, jurska	31 – 35	15 – 19	12 – 17
pijesak glinovit:			
kvartarni, fluvioglacialni	19 – 23	12 – 19	3 – 7
osnovni (kreda)	20 – 28	14 – 23	4 – 7
les	20 – 24	16 – 19	3 – 7

Tabela 2.12 Vrijednosti indeksa tečenja  $I_L$  za neke vrste glina

Tlo	Indeks tečenja, $I_L$	Indeks tečenja, $I_L$
glinoviti pijesak	(Maslov i dr. 1975.)	HRN EN ISO 14688-2
kruti	< 0	
plastični	0 – 1	
žitki	> 1	
pjeskovita glina		
čvrsta	< 0	< 0
polučvrsta	0 – 0,25	0 – 0,25
teško gnječiva	> 0,25 – 0,5	0,25 – 0,5
lako do teško gnječiva	> 0,5 – 0,75	–
lako gnječiva	> 0,75 – 1	0,5 – 0,75
žitka	> 1	< 0,75

A. Casagrande je utvrdio da, povezujući indeks plastičnosti ( $I_p$ ) i granicu tečenja ( $w_L$ ), za pojedine vrste koherentnih tala u jedinstvenom dijagramu nastaje grupiranje tala u pojedinim područjima. Na taj je način dobio dijagram sa slike 2.6 koji je nazvao dijagram plastičnosti. Pomoću njega je moguće razvrstati koherentna, sitnozrna tla u podgrupe prema plastičnosti.



Slika 2.6 Veza granice tečenja ( $w_L$ ) i indeksa plastičnosti ( $I_p$ ) za razne vrste tla (Earth Manual, Part 1, 1998.)

### 2.5.2 Granulometrijski sastav

Služi za razredbu krupnozrnog tla. Temeljem krupnoće čestica i oblika granulometrijske krivulje, krupnozrna se tla mogu svrstati u osnovne skupine i podskupine.

Količina najkrupnijih čestica u ukupnoj masi tla može se procijeniti prema tabeli 2.13 (grupiranje prema HRN EN ISO 14688-2: 2008., Tab.1).

Tabela 2.13 Razredba komada krupnijih od promjera bušotine, odnosno 60 mm

Krupnoća čestica	Postotak u ukupnoj masi	Određenje
blokovi (promjera > 300 mm, prema EN HRN>200 mm) (samci, kasnije oznaka Bo)	<5	mala količina blokova
	5-20	srednja količina blokova
	>20	velika količina blokova
komadi (promjera 300 - 60 mm, prema EN HRN 200-60 mm) (kasnije oznaka Co)	<10	mala količina komada
	10-20	srednja količina komada
	>20	velika količina komada

Ovakva se razredba može učiniti u jamama i raskopima gdje je te krupne komade moguće vidjeti u punoj veličini. Sondažnim bušenjem se to ne može detaljno utvrditi. Prilikom bušenja valja voditi računa da krupni samci mogu zavarati i dati dojam da se radi o osnovnoj stijeni.

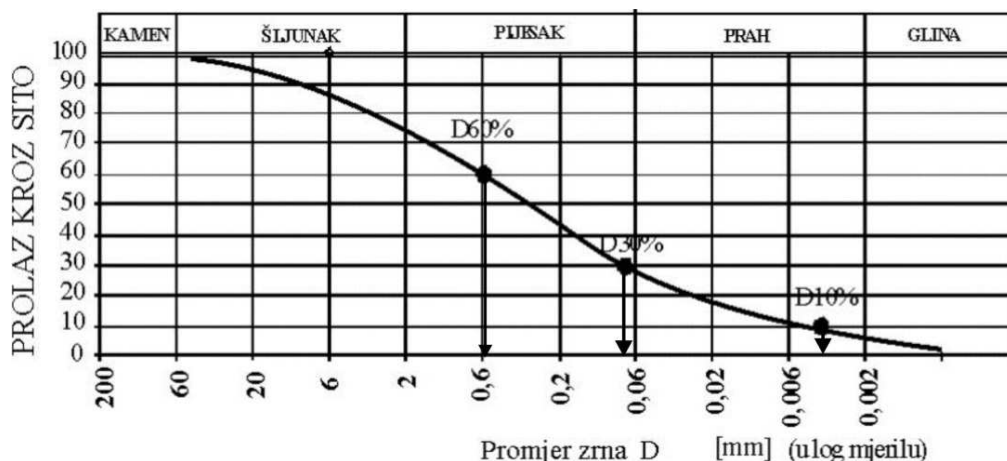
Za sastav tla u kojem su čestice manje od 60 mm provodi se postupak sisanja.

Tlo, koje je sastavljeno isključivo od krupnih čestica (šljunka i pijeska), podvrgava se postupku sisanja. Čista krupnozrna tla mogu se podvrgnuti **suhom sisanju**.

Sitnozrno tlo, promjera čestica <0,06 mm, nije moguće sijati da bi se odredila krupnoća čestica, već se ona određuje temeljem određivanja promjene gustoće suspenzije uslijed taloženja čestica različitih promjera u vremenu, u poznatoj tekućini. Postupak se naziva **hidrometrijska analiza ili areometriranje**. U literaturi se ovaj postupak naziva i pokus taloženja (sedimentacije).

Mješavine krupnozrnih i sitnozrnih čestica se moraju podvrgnuti postupku mokrog sisanja, da bi se isprale sitne čestice. Ako sitnih čestica u ukupnom masi ima u količini iznad 10 % provodi se i hidrometrijska analiza. U tom slučaju se govori o **kombiniranoj** analizi u kojoj se u granulometrijskom dijagramu rezultat prikazuje jednom zajedničkom krivuljom na način da se krivulja sitnih čestica svede na dio (postotak) koji joj pripada u ukupnoj masi ispitanog uzorka i docrta u pripadni dijagram.

Granulometrijski sastav tla prikazuje postotak čestica određene krupnoće u ukupnoj masi uzorka. Prikazuje se granulometrijskom krivuljom u polulogaritamskom mjerilu, kod kojeg je na osi apscisa promjer zrna,  $D$  [mm], u logaritamskom mjerilu, a na osi ordinata prolaz kroz sito određenog otvora u postocima [%].



Slika 2.7 Granulometrijski dijagram sa svojstvenim točkama

Pomoću svojstvenih točaka tj. promjera sita kroz kojeg prolazi određeni postotak zrna, određuju se **svojstva granulometrijske krivulje**. Ona se mogu izraziti pomoću efektivnog promjera zrna ( $D_{10}$ ), koeficijenta jednolikosti ( $C_U$ ) i koeficijenta zakrivljenosti ( $C_C$ ), koji se računaju iz promjera zrna:

$D_{10}$ , efektivni promjer zrna, promjer sita kroz kojeg prolazi posljednjih 10% ispitanog uzorka sa slike 2.7;

$D_{30}$ ,  $D_{60}$ , promjer sita kroz koje prolazi 30% odnosno 60% ukupne količine uzorka sa slike 2.7.

Pomoću gornjih vrijednosti može se za svaku granulometrijsku krivulju odrediti:

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}, \text{ koeficijent jednolikosti;}$$

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}}, \text{ koeficijent zakrivljenosti.}$$

Detalji pokusa određivanja granulometrijskog sastava tla dani su u propisima za izvođenje laboratorijskih pokusa u geotehnici.

Prethodno je rečeno da se oblik granulometrijske krivulje može izraziti pomoću **efektivnog promjera zrna** ( $D_{10}$ ), **koeficijenta jednolikosti** ( $C_U$ ) i **koeficijenta zakrivljenosti** ( $C_C$ ). Temeljem vrijednosti ovih koeficijenata može se opisati granulometrijska krivulja kao u tabeli 2.14.

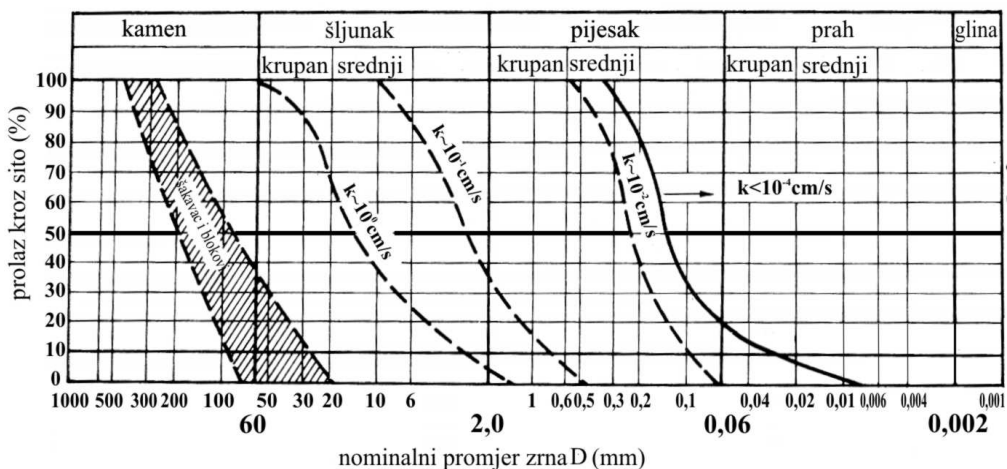
Male vrijednosti koeficijenta jednolikosti javljaju se kod tala uskog granulometrijskog područja. Kod idealnih krivulja koeficijent zakrivljenosti bi trebao biti oko 2.

Tabela 2.14 Koeficijenti oblika granulometrijske krivulje (HRN EN ISO 14688-2:2008, Tab. 2)

Oblik krivulje	Koeficijent jednolikosti $C_U$	Koeficijent zakrivljenosti $C_C$
široko granulometrijsko područje	$>15$	$1 < C_C < 3$
ravnomjerno granulirano	6-15	$<1$
jednoliko granulirano	$<6$	$<1$
s prekidom	obično visok	bilo koji (obično $<0,5$ )

### 2.5.2.1 Koeficijent filtracije

Iz podataka granulometrijske krivulje može se približno odrediti koeficijent vodopropusnosti (Darçy-ev koeficijent propusnosti, Darçy, 1856.), slika 2.8.



Slika 2.8 Približne vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti,  $k$ , ovisno o granulometrijskim sastavu (Striegler, Werner, 1969.)

Za čisti pijesak s manje od 5% čestica manjih od 0,06 mm, poznat je izraz od A. Hazena (1911.) za približno određivanje koeficijenta procjeđivanja kada nema boljih podataka:

$$k \text{ [cm/sek]} = C * [D_{10} \text{ [mm]}]^2 \quad (2.26)$$

uz vrijednost parametra  $C$  između 0,4 i 1,2 ili prosječno 1,0.

Ovaj izraz vrijedi za granulometrijske krivulje koje imaju svojstvo da im je nominalni promjer zrna  $D_{10}$  između 0,1 mm do 3,0 mm i  $k \geq 10^{-3} \text{cm/s}$ . U tabeli 2.15 priložene su orijentacione vrijednosti koeficijenta vodopropusnosti,  $k$ . Za ozbiljnu procjenu potrebno je izvršiti terenska ispitivanja vodopropusnosti.

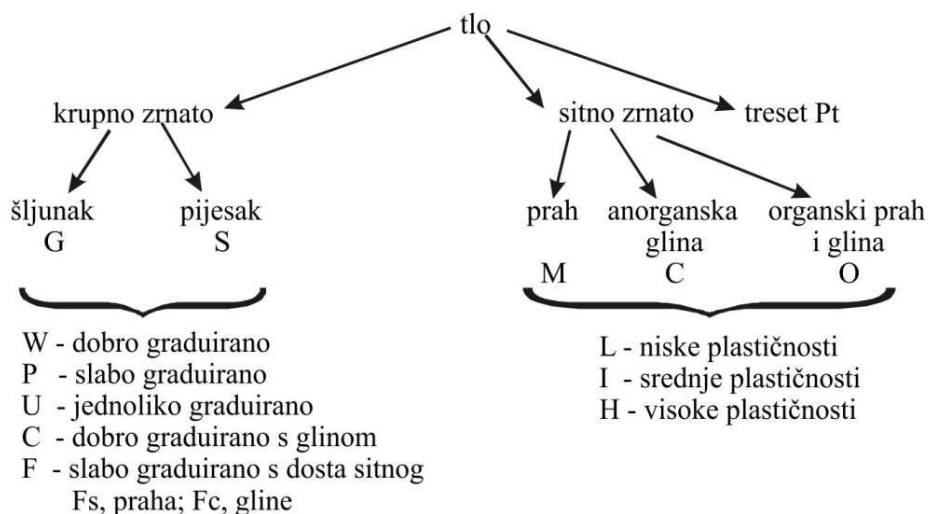
Tabela 2.15 Koeficijent procjeđivanja, k, za neke vrste tla (Maslov 1975.)

Vrsta tla	Koeficijent filtracije k [m/sat]	Koeficijent filtracije k [cm/s]
šljunak, krupni	8,3	0,23
šljunak, sitni: čist s pijeskom	8,3 – 4,2 6,25 – 3,13	0,23 – 0,11 $1,7 \cdot 10^{-1} - 8,7 \cdot 10^{-2}$
pijesak: krupni srednji sitni prašinst i glinovit	2,13 – 1 $1 - 4,2 \cdot 10^{-1}$ $4,2 \cdot 10^{-1} - 8,3 \cdot 10^{-2}$ $8,3 \cdot 10^{-2} - 1,16 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-2} - 3 \cdot 10^{-2}$ $3 \cdot 10^{-2} - 1,2 \cdot 10^{-2}$ $1,2 \cdot 10^{-2} - 2,3 \cdot 10^{-3}$ $2,3 \cdot 10^{-3} - 1,2 \cdot 10^{-4}$
glina pjeskovita glina, čista	$1,7 \cdot 10^{-2} - 2,1 \cdot 10^{-4}$ $< 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4} - 5,8 \cdot 10^{-6}$ $< 10^{-6}$

**Nije preporučljivo osloniti se isključivo na ovakve podatke ako je procjeđivanje važno za predmetnu građevinu.**

## 2.6 AC RAZREDBA

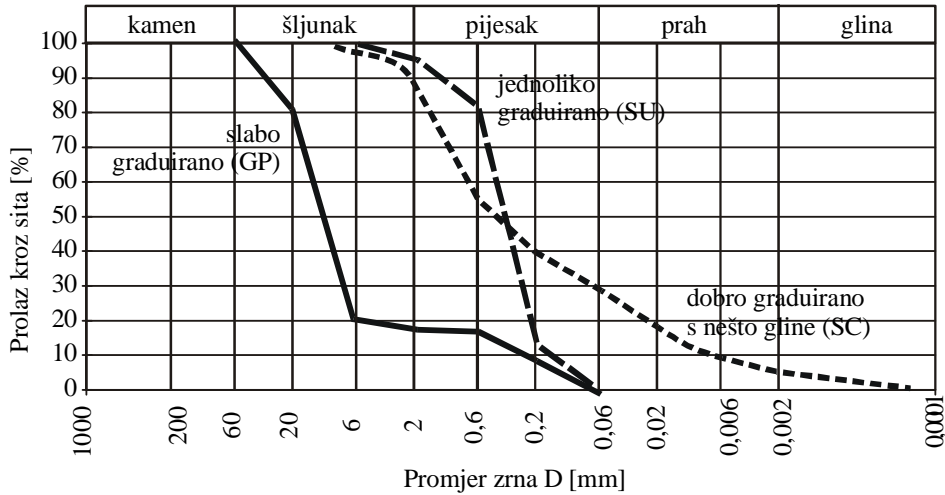
To je razredba koja se i danas koristi u određenim slučajevima. Osniva se na podjeli tla prikazanoj na slici 2.9.



Slika 2.9 Osnova AC razredbe tla

Podjela krupnozrnog tla osniva se na obliku granulometrijske krivulje prikazane na slici 2.10.





Slika 2.10 Nekoliko granulometrijskih krivulja za razredbu krupnozrnog tla

Tabela 2.16 prikazuje osnovnu podjelu tla prema veličini čestica, koja se po oznakama razlikuje od one u AC razredbi, ali je osnovna, fina podjela ista.

Tabela 2.16 Osnovna podjela tla prema veličini čestica s pripadnim razredbenim oznakama prema HRN EN ISO 14688-1:2008

Krupnoća čestica	Fina podjela	Podgrupa	Simbol	Veličina zrna [mm]
krupni komadi	veliki blokovi		LBo	>630
	blokovi		Bo	>200-630
	komadi		Co	>63-200
krupnozrno tlo	šljunak		Gr	>2,0-63
		krupni	CGr	>20-63
		srednji	MGr	>6,3-20
	pijesak	sitni	FGr	>2,0-6,3
			Sa	>0,063-2,0
		krupni	CSa	>0,63-2,0
		srednji	MSa	>0,2-0,63
	sitni	FSa	>0,063-0,2	
Sitnozrno tlo	prah		Si	>0,002-0,063
		krupni	CSi	>0,02-0,063
		srednji	MSi	>0,0063-0,02
		sitni	FSi	>0,002-0,0063
	gline	gline	Cl	≤0,002

Casagrande je uočio da se, u dijagramu plastičnosti, anorganske gline grupiraju iznad organskih gline i prašinstih tala za iste vrijednosti granice tečenja. To znači da organske gline i prašinsti tla imaju manji raspon vlažnosti između granice plastičnosti i granice tečenja. Granična "A" linija ima jednadžbu:

$$I_p = 0,73 * (w_L - 20) \quad (2.27)$$

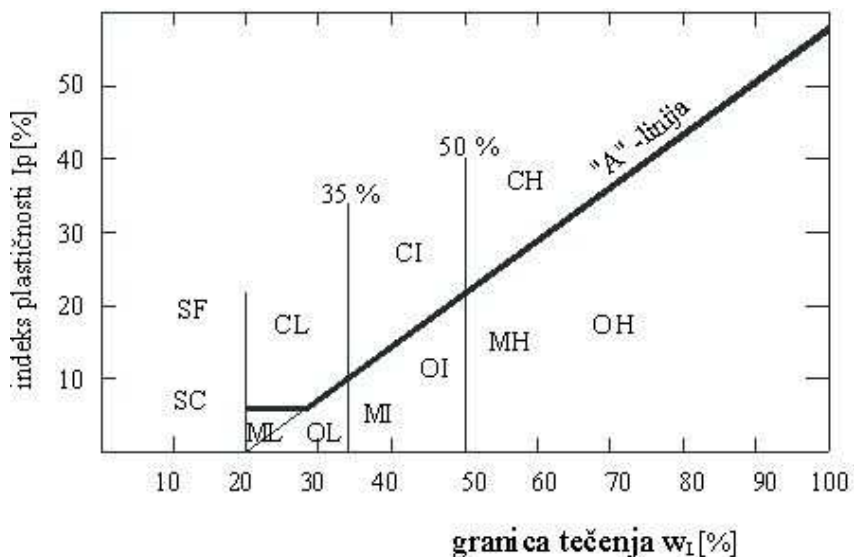
Za prah i gline razredbene oznake podgrupa se temelje na vrijednosti vlažnosti na granici tečenja:

L = nisko plastične ( $w_L < 35\%$ );

I = srednje plastične ( $35\% < w_L < 50\%$ );

H = visoko plastične ( $w_L > 50\%$ )

Za AC razredbu sitnozrnog tla koristi se dijagram plastičnosti kao na slici 2.11.



Slika 2.11 Dijagram plastičnosti

Kombinacijom oznaka dobivaju se sljedeće razredbene grupe za krupnozrna tla:

Tabela 2.17 Razredbene oznake prema AC razredbi krupnozrnog tla

Opis granulometrijske krivulje	Podgrupa	
	šljunak	pijesak
dobro graduiran	GW	SW
s glinovito prašinstim vezivom	GC	SC
slabo graduiran	GP	SP
jednoliko graduiran	GU	SU
s prekomjerno praha	GFs	SFs
s prekomjerno gline	GFc	SFc

odnosno za sitnozrna tla:

Tabela 2.18 Razredbene oznake prema AC razredbi sitnozrnog tla

Plastičnost	Podgrupa		
	prah	glina	organska glina
niska	ML	CL	OL
srednja	MI	CI	OI
visoka	MH	CH	OH

i treset Pt. Ukupno po ovoj razredbi ima 21 vrsta tla uglavnom dostatnih za potpuni opis.

### 2.7 UC JEDINSTVENA RAZREDBA (UNIFIED CLASSIFICATION)

Ova se razredba službeno koristi u SAD-u od 1. siječnja 1986. Osniva na Casagrandeovoj razredbi s izvjesnim preinakama. Dobila je naziv prema Unified Classification (jedinstvena razredba). Prva je razredbena oznaka ista kao kod AC razredbe pa ostaju osnovne grupe:

za krupnozrna tla:

G šljunak, više od 50 % u ukupnoj masi ima šljunka

S pijesak, manje od 50 % u ukupnoj masi ima šljunka

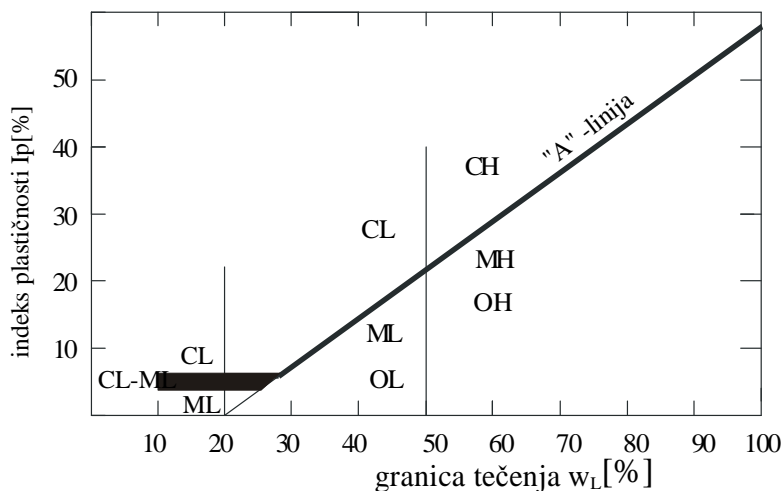
za sitnozrna tla (nestaje tlo srednje plastičnosti):

M prah,  $I_p$  ispod "A" linije ili  $I_p < 4$

C glina,  $I_p$  iznad "A" linije i  $I_p > 7$

O organska glina,  $I_p$  ispod "A" linije ili  $I_p < 4$

Na slici 2.12 prikazan je dijagram plastičnosti prilagođen UC razredbi.



Slika 2.12 Dijagram plastičnosti za UC razredbu

Za podgrupe postoje sljedeće razredbene oznake prikazane u tabelama 2.19 i 2.20:

Za **krupnozrna tla** s manje od 5 % čestica, koje prolaze kroz sito br. 200 (ASTM, promjera otvora 0,075 mm), odnosno sito promjera otvora 0,06 mm prema britanskim standardima BS 1377:90:

W dobro graduirano ako je  $C_u > 4$  za šljunke;  $C_u > 6$  za pijeske te  $1 \leq C_c \leq 3$ , gdje je  $C_u$ , koeficijent jednolikosti, a  $C_c$ , koeficijent zakrivljenosti.

P siromašno graduirano; nedostaje poneka frakcija.

Za **krupnozrna tla** koja u granulometrijskoj krivulji sadrže više od 12 % čestica, koje prolaze kroz sito br. 200 (ASTM, promjera otvora 0,075 mm), odnosno sito promjera otvora 0,063 mm prema britanskim standardima BS 1377:90:

C s glinom, M s prahom.

Tlo koje ima između 5 % i 12 % čestica sitnijih od 0,075 mm (0,063 mm) ima dvojnju oznaku GW-GC, odnosno SW-SC kao i sve druge moguće kombinacije.

Tabela 2.19 Osnovne razredbene oznake prema UC razredbi krupnozrnog tla

Opis granulometrijske krivulje	Podgrupa	
	šljunak	pijesak
dobro graduiran	GW	SW
slabo graduiran	GP	SP
s prahom	GM	SM
s glinom	GC	SC

Ovdje se pojavljuju dvojne oznake (GC-GM) koje daju detaljan i složeni opis tla ovisno o vrsti primjese. (vidi na pr. Long i dr. 1987.)

Za **sitnozrna tla** (kada  $\geq 50$  % prolazi kroz sito promjera otvora 0,075 mm) :

H visoko plastična ( $w_L > 50$  %),

L nisko plastična ( $w_L < 50$  %).

Tabela 2.20 Osnovne oznake prema UC razredbi za anorganska sitnozrna tla

Plastičnost	Podgrupa	
	prah	glina
niska ( $w_L < 50$ %)	ML	CL
niska ( $w_L < 50$ %), $I_p$ iznad "A" linije i $4 \% < I_p < 7$ %	CL-ML	
visoka ( $w_L > 50$ %)	MH	CH

## 2.8 RAZREDBA TLA PREMA HRN EN ISO 14688-1:2008 I 14688-2:2008

Može se provesti kada su utvrđeni indeksni pokazatelji uključujući i granulometrijski sastav. Za potrebe određivanja konzistentnog stanja treba odrediti prirodnu vlažnost ( $w_0$ ). Za tla kod kojih se sumnja da sadrže organske primjese, potrebno je ispitati sadržaj organskih tvari<sup>†</sup>.

Sljedeći korak je određivanje vrste čestica koje su u ukupnoj količini zastupljene u manjoj količini. Na taj način nastaju složeni simboli za opis tla. Ovo je oblikovanje simbola prema načinu opisa vrsta tla u engleskom jeziku. Odabir simbola mora biti takav da opiše one čestice koje čini pretežiti dio ukupne količine. Tlo je često mješavina čestica svih mogućih veličina.

### Plastičnost

Sitnozrna tla imaju svojstvo plastičnosti. Ovo se svojstvo određuje utvrđivanjem granice tečenja  $w_L$  i granice plastičnosti  $w_p$ . Prilikom određivanja granica plastičnosti određuje se i indeks konzistencije,  $I_C$ . On ovisi o prirodnoj vlažnosti tla.

Konzistenciju se približno može odrediti ovisno o broju udaraca prilikom izvođenja standardnog penetracijskog pokusa (SPP). Veza konzistentnog stanja, indeksa konzistencije  $I_C$  i broja udaraca SPP-a prikazana je u tabeli 2.10.

Prema vrijednosti indeksa konzistencije,  $I_C$  može se tlo opisati prema tabeli 2.21.

Tabela 2.21 Konzistentna stanja prema indeksu konzistencije (HRN EN ISO 14688-2:2008, Tab. 6)

Konzistentno stanje praha ili gline	Indeks konzistencije $I_C$ [%]
žitko	<25
lako gnječivo	25-50
teško gnječivo	50-75
polučvrsto	75-100
čvrsto	>100

<sup>†</sup> U međuvremenu je izrađen dodatak EC7: "prEN 16907-2Earthworks - Part 2: Classification of materials" s novim prijedlogom razredbe tla za potrebe zemljanih radova

### Sadržaj organskih tvari

Postoji razlika između organskog tla i tla pretežito mineralnog sastava s određenom količinom organskih primjesa. U tom se slučaju može primijeniti opis iz tabele 2.22.

Tabela 2.22 Udio organskih primjesa u tlu pretežito mineralnog sastava. (HRN EN ISO 14688-2:2008, Tab. 3)

Tlo	Sadržaj organske tvari u odnosu na suhu masu čestica <2 mm u [%]
s malo organskih primjesa	2-6
sa srednjom količinom organskih primjesa	6-20
s mnogo organskih primjesa	>20

Prema engleskim nazivima osnovnih grupa (zrna koja dominiraju u granulometrijskoj krivulji) odabrano je prvo slovo za razredbenu oznaku, pa je:

- G - šljunak (gravel)      C - glina (clay) anorganska  
S - pijesak (sand)      O - organsko tlo (organic), glina i prah  
M - prah (mud)      Pt - treset (peat)

Sljedeća, finija podjela je različita za krupnozrna i za sitnozrna tla. Za nekoherentna, krupnozrna tla, razredba se temelji na svojstvima (obliku) granulometrijske krivulje. Dobro graduirano tlo (W) ima krivulju u kojoj su jednakomjerno zastupljene sve frakcije između najkrupnije i najsitnije. Ukoliko je raspon od najkrupnije do najsitnije frakcije uzak, tlo je jednoliko graduirano (U). Kada nedostaje neka frakcija (krivulja postaje pravac usporedan s osi apscisa), radi se o slabo graduiranom tlu (P). Kada uz oznaku za krupnozrno tlo stoji oznaka (C) znači da tlo sadrži veću količinu gline. Oznaka (F) uz oznaku za krupnozrno tlo znači da ima dosta sitne frakcije, ali da nije dominantna glina već pijesak i prah uz šljunak, odnosno prah i glina uz pijesak. Za šljunke i pijeske razredbene oznake podgrupa dane su u tabeli 2.16, a granulometrijske krivulje na slici 2.10.

Ova razredba uvažava podatke prema tabelama 2.13, 2.16 i 2.17.

Temeljem svega prethodnog moguće je oblikovati tabelu za razredbu tla 2.23.

Tabela 2.23 Razredba tla prema trenutnim normama HRN EN ISO 14688-2:2008

Kriterij	Vrsta tla	Vrednovanje	Svrstavanje u grupe sličnih svojstava	Daljnja finija podjela prema:	
vlažno tlo, ne lijepi se	vrlo krupno	većina čestica >200 mm	Bo xBo boCo coBo	zahtijeva posebno razmatranje	
		većina čestica > 63 mm	Co saCo, grCo sagrCo		
vlažno tlo, lijepi se	krupno	većina čestica > 2 mm	Gr cosaGr coGr	granulacija, oblik granulometrijske krivulje, zbijenost, vodopropusnost, mineralogija, oblik čestica	
		većina čestica > 0,063 mm	Sa saGr, grSa sasiGr, grsiSa siGr, clGr siSa, clSa, saclGr orSa		
vlažno tlo, lijepi se	sitno	niska plastičnost, otpušta vodu plastično, ne otpušta vodu	Si saSi sagrSi saclSi clSi, siCl Cl sagrCl orSi, orCl	plastičnost, vlažnost, čvrstoća, osjetljivost, stišljivost, krutost, minerali glina	
tamno, lagano	organsko		Or saOr, siOr clOr	zahtijeva posebno razmatranje	
neprirodno	umjetno napravljeno	nasip	Mg xMg	umjetno gradivo	zahtijeva posebno razmatranje
				prirodno tlo, deponija ili nasip	postupak kao da je prirodno tlo

Ključ za oznake tla: osnovna oznaka

Druga ili treća sastavnica mogu biti:

– blokovi	Bo	bo
– komadi	Co	co
– šljunak	Gr	gr Gr(gr) i Sa(sa) imaju pod podjelu na sitno F (f)
– pijesak	Sa	sa srednje M(m) i
– prah	Si	krupno C(c)
– glina	Cl	si
– organsko tlo	Or	cl
– neprirodno tlo	Mg	or
		x - bilo koja kombinacija sastavnica

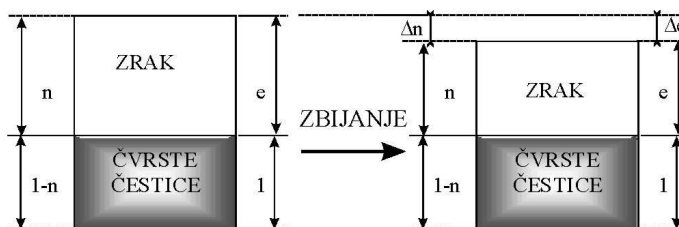
Ona tla, koja zahtijevaju posebno razmatranje, treba razvrstati u skladu sa zahtjevima projekta ili uobičajenim opisima.

## 3 ZBIJANJE I ZBIJENOST

### 3.1 O ZBIJANJU OPĆENITO

Zbijanje je postupak kojim se tlo, razastrto na mjestu ugradnje, dovodi u stanje kada postaje gradivo s projektiranim geotehničkim svojstvima. Mjera zbijenosti tla je suha gustoća ( $\rho_d$ ) ili jedinična prostorna težina ( $\gamma_d$ ) suhog tla, zbijenog na mjestu ugradnje. Za krupnozrna tla mjera je modul stišljivosti, određen probnom pločom, CBR-pokusom ili nekim drugim prikladnim postupkom.

Prilikom iskopa, prijevoza i razastiranja, tlo u potpunosti gubi prirodnu strukturu i gustoću. Postaje rahlije i gubi prirodna geotehnička svojstva. Tijekom zbijanja smanjuje se količina pora u tlu, izražena kao  $\Delta e$ , na slici 3.1. Čestice se približavaju jedna drugoj, a geotehnička se svojstva mijenjaju u ona koja su predviđena projektom. Pretpostavka je da su čestice tla nestišljive za razinu naprezanja koja se nanosi prilikom zbijanja.



Slika 3.1 Model učinka zbijanja na smanjenje poroziteta

Učinak je isti za nevezana i vezana tla, smanjuje se porozitet,  $e$ . Zbijanjem se čestice približavaju, a njihove veze postaju čvršće. Veze među česticama su različite za krupnozrna i za sitnozrna tla. Za koherentna se tla smanjuje razmak među česticama i povećava učinak elektrokemijskih sila koje utječu na porast kohezije. Kod nekoherentnog tla povećavaju se dodirne površine i uklještenje među česticama. To povećava vrijednosti geotehničkih svojstava.

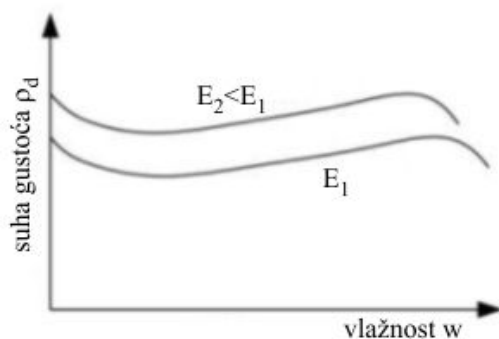
O zbijenosti ovise svojstva bitna za stabilnost pokosa, nosivost, stišljivost nasipa, vezana za naknadno slijeganje nasipa, vododrživost nasipa i vezana za štetni utjecaj vode kada ona povremeno, privremeno ili stalno djeluje na nasipe.

Kod **krupnozrnih tala** bolja geotehnička svojstva se ostvaruju trenjem među česticama na dodirnim točkama. Da bi se ovo trenje ostvarilo, čestice moraju međusobno pružati otpor pomicanju. Rahla, suha ( $S_r=0$ ) i potpuno zasićena ( $S_r=100\%$ ), čista, krupnozrna, nekoherentna tla, nemaju čvrstoću kada nema bočnog otpora. Prema Mohr-Coulombovoj teoriji, nosivost na površini tla je jednaka nuli,



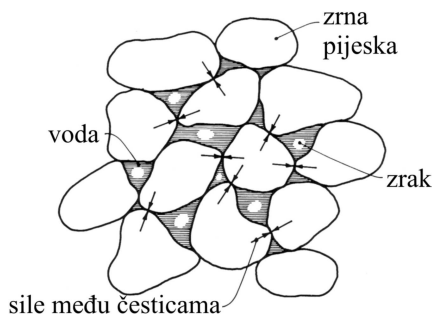
pravac čvrstoće na smicanje u  $\sigma$ - $\tau$  dijagramu prolazi kroz ishodište. Zbijanje krupnozrnog tla izaziva premještanje sitnijih čestica u prazne prostore i time povećava gustoću tla.

Istraživanja su pokazala da na čiste pijeske, prilikom zbijanja malo utječe promjena vlažnosti, međutim povećana energija zbijanja daje gušću strukturu. Ispitivanja čistih pijesaka su dala rezultate prikazane na slici 3.2. Uočava se pad suhe gustoće pri postepenom vlaženju, dosizanje minimuma i zatim opet povećanje pri vlažnosti blizu, ali još uvijek ispod potpunog zasićenja. Ovo se može objasniti pojavom tzv. „prividne kohezije“ koja se javlja kod čistih pijesaka.



Slika 3.2 Ponašanje čistog pijeska pri promjeni vlažnosti i zbijanju s različitim energijama (Schroeder, 1975.)

Prividna kohezija se javlja u čistim pijescima određene vlažnosti. Zbog vrlo malih dimenzija pora, među česticama tla i vode dolazi do pojave kapilarnih sila (slika 3.3).



Slika 3.3 Uzrok „čvrstoće“ vlažnog pijeska (Schroeder, 1975.)

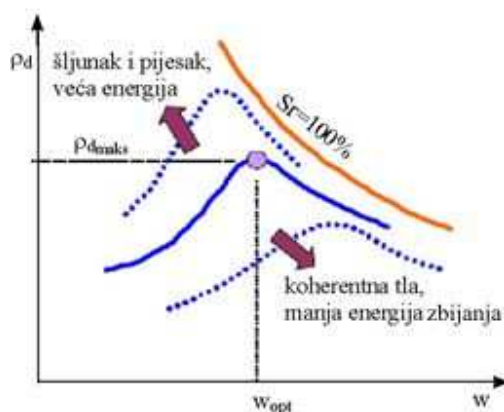
Kao reakcija na negativni porni tlak i vlačna naprežanja na dodiru vode i čestica, javlja se pritisak među česticama. Kapilarne sile drže čestice na okupu i kada nema bočnog tlaka, do trenutka dok se ne prekorači neka granična vlažnost, kada utjecaj kapilarnih sila prestaje djelovati i pijesak ponovo gubi čvrstoću kao kad je bio potpuno suh (bliži se zasićenju).

Prilikom zbijanja krupnozrnog tla, uočeno je da se krupne čestice lakše pomiču vibriranjem nego čistim pritiskom. Tome su prilagođeni i moderni strojevi za zbijanje te se ova gradiva zbijaju vibro-valjcima, vibro pločama i sličnom mehanizacijom.

Kod nekih stijena, mekših svojstava (lapori i slično), dolazi do drobljenja čestica, (slika 1.4) što također uzrokuje gušću strukturu. Mogućnost zbijanja ovisi o granulometrijskom sastavu, obliku čestica, hrapavosti površine i td.

Kod **sitnozrnog tla** bitan učinak ima vlažnost. Ovu je činjenicu 1933. godine uočio R. Proctor. Radeći na izgradnji brane Bouquet Canyon u razdoblju od 1932.-1934. godine, razradio je postupak zbijanja uz promjenu vlažnosti i ispitivao učinak istog u laboratoriju i na terenu. Prije tog saznanja, ugradnja sitnozrnog tla temeljila se na iskustvu.

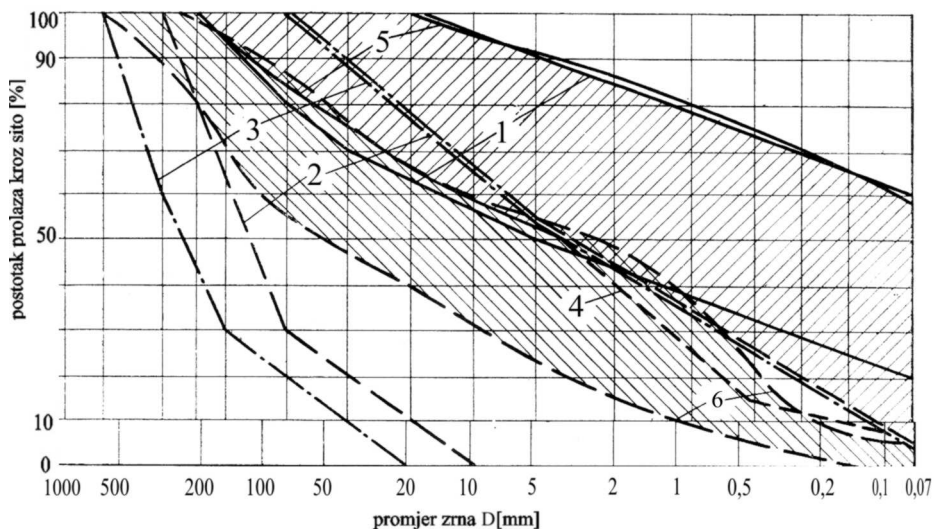
Proctor (1933.) je utvrdio da zbijenost tla ovisi o energiji zbijanja i vlažnosti tla. Uočio je da postoji vlažnost koja, za određenu energiju zbijanja, daje najveću moguću suhu gustoću tla, tj. najveću moguću zbijenost. Tu je vlažnost nazvao „*optimalna vlažnost*“. Predložio je uređaj kojim se ispituje utjecaj tih dvaju parametara. Kao standardnu energiju zbijanja u laboratoriju izabrao je onu koja je bila usporediva energiji koju su strojevi za zbijanje s početka dvadesetog stoljeća mogli unijeti u tlo. Tako je nastao standardni Proctorov pokus. Kasnijim povećanjem snage i time i učinaka strojeva za ugradnju i zbijanje tla na terenu, američko udruženje za ceste (AASHTO) oko 1950., uvelo je modificirani Proctorov pokus kao pogodniji za tada modernu tehnologiju ugradnje tla pri izgradnji autocesta. U tom pokusu energija zbijanja povećana je približno 4,5 puta u odnosu na onu iz standardnog pokusa. Slika 3.4 pokazuje učinak promjene energije zbijanja i vrste tla koje se zbijaju pri Proctorovom pokusu (Narita, 2000.).



Slika 3.4 Promjena optimalne vlažnosti za različite energije zbijanja i za različite vrste tla

Ponašanje **mješavina** ovisi o odnosu količina čestica pojedine krupnoće. Kada u tlu ima manje od 5 % sitnih čestica (promjera ispod 0,063 mm), može se smatrati da ta količina nema utjecaj na svojstva krupnozrnog tla. Količina veća od 12 % čestica ispod 0,063 mm utječe na ponašanje mješavine. U OTU za radove na cestama i OTU za radove u vodnom gospodarstvu, pod miješanim se gradivima podrazumijevaju ona koja sadrže čestice <0,063 mm u količini između 15 % i manje od 50 %.

U većini slučajeva nije moguće ugrađivati potpuno čiste vrste prirodnog gradiva. Također nije moguće propisati vrstu prirodnog gradiva jednom granulometrijskom krivuljom. Propisuje se područje unutar kojeg se mora nalaziti pojedina vrsta gradiva za pojedini dio nasipa (kada se radi o zoniranim nasipima) ili unutar kojeg se područja mora nalaziti granulometrijska krivulja gradiva za homogeni nasip. Na slikama 3.5 i 3.7 prikazana su područja unutar kojih se mora nalaziti granulometrijska krivulja gradiva za pojedino područje nasipa. Primjeri su gradiva za nasipe brana Mica i Outards-4 u Kanadi.

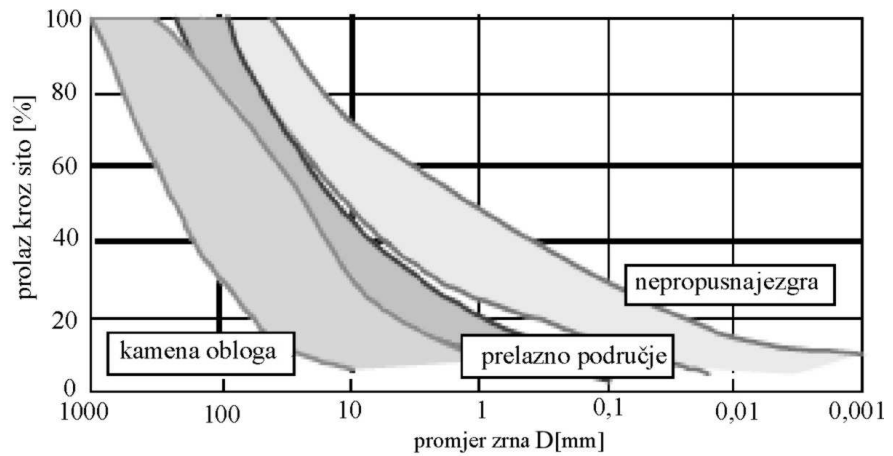


Slika 3.5 Propisana područja granulometrijskih sastava tla u pojedinim zonama brane Mica, Kanada i područja tala s česticama različite krupnoće, koja su ugrađena u branu (Webster, 1976.)

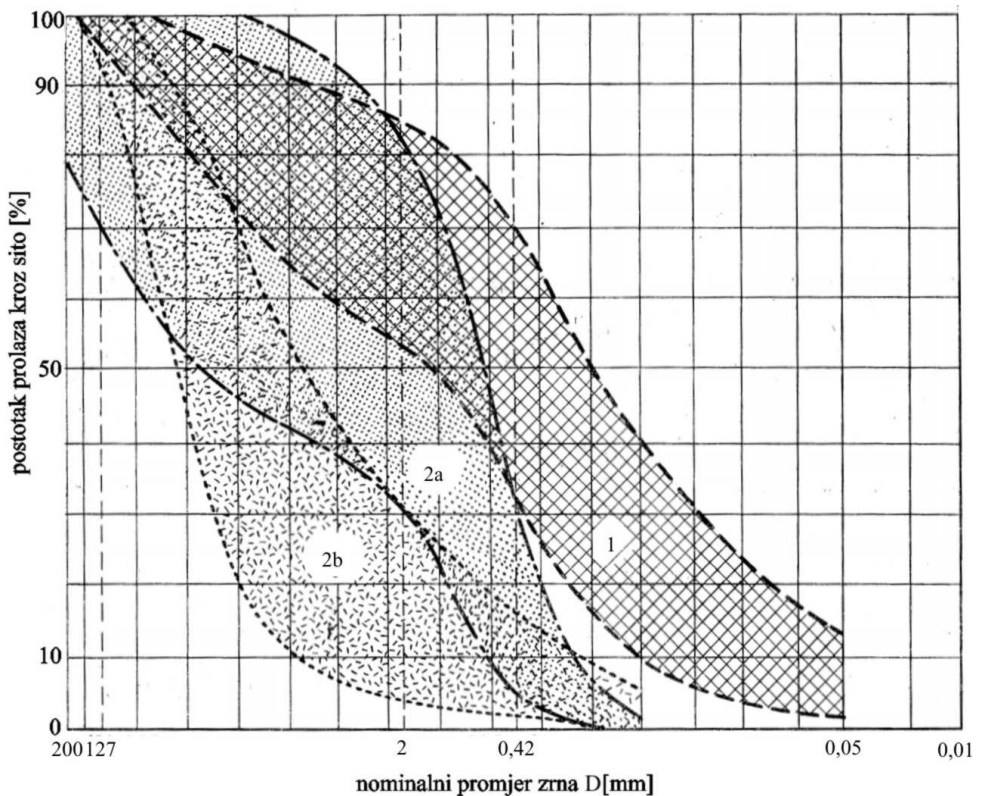
1-dozvoljeni raspon za jezgru; 2-dozvoljeni raspon za uzvodnu i nizvodnu potpurnu prizmu; 3- dozvoljeni raspon za prelazni sloj prema kamenoj oblozi; 4-kamena obloga; 5- raspon za čestice manje od 75 mm prema uzorcima iz pozajmišta; 6-raspon za 32 uzorka mješavine pijeska i šljunka iz pozajmišta

Japanska iskustva pokazuju da je moguće ugrađivati i u nepropusnu jezgru, mješavine s dosta krupnih čestica. Ovo je moguće zbog najnovijeg razvoja teških strojeva i najnovijih tehničkih mogućnosti provjere ugrađenog tla. Na slici 3.6

prikazan je granulometrijski sastav tla ugrađenog u 12 kamenih nasutih brana u Japanu (Narita, 2000.).



Slika 3.6 Područja granulometrijskih dijagrama tala ugrađenih u 12 nasutih brana u Japanu

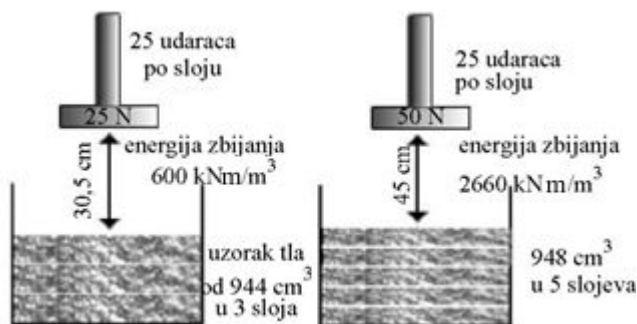


Slika 3.7 Područja granulometrijskih sastava jezgre (1) i filtarskih područja (2a i 2b) nasute brane Outards-4, Kanada (Dumas i dr. 1976.)

## 3.2 ISPITIVANJE ZBIJENOSTI U LABORATORIJU

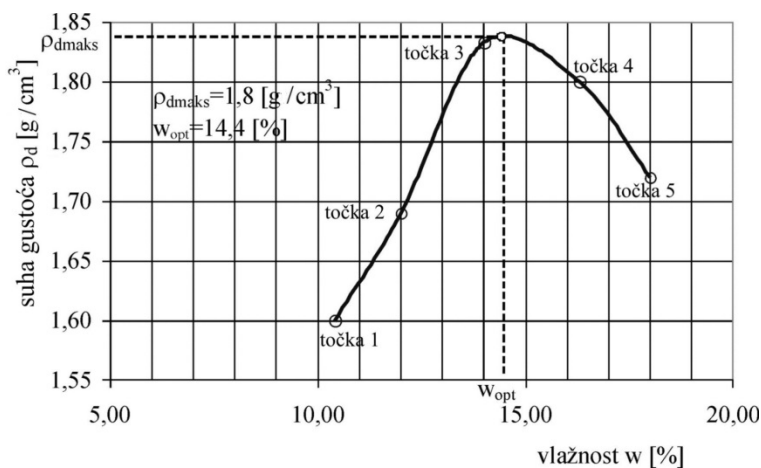
### 3.2.1 Proctorov pokus

U standardnom kao i u modificiranom Proctorovom pokusu, tlo određene vlažnosti ugrađuje se zbijanjem u slojevima u cilindrični kalup unutrašnjeg promjera 10,2 cm, visine 11,75 cm i zapremine  $944 \text{ cm}^3$  (slika 3.8, Earth Manual, 1998.). Zbija se pomoću određenog broja udaraca slobodno padajućeg bata promjera 5,1 cm, zadane mase, sa zadane visine. Zbijanje se ponavlja za svaki sloj. Tako zbijenom uzorku tla se odredi suha gustoća  $\rho_d$ . Pokus se ponavlja nekoliko puta pri različitim vlažnostima tla,  $w$ , koje se postepeno povećavaju. Svakoj vlažnosti će odgovarati određena suha gustoća koja raste do maksimuma, a zatim postepeno pada.



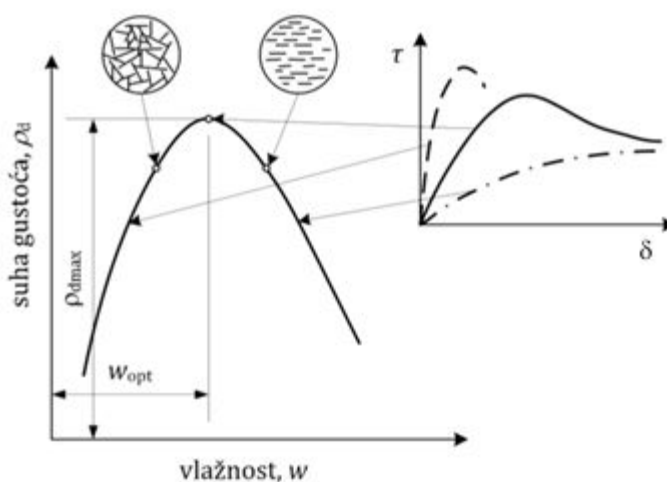
Slika 3.8 Proctorov pokus, lijevo standardni, desno modificirani

Bilježi se vrijednost vlažnosti svakog zbijenog primjerka i odgovarajuća suha gustoća kao na slici 3.9. Kroz dobivene točke provlači se krivulja koja ima maksimum. U toj se točki očitava vrijednost vlažnosti,  $w$ , kao optimalne ( $w_{opt}$ ) i pripadne suhe gustoće koja za odabranu energiju zbijanja iznosi  $\rho_{dmaks}$ .



Slika 3.9 Proctorova krivulja i način određivanja  $w_{opt}$  i  $\rho_{dmaks}$

Razmotri li se položaj čestica prilikom zbijanja, može se uočiti da na manje vlažnoj strani kostur tvore čestice različitih položaja. Na vlažnijoj strani, čestice su pravilnije raspoređene, bliže vodoravnom položaju. To je posljedica toga što voda povećava pokretljivost čestica i dozvoljava njihovo bolje slaganje, do određene vlažnosti. Iza toga porinu tlakovi, koji nastaju prilikom zbijanja u sitnozrnom tlu, a koji ne mogu dovoljno brzo disipirati zbog male propusnosti, ne dozvoljavaju veću zbijenost čestica odnosno gustoću, pa time i suhu gustoću (slika 3.10).



Slika 3.10 Položaj čestica prilikom zbijanja tla uz postepenu promjenu vlažnosti i promjena svojstava tla pri određenim gustoćama za različite vlažnosti

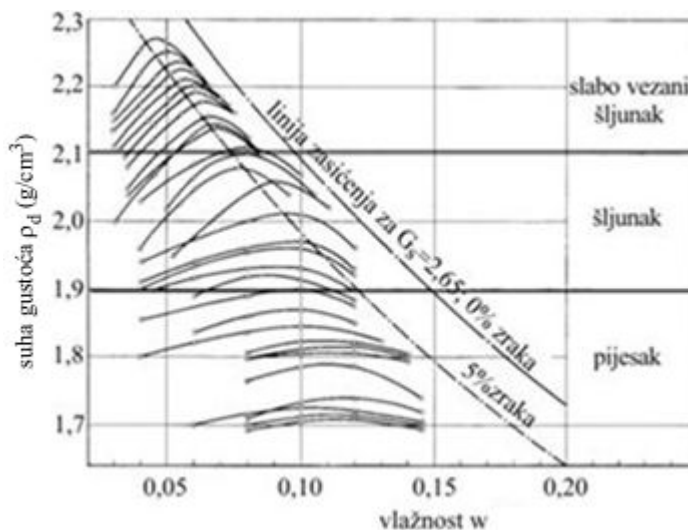
Raspored čestica ima određene posljedice na razna svojstva tla. Ima utjecaj na hidrotehničke nasipe, koji će kasnije doći pod utjecaj vode. U nezasićenom stanju, pri vlažnosti ispod optimalne ( $w < w_{opt}$ ), dio čvrstoće skeleta nastaje uslijed kapilarnih sila. Čestice su u nepravilnom rasporedu. Povećanjem vlažnosti (do zasićenja) ova čvrstoća opada. To se događa prilikom prvog dodira nasipa s vodom. Rezultat je nagli pad čvrstoće skeleta i veliko slijeganje uslijed vlastite težine. Posljedice su znatna diferencijalna slijeganja i otvaranje pukotina u području jezgre (Narita, 2000.). Slijeganje uslijed vlaženja može se jednostavno provjeriti ispitivanjem u edometru primjeraka zbijenih po Proctoru, iste suhe gustoće i naknadno zasićenih. Ovo pokazuje da kod sitnozrnih tala nije svejedno da li je vlažnost pri zbijanju manja ili veća od optimalne. Nastoji se da bude što bliže optimalnoj. Ovisnost čvrstoće na smicanje primjeraka iste gustoće, a različite vlažnosti, prikazana je na slici 3.10 desno.

Odstupanje od optimalne vlažnosti i pripadne suhe gustoće, koje se naziva **stupanj zbijenosti**, propisuje se kao mjera pogodnosti tla pri ugradnji, a računa se kao:

$$S_z [\%] = \frac{\rho_d}{\rho_{d_{\max}}} \times 100 \quad (3.1)$$

gdje je  $\rho_d$  suha gustoća ugrađenog tla, a  $\rho_{d_{\max}}$  najveća suha gustoća dobivena pokusom po Proctoru.

U nastavku je prikazan niz primjera rezultata zbijanja po Proctoru za krupnozrna (slika 3.11) i sitnozrna (slika 3.13) tla (Striegler, Werner, 1969.).



Slika 3.11 Odnos suhe gustoće i vlažnosti za razne vrste tla zbijene istom energijom zbijanja po standardnom Proctoru

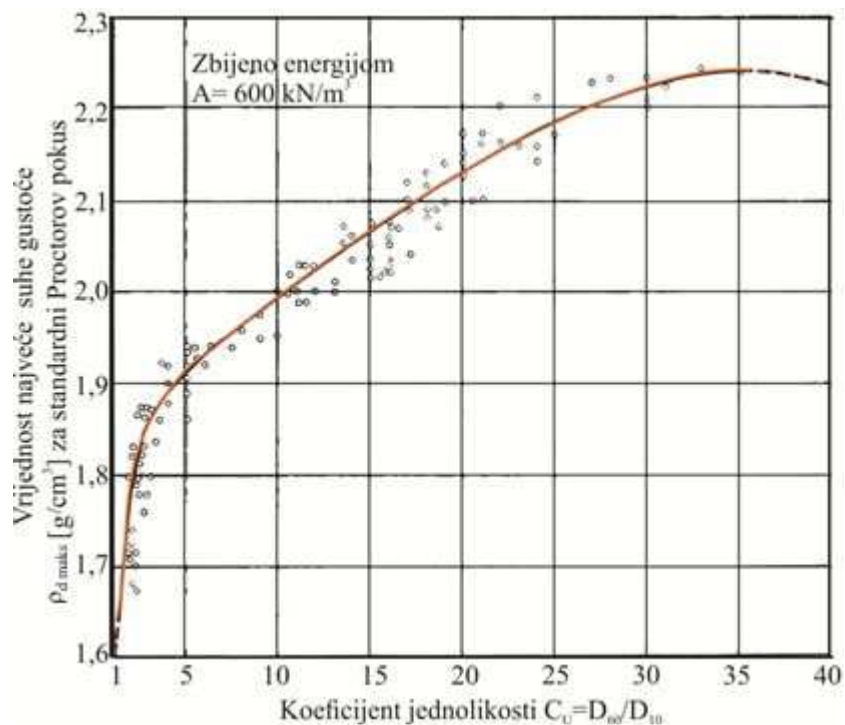
Treba obratiti pažnju na rezultate sa slike 3.11 za pijeske. Oni su u suglasju s rezultatima sa slike 3.2 iako im nedostaju vrijednosti za suho tlo pa se ne mogu u potpunosti usporediti. Uočljivo je da su puno manje podložni promjeni gustoće prilikom zbijanja nego na pr. slabo vezani šljunci na koje utječe postotak sitne frakcije.

Na slici 3.11 prikazana je i krivulja potpunog zasićenja. Ona povezuje suhu gustoću,  $\rho_d$ , s količinom vlage,  $w$  [%], kada su sve pore ispunjene vodom ( $S_r=100\%$ ). Točke krivulje se mogu izračunati za poznatu vrijednost specifične težine čvrstih čestica  $G_s$ .

$$\rho_d = \frac{G_s}{1 + \frac{w}{S_r} G_s} * \rho_v \quad (3.2)$$

Za poznatu specifičnu težinu čvrstih čestica,  $G_s$ , mogu se izračunati suhe gustoće,  $\rho_d$  i ucrtati krivulje za po volji odabrane vlažnosti,  $w$ , i odabrani stupanj zasićenja,  $S_r$ . Na slici 3.11 prikazane su krivulje za  $S_r=95\%$  i  $S_r=100\%$  i zasićenja.

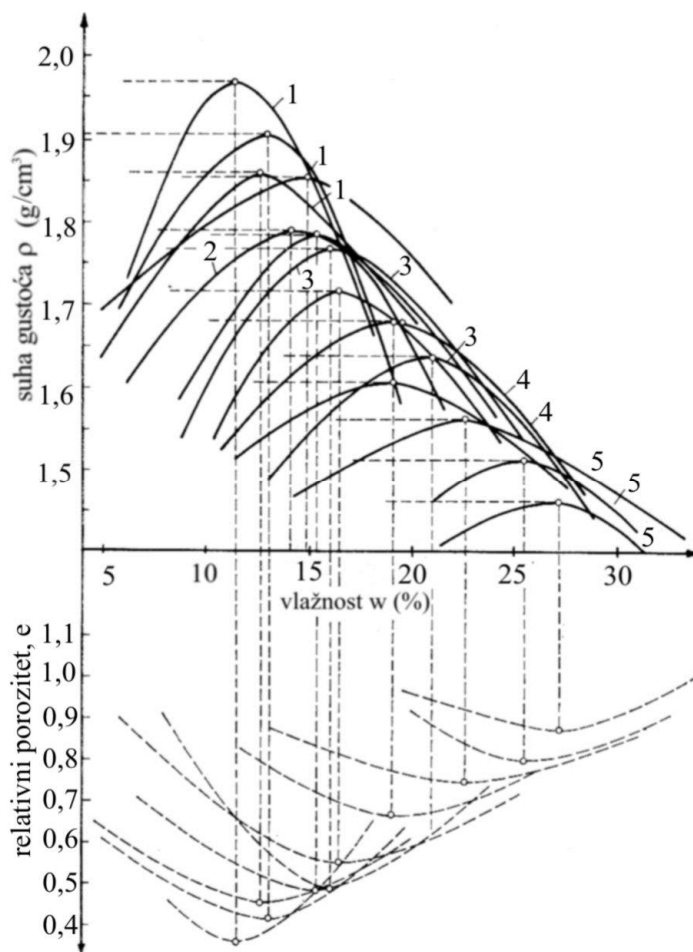
Za grupu tala sa slike 3.11 može se pokazati kako najveća suha gustoća ( $\rho_{d \text{ maks.}}$ ) dobivena pokusom po standardnom Proctoru, ovisi o koeficijentu jednolikosti  $C_U$  (sl. 3.12).



Slika 3.12 Ovisnost najveće suhe gustoće o koeficijentu jednolikosti za pijeske i šljunke različite ujednačenosti granulometrijskog sastava

Na slici 3.13 prikazan je niz krivulja nastalih kao rezultat Proctorovog pokusa za sitnozrna tla. Rezultate Proctorovog pokusa moguće je prikazati i u odnosu vlažnost,  $w$ , i relativni porozitet,  $e$ , kako je to vidljivo na slici 3.13. Pri optimalnoj vlažnosti,  $w_0$ , javlja se minimalni porozitet za određenu energiju zbijanja. Uočljivo je da, što je tlo plastičnije to mu je optimalna vlažnost veća, a moguća postignuta suha gustoća manja. Razlog je tome razvoj pornog tlaka prilikom zbijanja. Povećani porni tlak zbog male propusnosti tla, ne dozvoljava preraspodjelu čestica u gušću strukturu. To tlo ostaje relativno velikog poroziteta i nakon zbijanja i trpi dugotrajno slijeganje uslijed vlastite težine. Stoga se čisto, visokoplastično tlo rijetko ugrađuje u nasute građevine. Mala vodopropusnost može se postići i s miješanim tlima, uz veću zbijenost i znatno manje naknadno slijeganje.





