

7. Nasipi i brane

7.1. Uvod

Izgradnja bilo koje građevine gotovo redovito uključuje iskop, premještanje i ugradnju zemljanog materijala u odgovarajući nasip. Nasip je, dakle, umjetna tvorevina izgrađena iz prirodnog materijala nasipanjem. Gotovo redovito uvjeti uporabivosti i stabilnosti građevine koja će se graditi na nasipu ili koju tvori sam nasip, traže odgovarajuću krutost i čvrstoće nasipanog materijala. Zbijanje nasipanog tla povećava njegovu krutost i čvrstoću pa će se nasipi vrlo često tijekom gradnje zbijati.

Posebnu vrstu nasipa čine brane. Brane su nasipi koji služe za zadržavanje vode ili neke druge tekućine. Zbog se, osim traženih svojstava za nasipe, za brane traži mala vodopropusnost ili vododrživost, kao i neka druga pogodna svojstva. Ti se uvjeti mogu postići izborom vrste tla, pripremom tla prije ugradnje, ugradnjom i zbijanjem tijekom ugradnje te pogodnim oblikovanjem nasipa.

Izgradnja nasipa i brana obično traži velike zemljane radove iskopa, premještanja, nasipavanja i zbijanja. Potreba za racionalnom izgradnjom uz održavanje kvalitete i što manjih troškova dovela je do razvoja odgovarajućih postupaka ispitivanja i preporuka za projektiranje koji omogućuju optimalni izbor materijala, oblikovanje te način ugradnje i zbijanja da bi se postigli traženi uvjeti.

Krutost, čvrstoća, a u manjoj mjeri i vododrživost, rastu s porastom zbijenosti tla. Zbijenost, pojam usko povezan s gustoćom, opisno označava

relativni odnos volumena čvrstih čestica u volumenu tla. Zbijenije tlo je ono koje ima veći postotak volumena čvrstih čestica u volumenu tla. Obično je praktično i jasnije zbijenost nekog tla opisati u relativnom odnosu prema nekoj referentnoj gustoći razmatranog tla. Kao referentnu gustoću je pak povoljno izabrati onu koja se jednostavno može postići nekim uobičajenim strojevima i postupcima na terenu.

Načelno se povećanje gustoće tla može postići na razne načine: opterećenjem, gnječenjem, nabijanjem i vibriranjem. Od ovih načina najučinkovitijim su se pokazale metode nabijanja, gnječenja i vibriranja. Također se pokazalo da učinak postupka za povećanje gustoće tla jako ovisi o njegovoj vlažnosti, ali i o načinu zbijanja. Tako je krupnozrna tla najlakše zbijati vibriranjem, a sitnozrna gnječenjem i nabijanjem.

Zbog slabe vodopropusnosti zbijanje sitnozrnih tla predstavljati će znatno veći problem od zbijanja krupnozrnog tla. Slaba vodopropusnost znatno otežava istiskivanje vode iz pora tla bez obzira na uloženu energiju u zbijanje. Zbog toga će vlažnost takvih tla imati presudnu ulogu na mogućnost njihovog zbijanja. Iz takvog promišljanja bi proizlazilo da smanjenje vlage u tlu može samo pogodovati mogućnosti njegovog zbijanja. Međutim, pokazalo se da smanjivanje vlažnosti ispod neke granice, uz stalnu uloženu energiju na zbijanje, počinje to zbijanje otežavati. To znači da za danu energiju koja se utroši na zbijanje, postoji neka optimalna vlažnost pri kojoj se postiže najveći mogući učinak zbijanja. Postojanje optimalne vlažnosti prvi je eksperimentalno utvrdio Proctor (1933).

Prije 1920 ugradnja sitnozrnog tla materijala slijedila je potpuna empirijska pravila. Proctor (1933) je prepoznao potrebu za laboratorijskim ispitivanjem mogućnosti zbijanja tla kao podlogu za racionalno projektiranje zemljanih nasipa. Pri tome je uočio da energija zbijanja i vlažnost tla imaju najveći učinak na postignutu zbijenost pa je predložio uređaj kojim se ispituje utjecaj tih dvaju parametara. Kao standardnu energiju zbijanja u laboratoriju izabrao je onu koja je bila usporediva energiji koju su građevinski valjci početka dvadesetog stoljeća mogli unijeti u tlo. Tako je nastao standardni Proctorov pokus. Kasnijim povećanjem strojeva za ugradnju i zbijanje tla na terenu, američko udruženje cestovnih službenika (AASHTO) oko 1950, tijekom velike kampanje izgradnje američkog sustava autocesta, uvelo je modificirani Proctorov pokus kao pogodniji za tada modernu tehnologiju ugradnje tla. U tom pokusu energija zbijanja povećana je oko 4.5 puta u odnosu na onu iz standardnog pokusa. Tlo zbijeno na gustoću koja približno odgovara onoj prema standardnom Proctorovom pokusu obično je nedovoljno kruto i čvrsto bilo kao podloga suvremenim prometnicama bilo kao podloga uobičajenim plitkim temeljima građevina.

Nasuprot tome, tlo zbijeno na gustoću koja približno odgovara onoj prema modificiranom Proctorovom pokusu obično zadovoljava kriterije krutost i čvrstoće koje traže takve građevine.