Slika 3.13 Rezultati Proctorovog pokusa za sitnozrna tla, mješavine pijeska, praha i gline; 1-glečerska; 2-nastala rastrošbom; 3-lesna; 4-padinska; 5-iz naplavina (Striegler, Werner, 1969.)

Pri zbijanju sitnozrnih tala, bitnu ulogu igra vodopropusnost. Što je tlo slabije propusno, to teže ispušta vodu iz pora. Prilikom zbijanja se u pornoj vodi povećava porni tlak, ali je vrijeme u kojem se zbijanje odvija nedovoljno za njegovu disipaciju, tako da i dalje porozitet ostaje velik.

Najteže je zbiti visokoplastične gline i prahove jer su oni najmanje propusni. Stoga ove vrste tala nisu preporučljive za ugradnju u nasipe. Nakon sušenja su podložni pojavi neželjenih pukotina i većim slijeganjima uslijed vlastite težine. Geotehnički parametri, koji ovise o efektivnim naprezanjima, su u takvim tlima najslabiji u trenutku neposredno nakon ugradnje. To je jedan od razloga zbog kojih ta tla nije preporučljivo ugrađivati u nasipe.

### **3.3 POSTUPCI ZBIJANJA PRI UGRADNJI NASIPA**

#### 3.3.1 Općenito

Postoje razni načini izrade nasipa. Na raspolaganju su dvije mogućnosti izvedbe: nasipavanje bez zbijanja i nasipavanje uz kontrolirano zbijanje. Koji će način biti odabran ovisi o namjeni nasipa i stvarnim mogućnostima na terenu.

#### 3.3.2 Nasipanje bez zbijanja

Neke nasipe, kao pri nasipanju u vodi, nije moguće kontrolirano ugrađivati. Postoje razni načini nasipavanja u vodu. Potrebno ih je izvesti na način da se postigne određena zbijenost. U tu se svrhu mogu koristiti razni postupci poboljšanja tla kojima se ubrzava konsolidacija i/ili povećava gustoća (vidi Roje-Bonacci, 2012.). Primjer nasipavanja u vodu bez mogućnosti izravnog zbijanja su umjetni otoci u Dubai-u, prikazani na slici 3.14.



Slika 3.14 Umjetni otoci (otoci Palmi) nastali nasipavanjem u more.



Slika 3.15 Naselje na umjetnom otoku, Palm Island, Dubai

Ako se nasipi, izvedeni u vodi, žele koristiti kao građevinsko zemljište (slika 3.15) u bilo koje svrhe, ne smije ih se ostaviti u rahlom stanju, kakvi ostaju nakon nasipavanja. Tada su izrazito podložni likvefakciji, vrlo su stišljivi i kao takvi nepogodni za korištenje. U takvim slučajevima treba primijeniti neku od metoda poboljšanja podtemeljnog tla.

### 3.3.3 Nasipavanje sa zbijanjem

Ovo je nasipavanje temelj izrade nasutih građevina na površini terena. Nasipavanje se vrši u slojevima uz zbijanje svakog pojedinog sloja. Time se nastoji postići ona gustoća ugrađenog tla,  $\rho$ , koja je predviđena projektom, temeljem rezultata dobivenih u laboratoriju, Proctorovim pokusom. To je potrebno postići stoga što su svi ostali parametri tla potrebni za geotehničke proračune, a koji su korišteni prilikom dimenzioniranja nasute građevine, dobiveni na način da su prethodno zbijeni po Proctoru (standardnom ili modificiranom) uz optimalnu vlažnost, a zatim su iz takvih umjetnih uzoraka pripremljeni primjerci za ispitivanja svih fizičko-mehaničkih svojstava tla potrebnih za proračune. Dade se zaključiti da je najveća suha gustoća dobivena pokusom zbijanja u laboratoriju čimbenik, koji osigurava kakvoću ugrađenog tla nakon zbijanja.

Sredstva, kojima će se zbijati tlo na terenu, ovise o vrsti tla koje se zbija. To su razne vrste valjaka, vibrovaljaka, valjaka s gumenim kotačima i ježeva za široke plohe. Strojeve za zbijanje treba prilagoditi vrsti tla, kako je to prikazano na slici 3.16.



Slika 3.16 Prilagodba strojeva za zbijanje vrsti tla (Schroeder, 1975).

Ježevi i gumeni valjci koriste se za sitnozrna, slabo propusna tla. Za propusna tla kao što su pijesci i šljunci, koriste se gumeni valjci i vibrovaljci. Uski prostori uz

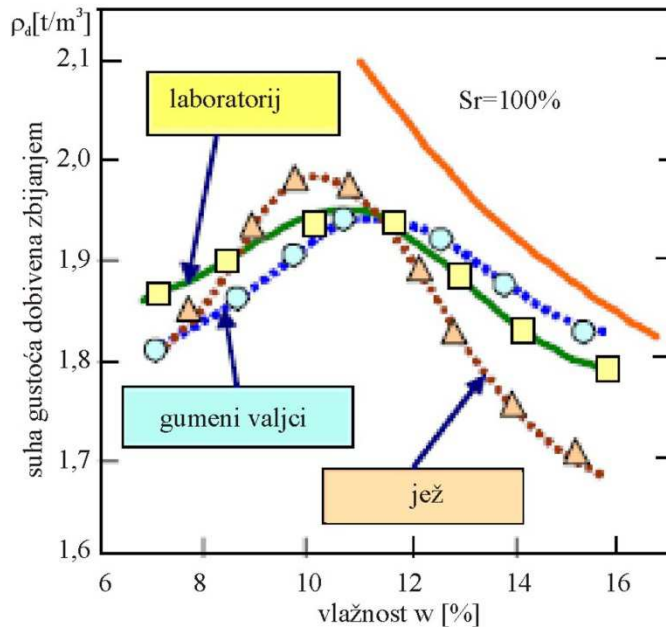
betonske dijelove građevine zbijaju se manjim strojevima, žabama, vibropločama ili ručnim nabijačima.

U tabeli 3.1 dani su uobičajeni kriteriji za zbijanje i zbijenost nasipa

Tabela 3.1 Uobičajeni kriteriji zbijenosti nasipa (Szavits, 2007.)

Vrsta tla		Krupnozrna tla	Sitnozrna tla
stupanj zbijenosti $S_z$ [%] prema modificiranom Proctorovom pokusu	granično moguće zbijanje	98 % ( $I_D \sim 90$ %)	96 %-98 %
	granično moguće zbijanje bez poteškoća	95 %	95 %
	nasipanje suho, bez zbijanja	88 %-91 %	—
	nasipanje vlažno, bez zbijanja	80 %-85 %	—
	zadovoljava većinu nasipa (osim brana koje zahtijevaju veće vrijednosti)	90 %-92 %	93 %
	za sprječavanje likvefakcije	95 % ( $I_D \sim 70$ %-75 %)	—
dopustivi raspon vlažnosti oko optimalne		—	$\pm 2$ % (< $\pm 1,5$ % teško postići)
kontrola zbijenosti		suha gustoća	suha gustoća
utjecaj vlažnosti na mogućnost zbijanja		mali	veliki
utjecaj strukture zbijenog tla na čvrstoću, krutost i vodopropusnost		mali	veliki
strojno zbijanje		glatki vibro-valjci	valjci sa stopama i ježevi
ručno zbijanje		vibro-ploče	nabijači
tipične visine sloja u rahlom stanju (mora se odrediti pokusnom dionicom)	uobičajeno	15-30 cm	15-20 cm
	jako zbijanje teškim strojevima	do 60 cm, do 150 cm za kamen	do 30 cm
	srednje jako zbijanje	—	do 45 cm
	ručno zbijanje	15 cm	15 cm
	dozvoljeni najveći promjer zrna u sloju	1/3 visine sloja	

Rezultati zbijanja se uspoređuju s laboratorijskim rezultatima Proctorovog pokusa, kako je to prikazano na slici 3.17. Za odabir optimalne mehanizacije izvodi se pokusna dionica poznata kao „probno polje“ (Roje-Bonacci, 2012.).



Slika 3.17 Usporedba rezultata zbijanja u laboratoriju i na terenu ježem i gumenim valjcima za istu vrstu tla (Narita, 2000.)

Da bi se osigurala propisana zbijenost (gustoća) tla, potrebno je provoditi stalnu provjeru kakvoće ugrađenog tla kroz tekuća ispitivanja, propisana brojem i učestalošću, u izvedbenom projektu i predviđena ugovorom o izvođenju.



Slika 3.18 Kontrolirana ugradnja tla u nasipe sa zbijanjem (Istočna Slavonija)

Prilikom zbijanja glatkim i gumenim valjcima nastaje glatka površina na vrhu sloja koji se zbija (slika 3.19). Ovo je potencijalno moguća ploha razdvajanja među slojevima koja nije poželjna. Može biti prioritetni put za vodu i potencijalna klizna ploha. O ovome treba voditi računa prilikom zbijanja na terenu.



Slika 3.19 Vibroploča, valjak s gumenim kotačima i glatki valjak

U OTU (2001.) i OTU (2010.) dane su tabele s uvjetima zbijenosti koje moraju imati tla ugrađena u nasipe.

### 3.4 INDEKS GUSTOĆE ( $I_D$ )

#### 3.4.1 Općenito

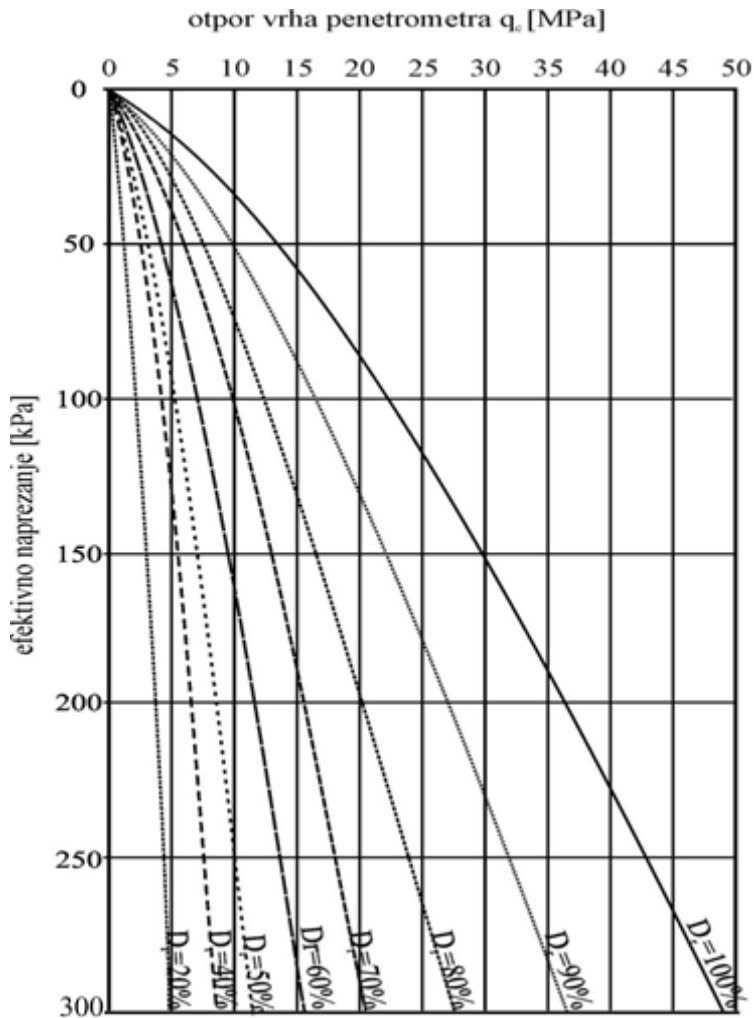
Indeks gustoće,  $I_D$ , koristi se u američkoj literaturi, a prihvaćen je i u hrvatskom prijevodu EC7. Odgovara pojmu „relativne gustoće  $D_r$ “, koji se do nedavno koristio u geotehničkoj literaturi ne samo na hrvatskom jeziku. U novijoj literaturi i propisima, pojam „relativne gustoće“ odnosi se na pojam gustoće čvrstih čestica i kao takav je određen. Stoga je bilo nužno uvesti novi pojam.

Indeks gustoće,  $I_D$ , je vrlo bitan pojam za ocjenu zbijenosti krupnozrnog tla, naročito pijeska. Govori o odnosu mogućeg najmanjeg i najvećeg poroziteta naspram prirodnom porozitetu pijeska. Može se kretati od  $I_D=100$  %, kada označava veoma dobro zbijeno tlo, pa do  $I_D=0$  %, kada označava potpuno rahlo tlo bez čvrstoće.

Ovaj pojam spominje Burmister (1938.) kao pojam koji opisuje „svojstvo ponašanja tla, pa je dosljedna i praktički uspješna veza kojom se osigurava alat za sporazumijevanje među inženjerima“. Isti pojam spominje i Terzaghi u svom radu iz (1925.). Holtz (1973.) se poziva na rad Burmistera iz 1948. godine i opisuje „relativnu gustoću“ kao prikladno sredstvo za određivanje zbijenosti, odnosno

rahlosti, pijesaka i pjeskovito–šljunkovitih mješavina, pomoću kojeg se mogu uspoređivati bitna svojstva tla kao što su smicanje i konsolidacija.

Najpoznatija primjena indeksa gustoće,  $I_D$ , za nekoherentna tla je usporedba s rezultatima statičke penetracije, prikazana na slici 3.20.



Slika 3.20 Veza relative zbijenosti  $D_r$  (indeksa gustoće  $I_D$ ) i otpora vrha statičkog penetrometra  $q_c$  (Gibbs i Holtz, 1957.)

Razmatranje ovog pojma kao svojstva za standardizirani opis nekoherentnog tla započelo je od strane ASTM-a 1954. godine. Godine 1964. objavljen je prijedlog standarda. Službeno je 1969. godine ASTM-a izdao standard za ovaj pojam, pod nazivom „relativna gustoća – relative density“. Godine 2006. ASTM D4254-00 standard je ponovno odobren za isto svojstvo, ali sada pod imenom „**indeks gustoće**“.

Valja napomenuti da indeks gustoće nije prirodno svojstvo tla već je izvedenica triju svojstava:

1.  $e_{\text{maks}}$  - najveći porozitet koji postiže pojedino nekoherentno tlo pri najmanjoj gustoći (dobivenoj prema laboratorijski propisanom postupku) odnosno jediničnoj težini;
2.  $e_{\text{min}}$  - najmanji porozitet koji postiže pojedino nekoherentno tlo pri najvećoj gustoći (dobivenoj prema laboratorijski propisanom postupku) odnosno jediničnoj težini;
3.  $e$  ili  $e_0$  - porozitet određen in situ za sloj tla ili nasipa.

Izraz je dan jednadžbom 2.23 odnosno 3.3,

$$I_D = \left( \frac{e_{\text{maks}} - e}{e_{\text{maks}} - e_{\text{min}}} \right) \times 100, \quad (3.3)$$

a može se izraziti i preko suhe gustoće  $\rho_d$  ili suhe jedinične težine  $\gamma_d$  kao:

$$I_D = \frac{\rho_{d \text{ maks}} (\rho_d - \rho_{d \text{ min}})}{\rho_d (\rho_{d \text{ maks}} - \rho_{d \text{ min}})} \times 100 \quad (3.4)$$

ili kao:

$$I_D = \frac{\gamma_{d \text{ maks}} (\gamma_d - \gamma_{d \text{ min}})}{\gamma_d (\gamma_{d \text{ maks}} - \gamma_{d \text{ min}})} \times 100 \quad (3.5)$$

### 3.4.2 Kritički osvrt na indeks gustoće $I_D$

Prve sumnje u vrijednost indeksa gustoće,  $I_D$ , izrazio je Bowles (1979.). On kaže: „Mnoga istraživanja od kojih su najnovija objavljena u ASTM (1973.), pokazuju da  $D_r$  (odnosi se na  $I_D$ ) nije jako pouzdano svojstvo tla. Moguće je da dva pijeska, s identičnom vrijednošću koeficijenta pora,  $e$  i  $D_r$ , imaju bitno različita inženjerska svojstva, ovisno o obliku zrna, cementaciji, rubnim uvjetima i uslojenosti, koje proizlaze iz uvjeta taloženja i stanju opterećenja kroz povijest. Kako  $D_r$  ovisi o laboratorijskom određivanju  $\gamma_{\text{maks}}$  i  $\gamma_{\text{min}}$  odnosno odgovarajućim koeficijentima pora, to se pri tom mogu javiti mnoge pogreške, ako se određivanja ovih vrijednosti ne provedu s najvećom pažnjom.“ (Hamidi i dr. 2013.)

Isti autor u svom radu iz 1996. navodi sljedeće: „Prema mišljenju autora (Bowles, 1996.), pokus kojim se dobiva vrijednost  $D_r$  nema veliki značaj, jer je vrlo teško postići najveću i najmanju vrijednost jedinične težine unutar raspona od oko  $\pm 0,5 \text{ kN/m}^3$ .“



Slično mišljenje izrazio je Mayne (2006.). Prema njemu je  $D_r$  ( $I_D$ ) parametar koji slabo opisuje svojstva tla jer je razlika ( $e_{maks}-e_{min}$ ), u prosjeku 0,42, za te pijeske (o kojima autor govori), a raspon tog malog  $\Delta e$  varira od 0 do 100 %.“

ASTM je 1972. godine 75. godišnji skup održao pod naslovom „Vrednovanje relativne gustoće i njene uloge u geotehničkim projektima koji uključuju nekoherentna tla“. Urednici su Selig i Ladd (1972.). U svom radu prikazuju mogućnosti pogrešaka koje nastaju pri određivanju indeksa gustoće (str. 487-504). Moguće pogreške dijele na slučajne pogreške (error), sustavne pogreške i osobne greške (mistake).

Struktura samog izraza za izračunavanje indeksa gustoće,  $I_D$ , je takva da je konačna vrijednost vrlo osjetljiva već na vrlo male promjene vrijednosti sastavnica (konkretno suhe jedinične težine  $\gamma_d$ ) izmjerenih u laboratoriju. U literaturi se može naći utjecaj slučajnih pogrešaka na veličinu vrijednosti indeksa gustoće (Yoshimi i Tohno, 1973). U istom radu autori pokazuju kako se promjenom broja ispitanih uzoraka koji se statistički obrađuju, mijenja vrijednost indeksa gustoće  $I_D$ . Utjecaj sustavne greške je neupitan jer daje u potpunosti pogrešan rezultat.

Osim ovih poteškoća vezanih uz ispitivanja u laboratoriju, javljaju se i one terenske. U nekoherentnim tlima teško je i skupo dobiti neporemećeni uzorak s veće dubine, a što je uvjet za određivanje suhe prostorne težine u prirodnom stanju. Isti je slučaj sa vađenjem uzoraka ispod razine podzemne vode. Još je skuplje izvesti dovoljan broj terenskih, ponovljenih pokusa, potrebnih za statističku obradu kojom se odstranjuju slučajne pogreške.

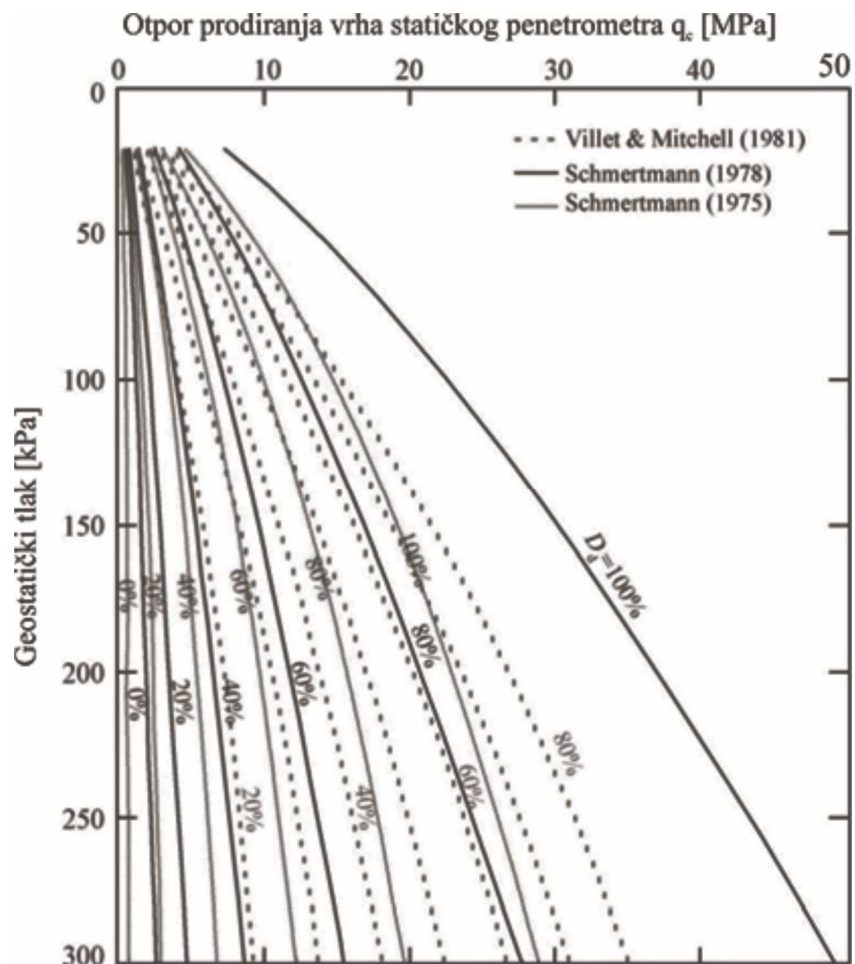
Drugo pitanje koje se postavlja vezano za indeks gustoće  $I_D$  je: Hoće li dva tla koja imaju isti indeks gustoće  $I_D$ , imati i ista fizikalna svojstva i ponašati se na isti način?

Može se pokazati da na fizičko-mehanička svojstva i ponašanje tla bitno utječu:

- veličina i oblik zrna;
- krupnoća i oblik granulometrijske krivulje;
- sadržaj sitnih čestica;
- učinci vodoravnog i uspravnog naprezanja;
- mineraloški sastav;
- stišljivost i drobljivost;
- cementacija;
- predkonsolidacija;
- starost.

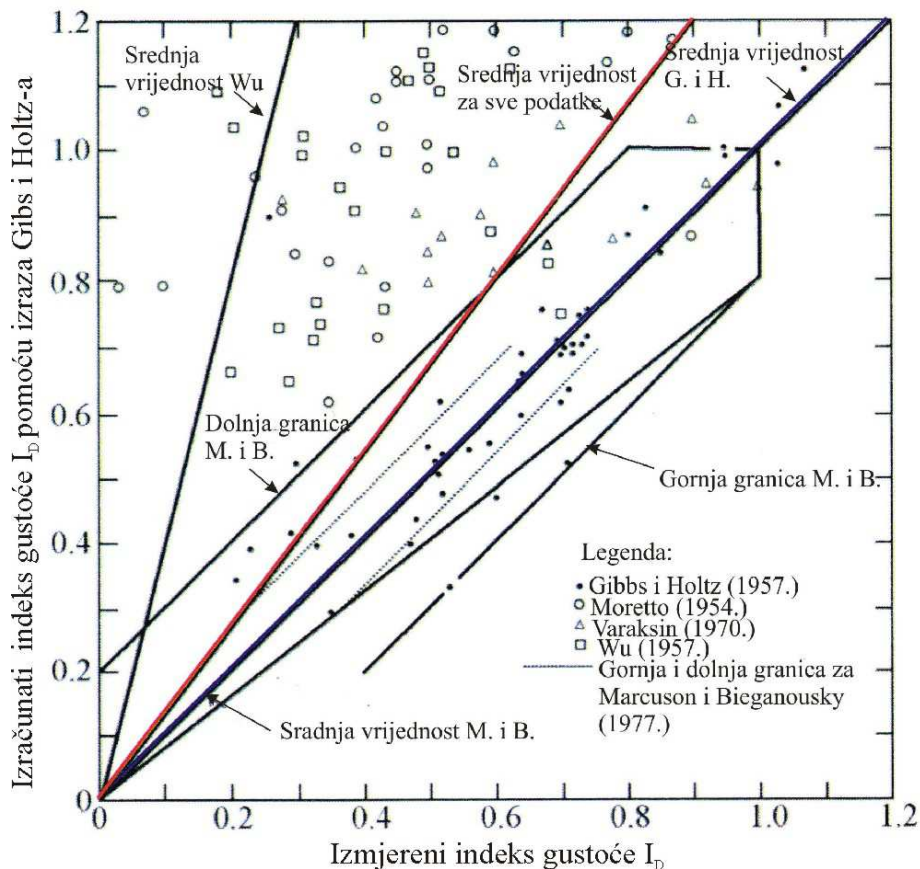
Stoga je vrlo malo vjerojatno da bi odgovor na postavljeno pitanje bio DA.

Nepouzdanost indeksa zbijenosti  $I_D$  najbolje opisuju dva dijagrama (slika 3.21 i 3.22), koji su rezultat istraživanja raznih autora kroz dugi niz godina. Prvi uključuje podatke sa slike 3.20 koja je opće priznata u praktičnoj upotrebi (Villet i Mitchell, 1981.).



Slika 3.21 Veza otpora prodiranja vrha statičkog penetrometra i indeksa gustoće prema tri različita autora

Drugi dijagram (slika 3.22) pokazuje vezu između izmjerenog indeksa gustoće,  $I_D$ , i proračunatog pomoću izraza od strane više autora (Haldar i Tang, 1979.).



Slika 3.22 Usporedba izmjenog i izračunatog indeksa gustoće  $I_D$ , prema raznim autorima.

Coduto (2001.) daje izraz za vezu indeksa gustoće  $I_D$  ( $D_r$ ) i otpora prodiranja vrha statičkog penetrometra (jed. 3.6) za tla različite stišljivosti. Koristi modificirani izraz od Kulhawy i Mayne (1990.) kao funkciju faktora stišljivosti  $Q_c$ .

$$D_r = \sqrt{\left(\frac{q_c}{315Q_cOCR^{0,18}}\right) \sqrt{\frac{100kPa}{\sigma'_z}}} \times 100\% \quad (3.6)$$

Pri čemu je:

$q_c$  = otpor prodiranja vrha statičkog penetrometra [ $kg/cm^2$ ];

$Q_c$  = faktor stišljivosti;

OCR = koeficijent prekonsolidacije

$\sigma'_z$  = geostatički, efektivni tlak [kPa].

Za faktor stišljivosti  $Q_c$  daje sljedeće podatke:

Tabela 3.2 Vrijednosti faktora stišljivosti  $Q_c$  za proračun veze indeksa gustoće i otpora prodiranja šiljka statičkog penetrometra prema jednadžbi 3.6

Faktor stišljivosti, $Q_c$	Vrsta tla*
0,91	vrlo stišljiv pijesak
1,00	srednje stišljiv pijesak
1,09	slabo stišljiv pijesak
*pod vrlo stišljiv se podrazumijeva pijesak s dosta sitnih čestica ili čestica tinjca, dok se kvarcni pijesak može svrstati u slabo stišljive pijeske	

Koeficijent prekonsolidacije predstavlja omjer naprezanja  $\sigma'_c$  očitano iz krivulje edometarskog dijagrama u točki loma edometarske krivulje i naprezanja  $\sigma'_{z0}$ , efektivnog naprezanja na promatranoj dubini, z.

$$OCR = \frac{\sigma'_c}{\sigma'_{z0}} \quad (3.7)$$

Razina prekonsolidacije  $\sigma'_m$  može se odrediti iz izraza:

$$\sigma'_m = \sigma'_c - \sigma'_{z0} \quad (3.8)$$

prema kojoj se može odrediti razina prekonsolidacije određene vrste tla prikazane u tabeli 3.3 (Coduto, 2001).

Dva navedena primjera pokazuju s koliko se pažnje treba odnositi prema upotrebi indeksa gustoće  $I_D$  u geotehničkim proračunima (Hamidi, Nikraz, Varaksin 2013.).

Tabela 3.3 Tipični rasponi razina prekonsolidacije

Razina prekonsolidacije $\sigma'_m$ [kPa]	Stanje konsolidacijske razine
0	normalo konsolidiran
0-100	blago prekonsolidirano
100-400	lagano prekonsolidirano
>400	jako prekonsolidirano

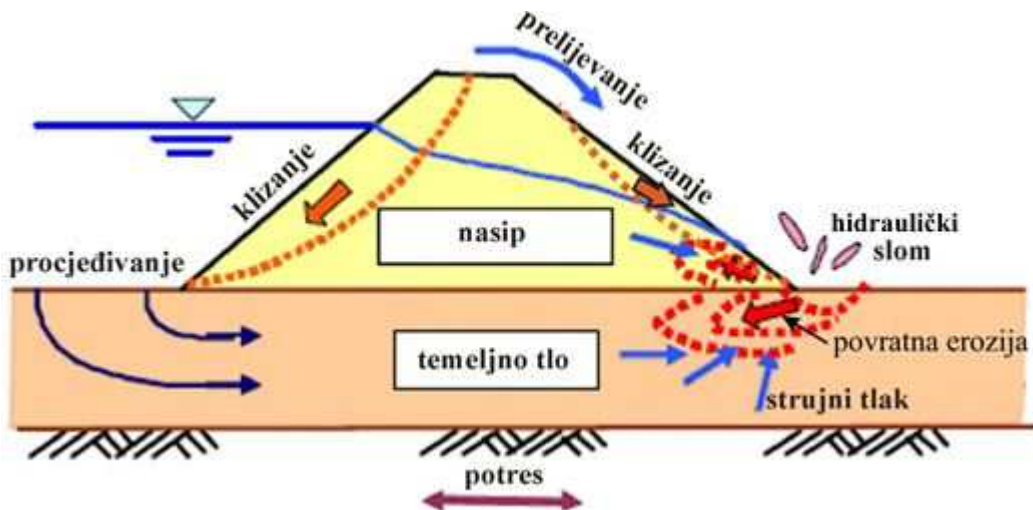
I ovo razmatranje ukazuje da veza između prodiranja šiljka statičkog penetrometra i indeksa zbijenosti nije tako jednostavna kako ju prikazuje dijagram sa slike 3.20.

## 4 UTJECAJ ZBIJENOSTI NA FIZIČKO-MEHANIČKA SVOJSTVA TLA

### 4.1 OPĆENITO

U projektiranju nasipa potrebno je izvršiti nekoliko proračuna nužnih za sigurnost i stabilnost ovih građevina. Pri tom bitnu ulogu igraju fizičko-mehanička svojstva gradiva, koje je ugrađeno u nasip. Ona se mogu programirati tako da se propiše potrebna zbijenost. Tla s programirano potrebnom zbijenošću ispituju se u laboratoriju. Rezultat su projektna fizičko-mehanička svojstva tla, koja ulaze u proračune.

Na slici 4.1 prikazana su moguća oštećenja hidrotehničkog nasipa za koje je potrebno projektnim rješenjima pokazati da se s velikom vjerojatnošću neće dogoditi.

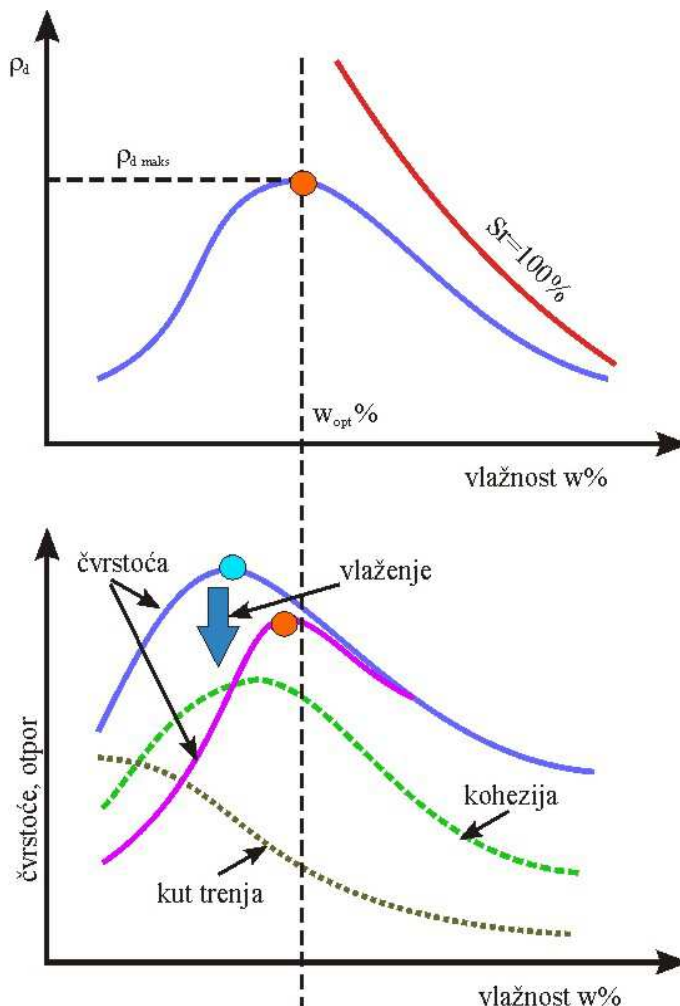


Slika 4.1 Štetne pojave na nasipu i u temeljnom tlu ispod nasipa koje je potrebno obraditi u projektnoj dokumentaciji

Da bi se projektom mogle obuhvatiti pojave sa slike 4.1 potrebno je, za korištenje Mohr-Coulombovog modela, poznavati čvrstoću na smicanje ugrađenog tla ( $\tau$ ), koja ovisi o parametrima čvrstoće na smicanje,  $c$  i  $\phi$ , i koeficijent vodopropusnosti,  $k$ . Kada se za proračun koriste numeričke metode, potrebno je odabrati model tla koji će dati podatke o deformacijskim svojstvima tla kao što su moduli elastičnosti,  $E$ , edometarski modul stižljivosti,  $E_{\text{oed}}$ , i Poissonov koeficijent,  $\nu$ , (Roje-Bonacci i dr.

2007.). Ta su svojstva tla također ovisna o zbijenosti. Iste parametre potrebno je poznavati i za podlogu – prirodno tlo, što ovdje nije predmet razmatranja.

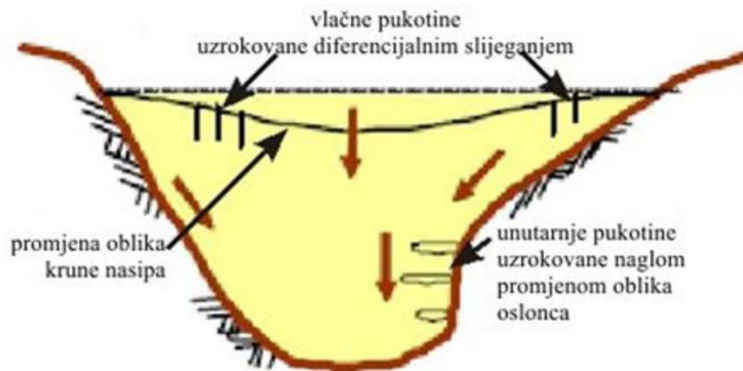
Općenito je utvrđeno da zbijenost utječe na promjenu čvrstoće i otpore gradiva ugrađenog u nasute građevine zbijanjem, kako je prikazano na slici 4.2. Pri tom je tlo manje vlažnosti moguće bolje zbiti, ali uz veću upotrijebljenu energiju zbijanja. Postavlja se i pitanje ekonomičnosti. To znači da je potrebno učiniti optimalizaciju uzimajući u obzir kakvoću, sigurnost i troškove.



Slika 4.2 Učinak zbijanja istovrsnog tla pri različitim vlažnostima, na čvrstoću i otpore ugrađenog tla

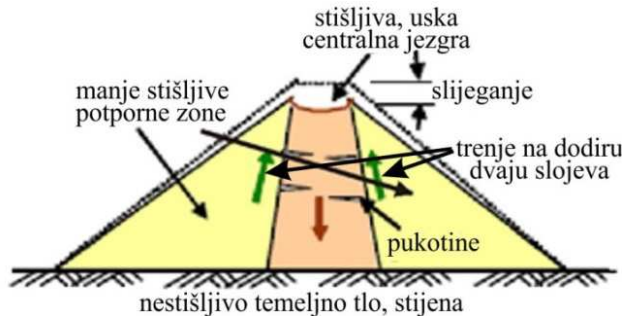
Osim navedenih pojava sa slike 4.1, kod visokih nasipa treba voditi računa o naknadnom slijeganju uslijed vlastite težine. Ono je različito ovisno o visini nasipa, a najizraženije je kod velikih, nasutih brana. Kod brana su visine dovoljno velike da

slijeganja budu značajna, ali su i razlike u visini u središtu brane i na bokovima tolike da prouzrokuju značajna diferencijalna slijeganja (slika 4.3). Ova pak značajna diferencijalna slijeganja mijenjaju stanje naprezanja u masi ugrađenog tla, što izaziva pojavu vlačnih pukotina na kruni, ali i u tijelu nasipa.



Slika 4.3 Posljedice slijeganja visokog nasipa

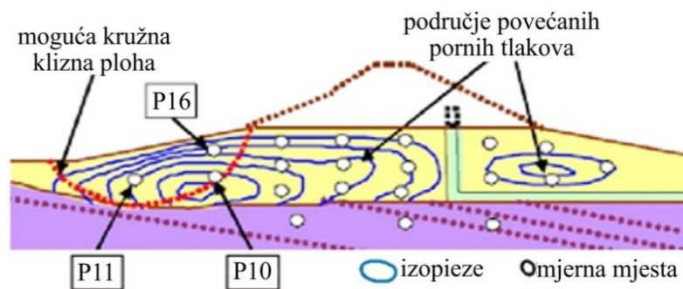
Kod nasipa izvedenih od građiva različitih svojstava, kao što su zonirane brane, dolazi do različitog slijeganja jače stišljivih područja u odnosu na ona manje stišljiva (slika 4.4).



Slika 4.4 Posljedice slijeganja zoniranog nasipa uslijed različitih svojstava stišljivosti pojedinog građiva

Na naknadno slijeganje ima utjecaj disipacija pornih tlakova u vremenu, a koja nastaje prilikom zbijanja dijelova nasipa izvedenih od sitnozrnih građiva. Mala propusnost sitnozrnog tla ne dozvoljava dovoljno brzu promjenu pornih tlakova u središnjim dijelovima nasipa, koji stalno dolaze pod sve veći tlak, kako nasip raste. Najveći porni tlakovi u središnjem dijelu nasipa su u trenutku završetka radova. To je trenutak kad je efektivna vrijednost čvrstoće na smicanje najmanja, a o njoj upravo ovisi stabilnost pokosa nasipa. Slično se događa i tijekom građenja nasute građevine od sitnozrnog tla. Pri zbijanju rastu porni tlakovi u tlu male propusnost i smanjuju

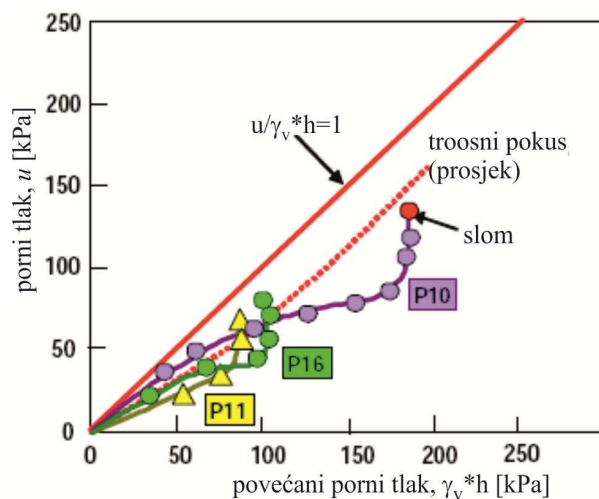
efektivne vrijednosti geotehničkih svojstava tla, što može utjecati na pojavu klizanja već u tijeku građenja. Na slici 4.5 prikazana su japanska iskustva (Narita, 2000.).



Slika 4.5 Izopieze u tijelu nasipa u izgradnji (Narita 2000.)

Pijezometar P10 nalazi se na potencijalnoj kliznoj plohi duž koje se može očekivati slom zbog smanjenja efektivne čvrstoće na smicanje.

Slika 4.6 prikazuje odnos hidrostatskog i povećanog pornog tlaka tijekom izgradnje nasipa, izmjereno u točkama 10, 11 i 16, sa slike 4.5.



Slika 4.6 Izmjerene vrijednosti povećanih pornih tlakova tijekom gradnje nasipa

Za dio proračuna bitno je poznavati koeficijent filtracije (Darči-ev koeficijent). Ovaj je podatak naročito važan za hidrotehničke nasipe iz niza razloga.

Gušća tla imaju bolja fizičko-mehanička svojstva. Gušća, krupnozrna tla imaju više dodirnih točaka i ploha na kojima se ostvaruje trenje i uklještenje. Sitnozrna tla u zbijenijoj strukturi imaju manje porozitete i veći utjecaj elektrokemijskih sila (vidi (Mitchel, Soga, 2005.).



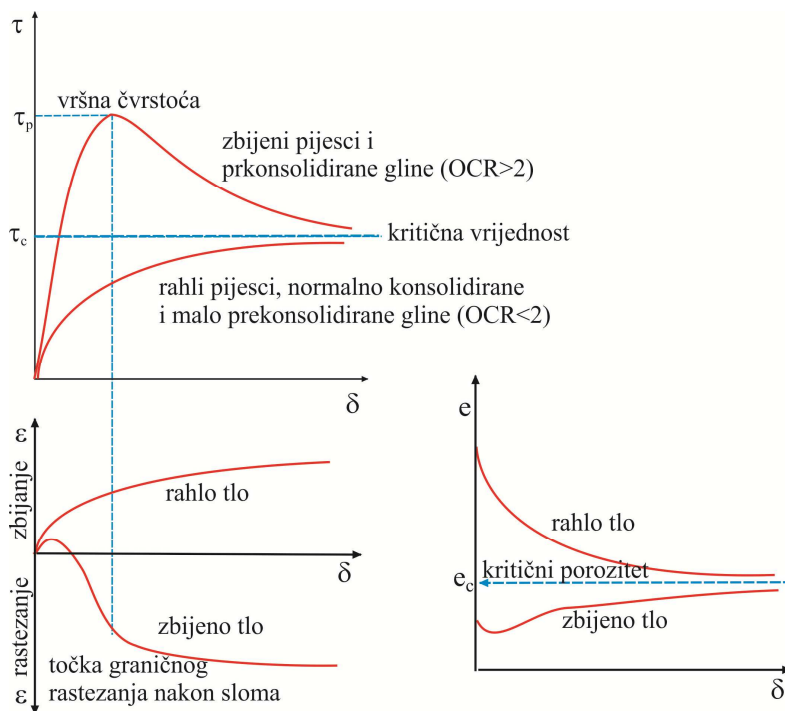
#### 4.1.1 Čvrstoća na smicanje

Ovo je svojstvo bitno pri projektiranju nekoliko stanja nasipa. To su:

- stabilnost uzvodnog i nizvodnog pokosa neposredno po završetku gradnje;
- stabilnost uzvodnog pokosa pri najvišem projektiranom vodostaju;
- stabilnost uzvodnog pokosa pri naglom opadanju vodostaja;
- stabilnost uzvodnog i nizvodnog pokosa pri potresu za najviši vodostaj i vodostaj na polovici visine nasipa.

Za sve ove proračune potrebno je poznavati čvrstoću na smicanje ugrađenog tla. Proračuni se provode za stanje totalnih naprezanja za prva dva slučaja i za stanje efektivnih naprezanja za preostala dva slučaja.

Na slici 4.7 pokazani su rezultati smicanja rahlog i zbijenog tla. Pri tom su uzeti u obzir zbijeni pijesci i prekonsolidirane gline kao predstavnici zbijenog tla, a rahli pijesci i normalno konsolidirane i malo prekonsolidirane gline kao predstavnici rahlog tla.

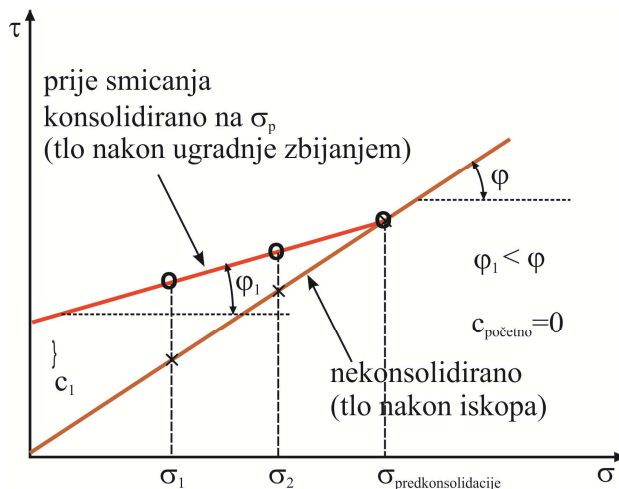


Slika 4.7 Ponašanje zbijenog i rahlog tla prilikom smicanja s prikazom promjene zapremine i poroziteta

Tlo, kojim se gradi nasip, izgubilo je u potpunosti svoju prirodnu strukturu. Strukturu nasutom građivu treba vratiti pomoću zbijanja. Kako zbijanje utječe na

promjenu čvrstoće na smicanje, može se pokazati ispitivanjima poznatim iz teorijske mehanike tla (slika 4.7)..

Također je moguće pokazati ponašanje koherentnog tla pri smicanju u stanju zbijenosti pod određenim tlakom i istog tog tla, koje je prije smicanja bilo podvrgnuto većem tlaku od onog pri kojem je smicano. Uočeno je da je vrijednost kohezije u funkciji prethodnog tlaka. Ovaj pokus se može smatrati modelom učinka prekonsolidacije na koherentna tla, a prikazan je na slici 4.8.



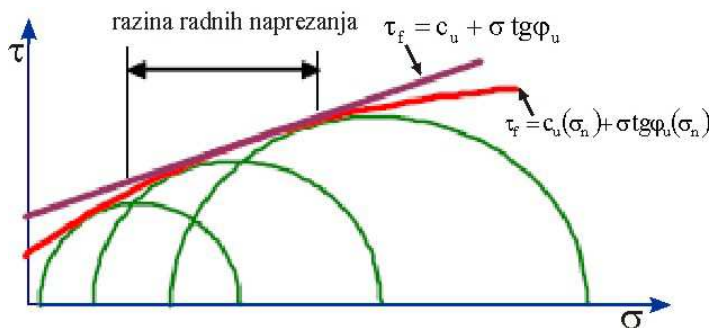
Slika 4.8 Pokus direktnog smicanje, kojim se pokazuje ovisnost veličine kohezije o prekonsolidaciji

Učinak prekonsolidacije na koheziju može se detaljnije proučiti u literaturi (Mitchel, Soga, 2005.) koja se bavi kemizmom glina.

#### 4.1.1.1 Učinak zbijanja na čvrstoću na smicanje koherentnog tla

##### Izražen u totalnim napreanjima

U ovim se analizama koriste rezultati nedrenirane čvrstoće tj. parametri  $c_u$  i  $\phi_u$ . Pri tom je bitno razlikovati nezasićeno tlo od potpuno zasićenog tla. Kod nezasićenog tla je ovojnica Mohr-ovih kružnica zakrivljena tj. čvrstoća na smicanje promjenjiva je s promjenom razine naprezanja,  $\sigma_n$ . Čvrstoća na smicanje se mijenja od točke do točke ovisno o razini naprezanja,  $\sigma_n$ , za koju se vrši proračun. U tom je slučaju numerički prikaz vrijednosti čvrstoće na smicanje jednadžba pravca, ali koja vrijedi samo u diskretnim točkama radnog, odnosno odabranog naprezanja,  $\sigma_n$ . Razlog tome je postepena promjena zasićenosti uslijed smanjenja poroziteta na račun zraka u porama. Učinak je prikazan na slici 4.9.

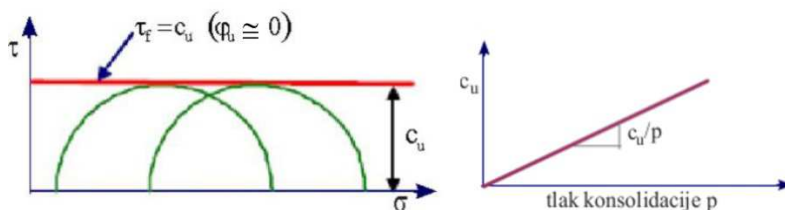


Slika 4.9 Rezultati odnosa naprezanja u konsolidiranom nedreniranom troosnom pokusu (CU) za nezasićeno tlo

Parametre čvrstoće treba odabrati u području očekivanih radnih naprezanja prikazanih na slici 4.9. U tom slučaju Mohr-Coulombov zakon čvrstoće na smicanje se može, za odabrano područje, aproksimirati pravcem s jednačzbom:

$$\tau_f = c_u + \sigma \operatorname{tg} \varphi_u \quad (4.1)$$

Potpuno zasićeno tlo se, pri nedreniranom pokusu, ponaša kako je prikazano na slici 4.10.

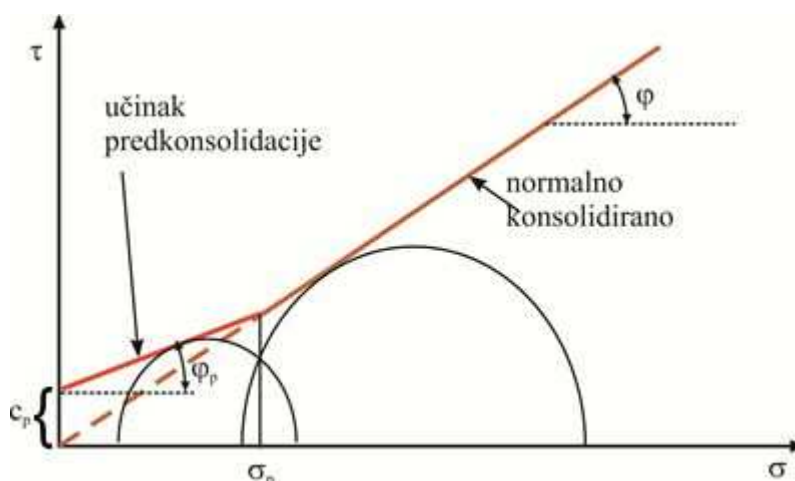


Slika 4.10 Troosni nekonsolidirani, nedrenirani pokus potpuno zasićenog tla i ovisnost nedrenirane kohezije o prethodnoj konsolidaciji

Nedrenirana čvrstoća,  $\tau_f$ , jednaka je vrijednosti kohezije  $c_u$  u nedreniranom stanju, dok je kut unutarnjeg trenja,  $\varphi_u$ , jednak ili približno jednak 0. Kohezija izravno ovisi o porozitetu u određenim uvjetima taloženja. Može se pokazati slično kao i na slici 4.8, da vrijednost kohezije raste porastom tlaka prekonsolidacije. Međutim kod tla koje se ugrađuje u nasip, prirodna struktura je potpuno uništena pa parametri čvrstoće na smicanje izravno ovise o zbijanju pri ugradnji.

Nasipi, koje nije moguće zbijati pri ugradnji (nasipanje u vodu), ne mogu pokazivati svojstvo kohezije već im čvrstoća na smicanje ovisi o nadsloju iznad određene razine nasipa tj. o efektivnom geostatičkom tlaku,  $\sigma'_0$ , a te vrijednosti su rijetko kada značajne.

Rezultati troosnog ispitivanja čvrstoće na smicanje zbijenog tla za nasipe, pokazat će, slično kao na slici 4.8, dva pravca čvrstoće na smicanje prikazana na slici 4.11. Čvrstoća na smicanje pri normalnim napreznjima manjim od tlaka prekonsolidacije,  $\sigma_p$ , pokazuje veće čvrstoće od one koju ima normalno konsolidirano tlo. Ova čvrstoća je dijelom nastala djelovanjem kapilarnih sila vode, preostale u porama nakon rasterećenja, a dijelom jačim elektrokemijskim vezama zbog veće blizine čestica. U dodiru s vodom ovaj učinak može prestati te o tome treba voditi računa prilikom odabira parametara čvrstoće na smicanje kod projektiranja nasipa (naročito onih koji dolaze u dodir s vodom).



Slika 4.11 Učinak zbijanja na čvrstoću na smicanje za tlo ugrađeno u nasip

### Izražen u efektivnim<sup>‡</sup> napreznjima

Za dio geotehničkih proračuna nasutih građevina, koriste se parametri čvrstoće na smicanje dobiveni analizama efektivnih napreznja. Ona nisu mjerljiva, već se računaju kao razlika ukupnih napreznja,  $\sigma$ , umanjnih za porni tlak,  $u$ , kako slijedi:

$$\tau_f = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi' = c' + (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi' \quad (4.2)$$

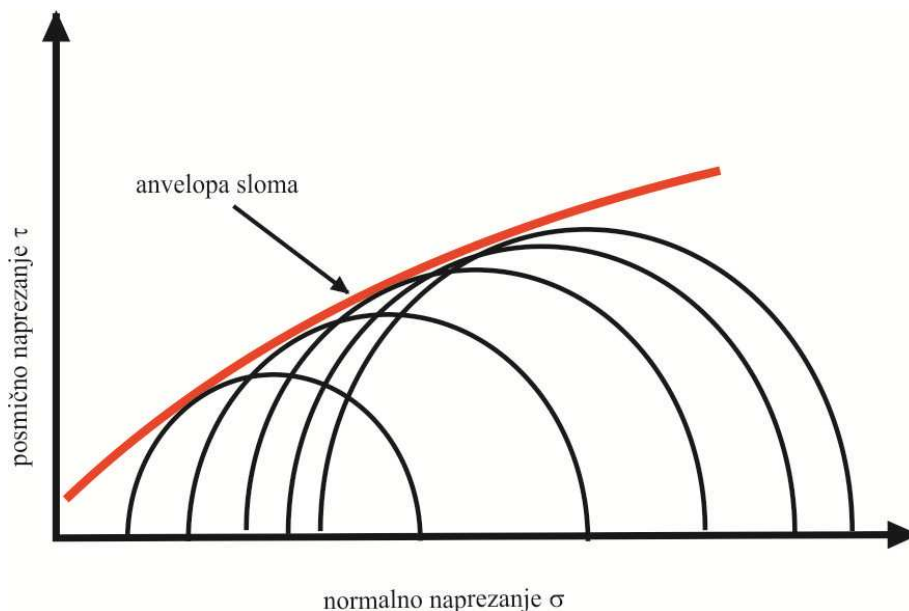
Parametri čvrstoće na smicanje,  $c'$  i  $\phi'$ , izražavaju se pomoću odnosa čvrstoće na smicanje u efektivnim napreznjima koja se određuju u CU pokusu za zasićeno tlo ili u dreniranom pokusu za potpuno zasićeno tlo, a prema zahtjevima iz standarda (vidi HRN CEN ISO/TS 17892-9:2008).

<sup>‡</sup> Efektivna napreznja definirao je Terzaghi (1925.) kao ona napreznja koje se prenose isključivo skeletom tj. prenose se s čestice na česticu na mjestima njihovog međusobnog dodira.

#### 4.1.1.2 Učinak zbijanja na čvrstoću na smicanje nekoherentnog tla i drobine

U ova gradiva spadaju sva nekoherentna tla kao što su šljunci i pijesci, ali i gradiva raznih krupnoća dobivena drobljenjem u kamenolomu. Ova gradiva nemaju koheziju (slika 4.12), a čvrstoća na smicanje im je određena izrazom:

$$\tau_f = (\sigma - u) \operatorname{tg} \phi' \quad (4.3)$$



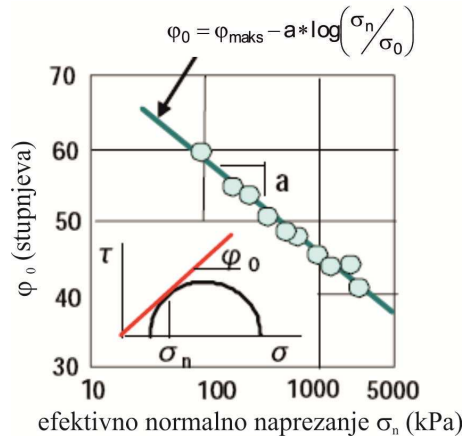
Slika 4.12 Rezultati troosnog smicanja nekoherentnog tla

Najnovija istraživanja posmične čvrstoće nekoherentnog tla, drobine, (Narita, 2000.) pokazuju značajno povećanje čvrstoće u području vrlo visokih tlakova pri spriječenom bočnom širenju. Umjesto izraza za anvelopu sloma, u praktičnoj primjeni, pri projektiranju se preporučuju dvije vrste izraza za posmičnu čvrstoću.

Prvi je izraz istog oblika kao (4.3), ali s promjenjivom vrijednošću kuta trenja,  $\phi_0$ , prema izrazu sa slike 4.13, odnosno:

$$\phi_0 = \phi_{\text{maks}} - a * \log \left( \frac{\sigma_n}{\sigma_0} \right) \quad (4.4)$$

a što predstavlja vrijednost kuta trenja,  $\phi$ , izraženog preko nagiba tangente na anvelopu sloma sa slike 4.12 (slično kao i na slici 4.9) za odabranu razinu normalnog naprezanja  $\sigma_n$ , kako je prikazano na slici 4.13.



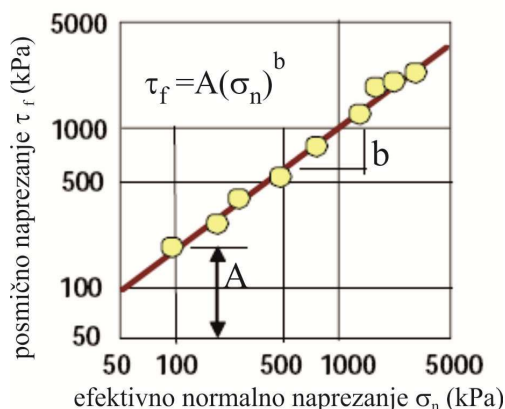
Slika 4.13 Promjena vrijednosti kuta trenja  $\varphi$  ovisno o razini naprezanja pri troosnom smicanju nekoherentnog gradiva

Vrijednost kuta  $\varphi_0$  za razine naprezanja  $\sigma_0$  manje od  $\sigma_n$ , treba uzeti sa vrijednošću  $\varphi_{maks}$ , dok se za razine naprezanja  $\sigma_0 > \sigma_n$  preporuča uzeti tangencijalne vrijednosti za  $\varphi_0$  prema jednadžbi 4.4.

Drugi izraz za čvrstoću na smicanje je eksponencijalan u odnosu na razinu efektivnog normalnog naprezanja  $\sigma_n$  kako je prikazano jednadžbom 4.5.

$$\tau_f = A(\sigma_n)^b \quad (4.5)$$

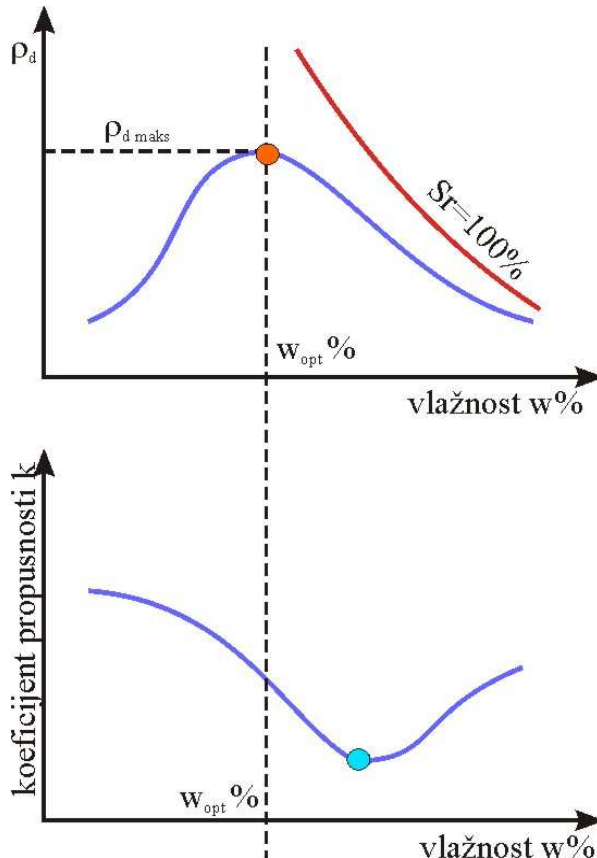
Vrijednosti A i b prikazane su na slici 4.14, a za kamene agregate (prema Narita, 2000) iznose  $A=0,9-1,9$ , a  $b=0,75-0,98$ .



Slika 4.14 Prikaz rezultata smicanja kamenih agregata, za koje se može koristiti izraz 4.5 s označenim načinom određivanja parametara A i b

#### 4.1.2 Vodopropusnost

Vodopropusnost svakog tla ovisi o veličini pora, njihovom prostornom rasporedu i povezanosti unutar tla. Kako ona ovisi o zbijenosti prikazano je na slici 4.15.



Slika 4.15 Promjena koeficijenta vodopropusnosti, k, ovisno o zbijenosti

U poglavlju 2 (jed. 2.26) pokazano je, za poseban slučaj pijeska određene granulacije, kako se može odrediti koeficijent propusnosti tla. Za tla ugrađena u nasipe to nije prikladan način određivanja koeficijenta vodopropusnosti, k.

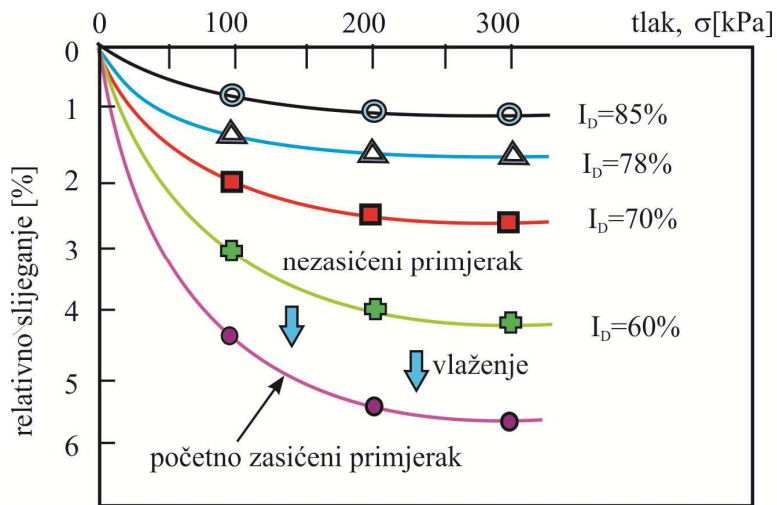
Vodopropusnost je vrlo važna za hidrotehničke nasipe bez obzira da li vodu drže privremeno, povremeno ili stalno. Stoga je za tla koja će se ugrađivati u te nasipe, vrlo važno odrediti vodopropusnost u onim uvjetima, u kojima želimo da tlo bude ugrađeno u nasip. Za određivanje koeficijenta vodopropusnosti u laboratoriju postoje uređaji, standardi i propisi. Vrijednosti koeficijenata vodopropusnosti za određene vrste tla dane su u tabeli 2.15.

### 4.1.3 Stišljivost

Stišljivost tla je svojstvo koje ovisi o njegovom porozitetu. Slijeganje u tlu nastaje isključivo na račun smanjenja poroziteta (podrazumijeva se da su čestice nestišljive). Na slici 4.16 je prikazano kako se ponaša primjerak iste vrsti tla, ali različitog početnog indeksa gustoće,  $I_D$ , pri tlačnom pokusu.

Pri tom je,  $I_D$ , prema jed. 3.3:

$$I_D = \left( \frac{e_{\text{maks}} - e}{e_{\text{maks}} - e_{\text{min}}} \right) \times 100 \quad (3.3)$$



Slika 4.16 Slijeganje ovisno o zbijenosti

Suha gustoća,  $\rho_d$ , je izravno ovisna o porozitetu,  $e$ , a što se može prikazati u rezultatu Proctorovog pokusa kao odnos vlažnosti,  $w$ , i koeficijenta pora,  $e$ , jer je:

$$\rho_d = \frac{G_s \cdot \rho_v}{(1 + e)} \quad (4.6)$$

Za određenu vrijednost specifične težine čvrstih čestica,  $G_s$ , može se odrediti suha gustoća,  $\rho_d$ , za odabrani porozitet,  $e$ , kao i obratno.



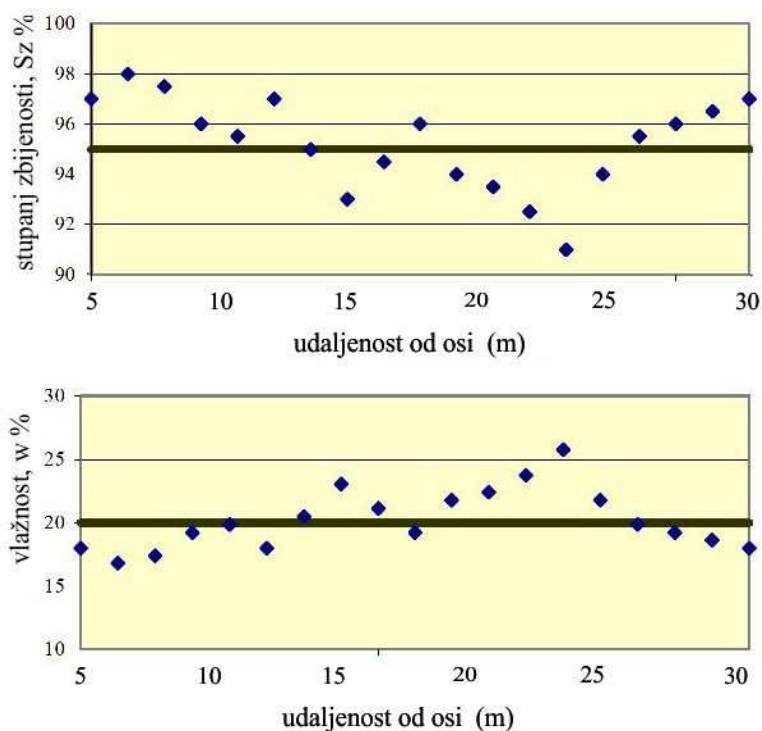
## 5 TERENSKA PROVJERA ZBIJENOSTI

### 5.1 OPĆENITO

Terenskom provjerom zbijenosti dokazuje se kakvoća ugrađenog tla. Kako je prethodno rečeno, odstupanje od najveće suhe gustoće ( $\rho_d$ ), dobivene Proctorovim pokusom, naziva se **stupanj zbijenosti** i propisuje kao mjera kakvoće ugrađenog tla. Računa se prema jed. 5.1 kao:

$$S_z [\%] = \frac{\rho_d}{\rho_{d_{\max}}} \times 100 \quad (5.1)$$

Jednako se propisuje za sitnozrna, krupnozrna i miješana tla. Razlika je u postupcima pomoću kojih se dobiva podatak o suhoj gustoći  $\rho_d$ . Razlikuju se i zahtjevi na raspone mogućih odstupanja za pojedine grupe tala koja se ugrađuju (tabela 3.1). Slika 5.1 prikazuje rezultate tekućih ispitivanja tla ugrađenog u nasip od koherentnog tla za koji se traži stupanj zbijenosti od najmanje 95%, dobivene pri ili oko optimalne vlažnosti od 20%.



Slika 5.1 Primjer grafičkog prikaza rezultata tekućih ispitivanja sitnozrnog tla ugrađenog u nasip (FHWA NHI-05-037, 2006.)

Da bi se provjera zbijenosti mogla provesti potrebno je imati podatke za usporedbu. Oni se dobivaju **prethodnim ispitivanjima** u laboratoriju, a potvrđuju izvedbom **probni polja**. Kod koherentnih tala, pijesaka i sitnih šljunaka koristi se Proctorov pokus. Kao rezultat dobiva se najveća moguća gustoća ispitanog tla ( $\rho_{dmax}$ ) za odabranu energiju zbijanja (standardni ili modificirani pokus). Kod **krupnozrnih tala**, krupnijih od srednjeg do sitnog šljunka, nije moguće provoditi Proctorov pokus prema opisanim standardima. Najnoviji propisi predviđaju ispitivanja, za  $D \leq 63$  mm, u cilindrima većeg promjera, i do  $\Phi = 250$  mm (HRN EN 13286-2:2010). Za **miješana gradiva** postoje propisi načina pripreme primjeraka za Proctorov pokus na način da se odstrani dio čestica do određene krupnoće pa se ispituje samo dio koji sadrži čestice manje od određenih promjera.

Sljedeći je korak ispitivanje ugrađenog tla. To su **tekuća ispitivanja** koja se provode ispitivanjem suhe gustoće ( $\rho_d$ ) i vlažnosti ugrađenog tla ( $w$ ). S tim podacima se odredi stupanj zbijenosti,  $S_z$ , gotovog nasipa. Rezultati se prikazuju tabelarno i grafički. Grafički postupak je pregledniji pogotovo ako se u grafikon ucrtaju dozvoljene granice odstupanja. Tada se odmah može uočiti postojanje nedozvoljenih odstupanja i pristupiti popravku takve dionice ugrađenog sloja.

U tabeli 3.1 navedeni su uobičajeni kriteriji za zbijenost nasipa ugrađenih na razne načine, kao i još neki podaci bitni za izvedbu nasipa. U OTU za ceste (2001.) i OTU u vodnom gospodarstvu (2010.) dane su tabele s uvjetima zbijenosti koje moraju imati tla ugrađena u nasipe.

Kako je tlo prirodno gradivo, podložno je promjenama i raznolikosti svih svojih svojstava. Iz tog je razloga potrebno povremeno izvršiti provjeru **svih svojstava** koja su bitna za nasutu građevinu koja se od tog tla izvodi. Ta provjera se naziva **kontrolna ispitivanja**. Temeljem tako dobivenih rezultata, mogu se mijenjati uvjeti ugradnje tla u nasip.

Na slici 5.1 debelom crtom je označena tražena vrijednost zbijenosti i vlažnosti prema projektu. Odstupanja su normalna pojava, ali je pitanje postavljenih granica unutar kojih se dobivene vrijednosti moraju nalaziti. Granice se mogu odrediti statistički (U.S. Department of Transportation, 1977.).

#### 5.1.1 Sitnozrna tla

Kod sitnozrnih, koherentnih tala, ispituje se prirodna vlažnost  $w_0$  neposredno nakon razastiranja i uspoređuje s optimalnom vlažnošću po Proctoru. U tabeli 3.1 dan je uobičajeni uvjet za odstupanje vlažnosti tla koje se ugrađuje, od optimalne i iznosi

$\pm 2$  %. Postoje uređaji za terensko, brzo određivanje vlažnosti. Ako tlo ima manju vlažnost od tražene, može se povećati vlažnost prskanjem razasrtog sloja ili ga ugraditi uz veći utrošak energije zbijanja. Ako je vlažnije mora se prosušiti, a može se i pomiješati sa suhljim tлом uz miješanje da se dobije smjesa tla što ujednačenje vlažnosti.

Ključan korak u tekućim ispitivanjima je određivanje **stupnja zbijenosti**,  $S_z$ , u odnosu na standardni Proctorov postupak najmanje na svakih 1000 m<sup>2</sup> svakog sloja nasipa. Koristi se jed. 5.1. Rezultati moraju zadovoljiti standardima i projektom propisane uvjete.

Za određivanje suhe gustoće ili prostorne težine, potrebno je raspolagati s dva podatka da bi se mogli uvrstiti u izraz (vidi poglavlje 2.2):

$$\gamma_d = \frac{W_{\text{čč}}}{V} = \left( \frac{G_s}{1+e} \right) \gamma_v = \frac{\gamma}{1+w} \quad (2.14)$$

gdje je  $W_{\text{čč}}$  težina suhих čvrstih čestica,  $V$  zapremina izvađenog uzorka, a ostale veličine objašnjene su u poglavlju 2.2.

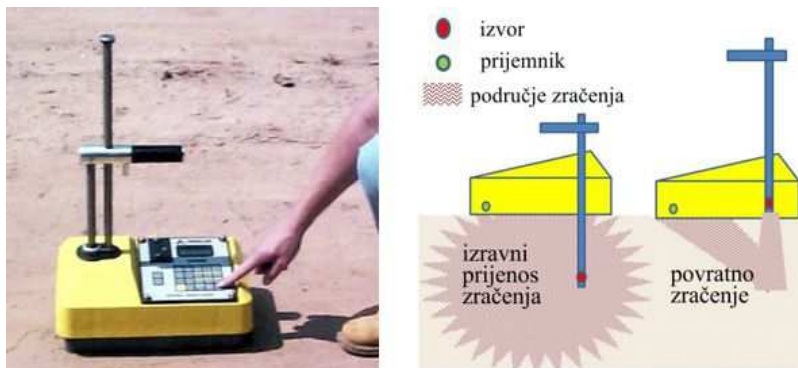
Odnosno:

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} \quad (5.2)$$

gdje je,  $m_d$ , masa suhog tla izvađena iz određene zapremine nasipa,  $V$ .

Masa se jednostavno određuje sušenjem u sušioniku i vaganjem uzoraka izvađenih s površine i sredine ugrađenog sloja. Zapremina  $V$  može se odrediti na više načina.

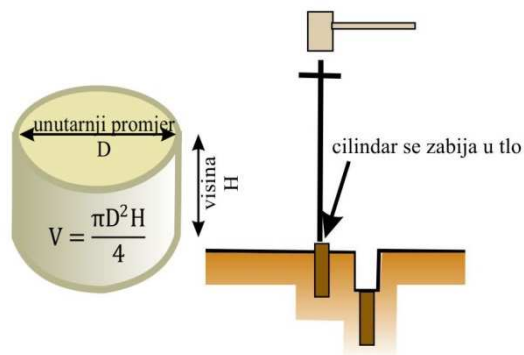
Danas postoje uređaji kojima se izravno na terenu može odrediti suha gustoća ugrađenog tla, što znatno ubrzava postupak provjere kakvoće ugrađenog tla. Jedan od njih, nuklearni denzimetar, daje kao rezultat mjerenja vrijednost suhe gustoće ugrađenog tla,  $\rho_d$ , (slika 5.2).



Slika 5.2 Mjerenje gustoće tla nuklearnim denzimetrima

Da bi podatak bio ispravan potrebno je uređaj prethodno kalibrirati na tlu poznate gustoće. To je najbrži način ispitivanja, koji zahtijeva posebno obučeno osoblje s obzirom da se radi o uređaju koji zrači.

Za sitnozrna tla vadi se uzorak pomoću valjka poznate zapremine  $V$ , s površine i iz sredine sloja u propisanom broju, ovisno o količini ugrađenog tla (slika 5.3). Svaki se uzorak pažljivo bilježi i prolazi postupak ulaska i obrade u laboratoriju. Ispitnom primjerku se, nakon sušenja u sušioniku kroz 24 sata izmjeri masa osušenog tla (bez cilindra),  $m_d$ .

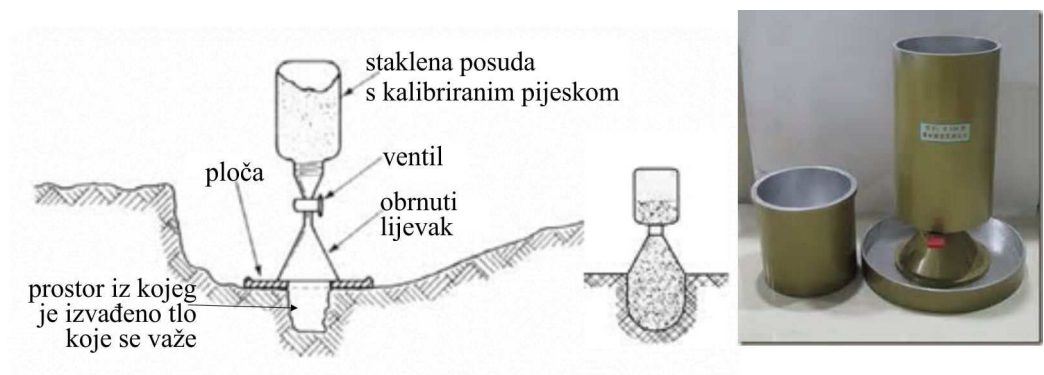


Slika 5.3 Uzimanje uzorka cilindrom iz nasipa

#### 5.1.2 Sitna nekoherentna tla

Za ova tla se može primijeniti isti postupak provjere, pomoću suhe gustoće  $\rho_d$ , uz određivanje zapremine drugim postupcima.

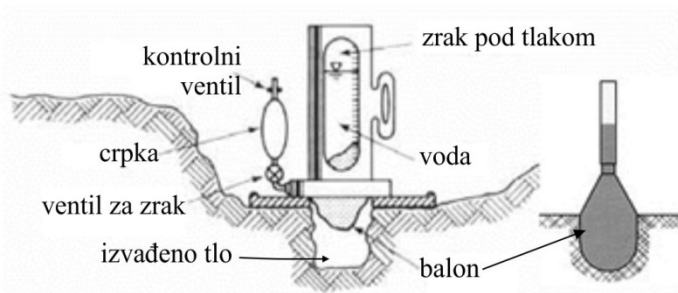
Za takva tla, iz kojih je teško izvaditi dobar uzorak pomoću cilindra, može se zapremina tla  $V$ , izvađena iz gotovog nasipa, izmjeriti metodom kalibriranog pijeska (slika 5.4).



Slika 5.4 Pokus s kalibriranim pijeskom, u sredini shema, desno pribor

Tlo koje je izvađeno iz nasipa, važe se, suši i ponovo važe. Na taj se način odredi masa suhog tla izvađenog iz nasipa,  $m_d$ . Koristeći jednadžbu 5.2 odredi se gustoća  $\rho_d$ . Ujedno se dobiju podaci iz kojih se može odrediti i vlažnost  $w$ .

Zapremina,  $V$ , se može odrediti i postupkom pomoću balona s vodom (slika 5.5). Tlo se vadi, a dobiveni prostor oblaže podatnim balonom koji se puni vodom iz kalibrirane posude. Na taj se način odredi zapremina,  $V$ . Izvađeno tlo se suši kao i u prethodnim pokusima, važe se, te se pomoću tako dobivenih podataka određuje masa suhog uzorka  $m_d$ .



Slika 5.5 Pokus s balonom s vodom, desno shema

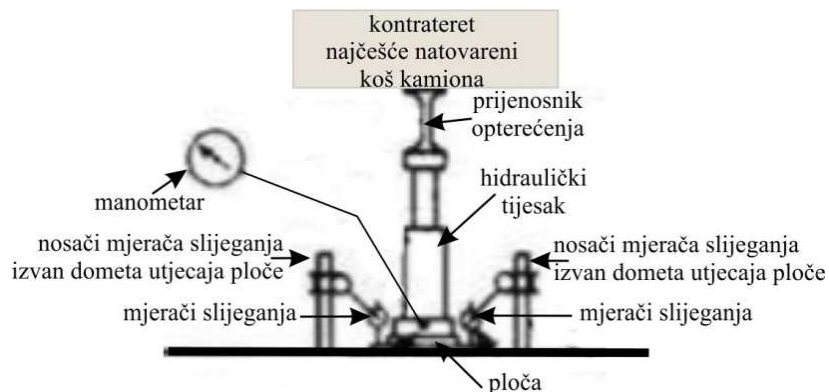
### 5.1.3 Krupnozrna tla

Kontrola zbijenosti se za krupnozrna, nekoherentna tla provodi pomoću probne ploče (slike 5.6 – 5.8). Kod građevina kod kojih je tlo gradivo, ovo je vrlo važno ispitivanje. Koristi se dvojako:

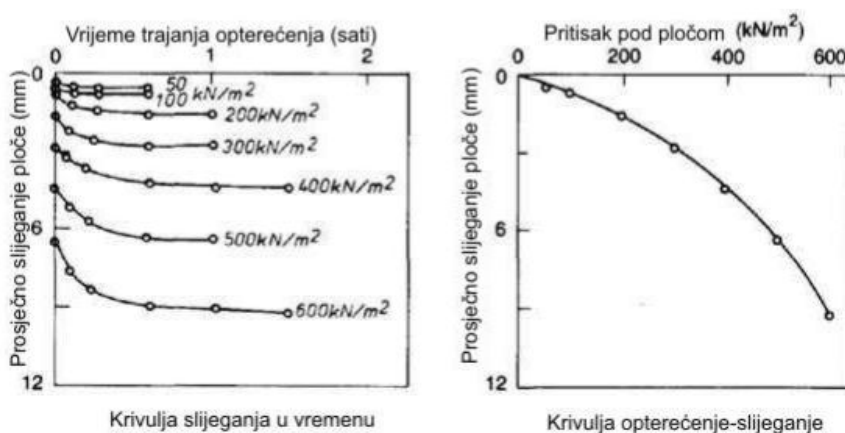
- za ispitivanje površinskih slojeva tla kada su oni podloga budućem nasipu koji leži na tlu;
- za ispitivanje zbijenosti slojeva nekoherentnog tla, izvedenih nasipavanjem sa zbijanjem.



Slika 5.6 Oprema za ispitivanje probnom pločom



Slika 5.7 Shema probne ploče



Slika 5.8 Rezultati ispitivanja probnom pločom

Probnom pločom ispituje se tlo koje će biti temelj budućem nasipu. Zbijenost prvog sloja nasipa ovisi o zbijenosti podloge, koju je potrebno utvrditi. Kada podloga ne zadovoljava tražene kriterije potrebno ju je poboljšati nekim od postupaka poboljšanja podtemelnog tla (Roje-Bonacci, 2012.).

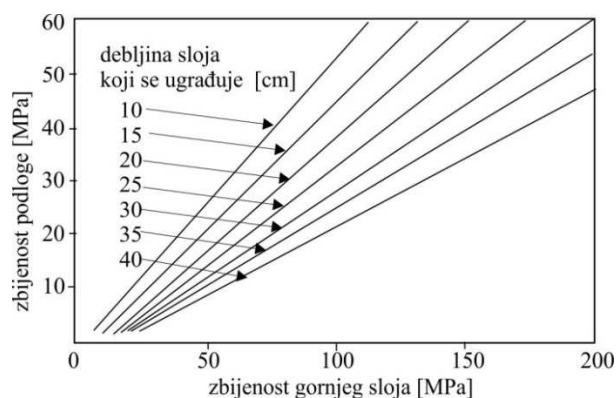
Zbog činjenice da zbijenost sloja koji se ugrađuje ovisi o zbijenosti podloge, propisi (OTU za ceste 2001.) razlikuju kriterije kakvoće ugradnje u slojeve nasipa visokih preko 2 metra, na dijelu od podnožja nasipa do visine 2 metra ispod planuma posteljice te slojeva nasipa nižih od 1 m i slojeva nasipa viših od 2 metra u području 2 metra ispod planuma posteljice. Ovi kriteriji prikazani su u tabeli koja slijedi. Razlikuju se kriteriji kakvoće ugradbe ovisno o vrsti gradiva koje se ugrađuje, prema podjeli u spomenutim tehničkim uvjetima na:

- zemljano tlo,
- miješano tlo i
- kamen.

Tabela 5.1 Kriteriji kakvoće ugradnje tla u nasipe prema OTU za ceste (2001.)

Položaj nasipnih slojeva	Stupanj zbijenosti $S_z$ (u odnosu na standardni Proctorov postupak), najmanje (%)	Modul stišljivosti $E_{PLT}$ (ploča $\varnothing 30$ cm) najmanje ( $MN/m^2$ )
zemljano tlo		
a) slojevi nasipa visokih preko 2 m na dijelu od podnožja nasipa do visine 2 m ispod planuma posteljice	95	20
b) slojevi nasipa nižih od 1 m i slojevi nasipa viših od 2 m u području 2 m ispod planuma posteljice	100	25
miješano tlo		
a) slojevi nasipa visokih preko 2 m na dijelu od podnožja nasipa do visine 2 m ispod planuma posteljice	95	35
b) slojevi nasipa nižih od 1 m i slojevi nasipa viših od 2 m u području 2 m ispod planuma posteljice	100	40
kameni nasip		
a) slojevi nasipa visokih preko 2 m na dijelu od podnožja nasipa do visine 2 m ispod planuma posteljice	95	40
b) slojevi nasipa nižih od 1 m i slojevi nasipa viših od 2 m u području 2 m ispod planuma posteljice	100	40

Na slici 5.9 prikazani su odnosi moguće zbijenosti prethodnog i budućeg sloja, ovisno o njegovoj debljini. Tu postoji zakonitost koju je potrebno poštivati.

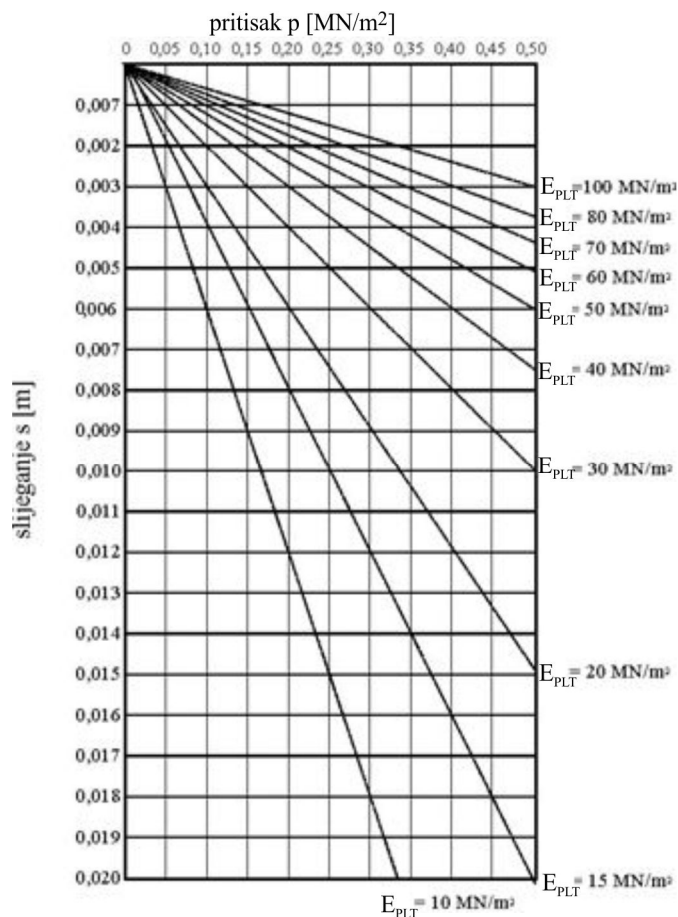


Slika 5.9 Vossov dijagram za određivanje moguće zbijenosti sljedećeg sloja

Za brzu ocjenu zbijenosti postoje gotovi dijagrami naprezanje,  $\sigma$ - slijeganje,  $s$ , u kojima su ucrtani pravci koji označavaju vrijednosti modula stišljivosti ( $E_{PLT}$ ), tako da se rezultat ne mora izračunavati već se očita grafički (slika 5.10). Iz mjerenih se podataka modul stišljivosti ( $E_{PLT}$ ), računa prema izrazu:

$$E_{PLT} = \frac{\Delta p}{\Delta s} * \frac{\pi * b}{4} (1 - \nu^2) \quad (5.3)$$

Gdje je  $\Delta p$  [kPa], odabrana razina nanesenog pritiska,  $\Delta s$  [m] promjena ukupnog slijeganja za odgovarajuću promjenu nanesenog dodirnog pritiska  $\Delta p$  uključujući i puzanje;  $b$  [m] promjer ploče u metrima, a  $\nu$ , Poissonov koeficijent za uvjete pri pokusu (EC 7 dio 2., dodatak K).

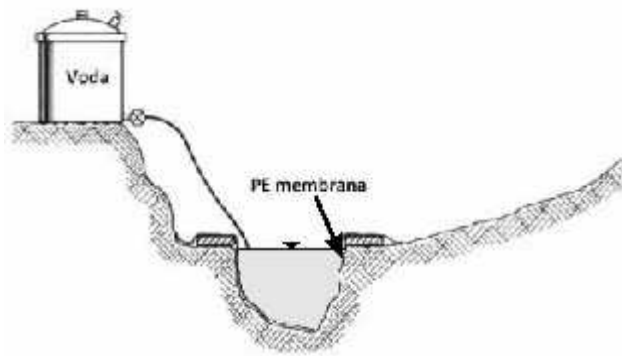


Slika 5.10 Obrazac za određivanje modula stišljivosti na terenu

Za kamene nasipe, koji se ne mogu ispitivati probnom pločom zbog suviše krupnih komada, izvodi se pokus tako da se zapremina odredi pomoću količine vode u



iskopanoj jami većih dimenzija, prekrivenoj vodonepropusnom folijom, kako je prikazano na skici 5.11.



Slika 5.11 Pokus određivanja zapremine u kamenom nasipu

Iskopana masa kamena se važe. Najčešće iskopanu masu nije potrebno sušiti. Vlažnost ovdje ima minimalni doprinos u težini.

Za nasip od kamena, dobivenog miniranjem, ispituje se granulometrijski sastav zrna manjih od 10,00 cm, a udio većih frakcija (10-40 cm) određuje se vizualnom provjerom i procjenom.

U jednoj seriji, jedan od pet rezultata ispitivanja zbijenosti može biti manji od minimalno traženog s tim da po apsolutnoj vrijednosti ne odstupa za više od:

- 5 %, pri mjerenju suhe gustoće ( $\rho_d$ )
- 10 %, pri mjerenju modula stižljivosti ( $E_{PLT}$ ).

Ako je broj pokusa u jednoj kontrolnoj seriji manji od pet, tada sve vrijednosti (rezultati) određene ispitivanjem, trebaju biti veće od najmanje tražene.

Ako rezultati ispitivanja zadovoljavaju, može se razastrti i zbiti sljedeći sloj nasipa.

## **5.2 STATISTIČKA OBRADA PODATAKA TEKUĆIH I KONTROLNIH ISPITIVANJA**

Tekuća provjera kakvoće svodi se na ispitivanje vlažnosti i suhe gustoće ugrađenog tla ili ispitivanje zbijenosti probnom pločom. Tako dobiveni podaci uspoređuju se sa zahtjevima projektanta danim u tehničkim uvjetima izvedbe. Oni određuju granice unutar kojih se moraju kretati dobiveni podaci da bi se ugradnja mogla smatrati zadovoljavajućom.

Postoji ograničenje da ni jedan uzorak ne smije imati traženu vrijednost ispod neke granice, da određeni postotak uzoraka može imati vrijednost manju od propisane, a u

koliko se radi s metodom kojom se iz jednog sloja uzima N uzoraka, tada se ograničava i broj uzoraka od tih N koji mogu postići vrijednost manju od neke granice.

Ako uzorci zadovoljavaju kriterije propisane tehničkim uvjetima izvedbe, tada se ugrađeno tlo prihvaća kao zadovoljavajuće.

Sve prethodno rečeno pretpostavlja da uzorci statistički pripadaju istom osnovnom skupu. Ovo se može provjeriti na raznim obilježjima tla (granici tečenja,  $w_L$ ; indeksu plastičnosti,  $I_p$ , suhoj gustoći,  $\rho_d$ ). Provjera se vrši pomoću koeficijenta varijacije,  $v$ , koji glasi:

$$v = \frac{\sigma}{\bar{x}} * 100\% \quad (5.4)$$

gdje je  $\bar{x}$ , srednja vrijednost mjenenog svojstva, a  $\sigma$ , standardna devijacija promatranog skupa rezultata provjere kakvoće. Za pripadnost istom osnovnom skupu obilježja, mora biti zadovoljen uvjet da je koeficijent varijacije,  $v < 30\%$ .

Druga je pretpostavaka da se mjerene vrijednosti ponašaju po zakonu normalne raspodjele. Uz takve pretpostavke može se vršiti statistička analiza dobivenih rezultata tekućih i kontrolnih ispitivanja.

#### 5.2.1 Mogućnost greške

Može se pokazati kako uz rubne uvjete propisane tehničkim uvjetima izvedbe, bez statističke analize, nije moguće dokazati da su svi uvjeti zadovoljeni.

Da bi se izbjegla mogućnost greške, koja se javlja pri jednostavnom uspoređivanju stupnja zbijenosti,  $S_z$ , ili modula stišljivosti  $E_{PLT}$  s propisanim rezultatima u provjeri kakvoće, treba se poslužiti metodama matematičke statistike.

Rezultati dobiveni ispitivanjima, gomilaju se oko neke srednje vrijednosti,  $\bar{X}$ , a što je poznato iz teorije o kontroli kakvoće općenito. Oni predstavljaju skup reprezentativnih vrijednosti pomoću kojih se može izračunati vjerojatnost pojave bilo koje veličine iz skupa dobivenog ispitanim uzorcima. Može se pokazati da se pri tom u skupu može pojaviti određeni postotak vrijednosti (koji se nije pojavio prilikom ispitivanja), a koji neće zadovoljiti zadane uvjete. Neka su rezultati ispitivanja suhe gustoće uzoraka iz zadanog sloja prikazani u tabeli 5.2.

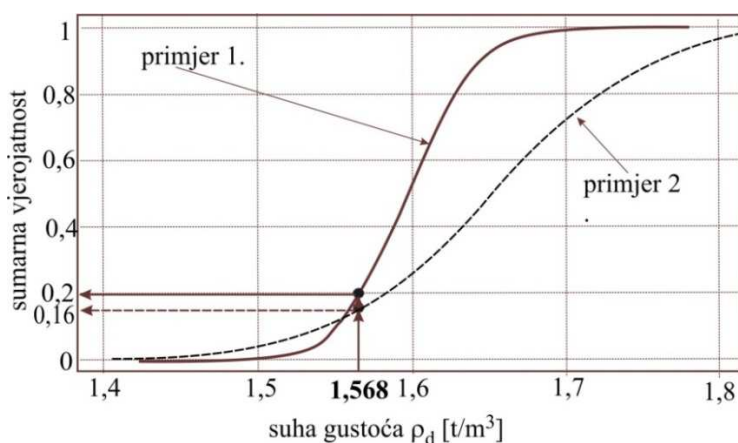
U prvom su skupu svi izmjereni podaci,  $S_z$ , zadovoljavajući tj. veći su ili jednaki traženoj vrijednosti. U drugom skupu je jedan rezultat nezadovoljavajući tj. manji je od tražene vrijednosti. Međutim, primjenom metoda matematičke statistike, tj.

koristeći svojstva normalne raspodjele, može se pokazati da je vjerojatnost pojave uzoraka nezadovoljavajućih vrijednosti veća u prvom nego u drugom primjeru. Iz svojstava normalne raspodjele ( $\bar{x}$ ,  $\sigma$ ), moguće je izračunati vjerojatnost pojave vrijednosti manjih od tražene koja u oba primjera iznosi  $\rho_d=1,568$  [t/m<sup>3</sup>]. Za primjer 1 ona iznosi 20%, dok za primjer 2 s jednim lošim rezultatom iznosi 16 %.

Tabela 5.2 Rezultati ispitivanja suhe gustoće s površine i iz sredine sloja

Primjer 1			Primjer 2		
Broj uzorka	Suha gustoća kontrolnog uzorka $\rho_d$ [t/m <sup>3</sup> ]	Stupanj zbijenosti $S_z$ [%]	Broj uzorka	Suha gustoća kontrolnog uzorka $\rho_d$ [t/m <sup>3</sup> ]	Stupanj zbijenosti $S_z$ [%]
1	1,57	98,13	1	1,55	<b>96,88</b>
2	1,6	100,00	2	1,71	106,88
3	1,58	98,75	3	1,65	103,13
4	1,67	104,38	4	1,77	110,63
5	1,58	98,75	5	1,65	103,13
6	1,59	99,38	6	1,57	98,13
srednjak	1,5983		srednjak	1,6500	
standardna devijacija	0,0334		standardna devijacija	0,0757	
maksimalna suha gustoća po Proctoru $\rho_{dmaks} = 1,6$ [t/m <sup>3</sup> ]					
tražena vrijednost stupnja zbijenosti $S_z$ 98%=1,568[t/m <sup>3</sup> ]					

Ove se rezultate može prikazati grafički pomoću krivulja sumarne vjerojatnosti.



Slika 5.12 Krivulje sumarne vjerojatnosti normalne raspodjele za skupove uzoraka iz tabele 5.2

### 5.2.2 Pojam „inženjerskih granica“

Inženjerske granice su vrijednosti poznate u provjeri kakvoće proizvoda. One određuju raspon mjerenih vrijednosti unutar kojih se moraju kretati podaci provjere da bi se sa sigurnošću moglo tvrditi da određeni proizvod odgovara traženoj kakvoći. Mogu se odnositi na marku betona, debljinu lima, promjer cijevi i slično.

U provjeri kakvoće ugradnje zemljanog gradiva, zadani su rubni uvjeti tehničkim uvjetima izvedbe, koji glase:

- ispitani uzorci moraju imati vrijednost 98%  $\rho_d$  (suhe gustoće po Proctoru);
- najviše 10 % uzoraka može imati vrijednost manju od 98%  $\rho_d$ ;
- u jednom sloju najviše 2 uzorka mogu imati vrijednost manju od 98%  $\rho_d$ ;
- ni jedan uzorak ne smije imati vrijednost manju od 90%  $\rho_d$ .

Prvi i posljednji zahtjev je jednostavno zadovoljiti, dok se drugi zadovoljava u toku građenja, ali se ne određuje u odnosu na što se odnosi tih 10%. Svojstva gradiva se međutim mijenjaju u toku građenja. Iako se mijenjaju u dozvoljenim granicama, opet nije određeno na što se odnosi tih 10 %. Podatak o 2 rezultata koji mogu biti manji od tražene vrijednosti može za kakvoću pojedinog sloja biti koban, kako je to pokazano u prethodnom primjeru.

Iz četiri zahtjeva postavljena u tehničkim uvjetima izvedbe, koji su navedeni na početku, uočljivo je da se u građevinarstvu upotrebljava samo donja inženjerska granica, koju se može ozračiti kao DIG. Ona kaže da vrijednost svojstva gradiva koje se provjerava ne smije biti **manja** od zadane vrijednosti. Kako svojstva koja se provjeravaju osciliraju oko neke vrijednosti po zakonu normalne raspodjele, to se za provjeru kakvoće može koristiti svojstva upravo te raspodjele za određivanje inženjerskih granica. Provjera se može vršiti na skupu pojedinih mjerenja  $N$  ili na podskupovima sačinjenim od skupa jednakog broja,  $n$ , uzoraka iz skupa  $N$  pojedinih mjerenja. Pretpostavka je da se i novo nastali podskupovi ponašaju također po zakonu normalne raspodjele pa sa s njima može postupati kao i s osnovnim skupom.

Kada se provjerava skup pojedinačnih mjerenja,  $N$ , i kada se određuje najmanja inženjerska granica, kao vrijednost iznad koje se moraju nalaziti ili sve ili određeni postotak izmjerenih vrijednosti, tada je ta donja granica vrijednost, koja za normalnu raspodjelu iznosi:

$$DIG = \bar{x} - u * \sigma \quad (5.5)$$

gdje je  $\bar{x}$ , srednja vrijednost, a  $\sigma$ , standardna devijacija osnovnog skupa. To proizlazi iz svojstava normalne raspodjele da se u rasponu od  $-u * \sigma$  do  $+u * \sigma$  nalazi raspon

traženih vrijednosti koje ne prelaze traženi minimum odnosno maksimum. Kada je  $u=3$  tada je unutar ovako određenih granica smješteno 99,7 % podataka promatranog skupa. Za,  $u$ , se može pisati da je:

$$u = \frac{\bar{x} - x_1}{\sigma} \text{ pa je: } x_1 = \bar{x} - u \cdot \sigma \quad (5.6)$$

pri čemu je,  $u$ , vrijednost površine ispod normalne krivulje za traženu vjerojatnost,  $P$ . Ako je zahtjev da samo 10% vrijednosti može biti manje od neke tražene vrijednosti tada je tražena vrijednost vjerojatnosti  $F(x)$ :

$$F(x) = 0,5 - P(u) \quad (5.7)$$

To znači da na sumarnoj krivulji normalne raspodjele promatranog obilježja treba naći apscisu, za koju je vrijednost ordinate 10%. Iz podataka za površinu ispod krivulje normalne raspodjele može se za  $P(u)=40\%$  očitati vrijednost  $u=1,28$ . Ako se ova vrijednost uvrsti u jednadžbu 5.6 dobije se:

$$0,98 \cdot \rho_d = \bar{\rho}_d - 1,28 \cdot \sigma \quad (5.8)$$

Treći zahtjev, da u jednom sloju najviše 2 uzorka mogu imati vrijednost manju od 90 %  $\rho_d$ , može se preinačiti tako da ni jedan uzorak ne smije imati vrijednost manju od 90 % vrijednosti dobivene po Proctoru. Dobiva se druga jednadžba koja glasi:

$$x_2 = \bar{x} - 3\sigma \quad (5.9)$$

odnosno:

$$0,9 \cdot \rho_d = \bar{\rho}_d - 3\sigma \quad (5.10)$$

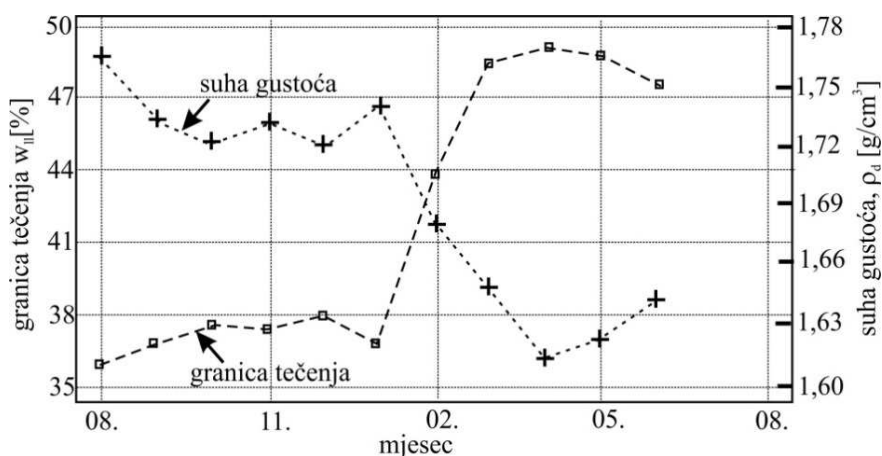
Na taj način nastaju dvije jednadžbe s dvije nepoznanice iz kojih se mogu izračunati parametri krivulje normalne raspodjele, srednja vrijednost suhe gustoće  $\bar{\rho}_d$  i standardna devijacija  $\sigma$ .

Sličan se postupak može provesti i sa skupnim uzorcima sačinjenim od istog broja,  $N$ , pojedinačnih mjerenja u svakom uzorku.

### 5.2.2.1 Odnosi u skupu unutar kojeg se želi odrediti "inženjerske granice"

Za svaku skupinu od  $N$  uzoraka iz pojedinog sloja sitnozrnog tla koji se provjerava provjerom suhe gustoće  $\rho_d$ , kao referentna veličina služi pojedinačno izvedeni Proctorov pokus. Može se pokazati da su i rezultati Proctorovog pokusa slučajne veličine koje pripadaju određenom statističkom skupu, da se ponašaju po zakonu normalne raspodjele i da su kao i sve veličine koje se mjere opterećene greškom koju nije moguće utvrditi. Stoga se i odabir ove vrijednosti za usporedbu mora izvršiti na način koji će dati veću pouzdanost odabranoj inženjerskoj granici.

Prije odabira postupka za određivanje vrijednosti za usporedbu, potrebno je dokazati da se proračuni vrše unutar jednog osnovnog skupa podataka. Takve analiza potrebno je izvršiti s gradivom iz pozajmišta. Za gradiva koja će se koristiti za nasipe potrebno je odrediti pripadnost istom osnovnom skupu pomoću statističkih testova, da bi se za njih mogla odrediti DIG. U toku izvođenja radova može doći do odabira novih pozajmišta pa postupak statističke provjere pripadnosti istom osnovnom skupu treba ponoviti (slika 5.13). Proizlazi da za prirodna gradiva nije moguće jednoznačno unaprijed odrediti inženjerska granice, već je potrebno pratiti sve promjene tijekom izvođenja i inženjerske granice prilagoditi trenutno raspoloživoj kakvoći gradiva.



Slika 5.13 Promjena svojstava gline tijekom razdoblja građenja (Roje-Bonacci, 1994.)

### 5.2.2.2 Određivanje inženjerskih granica

Određivanje inženjerskih granica moguće je na dva načina. Jedan je da se one odrede na temelju prethodno poznatih („povijesnih“) podataka, odnosno analizom do tada provedenih ispitivanja, koja su služila za provjeru kakvoće, a nisu bila statistički obrađena ili da se sačini program istraživanja koji će dati podatke potrebne za utvrđivanje inženjerskih granica i postupke ispitivanja pri tako utvrđenim inženjerskim granicama.

Provjera kakvoće provodi se pomoću pojedinačnih mjerenja za određeno razdoblje ili uzoraka koji se sastoje od  $N$  pojedinačnih mjerenja (na primjer skup uzoraka prikupljen tijekom jednog mjeseca). Kod obrade pomoću uzoraka od  $N$  mjerenja u jednom uzorku određuje se srednja vrijednost,  $\bar{x}$ , i standardna devijacija,  $\sigma$ , za na pr. taj mjesec. Rezultati jedne takve analize prikazani su na slici 5.13 za granicu tečenja i suhu gustoću.

Korištenjem jednadžbi 5.8 i 5.10 pokazat će se na jednom primjeru određivanje inženjerskih granica za podatke iz primjera 1 table 5.2 uz pretpostavku da je postupak rađen s nizom pojedinačnih mjerenja.

Uvjet prema Proctorovom pokusu je  $\rho_{dmax} = 1,6 \text{ [t/m}^3\text{]}$ . Prema jednadžbi 5.8 može se pisati:

$$0,98 * 1,6 = \bar{\rho}_d - 1,28\sigma \quad (5.11)$$

a prema 5.10:

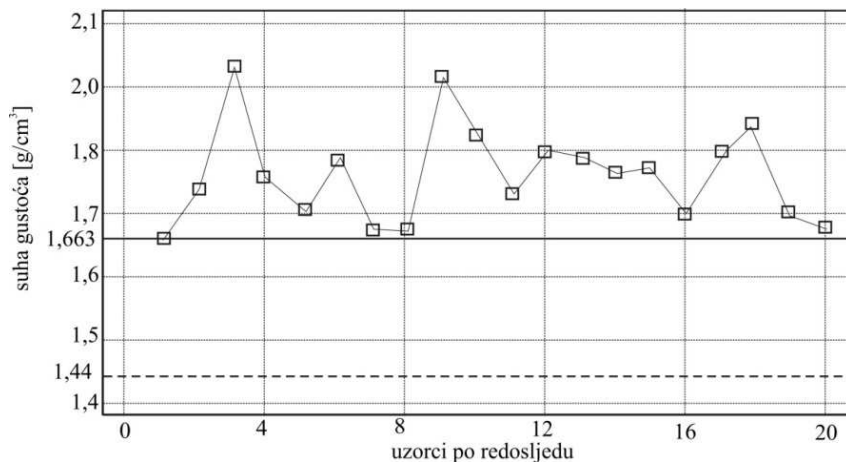
$$0,9 * 1,6 = \bar{\rho}_d - 3\sigma \quad (5.12)$$

pa izlazi da je  $\bar{\rho}_d = 1,663 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ , odnosno  $\sigma = 0,0744 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ . S tako dobivenim podacima može se nacrtati krivulja normalne raspodjele za tražene podatke, a koju bi trebali zadovoljiti i rezultati tekućih ispitivanja.

### 5.2.2.3 Kontrolne karte

Kontrolna karta je jednostavni grafički prikaz mjerenih podataka upisanih u unaprijed pripremljeni dijagram. Na osi apscisa se nalazi redni broj ispitano uzorka u vremenskom slijedu, a na osi ordinata vrijednosti ispitano obilježja.

U kontrolnu se kartu ucrtava srednja vrijednost obilježja izračunato prethodno prikazanim postupkom (na pr.  $\bar{\rho}_d = 1,663 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ ) i donja granica koja je za  $3 * \sigma$  (na primjer  $3 * 0,0744 = 0,2232 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ ) manja od dobivene srednje vrijednosti, a uključuje izračunatu standardnu devijaciju ( $DIG_2 = 1,663 - 0,2232 = 1,4398 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ ). Kontrolna je karta prikazana na slici 5.14.



Slika 5.14 Primjer kontrolne karte s dvadeset podataka suhe gustoće (Roje-Bonacci 1994.)

### 5.3 KONTROLNA ISPITIVANJA

Kontrolna ispitivanja propisana su u tehničkim uvjetima izvedbe ili onako kako je propisano u OTU. Tijekom izvedbe nasipa mijenja se izvor gradiva, bilo da se radi o onom iz usjeka ili onom iz pozajmišta. Stoga je nužno pažljivo pratiti tekuća ispitivanja da bi se uočile moguće promjene u sastavu i kakvoći gradiva za nasip. To upućuje također na potrebu provedbe kontrolnih ispitivanja.

#### 5.3.1 Kontrolna ispitivanja tijekom građenja

Ako se uoče promjene nekog od svojstava gradiva, potrebno je osim razredbenih pokusa, optimalne vlažnosti, provesti, odnosno ponoviti i dodatna, složenija ispitivanja da bi se utvrdila fizičko-mehanička svojstva tla kao što su:

- Proctorov pokus,
- ispitivanje stišljivosti u edometru,
- ispitivanja vodopropusnosti,
- parametri čvrstoće na smicanje.

Za nekoherentna tla to je:

- ispitivanje probnom pločom Ø30 cm,
- ispitivanje granulometrijskog sastava.

Pomoću dobivenih podataka provjeravaju se proračuni temeljem kojih je nasip projektiran i dimenzioniran.

Prethodno je pokazano kako se tijekom građenja mogu promijeniti svojstva tla koje se ugrađuje. Kontrolna ispitivanja, temeljem kojih su izvršena sva potrebna dimenzioniranja i proračuni, služe za popravke i provjere, koje je potrebno unijeti u projekt, a nastala su uslijed promjene svojstava tla koje se ugrađuje.

#### 5.3.2 Kriteriji kakvoće i kontrola nakon ugradnje

Da bi se zadovoljili uvjeti predviđeni projektom u smislu stabilnosti, nosivosti i slijeganja, nasipi nakon ugradnje moraju imati propisanu kakvoću. Njih za ceste i prometne površine propisuju OTU za ceste. Prema uvjetima ugradnje razlikuju se niski i visoki nasipi uz pretpostavku da temeljno tlo zadovoljava svojom kakvoćom. Uvjeti su dani u tabeli 5.3.

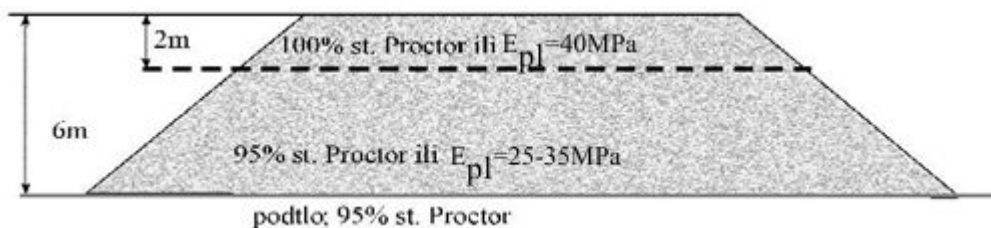
Pretpostavka je da su u laboratoriju, na umjetnim uzorcima (umjetno zbijeni primjerak, prema EC 7 dio 2.), zbijenim s odgovarajućim vlažnostima, izvršena ispitivanja svih potrebnih parametara za proračun i dimenzioniranje nasipa.



Tabela 5.3 Kriteriji kakvoće ugradnje zemljanog tla u nasipe

Položaj nasipnih slojeva	Stupanj zbijenosti $S_z$ najmanje [%] (u odnosu na rezultat standardnog Proctora)	Modul stišljivosti $E_{pl}$ (ploča $\varnothing 30$ cm) najmanje [MN/m <sup>2</sup> ]
a) slojevi nasipa visokih preko 2 m na dijelu od podnožja nasipa do visine 2 m ispod planuma posteljice	95	20
b) slojevi nasipa nižih od 1 m i slojevi nasipa viših od 2 m u zoni 2 m ispod planuma posteljice	100	25

Opisana područja nasipa prikazana su na slici 5.15.



Slika 5.15 Propisana zbijenost visokog nasipa

**dio II**  
nasipi i male brane



## 6 OPĆENITO

U ovom poglavlju razmatrati će se nasipi koji se kontrolirano grade na dobroj ili unaprijed uređenoj podlozi (za načine uređenja podloge vidi Roje-Bonacci, 2010. i 2012.). Naglasak će biti na nasipima koji se izvode uz kontrolirano zbijanje iako je to samo dio građevina koje spadaju pod naziv NASIPI.

Nasipi, kao i sve ostale geotehničke građevine, podliježu propisima prema EC7, (EN 1997-1-2004 Eurocode 7: Geotehničko projektiranje – Dio 1.: Opća pravila i EN 1997-2-2007 Eurocode 7: Geotehničko projektiranje – Dio 2.: Istraživanja i ispitivanja tla). Na nasipe se iz dijela 1 odnose: poglavlje 5 Nasipavanje, odvodnja, poboljšanje i ojačanje temeljnoga tla (na izvedbu nasipa), poglavlje 10 Hidraulički slom i poglavlje 12 Nasipi, koje se odnosi na nasipe i male brane za infrastrukturu. Iz dijela 2 se na nasipe odnosi sve što govori o „građivu“. Podrazumijeva se tlo kao građivo i govori o umjetnim uzorcima i zbijanju tla. Osim propisa, pri projektiranju i izvođenju nasipa, potrebno se pridržavati Općih tehničkih uvjeta za radove na cestama (OTU, 2001), knjiga 2 Nasipi i Općih tehničkih uvjeta za radove u vodnom gospodarstvu (OTU, 2010), knjiga 2 Gradnja i održavanje komunalnih vodnih građevina, poglavlje 12 Geotehnički radovi. Već odavde se vidi da se radi o građevinama koje imaju široku i raznoliku namjenu.



Slika 6.1 Zračna luka u Kobe-u, Japan, izgrađena na umjetnom otoku (nasipu)

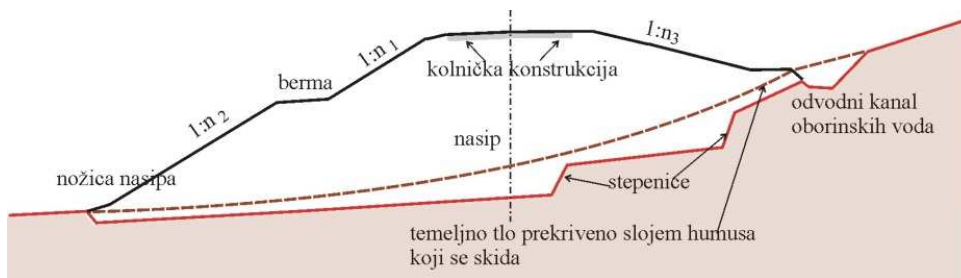
## 6.1 VRSTE NASIPA

Ovisno o namjeni nasipa, za svaki je pojedini nasip potrebno prilagoditi obim i vrstu proračuna. Prema *namjeni* se mogu podijeliti na nasipe:

### 6.1.1 Za prometnice

#### Za cestovnu infrastrukturu:

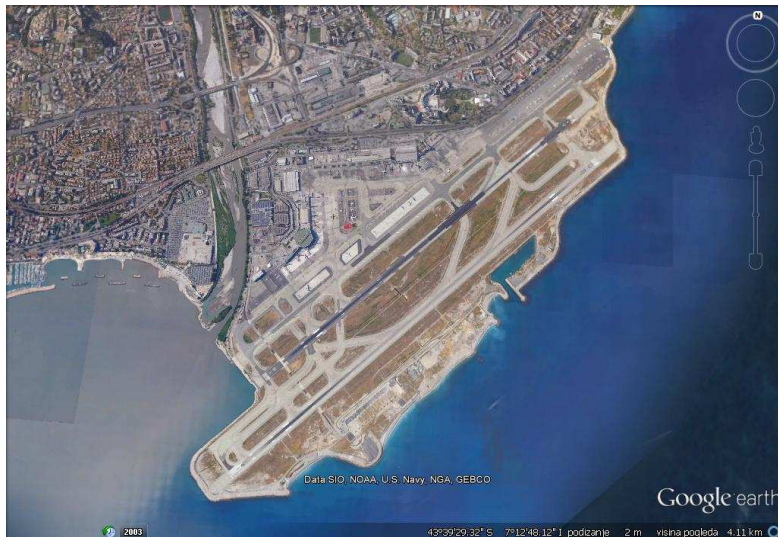
- nasipi za autoceste;
- nasipi za brze ceste i gradske obilaznice;
- nasipi za lokalne ceste;
- nasipi za zaštitu od buke;
- nasipi za parkirališta.



Slika 6.2 Cestovni nasip s bitnim dijelovima

#### Za aerodrome:

- nasipi za piste;
- nasipi za stajanke;
- nasipi za pomoćne radne površine



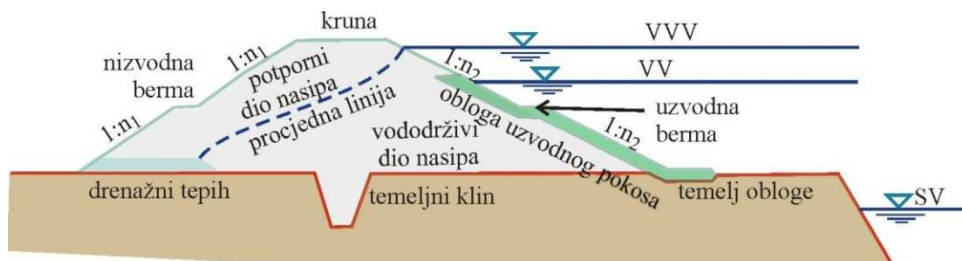
Slika 6.3 Zračna luka u Nici, Francuska, izvedena na nasipu u moru

### 6.1.2 Za željeznicu:

- nasipi za željeznice normalnih brzina;
- nasipi za željeznicu velikih brzina;
- nasipi za kolodvore i remontne pogone.

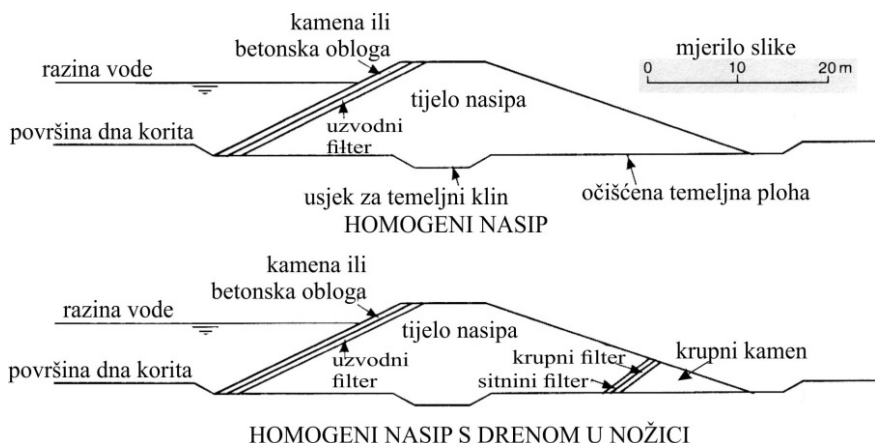
### 6.1.3 Za hidrotehničke nasipe

- velike brane (nisu predmet ovog rada);
- brane i dolinske pregrade;
- nasipi za oblikovanje kanala raznih namjena;
- nasipi za obranu od poplava;
- nasipi za regulacije vodotoka;
- nasipi u lukama i plovnim putovima;
- valobrani.



Slika 6.4 Hidrotehnički nasip s bitnim dijelovima

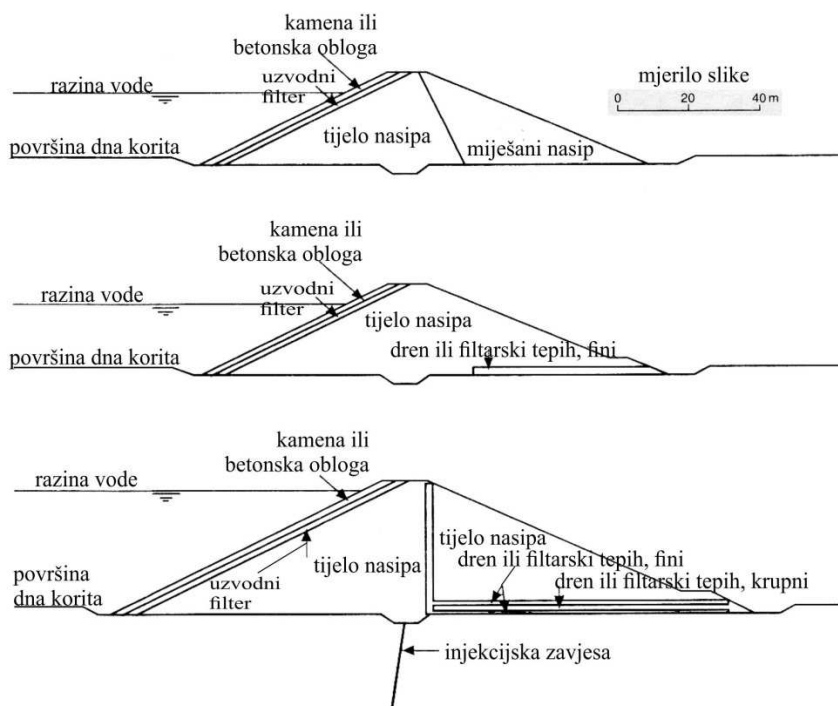
Drenažni tepih na zračnoj strani nasipa može se zamijeniti s trapezastim ili trokutastim drenažnim klinom (slika 6.5) ili se može ugraditi centralni dren spojen s drenažnim tepihom (slika 6.6).



Slika 6.5 Dva jednostavna poprečna presjeka zemljanih dolinskih pregrada (Fell i dr. 2015.)

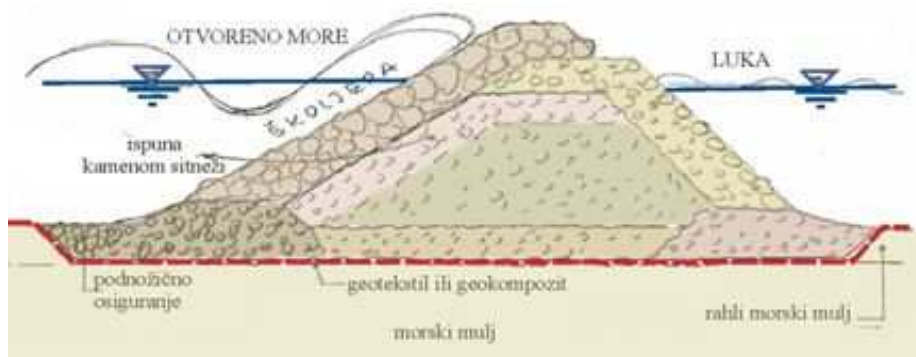
Slično hidrotehničkom nasipu sa slike 6.4 izgleda i dolinska pregrada. Kako ona trajno drži vodu mora imati vododrživi dio. To može biti vodonepropusni uzvodni

ekran (asfaltni, betonski ili nepropusna folija) ili mora imati vodonepropusnu jezgru, koja može biti različitih izvedbi (glinena uspravna ili kosa, glinobetonska, mlazno injektirani niz stupnjaka i slično). Za produženje toka vode može se kod dolinskih pregrada uzvodna, nepropusna obloga produžiti po dnu na uzvodnoj strani. Postoji niz različitih projektnih rješenja ovisno o konkretnom slučaju.



Slika 6.6 Složenije male brane, dolinske pregrade (Fell i dr. 2015.)

Posebna vrsta nasipa su nasipi za lučke građevine. Oni se izvode ugradnjom u vodu bez mogućnosti nabijanja. Primjer kamenog nasipa-valobrana prikazan je na slici 6.7.



Slika 6.7 Valobran

Ponekad nasipi mogu biti i višenamjenski, kako je to prikazano na slikama 6.8 i 6.9. Na slici 6.8 prikazan je hidrotehnički nasip za obranu od poplave koji štiti naselje, a ujedno je i trup autoceste.



Slika 6.8 Hidrotehnički nasip koji je ujedno i trup autoceste

Na slici 6.9 prikazan je trup željezničke pruge koji je ujedno i hidrotehnički nasip za obranu od poplava.

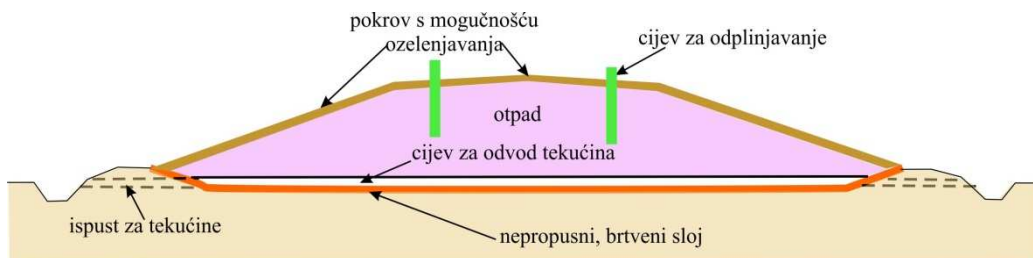


Slika 6.9 Željeznički nasip ujedno nasip za obranu od poplave



#### 6.1.4 Nasipi za posebne potrebe

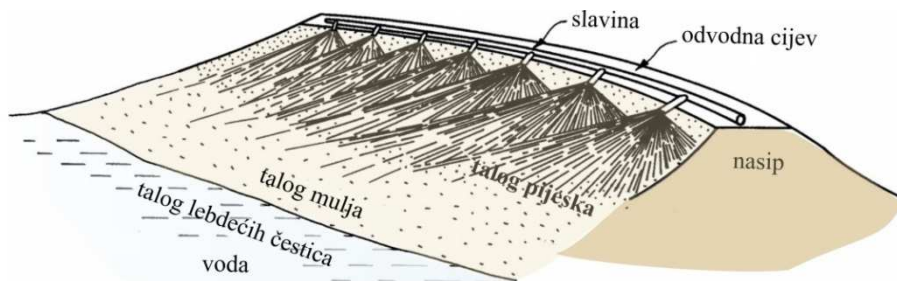
- nasipi za kontejnerske terminale;
- nasipi za platoe različitih namjena (rasute terete);
- nasipi za umjetne otoke, zagate i sl.;
- nasipi komunalnog otpada;
- nasipi industrijskog otpada.



Slika 6.10 Sanirani nasip komunalnog (industrijskog) otpada)

Nasipi industrijskog otpada mogu se podijeliti na dvije vrste:

- nasipi samog industrijskog otpada;
- nasipi za zadržavanje industrijskog otpada u određenom prostoru.



Slika 6.11 Nasip za zadržavanje krajnjeg ostatka industrijskog otpada (Fell i dr. 2015.)

## 6.2 NASIPI PREMA NAČINU IZRADE

- ovisno o tlu i mjestu na koje se nasipa i
- ovisno o načinu na koji se nasipa.

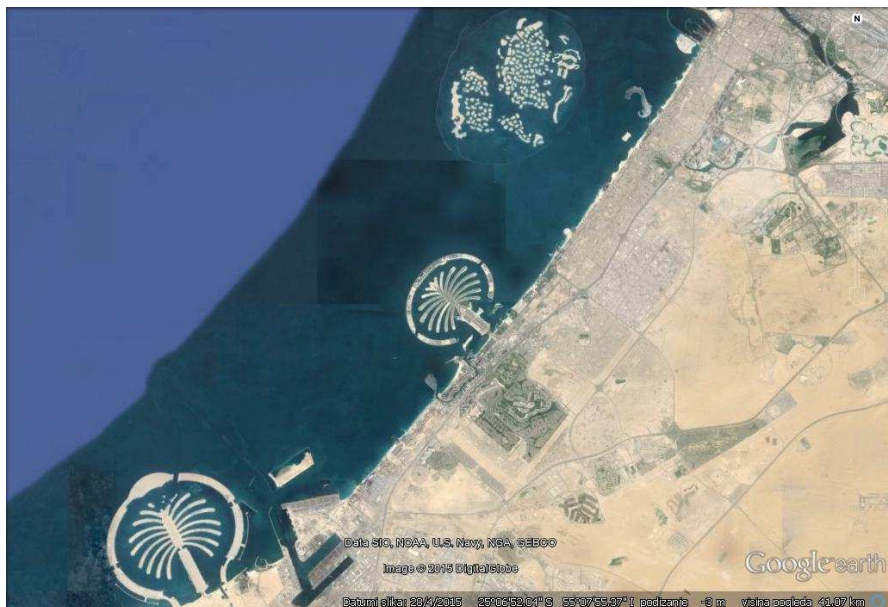
### 6.2.1 Ovisno o tlu i mjestu

Ovisno o *tlu i mjestu*, nasipati se može na

- na dobro nosivom tlu,
- na loše nosivom tlu,
- uz objekte.

Nasipavanje uz objekte je vrlo osjetljivo. Tu često dolazi do raznih vrsta oštećenja, kao što su visinske razlike na prijelazu na vijadukt ili most, nastale uslijed slijeganja nasipa, pojava pukotina uz betonske dijelove građevine i slična oštećenja.

Da izgradnja nasipa može biti i besmislena, pokazuju nasipi u moru – umjetni otoci, u Ujedinjenim Arapskim Emiratima.



Slika 6.12 Tri skupine umjetnih otoka izvedene refuliranjem pijeska, Dubai. Prikaz svijeta (gore u sredini) pomalo tone, a otoci se spajaju, prema NASSA (<http://www.dailymail.co.uk/>)

## 6.2.2 Prema načinu nasipavanja

### 6.2.2.1 Nasipavanje bez zbijanja

- nasipavanje s čela,
- nasipavanje bočno,
- nasipavanje kamenometa,
- refuliranje,
- nasipavanje sa skele.

### 6.2.2.2 Nasipavanje sa zbijanjem

Prema *gradivu za nasip*, koje se propisuje projektom, OTU (2001 i 2010) predviđa izradu nasipa od:

- zemljanih materijala;
- miješanih materijala;
- kamenitih materijala.

S obzirom na mnoge raznolikosti koje se javljaju u izradi nasipa, jasno je da će se kod projektiranja trebati raspolagati s određenim, za pojedinu lokaciju i namjenu konkretnim i detaljnim podacima kako o gradivu tako i o podtemeljnom tlu i načinu izvedbe.

### 6.3 NASIPI PREMA SLOŽENOSTI POPREČNOG PRESJEKA

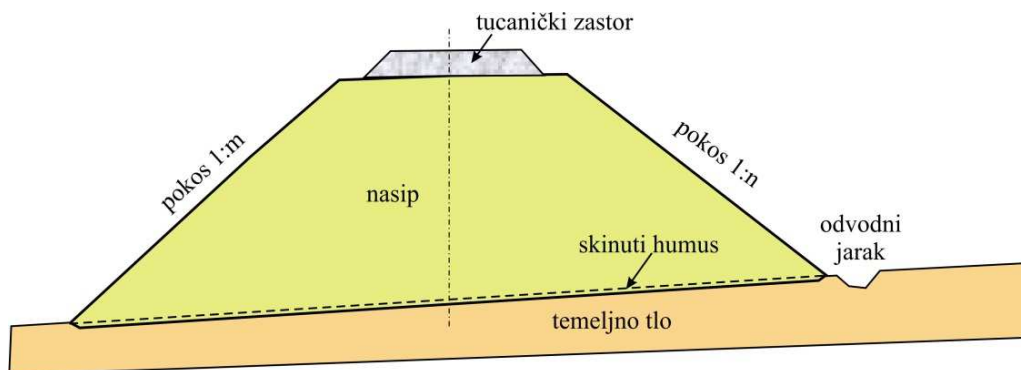
Prema vrsti gradiva ugrađenog u nasipe mogu biti:

- 1) isključivo nasuti:
  - homogeni, najčešće trapezni;
  - zonirani, trapezni i razvijenih oblika
- 2) složeni nasipi
  - s građevinom na kruni;
  - s građevinom na uzvodnoj strani;
  - s građevinom unutar nasipa.

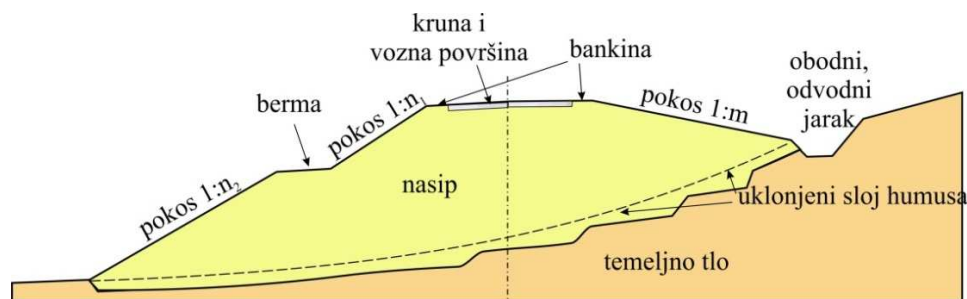
#### 6.3.1 Isključivo nasuti nasipi

##### 6.3.1.1 Homogeni nasipi

Homogeni nasipi su svi nasipi za ceste, a koji ne služe ujedno i kao hidrotehnički nasipi. Oni mogu imati berme, naročito ako se nalaze na lošem temeljnom tlu, pa je potrebno osigurati kosine od podnožičnog klizanja. Takav je nasip prikazan na slici 6.14. Slično je i sa željezničkim nasipima, slika 6.13. Iako homogeni, ovi nasipi u nekim slučajevima imaju dijelove, kao na pr. zaštite pokosa, izvedene od nekog drugog, prikladnog gradiva.

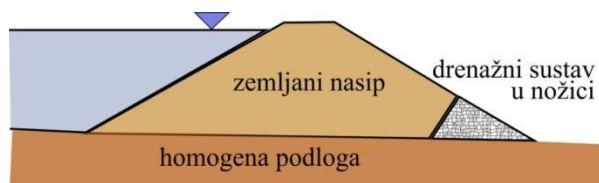


Slika 6.13 Shematski prikaz željezničkog nasipa s osnovnim elementima

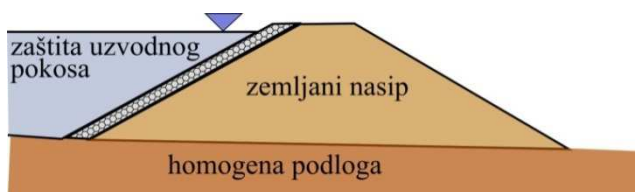


Slika 6.14 Standardizirani poprečni presjek cestovnog nasipa

Homogeni nasipi, naročito hidrotehnički, ne moraju uvijek biti strogo homogeni. Oni moraju sadržavati dijelove za zaštitu od svih mogućih štetnih djelovanja. Nekoliko je primjera prikazano na slikama koje slijede (prema CIRIA C731, (2013.).

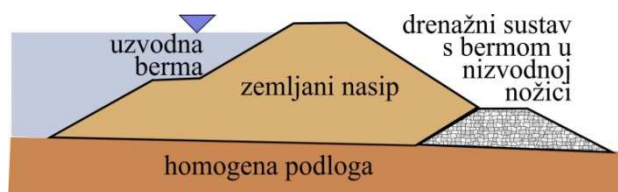


Slika 6.15 Homogeni nasip s drenom u nožici na homogenoj podlozi



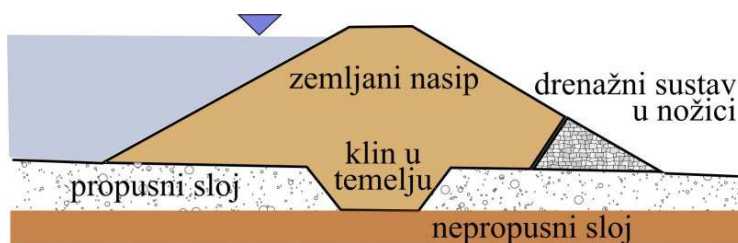
Slika 6.16 Homogeni nasip sa zaštitom uzvodnog pokosa na homogenoj podlozi

Nasip sa slike 6.16, može biti i cestovni i/ili željeznički s oba pokosa obložena nekim od načina zaštite od površinske erozije.

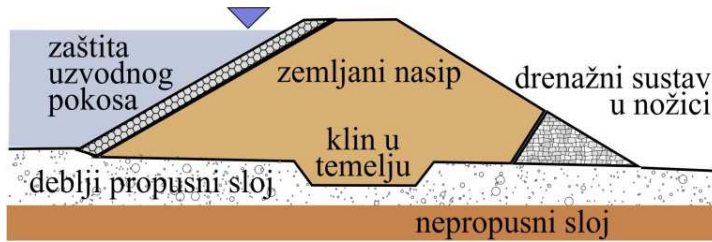


Slika 6.17 Homogeni hidrotehnički nasip s bermo i drenom u nožici na homogenoj podlozi

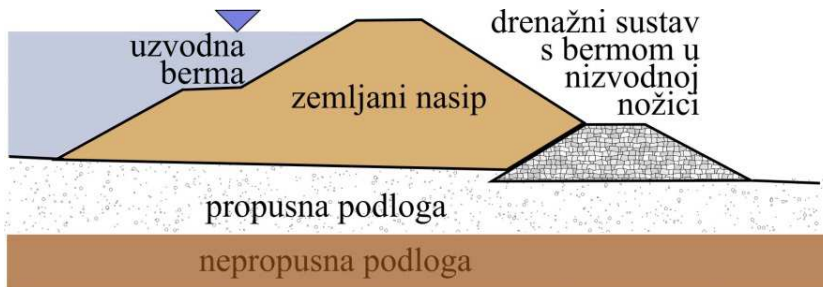
Složeniji je slučaj homogenog nasipa na višeslojnom tlu s različitim odnosima vodopropusnosti. Mogućnosti su prikazane na sljedećim crtežima (prema CIRIA C731).



Slika 6.18 Homogeni nasip na tankoj propusnoj podlozi s klinom u temelju i nizvodnim drenom

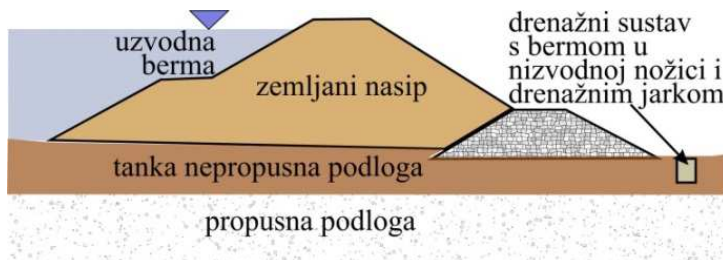


Slika 6.19 Homogeni nasip na debljoj propusnoj podlozi s klinom u temelju, oblogom uzvodnog pokosa i izvodnim drenom

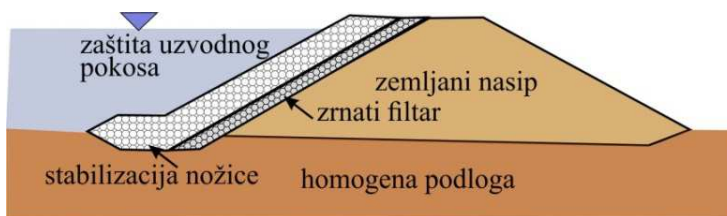


Slika 6.20 Homogeni nasip na debeloj, propusnoj podlozi s bermom i nizvodnim drenom

Slijedi nekoliko primjera nasipa na tankoj nepropusnoj podlozi. Ovi su hidrotehnički nasipi naročito osjetljivi na pojavu povratne erozije uslijed proboja tankog, nepropusnog sloja.



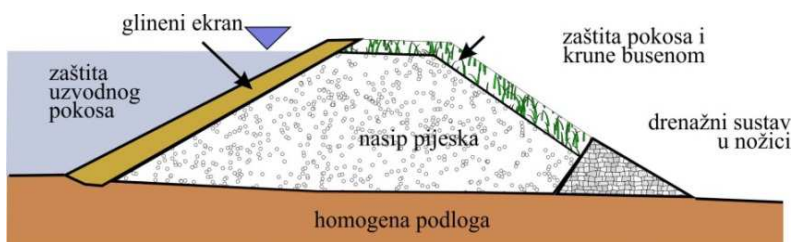
Slika 6.21 Hidrotehnički nasip na tankoj nepropusnoj podlozi - povratna erozija



Slika 6.22 Hidrotehnički homogeni nasip na homogenoj podlozi, izložen snažnom valovanju

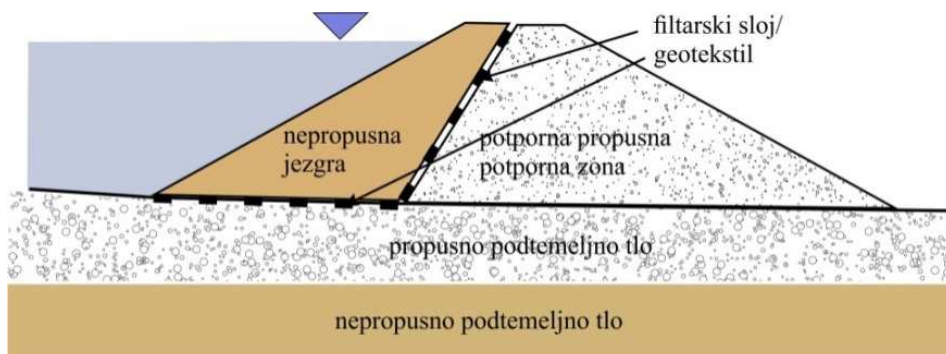
### 6.3.1.2 Zonirani nasipi

Zonirani nasipi se izvode od raznovrsnih gradiva, kada lokalno nema dovoljno odgovarajućeg za izvedbu punog tijela od istovrsnog tla. Kako je za nasipe potrebna velika količina gradiva za nasipavanje, to se pri njihovoj izvedbi nastoji koristiti što je više moguće lokalno gradivo koje ne zahtijeva prijevoz na velike udaljenosti. To uvijek nije moguće postići te se tada ugrađuje lokalno gradivo koje se dopunjuje s gradivom potrebne kakvoće ili raznim viškovima.

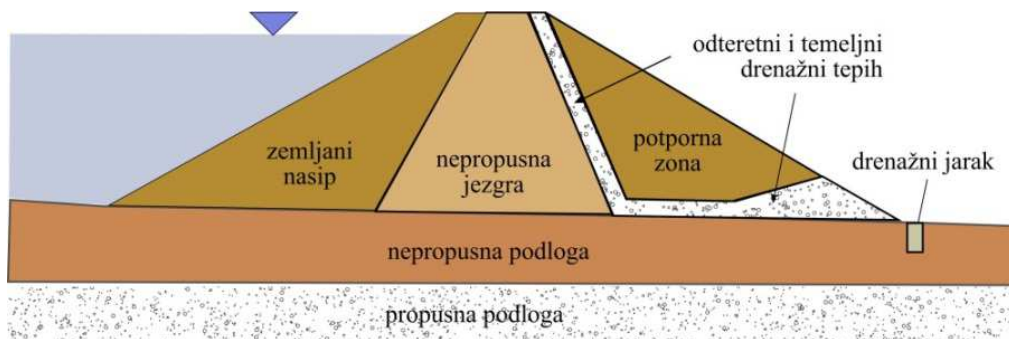


Slika 6.23 Zonirani nasip, osnova pijesak na nepropusnoj podlozi s različitim zaštitama od površinske erozije

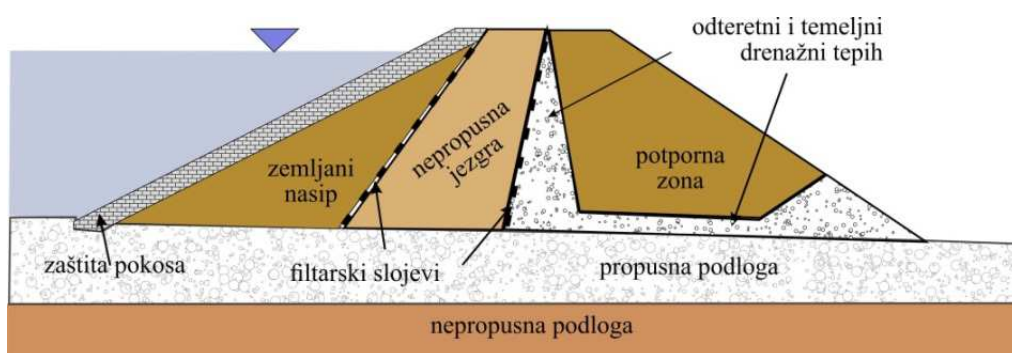
U području gdje se raspoložuje s većim količinama kamena i/ili šljunka i mješavina šljunka i pijeska, potrebno je zoniranjem osigurati potrebnu vodonepropusnost. U nasipe se mogu ugraditi i viškovi raznih industrijskih ostataka koji se ugrađuju u određene dijelove nasipa. Već takvi nasipi predstavljaju zonirane nasipe. Kada je tijelo nasipa pretežito izvedeno od vodopropusnog gradiva potrebno je koristiti dodatno vodonepropusno gradivo za osiguranje vododrživosti. Ono može biti ugrađeno kao vodonepropusna jezgra. Zoniranje je uvjetovano i svojstvima podloge. Različiti su uvjeti izvedbe nasipa na nepropusnoj odnosno propusnoj podlozi. Sve naprijed rečeno pokazuje složenost zahtjeva koje treba zadovoljiti koristeći gradivo različitih svojstava za izradu zoniranih nasipa. U nastavku će biti prikazano nekoliko primjera zoniranih nasipa.



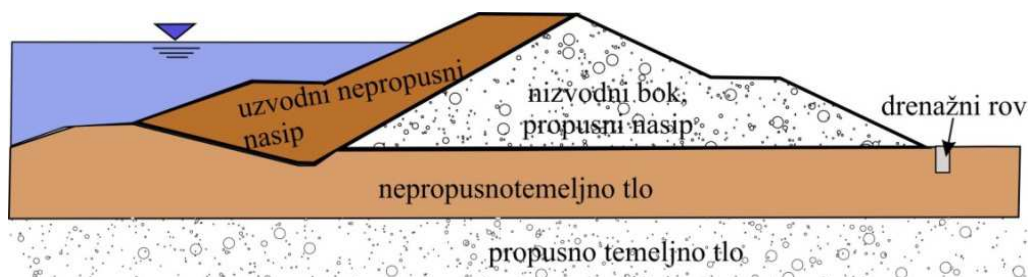
Slika 6.24 Zonirani nasip na propusnoj podlozi



Slika 6.25 Višestruko zonirani nasip na tankoj nepropusnoj podlozi sa zaštitom od povratne erozije kroz podlogu



Slika 6.26 Višestruko zonirani nasip na propusnoj podlozi



Slika 6.27 Višestruko zonirani nasip složene geometrije poprečnog presjeka na nepropusnoj podlozi sa zaštitom od povratne erozije kroz podlogu

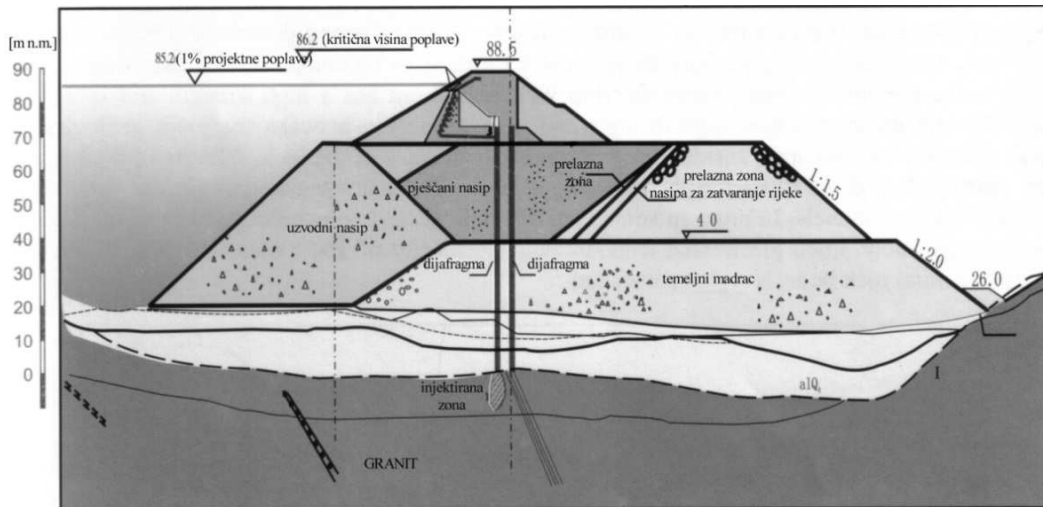
(slike 6.15-6.27 prema CIRIA C731, 2013.).

### 6.3.1.3 Složeni nasipi

Ovo su nasipi koji osim dijela koji je izveden standardnim postupcima nasipanja imaju još neke dodatke od drugih vrsta građiva. To može biti betonski zid, čelično žmurje, glinobetska dijafragma i slični građevinski dijelovi. Česti primjer za ovo je nadvišenje, proširenje i nadogradnja starih, homogenih nasipa.

Tu spadaju i različiti složeni zagati koji su privremene građevine, ali moraju za vrijeme svog trajanja zadovoljiti visoke zahtjeve zaštite građevne jame koju štite. To može biti nasuti zagat s betonskim zidom na kruni i injekcionom zavjesom u tijelu nasipa, Nasuti zagat s glinobetonskom jezgrom ili čeličnim žmurjem u sredini, što ovisi o vrsti tla ugrađenog u nasip, a kroz koji treba ugraditi vododrživi dio.

Slično tome je i nasip – zagat, za zaštitu građevne jame brane Tri Klanca na rijeci Yang-Ce u Kini prikazan na slijedećoj slici.



Slika 6.28 Višestruko složeni uzvodni zagat građevne jame za branu Tri Klanca

Ovo je netipičan nasip jer je veoma visok, preko 80 metara, sastavljen od niza dijelova s armirano-betonskim elementom L-profila neposredno ispod krune, u samom nasipu, dvostrukom dijafragmom u tijelu nasipa, do granitne podloge i injektiranim dijelom granitne podloge ispod dijafragmi. Ovo je zagat koji po svojim osobinama spada u velike brane. Morao je trajati više od deset godina da bi na kraju svojeg uporabnog vremena bio potopljen u jezero iza brane Tri Klanca.

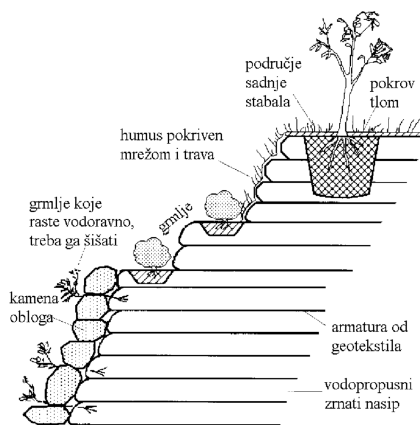


Slika 6.29 Ugradnja čeličnog (Larsen) žmurja i geotekstila pri sanaciji nasipa u Istočnoj Slavoniji 2014.



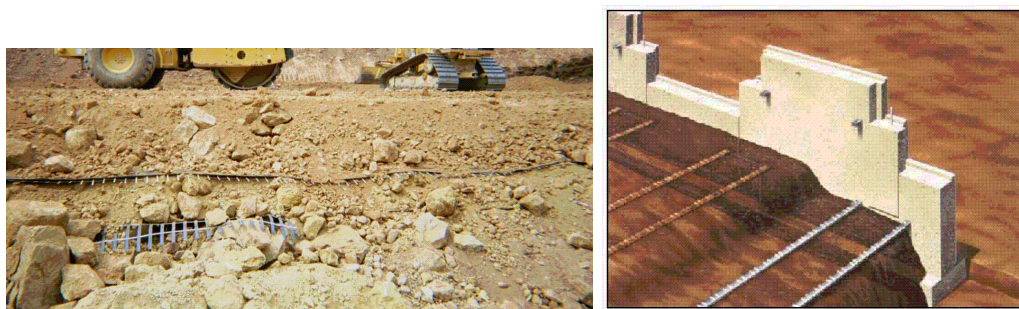
Kombinacije nasipa i zida za oblikovanje dolinskih pregrada, poznata je odavno na što ukazuje brana Marib iz Jemena, prikazana u uvodu kao i brana Prosperina, Španjolska.

Nova gradiva kao što su geotekstili, geomreže i druge vrste armatura za tlo, proširuju mogućnost unošenja vlačne čvrstoće u gradivo nasipa, koje ono samo po sebi nema. Jedan primjer dan je na slici 6.30. (više vidi u Roje-Bonacci, 2005.)



Slika 6.30 Nasip, armiran geotekstilom s uređenim i ozelenjenim pokosom (Roje-Bonacci, 2005.)

Armirano ili ojačano tlo može bitno ustrmiti nagib vanjskog lica nasipa čak i onda kada nema zaštite na licu, čime se bitno može uštedjeti na količini gradiva (slika 6.31).



Slika 6.31 Nasip armiranim geomrežom, bez lica, lijevo i zategama s licem, desno

Nasipi od ojačanog tla s licem mogu imati izgledati vrlo dekorativno, a u kombinaciji sa zelenilom mogu utjecati na uređenje okoliša, što je pogodno za izvedbu u urbanim sredinama.

## 6.4 DIJELOVI NASIPA

Prva pomisao na osnovni oblik nasipa je trapezni (slika 6.32). Većina nasipa i ima takav oblik, pogotovo nasipa za prometnice (slike 6.13 i 6.14) i veliki dio hidrotehničkih nasipa (slike 6.15 do 6.22). Međutim to nije jedini danas poznati oblik nasipa.

Kameni nasipi željezničkih pruga s početka 20. stoljeća, izvodili su se s vrlo strmim pokosima, ručno oblaganim kamenom – „rolirani pokos“, koji traju još i do danas bez potrebe za većim popravcima. Naravno to vrijedi isključivo za pruge brzina do 80 (100) km/sat. Jedan takav nasip prikazan je na slici 6.33.



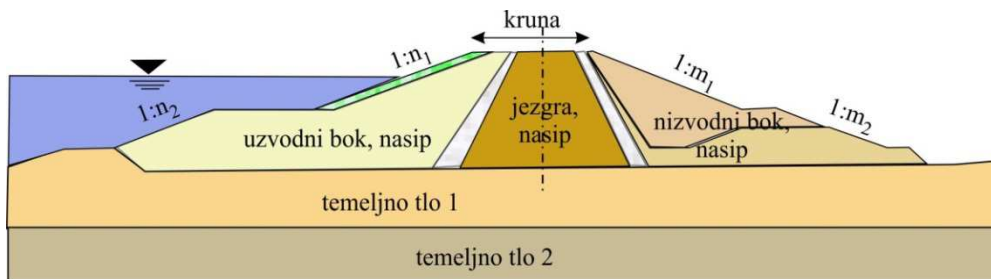
Slika 6.32 Željeznički, zemljani nasip trapeznog presjeka [www.zeljeznice.net](http://www.zeljeznice.net)



Slika 6.33 Strmi kameni željeznički nasip, u pozadini kameni potporni zid  
<http://ivanica.freshcreator.com/>

Oblik cestovnih nasipa ovisi o kategoriji prometnice za koju se izvodi. Razlikuju se cestovni nasipi za šumske ceste, koji su vrlo jednostavni i bez naročitih dodatnih elemenata. Nasipi za autoceste (slika 6.35), s druge strane, moraju imati niz elemenata koji im osiguravaju stabilnost i uporabivost za projektirani vijek trajanja, uz stalno održavanje.

Naročito složeni su oblici hidrotehničkih nasipa (slika 6.34), koji moraju sadržavati i sve elemente zaštite od štetnog djelovanja vode, opisanog u poglavlju 8.



Slika 6.34 Složeni hidrotehnički nasip

Lako je uočljivo kako je hidrotehnički nasip mnogo složenije građe od cestovnih i željezničkih, kada ovi posljednji nemaju nikakvu drugu funkciju osim da budu trup prometnice. Prikazani hidrotehnički nasip odgovarao bi nasipu koji trajno drži vodu (dolinska pregrada) te stoga mora imati sve potrebne dijelove koji osiguravanju stabilnost, sigurnost, uporabivost i trajnost građevine.

Pojedini dijelovi nasipa i njihova zadaća u stabilnosti i uporabivosti građevine, potanko su opisani u poglavlju 9



Slika 6.35 Visoki kameni nasip obložen gabionima na autocesti A1 kod tunela Sveti Rok

## 7 PRORAČUNI

Za nasipe općenito treba izvršiti proračun:

- stabilnosti kosima pod korisnim opterećenjem;
- slijeganje nasipa i
- slijeganje podloge ispod nasipa pod opterećenjem nasipom i korisnim teretom.

**Hidrotehnički** nasipi imaju dodatne zahtjeve glede proračuna. To su građevine na koje jednostrano djeluje voda. Utjecaj vode na nasipe potrebno je posebno razmotriti prilikom planiranja, projektiranja, dimenzioniranja i izvedbe. Prema Foster i dr. (2000.) i Fell i dr. (2015.), (temeljem analiza ICOLD-a, 1995., za 11192 nasute brane), najčešća su tri uzroka rušenja kod velikih brana. To se može primijeniti i za hidrotehničke nasipe, redom prema učestalosti:

- prelijevanje, (48% od ukupno urušenih nasipa);
- unutarnja erozija i cijevljenje (46% od ukupno urušenih nasipa) i
- klizanje (6% od ukupno urušenih nasipa).

Unutarnja erozija može se pojaviti kao:

- koncentrirano curenje;
  - kroz nasip,
  - kroz podlogu.
- povratna erozija;
- sufozija;
- erozija na dodiru nasip-objekt.

Klizanje može nastati na:

- uzvodnoj kosini;
- nizvodnoj kosini;
- bokovima, obalama novonastalog jezera, i uzrokovati prelijevanje.

Zato je za hidrotehničke nasipe potrebno dodatno provjeriti stabilnost i sigurnost na niz hidrostatičkih i hidrodinamičkih utjecaja koji obuhvaćaju:

- analizu procjeđivanja kroz hidrotehničke nasipe;
  - količinu procjeđivanja,
  - utjecaj hidrodinamičkih sila na stabilnost pokosa nasipa,
  - pojavu ispiranja čestica iz nasipa (hidraulički slom),
- analizu procjeđivanja kroz tlo ispod nasipa;
  - količinu procjeđivanja,
  - moguće ispiranje čestica temeljnog tla (hidraulički slom) ispod nasipa,
  - utjecaj uzgona na sloj temeljnog tla na nizvodnoj strani nasipa, uslijed razlike potencijala vanjske i zaobalne vode, (povratna erozija),
- analizu hidrodinamičkog djelovanja vode;
  - utjecaj prelijevanja (do kojeg ne bi smjelo doći),
  - udar vodene struje,
  - utjecaj virova nizvodno od izbočenih dijelova nasipa,
  - utjecaj valova i moguća tako nastala oštećenja,
  - utjecaj udara ledenih santi.

Proračune treba provesti prema EC7 za granično stanje nosivosti i granično stanje uporabivosti. Za ove je građevine potrebno slijediti sadržaje poglavlja 5, 10, 11 i 12. Preporuča se korištenje dodatnih uputa u CIRIA C731 i CIRIA C749.

Prema EC7 poglavlju 12 treba učiniti sljedeće:

„(1)P Mora se **sastaviti popis graničnih stanja** koje će se provjeravati u proračunu nasipa.

(2) Treba provjeravati sljedeća granična stanja:

- gubitak opće stabilnosti lokacije
- slom kosine ili krune nasipa
- slom prouzročen unutarnjom erozijom
- slom prouzročen površinskom erozijom ili podlokavanjem
- deformiranje nasipa koje vodi do gubitka uporabljivosti, npr. prekomjerna slijeganja ili pukotine
- slijeganja i pomaci od puzanja koji vode do oštećenja ili gubitka uporabljivosti susjednih građevina ili instalacija
- prekomjerno deformiranje prijelaznih područja, npr. prilaznog nasipa za upornjak mosta
- gubitak uporabljivosti prometnih površina uslijed klimatskih utjecaja kao što su zamrzavanje i odmrzavanje ili izuzetno jako sušenje
- puzanje kosina tijekom razdoblja zamrzavanja i odmrzavanja
- razgradnja krupnog gradiva u podlozi uslijed velikih prometnih opterećenja
- deformiranje prouzročeno hidrauličkim djelovanjima
- promjene uvjeta u okolišu kao što su onečišćenje površine ili podzemne vode, buka ili vibracije.“

Treba uvažiti točku 12.5 „Proračun graničnog stanja nosivosti“ i točku 12.6 “ Proračun graničnog stanja uporabivosti“.

#### 7.1.1 Dopuna propisa EC 7 za nasipe za obranu od poplava

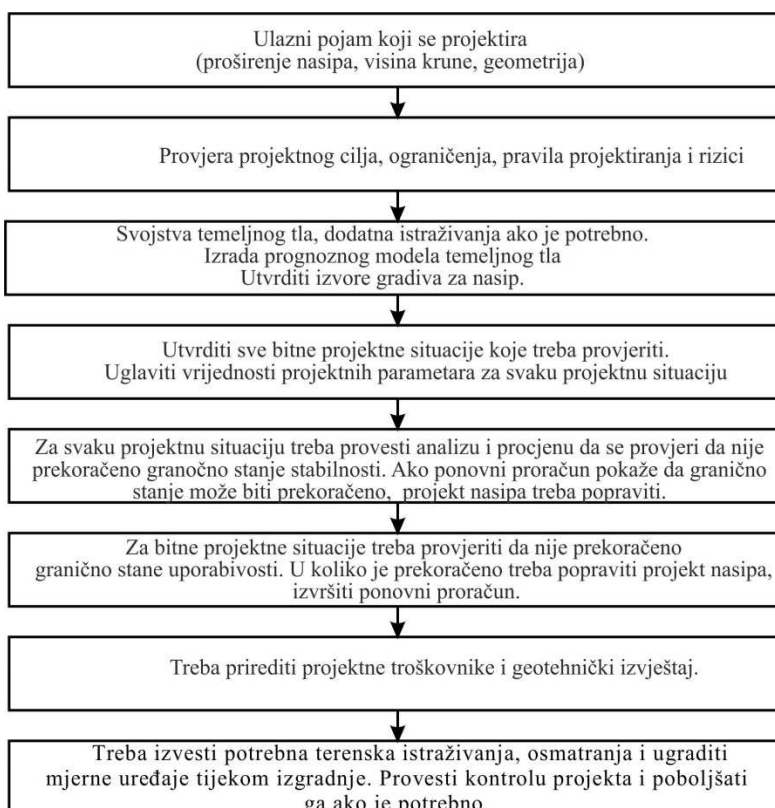
Godine 2013. CIRIA je objavila Međunarodni priručnik za nasipe (CIRIA C731). Prilikom izrade tog priručnika pokazalo se da propisi EC7, „EN 1997-1 (dio 1): opća pravila za geotehničko projektiranje i EN 1997-2 (dio 2) Zahtjevi za geotehničkim istražnim radovima i obavljanje i vrednovanje terenskih i laboratorijskih pokusa“, koji se odnose na nasipe, nisu obuhvatili sva područja projektiranja i izvođenja koja se odnose na hidrotehničke nasipe koji služe za obranu od poplava. Stoga su Velika Britanija i Irska izradile upute (vodič) za primjenu EC7 na projektiranje nasipa za obranu od poplava (Pickles i Sandham, 2014.; CIRIA C749). Svrha vodiča su nadopune i pojašnjenja vezana za projektiranje nasipa za obranu od poplava koja u spomenutim propisima (EC 7) nisu dovoljno detaljno obrađena, a to su :

- kategorizacija rizika kod nasipa za obranu od poplava;
- preoblikovanje parcijalnih faktora temeljem posljedica;
- primjenjivost graničnog stanja nosivosti (ULS);
- razlučivanje među različitim projektnim situacijama;
- utjecaj pornih tlakova u morskome i riječnome okolišu.

Dodatno, vodič upućuje na one dijelove propisa u kojima se može naći podatke o:

- svojstvima temeljnog tla;
- provjeri graničnog stanja uporabivosti (SLS);
- projektiranju građevina (nasipa za obranu od poplava) otpornih na hidraulička opterećenja;
- proračunu privremenog i trajnog stanja procjeđivanja;
- projektu nadvišenja krune i privremenih građevina u suglasju s EN 1997.

Autori preporučuju korištenje ovog vodiča zajedno s Međunarodnim priručnikom o nasipima (CIRIA C731, 2013.). U nastavku je prikazan predloženi dijagram toka za projektiranje nasipa za obranu od poplava.



Slika 7.1 Dijagram toka za projektiranje nasipa za obranu od poplava (Pickles i Sandham, 2014.)

Vodič sadrži 8 poglavlja kojima se dopunjuju nedostaci propisa potrebnih za projektiranje nasipa za obranu od poplava u EC7. Vodič je dostupan u e-formatu.

### 7.1.2 Odabir kote krune nasipa

Odabir kote krune nasipa ima različiti smisao kod nasipa za prometnice i platoe odnosno kod hidrotehničkih nasipa. Vrlo je bitno da kota krune ostane na projektiranoj visini za cijelog vijeka trajanja građevine. Stoga je potrebno osigurati da naknadno slijeganje nasipa i podloge bude različitim tehničkim zahvatima svedeno na najmanju, dozvoljenu vrijednost. Nasip je, za razliku od drugih vrsta građevina, u prednosti u toliko, što je u toku radnog vijeka građevine moguće (istina uz veće ili manje troškove), izvršiti popravke u smislu visinske kote krune nasipa.

Kod **prometnica i platoa**, kota krune mora zadovoljiti uvjet da osigura potrebnu visinsku kotu iznad koje će se ugraditi nosiva konstrukcija kolnika ili konstrukcija poda za koji je nasip izveden.

Ravnost podloge (krune nasipa) je kod nekih građevina iznimno bitna. Primjer su aerodromske piste, vozne površine brzih cesta, autocesta. Kod nekih vrsta platoa kao na pr. za kontejnerska terminale, površina platoa mora biti apsolutno vodoravna jer u suprotnom postaje upitna uporabivost platoa. Slično se događa i kod podova, u skladištima paletiziranih proizvoda, izvedenih izravno na nasipu. Pod mora biti apsolutno vodoravan inače dolazi do nagibanja paleta. One moraju biti potpuno upravne da bi se njima moglo rukovati unutar skladišta.

Hidrotehnički nasipi imaju posebne zahtjeve.

### 7.1.3 Odabir širine krune nasipa

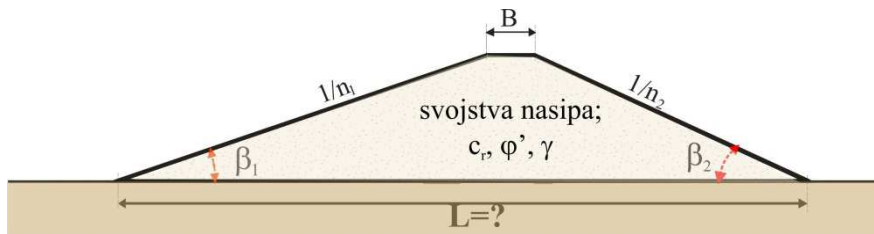
Širina krune nasipa za prometnice odabire se prema potrebnoj širini prometnice za koju se nasip izvodi. Kod platoa nema krune već je to završna površina. Hidrotehnički nasipi imaju posebne zahtjeve.

Kruna nasipa mora biti izvedena u padu, tako da se osigura površinsko otjecanje oborinske vode s nasipa u toku građenja i prilikom uporabe. Vodoravni platoi moraju imati namjenski projektiranu i izvedenu odvodnju završne površine.

### 7.1.4 Analize stabilnosti pokosa nasipa

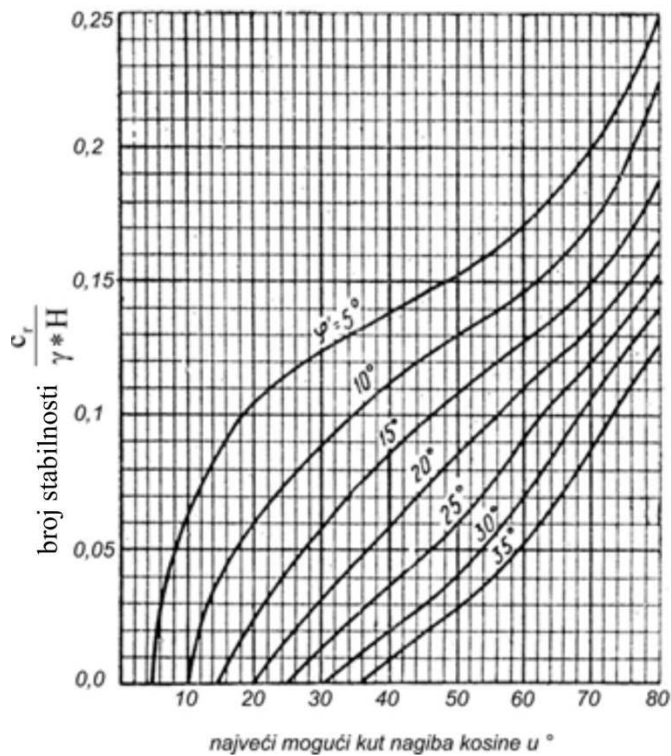
Nagibi pokosa nasipa odabiru se iskustveno. To ne znači da se ne mora provjeriti njihova stabilnost. Kod pokosa nasipa za prometnice potrebno je provjeriti stabilnost nasipa s korisnim, pokretnim teretom. Kod hidrotehničkih nasipa kritično je opterećenje silom strujnog tlaka na uzvodnoj kosini pri naglom sniženju vodostaja, a na nizvodnoj kosini nakon oblikovanja procjedne linije za stacionarno stanje tečenja.

Analizom stabilnosti treba provjeriti i podnožični slom kroz temeljno tlo, kada je ono takvih svojstva da bi se takvo klizanje moglo dogoditi.



Slika 7.2 Shema nasipa za dimenzioniranje pomoću dijagrama

Za nasipe jednostavnih, homogenih, poprečnih presjeka (kao sa slike 7.2), na čvrstoj i stabilnoj podlozi, postoje dijagrami pomoću kojih je moguće provjeriti stabilnost pokosa nasipa predviđenog projektom (slika 7.3)



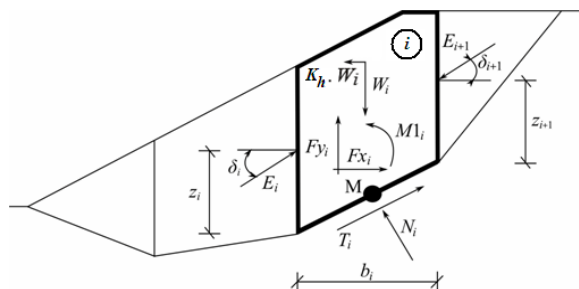
Slika 7.3 Dijagram za dimenzioniranje nagiba pokosa homogenog nasipa pomoću broja stabilnosti ( $\phi'$  kut trenja gradiva)

Kod ovih proračuna ne analizira se utjecaj procjeđivanja kroz nasip.

Za složenije nasipe, analiza stabilnosti se provodi raznim numeričkim metodama koje danas projektantima stoje na raspolaganju. Postoje dva osnovna pristupa. Jedan



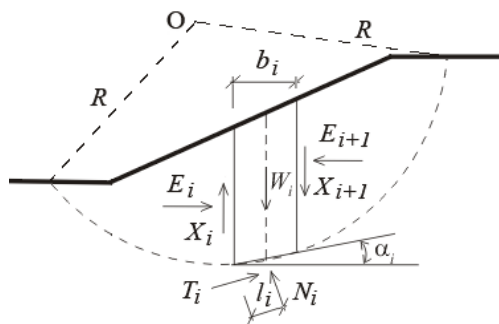
pristup osniva se na otkrivanju „kritične klizne plohe“ tj. one plohe koja pokazuje najmanji faktor sigurnost u određenim uvjetima. Tu se promatra niz kliznih ploha na kojima se analizira stabilnost. U prednumeričko doba postojao je niz **metoda blokova** nazvanih prema autorima. Na slici 7.4 prikazana je metoda Morgenster–Price. (<http://www.finesoftware.eu/>).



Slika 7.4 Analiza stabilnosti metodom blokova

**Metoda lamela** ili Bishopova metoda (Bishop, 1955.) analize stabilnosti, prva je prilagođena za proračun na računalu i dalje se u tom smislu razvija. Ova je metoda svojedobno napravila revoluciju u proračunima stabilnosti kosina. Omogućila je analizu u uslojenim tlima, prihvaćajući parametre čvrstoće na smicanje svakog sloja kroz koji prolazi potencijalna klizna ploha. Uključila je i utjecaj strujnog tlaka u kosini. Razvila se iz metode blokova, koja služi za proračun izduženih kliznih ploha koje je nemoguće prilagoditi dijelu kružnice.

Bishopova metoda izvorno koristi kružnu kliznu plohu kao potencijalnu kliznu plohu, kako je to prikazano na slici 7.5.



Slika 7.5 Kružna klizna ploha i elementi za analizu stabilnosti metodom lamela

Za proračun vidi Bishop, (1955.) ili bilo koju knjigu iz područja Mehanike tla.

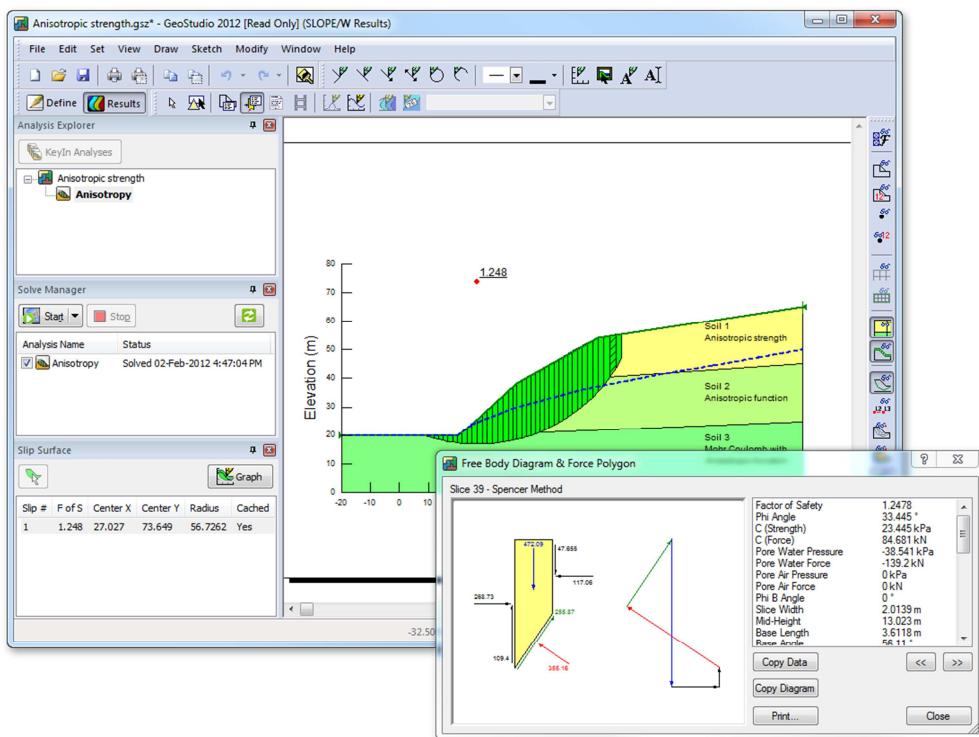
Opisani postupci koriste teoriju graničnog stanja. Teorija pokrenuti (kliznuli) dio tla promatra kao kruto tijelo koje se giba po površini preostalog tla dok ne postigne novu ravnotežu. Potrebno je utvrditi, za trenutno stanje odnosa krutog tijela i

podloge, koliki je odnos potrebnog i mogućeg otpora na smicanje. Taj se odnos izražava kao faktor sigurnosti:

$$F_s = \frac{\tau_{\text{moguće}}}{\tau_{\text{potrebno}}} \quad (7.1)$$

Pri tom je  $\tau_{\text{moguće}}$  ovisno o svojstvima tla na plohi dodira kliznog tijela i podloge, a  $\tau_{\text{potrebno}}$  otpor na istoj kliznoj površini potreban da klizno tijelo bude u stabilnoj ravnoteži. Kako je navedeno prethodno, trebalo je ispitati niz kliznih ploha ili niz sustava blokova, da bi se pronašla najmanja vrijednost faktora sigurnosti  $F_s$ .

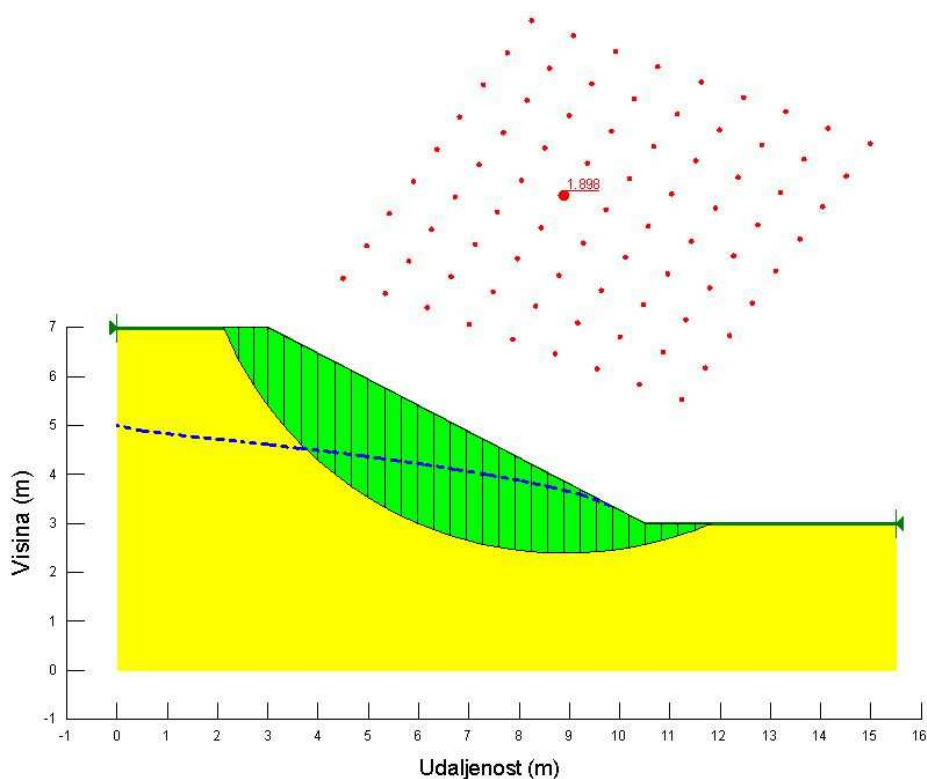
Na tržištu ima niz korisničkih paketa programa (primjer na slici 7.6) i svi mogu prihvatiti uslojenost tla i učešće moguće postojećih građevina na kosini. Mogu biti uključeni i razni dodaci za stabilizaciju kao što su sidra, geotekstil i geomreže, drenovi i slični elementi koji se ugrađuju u nasipe i kosine koje se analiziraju. Za sigurno rješenje treba imati dobre ulazne podatke. Za nasipe se projektiraju temeljem rezultata Proctorovog pokusa, ali podaci o podlozi su manje sigurni.



Slika 7.6 Prikaz načina rada programa SLOPE/W12 (<http://www.geo-slope.com/>)

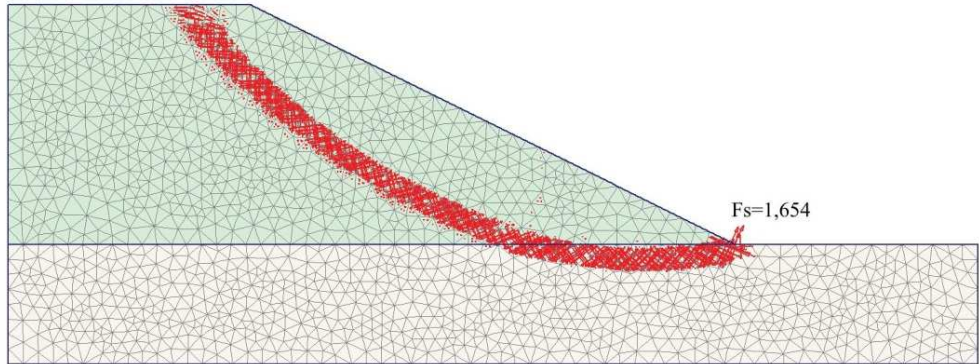
Podaci o podlozi neobično su važni u slučaju proračuna podnožičnog loma na lošem tlu, ali i za neke druge proračune, neovisno o stabilnosti na klizanje.

Na slici 7.7 prikazano je polje središta kružnica za koje je izvršen proračun stabilnosti. Program zadani broj kružnica ispituje tako što mu je zadana mreža središta i ulazna točka u kosinu ili niz polumjera određenih tangentama kroz kliznu plovu, za koje ispituje odnos posmičnog naprezanja i posmičnog otpora. Za svako središte je određen faktor sigurnosti. Program u grafičkom prikazu naznači središte za koje je dosegnut najmanji faktor sigurnosti. Uključuje i utjecaj strujnog tlaka na stabilnost pokosa. Može ujedno vršiti i proračun količine procjeđivanja. Proračun je potrebno prilagoditi EC7 i odabranom proračunskom pristupu prema Nacionalnom dodatku.



Slika 7.7 Rezultat analize stabilnosti programom GEO SLOPE (iz usluge IGH, PC Split)

Analiza stabilnosti prilagođena je za proračun i metodom konačnih elemenata. Proračunom se traži odnos naprezanja i deformacija za zadane uvjete. Mijenja se vrijednost faktora sigurnosti (povećava), pomoću kojeg se smanjuje čvrstoća do trenutka dok se ne postigne numerička nestabilnost. Iz takvog proračuna određeno je područje za koje postoji najveća vjerojatnost da će se u njemu dogoditi slom. Grafički izlaz ne daje plovu već područje unutar kojeg se može očekivati numerička nestabilnost. Izlazni rezultat je grafički prikazan na slici 7.8.



Slika 7.8 Izlazna grafika programa Plaxis (MKE), (Aryal, 2006.)

### 7.1.5 Proračun slijeganja

Slijeganje nasipa može uzrokovati mnoga oštećenja koja imaju utjecaj i na pojave drugih vrsta šteta na nasipima. Na slici 4.3 prikazane su posljedice slijeganja visokog nasipa, koje je vrlo teško spriječiti. Stoga je posebnu pažnju potrebno posvetiti pravilnoj izvedbi nasipa.

Nasip se sliježe uslijed:

- korisnog tereta (statičkog i/ili dinamičkog);
- vlastite težine i
- slijeganja podloge.

Slijeganje uslijed vlastite težine je kod nasipa od izrazito sitnozrnih tala nemoguće izbjeći jer je ono posljedica procesa konsolidacije. Na slici 4.5 prikazane su veličine pijezometrijskih tlakova u tijelu nasipa u izgradnji. Moguće rješenje je odabir gradiva veće propusnosti koje ima kraće vrijeme konsolidacije. To onda zahtjeva veću pažnju i određene zahvate u projektiranju sprječavanja nepoželjnog procjeđivanja.

Prema Terzaghi-u (1943.), vrijeme potrebno za određeni postotak konsolidacije,  $U(z,t)$ , može se odrediti, u pojednostavljenom obliku, rješenjem diferencijalne jednadžbe jednodimenzionalne konsolidacije za nepromjenjivo naprezanje,  $\sigma$ , koja glasi:

$$c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial t} \quad (7.2)$$

Rješenje je dano u poznatom obliku:

$$U(z,t) = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M} \left( \sin \frac{Mz}{H} \right) e^{-M^2 T} \quad (7.3)$$

u kojem figurira bezdimenzionalna veličina  $T$  koja je jednaka

$$T = \frac{c_v * t}{H^2} \quad (7.4)$$

i ovisna o koeficijentu konsolidacije,  $c_v$ , proteklom vremenu,  $t$ , i debljini sloja koji se sliježe,  $H$ . Iz toga proizlazi da je vrijeme,  $t$ , potrebno za određeni stupanj konsolidacije,  $U$ , određeno koeficijentom konsolidacije  $c_v$ , kako slijedi:

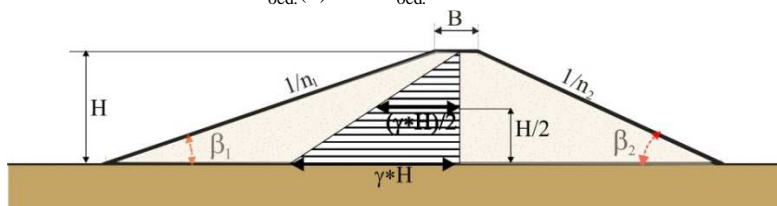
$$c_v = \frac{k}{\rho_w * g * m_v} \quad (7.5)$$

gdje je:  $k$ , koeficijent procjeđivanja;  $\rho_w$ , gustoća vode;  $g$ , gravitacija;  $m_v$ , modul promjene zapremine.

Koeficijent konsolidacije ovisi o propusnosti,  $k$ , i modulu promjene zapremine,  $m_v$ , a oni ovise o vrsti tla i o zbijenosti. Jednako tako o zbijenosti ovisi i modul stišljivosti,  $E_{oed.}$ , koji služi za proračun slijeganja i kojeg se također može propisati. Zbijenost je u nasipima moguće programirati koristeći se Proctorovim pokusom. Podaci o deformacijskim svojstvima ugrađenog gradiva dobiju se iz rezultata edometarskog pokusa na umjetnim ispitnim primjercima, zbijenim po Proctoru, uz optimalnu vlažnost. Postignute vrijednosti po ugradnji se mogu i moraju provjeriti nekim od načina za provjeru zbijenosti na terenu.

Ukupno slijeganje u osi nasipa,  $s$ , uslijed **vlastite težine**, za nasip trapeznog presjeka, može se izračunati uz oznake na slici 7.9, kako slijedi:

$$s = \sum \frac{\Delta\sigma_v}{E_{oed.}(\sigma)} \Delta z = \frac{\gamma * H}{E_{oed.}} * H \quad (7.6)$$



Slika 7.9 Poprečni presjek nasipa trapeznog oblika s oznakama za proračun slijeganja u osi, za linearno elastični model tla, uslijed vlastite težine

gdje je  $\Delta z = H$ , visina nasipa, a  $E_{oed.}$  edometarski modul stišljivosti za razinu naprežanja  $\sigma = (\gamma * H)/2$ .

**Korisni teret** utjecati će na slijeganje nasipa ovisno o njegovom načinu djelovanja i načinu rasprostiranja.

**Slijeganje temeljnog tla** uslijed opterećenja nasipom i korisnim teretom ovisit će o svojstvima podloge. Kada podloga nema zadovoljavajuća svojstva, treba izvršiti njeno poboljšanje za koje danas postoji niz vrlo učinkovitih tehničkih zahvata.

### 7.1.6 Proračun utjecaja potresa na nasipe

Potres na nasipe ima više utjecaja. Uslijed potresa mijenja se stanje naprezanja u nasipu i podtemeljnomo tlu te potres na taj način utječe na:

- vrijednosti parametara čvrstoće na smicanje;
- stabilnost pokosa;
- slijeganje krune i
- pojavu likvefakcije.

Prilikom potresa gradivo nasipa kao i podloge, gubi značajni dio čvrstoće, uslijed cikličke promjene stanja naprezanja. To izaziva značajne deformacije koje mogu ugroziti uporabivost nasipa. Prilikom proračuna nasipa na potres potrebno je pridržavati se propisa HRN EN 1998-5:2008 Eurocod 8: Projektiranje konstrukcija otpornih na potres –5. dio: Temelji, potporne građevine i geotehnička pitanja („EN 1998-5 (2011.): Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]“).

Djelovanje potresa, potrebno za projektiranje, temelji se na očekivanom pomicanju tla u budućnosti stoga se određuje procjenom rizika. Rizik se može procijeniti deterministički ili teorijom vjerojatnosti.

Većina zemalja raspolaže kartama seizmičkog rizika koje određuju seizmičnost određenog područja, a koje su izrađene od za to zaduženih nacionalnih službi.

Više o potresima vidi (Krinitsky, Gould i Edinger, 1993.)

#### 7.1.6.1 Utjecaj na parametre

##### a) čvrstoće

Za proračune utjecaja potresa na koherentna tla može se koristiti nedrenirana posmična čvrstoća ( $C_u$ ), koja je u većini slučajeva jednaka uobičajenoj vrijednosti za statičke proračune. Veći broj autora preporuča koristiti nedreniranu čvrstoću umanjenu za 20% jer neke visokoplastične gline gube čvrstoću pri cikličkom opterećenju. Međutim, neke gline pokazuju i povećanje posmične čvrstoće povećanjem opterećenja.

Za proračun utjecaja potresa na prašinstva tla preporuča se koristiti vrijednosti parametara čvrstoće na smicanje u dreniranim uvjetima ( $\phi'$  i  $c'$ ). Ovi se parametri izravno mogu koristiti u uvjetima suhog ili djelomično zasićenog tla. Na potpuno zasićena tla potres izravno utječe na promjenu porednog tlaka,  $u$ , a što onda utječe na promjenu vrijednosti efektivnog naprezanja i vrijednost čvrstoće na smicanje.

Eurocode 8 daje upute kako u tom slučaju odabrati parametre. Nedrenirana čvrstoća na smicanje, prema tim uputama može biti određena u laboratoriju, iskustveno vezano za relativnu zbijenost (indeks gustoće  $I_d$ ) tla ili indeksne parametre kao što je N-broj udaraca SPP-a. Svi ovi odabiri daju samo približne vrijednosti.

b) deformabilnosti

Krutost tla određena ja modulom smika  $G$ :

$$G = \frac{\Delta\tau}{\Delta\gamma} \quad (7.7)$$

gdje je  $\Delta\tau$ , promjena posmičnog naprezanja, a  $\Delta\gamma$ , promjena posmične deformacije. Male vrijednosti deformacije mogu se odrediti kao  $G_{maks} = \rho V_s^2$  gdje je  $\rho$  jedinična masa, a  $V_s$ , brzina širenja posmičnog vala u tlu.

Za većinu proračunskih modela kao mjerodavne vrijednosti, ne koriste se vrijednosti elastičnih deformacija već sekantne vrijednosti, kompatibilne s prosječnim posmičnim deformacijama potaknutim potresom. Eurocode 8 nudi skup redukcijskih faktora vezanih s vršnom površinom terena. Unutarnje prigušenje tla  $\eta(\gamma)$ , općenito se uzima između 5 i 20%.

#### 7.1.6.2 Utjecaj na stabilnost pokosa

Proračun stabilnosti pokosa nasipa računa se kao svaka druga stabilnost kosine pod utjecajem potresa. Razina analize vjerojatnosti pojave različita je za nasipe koji stalno drže vodu i koji povremeno drže vodu. Za nasipe, koji povremeno drže vodu, mala je vjerojatnost pojave vrlo visoke vode (VVV) i potresa, koji značajno utječe na stabilnost pokosa, istovremeno. Male brane i nasipi koji stalno drže vodu (derivacijski i plovni kanali) vjerojatnije će doći pod istovremeni utjecaj vode i potresa. Stoga pristup proračunu mora biti različit.

Dva su osnovna pristupa proračunu: pseudostatički i pseudodinamički.

U **pseudostatičkom** proračunu ključan je izbor koeficijenta seizmičnosti. O njemu ovisi veličina seizmičkih inercijalnih sila koje djeluju na klizno tijelo, a kojima se u ovom postupku simulira djelovanje potresa.

Seizmičke inercijalne sile su:

$$F_h = k_h W \quad (7.8)$$

$$F_v = k_v W \quad (7.9)$$

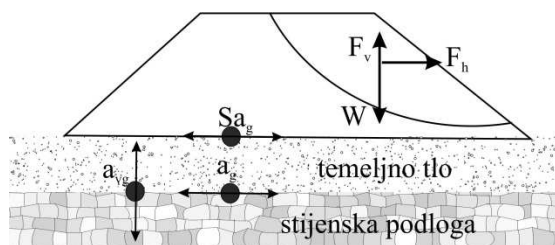
gdje su  $k_h$  i  $k_v$  pseudostatički seizmički koeficijenti, vodoravni i uspravni, negativnog predznaka (-), a  $W$ , ukupna težina klizne mase (kN). Njihovo djelovanje prikazano je na slici 7.10.

Vrijednosti pseudostatičkih seizmičkih koeficijenata općenito se mogu prikazati kao:

$$k_h = \pm \alpha S \frac{a_g}{g}; \quad (7.10)$$

$$k_v = \pm \beta S \frac{a_{vg}}{g} \quad (7.11)$$

gdje su:  $a_g$  i  $a_{vg}$  vodoravno i uspravno vršno ubrzanje tla na površini u ( $m/s^2$ ),  $S$  čimbenik uvećanja lokacije (bez dimenzija), a  $g$ , gravitacija ( $m/s^2$ ). Parametri  $\alpha$  i  $\beta$  određuju prosječno, vršno, vodoravno ubrzanje mase koja se može slomiti uključujući i nasip, uslijed ubrzanja tla.

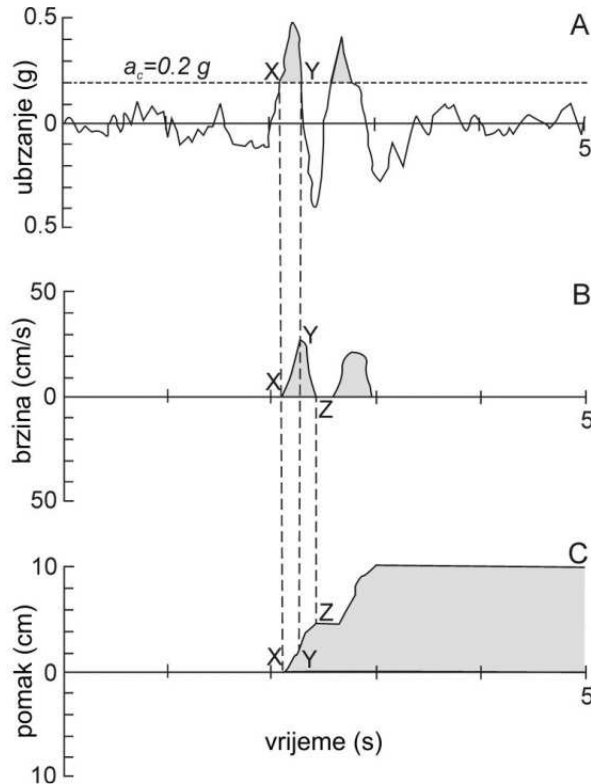


Slika 7.10 Djelovanje sila potresa na kosinu u pseudostatičkom pristupu

Za inženjersku praksu prihvatljive su vrijednosti za  $\alpha=2/3$ , a za  $\beta=0$ , dok Eurocode 8 preporuča za  $\alpha=0,5$ , a za  $\beta=0,17-0,25$  ovisno o odnosu  $a_{vg}/a_g$ . Ove se veličine mogu odrediti u Nacionalnom dodatku Eurocode-u.

**Pseudodinamički** pristup analizi stabilnosti pri djelovanju potresa, temelji se na analizi ravnoteže krutog bloka na kosini koji predstavlja potencijalnu kliznu masu. Jednostavni postupak određivanja pomaka kosine tijekom potresa temelji se na konceptu kritičnog ubrzanja,  $a_c$ , (Newmark 1965.). To je ono ubrzanje potrebno da izazove pomak bloka (granično stanje stabilnosti). Pomak bloka će nastati kada ubrzanje izazvano potresom, koje djeluje na blok, odgovara inercijalnoj sili izazvanoj potresom koji proizvede kritično ubrzanje. Za krutu masu tla, pomak se može dobiti jednostavnom dvostrukom integracijom prekoračenog ubrzanja ( $a_y$ ) sa slike 7.11. Za to je potrebno raspolagati zapisima (akcelerogramima) o potresima za što se danas mogu naći podaci u različitim elektroničkim bazama podataka. Rješenja su dali razni autori i mogu se naći u literaturi. Ovdje će biti samo nabrojani.





Slika 7.11 Newmark-ov algoritam za integraciju, prilagođen od Wilsona i Keefera, 1983. A, ubrzanje u vremenu s kritičnim ubrzanjem  $a_c$  – crtkano; B, brzina klizanja mase u vremenu; C, pomak mase u vremenu. X, Y i Z su referentne točke među crtežima (Jibson, 2011.)

Prema International Levee Handbook rješenja su dali:

Ambraseys i Menu (1988.)

$$\ln(D) = 0,90 + \ln \left[ \left( 1 - \frac{k_c}{k_{maks}} \right)^{2,53} \left( \frac{k_c}{k_{maks}} \right)^{-1,09} \right] \pm 0,3 \quad (7.12)$$

gdje je, D, očekivani pomak klizne mase tla u centimetrima,  $k_c = a_c/g$ , kritični seizmički čimbenik negativnog predznaka, (-), a  $k_{maks} = a_{maks}/g$ , maksimalni, prosječni seizmički čimbenik negativnog predznaka (-).

Jibson (2007.) predlaže da se umjesto vršnog ubrzanja tla,  $a_{maks}$ , koristi  $I_a$ , Ariasov intenzitet za opis jake trešnje (Arias, 1970.).

$$I_a = \frac{\pi}{2g} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt \quad (7.13)$$

gdje je g – gravitacija, a  $a(t)$ , povijest ubrzanja u vremenu u jedinicama gravitacije.

Tada se pomak može odrediti iz izraza:

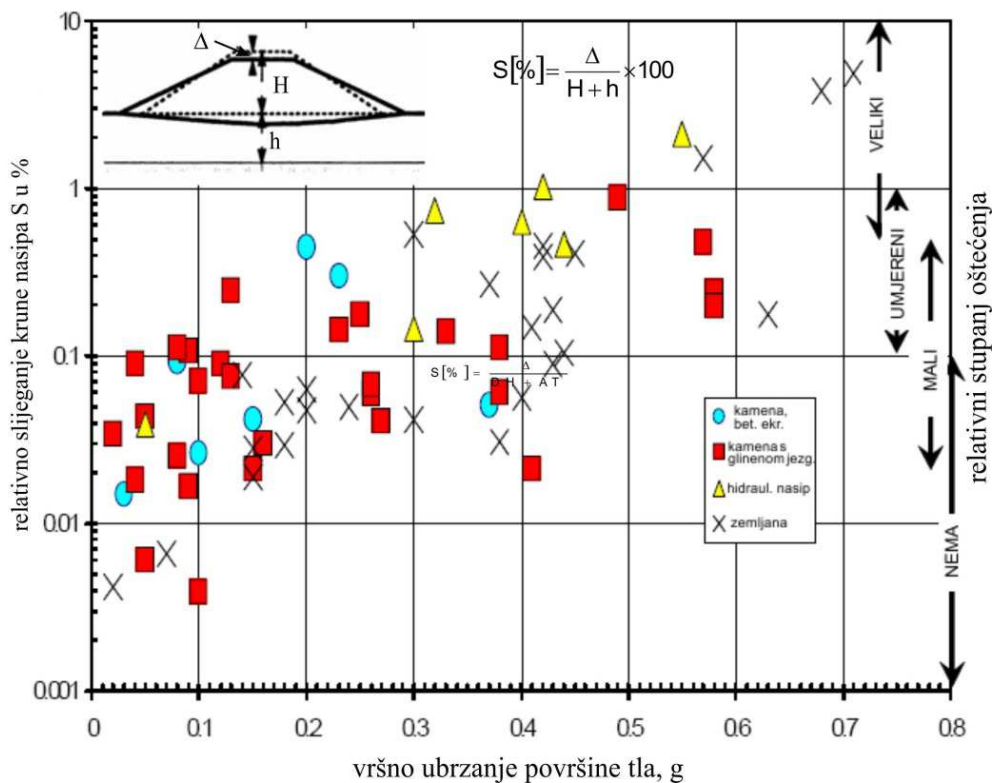
$$\ln(D) = 0,561 \ln I_a - 3,833 \ln\left(\frac{k_c}{k_{maks}}\right) - 1,474 \pm 0,616 \quad (7.14)$$

Pri analizi pomaka blokova bitno je utvrditi veličinu očekivanog pomaka bloka pri potresu, a koji određuje uporabivost građevine (granično stanje uporabivosti).

Ovo su samo neki od mogućih pristupa ovom proračunu. Svaki od njih ima svoje područje primjene.

### 7.1.6.3 Slijeganje krune

Postoji opsežna studija (Swaisgood, 2003.) o ponašanju nasipa i brana tijekom potresa, pri kojima se nije pojavila likvefakcija. Nastojalo se utvrditi postoji li neko pravilo pojave deformacije krune pri potresu, koje bi se moglo predvidjeti. Pokazalo se da je bitan čimbenik na slijeganje krune vršno ubrzanje lokacije i magnituda potresa. Veza između izmjerene slijeganja krune i vršnog ubrzanja tla prikazana je na slici 7.12.



Slika 7.12 Empirijska veza između vršnog ubrzanja tla i slijeganja krune

Za određivanje veličine slijeganja krune može se koristiti sljedeći empirijski izraz:

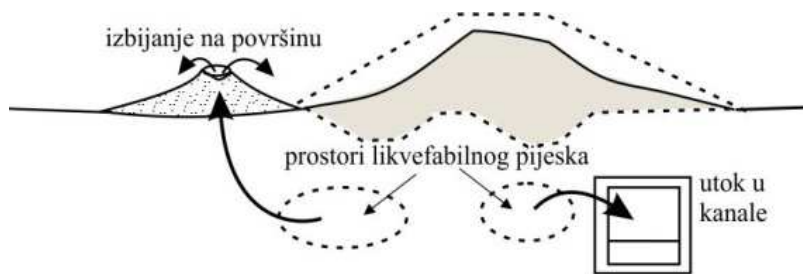
$$S = \exp(6,07a_{\text{maks}} + 0,57M - 8,00) \quad (7.15)$$

gdje je: S, slijeganje krune u %;  
 $a_{\text{maks}}$ , vršno ubrzanje (g) na površini stijenske mase;  
M, magnituda potresa.

Izraz (7.15) ima svoja ograničenja ovisno o raspoloživim podacima, a kako je eksponencijalan, ograničen je i na područja srednje seizmičnosti.

#### 7.1.6.4 Likvefakcija

Likvefakcija je pojava uzrokovana potresima, koja je vrlo štetna po nasip. Učinak je prikazan na slici 7.13. Likvefakcija se javlja u temeljnom tlu. Ono gubi nosivost.



Slika 7.13 Učinak likvefakcije na nasipe

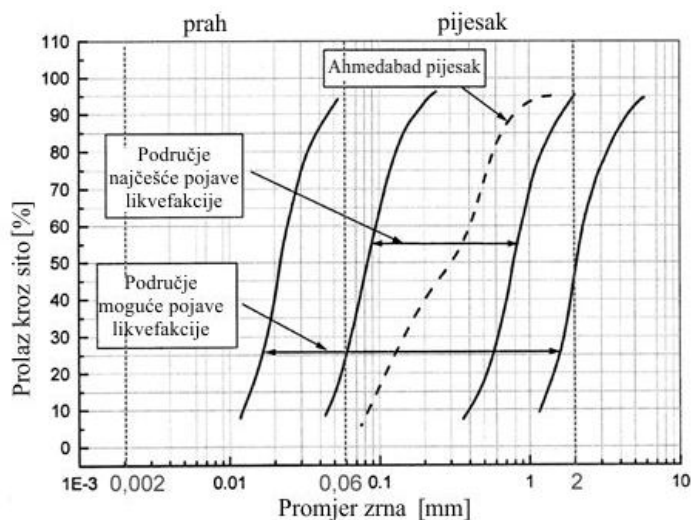
Likvefakcija je pojava koja se javlja u rahlim, vodom zasićenim pijescima uskog granulometrijskog sastava (slika 7.14), u trenutku cikličke promjene stanja napreznja uzrokovanog potresom. Ciklička promjena stanja napreznja izaziva pomake u tlu pri kojim sa mijenja (raste) vrijednost pornog tlaka, što u tlu mijenja (smanjuje) vrijednost čvrstoće na smicanje. Tlo se počne ponašati kao viskozna tekućina. Likvefakcija može nastati ako:

- je tlo rahlo, zasićeno vodom, pjeskovito i na dubini od 0 do 10-15 metara;
- je potres dovoljno jak da izazove pokrete u tlu sklonom likvefakciji.

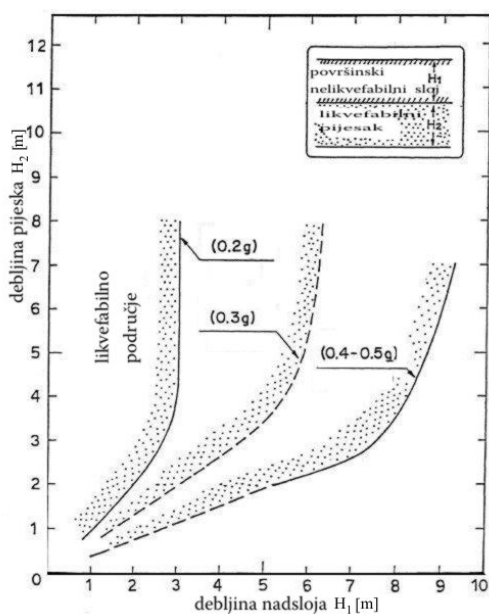
Na većim dubinama od navedenih, je geostatički pritisak dovoljno velik da se odupre utjecaju porasta pornih tlakova na smanjenje čvrstoće na smicanje. Na utjecaj potresa su otporna i prekonsolidirana tla koja „pamte“ predopterećenje iz geološke prošlosti, a koje ima utjecaj na čvrstoću na smicanje.

Likvefakciji su podložna djelomično zasićena tla koja su pretrpjela značajne deformacije prilikom prethodnih potresa. Likvefakciji nisu podložna potpuno suha tla bez obzira na druga geotehnička svojstva.

Da bi se pojavila likvefakcija, tlo mora imati visoki stupanj zasićenja kako bi se u pornoj vodi mogao razviti dovoljno visoki porni tlak. Za pojavu likvefakcije potrebna je i dovoljna debljina pješčanog sloja, koji može proizvesti dovoljno veliko naprezanje u vodi, koje onda može omogućiti da voda izbije na površinu. Tanki sloj neće moći proizvesti ovakav učinak i ništa se neće dogoditi. (slika 7.15)



Slika 7.14 Granulometrijski sastav pijesaka za koje se zna da su podložni likvefakciji (Tsuchida, prema Seed i dr., 1985.)



Slika 7.15 Likvefabilno područje u dvoslojnom tlu ovisno o jakosti potresa (Ishihara 1985.)

O likvefakciji postoji pionirski rad od Seed i Idris iz 1982. godine.

Jakost potresa je geofizička veličina i njome se bavi područje geofizike.

Svojstva tla podložna likvefakciji izučava geotehnika te će biti pobliže opisana.

Izučavanje se svodi na određivanje stupnja mogućnosti pojave likvefakcije odnosno na procjeni likvefakcijskog potencijala, a koji je vezan za svojstva tla. Tu postoje dva uobičajena pristupa:

1. Izučavanje ciklički izazvanih naprezanja;
2. Izučavanje ciklički izazvanih deformacija.

Za oba postupka treba imati na raspolaganju rezultate terenskih i laboratorijskih ispitivanja.

Iz laboratorija treba imati rezultate cikličkih troosnih pokusa, cikličkih direktnih smicanja i cikličkih torzionih smicanja. Za ovakve su pokuse potrebni dobro opremljeni, specijalizirani laboratoriji (kao na pr. u Japanu).

Nešto pristupačnija su terenska ispitivanja kao što su dinamička penetracije (SPT), statička penetracija sa i bez mjerenja pornog tlaka (CPT), određena geofizička mjerenja (posmični valovi) i još neki noviji postupci.

Pojednostavljena metoda određivanja likvefakcijskog potencijala razvijena je iz empirijskih procjena terenskih promatranja i rezultata laboratorijskih pokusa.

Za procjenu likvefakcijskog potencijala bitno je određivanje dviju varijabli:

- koeficijent cikličkog naprezanja (cyclic shear stress ratios) CSR i
- koeficijent cikličkog otpora (cyclic resistance ratios) CRR.

CSR predstavlja koeficijent cikličkog posmičnog naprezanja (cyclic shear stress ratios) koji se javlja prilikom pomicanja tla uzrokovanog potresom na dubini,  $h$ . Ova se vrijednost određuje jednadžbom:

$$CSR = \frac{\tau_h}{\sigma'_{v0}} = 0,65 \left( \frac{\sigma_{v0}^{*a_{maks}}}{\sigma_{v0}} \right) r_d \quad (7.16)$$

gdje su:

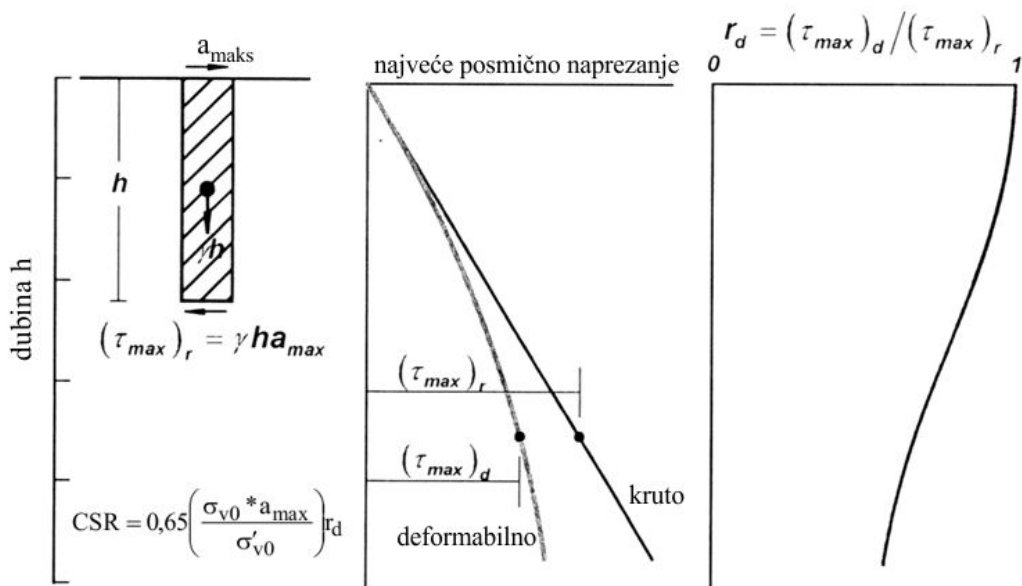
- $\tau_h$  posmično, vodoravno naprezanje,  
 $\sigma'_{v0}$  i  $\sigma'_{v0}$  totalno i efektivno, uspravno naprezanje na dubini  $h$ ,  
 $a_{maks}$  najveće vodoravno ubrzanje površine tla izraženo preko gravitacije,  $g$ ,  
 $r_d$  čimbenik smanjenja naprezanja, ovisan o krutosti tla (za kruto tlo  $r_d = 1$ ),  
0,65 čimbenik pretvorbe vršne vrijednosti posmičnog naprezanja u koeficijent cikličkog posmičnog naprezanja koji predstavlja najznačajniji ciklus pri ukupnom trajanju opterećenja (Idriss i Boulanger, 2004.)

Za praktičnu primjenu su najjednostavniji dijagrami nastali temeljem izučavanja niza potresa i pojave ili ne pojave likvefakcije pri tim potresima, dostupni u literaturi.

Shematski prikaz određivanja najvećeg posmičnog naprezanja  $\tau_{maks}$  i koeficijenta smanjenja naprezanja  $r_d$  potrebnog za određivanje vrijednosti CSR prikazani su na slici 7.16. Stup tla se, za analizu pri potresu, ponaša kao kruto tijelo te posmično naprezanje na dubini  $h$ , iznosi  $(\tau_{maks})_r$ . Međutim je stup tla deformabilan te će naprezanje pri analizi odgovora tla na potres biti manje  $(\tau_{maks})_d$ . Proizlazi da je:

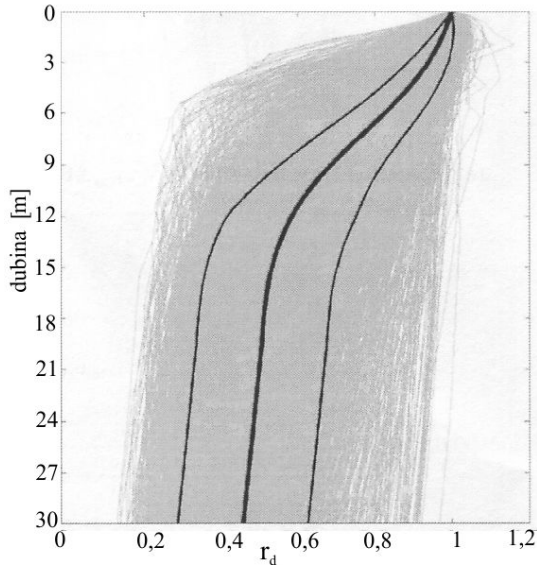
$$(\tau_{maks})_d = r_d * (\tau_{maks})_r \quad (7.17)$$

Kada je poznata vrijednost CSR može se pomoću vrijednosti dobivenih terenskim ispitivanjem i dijagrama koji slijede odrediti vjerojatnost pojava likvefakcije.



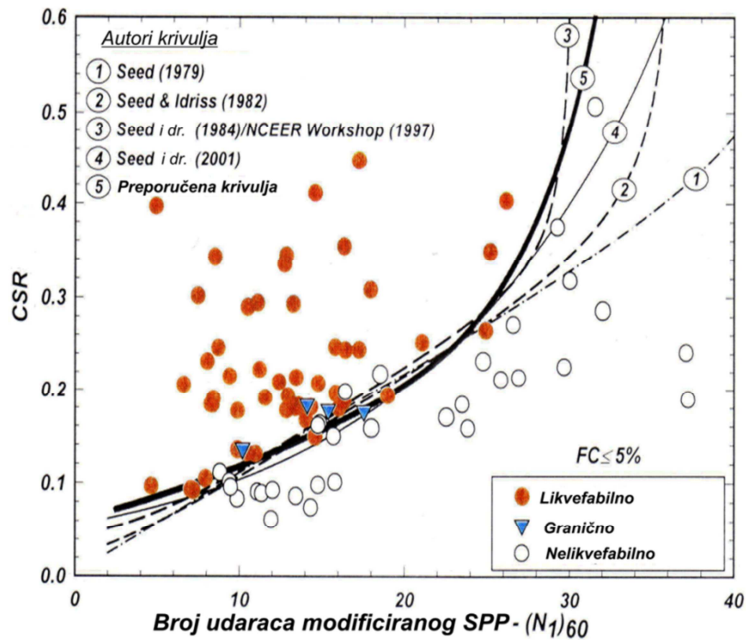
Slika 7.16 Shematski prikaz određivanja najvećeg posmičnog naprezanja  $\tau_{maks}$  i koeficijenta smanjenja naprezanja  $r_d$  (Idris i Boulanger, 2004.)

Temeljem statističke obrade podataka 2153 potresa izrađen je dijagram za određivanje vrijednosti čimbenika smanjenja ovisno o krutosti tla  $r_d$ , prikazan na slici 7.17. Debeli, srednja linija prikazuje srednju vrijednost, a bočne linije raspon od  $-\sigma$  do  $+\sigma$ , gdje je  $\sigma$  standardna devijacija promatranog skupa. Utvrđeno je da čimbenik smanjenja ovisno o krutosti tla ovisi o magnitudi potresa  $M_w$ , dubini  $h$ , brzini širenja posmičnih valova kroz tlo  $V_s$  i maksimalnom ubrzanju  $a_{maks}$ . (Cetin i Seed, 2004.)



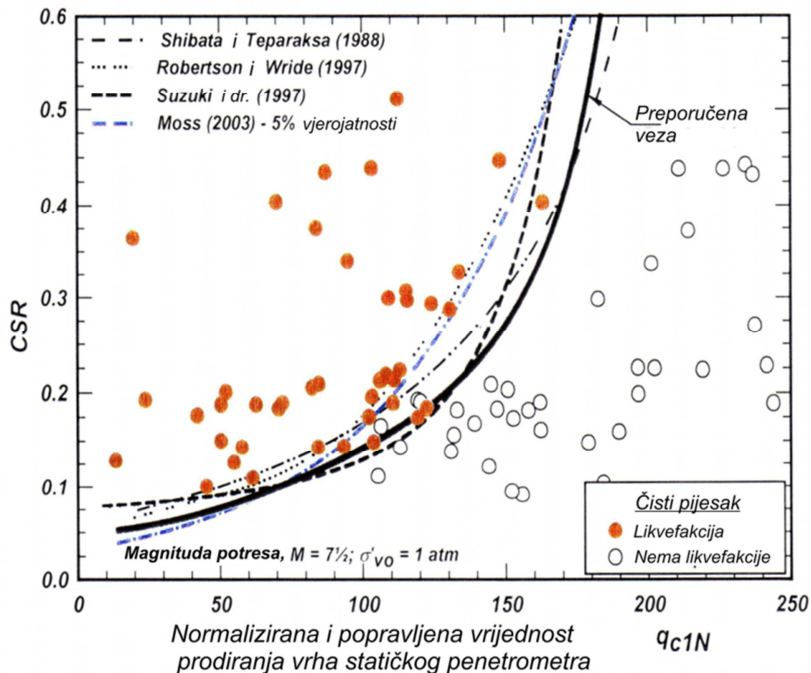
Slika 7.17 Prikaz rezultata statističke obrede podataka promjene vrijednosti čimbenika smanjenje ovisno o krutosti tla  $r_d$  za 2153 analize odgovora tla na potres

U literaturi se mogu naći dijagrami za određivanje koeficijenta cikličkog posmičnog naprezanja CSR iz podataka terenskih mjerenja statičkim i dinamičkim penetrometrom. (slika 7.18 i 7.19)



Slika 7.18 Veza između broja udaraca SPT-a ( $N$ ) za čiste pijeske i CSR-a, temeljem rezultata objavljenih između 1980. i 2004. godine, preporuča se za  $M_w=7\frac{1}{2}$  i  $\sigma'_{v0}=1\text{bar}$

To su poluempirijske korelacije temeljene na podacima o pojavi i ne pojavi likvefakcije utvrđeni temeljem pojave „vrenja“ pijeska i deformacija površine tla. (Idris i Boulanger, 2004.).



Slika 7.19 Veza između otpora prodiranja šiljka ( $q_s$ ) pri statičkoj penetraciji i CSR-a, za čiste pijeske, preporuča se za  $M_w=7\frac{1}{2}$  i  $\sigma'_{v0}=1\text{ bar}$

CRR predstavlja otpornost tla na likvefakciju. Može se odrediti u laboratoriju, međutim uzorci uzeti s terena ne predstavljaju pravo stanje, te se najčešće za procjenu otpornosti tla koriste terenski pokusi. To su standardni penetracijski pokus SPP, statički penetracijski pokus CPT, Beckerov penetracijski pokus BPT, mjerenje brzine posmičnih valova ( $V_s$ ).

Otpornost tla na likvefakciju se prikazuje preko CRR krivulja koje razgraničavaju područje u kojem se pojavljuje likvefakcija te područje u kojem tlo nije likvefabilno.

Danas se u inženjerskoj praksi koriste probablističke krivulje (Seed-a i dr.2003.). Probablističke krivulje dobivene korelacijom SPP-a i CPT-om.

Zbijenost tla izražena indeksom gustoće  $I_D$  jedan je od važnih čimbenika u pojavi likvefakcije, bez obzira na sve što je prethodno rečeno o ovom svojstvu tla. Pokazalo se da se likvefakcija događa u pjeskovitim tlima koja imaju indeks gustoće  $I_D < 50\%$ . Kod zbijenih pijesaka se prilikom cikličkih opterećenja, javlja negativni porni tlak.



Takvi pijesci, da bi se mogli dodatno zbiti pod cikličkim opterećenjem, moraju prethodno povećati zapreminu. Jedino tako je moguće premještanje čestica u gušću strukturu. Pri tom se povećava posmična čvrstoća, što sprječava pojava likvefakcije. Utvrđeno je da donja granica indeksa zbijenosti kod koje se neće javiti likvefakcija iznosi  $I_D > 75\%$

O utjecaju likvefakcije na nasipe i brane vidi više u *The International Levee Handbook*, 2014. (CIRIA C731)

Učinak na površinu tla prikazan je na slici 7.20.



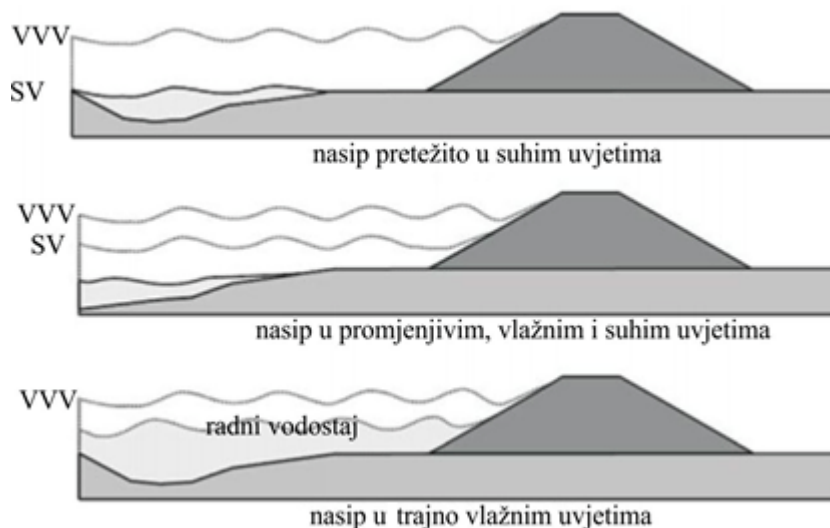
Slika 7.20 Ispusi pijeska i izvori tople vode kao posljedica likvefakcije uzrokovane Bhuj potresom. U blizini Lodai, Indija. (Krinitzsky i Hynes, 2002.)

Postoje metode za poboljšanje takvog temeljnog tla, ali su troškovi tog poboljšanja znatni. Potrebno je načiniti usporedbu troškova poboljšanja i mogućih šteta pri nastanku likvefakcije.

## 8 HIDROTEHNIČKI NASIPI

### 8.1 OPĆENITO

Hidrotehnički nasipi su nasute građevine opterećene jednostrano hidrostatskim tlakom. Vodom mogu biti opterećene trajno, privremeno i povremeno (slika 8.1).



Slika 8.1 Mogući odnosi nasipa i vode u trenutku vremena

Analizom velikih, nasutih brana (ICOLD,1995., Foster i dr., 2000.) je utvrđeno da djelovanje vode na razne načine štetno utječe na nasute građevine pa je i na te pojave potrebno obratiti pažnju pri projektiranju i izvedbi hidrotehničkih nasipa. Prilikom projektiranja, osim EC7, dio 1. i 2. treba koristiti (OTU, 2010.) „Opće tehničke propise za radove u vodnom gospodarstvu“, a uputno je primijeniti i (CIRIA C731) „The International Levee Handbook“ i (CIRIA C749) „Application of Eurocode 7 to the design of flood embankments“, koji dopunjuju europske i hrvatske propise za hidrotehničke nasipe.

### 8.2 ODABIR KOTE KRUNE NASIPA

Utvrđeno je da je prelijevanje najčešći razlog rušenja velikih brana. O rušenju nasipa uslijed prelijevanja ima vrlo malo analiziranih podataka, **ali je za vjerovati da je i kod njih to važan čimbenik pri rušenju.**

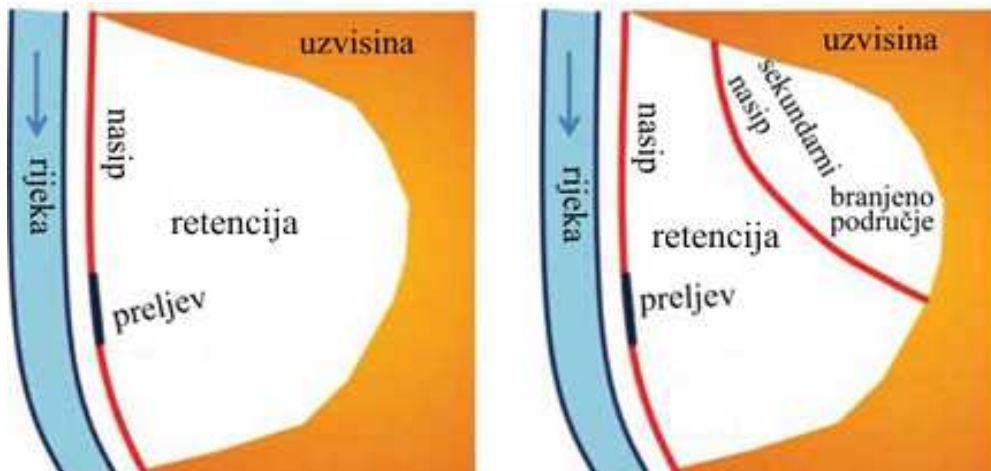
Odabir kote krune **hidrotehničkih** nasipa je stoga vrlo bitan. Sama uloga nasipa je da zadrži vodu s jedne strane pa je stoga vrlo bitno nasip osigurati od prelijevanja. Kod **dolinskih pregrada** izvodi se preljev za kontrolirano odvođenje velikih voda.

Kod **nasipa** je visina krune ključna. U slučaju da vodaostaj dosegne krunu nasipa koji povremeno drže vodu (za obranu od poplava na pr.), prelijevanje se sprječava raznim privremenim nadvišenjima (slika 8.2, pomoću zečjih nasipa tj. vreća punjenih pijeskom).



Slika 8.2 Zečji nasip, Karašica 2006. ( L. Tadić.) i uz samostojeću kuću (faslany, 2011.)

Kod nasipa koji su **stalno** opterećeni vodom s uzvodne strane, bira se najveća moguća radna visina vode. Te nasipe potrebno je osigurati tako da voda ne prijeđe kotu krune. To je moguće ili regulacijom količine ulaza vode (kod kanala) preljevom ili nekim drugim organom za osiguranje od velikih voda, koje bi prešle maksimalno projektom predviđenu kotu. Ako postoje preljevi mora postojati i prostor koji voda može plaviti bez značajnih štetnih posljedica (odteretni kanali i retencijski prostori ).

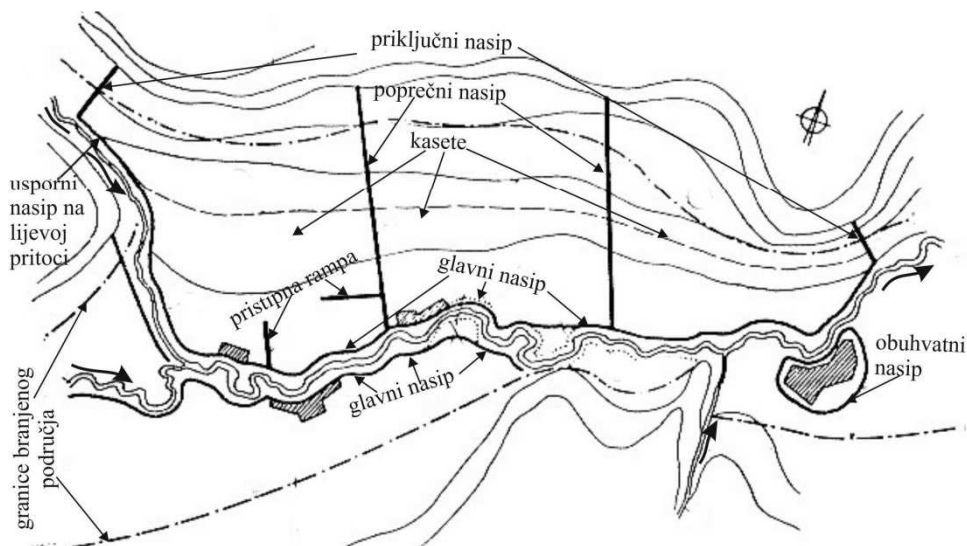


Slika 8.3 Moguća područja za ispuštanje vode preko preljeva

Retencijski prostori su predviđeni da budu plavljeni povremeno tijekom vrlo visokih vodostaja (Lonjsko polje).

Kod nasipa koji **povremeno** drže vodu, određivanje kote krune je još složenije. U te nasipe spadaju nasipi za regulaciju vodnog toka i nasipi za obranu od poplava. Kod nasipa za regulaciju vodnog toka, potrebno je utvrditi najviši vodostaj koji je predviđen da prođe reguliranim koritom, a zatim uzeti u obzir učinak poprečnog nagiba vodnog lica u krivinama i valovanja.

Kod nasipa za **obranu od poplava** mora se najprije odrediti branjeno područje, na odabrano povratno razdoblje velike vode. Za to postoji niz metoda koje se koriste u hidrotehnici (Gjurović, 1967., Svetličić 1987.). Na slikama 8.4 i 8.5 prikazani su nasipi za regulaciju i obranu od poplava.



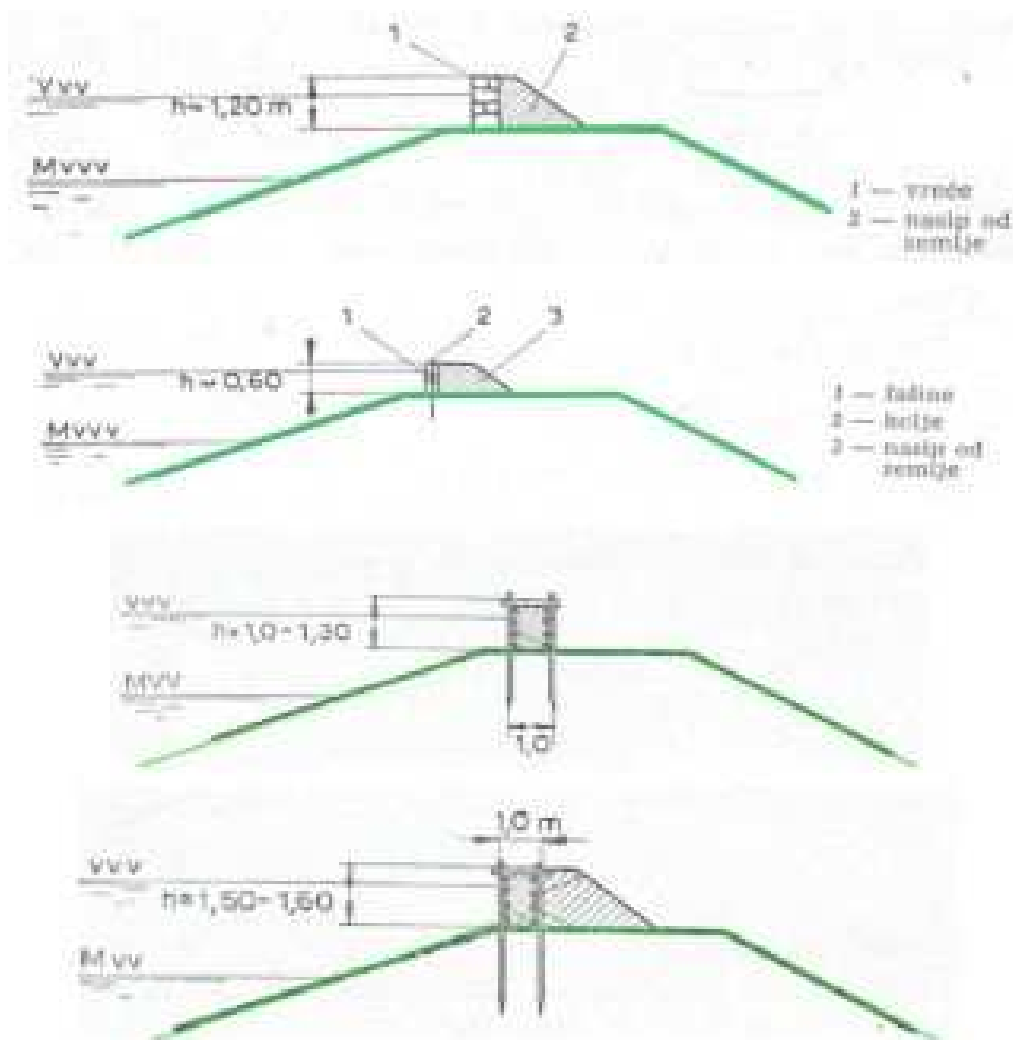
Slika 8.4 Položaj i vrste nasipa za regulaciju i obranu od poplava (Gjurović 1967.)



Slika 8.5 Obuhvatni nasip oko poljoprivrednog imanja (faslanyc, 2011.)

Nakon toga se određuje visina krune nasipa uzimajući u obzir nagib vodnog lica u krivinama u kombinaciji s mogućim valovanjem. Kod velike vode je valovanje vjerojatnije zbog većih vodenih površina, na kojima se može pojaviti dovoljna dužina razгона vjetrova koji može oblikovati valove znatnih visina.

Ako je prelijevanje na vrijeme predvidivo može se spriječiti dogradnjom određenog nadvišenja na kruni nasipa kako je prikazano na slici 8.6 i 8.7.



Slika 8.6 Moguće nadvišenje krune nasipa za osiguranje od prelijevanja pri pojavi iznimno visokih vodostaja nešto složenija od zečjih nasipa (Gjurović, 1967.)

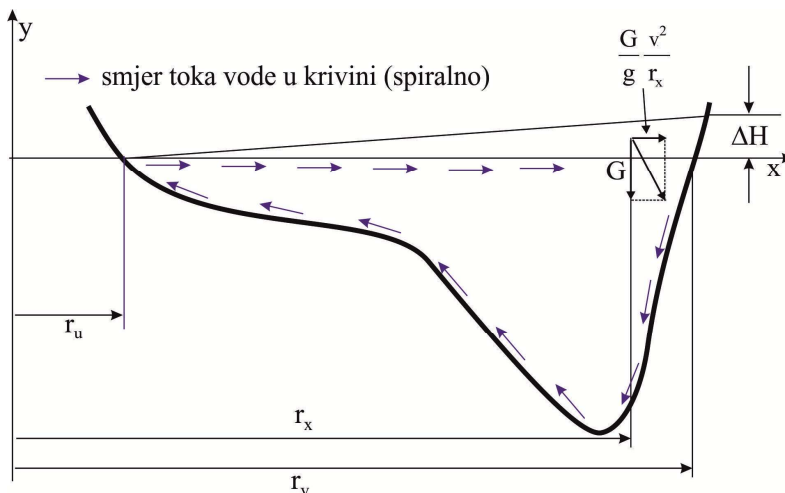
Umjesto vreća s pijeskom, za privremena nadvišenja krune u kriznim se situacijama mogu se koristiti gabionske košare obložene s unutarnje strane geotekstilom i punjene pijeskom kao na slici 8.7.



Slika 8.7 Obrana od poplave, svibanj 2011. Luisiana, USA, i gabioni u pripremi (L. Tadić)

### 8.2.1 Nadvišenje vodnog lica u krivini ( $\Delta H$ )

Ono ovisi o tlocrtnoj zakrivljenosti korita, brzini vodnog toka, širini korita na mjestu najveće zakrivljenosti i gravitaciji (Gjurović, 1967.).



Slika 8.8 Poprečni nagib vodnog lica u krivini

U krivini se javlja centrifugalna sila,  $\frac{G}{g} * \frac{v^2}{r_x}$  gdje je  $\frac{G}{g}=m$  - masa vode, a  $v$  - brzina vode u promatranoj točki.

Tada se (Grashof, 1878., prema Gjurović, 1972.) može dobiti rješenje za nagib površine vodnog lica u krivini, prema oznakama sa slike 8.8, kako slijedi:

$$\Delta h_x = \frac{v^2}{g} \ln \frac{r_x}{r_u} \quad (8.1)$$

odnosno za nadvišenje uz vanjsku obalu:

$$\Delta H = \frac{v^2}{g} \ln \frac{r_v}{r_u} \quad (8.2)$$

ili približno, još jednostavnije (Babić Mladenović 2013.):

$$\Delta H = \frac{v^2 * B}{g * r_u} \quad (8.3)$$

gdje je B širina korita u promatranoj krivini na mjestu najveće zakrivljenosti. Ova nadvišenja nisu velika, reda veličina do nekoliko centimetara. Ipak, kod nasipa većeg značaja na pr. kod glavnih nasipa za obranu od poplave, ukupno nadvišenje se uzima između 0,5 i 1,5 m iz razloga sigurnosti.

Kada nasip tvori vodenu površinu većih razmjera, na koje može značajno utjecati vjetar, mora se u proračun uzeti i utjecaj valovanja.

Visina **uzdizanja vala** po kosini se može računati po izrazu:

$$h_v = 3,2 * k * H * tg\alpha \quad (8.4)$$

gdje je:

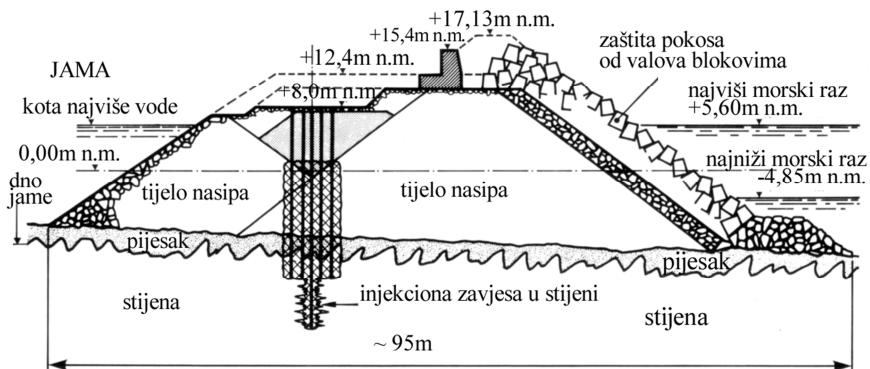
$h_v$  – visina uzdizanja vala uz kosinu u metrima;

H – visina vala u m, (određena za morske valove, Babić, L. 1968.) ;

$\alpha$  – kut nagiba uzvodnog pokosa nasipa prema horizontali;

k – koeficijent hrapavosti ( $k=0,7-1,0$ )  $k=1$  za savršeno glatki pokos.

Kod nasipa koji **privremeno** drže vodu, kao što su nasuti zagati (slika 8.9, vrlo složeni zagat), bira se nešto tolerantnije povratno razdoblje velikih voda ili maksimalnih plima za zagate uz morsku obalu. Vršiti se procjena rizika od poplave gradilišta u odnosu na cijenu koštanja izrade zaštite. Ovi nasipi iako vodu drže privremeno, drže je za cijelo vrijeme svoga vijeka trajanja. Njihova se privremenost očituje i u tome što se dozvoljava određena količina procjeđivanja kroz nasip i podlogu, a koja se crpi iz građevne jame, ali tako da se procjeđivanjem ne ugrozi stabilnost i uporabivost nasipa-zagata.



Slika 8.9 Nasuti zagat za izvedbu građevne jame nuklearne elektrane uz morsku obalu (atlantska obala Francuske)

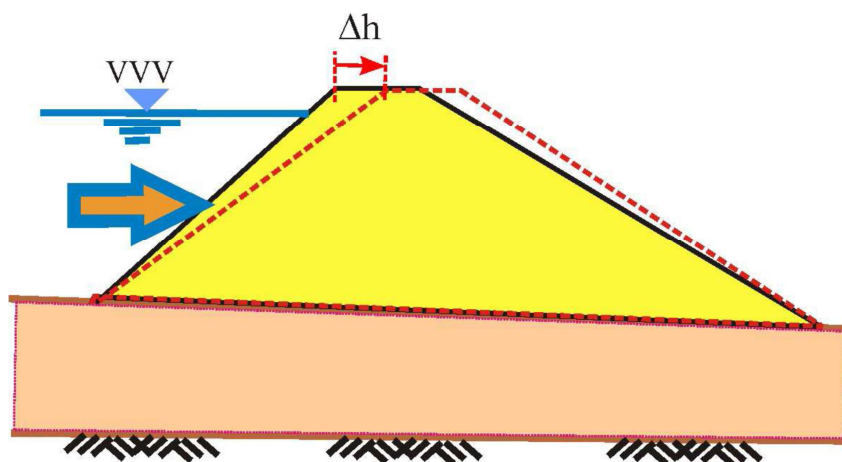
### 8.3 ODABIR ŠIRINE KRUNE NASIPA

Kruna hidrotehničkog nasipa (glavnih nasipa i malih brana) mora biti barem toliko široka da se po njoj mogu kretati terenska vozila. Širine mogu biti i veće, ako nasip služi i za javni promet, kako je to prikazano na slici 6.8. Tada mora zadovoljiti odgovarajuće tehničke uvjete kategorije prometnice kojoj služi. Nasipi za obranu od poplava, širinu krune moraju imati toliku, da ukupna širina nasipa zadovolji zadržavanje vodnog vala za sve vrijeme trajanja velike vode i da pri tom ne dođe do procjeđivanja kroz i ispod nasipa. To ovisi o obliku, rasporedu i vrsti gradiva ugrađenog u poprečni presjek nasipa i trajanju poplave.

### 8.4 UTJECAJ TEČENJA U VODOTOKU NA NASIPE U KRIVINI

Nasipi na vodotocima, kroz koje voda može teći velikim brzinama, kao što su nasipi za regulacije i obranu od poplava, a koji nisu pravocrtni, već imaju i krivine, mogu biti pod utjecajem dinamičkog učinka strujne sile u vodotoku.

Naročito su osjetljivi nasipi koji rijetko (povremeno) dolaze pod ovaj utjecaj. Oni se svaki put ponašaju kao da im je to prvo punjenje. Nasipi nisu krute, nedeformabilne građevine. Pokazano je kako pod utjecajem već samog hidrostatičkog tlaka, naročito pri prvom dodiru s visokom vodom, dožive određeni pomak, kako je prikazano na slici 8.10.



Slika 8.10 Vodoravni pomak nasipa pod djelovanjem hidrostatičkog i hidrodinamičkog tlaka (Kuspilić, 2009.)

Pregledom nasipa primijećene su pukotine okomito na os nasipa. Na mjestima gdje je došlo do proboja može se na ostatku nasipa uočiti gotovo pravilan rez okomito na os nasipa (slika 8.11).





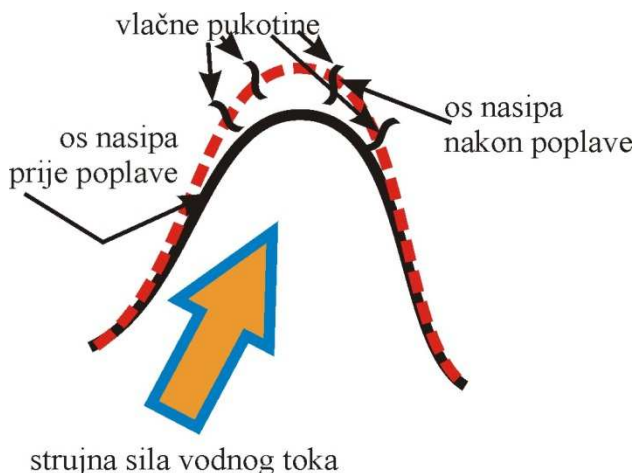
Slika 8.11 Bok nasipa nakon proloma (Roje-Bonacci, 2015.)

Pukotine okomito na os nasipa primijećene su i na mjestima gdje nije došlo do proboja već samo do jačeg procurivanja vode. Ove pukotine, okomite na os nasipa mogu se objasniti hidrodinamičkim tlakovima mase vode na zemljanu građevinu koja je podložna deformacijama. Nasip, kako je već rečeno, nije kruta građevina, već njegova deformabilnost ovisi o elastičnim svojstvima tla ugrađenog u slojevima i to u vodoravnom smjeru. U nasipu dolazi do pomaka ka zračnoj strani uslijed djelovanja hidrodinamičkih sila vodnog toka.

Utjecaj ovih deformacija na stvaranje vlačnih pukotina značajan je na dijelu nasipa koji je konkavan u odnosu na tok vode. U konveksnom dijelu nasipa tlak vode inicira tlačno stanje naprezanja u luku i nema mogućnosti stvaranja vlačnih pukotina. Kod nasipa za obranu od poplava, nije moguće izvesti nasipe koji neće doći u vlačno stanje naprezanja uslijed jednostranog opterećenja pri visokim vodostajima. Oni tlocrtno uglavnom prate oblik vodnog toka.

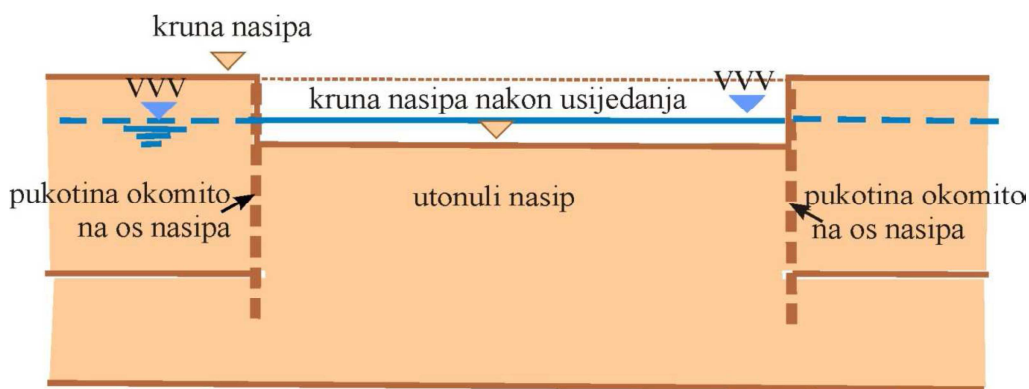
Ma kako mali bili vodoravni pomaci nasipa opterećenog vodnim tokom, aktiviraju posmičnu čvrstoću na bočnim plohama. One najmanje površine i najmanjeg otpora su plohe okomito na os nasipa te tu nastaje popuštanje. Na zračnoj strani nasipa dolazi do rastezanja što aktivira vlačnu čvrstoću tla okomito na smjer ugradnje. Ona nije velika i očito lako dolazi do popuštanja i stvaranja mikropukotina. Mikropukotne pak

postaju prioritetni put za vodu koja počinje proces ispiranja i priključuje se ostalim mehanizmima proloma nasipa.



Slika 8.12 Rastezanje nasipa i mjesta vlačnih pukotina u konkavi

Ako su premašene čvrstoće na smicanje u kritičnim poprečnim presjecima nasipa, doći će do popuštanja. Kako se ni jedna od prethodnih pojava ne dešava sama, rezultat može biti sjedanje nasipa u prostor nastao ispiranjem ili podloge ili najnižih slojeva nasipa uslijed klizanja. Tada se čini kao da je oštećeni nasip vrlo pravilno odsječen bočno od ostatka nasipa i naprosto izgubio na visini. (Roje-Bonacci, 2015.).



Slika 8.13 Usjedanje nasipa

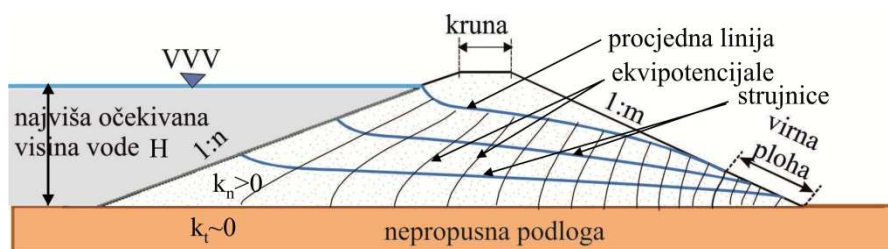
Način ispiranja i odnošenja tla ispod nasipa prikazati će se nastavno.

## 8.5 PROCJEĐIVANJE KROZ NASIP

### 8.5.1 Općenito

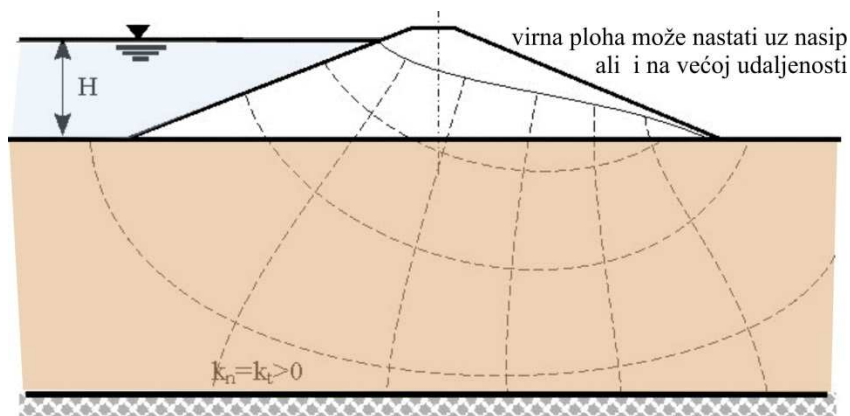
Kako tlo nije apsolutno nepropusno, potrebno je proračunati procjeđivanje kroz nasip kao i kroz temeljno tlo. Na taj se način može odrediti količina procjedne vode koja može biti gubitak, ako se voda želi zadržati. Može se odrediti količina koju je potrebno crpiti, kada nasip osigurava određeni prostor od vode kao na pr. nasuti zagati koji štite građevne jame ili obuhvatni nasipi sa slike 8.5, kojima se štiti naselje od poplave. Ovakav proračun sadrži i određivanje dužine virne plohe „a“ kroz koju se voda procjeđuje na nizvodnom pokosu. Određuje se izlazni gradijent na virnoj plohi i na taj način provjerava mogućnost pojave hidrauličkog sloma i mogućeg oštećenja nasipa do rušenja (slika 4.1 i EC 7, 10. poglavlje).

Za proračun procjeđivanja potrebno je poznavati strujno polje u nasipu za određenu razinu vodostaja (slika 8.14).



Slika 8.14 Potencijalno strujno polje pri procjeđivanju kroz nasip na nepropusnoj podlozi

Razlikuju se nasipi na nepropusnoj i na propusnoj podlozi (slika 8.15). Nepropusnom podlogom u odnosu na nasip može se smatrati tlo kojem je koeficijent hidrauličke provodljivosti (filtracije),  $k_t$ , 100 puta ( $10^2$ ) manji od onoga u nasipu,  $k_n$ .



Slika 8.15 Potencijalno strujno polje pri procjeđivanju kroz nasip i podlogu

Proračun procjeđivanja kroz nasip na propusnoj podlozi, uključuje i procjeđivanje kroz podlogu (slika 8.16). Ti uvjeti za proračun su nešto složeniji, kao i oni za procjeđivanje kroz nasipe s nizvodnim drenom, drenažni tepihom, općenito nasipe složenih poprečnih presjeka za koje je metode proračuna moguće naći u literaturi.

Dimenzioniranje se vrši na najviši mogući vodostaj kao najopasnije stanje. Pretpostavlja se da je uspostavljeno stacionarno strujanje.

Strujno polje sastoji se od strujnica i ekvipotencijala. Za proračun postoji niz analitičkih i grafičkih rješenja, a danas se najviše koristi metoda konačnih elemenata. Ona uvažava zonirane nasipe s različitim svojstvima tla.

S podacima o potencijalnom polju, za hidrotehničke se nasipe provodi analiza stabilnosti uvažavajući moguće najnepovoljnije djelovanje sile strujnog tlaka.

### 8.5.2 Izlazni i kritični hidraulički gradijent

Proračun izlaznog hidrauličkog gradijenta može se izvesti iz podataka strujnog polja (slike 8.14 i 8.15).

$$i_{\text{izl}} = \frac{H}{L_{\text{min}}} \quad (8.5)$$

Gdje je H visinska razlika između gornje i donje vode, a  $L_{\text{min}}$ , dužina procjedne linije kao najkraćeg puta čestice vode kroz nasip ili podlogu. Kritična točka na kojoj započinje hidraulički slom je u nožici nasipa kako je to prikazano na slici 4.1, ali može biti i u nekoj geotehnički nepovoljnoj točki u zaobalju, na nizvodnoj strani nasipa.

Dobiveni izlazni gradijent se uspoređuje s kritičnim izlaznim gradijentom pri kojem dolazi do iznošenja čestica. Pri tom mora biti zadovoljena nejednakost:

$$i_{\text{izl}} < i_{\text{krit}} \quad (8.6)$$

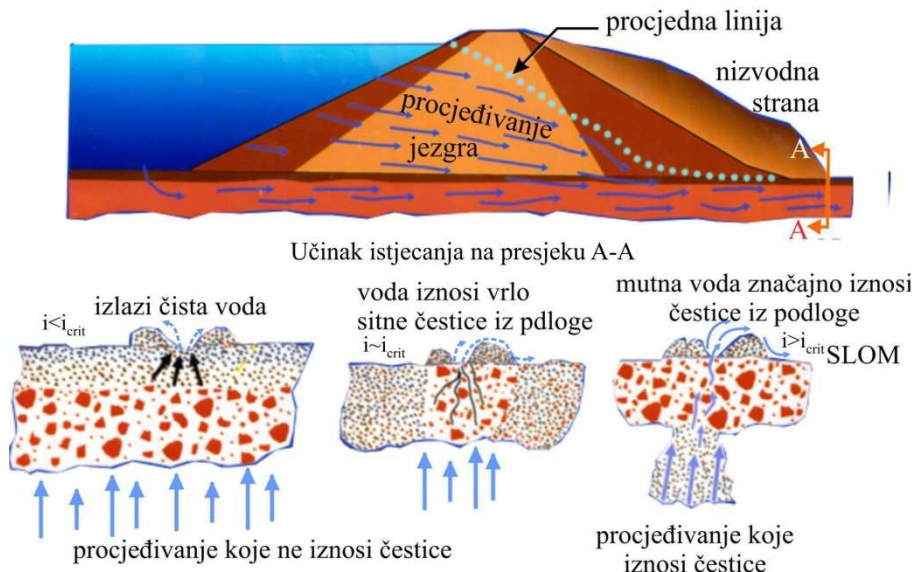
Izraz za kritični izlazni gradijent ovisi o prostornoj težini kako slijedi:

$$i_{\text{krit}} = \frac{\gamma_{\text{zas}} - \gamma_v}{\gamma_v} \quad (8.7)$$

što proizlazi iz uvjeta da je efektivno naprezanje, izraženo vektorski preko prostornih težina, na promatranoj plohi jednako nuli.

$$\vec{\gamma}' = \vec{\gamma} - \bar{i} * \gamma_v; \quad \vec{\gamma}' = 0 \quad (8.8)$$

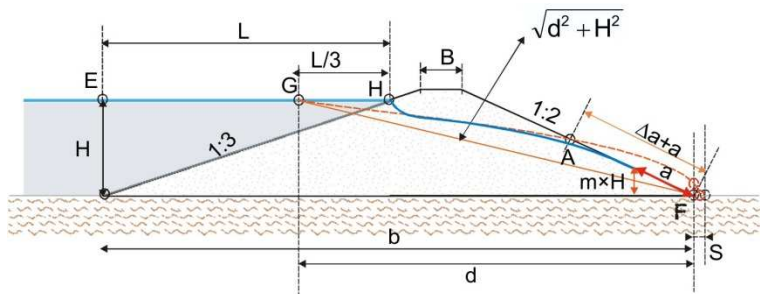
Postanak, napredovanje i učinak procjeđivanja kroz površinu na kojoj se može javiti kritični hidraulički gradijent, prikazana je na primjeru istjecanja kroz nizvodnu nožicu nasipa ili dolinske pregrade, slika 8.17 ( FERC, 2009.).



Slika 8.17 Kritični presjek i učinak procjeđivanja na pojavu hidrauličkog sloma

### 8.5.3 Proračun količine procjeđivanja

Za proračun procjeđivanja kroz nasipe postoji više metoda. Potrebno je poznavati strujnu mrežu, odnosno izlazni gradijent,  $i_{izl}$ , i veličinu površine kroz koju se procjeđivanje događa. U slučaju homogenog nasipa na nepropusnoj podlozi izlazna površina je virna ploha,  $a$ . Grafička konstrukcija rubne strujnice, a time i virne plohe moguća je korištenjem svojstava parabole (Casagrande 1937. ) kako je prikazano na slici 8.18.



Slika 8.18 Grafička konstrukcija procjedne linije i virne plohe za homogeni nasip

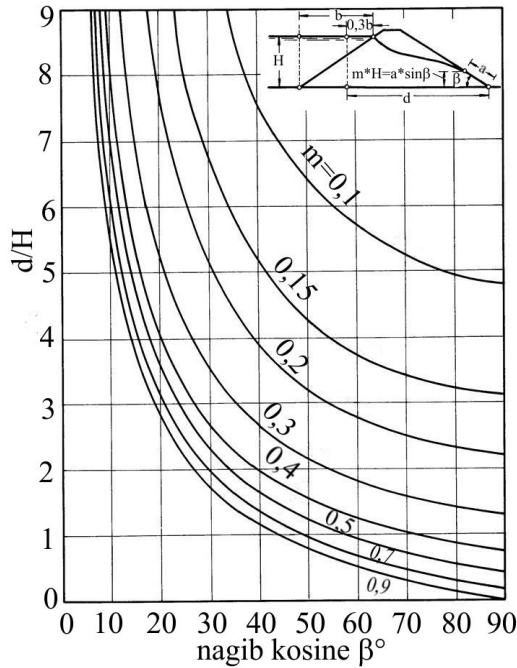
S oznakama na slici 8.18 može se nizom približnih izraza odrediti dužina virne plohe,  $a$ , na zračnoj strani nasipa, za homogeni nasip i stacionarno tečenje.

Iz podataka sa slike 8.18, prema Gilboy-u:

$$m \times H = a \times \sin \beta \quad (8.9)$$

gdje je  $\beta = \beta_2$ , kut nagiba pokosa nasipa na zračnoj strani (slika 8.19).

Gilboy (1934.) je za proračun veličine virne plohe "a" izradio dijagram.



Slika 8.19 Dijagram za izračun duljine virne plohe „a“

Za proračune u nastavku potrebno je odrediti još i veličinu spojnice točaka F-G, sa slike 8.18. S je  $S = \sqrt{d^2 + H^2}$ .

Casagrande je analizom Dupuit-evog približnog izraza došao do jednadžbe za vrijednost veličine virne plohe (Dupuit, 1863.):

$$a = \frac{d}{\cos \beta} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \beta} - \frac{H^2}{\sin^2 \beta}} \quad (8.10)$$

odnosno

$$a = S - \sqrt{d^2 - \frac{H^2}{\sin^2 \beta}} + d \quad (8.11)$$

Kada je poznata veličina virne plohe "a" i strujna mreža, iz koje se može izračunati izlazni gradijent,  $i_{izl.}$ , moguće je proračunati količinu procjeđivanja kroz nasip,  $q$ , u  $[m^3/s]$  ili  $[l/s]$ , za stacionarno tečenje.

Iz strujne mreže količina procjeđivanja je sljedeća:

$$q = k * h * \frac{n_s}{n_{ekv}} \quad (8.12)$$

gdje ne  $n_s$  broj strujnica, a  $n_{ekv}$  broj ekvipotencijala.

Pomoću dijagrama Gilboya (za  $q = v * F$ , protok = brzina  $\times$  površina):

$$q = k * i * F = k \frac{dz}{dx} z; \quad \frac{dz}{dx} = \text{tg}\beta; \quad z = a * \sin\beta \quad (8.13)$$

$$q = k * a * \sin\beta * \text{tg}\beta$$

#### 8.5.4 Utjecaj strujnog tlaka na stabilnost pokosa

Tečenje vode kroz tlo izaziva pojavu dinamičke sile strujnog tlaka,  $\vec{S}$ . Voda djeluje na čestice tla u smjeru svojeg toka i mijenja polje efektivnog naprezanja u kosini. Između vode i čestica tla javlja se trenje, koje se može izraziti pomoću jedinične sile strujnog tlaka  $\vec{s}$ , izražene u vektorskom obliku.

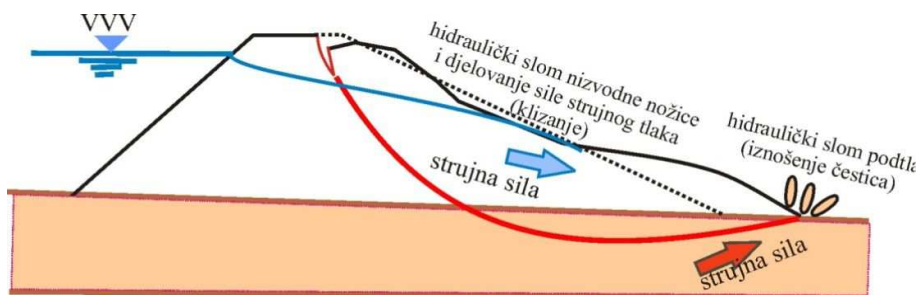
$$\vec{s} = \gamma_w * \vec{i}; \quad (8.14)$$

dok je ukupna sila strujnog tlaka  $\vec{S}$ , koja djeluje na odabranu kliznu plohu površine  $P$  jednaka:

$$\vec{S} = \int_p \gamma_w * \vec{i} * dP \quad (8.15)$$

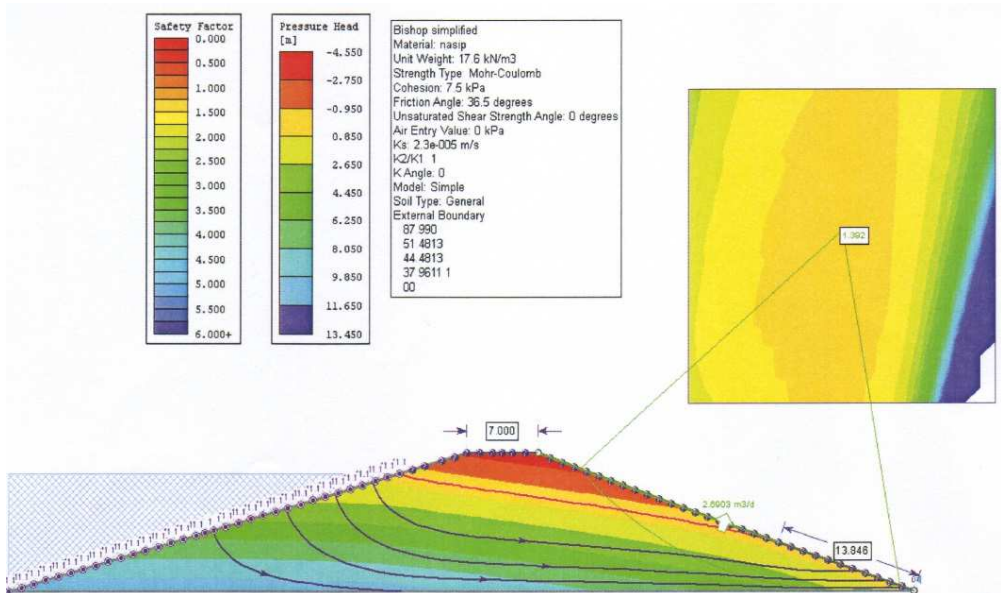
ili se može izračunati iz djelovanja uzgona na kritičnu ili odabranu kliznu plohu dužine  $l$ .

Kada trenje djeluje niz kosinu, povećava se opterećenje na kritičnoj kliznoj plohi, što može uzrokovati slom. Utjecaj sile strujnog tlaka,  $\vec{S}$ , na stabilnost nizvodne kosine, tijekom stacionarnog procjeđivanja kroz nasip prikazana je na slici 8.20.



Slika 8.20 Učinak sile strujnog tlaka na stabilnost nizvodne kosine i moguću pojavu hidrauličkog sloma u nožici i/ili uz nožicu u temeljnom tlu (Roje-Bonacci, 2015.)

Proračun nekom od numeričkih metoda objedinjuje sve proračune u koje je uključeno strujanje kroz nasip kako je prikazano na slici 8.21.



Slika 8.21 Rezultat analize stabilnosti programom Slide (studentski rad)

U izlaznim podacima na slici 8.21 prikazane su strujnice, dužina virne plohe “a” u metrima i količina procjeđivanja za odabranu visinu vodostaja, “q” u m<sup>3</sup>/dan. (Proračun je vršen za 1 m’ nasipa.)

Temeljem poznatih vrijednosti pornih tlakova, provodi se analiza stabilnosti pokosa nizvodne kosine nasipa uz učešće nepovoljnog utjecaja sile strujnog tlaka (slika 8.21). Prikazani su i klizna ploha i njeno središte, s najmanjim faktorom sigurnosti na klizanje.

Učinak sile strujnog tlaka prikazan je na fotografiji na slici 8.22.



Slika 8.22 Klizište na nizvodnoj (zračnoj) strani nasipa uslijed djelovanja procjeđivanja kroz nasip pri ekstremno visokom vodostaju (Roje-Bonacci, 2015.)



## **8.6 MOGUĆA OŠTEĆENJA HIDROTEHNIČKIH NASIPA USLIJED PROCJEDIVANJA**

### **8.6.1 Općenito**

U EC 7, dio 1. poglavlje 10 se bavi pojavom hidrauličkog sloma općenito kod raznih vrsta hidrotehničkih građevina. Ono govori o četiri vrste mogućih pojava sloma temeljnog tla, ali dio toga vrijedi i za dijelove nasipa. Odredbe se odnose na:

- slom prouzročen djelovanjem uzgona,
- hidraulički slom tla,
- slom prouzročen unutarnjom erozijom,
- slom prouzročen sufozijom, (cijevljenjem uslijed iznošenja čestica).

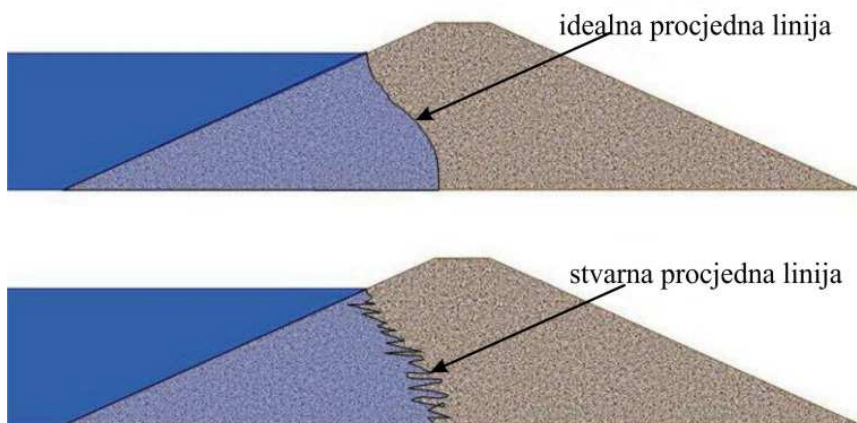
Radi se o oštećenjima nastalim uslijed unutarnje erozije i pojave cijevljenja kroz nasip i temeljno tlo. Ova oštećenjima detaljno opisuje Fell i dr. (2015.). Saznanja o ovoj pojavi su nastala prikupljanjem podataka s preko 11000 nasutih građevina (uglavnom velikih brana) od strane ICOLDa (1995.). Ista upozorenja o mogućim oštećenjima vrijede i za nasipa i male brane te će se ovdje njima posvetiti dužna pažnja. U većini slučajeva bit pojave je hidraulički slom tj. pojava izlaznog gradijenta „i“ većeg od kritičnog „ $i_{krit}$ “ (vidi jed. 8.7).

### **8.6.2 Prvo punjenje**

Hidrotehnički nasipi za obranu od poplava i po nekoliko godina ne dolaze u dodir s vodom. Pri tom se svaki put, kada nastupi velika voda, ponašaju kao da su prvi put pod njenim utjecajem. Kako vodeni val dolazi naglo, to relativno slabo propusno gradivo nasipa ne može trenutno propustiti vodu i oblikovati potpunu procjednu liniju. Teorijska je pretpostavka da je procjedna linija, dok se kreće prema zračnoj strani nasipa glatka, dok je ona u stvarnosti vrlo nepravilna, ovisno o svojstvima propusnosti u pojedinim točkama na njenom putu kroz nasip, dok ne dođe do potpunog zasićenja prostora ispod procjedne linije. Tako u nasipu mogu nastati porni tlakovi veći od bočnih tlakova, što može dovesti do hidrauličkog sloma. Pojava je prikazana na slici 8.23. (ASDSO, 2003.)

Povećanje pornih tlakova može biti uzrok početka proloma nasipa. Ta pojava u praksi nije nepoznata.

Jedan takav slučaj prikazan je na slici 8.24. Na istoj slici uočljiv je bok nasipa na mjestu proloma, koji je gotovo okomit na uzdužnu os nasipa, što potvrđuje postavke iz poglavlja 8.4.



Slika 8.23 Izgled procjedne linije pri prvom potapanju suhog nasipa

Cijevljenje je pojava koncentriranog toka, procjeđivanja, kroz nasip na mjestu veće propusnosti, koje se može pojaviti iz najrazličitijih razloga.



Slika 8.24 Prolom nasipa pri prvom punjenju (FEMA 2005.)

Fell i dr. (2015.) navode sljedeće razloge pojave koncentriranog procjeđivanja:

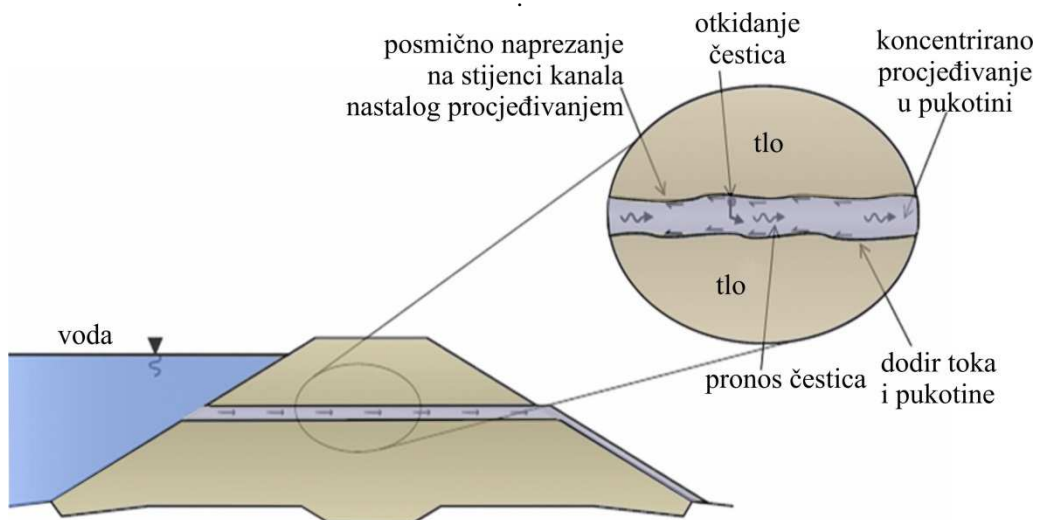
- pukotine nastale uslijed diferencijalnog slijeganja temeljnog tla i nasipa tijekom i nakon građenja;
- hidrauličko raspucavanje;
- sušenje;
- urušavanje slabo zbijenog sloja podtemelnog tla ili sloja nasipa kao i tla oko prodora cijevi kroz nasip.

### 8.6.3 Cijevljenje ili koncentrirano procjeđivanje

Da bi se unutarnja erozija ostvarila potrebno je sljedeće:

- mora postojati pukotina;
- sile toka vode kroz pukotinu moraju biti dovoljne da potaknu eroziju;
- brzina toka vode mora biti dovoljna za pronos pokretljivih čestica tla kroz pukotinu.

Da bi se ostvarila progresivna erozija moraju za to postojati određeni uvjeti kako u tlu tako i u potencijalnom polju.



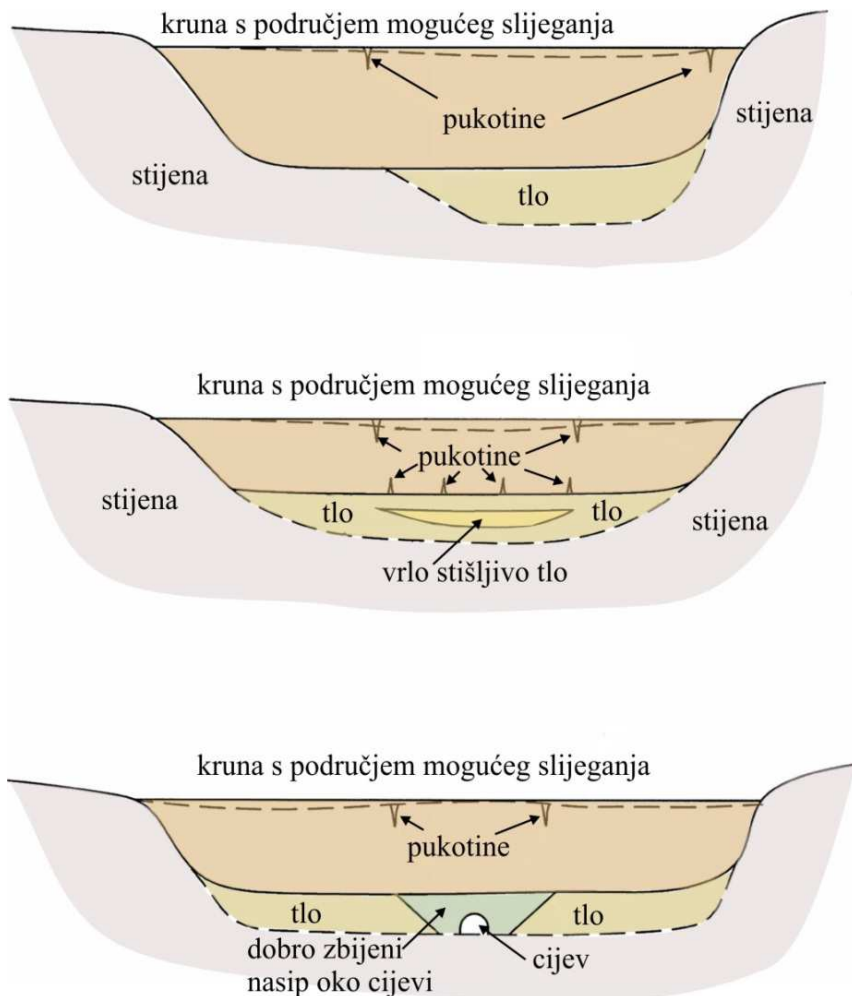
Slika 8.25 Cijevljenje, procjeđivanje prioritarnim putem kroz nasip (Fell i dr. 2015.)

Pukotine, koje su preduvjet za nastanak progresivne erozije, mogu nastati iz različitih razloga. Jedan od njih je diferencijalno slijeganje (slika 8.26).

Ono može nastati uslijed nejednolikog slijeganja podloge ili uslijed slijeganja nasipa nejednolike visine. U kruni se tada javljaju područja vlačnih napreznja, rastezanja i konačno pucanja. Tu nastaje prioritetni put za početak unutarnje erozije.

Pukotine mogu nastati pod utjecajem trenja između betonskih građevina koje se nalaze u dodiru s nasipom ili slijeganje nasipa uz zid betonske građevine. Ovakvi su spojevi vrlo osjetljivi i zahtijevaju vrlo pažljivo zbijanje nasipa uz betonske stjenke. Bolje je rješenje ugradnja betonskih dijelova u temeljno tlo.

Procjeđivanje kroz slabije zbijeni sloj nasipa mogući je uzrok progresivne erozije. Ovakve su pojave moguće kod starih nasipa zbijanih bez stroge kontrole kako ugrađenog tla tako i zbijenosti podloge. To su nasipi izvedeni konjskim zapregama, od tla vlažnosti manje od optimalne, ugrađeni dozerima, bez primjene valjaka ili u slojevima debljim od optimalnih za primijenjenu mehanizaciju.



Slika 8.26 Pukotine nastale diferencijalnim slijeganjem u podlozi

. Slika 8.27 jasno ukazuje na slabije zbijeni sloj. Procurivanja sva započinju na istoj visini.

Pukotine mogu nastati i uslijed:

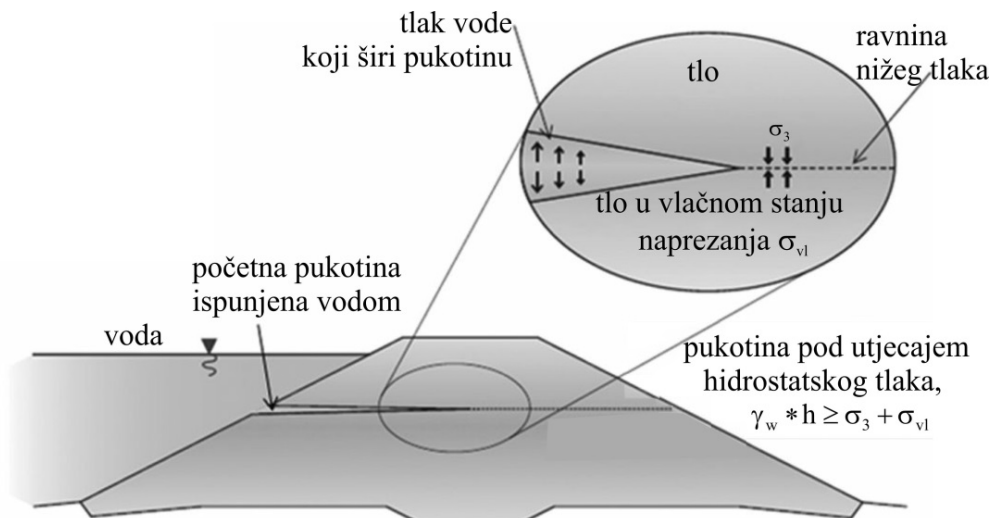
- stezanja na površini, u klimatski nepovoljnim okolnostima, kada sitnozrno tlo u nasipu nije zaštićeno od isušivanja;
- utjecaja mraza, nakon otapanja, ako postoje uvjeti za to;
- djelovanja potresa;
- djelovanja vegetacije i životinja koje kopaju nastambe u nasipu.

Kad je nastala pukotina, započinje hidrauličko raspucavanje uzrokovano povećanim pornim tlakovima.



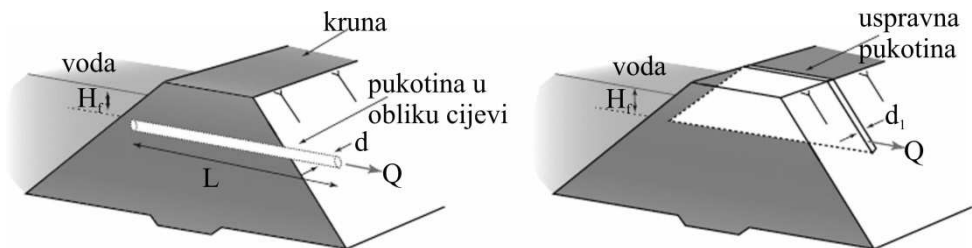
Slika 8.27 Koncentrirani tok na nizvodnoj strani nasipa Tunbridge, (Fell i dr. 2015.)  
uslijed procjeđivanja kroz slabije zbijeni sloj

Hidrauličko raspucavanje pukotine može nastati onda, kada je efektivno geostatičko uspravno naprezanje  $\sigma'_3$ , uvećano za vlačnu čvrstoću  $\sigma'_{vl}$ , jednako ili manje od hidrostatičkog tlaka,  $\gamma_w * h$ . (slika 8.28)



Slika 8.28 Hidrauličko širenje pukotine u nasipu

Više autora, među kojima i Fell i dr. (2015.) daju način proračuna za određivanje hidrauličkog posmičnog naprezanja u pukotini i cijevi. Posmični otpor na stjenkama,  $\tau$ , nastao tečenjem kroz prioritetni put, jednak je strujnoj sili, s. Slika 8.29 shematski prikazuje moguće prioritetne putove za vodu kroz nasip, s osnovnim podacima za proračun utjecaja strujanja na trenje na stjenci pukotine. Ovo su dva najjednostavnija primjera.



Slika 8.29 Geometrija nasipa i prioritetnog puta za proračun hidrauličkog posmičnog naprezanja

Uz određene pojednostavljene rubne uvjete, može se izračunati posmično naprezanje,  $\tau$ , uslijed strujanja kroz prioritetni put:

za cijev kružnog poprečnog presjeka promjera  $d$ ,

$$\tau = \rho_w \frac{g * H_f * d}{4 L} \quad (8.16)$$

– za uspravnu pukotinu širine  $d_1$ ,

$$\tau = \frac{\rho_w * g * H_f^2 * d_1}{2(H_f + d_1)L} \quad (8.17)$$

gdje je :

- $\tau$  – posmično naprezanje uslijed strujanja u  $N/m^2$ ;
- $\rho_w$  – gustoća vode u  $kg/m^3$ ;
- $g$  – gravitacija,  $9,81m/s^2$ ;
- $H_f$  – pad tlaka uslijed trenja u metrima;
- $L$  – dužina puta vode kroz prioritetni put u metrima;
- $d$  – promjer cijevi u metrima;
- $d_1$  – širina pukotine u metrima

Unutarnja erozija će započeti kada su za to ostvareni uvjeti. Posmično naprezanje, uslijed tečenja, ovisi o širini pukotine i hidrauličkom gradijentu duž prioritetnog puta. Kada je ono veće od kritičnog u stjenkama pukotina, započinje erozija, a  $\tau_{krit}$  se može izraziti kao (Richards, 2012.):

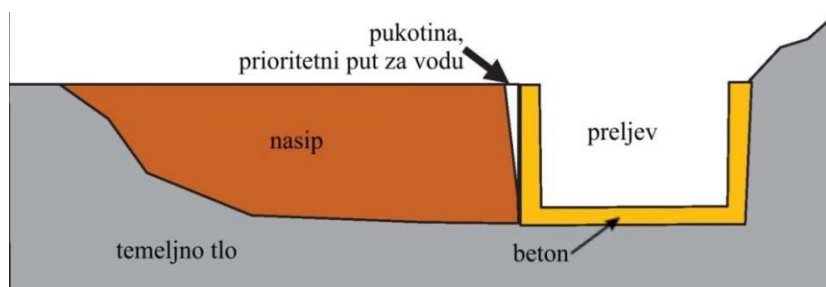
$$\tau_{krit} = \gamma_w * h_p * i_{krit} \quad (8.18)$$

gdje je:  $\tau_{krit}$  - kritično posmično naprezanje;  $\gamma_w$  – jedinična težina vode;  $h_p$  – pijezometarski tlak, a  $i_{krit}$  – kritični hidraulički gradijent pri kojem počinje hidraulički slom.

Kod nasipa koji povremeno drže vodu ostaje pitanje utjecaja vremena na napredovanje procjeđivanja, nastajanje strujnog polja i na pojave oštećenja u nasipima koje iz tog strujanja proizlaze (slika 8.23), odnosno vremena trajanja vrlo visokog vodostaja (VVV).

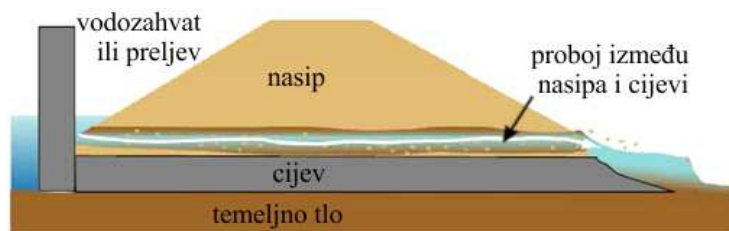
#### 8.6.4 Erozija uz građevine koje prolaze nasipom

Koncentrirana erozija se vrlo često javlja uz razne betonske cijevi ugrađene u nasipe kao i uz građevine ugrađene uz nasipe. Tipičan primjer je betonski preljev kojim se propušta višak vode kroz nasip u zaobalje ili nizvodni tok. Uz takvu građevinu, u slučaju nedovoljno pažljive i precizne izvedbe, nastaje prioritetni put koji može uzrokovati cijevljenje i velika oštećenja (slika 8.30).



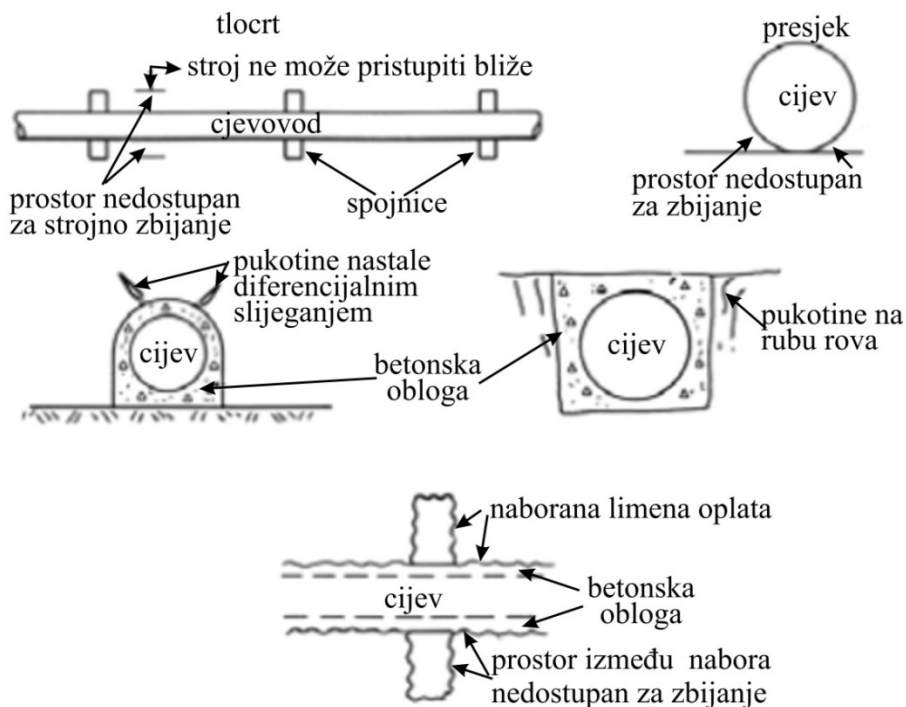
Slika 8.30 Pukotina uz betonski zid

Erozija može nastati i uz cijevi koje prolaze kroz nasip. To mogu biti prodori dovoda zaobalnih voda, ispusti iz crpnih stanica koje prebacuju vodu iz zaobalja u rijeku, temeljni ispusti, vodozahvati i slični cjevovodi. Uz takve cjevovode vrlo jednostavno nastaju prioritetni putovi u kojima započinje unutarnja erozija koja se zatim širi i može dovesti do proloma nasipa (slika 8.31).



Slika 8.31 Prodor cijevi kroz nasip s prodorom vode uz cijev

Ovo cijevljenje nastaje uslijed nemogućnosti pristupa strojevima (valjcima, ježevima, žabama) određenim dijelovima cjevovoda, na pr. u prostoru oko spojnica, kako je to prikazano na slici 8.32 i fotografiji 8.33.



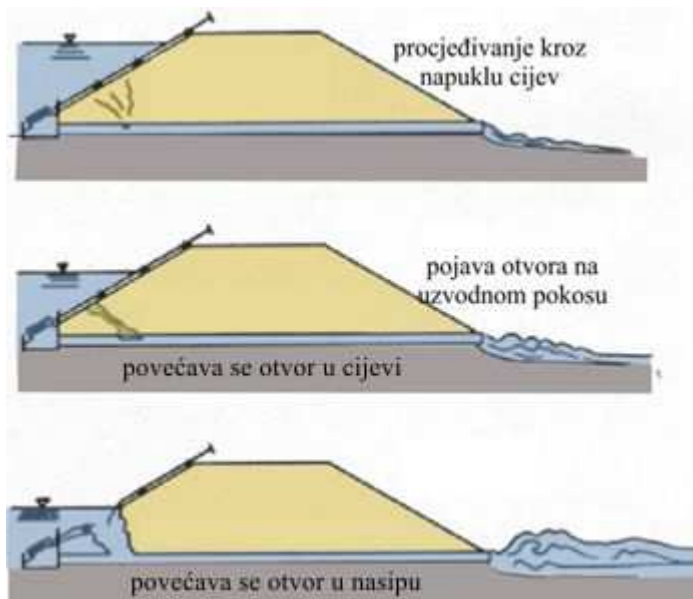
Slika 8.32 Prostori oko cijevi nedostupni za strojno zbijanje (Fell i dr. 2015.)



Slika 8.33 Ugradnja cijevi i spojnica (FEMA 484, 2005.)

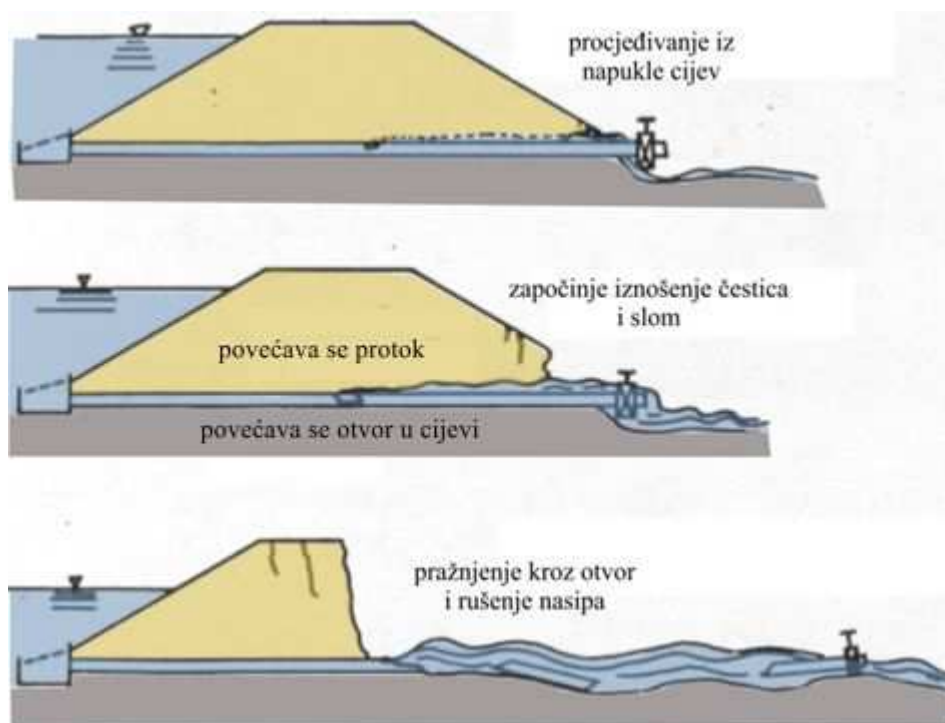
Slijeganja nasipa mogu dovesti do pucanja cijevi koje su iz raznih razloga u njega ugrađene. Tada može nastati cijevljenje u cijev kako je to prikazano na slici 8.34.





Slika 8.34 Puknuta cijev na kojoj počinje erozija uzvodne strane nasipa (FERC 2009.)

Iz istog razloga može doći do cijevljenja kroz cijev, kako je prikazano na slici 8.35.



Slika 8.35 Pojava erozije na nizvodnoj nožici uslijed pukotine u cijevi (FERC 2009.)

### 8.6.5 Povratna erozija

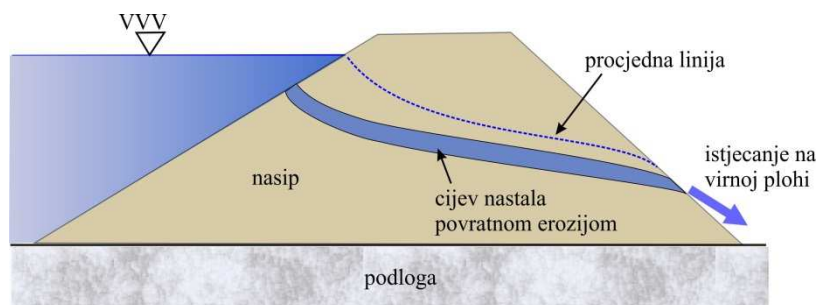
Povratna erozija nastupa onda kada se na zračnoj strani nasipa pojavi pukotina ili hidraulički slom (slika 8.36). Prethodno je pokazano kako mogu nastati pukotine.

Hidraulički slom se može pojaviti u samoj nožici nasipa, ali i u točkama nešto udaljenijim od nožice nasipa, u podlozi. Gdje će slom pojaviti ovisi o odnosima pijezometarskog tlaka i svojstava tla. Kada se pojavi na virnoj plohi u nožici nasipa može nastati koncentrirano cijevljenje kroz nasip (slika 8,36).

Ova je pojava moguća kada je nasip temeljen (FERC, 2009.):

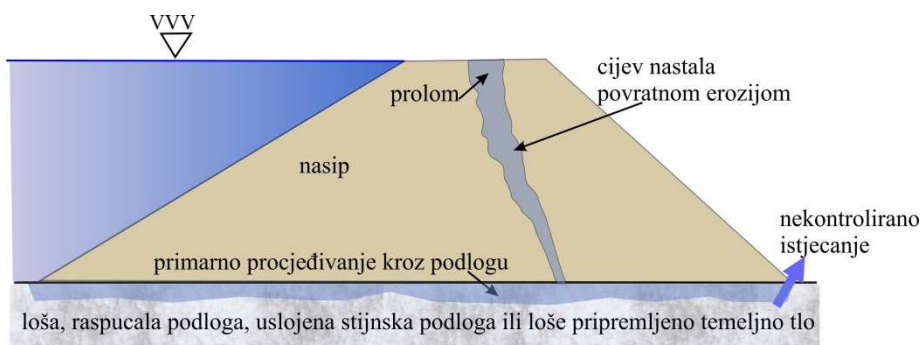
- na propusnoj podlozi koja nije kompatibilna s gradivom nasipa, a izostala je ugradnja filtra po filtarskom pravilu ili primjenom geotekstila (slika 8.38),
- na tlu na kojem pukotine u temelju nisu pravilno obrađene,
- na tlu na kojem se pojavljuju nestupnjevani otvori,
- na cijevi od lave u temeljima,
- na vapnenačkom kršu.

Duljim trajanjem ovakvog koncentriranog tečenja kroz nasip dolazi do potpunog rušenja.



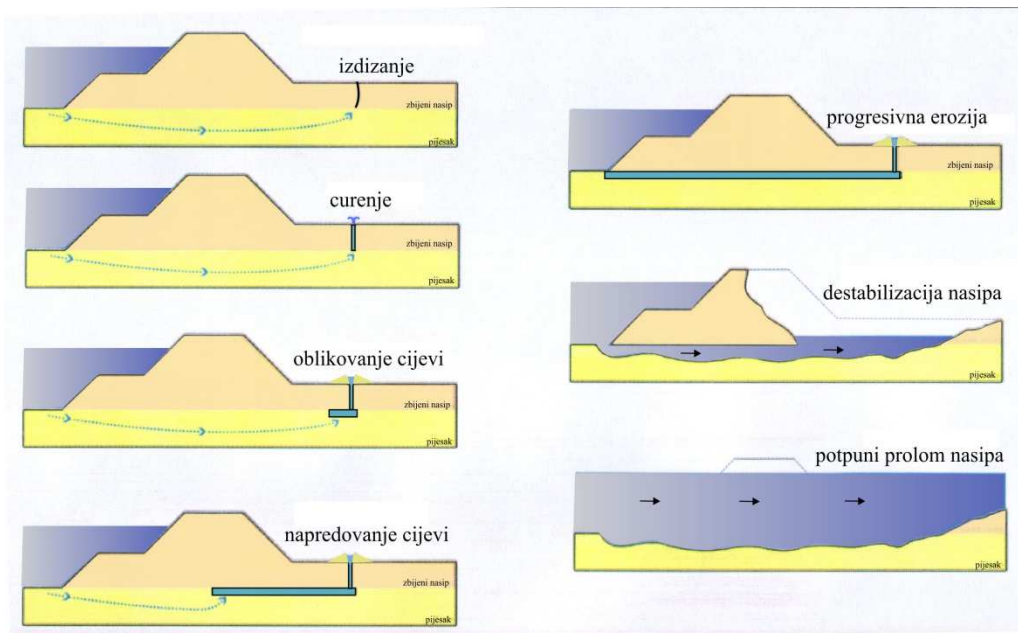
Slika 8.36 Povratna erozija kroz nasip uslijed hidrauličkog sloma na virnoj plohi

Može nastati i kombinacija procjeđivanja kroz temeljno tlo koje povuče tečenje iz nasipa i povratnom erozijom stvori cijev kroz nasip kao na slici 8.37.



Slika 8.37 Povratna erozija kroz nasip uslijed ispiranja temeljnog tla

Na slici 8.15 prikazana je strujna mreža kroz nasip i propusnu podlogu sličnih procjednih svojstava. Takvo strujanje može izazvati pojavu povratne erozije. Ona nastaje kada se na određenoj udaljenosti od nožice nasipa na nizvodnoj strani poklopi izlazni gradijent i kritični izlazni gradijent za tlo u podlozi. Na tom se mjestu javlja virna ploha. Proces je prikazan na slici 8.38, a rezultat u prirodi na slici 8.39.

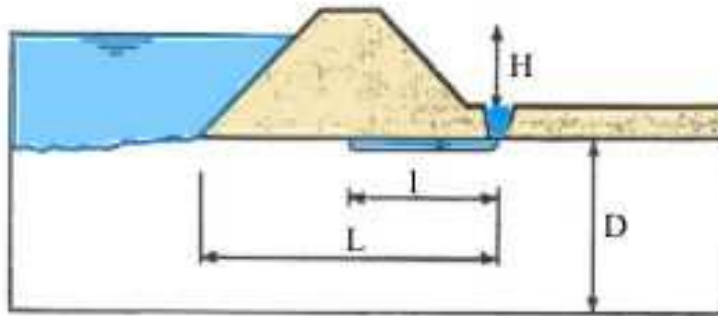


Slika 8.38 Proces povratne erozije kroz propusnu podlogu (Van Beek i dr. 2010.)



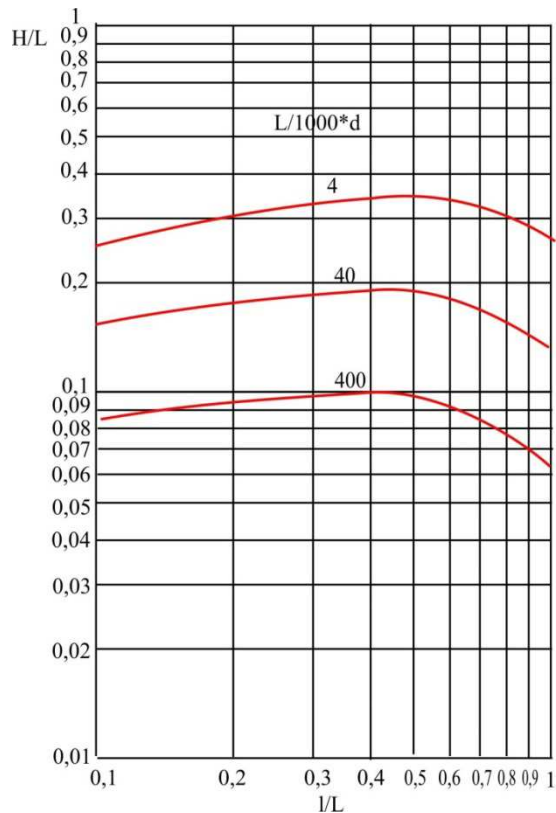
Slika 8.39 Stožac tla na mjestu početka povratne erozije u zaobalju (Fell, 2005.)

O tome koliki je značaj povratne erozije, govori činjenica da je hidrotehnički laboratorij u Delftu tu pojavu vrlo detaljno istraživao raznim metodama, od fizičkog modela, centrifuge pa do niza numeričkih modela (slika 8.40).



Slika 8.40 Geometrija modela povratne erozije laboratorija u Delftu (Weijers, Sellmeijer, 1993.)

Koenders i Sellmeijer su 1992. godine publicirali rad o matematičkom modelu za pojavu cijevljenja kroz nasipe. Rezultat je dijagram na slici 8.41.

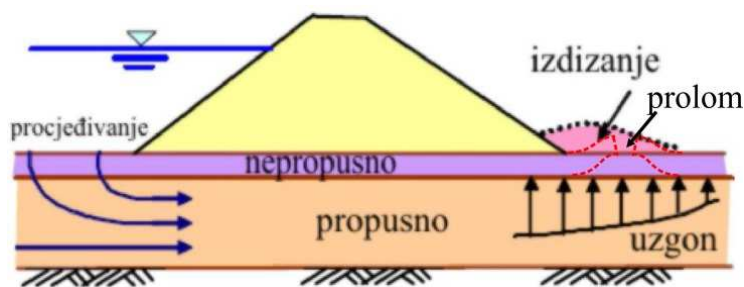


Slika 8.41 Rezultat numeričke analize povratne erozije (Koenders i Sellmeijer 1992.)

Na njemu je (oznake na sl. 8.40) povezan odnos  $l/L$ , dužine erozivnog kanala,  $l$ , i širine nasipa u temelju,  $L$ , s odnosom  $H/L$ , razlike potencijala gornje i donje vode,  $H$  i širine nasipa u temelju  $L$ , s odnosom širine nasipa  $L$  i promjera čestica tla,  $d$ ,

L/1000d. Sve to ukazuje na neobičan značaj i učestalost ove pojave. (vidi US Buro of reclamation, 2012.). Nije naznačeno kako izgleda granulometrijska krivulja iz koje se bira promjer zrna,  $d$ , i kojem postotku prolaza kroz sito pripada taj promjer zrna.

Povratna erozija, koja uzrokuje oštećenja s istovjetnim posljedicama, je izdizanje i probijanje temeljnog sloja tla, male propusnosti, neposredno pored zračne strane nasipa ili na nekoj udaljenosti kada je nepropusni, površinski sloj, koji se nalazi na sloju veće propusnosti, nedovoljne debljine da savlada uzgon koji nastaje u dubljem, ječe propusnom sloju pod utjecajem visine vode u površinskom vodonosniku (slika 8.42). Razina vode u površinskom vodonosniku izravno utječe na pijezometarske tlakove u podlozi veće propusnosti. Razlika potencijala, uzgon, uzrokuje prolom nepropusnog sloja i povratnu eroziju (Roje-Bonacci, 2015.).



Slika 8.42 Prolom suviše tanke nepropusne podloge uslijed djelovanja uzgona

Tlo u propusnom sloju iznosi voda kroz nastalu cijev kao na slici 8.38 pa je rezultat također povratna erozija. Kada se ovakva pojava uoči, jedini je način obrane zaustavljanje tečenja. To je moguće jedino povećanjem hidrauličkog potencijala na mjestu istjecanja, odnosno smanjenje ukupne razlike potencijala, kako je to prikazano na slikama 8.43 i 8.44.



Slika 8.43 Bunar za poravnanje tlakova

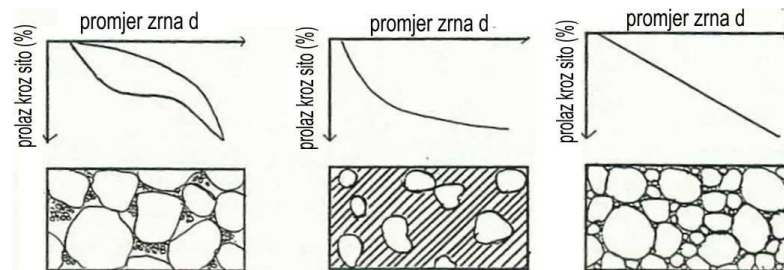


Slika 8.44 Povećanje razine na izlazu, pomoću zečjeg nasipa lijevo Fell, (2015.), desno L. Tadić, Dunav, travanj 2006.

### 8.6.6 Sufozija u nestabilnim tlima

Sufozija je još jedna pojava koja može uzrokovati oštećenje i rušenje nasipa.

Sufozija se može dogoditi u nekoherentnim, slabo graduiranim (GP, SP) tlima kao i tlima širokog granulometrijskog sastava, kroz koja protječe voda. Tla su prikazana na slici 8.45.



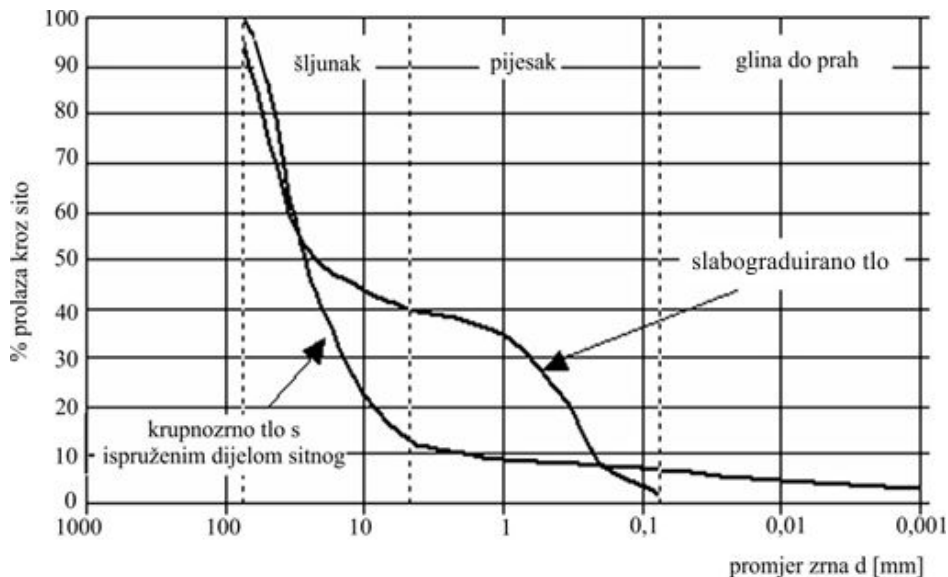
Slika 8.45 Shenatski izgled granulometrijskog sastava i rasporeda zrna tala podložnih sufoziji (lijevo i u sredini) i tla koje nije podložno sufoziji (desno), ( Rönqvist i Viklander 2014.)

Da bi se pojavila sufozija potrebno je da bude zadovoljeno nekoliko uvjeta:

- sitne čestice moraju biti manje od najmanjih razmaka među krupnim česticama koje čine temeljni kostur tla;
- količina sitnih čestica mora biti nedovoljna da ispuni prostore između krupnih čestica kostura, prostori moraju biti „poluprazni“. Ako ima previše sitnih čestica koje su ispunile prazne prostore, krupne čestice počinju „lebdjeti“ u okruženju sitnih čestica te i same postaju vrlo pokretljive;
- brzina toka vode kroz tlo mora biti dovoljno velika, kako bi sila strujnog tlaka mogla pokrenuti sitne čestice i provući ih kroz razmake između krupnijih čestica kostura tla.

Takva se tla mogu naći u podlozi nasipa. To su aluvijalna tla velikih rijeka i koluvijalna tla u koritima brdskih potoka i bujica, nepravilnih granulometrijskih sastava.

U nasipima to mogu biti tla ledenjačkog porijekla u jezgri ili filtarski slojevi širokog granulometrijskog sastava ili sastava kojem nedostaje pojedina frakcije ili s prekomjerno sitnih čestica. Na slici 8.46. prikazana su dva oblika granulometrijskog dijagrama ključna za pojavu odnosno ne pojavu sufozije.



Slika 8.46 Granulometrijski dijagrami tala podložnih sufoziji (Fell i dr, 2015.)

Za dva prikazana granulometrijska dijagrama shematski se raspored čestica može prikazati kao na slici 8.47.

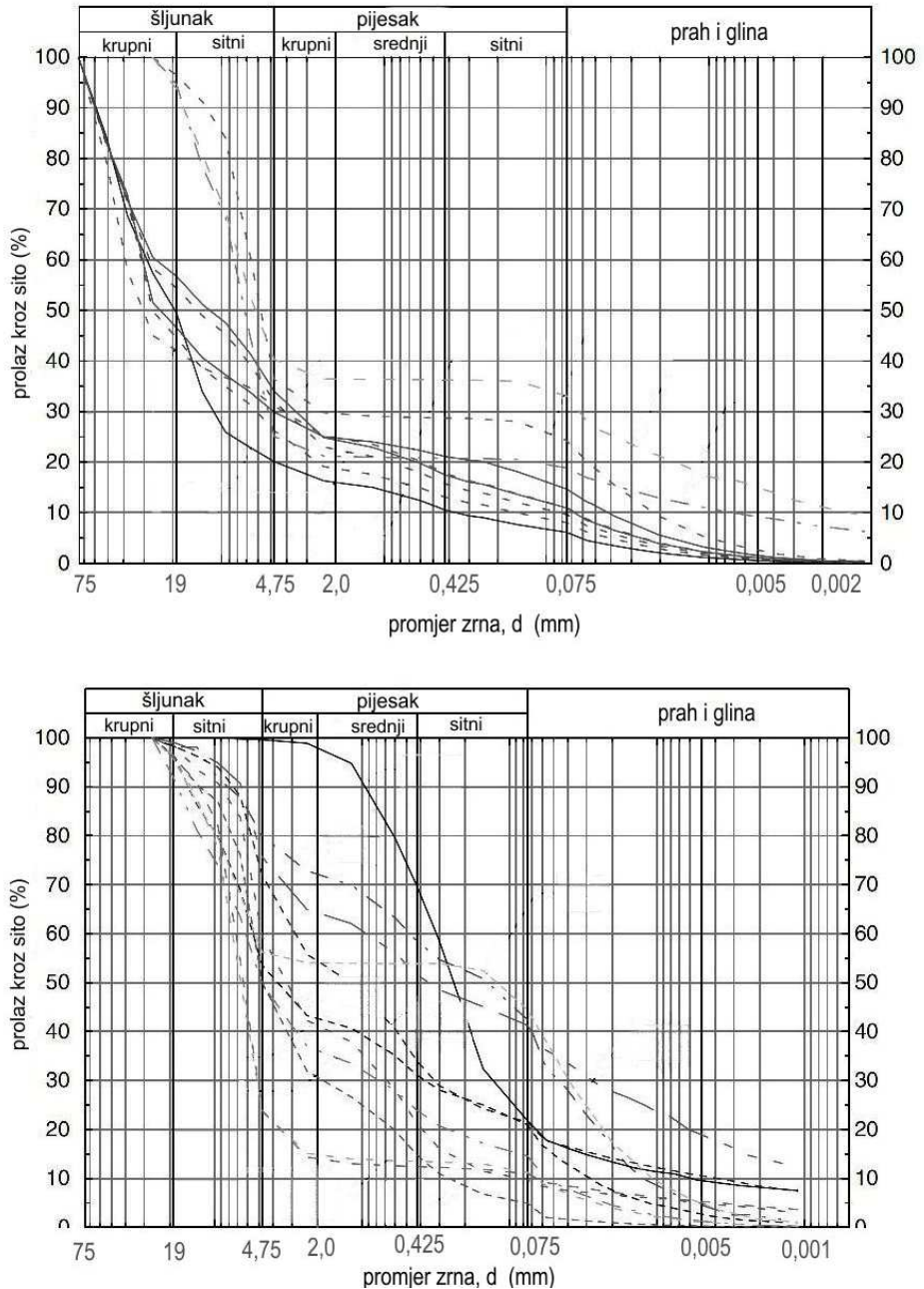


Slika 8.47 Lijevo model tla s previše sitnih čestica, desno za slabo graduirano tlo

Sufozija uzrokuje postepeno povećanje koeficijenta filtracije „k“ i povećanu brzinu tečenja kroz tlo. Postepeno, voda iznosi sve više i sve krupnijih čestica. Stoga sufozija može uzrokovati slijeganje podloge i samog nasipa i uzrokovati sve

posljedice koje nastaju slijeganjem, a prethodno su prikazane. Neki autori koriste pojam sufozija u slučaju povratne erozije u koherentnim tlima, a što nisu iste pojave.

Na slici 8.48 prikazane su dvije grupe granulometrijskih dijagrama, jedna, gore, na kojoj su tla podložna sufoziji i druga, dolje, na kojoj su tla otporna na sufoziju.



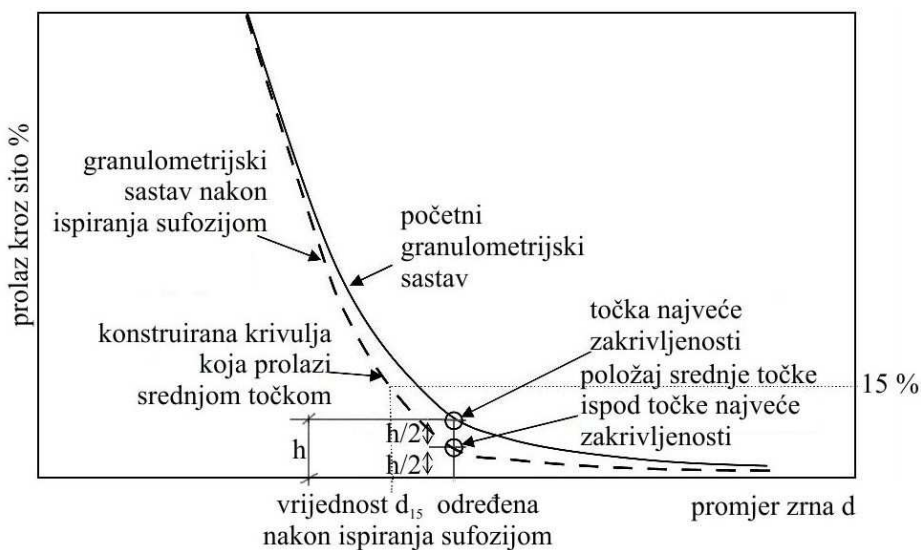
Slika 8.48 Granulometrijski dijagrami tala, gore podložnih sufoziji , dolje stabilnih na sufoziju (Wan i Fell, 2004, 2007)



Prethodno prikazani granulometrijski dijagrami su rezultati laboratorijskih ispitivanja sufozije. Oblik granulometrijskog dijagrama je jedan od načina za prepoznavanje tla koje bi moglo biti podložno sufoziji.

Fell i dr. (2015.) daju primjere, kako se može popraviti tlo koje pokazuje svojstvo sufozije, prema raznim autorima. To je moguće dodajući pojedine potrebne frakcije slično kao što je to, za neke druge potrebe prikazano, u poglavlju 1 (slika 1.3). Dodavanje frakcija i miješanje u krivulje traženih oblika je moguće, ali je za velike nasute građevine skupo. Stoga se koristi isključivo kada ne postoji nikakvo drugo rješenje i za pojedine dijelove zoniranih nasipa, kao što su filtarski slojevi.

U izučavanju pojave sufozije Fell i dr. (2008.) pokazuje približni postupak za određivanje granulometrijske krivulje i promjera 15 % zrna,  $d_{15}$ , iz osnovne granulometrijske krivulje tla podložnog sufoziji, nakon što su isprane sitne čestice, (slika 8.49).

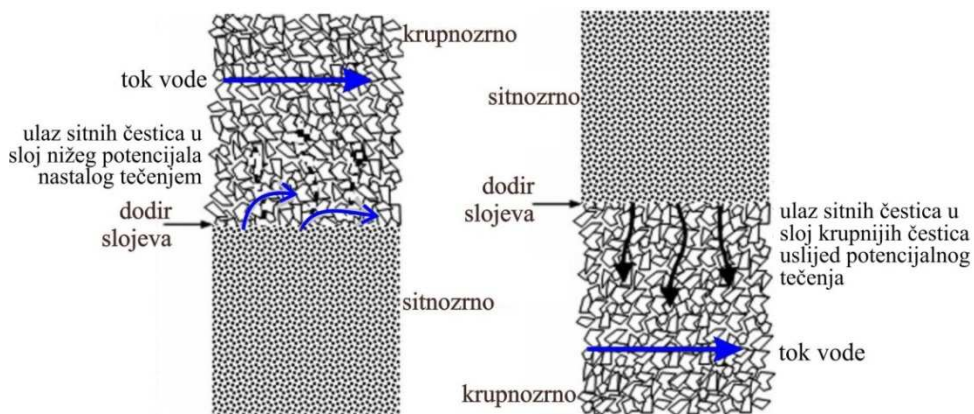


Slika 8.49 Konstrukcija približne granulometrijske krivulje tla podložnog sufoziji nakon ispiranja sufozijom iz izvorne granulometrijske krivulje prije ispiranja

Općenito je uočeno da je sufoziji više podložno slabo zbijeno tlo velike propusnosti. Ono erodira već pri hidrauličkom gradijentu  $i < 0,3$  dok tla s više sitnih čestica erodiraju pri većim hidrauličkim gradijentima. Tla tipa GP i SP, slabo građirana, erodiraju pri nižim gradijentima od sličnih tala koja imaju nešto sitnih čestica. Ispitivanja su pokazala da kritični izlazni gradijent,  $i_{krit.}$ , kojeg je definirao Terzaghi, ovisi i o efektivnom napreznju u promatranoj točki nasipa i/ili podtemeljnog tla.

### 8.6.7 Erozija na spoju slojeva različitog granulometrijskog sastava

Ova se vrsta erozije događa na dodiru dva sloja različitih krupnoća, a njihov odnos granulometrijskih sastava ne odgovara filtarskom pravilu. Ispiranjem sitnih čestica dolazi do „segregacije“ pri kojoj sitne frakcije nestaju, povećava se porozitet što povećava vodopropusnost i dolazi do urušavanja rahlog sloja. Može se dogoditi i u nasipu i u podlozi kako je to prikazano na slici 8.50.

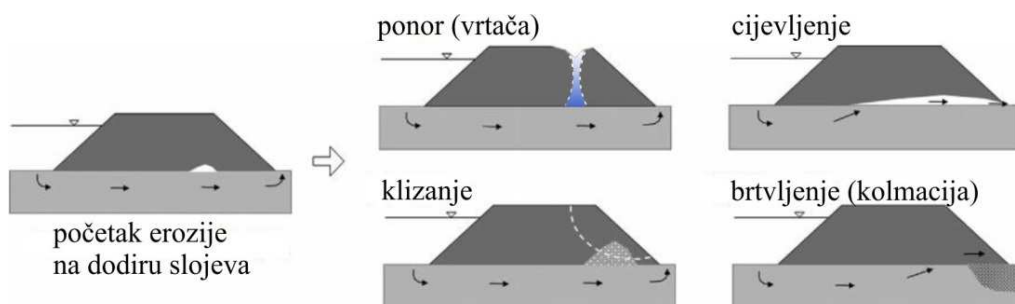


Slika 8.50 Erozija na granici dvaju slojeva

Da bi se ovakva erozija mogla dogoditi trebaju biti ispunjena dva uvjeta:

1. Razlika u krupnoći čestica granulometrijskih krivulja mora biti takva da sitnije čestice mogu nesmetano ulaziti u prostore između krupnih čestica;
2. Brzina vode mora biti dovoljna da može otkidati čestice na dodiru dvaju slojeva i time povećati prostor u sitnijem sloju za slobodniji i brži protok što zatim rezultira otkidanjem čestica u dubini sloja i povećanjem debljine segregiranog, destabiliziranog sloja.

Više autora je izučavalo ovu pojavu kako analitički tako i na fizikalnim modelima (Beguin, 2011.). Jedan od rezultata prikazan je na slici 8.51, kao mogući učinci međuslojne erozije.



Slika 8.51 Učinci dodirne, međuslojne erozije

U literaturi se može naći više izraza za ocjenu ove erozije. To mogu biti kritične brzine pri laminarnom tečenju, kod kojih će započeti međuslojna erozija.

Beguín (2011.) navodi da za  $v_{krit}$  dobre rezultate daje izraz od Brauns-a (1985.):

$$v_{krit} = 0,7n_D \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right)g * d_{50}} \quad (8.19)$$

gdje je  $n_D$  porozitet sloja šljunka,  $\rho_s$  ( $\text{kg/m}^3$ ) gustoća čestica pijeska,  $\rho_w$  ( $\text{kg/m}^3$ ) gustoća vode,  $d_{50}$  srednji (50%) promjer zrna iz granulometrijske krivulje pijeska. Jednadžba vrijedi za uvjet da je  $(n_D * d_{15})/d_{85} > 10$ .

Za slučaj sitnozrnog tla (niske plastičnosti, čestica  $< 75 \mu\text{m}$ ) ispod sloja šljunka, Guidoux i dr. (2010.), nakon laboratorijskih ispitivanja su prilagodili Brauns-ovu jednadžbu na efektivni promjer zrna sitnih čestica,  $d_{ef}$  sitnih čestica, umjesto 50 % promjera zrna  $d_{50}$  kako slijedi:

$$d_{ef} = \left(\sum_{j=1}^m \frac{F_j}{d_j}\right)^{-1} \quad (8.20)$$

gdje je  $F_i$  masa čestica promjera  $d_i$  iz granulometrijske krivulje, koji je pridružen odgovarajućem dijelu početne granulometrijske krivulje.  $F_i$  se određuje u odnosu na ukupnu masu ispitanog uzorka.

Guidoux i dr. (2010.) predlažu za laminarno tečenje sljedeći izraz za kritičnu brzinu  $v_{krit}$ :

$$v_{krit} = 0,7n_D \sqrt{\left(\frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_w}\right)g * d_{ef} \left(1 + \frac{\beta}{d_{ef}^2}\right)} \quad (8.21)$$

gdje je  $\beta$  empirijski parametar. Prema rezultatima Guidoux i dr. (2010.),  $\beta = 5,3 \times 10^{-9} [\text{m}^2]$ .

Opisane pojave erozije ukazuju na moguće uzroke proloma nasipa. Može se zaključiti da je dio ovih učinaka moguće spriječiti pravilnim projektiranjem, izvedbom i opažanjem nasipa. Postoje poteškoće kod davno izvedenih građevina, koje ne mogu zadovoljiti današnje zahtjeve prema EC 7 glede stabilnosti i uporabivosti.

I same postavke EC 7 u području hidrotehničkih nasipa ne obuhvaćaju sva područja koja je potrebno regulirati. Stoga je 2014. godine CIRIA objavila dodatak EC 7 kao dopunu naputcima o hidrotehničkim nasipima za obranu od poplava, tj. nasipima koji povremeno drže vodu, a koji je prethodno opisan.

## 9 SASTAVNICE PROJEKTA I IZVEDBE NASIPA

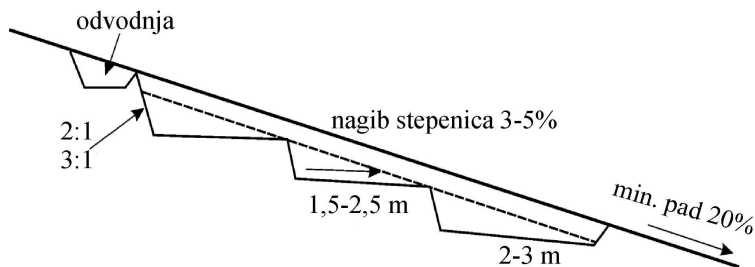
Svaki nasip sastoji se od nekoliko osnovnih dijelova od koji svaki ima neku zadaću. Svaka od tih sastavnica zahtjeva posebnu pažnju pri projektiranju, izvedbi i provjeri kakvoće izvedenog dijela. Ti dijelovi nasipa su :

- temeljno tlo;
- tijelo nasipa;
- nepropusno tijelo;
- kruna;
- zaštita i obloga pokosa;
- berme;
- filtarski slojevi;
- sustavi za odvodnju i procjeđivanje;
- dijelovi za osiguranje od proloma i povratne erozije u nasipu i zaobalju;
- vododrživi dijelovi hidrotehničkih nasipa.

### 9.1 TEMELJNO TLO

Temeljno tlo je sastavni dio nasipa. Nasip nema temelj u klasičnom smislu, kao što ga imaju zidane, betonske, čelične ili drvene građevine. Nasip leži izravno na prirodnoj podlozi. Kod podloge traženih svojstava, dovoljno je odstraniti raslinje i sloj humusa. Podloga može biti odgovarajuća za nasip koji se na njoj gradi ili ju je potrebno popraviti. Za nasipe nije moguće birati dobro temeljno tlo jer nasip ima prostor na kojem mora biti izgrađen. Iz tog razloga se temeljno tlo treba urediti. To mogu biti jednostavne metode dodatnog zbijanja, ali i vrlo složeni zahvati raznim metodama za poboljšanje svojstava podtemelnog tla u plićim i/ili dubljim slojevima. Koji će se način poboljšanja odabrati i koje mjere poduzeti u smislu kakvoće i dubine, ovisi o namjeni nasipa i stanju temeljnog tla. Mjere mogu služiti za smanjenje slijeganja, ubrzanje slijeganja, smanjenje vodopropusnosti, povećanje čvrstoće na smicanje i slično. Za to je potrebno poznavati sastav i svojstva temeljnog tla, što zahtijeva ozbiljne geotehničke istražne radove (FHWA, 2002.). Za metode za poboljšanja temeljnog tla vidi u Roje-Bonacci, (2010. i 2012.).

Kada je teren, na kojem će ležati nasip, u nagibu većem od 20%, potrebno je radi veće stabilnosti nasipa, iskop izvoditi u više stepenica (slika 6.14 i 9.1). Zasijecanje se vrši stepenasto na svakih 100 – 300 cm visinske razlike, ovisno o nagibu terena, a ploha nalijeganja treba da je u padu 3-5 % u smjeru pada terena.

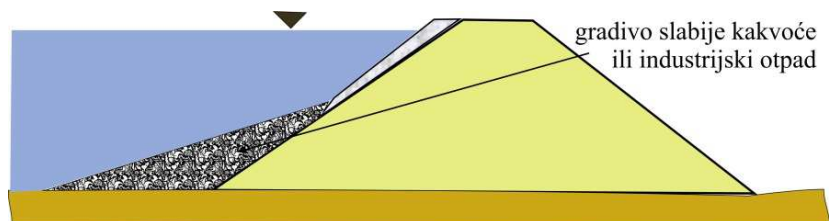


Slika 9.1 Stepenice u nagnutom tlu

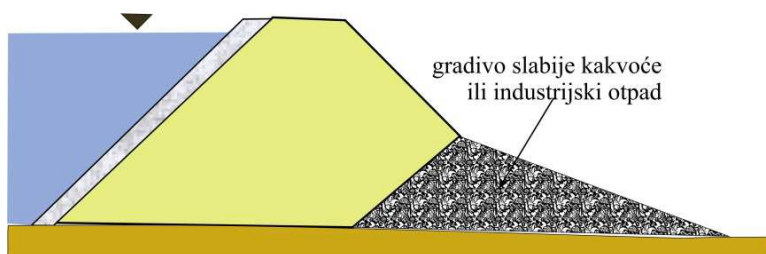
Zasijecanje se vrši nakon skidanja humusa, strojno, odnosno ručno, ako je teren u velikom nagibu ili ako je stjenovit. Zasijecanje treba izvršiti neposredno prije početka nasipavanja, kako se podloga ne bi izlagala dugotrajnijem vlaženju i kvašenju te eventualnom odronjavanju stepenastih zasjeka. Prije ugradnje nasipa, zamjenskog sloja ili temelja, podlogu treba uvaljati prema zahtjevima iz projekta.

## 9.2 TIJELO NASIPA

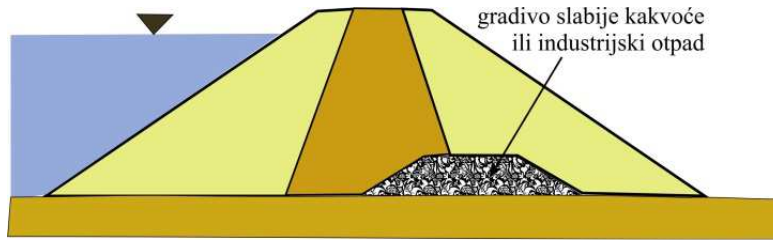
Tijelo nasipa je trup nasute građevine, izveden od propisanog tla kao gradiva i ugrađenog na propisani način. Gradivo za nasipe i njegova svojstva, kao i način ispitivanja, opisani su u prethodnim poglavljima. Ovdje treba dodati da se u nasipe mogu ugraditi i tla lošije kakvoće odnosno industrijski otpad, ako mogu zadovoljiti uvjete predviđene projektom. Ta se gradiva u hidrotehničkim nasipima ugrađuju u potporne zone nasipa ili ako odgovaraju sastavom, u prelazne, široke filtarske zone. (Slike 9.2-9.5)



Slika 9.2 Uzvodna potporna zona ojačana nasipom tla slabije kakvoće ili industrijskim otpadom

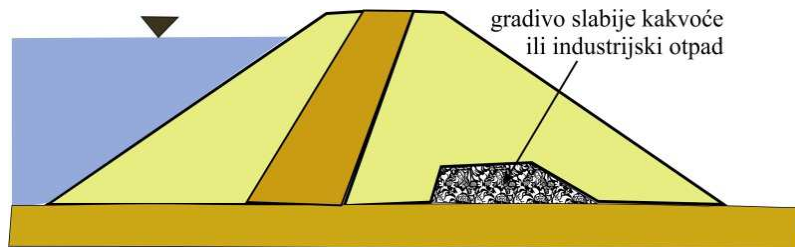


Slika 9.3 Gradivo slabije kakvoće ugrađeno u nizvodnu potpornu zonu



Slika 9.4 Građivo slabije kakvoće unutar jezgre i nizvodne potporne zone

U slučaju sa slike 9.4 građivo slabije kakvoće može služiti kao drenažni sloj, slično kao i na slici 9.5, ako ima zadovoljavajuća svojstva.



Slika 9.5 Građivo slabije kakvoće unutar nizvodne potporne zone

Velike količine raznog industrijskog otpada natjerale su istraživače u SAD-u da se ozbiljno pozabave mogućnošću upotrebe ovih ostataka u izgradnji nasipa za prometnice, naročito autoceste, za koje su potrebne velike količine građiva (Chesner i dr. 1998.). Utvrdili su da postoji 19 vrsta industrijskog otpada koji je prikladan za ponovnu upotrebu pri izgradnji autocesta. Upotreblijivi su ili kao samostalna građiva ili kao primjese u drugim građivima za nasipe (Roje-Bonacci, 2006.). Sličan problem s težištem na kolničku konstrukciju razmatra i Christopher i dr. (2006.).

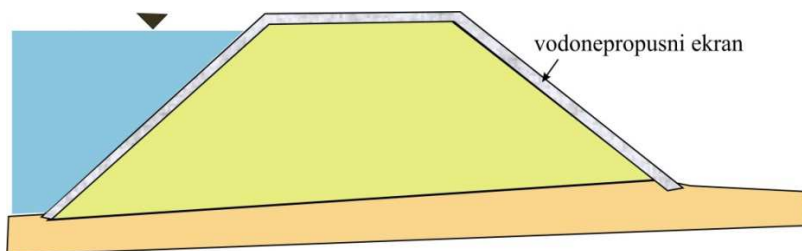


Slika 9.6 Nasip dijelom izveden od iskorištenih automobilskih guma

### 9.3 NEPROPUSNO TIJELO

Svi hidrotehnički nasipi imaju zadaću zadržavanja vode s jedne strane. Da bi se to ostvarilo moraju ili sami biti izvedeni od vododrživog gradiva u cijelosti ili moraju imati neki vododrživi dio ugrađen u ili na nasip. Nasipi za obranu od poplava koji povremeno drže vodu, uglavnom su homogeni nasipi od slabo propusnog tla. Oni mogu vodu zadržati dovoljno dugo da osiguraju branjeno područje od poplave. Dolinske pregrade, koje vodu drže trajno, uglavnom u nasip ili na nasip imaju ugrađen element koji je vododrživ. Na slici 6.34 je jedna takva pregrada s glinenom, vododrživom jezgrom. Jezgra mora biti ugrađena do visine za koju se projektom predvidjelo da će u svakom trenutku biti iznad najviše projektirane kote vode. Vododrživa jezgra, nakon ugradnje mora zadovoljiti sve zahtjeve vezane uz fizikalno-mehaničke osobine, propisane projektom naročito glede zbijenosti i vodopropusnosti.

Vododrživost se može postići asfaltnom oblogom nasipa (primjer: nasipi za HE Varaždin, slika 9.7 i 9.8)



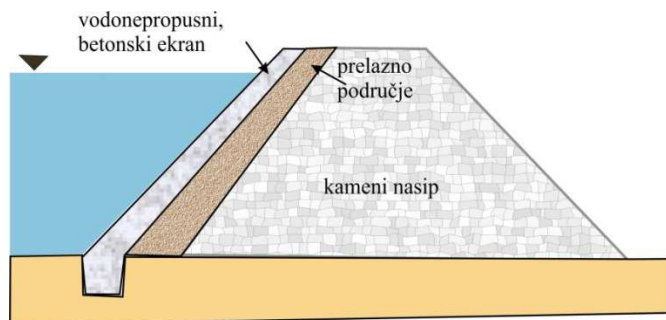
Slika 9.7 Shema zemljanog nasipa obloženog vodonepropusnim slojem,



Slika 9.8 Dovodni kanal HE Varaždin, obložen asfaltnim ekranom

Kod vododrživih ekrana koji prekrivaju zemljane nasipe, treba voditi računa o mogućoj pojavi klizanja po pokosu nasipa. Potrebno je razmotriti mogući utjecaj uzgona, pri naglom spuštanju vanjske vode, na vodonepropusnu oblogu i utjecaj promjene temperature zraka na istu.

Kameni nasipi mogu imati betonski ekran (brana Rama) kako je shematski prikazano na slici 9.9. Prelazno područje u slučaju brane Rama je izvedeno od slaganog kamena, slično roliranom pokosu, kao podloga za betonski ekran.



Slika 9.9 Kameni nasip s betonskim, vodonepropusnim ekranom

Betonska obloga kamenih nasipa mora imati dobro uporište u nožici na koju se obloga oslanja.

#### 9.4 KRUNA NASIPA

O kruni nasipa bilo je govora u prethodnim poglavljima. Kruna može biti dodatno doručena voznom površinom, ali može ostati i kao nezaštićena završna površina nasipa. Nasipi, koji samo povremeno dolaze pod utjecaj vode, a nemaju zaštićenu krunu na bilo koji način (kolničkom konstrukcijom ili namjenskom zaštitom), mogu pretrpiti isušivanje. Ako su izvedeni od srednje do visoko plastičnih glina, isušivanje može prouzročiti pojave pukotina na površini uslijed smanjenja zapremine zbog gubitka vlage. Frith i dr. (1997.) su pokazali da je ova pojava vezana uz indeks plastičnosti gradiva nasipa ( $I_p$ ).

Pukotine mogu nastati uzduž i poprijeko na pružanje nasipa. Tada na kruni nastaje tzv. „krokodilska koža“, prikazana na slici 9.10. Ove pukotine, ako sušno razdoblje potraje dovoljno dugo, mogu sezati znatno u dubinu, i do 1,0 m, odnosno u izrazito sušnim krajevima i do 5,0 m (Dyer i dr., 2009.).

Prethodno je bilo govora o učinku ovakvih pukotina u hidrotehničkim nasipima na njihovu sigurnost. Ta je pojava najizraženija na kraju dugog sušnog razdoblja nakon kojeg naglo dolazi do pojave intenzivnih kiša i bujanja vodotoka koji naglo smoče takav nasip.





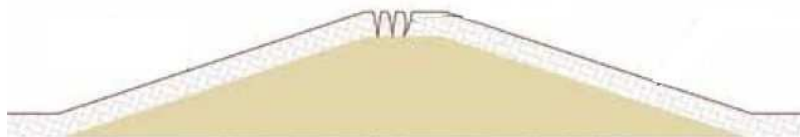
Slika 9.10 Pukotine u obliku „krokodilske kože“ na isušenoj kruni nasipa

Osim poplavne vode, u pukotine ulazi i kiša. Naglo vlaženje može dovesti do promjene fizičko-mehaničkih svojstava tla i izazvati razna, naprijed opisana oštećenja. Osim na procjeđivanje, ove pukotine mogu utjecati i na stabilnost pokosa ukoliko su ovi i inače na granici stabilnosti. Ovakve pukotine na površini mogu imati znatne širine. Jedna takva pukotina prikazana je na slici 9.11, nastala na nasipu u Slavoniji, uočena tijekom poplave 2014. godine.



Slika 9.11 Pukotina u kruni nasipa, početak klizanja

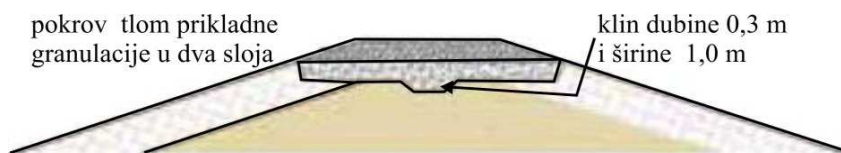
Shematski pukotine u kruni mogu izgledati kao na slici 9.12, a moguće ih je popraviti ili rekonstruirati kako je prikazano na crtežima od 9.13-9.15.



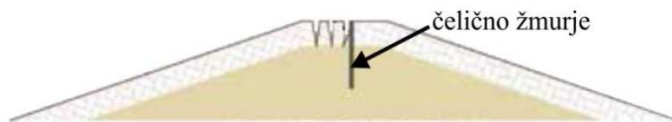
Slika 9.12 Raspucala kruna nakon duge suše



Slika 9.13 Popravak krunice iskopom i ponovnim zbijanje prikladnijim gradivom



Slika 9.14 Zaštita krunice granuliranim slojem tla



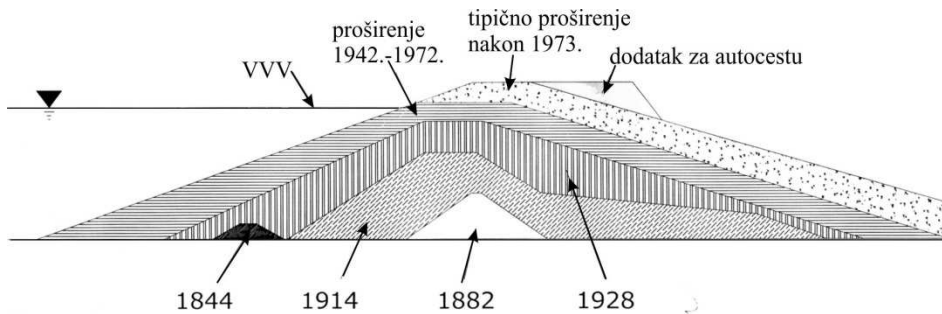
Slika 9.15 Zaštita krunice od procjeđivanja čeličnim žmurjem

Ovdje su prikazane samo neke od mogućnosti zaštite krunice od utjecaja isušivanja i nastanka pukotina. Ovakve pukotine mogu nastati i na pokosima nasipa ako isti nije prikladno obložen.

#### 9.4.1 Mogući načini nadvišenja krunice starih nasipa

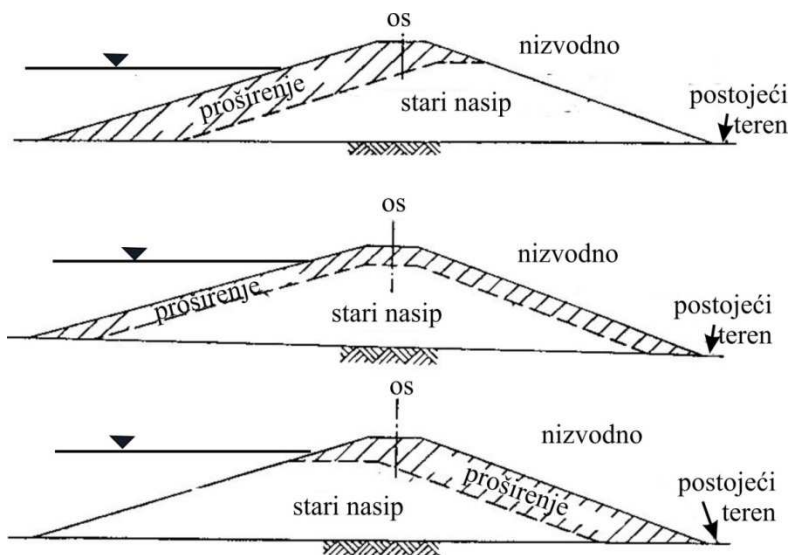
Pri rekonstrukciji starih nasipa je, iz različitih hidroloških, hidrauličkih, ekoloških, ekonomskih i drugih razloga, potrebno nadvisiti nasip. To je najjednostavnije skidanjem pokrovnog tla i nadomještanjem visine novim nasipom.

Da je to nužno potvrđuje slika 9.16 iz koje je jasno vidljivo kako je raso nasip na rijeci Mississippi u SAD-u. Vidljiv je rast nasipa kroz više od jednog stoljeća (1844.-2000.) Primjetna je razlika u pristupu nadvišenja od odmicanja od rijeke, dvostranog nadvišenja i jednostranog nadvišenja uz proširenje za izgradnju autoceste.



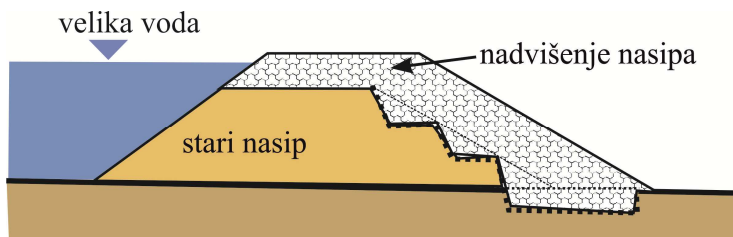
Slika 9.16 Nadogradnja nasipa na rijeci Mississippi (CIRIA C731)

Prema preporukama (USAEC, 2000.) nadvišenje je moguće izvesti s uzvodne strane, s obje strane i s nizvodne strane.



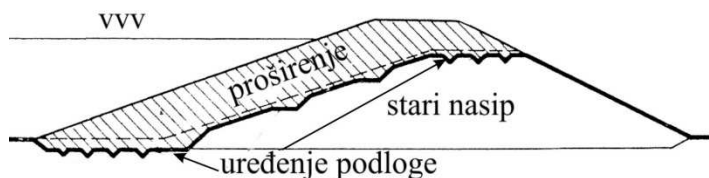
Slika 9.17 Mogući načini ojačanja i nadvišenja nasipa prema USAEC

Proširenje uvijek zahtijeva zauzimanje znatne dodatne površine da bi širina krune ostala nepromijenjena. Zbog jednostavnosti se najčešće radi sa zračne strane (slika 9.18), ali zauzme dosta prostora.



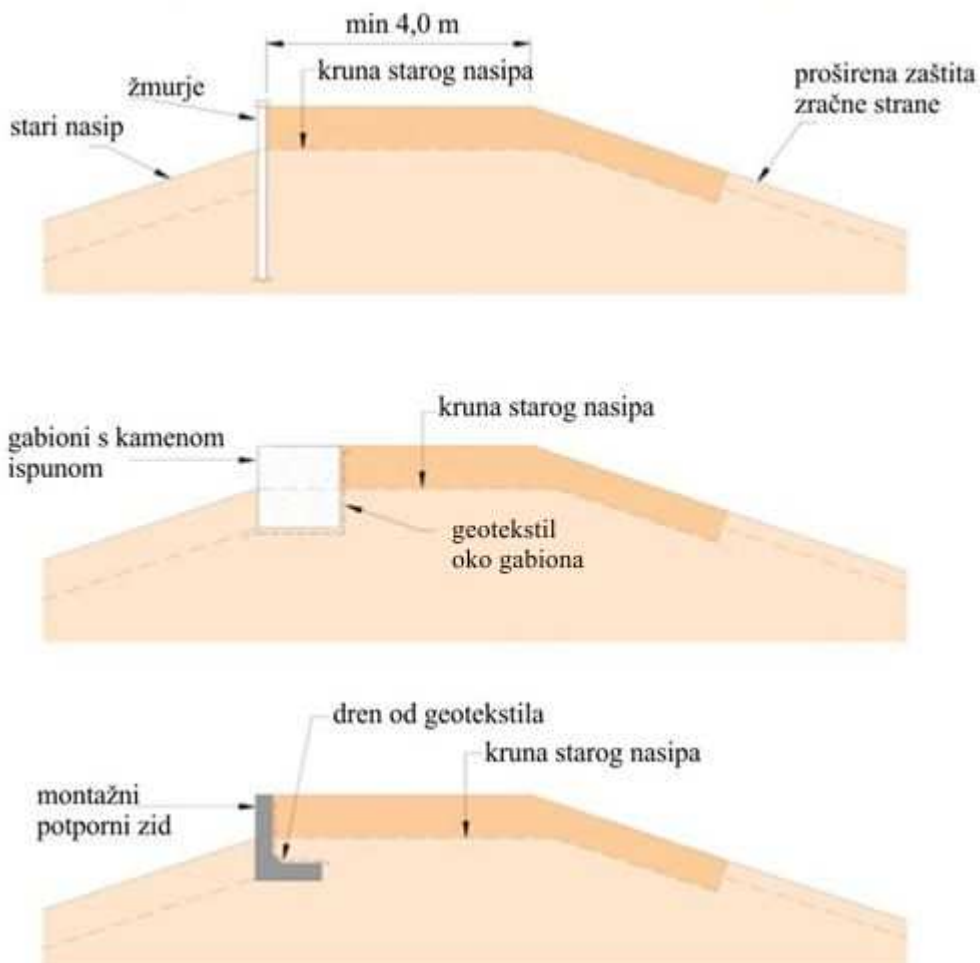
Slika 9.18 Nadvišenje nasipa proširenjem sa zračne strane

Gjurović, (1967.) preporuča proširenje nasipa izvoditi s uzvodne strane (sl. 9.19). U tom slučaju učinak manje propusnog, dograđenog dijela nasipa ne dolazi pod utjecaj uzgona kao u slučaju proširenja kvalitetnim nepropusnim gradivom s uzvodne strane.



Slika 9.19 Ojačanje i nadvišenje nasipa s uzvodne strane

Prema preporukama CIRIA C731, (2013.) može se prikladnim zahvatima uštedjeti na prostoru u zaobalju, a da pri tom kruna ostane tražene širine (slika 9.20).



Slika 9.20 Moguća nadvišenja krune uz minimalno zadiranje u zaobalje

## 9.5 ZAŠTITA POKOSA

Za zaštitu pokosa podliježe normi HRN U.S4.064 (Tipovi osiguranja kosina nasipa i usjeka i nožice usjeka), poglavlje u OTU za radove na cestama, (2-15, Zaštita pokosa i drugih površina izloženih eroziji) i u OTU za radove u vodnom gospodarstvu, knjiga, poglavlje 12 i 14.

Nasipi su najosjetljiviji na površinsku eroziju u trenutku završetka trupa nasipa. Pri tom je najosjetljiviji zemljani nasip i nasip od miješanog gradiva. Kameni nasip je nešto manje osjetljiv na djelovanje oborinske vode, a što ovisi o granulometrijskom sastavu gradiva. Nasipi od industrijskog ostatka, komunalnog otpada i slično, različito su osjetljivi na površinsku eroziju.

Različit je način zaštite nasipa koji su uvijek na suhom i onih koji stalno, privremeno ili povremeno dolaze u dodir s vodom. Tako HRN razlikuju:

- osiguranje kosina nasipa i usjeka;
- osiguranje kosine i nožice nasipa pored vodotoka;
- osiguranje kosina visokih kamenih nasipa;

U istoj su normi prikazani zaštitni jarci koji štite usjek i zasjek od vanjske vode.

Za svaki od ovih pokosa postoji čitav niz mogućnosti zaštite, prikladan površini koju štiti, određene cijene koštanja i određene trajnosti. U spomenutoj normi prikazani su i neki povijesni načini zaštite jer norma datira iz daleke 1965. godine, koji se danas ne izvode. Postoje jednostavnija i brža tehnička rješenja. Njih norma iz razumljivih razloga ne spominje, ali su obuhvaćeni u OTU za radove na cestama i OTU za radove u vodnom gospodarstvu.

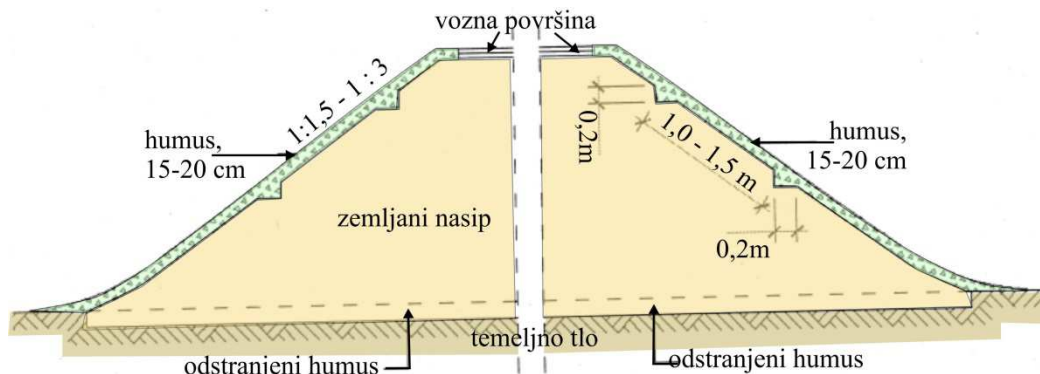
Osim namjene zaštite površina, neke od zaštita moraju imati i estetski učinak kad se nalaze u okruženju koje takav učinak zahtijeva. Primjer takve zaštite su površine u naseljima i zaštićenom okolišu.

Da bi zaštita pokosa bila uspješna potrebno ih je izvesti takvih nagiba da budu stabilni. Potrebno je izvesti kontroliranu odvodnju vanjske oborinske i podzemne vode. Pokose nije moguće osloboditi vlastite vode tj. one koja kao kiša padne izravno na pokos.

### 9.5.1 Zaštita pokosa nasipa od miješanih i zemljanih tala

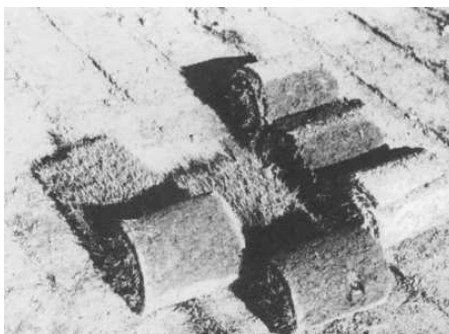
Temeljna je ideja zaštititi svježi pokos od šteta koje načine intenzivni pljuskovi. Uz to se zahvat nastoji izvesti brzo, jeftino, sa što manje zahtjeva na održavanje i ekološki prihvatljivo.

Najčešća i najjednostavnija zaštita je prekrivanje pokosa humusom (slika 9.21), koji je skinut prilikom iskopa i privremeno deponiran. Na tako pripremljenu podlogu sije se trava. Ovakva zaštita može se izvesti i kod hidrotehničkih nasipa koji povremeno dolaze u dodir s tekućom vodom (nasipi za obranu od poplava i kanali za melioracije). Jedini zahtjev za održavanje ove zaštite je redovita košnja.



Slika 9.21 Oblaganje pokosa humusom (OTU za ceste)

Prekrivanjem humusa geomrežama za pridržavanje dok ne naraste trava i korijenjem veže humus uz nasip, poboljšan je ovaj način ozelenjavanja. Nešto skuplji ali učinkovitiji način zaštite je oblaganje pokosa busenom (slika 9.22). (Za više vidi Roje-Bonacci 2012.)



Slika 9.22 Buseni u rolama spremni za polaganje

Za travnate obloge koristi se i hidrosjetva (sl. 9.23). Prema OTU može se primijeniti na svim vrstama tala. „To mogu biti tla bez humusa, sterilna i devastirana tla (naplavni pijesci, riječni nanosi, nasipni materijali, odlagališta industrijskih otpadaka, ugljen, šljaka, jalovina i drugo). Nedostatak humusnih tvari i fiziološko aktivnih hranjiva u tlu navedenih tala nadoknađuje se organskim humusno-tresetnim sastojcima u baznoj suspenziji.“ U uvjetima ekstremno neplodnih podloga i suhe klime, preporuča se za hidrosjetvu podlogu pripremiti.



Slika 9.23 Hidrosjetva (Roje-Bonacci, 2012.)

Na tržištu su se pojavili i netkani geotekstili s već umetnutim sjemenom trave, koji se jednostavno rasprostru i učvrste po pokosu. Nakon što sjeme proklija spoji geotekstil s podlogom i tako trajno, učinkovito i brzo zaštiti pokos.

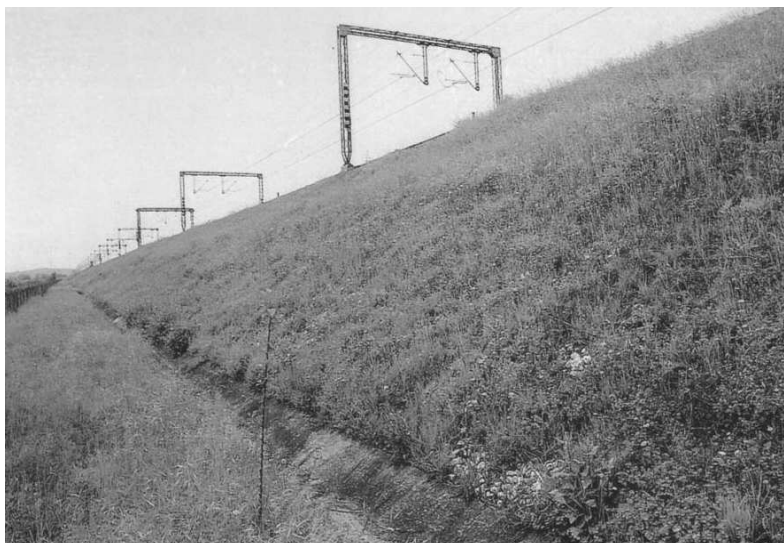
Za ozelenjavanje strmijih pokosa na kojima se humus teško zadržava, pokosa koji su podložni jačoj eroziji bilo kiše bilo tekuće vode i želi se postići zelena površina, a busen je preskup, postoji niz varijantnih rješenja s travnim rešetkama (slika 9.24). Mogu biti betonske ili od plastičnih masa. Rešetka zadržava tlo pri pljusku, dok trava dovoljno ne naraste da korijenov sustav veže travu za podlogu.



Slika 9.24 Travna rešetka od PVC-a

Pokos se može štititi i sadnjom grmlja između trave. Time se postiže ekološki značajniji prostor koji može biti iskorišten u različite svrhe, od korisnog bilja (bobičasto voće) do prostora za rekreaciju i odmor. Pokos se može štititi i sadnjom

pletera od pruća. Pleter sprječava eroziju, a pruće u pleteru nakon nekog vremena pusti korijenje i propupa. Na taj se način dobije zaštita pokosa od erozije odmah, a zelena površina nakon određenog vremena.



Slika 9.25 Gabionska zaštita kao podloga za travu (Roje-Bonacci, 2012.)

Hidrotehnički nasipi, stalno pod utjecajem vode, zahtijevaju drugačiju zaštitu pokosa od nasipa koji ne dolaze u dodir sa stajaćom i/ili tekućom vodom. Najčešća zaštita nasutih dolinskih pregrada s vodene strane je ili rolirani pokos ili zaštita „rip-rap“ strojno sлагanim krupnim kamenom. Ovo je zaštita od valovanja i od erozije pri naglom sniženju razine vode.



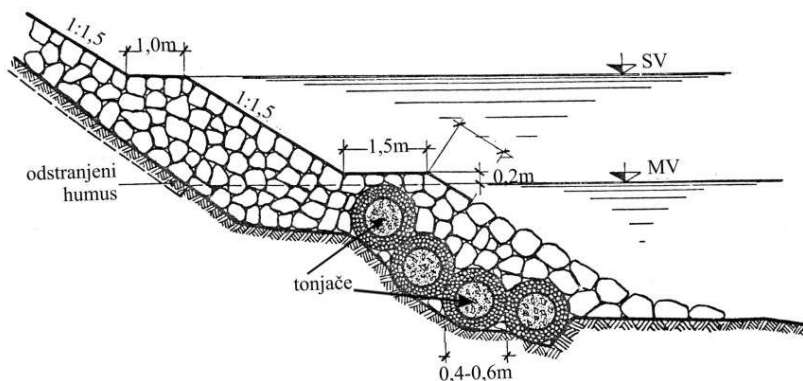
Slika 9.26 Zaštita pokosa gabionima punjenim kamenom), zamjenjuju roliranje kamenom





Slika 9.27 Rip-rap obloga uzvodne strane nasipa

Hidrotehnički nasipi koji su stalno pod utjecajem tekuće vode, moraju se naročito dobro osigurati u nožici da ne dođe do podlokavanja. Na slici 9.28 prikazana je jedna takva zaštita nožice. Za detalje vidi norme HRN U.S4.064 (Tipovi osiguranja kosina nasipa i usjeka i nožice usjeka)



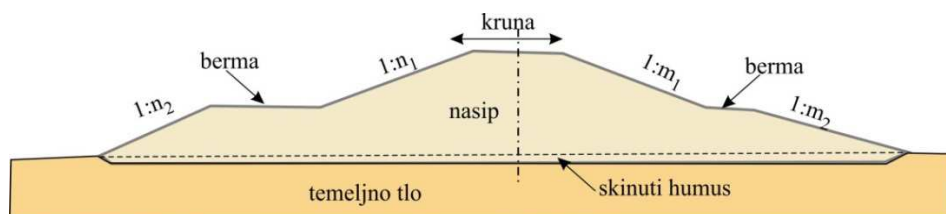
Slika 9.28 Zaštita pokosa nasipa ili obale pod stalnim utjecajem tekuće vode – obaloutvrda (HRN, u dnu se vide tonjače od pruća, punjene šljunkom)

Zaštita nožice može se izvesti oblaganjem nožice gabionima, gabionskim madracima i drugim najrazličitijim kombinacijama geosintetika i kamena. Pri tom se naročito koriste drenirajuća, filtrirajuća i odvajajuća svojstva geosintetika.

Zaštita nizvodnog i uzvodnog pokosa kod hidrotehničkih nasipa može biti identična, ali i potpuno različita ovisno o namjeni nasipa.

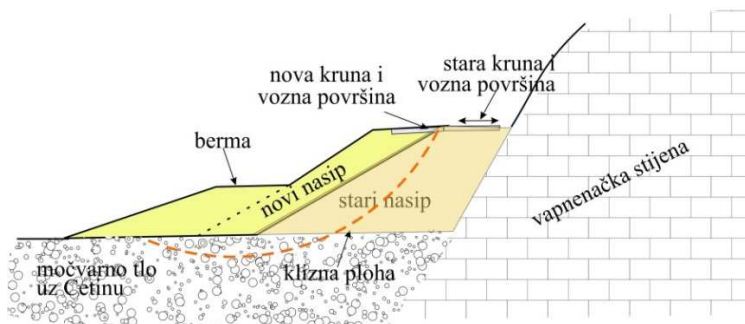
## 9.6 BERME

Berma je nasuti dio građevine od zemljanog, miješanog ili kamenog gradiva, ovisno o svrsi i namjeni. Berma je dio nasipa koji ima vrlo različite svrhe i zadaće. Njome se prekida duga kosina, ojačava potporna zona kod hidrotehničkih nasipa i/ili stabilizira pokos koji bi mogao izazvati podnožični slom lošeg tla ispod nasipa. Služi za produženje puta vode u zaobalje i smanjenje opasnosti od povratne erozije. Smanjuje utjecaj valova na eroziju nasipa tamo gdje je to značajno. Na slici 9.29 prikazan je nasip s bermama.



Slika 9.29 Nasip s obostranim bermama

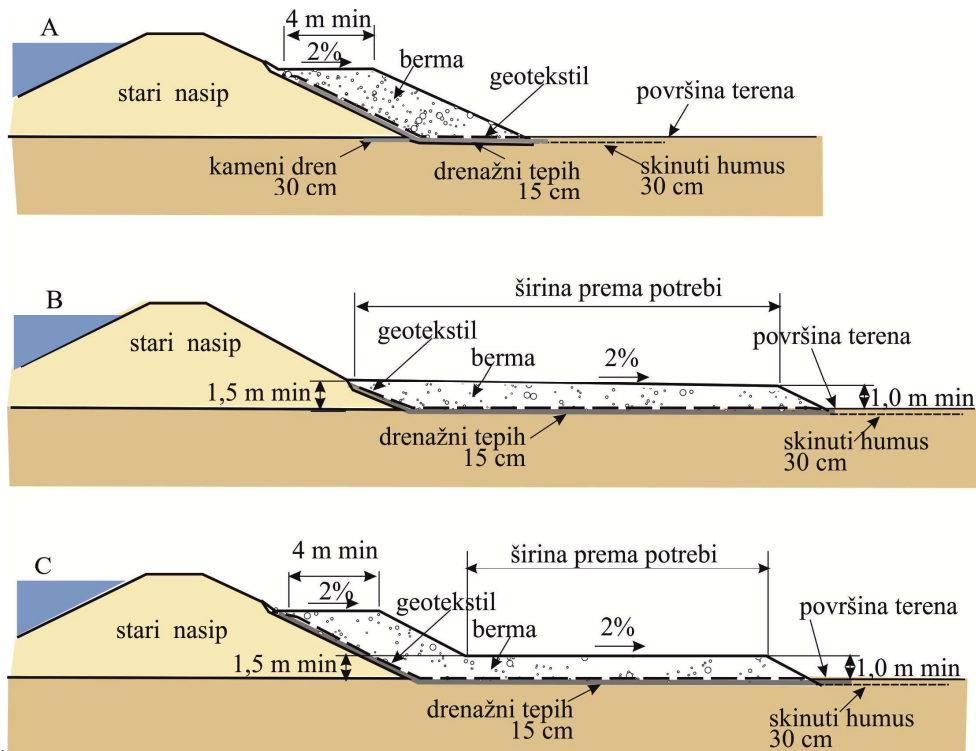
Primjer zaštite od podnožičnog sloma tla prikazan je na slici 9.30. Slom tla nastao je nakon proširenja trupa ceste na potezu Omiš-Radmanove mlinice. Stari nasip bijele (neafaltirane) ceste je postepeno tonuo u naplavinu Cetine, godinama je popravljan i bio prikladan za promet životinjama i zapregama.



Slika 9.30 Proširenje cestovnog nasipa na cesti Omiš-Radmanove mlinice

Rekonstrukcija u cestu s asfaltnim zastorom, prikladnu za automobilski promet zahtijevala je proširenje u kruni, a time i trupa nasipa. Kako je cesta u zasjeku, nije bilo moguće zasijecati strmu liticu već se proširenje izvelo na stranu prema rijeci, zadiranjem u močvarno tlo. Odmah po izvedbi proširenja došlo je do podnožičnog sloma u močvarnom tlu. Tehničko rješenje izvedeno je pomoću berme.

Berma može biti propusna, drenirajuća i nepropusna. Ona je sastavni dio nasipa pa ju je potrebno na površini štititi od erozije na isti način kao i nasip. Na slici 9.31 primjeri su bermi za stabilizaciju hidrotehničkih nasipa.

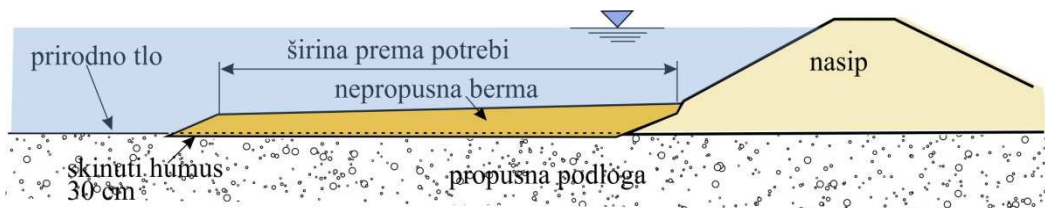


Slika 9.31 Berme na zračnoj strani nasipa

Berma na slici A služi kao i ona na slici 9.30, za stabilizaciju pokosa i nožice nasipa, na slici B berma ima ulogu sprječavanja hidrauličkog sloma i proloma uslijed uzgona, a na slici C ima obje gore opisane funkcije

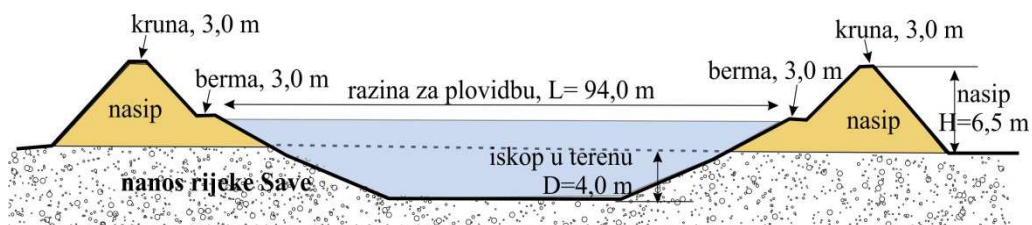
Ove berme mogu biti izvedene od propusnog ili nepropusnog tla ovisno o odnosu nasipa, temeljnog tla (u smislu vodopropusnosti) i funkcije koju moraju obaviti. Na bermi se može nalaziti i prometnica javne namjene ili može služiti za obilaske i provjere nasipa.

Berma se može izvesti i s uzvodne strane (slika 9.32). To je slučaj kod dolinskih pregrada na propusnom tlu. Na taj se način povećava duljina puta vode kroz temeljno tlo ispod nasipa, smanjuju gubici i osigurava od hidrauličkog sloma.



Slika 9.32 Uzvodna berma

Na slici 9.33 prikazan je odteretni kanal Odra, predviđen za obranu od poplave i za plovidbu. Vidljive su berme na vodenoj strani oba nasipa.



Slika 9.33 Poprečni presjek kanala Odra (crtež nije u mjerilu, Müller, 1974.)

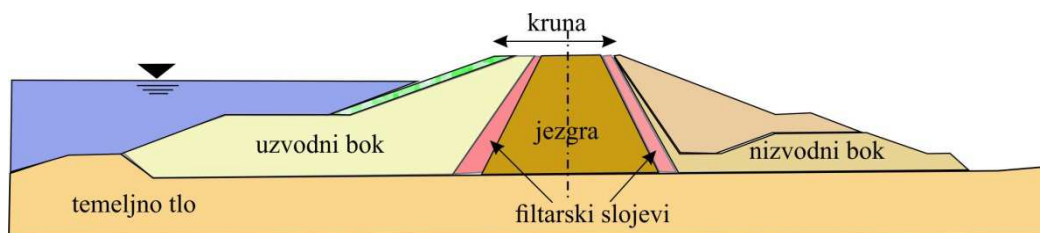
## 9.7 FILTARSKI SLOJEVI

Filtarski slojevi imaju svrhu obrane od unutarnje erozije. Prethodno je navedeno da to može biti: povratna erozija, koncentrirano procjeđivanje, sufozija, erozija na dodiru dvaju slojeva i granična stabilnost filtarskih slojeva.

Unutarnja erozija može se javiti unutar nasipa, u temeljnom tlu i na dodirnoj plohi između nasipa i temeljnog tla.

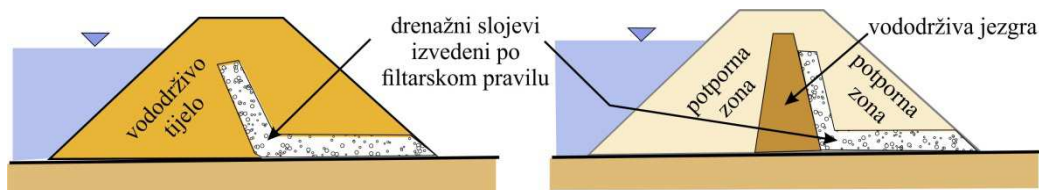
Filtarski slojevi moraju se ugraditi na svim mjestima, u nasutim građevinama, gdje dolaze u dodir tla značajno različitih propusnosti (jednoslojni ili višeslojni filtri). Oni sprječavaju nepoželjne pojave kao što su iznošenja sitnih čestica iz slabo propusnih slojeva u slojeve veće propusnosti na granici dvaju takvih slojeva (vidi sliku 8.50).

Filtarski slojevi se najčešće nalaze između glinene jezgre i kamenog nasipa kod dolinskih, kamenih pregrada (slika 9.34).



Slika 9.34 Položaj filtra u složenoj hidrotehničkoj dolinskoj pregradi

U jednostavnim nasipima i dolinskim pregradama nalaze se između vododrživog tijela i potpornih zona od tla slabije kakvoće, kako je to prokazano na slici 9.35.



Slika 9.35 Jednostavni filtri unutar nasute građevine

Gradiva za filtre su zrnata tla određenih granulometrijskih sastava i različiti geotekstili i njihove kombinacije.

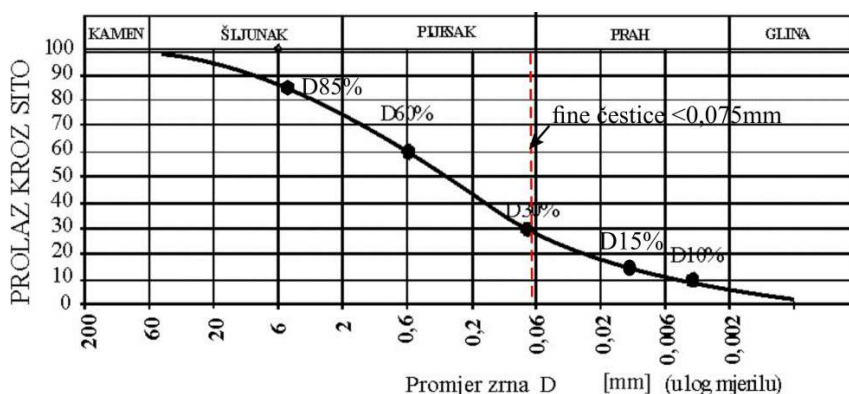
Zrnati filtri moraju zadovoljiti sljedeće zahtjeve:

- zadržavanje sitnih čestica;
- dreniranje;
- samofiltriranje;
- ne smiju se drobiti;
- moraju biti nekoherentni.

Za sposobnost zadržavanja sitnih čestica je Terzaghi (1953.) predložio kriterij da vrijedi sljedeći odnos:

$$\frac{D_{15}}{D_{85}} < 4 - 5 \quad (9.1)$$

Vrijednosti  $D_{15}$  i  $D_{85}$  su nominalni promjeri zrna koja prolaze kroz sita u iznosu od 85% odnosno 15% od ukupne mase uzorka. Prikazana su na slici 9.36. Ovaj kriterij smatra se suviše konzervativnim.



Slika 9.36 Granulometrijski dijagram s promjerima zrna bitnim za određivanje filtarskog pravila po Terzaghi-u (1953.)

Temeljem opsežnih laboratorijskih ispitivanja, Sherard i Dummigan (1985. i 1989.) utvrdili su kriterije za filtarsko pravilo dano nastavno u tabeli 9.1.

Tabela 9.1 Kriteriji odabira promjera zrna za granulometrijske krivulje filtarskih slojeva

Postotak finih čestica	Vrsta tla	Uvjeti za filtriranje
<15%	pijesak, šljunak	$D_{15\%f} < 4D_{85\%podloge}$
15-40%	pijesak, prašinst i glinovit	$D_{15\%f} < 0,7 + (40\% \text{ finog}) (4D_{85\%podloge} - 0,7) / 25$
46-85%	pijesak, prah, glina	$D_{15\%f} < 0,7 \text{ mm}$
>85%	sitni prah, glina	$D_{15\%f} < 9D_{85\%podloge}$

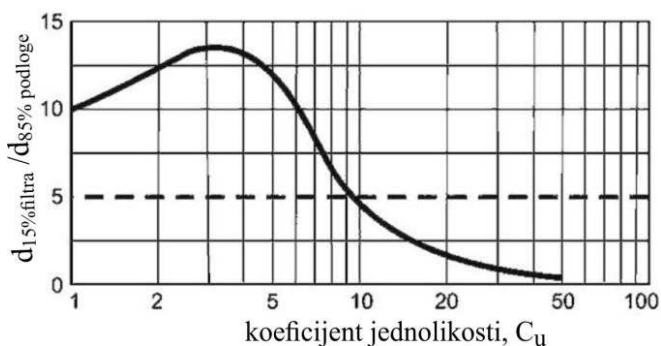
$D_{15\%f}$  = promjer zrna filtarskog sloja koji u iznosu od 15% prolazi kroz odabrano sito

Drobljenje može nastati, ako se u drenažnom sloju javi posmična naprezanja, a mineraloški je sastav takav da je drobljenje moguće.

Za nekoherentno tlo smatra se svako ono kod kojeg je količina sitnih čestica manja od 5%.

Filtri sa slike 9.35 mogu biti izvedeni tako da je dodir između dva tla različite krupnoće obloženo odgovarajućom vrstom geotekstila koji djeluje drenirajuće, filtrirajuće i odvajajuće.

Geotekstili su uvelike poboljšali kakvoću izrade filtara kao i brzinu izvedbe, ali je ponekad, kada postoje krupnozrna tla odgovarajućeg granulometrijskog sastava, cijena bitan čimbenik u izboru gradiva za filtarske slojeve. Giroud (2003.) je za geotekstil filtre dao prijedlog odnosa promjera 15%-tnog zrna filtra prema 85%-tnom promjeru zrna podloge za zbijena tla u odnosu na koeficijent jednolikosti  $C_u$  u dijagramu sa slike 9.37, a koji se može koristiti i za zrnate filtarske slojeve. Ravna, crtkana linija na dijagramu prikazuje kriterij po Terzaghiju.



Slika 9.37 Kriterij za izbor filtarskog sloja u odnosu na koeficijent jednolikosti

Prvi netkani (filc) geotekstili koristili su se upravo za odvajanje krupne, kamene obloge vodene strane nasipa od njegovog sitnozrnog tijela. Ovakva se ugradnja mogla izvoditi i ispod razine vode što je omogućilo rad i pri takvoj razini vode koja je potapala dio nasipa po visini. (O kakvoći i vrstama geotekstila vidi u OTU za radove u vodnom gospodarstvu, knjiga 1, poglavlje 3 i OTU za ceste, knjiga 2, Zemljani radovi).

Učinak geotekstila u funkciji filtriranja, dreniranja i odvajanja prikazan je na slici 8.40.



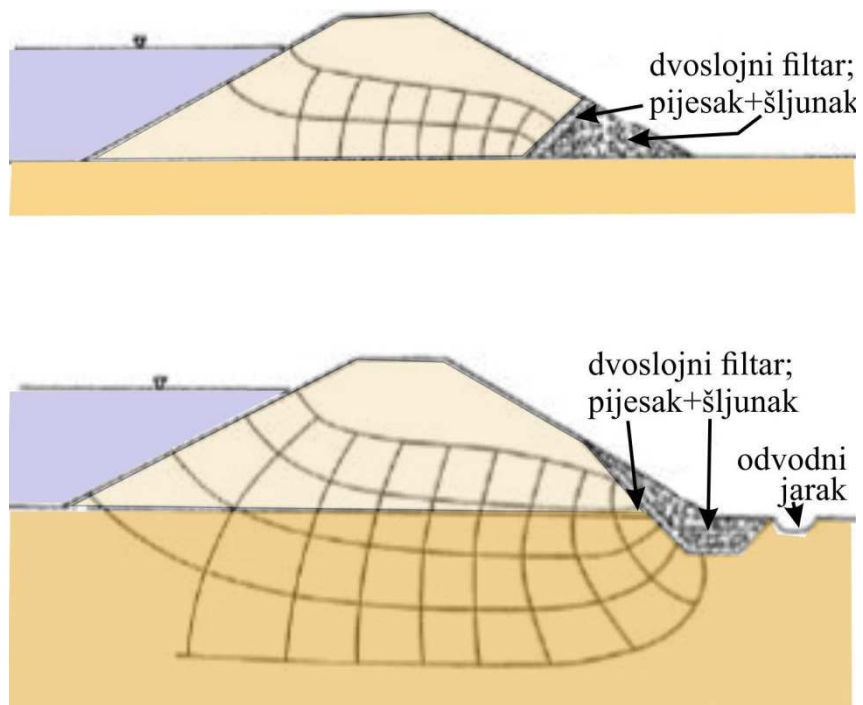
Slika 9.38 Filtri

## 9.8 SUSTAVI ZA PRIKUPLJANJE PROCJEDNE VODE

Ovi sustavi nalaze se na nizvodnoj strani nasipa. Drenažni sustavi se nalaze neposredno uz nepropusne dijelove nasipa. Prikupljaju procjednu vodu iz nasipa i podloge. Svojim djelovanjem utječu na raspodjele pornih tlakova u nasipu i na upravljanje izlaznim gradijentima. U drenovima mogu i ne moraju biti ugrađene drenažne cijevi (kao na slici 9.38). Osim drenaža u nasipu, koriste se i drenažni jarci i/ili zdenci. Oni su smješteni uz nizvodnu nožicu nasipa i odvođe prikupljanu vodu u za to prikladne sabirnike; kanale i prirodne vodotoke. Na slikama 9.39 i 9.41 prikazan je niz sustava za dreniranje vode iz nasipa.

Površinski odvodni jarak sa slike 9.39, dolje, može biti zamijenjen s drenažnim jarkom s drenažnom cijevi i sa zatvorenom površinom.

Ovi odvodni sustavi smanjuju opasnost od djelovanja uzgona, smanjuju opasnost od hidrauličkog sloma tla uz nasip. Na stabilnost pokosa mogu djelovati i stabilizirajuće, ali i destabilizirajuće te je s toga posebno pažnju potrebno posvetiti analizi njihovog položaja prilikom projektiranja.



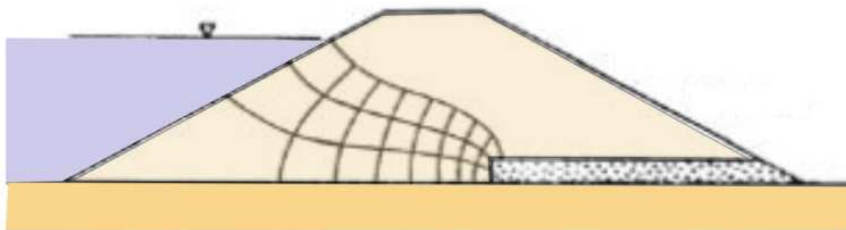
Slika 9.39 Jednostavni filtri za zaštitu nožice nasipa na nepropusnoj i propusnoj podlozi



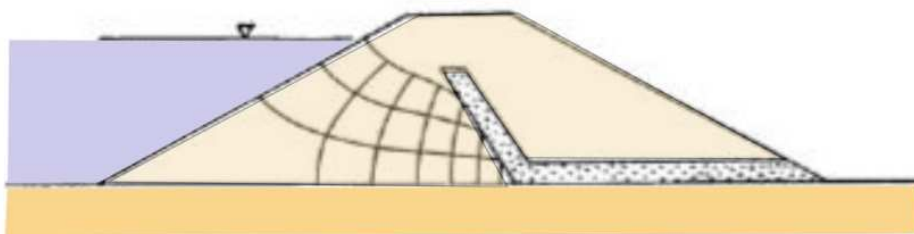
Slika 9.40 Ugradnja nizvodnog drena u nožicu nasipa, nakon oštećenja poplavom 2014. god.

Ovi sustavi ujedno povećavaju i stabilnost nasipa jer kontroliraju sile strujnog tlaka na nizvodnom pokosu.

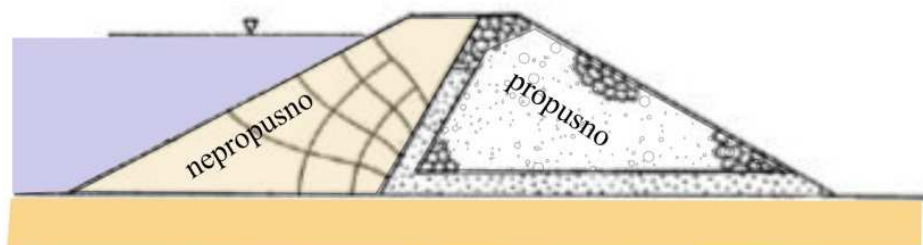




vodoravni drenažni tepih



nakošeni drenažni tepih u homogenom nasipu

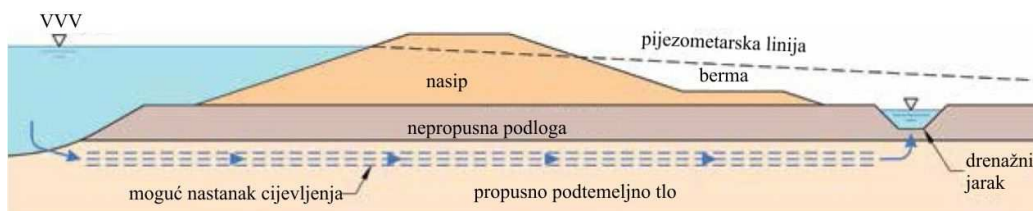


nakošeni drenažni tepih u zoniranom nasipu

Slika 9.41 Filtarski tepisi različito smješteni u nasipu

## 9.9 DIJELOVI ZA OSIGURANJE OD PROLOMA I POVRATNE EROZIJE U NASIPU I ZAOTALJU

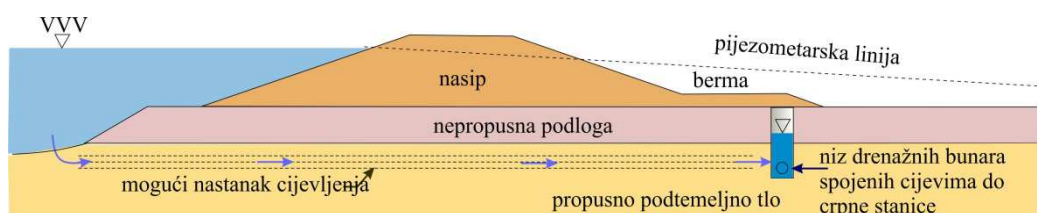
Na slici 9.42 prikazan je trenutak pojave velike vode i njenog djelovanja na nasip i zaobalje. Da bi se ovakav scenarij ostvario potrebno je da velika voda traje dovoljno dugo.



Slika 9.42 Zaštita zaobalja od raznih utjecaja vode tijekom visokih vodostaja

Ako se to ostvari, potrebno je zaobalje štititi od svih opisanih slučajeva procjeđivanja i cijevljenja. U konkretnom slučaju za to služe nizvodna berma i drenažni jarak, čije je djelovanje prethodno opisano.

Umjesto drenažnih jaraka mogu služiti odteretni zdenci, kojima se točkasto snižava pijezometrički tlak u zaobalju (slika 9.43). Kada odteretni zdenci ulaze u neprekinuti drenažni sloj imaju pojačano djelovanje. Postoji čitav niz mogućih kombinacija zahvata kojima se djeluje na zaštitu zaobalja od proloma nasipa uslijed procjeđivanja.



Slika 9.43 Zaštita zaobalja od prodora vode i cijevljenja pomoću zdenaca

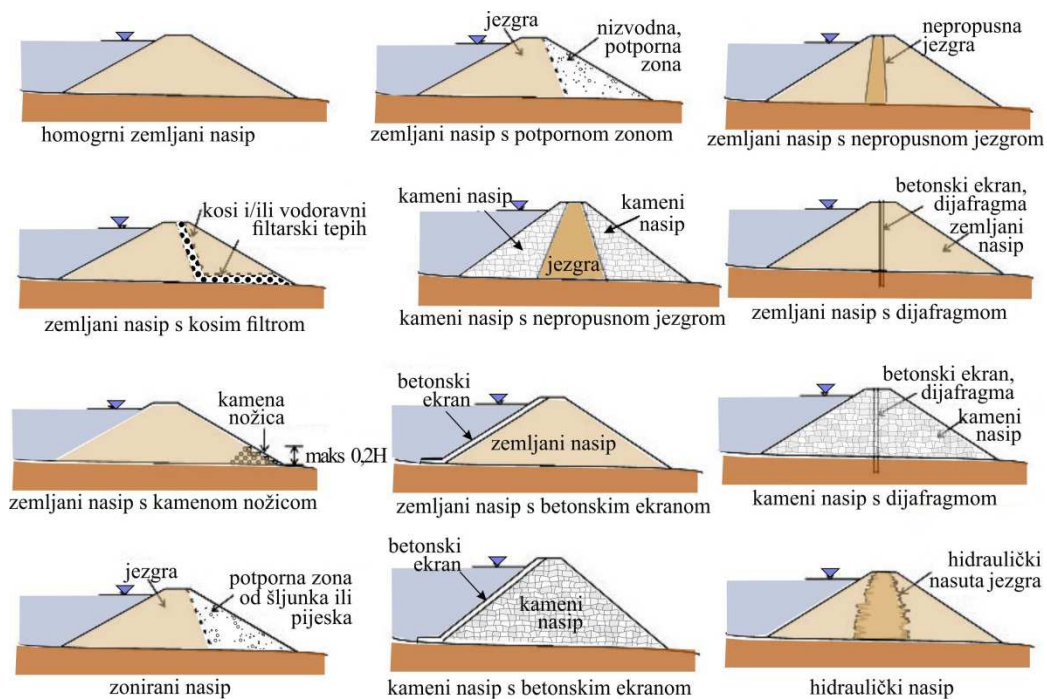
## 9.10 VODODRŽIVI DIJELOVI HIDROTEHNIČKIH NASIPA

Osnovna namjena hidrotehničkog nasipa je da drži vodu s jedne strane. Stoga mora imati osigurano vododrživost na zadovoljavajući način. Nasipi koji stalno drže vodu moraju imati znatno veću vododrživost od onih koji vodu zadržavaju privremeno. Nasipi koji trajno drže vodu moraju svojom vododrživošću osigurati što manje gubitke vode uslijed procjeđivanja kroz nasip, a time i stabilnost same građevine.

Nasipi koji povremeno drže vodu moraju podnijeti razne vrste procjeđivanja bez štetnih posljedica, ali nemaju zadatak potpuno je zadržati. Procjedna se voda mora negdje sakupljati i kontrolirano odvoditi, što se osigurava sustavom za odvodnju (vidi Roje-Bonacci. 2005.). Na slici 9.44 prikazani su razni poprečni presjeci nasipa s vododrživim dijelovima. Ne odnosi se na vododrživost podloge!

Vodonepropusnost se postiže na dva načina. Nasipi, koji povremeno drže vodu, moraju zadovoljiti trenutno zadržavanje velike vode, ali moraju cijenom odgovarati svom povremenom djelovanju. Oni su s toga jednostavnih presjeka, a vododrživost postižu svojim granulometrijskim sastavom, zbijenošću i odgovarajućom širinom.

Potrebno je osigurati nizvodnu stranu nasipa i tla neposredno uz nasip od šteta koje bi mogle nastati procjeđivanjem.



Slika 9.44 Nasipi raznih poprečnih presjeka s pripadnim vododrživim dijelom

Nasipi, koji trajno drže vodu, složenijih su poprečnih presjeka, koji moraju odgovarati njihovoj zadaći trajne vododrživosti. Moguće varijante poprečnih presjeka nasipa i dolinskih pregrada su u tom smislu prikazane također na slici 9.44.

Nasipi koji privremeno drže vodu, najčešće štite građevne jame, mogu podnijeti izvjesno procjeđivanje – gubitak vode. Tu vodu treba evakuirati ili oko jame ili iz jame. Sam nasip u smislu sigurnosti i stabilnosti treba osigurati od bilo kakvog štetnog djelovanje uslijed procjeđivanja. Posljedice oštećenja bile bi kobne po ljude i imovinu na gradilištu. (vidi Roje-Bonacci, 2005.)

Sve ovo se ne odnosi na vododrživost podloge za koju postoje posebna rješenja ovisno o njenim svojstvima vodopropusnosti.

## 10 BIBLIOGRAFIJA

- Ambraseys, N.N., Menu, J.M. (1988.), *Earthquake-induced ground displacements*. Earthquake Engineering & Structural Dynamics Volume 16, Issue 7, str 985–1006, October 1988.
- Arias, A. (1970.), *A Measure of Earthquake Intensity*. U R.J. Hansen, ed. Seismic Design for Nuclear Power Plants, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, pp. 438-483.
- Aryal, K.P. (2006.), *Slope Stability by Limit Equilibrium and Finit Element Methods*. (Doctoral Thesis at NINU 2006:66), Norwegian Universita of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- ASDSO - Association of State Dam Safety Officials (2003.), *Seepage for Earth Dams*. First Advanced Technical Seminar, October 28-30, 2003.
- ASTM, *American Society for Testing and Materials*.
- Atterberg, A. (1911.), *Ober die physikalische Bodwountersuchung*. Internationale Mitteilungen fur Bodenkunde, Vol. 1 pp 7-9.
- Atterberg, A. (1911.), *Die Plastizitat der Tone*. Internationale Mitteilungen fur Bodenkunde, Vol.1 pp 10-43
- Babić, L. (1968.), *Pomorski objekti . betonu: projektiranje i izvođenje*. Epoha, Beograd
- Babić Mladenović, M. (2013.), *Regulacija rijeka*. skripta. <http://agf.unibl.org/>
- Beguin, R. (2011.), *Etude multi-échelle de l'érosion de contact dans les ouvrages hydrauliques*. Thèse de l'Université, Joseph Fourier, Grenoble.
- Bishop, A.W. (1955.), *The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes*. Geotechnique, Vol. 5, No. 1, Mar., pp. 7-17.
- Bonacci, O., Mladineo, N. (1981.), *Primjena linearnog programiranja za određivanje optimalnih smjese u građevinarstvu*. Građevinar 33 (4): 173-179.
- Boulanger, R.W., Idriss, I.M. (2004.), *Evaluating the Potential for Liquefaction od Cyclic Failure of Silts and Clays*. Report No. UCD/CGM-04/01, Center for Geotechnical modeling, Department of civil&environmental engineering, College of engineering, University of California at Davis
- Bowles, J. E. (1979.), *Physical and Geotechnical Properties of Soils*. New York, McGraw-Hill, 448.
- Bowles, J. E. (1996.), *Foundation Analysis and Design*. 5. ed., New York, McGraw-Hill, 1175.
- Brauns, J. (1985.), *Erosionsverhalten geschichteten Bodens bei horizontaler urchstromung*. Wasserwirtschaft, vol. 75, pp. 448–453, 1985.
- BS 1377:75, Britanski standard.
- Budu, M. (2011.), *Soil mechanisc and foundations*. 3e., J. Wiley.

- Burmister, D.M. (1938.), *The Grading – Density Relation of Granular Materials*.  
 Proceed. of ASTM, Philadelphia, Pennsylvania, Vol. 38, Part II, str. 587.
- Burmister, D. M. (1948.), *The Importance and Practical Uses of Relative Density in Soil Mechanics*. American Society for Testing and Materials, 48, Philadelphia, PA, USA, 1249-1268.
- Casagrande, A. (1937.), *Seepage Through Dams*. J. New England Water Works Assn., 51(2), 131-172.
- Casagrande, A. (1948.), *Classification and Identification of Soils*. Transactions, American Society of Civil Engineers, vol. 113, pp. 901-991.
- Celmić, I. (1974.), *Autocesta Zagreb-Karlovac i uloga IGH u njenoj izgradnji*. Zbornik radova 1, IGH Zagreb.
- Cetin, K.O., Seed, B.R. (2004.), *Nonlinear shear mass participation factor ( $r_d$ ) for cyclic shear stress ratio evaluation*. Soil Dynamic and Earthquake Engineering 24, 103-113.
- Chesner, W., Collins, R., MacKay, M., Emery, J. (1998.), *User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction; Recycled Materials In The Highway Environment*. Publication Number: FHWA-RD-97-148
- Christopher, B.R., Schwartz, C., Boudreau, R. (2006.), *Geotechnical Aspects of Pavements*. FHWA NHI-05-037, National Highway Institute Federal Highway administration U.S. Department of Transportation Washington, D.C.
- CIRIA C731, (2013.), *The International levee Handbook*. CIRIA, London.
- CIRIA C749, (2014.), *Application of Eurocode 7 to the design of flood embankments UK/Ireland*. CIRIA, London.
- Coduto, D. P. (1999.), *Geotechnical Engineering-Principles and Practices*. Prentice Hall, N.J.
- Coduto, D. P. (2001.), *Foundation design, Principles and practice*, 2. izdanje. Prentice Hall, N.J.
- Coulomb, M. (1773.), *Essai Sur une applicatin des règles de Maximis & Minimis à quelques Problèmes de Statique, relatifs à l'Architecture*. U "Mémoires fe Mathematique et de Physique, Présentés à l'Academie des Sciences par divers Savans", Année 1773, Tome VII.
- Darçi, H. (1856.), *Fontaines publiques da la ville Dijon, Appendice. – note D*. Victor Dalmont, Éditeur, Successeur de Carilian-Gaery et V<sup>of</sup> Dalmont, Libraire des corps inépériaux des ponts et chaussées et des mines, Paris.
- Dumas, J.C., Larocque, G.S., Lebel, M. (1976.), *Mesure préventives contre la fissuration du noyau du barrage principal d'Outardes 4*. U Borov, A.A. (ur.) Tehnički napredak u projektiranju i gradnji visokih brana, prema Saopćenjima 10 međunarodnog kongresa o velikim branama, (na ruskom), Energija, Moskva 1976.
- Dupuit, J. (1863.), *Estudes Théoriques et Pratiques sur le mouvement des Eaux dans les canaux écouverts et à travers les terrains perméables (2. ed.)*. Paris: Dunod.

- Dyer, M.R., Utili, S., Zielinski, M. (2009.), *Field survey of desiccation fissuring of flood embankments*. ICE Proc. Water Management, 162, WM3, Institution of Civil Engineering, London, str. 221-232.
- Earth Manual, Third Edition (1998.), U.S. Department of the interior, Bureau of Reclamation, Earth Sciences and Research Laboratory, Geotechnical Research, Technical Service Center, Denver, Colorado.
- EUROCODE 7 (2012.), – *Geotehničko projektiranje, Dio 1. i 2.*, (HRN EN 1997.-1:2012) i (HRN EN 1997.-2:2012).
- EUROCODE 8 (2011.) – *Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija, Dio 5.*, Temelji, potporne konstrukcije i geotehnička pitanja, (HRN EN 1998-5:2011).
- faslanc, (2011.), *New Orleans: Outpost for an Empire*. Speculative histories, landscapes and instruments, and Latin American landscape architecture, Sunday, May 29, 2011. (faslanc.blogspot.com/2011/05).
- Fell, R., Foster, M., Davidson, R., Cyganiewicz, J., Sills, G. and Vroman, N. (2008.), *A Unified Method for Estimating Probabilities of Failure of Embankment Dams by Internal Erosion and Piping*. UNICIV Report R 446, The School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney, Australia. 2052. ISBN:85841 413 9. [www.engineering.unsw.edu.au/civil-engineering / uniciv -reports](http://www.engineering.unsw.edu.au/civil-engineering/uniciv-reports).
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, D., Bell, G., Foster, M. (2015.), *Geotechnical Engineering of Dams, 2nd edition*. CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK/Balkema book.
- FHWA (2002.), *Subsurface investigations-Geotechnical site characterization*. NHI Course No. 132031, Publication No. FHWA NHI-01-031, May 2002, US Department of transportation
- FHWA (2006.), *Geotechnical aspects of pavements*. NHI Course No. 132040, Publication No. FHWA NHI-05-037, May 2006, US Department of transportation
- FEMA (2005.), *Conduits through Embankment Dams*. L-266/september 2005. US Department of Homeland Security
- FEMA 484 (2005.), *Technical Manual: Conduits through Embankment Dams*. Best Practices for Design, Construction, Problem Identification and Evaluation, Inspection, Maintenance, Renovation, and Repair, September.
- FERC (2009.), *Internal Erosion and Piping*, FERC Engineering Guidelines, Risk-Informed Decision Making, Chapter 10, draft.
- Foster, M., Fell, R., Spannagle, M. (2000.), *The Statistics Of Embankment Dam Failures And Accidents*. Canadian Geotechnical Journal, Vol.37, No.5, National Research Council Canada, Ottawa, pp.1000-1024, ISSN: 0008-3674.
- Frith, C.W., Purcell, A.M., Powel, A.S. (1997.), *Embankment fissuring manual*. R&D Technical Report W41. Environment Agency, Bristol, UK (<http://tinyurl.com/m63yfg9>).

- Gibbs, H. J., Holtz, W. G. (1957.), *Research on determining the density of sands by spoon penetration testing*. Proc. 4th Int. Conf Soil Mech. Fdn Engng, London 1,35-39.
- Gilboy, G. (1934.), *Mechanics of hydraulic-fill dams*. Jour., Bos.Soc. C.E., July, 1934 Vol. 21, pp. 185-205.
- Giroud, J-P. (2003.), *Filter criteria*. Jubilee Volume, 75th anniversary of K. Terzaghi's „Soil mechanics“, H. Brandl (ur.)Reports of Institute for Soil Mecanic and Geotechnical Engineering, Technical University of Vienna, Austria.
- Gjurović, M. (1967.), *Regulacija rijeka*. Tehnička knjiga, Zagreb.
- Grashof, F. (1878.), *Theorie der Elastizität und Festigkeit* . 2. izd, Berlin: Gaertner.
- Guidoux, C., Faure, Y.H., Beguin, R. and Ho, C.C. (2010.), *Contact erosion at the interface between granular filter and various base-soils with tangential flow*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 136(5), 655–775.
- Haldar, A. , Tang, W. H. (1979.), *Uncertainty Analysis of Relative Density*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 107, 7 (July), 899-904.
- Hamidi, B., Nikaz, H., Varaksin, S. (2013.), *Invalidity of Relative Density for Quality Control of Cohesionless Soils*. Australian Geotechnical Society – WA Chapter, Curtin University.
- Hazen, A. (1911.), Journal New England Water Works Association v. 25.
- Head, K.H.(1984.), *Manual of Soil Laboratori Testing, Volume 1, Soil classification and compaction tests*. ELE International Ltd. England, 1984.
- Herle, I. (2004.), *History of Geotechnical Engineering*. Institute of Geotechnical Engineering, TU Dresden.
- Holtz, W. G. (1973.), *Evaluation of Relative Density and its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils: ASTM STP523(EB.7744-1. The Relative Density Approach - Uses, Testing Requirements, Reliability, and Shortcomings. Los Angeles, 25-30 June 1972, 5-17.*
- Houlsby, G. T. ( 1982.), *Theoretical analysis of the fall cone test*. Géotechnique **32** (2). pp. 111–118.
- HRN U.S4.064 (*Tipovi osiguranja kosina nasipa i usjeka i nožice nasipa*).
- HRN EN ISO 14688-1:2008.
- HRN EN ISO 14688-2:2008.
- ICOLD (1995.), *Dam failures statistical analysis*. International Commission on Large Dams, Paris. Bulletin 99.
- Idriss, I.M., Boulanger, R.W. (2004.), *Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes*. in Proceedings, 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., eds., Stallion Press, Vol. 1, pp. 32–56.

- Ishihara, K. (1985.), *Stability of natural deposits during earthquakes*. Proc. 11th International Conference on Soil mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, CA, A.A. Balkema, Rotterdam 1: 321–376.
- ISRM, (1981.), *Suggested Methods for the Rock Characterization, Testing and Monitoring*. Za ISRM, E.T. Brown, ISRM 1981. (Međunarodno društvo za mehaniku stijena)
- Jibson, R.W. (2007.), *Regression models for estimating coseismic landslide displacement*. Engineering geology 91, 209-218.
- Jibson, R.W. (2011.), *Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—A retrospective*. Engineering Geology, v. 122, str. 43-50.
- Konders, M.A., Sellmeier, B.J. (1992.), *Mathematical Model for Piping*. Journal of Geotechnical Engineering, Vol 118, No. 6.
- Krinitzky, E.L., Gould, J.P., Edinger, P.H. (1993.), *Fundamentals of Earthquake-Resistant Construction*. WILEY series of construction guides.
- Krinitzky, E.L., Hynes, M.E. (2002.), *The Bhuj, India, earthquake: lessons learned for earthquake safety of dams on alluvium*. Engineering Geology, Vol. 66, Issues 3-4, 163-195.
- Kulhawy, F.H., Mayne, P.W. (1990.), *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Report EL- 6800. Electric Power Research Institute, Palo Alto, 306 p.
- Kuspilić, N. (2009.), *Hidrotehničke građevine – 3 dio (3.3-2 Nasute brane)*, Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, nastavni materijali.
- Long, P.R., Demars, K.R. (1987.), *Conversion to the unified soil classification system*. Final report. Project 86-6, JHR 87-176. University of Connecticut, School of Engineering ([www.engr.uconn.edu](http://www.engr.uconn.edu)).
- Maslov, N.N. i grupa autora (1975.), *Složeno fundiranje, stabilnost kosina i drenaže*. Građevinska knjiga, Beograd
- Mayne, P. W. (2006.), *Undisturbed Sand Strength from Seismic Cone Tests*. The Second James K Mitchell Lecture: Geomechanics and Geoenvironmental Engineering, 1, 4, 239-257.
- Mitchel, K.J., Soga, K. (2005.), *Fundamentals of Soil Behavior*. 3rd Edition, 592 str., J. Wiley.
- Müller, B. (1974.), *Geotehnički radovi i objekti*. Viša geotehnička škola Varaždin i RGN fakultet Sveučilišta u Zagrebu, skripta..
- Narita, K. (2000.), *Design and Construction of Embankment Dams*. Aichi Institute of Technology, Dep. of Civil Engineering.
- Newmark, N.M. (1965.), *Effects of earthquakes on dams and embankments*. Géotechnique, vol 15.2. Institution of Civil Engineers UK, str.139-160.
- OTU; Grupa autora, (2001.), *Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, Knjiga 2*. Institut građevinarstva Hrvatske, Zagreb.



- OTU; Grupa autora, (2010.), *Opći tehnički uvjeti za radove u vodnom gospodarstvu, knjiga 1, Gradnja i održavanje regulacijskih i zaštitnih vodnih građevina i vodnih građevina melioracije*. Hrvatske vode, Zagreb.
- Pickles, A., Sandham, R. (2014.), *Application of Eurocode 7 to the design of flood embankments*. CIRIA C749, London.
- Proctor, R.R. (1933.), *Fundamental Principles of Soil Compaction*. U History of Progress: Selected U.S. Papers in Geotechnical Engineering (Allen Marr, ur), Geotechnical Special Publication No. 18, Vol. 1, ASCE 2003., str 59-62.
- Richards, K.S. (2012.), *Internal Erosion-Potential Failure Modes*. FERC (Federal Energy Regulatory Commission. US Departmenr of Interior.
- Roje-Bonacci, T. (1993.), *Mogućnost racionalizacijekontrolne kvalitete ugradnje zemljanih materijala kod velikih zemljanih radova*. (disertacija), (Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.
- Roje-Bonacci, T. (1994.), *Upotreba kontrolnih karata u kontroli kvalitete ugrađenih zemljanih materijala*. Geotehnika prometnih građevina, znanstvenostručno savjetovanje, Novigrad 5.-8. X. 1994.
- Roje-Bonacci, T. (2005.), *Potporne građevine i građevne jame*. Građevinsko-arhitektonski fakultet Sveučilišta u Splitu, Split.
- Roje-Bonacci, T. (2006.), *Korištenje nekonvencionalnih gradiva u izgradnji autocesta i graditeljstvu uopće s posebnim osvrtom na industrijski otpad i nusproizvode*. Gospodarstvo i okoliš. XIV, 83; str. 690-699.
- Roje-Bonacci, T. (2010.), *Složeno temeljenje i poboljšanje temeljnog tla*. Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split.
- Roje-Bonacci, T. (2012.), *Zemljani radovi*. Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split.
- Roje-Bonacci, T. (2015.), *Što se može naučiti o nasipima nakon katastrofalnih poplava u istočnoj Slavoniji*. Hrvatske vode 23, 9; str. 35-42.
- Roje-Bonacci, T., Lasić, A., Talić, Z. (2007.), *Modeli tla ili konstitutivne jednadžbe*. Građevni godišnjak '05/'06. **13**, str. 294-344, Hrvatski savez građevinskih inženjera, Zagreb.
- Rönnqvist, H., Viklander, P. (2014.), *Laboratory Testing of Internal Stability of Glacial Tills*. a Review EJGE, Vol.19, Bund.V, str. 6315-6336.
- Schroeder, W. L. (1975.), *Soils in Construction*. John Wilwy & Sons, Inc. New York
- Schnitter, N. (1994.), *A History of Dams: The Useful Pyramids*. Balkema.
- Seed, H.B., Idriss, I.M. (1982.), *Ground motion and soil liquefaction during earthquakes (engineering monographs on earthquake criteria, structural design, and strong motion records)*. Earthquake Engineering Research Institute, California, USA.
- Seed, H.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F. (1985.), *Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations*. J. Geotech. Engrg., 111(12), 1425-1445.

- Seed, H. B., Cetin K.O., Moss R.E.S., Kammerer A.M., Wu J., Pestana J.M., Riemer M.F., Sancio R.B., Bray J.D., Kayen R.E., Faris A. (2003.), *Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering: a Unified and Consistent Framework*. 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar, Keynote Presentation, H.M.S. Queen Mary, Long Beach, California.
- Selig, E.T., Ladd, R.S. (ur.) (1972.), *Evaluation of relative density and its role in geotechnical projects involving cohesionless soils*. A symposium presented at the Seventy-fifth Annual Meeting American Society for Testing and Materials, Los Angeles, Calif., 25-30 June 1972., ASTN Special Technical Publication 523.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L.P. (1985.), *Filters and leakage control in embankment dams, seepage and leakage from dams and impoundments*. Procee. Of The ASCE Symp. on seepage and leakage from dams and impoundments, Denver, CO, USA (ISBN: 978-87262-448-1), str 1-29.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L.P. (1989.), *Critical filters for impervious soils*. Journal fo Geotechnical Engineering, vol 115, 7, American Society of Civil Engineering (ASCE), New York, USA, str 927-947.
- Strigler, W., Werner, D. (1969.), *Dambau in Theorie und Praxis*. Springer-Verlag, Wien, New York.
- Svetličić, E. (1987.), *Otvoreni vodotoci: regulacije*. Fakultet građevinskih znanosti Zagreb.
- Swaisgood, J. (2003.), *Embankment Dam Deformations caused by Earthquakes*. U Proc. Pacific Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 14.
- Szavitz, 2007. Nastavni materijali Građevinskog fakulteta u Zagrebu.
- Štambuk-Cvitanović, N. (2015.), Interna komunikacija.
- Tadić, L. (2006.), *Provedba obrane od poplava na Muri, Dravi i Dunavu*. Seminar stručnog usavršavanja, Hrvatski savez građevinskih inženjera.
- Terzaghi, K. (1925.), *Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer grundlage*. F. Deuticke, Leipzig, Wien.
- Terzaghi, K. (1943.), *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc., London.
- Terzaghi, K. (1953.), *Investigation of filter requirements for underdrains*. Technical Memo 3-360, US Waterways Experiment Station, USACE, Vicksburg, Mississippi, USA.
- USACE, (2000.), *Engineering and Design, Design and Construction of Levees*. Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, EM 1110-2-1913, CECW-EG Washington, DC 20314-1000, Manual No. 1110-2-1913.
- US Buro of reclamation (2012.), *Best Practice in Dam and Levee Safety Risk Analysis*. 26. Internal Erosion.
- U.S. Department of Transportation, (1977.), *Demonstration Project#42, Highway Quality Assurance-Process Contros and Acceptance Plans*. Federal Highway Administration, Region 15, Demonstration Projects Division, 1000 North Globe Road, Arlington, Virginia 22201.

- Van Beek, V.M., Knoeff, J.G., Rietdijk, J., Sellmeijer, J.B. and Lopez De La Cruz, J. (2010.), *Influence of sand and scale on the piping process – experiments and multivariate analysis*. Physical Modelling in Geotechnics, Zürich, Taylor and Francis Group.
- Villet, W. C. B., Mitchell, J. K. (1981.), *Cone Resistance, Relative Density and Friction Angle*. Symposium on Cone Penetration Testing and Experience, ASCE National Convention, St. Louis, October, 178-208.
- Wan, C.F., Fell, R. (2004.), *Experimental investigation of internal instability of soils in embankment dams and their foundations*. UNICIV Report No. 429, School of Civil and Environmental Engineering, The University of New SouthWales, ydney, ISBN 85841 396 5. [www.engineering.unsw.edu.au/civil-engineering/uniciv-reports](http://www.engineering.unsw.edu.au/civil-engineering/uniciv-reports).
- Wan, C.F. , Fell, R. (2007.), *Investigation of internal erosion by the process of suffusion in Embankment dams and their foundations*. In *Internal Erosion of Dams and their Foundations*. Editors R. Fell and J.J. Fry. Taylor and Francis, London. 219–234.
- Webster, J.L. (1976.), *Mica dam designed with spetial attention to control of cracking*. U Borov, A.A. (ur.) Tehnički napredak u projektiranju i gradnji visokih brana, prema Saopćenjima 10 međunarodnog kongresa o velikim branama, ( na ruskom), Energija, Moskva 1976.
- Weijers, J.B.A, Sellmeijer, J.B. (1993.), *A new model to deal with the piping mechanism*. U Brauns, Herbaum i Schuler, ured., “Filters in Geotechnical and Hydraulic Engineering“; (Saopćenja I. međunarodne konferencije „Geo-Filters“;). Balkema, Rotterdam.
- Yoshimi, Y., Tohno, I. (1973.), *Statistical Significance of the Relative Density*. U: *Evaluation of Relative Density and its Role in Geotechnical Projects Involving Cohesionless Soils: ASTM STP523(EB.7744(1, Los Angeles, 25-30 June 1972, 74-84.*
- //Danas.net.hr/ 2014
- //ivanica.freshcreator.com/
- [www.dailymail.co.uk/](http://www.dailymail.co.uk/)
- [www.dexpan.com](http://www.dexpan.com)
- [www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/initiatives/risk-informed-decision-making/eng-guide-ridm/chapter-10.docx](http://www.ferc.gov/industries/hydropower/safety/initiatives/risk-informed-decision-making/eng-guide-ridm/chapter-10.docx))
- [www.finesoftware.eu/](http://www.finesoftware.eu/)
- [www.geo-slope.com/products/slopew.aspx](http://www.geo-slope.com/products/slopew.aspx)
- [www.usbr.gov/ssle/damsafety/Risk/BestPractices/ 26-Internal ErosionPP20121126.pdf](http://www.usbr.gov/ssle/damsafety/Risk/BestPractices/26-InternalErosionPP20121126.pdf)
- [www.training.ce.washington.edu](http://www.training.ce.washington.edu)
- [www.željeznice.net](http://www.željeznice.net)

# 11 KAZALO POJMVA

## A

A linija .....	34
AC razredba .....	4, 34
akcelerogram .....	121
aluvijalno tlo .....	160
Ambraseys i Menu .....	122
analiza	
hidrodinamičkog djelovanja vode.....	109
analiza procjeđivanja .....	109
ispod nasipa.....	109
kroz nasip .....	109
analiza stabilnosti.....	66, 141
metoda blokova.....	114
metoda lamela.....	114
numeričkim metodama .....	113
pri potresu .....	66
u uslojenom tlu .....	114
anvelopa sloma	
nekoherentnog tla.....	70
areometriranje .....	30
ASTM .....	56
Atterberg.....	21
Atterbergove granice .....	10, 24
autocesta	
trup .....	97

## B

balon s vodom .....	78
berma	
drenirajuća .....	179
nepropusna .....	179
nizvodna.....	187

propusna.....	179
betonska cijev	
ugrađena u nasip .....	152
betonska građevina	
uz nasip .....	148
betonski ekran .....	169
Bishop	
analiza stabilnosti .....	114
boja .....	22, 23
Bowles .....	57
brana	
mala .....	137
nasuta, u Japanu .....	45
brana Mica .....	44
brana Prosperina.....	3, 106
brana Tri Klanca.....	105
branjeno područje .....	133
broj udaraca SPP .....	120
brzina širenja vala .....	120
Budhu .....	13
Burmister .....	22, 55
bušenje	
sondažno .....	30

## C

Casagrande.....	4, 21, 28, 34, 142
Casagrandeova treskalica .....	25
cijevljenje .....	147, 153
matematički model .....	157
CIRIA 2013 .....	110
crpna stanica	
ispust iz.....	152

## Č

čimbenik smanjenja pri potresu.....	127
čvrstoća	
na smicanje.....	69
nedrenirana.....	68, 120
čvrstoća na smicanje	
efektivna.....	65
efektivna vrijednost.....	64
nekoherentnog tla.....	70
ugrađenog tla.....	66
čvrstoća tla	
ispod nasipa.....	5

## D

Darçy.....	32
koeficijent filtracije.....	65
deformacija	
potaknuta potresom.....	120
Delft	
hidrotehnički laboratorij.....	156
dijagram plastičnosti.....	28, 35
UC razredbe.....	36
dijagram toka	
identifikacije na terenu.....	19
za projektiranje nasipa.....	111
dobro graduirano.....	37
dolinska pregrada.....	95, 131, 168
drenažni jarak.....	187
drobina	
smicanje.....	70
drobljenje čestica.....	43
Dubai.....	51, 99
Dupuit	
približni izraz za proračun virne plohe	
.....	143

## E

edometerski pokus.....	118
efektivni promjer zrna.....	164
efektivno naprezanje.....	141
u kosini.....	144
energija zbijanja.....	43, 46, 63
različita.....	42
za modificirani pokus.....	43
erozija	
međuslojna.....	163
površinska.....	174
progresivna.....	148
unutarnja.....	109, 146, 148
Eurocode 7.....	5, 93
<i>Eurocode 8</i>	
proračun na potres.....	119

## F

filtrar	
gradivo za.....	182
jednostavni.....	182, 185
filtrarsko pravilo.....	163, 182
kriteriji za.....	182
fizičko-mehanička svojstva	
utjecaj na.....	58

## G

geotekstil.....	183
netkani.....	184
Gilboy.....	143
Giroud.....	183
Gjurović.....	133
glina.....	39
anorganska.....	34
normalno konsolidirana.....	67
organska.....	34

prašinasta .....	34
prekonsolidirana .....	67
gradivo	
rastresito .....	4
građevinsko zemljište	
nasipi u vodi kao.....	52
granica plastičnosti.....	25, 38
granica stezanja.....	25
granica tečenja .....	25, 34, 38
pomoću jedne točke.....	26
granice plastičnosti.....	24
granična stanja	
popis .....	110
provjera.....	110
granično stanje	
nosivosti.....	110
uporabivosti.....	110, 111
granično stanje nosivosti.....	111
granično stanje stabilnosti.....	121
granulometrijska analiza	
kombinirana.....	30
granulometrijska krivulja .....	30, 40
mješavina .....	9
oblik .....	29, 33
popravljanje.....	8
prirodnog gradiva.....	7
svojstva .....	31
granulometrijski dijagram .....	31
granulometrijski sastav .....	5, 10, 38
nepravilni .....	160
pijeska podložnog likvefakcijij .....	125
Grashof.....	135
gumeni valjak.....	52
gustoća .....	12, 41
predviđena projektom.....	52
ugrađenog tla .....	52, 76

gustoća čvrstih čestica .....	9
gustoća tla	
povećanje .....	42
gustoća vode.....	16

## H

Hamidi .....	57, 61
Hazen.....	32
Head .....	26
hidraulički gradijent .....	151
izlazni .....	141
kritični .....	142
hidraulički potencijal	
povećanje na mjestu istjecanja.....	158
hidraulički slom.....	115, 142, 146, 184
pojava .....	140
u nožici .....	144
hidrauličko opterećenje	
otpotnost na .....	111
hidrauličko raspucavanje.....	149
hidrodinamički	
pritisak vode.....	138
hidrometrijska analiza.....	30
hidrosjetva .....	175
Holtz.....	55
humus .....	12

## I

indeks gustoće .....	18, 57, 59, 61
različiti.....	73
indeks konzistencije.....	10, 27, 38
indeks plastičnosti .....	10, 27
indeks tečenja.....	27
indeks zbijenosti	
kod likvefakcije .....	130
nepouzdanost .....	59

indeksa gustoće	
utjecaj pogreške .....	58
indeksni pokazatelji .....	11, 24, 38
industrijski ostatak	
nasip od .....	5
industrijski otpad .....	167
ugrađen u nasip .....	166
inundacijski prostor .....	132
inženjerska svojstva	
različita .....	57
iskop	
kubatura.....	7
široki .....	7
ISMR .....	19
istražni radovi.....	165
izlazni gradijent .....	140, 146
kritični.....	141, 162

## J

jama	
sondažna.....	30
jezgra .....	96
glinena.....	168
jež.....	52
Jibson.....	122

## K

kakvoća	
ugrađenog tla .....	52
kalibrirani plesak .....	77
kamenolom .....	6
kapacitet zbijanja.....	18
kapilarne sile .....	47
karta seizmičkog rizika .....	119
kemijska agresivnost .....	5
klizanje .....	109

klizna ploha	
kritična .....	144
kružna.....	114
potencijalna.....	65
koeficijent	
konsolidacije .....	118
vodopropusnosti .....	72
koeficijent cikličkog naprezanja.....	126
dijagrami.....	128
koeficijent cikličkog otpora .....	126
koeficijent filtracije .....	65, 140
povećanje.....	160
koeficijent jednolikosti .....	31, 49
koeficijent pora.....	13, 14, 15
koeficijent seizmičnosti .....	120
koeficijent zakrivljenosti .....	31
kohezija.....	68
funkcija pritiska .....	67
prividna .....	42
količina procjeđivanja .....	144
količine	
ograničene.....	7
koluvijalno tlo .....	160
kombinacija nasipa i ziđa .....	106
koncentrirano tečenje	
kroz nasip .....	155
konsolidacija.....	56
jednodimenzionalna .....	117
ubrzavanje.....	51
kontrolna ispitivanja.....	75, 89
konzistencija	
kruta .....	27
lako gnječiva.....	27
plastična .....	27
polučvrsta .....	27
prema broju udaraca SPP-a.....	38

teško gnječiva.....	27
žitka.....	27
konzistentno stanje .....	23, 24, 38
kriteriji	
zbijenosti za nasipe .....	75
kritična klizna ploha .....	114
kritično ubrzanje .....	121
krivulja	
potpunog zasićenja.....	48
krokodilska koža	
na kruni.....	169
kruna	
nadvišenje .....	134
ravnost podloge .....	112
širina za prometnice .....	112
visinska kota.....	112
zaštita od isušivanja .....	171
krutost tla.....	120
kut trenja .....	70

## L

likvefakcija .....	52, 123, 124
lomljivost zrna .....	8

## M

magnituda potresa.....	123
masa .....	12
masa suhog tla.....	76, 77
metoda konačnih elemenata.....	116, 141
miješana gradiva.....	8
miješenje	
frakcija.....	9
minimalni porozitet .....	49
mjera zbijenosti.....	41
mješavina	
ponašanje .....	44

za nepropusnu jezgru.....	44
modul	
promjene zapremine .....	118
modul smika .....	120
modul stišljivosti .....	80, 90, 118
dijagram .....	81
proračun .....	81
mogućnost zbijana .....	5
Mohr-ova kružnica.....	67
mokro sijanje.....	30
morski mulj .....	12

## N

nagib vodnog lica .....	134
u krivini .....	134
naprezanje	
efektivno .....	66, 69
radno .....	68
totalno.....	66
vlačno .....	42
naselje	
zaštita od poplave .....	97, 140
nasip .....	5
armiran geotekstilom.....	106
cestovni .....	108
glavni, nadvišenje .....	136
gotovi, ispitivanje .....	75
gradivo .....	93, 99
hidrotehnički .....	65, 95, 108, 109, 168
hidrotehnički, provjera na stabilnost	109
homogeni.....	142, 168
homogeni presjek, dimenzioniranje .	113
industrijskog otpada.....	98
kameni.....	169
kameni, ispitivanje .....	81
kameni, za željeznicu .....	107



koji povremeno drži vodu .....	120, 133	vodoravni pomaci .....	138
koji privremeno drži vodu.....	136	za aerodrome .....	94
koji stalno drži vodu.....	120	za autoceste.....	108
komunalnog otpada.....	98	za ceste .....	94
komunalnog otpada, sanirani .....	98	za lučke građevine .....	96
kriteriji kakvoće ugradnje .....	90	za obranu od poplava 133, 137, 138, 168	
kriteriji zbijenosti.....	53	za posebne potrebe .....	98
kruna .....	112	za regulaciju.....	133, 137
moguća oštećenja .....	62	za zadržavanje mulja.....	98
način izrade .....	98	za željeznice.....	95
nadvišenje.....	171	zaštita od erozije .....	174
nadvišenje krune .....	134	zbijenje uz betonske sijenke .....	148
nagib pokosa .....	112	zonirani.....	141
oblik.....	107	nasipavanje.....	4, 52
obuhvatni.....	133, 140	bez zbijanja.....	51, 99
oštećenje procjeđivanjem.....	140	sa zbijanjem .....	51, 99
pomak.....	137	u vodi .....	51
poprečni presjeci, razni.....	188	nasuta građevina .....	52
povremeni utjecaj vode .....	137	dimenzioniranje.....	52
povremeno drži vodu .....	152	nedrenirana čvrstoća.....	67
projektiranje, odabir parametara .....	69	nepropusna obloga .....	96
prolom, uzroci.....	164	Newmark .....	121
proširenje.....	179	algoritam za integraciju .....	122
pukotine, nastanak.....	137	nominalni promjer zrna .....	22, 182
rastezanje.....	139	nosivost .....	41
rastezanje na zračnoj strani .....	138	na površini .....	41
rušenje uslijed prelijevanja .....	131	nožica	
sjedanje u isprani prostor.....	139	osiguranje od podlokavanja.....	178
slijedeći sloj.....	82	nuklearni denziometar .....	76
slijeganje .....	63, 153		
stalno drži vodu.....	187		
stari, procjeđivanje .....	148		
suh, prvo punjenje.....	147		
trajno drži vodu, presjeci .....	188		
utjecaj vode na .....	41, 109		
višenamjenski .....	97		

## O

oblaganje busenom .....	175
oblik zrna .....	22
oborinska voda	
djelovanje na pokos .....	174
obrana od poplave .....	95, 135

odlagalište	
divlje.....	21
odteretni bunar .....	187
odteretni kanal.....	132
odteretni kanal Odra .....	181
odvodnja	
pozajmišta .....	10
optimalna vlažnost.....	43
promjena za različite energije zbijanja	
.....	43
veća .....	49
organske primjese.....	38
organske tvari.....	10
organsko tlo .....	39
otjecanje	
površinsko .....	112
otpornost na drobljenje .....	5
OTU, 2001 .....	93
OTU, 2010 .....	93

## P

parcijalni faktori	
preoblikovanje .....	111
pijesak .....	39
podložan likvefakciji.....	124
pijezometarski pritisci	
u nasipu pri izgradnji .....	117
pijezometarski tlak .....	152
plastičnost.....	5, 23, 38
plato	
upotabivost.....	112
pleter .....	177
ploha razdvajanja.....	55
plovni putovi.....	95
poboljšanje	
podtemeljnog tla .....	52, 165

poboljšanje tla	
postupci.....	51
pod	
skladišta .....	112
podloga	
nepropusna .....	140
propusna.....	140
svojstva .....	103
vodrživost .....	188
podložnost smrzavanju.....	5
podnožični slom .....	179
kroz temeljno tlo.....	113
podtemeljno tlo	
podaci o.....	99
pogreška	
osobna.....	58
pri određivanju gustoće .....	57
pri određivanju indeksa gustoće .....	58
sistematska .....	58
slučajna .....	58
pokus	
identifikacioni .....	19
laboratorijski .....	19
nedrenirani konsolidirani.....	68
troosni.....	69
pokusna dionica.....	54
porni tlak	
disipacija .....	64
negativni .....	42
pri zbijanju .....	47
promjena .....	124
promjena pri potresu .....	119
razvoj pri zbijanju .....	49
utjecaj .....	111
porozitet.....	13
apsolutni.....	14

in situ .....	57	probno polje.....	54, 75
najmanji.....	55, 57	procjedna linija .....	141, 146
najveći.....	55, 57	procjedna voda	
prirodni.....	55	određivanje količine .....	140
promjena.....	73	sakupljanje .....	187
relativni .....	14	procjeđivanje .....	142
sloja nasipa .....	57	koncentrirano .....	147
smanjenje.....	67	kroz nasip .....	113, 136, 187
straslog tla .....	14	privremeno .....	111
posmična deformacija.....	120	proračun količine.....	116
posmično naprezanje		trajno .....	111
hidrauličko.....	151	Proctor .....	43
uslijed strujanja.....	151	Proctorov pokus.....	43, 52, 75
potencijalna klizna ploha.....	55	modificirani .....	43
potres		odnos vlažnosti i relativnog poroziteta	
utjecaj na parametre .....	119	.....	49
povratna erozija .....	156, 158	standardni i modificirani .....	46
pozajmište .....	6	projektne situacije.....	111
ispitivanje.....	6	prolom	
kapacitet iskopa .....	10	uslijed uzgona .....	180
odvodnja.....	10	promjena obujma.....	5
prah.....	39	promjer zrna	
predkonsolidacija		efektivni .....	31
pritisak .....	69	propusnost.....	5, 118
učinak na koheziju.....	67	propusnost tla	
prelijevanje.....	109	mala.....	49
preljev		proračun procjeđivanja.....	141
betonski .....	152	proračun slijeganja .....	118
prethodna ispitivanja.....	75	proračun stabilnosti	
prijevoz .....	41	pri potresu.....	120
prioritetni put .....	139, 148, 151, 152	prostorna težina .....	141
prioritetni put za vodu.....	55	jedinična .....	41
prirodna struktura .....	41	suha .....	10
prirodna vlažnost .....	10, 23, 24, 38, 75	provjera kakvoće	
prividna kohezija .....	42	statistička.....	82
probna ploča .....	78	pseudodinamički	

pristup proračunu .....	120
pseudostatički	
pristup proračunu .....	120
pukotina	
na kruni .....	169
nastanak .....	149
u kruni .....	171
vlačna .....	138
put vode	
produljenje kroz temeljno tlo .....	180

## R

rahlost	
određivanje .....	56
raskop .....	30
rastresitost .....	7
razastiranje .....	41
razredba	
AC .....	34
krupnih komada .....	30
prema HRN EN ISO 14688-1	
2008 .....	34, 40
terenska, jedinstveni sustav .....	21
tla .....	10
razredbene grupe .....	35
prema AC razredbi .....	35
razredbene oznake	
za podgrupe .....	37
reakcija na potresanje .....	23
regulacija vodotoka .....	95
relativna gustoća .....	55
vrednovanje .....	58
rip-rap .....	177
rizik	
kategorizacija za obranu od poplava .....	111
procjena .....	119

rolirani pokos .....	107, 177
ručni nabijač .....	53

## S

sadržaj organskih tvari .....	5
seizmički inercijalne sile .....	120
serija	
kontrolna .....	82
sijanje	
suho .....	30
sila	
kapilarna .....	42, 69
sila strujnog tlaka .....	112, 144
kontrola .....	185
nepovoljan utjecaj .....	145
siromašno građuirano .....	37
sitnozrno tlo .....	30
slijeganje .....	41
diferencijalno .....	47, 64, 148
dugotrajno .....	49
naknadno .....	49, 64
nejednoliko .....	148
podloge sufozijom .....	160
temeljnog tla .....	118
uslijed vlastite težine .....	49, 117
visokog nasipa .....	64
slijeganje krune	
pri potresu .....	123
slom	
temeljnog tla .....	146
smicanje .....	56
rahlog tla .....	67
zbijenog tla .....	67
specifična zapremina .....	7
stabilnost pokosa .....	41, 64
stacionarno strujanje .....	141

standardni penetracijski pokus .....	38
stanje naprezanja	
ciklička promjena .....	124
statička penetracija .....	56
statistička obrada .....	82
stijenska masa .....	<b>19</b>
stišljivost .....	41
strojevi za zbijanje .....	43
strujanje kroz nasip .....	144
strujna mreža .....	142
strujni tlak .....	141
utjecaj na stabilnost .....	116
strujnica	
rubna, konstrukcija .....	142
strujno polje .....	141
stupanj zasićenja .....	16, 49
stupanj zbijenosti .....	48, 53, 74, 76, 80, 90
sufozija	
popravlak svojstava tla .....	162
uvjeti za pojavu .....	159
suha čvrstoća .....	23
suha gustoća .....	41, 46, 57, 73
izračun za odabranu vlažnost .....	49
manja .....	49
najveća .....	49
pad .....	42
suha jedinična težina .....	57
suha prostorna težina	
u pripradnom stanju .....	58
sušenje .....	24
svojstva temeljnog tla .....	111

## Š

šljunak .....	39
---------------	----

## T

tečenje	
stacionarno .....	142
tehnički uvjeti izvedbe .....	89
tekuća ispitivnja .....	75
temeljni ispust .....	152
temeljno tlo	
ispiranje .....	155
terenska identifikacija .....	<b>21</b>
Terzaghi .....	18, 55
težina .....	12
čvrstih čestica .....	14
jedinična .....	13, 16
potpuno zasićenog tla .....	17
specifična .....	15
suha .....	17
uronjena, efektivna .....	17
vode .....	14, 15
tlak	
hidrostatski .....	65
porni povećani .....	65
tlo .....	3, 6
apsolutno nepropusno .....	140
dobro graduirano .....	22
dobro zbijeno .....	55
građevinski materijal .....	<b>19</b>
inženjerska svojstva .....	11
iz iskopa .....	6
jednoliko graduirano .....	22
kao viskozna tekućina .....	124
krupnozrno .....	37
krupnozrno, nekoherentno .....	12
loše graduirano .....	22
lošije kakvoće .....	166
nezasićeno .....	67
opasno, neupotrebljivo .....	12

podložno sufoziji .....	161, 162
potpuno zasićeno .....	41, 67, 68, 119
prirodna struktura .....	66
rahlo .....	41, 55
rastresito .....	3, 12, 13
s organskim primjesama .....	39
s većom količinom gline.....	39
sitnozrno .....	4
sitnozrno, koherentno.....	12
slabo graduirano .....	39
stjenovito .....	12
stjenovito, čvrsto .....	12
stjenovito, polučvrsto.....	12
stjenovito, vrlo čvrsto .....	12
suho .....	41
visokoplastično, čisto.....	49
vlažnost.....	14
vrsta.....	11
zbijenost.....	6
topljivost.....	5
travna rešetka .....	176
trenje	
na dodiru među česticama.....	41
treset.....	21, 39
amorfni .....	21
tresetište .....	12
troosno smicanje	
nekoherentnog tla.....	70

## U

UC razredba	
anorganskog sitnozrnog tla .....	37
krupnozrnog tla.....	37
učinak	
iskopa .....	5
prijevoza .....	5

ugradnje .....	5
zagađenja.....	5
ugradnja	
kontrolirana .....	54
umjetni otok .....	51, 93
unutarnja erozija.....	152, 181
urušavanja	
rahlog sloja.....	163
utjecaj	
hidrodinamički.....	109
hidrostatički.....	109
valovanja .....	136
uzgon .....	115
djelovanje .....	184
prolom nepropusnog sloja.....	158
uzorak	
iz sloja nasipa .....	77
umjetni .....	52, 89
uzrok rušenja	
velikih brana.....	109

## V

valovanje.....	134
velika voda	
osiguranje od .....	132
trajanje .....	186
trenutno zadržavanje .....	187
vibriranje .....	43
vibroploča .....	53
vibrovaljak .....	52
virna ploha .....	140, 142
visina vode	
radna .....	132
vlačna naprezanja	
u kruni.....	148
vlaženje	

naglo .....	170
vlažnost .....	42
granična .....	42
ispod optimalne .....	47
na granici tečenja .....	25, 35
odstupanje od optimalne .....	75
optimalna .....	10, 43, 46, 118
promjena .....	42
provjera .....	10
raspon oko optimalne .....	53
učinak pri zbijanju .....	43
vlažnost tla .....	43
voda	
doljnja .....	141
gornja .....	141
vodno lice u krivini	
nagib .....	135
vododrživi ekran .....	169
vododrživost .....	41, 168
vodonepropusna jezgra .....	103
vodonepropusni ekran .....	96
vodopropusnost .....	49
vršno ubrzanje .....	123
vršno ubrzanje tla .....	121

## **Z**

zagat .....	105, 140
nasuti .....	136
zapremina	
čvrstih čestica .....	14
krupnozrnog tla .....	77
pora .....	14
specifična .....	14

ukupna .....	14
zasićenje	
potpuno, ispod procjedne linije .....	146
zaštita	
od valovanja .....	177
prekrivanje humusom .....	175
zaštita građevne jame .....	140
zaštita nožice .....	178
zaštita pokosa	
estetski učinak .....	174
sadnjom grmlja .....	176
zbijanje .....	41, 66
čistog pijeska .....	42
glatkim valjcima .....	55
krupnozrnog tla .....	42
pri ugradnji .....	68
ručno .....	53
srednje jako .....	53
sredstva za .....	52
strojevi za .....	52
teškim strojevima .....	53
usporedba rezultata .....	54
utjecaj na tlo .....	63
zbijenost .....	11, 118
ispitivanje, kriteriji .....	82
krupnozrnog tla .....	55
određivanje .....	55
propisana .....	90
u prirodnom stanju .....	18
žečji nasip .....	132

## **Ž**

žaba .....	53
------------	----