Nasipi često služe kao brane akumulacijskih jezera, kao obrambeni nasipi od poplava ili kao građevine koje ograničavaju odlagališta rudarske ili industrijske tekuće jalovine. Takvi nasipi nazivaju se branama ili hidrotehničkim nasipima. Kako nasipi obično nisu potpuno nepropusni bez obzira iz kojeg su tla izgrađeni, u brana će nastati procjeđivanje vode iz područja većeg hidrauličkog potencijala u zone s nižim potencijalom. Kako bi se to procjeđivanje svelo na najmanju moguću mjeru, nasipi trebaju zadovoljiti neki kriterij vododrživosti. To se može postići ugradnjom slabo propusnih vrsta tla, ako takova stoje na raspolaganju. Slabo propusna tla, s druge strane, imaju redovito i manju čvrstoću od dobro propusnih tla. Kada je raspoloživost pogodnih vrsta tla za brane ograničena, pribjegava se oblikovanju brana na način da se razdvoje funkcije čvrstoće od funkcija vododrživosti. Tako nastaju zonirane brane u kojima je dio, obično središnji, služi za smanjenje procjeđivanja, a drugi, obično na uzvodnoj i nizvodnoj strani, za osiguranje stabilnosti građevine.

Kod zoniranih brana, voda koja se procjeđuje prolazi iz zone slabo propusnog u zonu dobro propusnog tla. Kako su čestice slabo propusnog tla mnogo manje od veličina pora dobro propusnog tla, javlja se opasnost od odvajanja tih čestica pod silama strujnog tlaka od osnovne mase materijala te od njihovog postupnog iznošenja kroz dobro propusne zone brane. Ako takav proces potraje, mogu se kroz zone slabo propusnog tla stvoriti kanali koji omogućuju prodiranje vode pod većim brzinama, što pospješuje daljnju eroziju sitnozrnog tla, daljnje povećanje kanala i konačno urušavanje i potpuno rušenje brane. Takav proces, koji se naziva cijevljenje, u svakom slučaju treba spriječiti. To se postiže ugradnjom filtara na sučelju tla bino različitih veličina zrna. Filtri služe za sprječavanje iznošenja sitnih čestica. Izrađuju se iz tla odgovarajućeg granulometričkog sastava po posebnim pravilima i čine ključan element osiguranja stabilnosti zoniranih brana. Istraživanja su dovela do izrade pravila za dimenzioniranje odgovarajućih filtara.

U načelu slična pojava pojavi cijevljenja u nasutim branama je i pojava površinske erozije pri procjeđivanju. U tom slučaju iznošenje čestica sitnozrnog tla nastaje na mjestima na kojima procjedna voda izlazi na nizvodnu površinu brane ili površinu tla nizvodno od brane. I tu pojavu treba spriječiti, prvenstveno oblikujući branu tako da se izbjegne izlazak procjedne vode na površine koje su zbog sitnih zrna osjetljive na eroziju. Zato se u branu ugrađuju drenovi koji skupljaju procjednu vodu i uredno je

odvode iz brane bez opasnosti od iznošenja sitnih čestica. Ti se drenovi obično izrađuju iz dobro propusnog, dakle krupnozrnog, tla pa je i na njihovom sučelju sa sitnozrnim tlom potrebna filtarska zaštita.

Opisane pojave, svojstva i primjereni postupci ispitivanja i kontrole opisat će se u ovom poglavlju.

7.2. Iskop, prijevoz, nasipanje i zbijanje tla

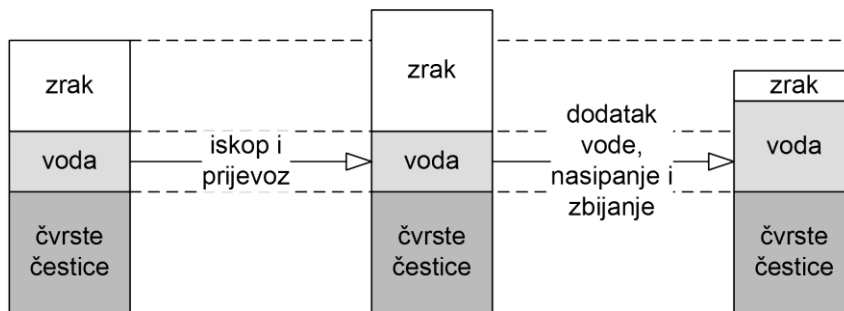
Početak gradnje gotovo svakog građevinskog zahvata počinje zemljanim radovima. Ovisno o potrebi oni obuhvaćaju čišćenje terena od raslinja i smeća, iskop, prijevoz, nasipanje i zbijanje tla. Kod iole značajnijih građevinskih zahvata ti se radovi izvode korištenjem odgovarajućih strojeva (slika 7-1). Ključni element u razvoju modernog premještanja tla je bio uvođenje traktora, prvo za poljoprivredne i vojne svrhe, početkom dvadesetog stoljeća. Traktori mogu biti gusjeničari, koji su spori, ali mogu ostvariti veću silu otpora tla (slika 7-1d) i na kotačima, koji su brži, ali ostvaruju manji otpor tla (slika 7-1b). Na traktor se mogu priključiti razni pogodni uređaji, ovisno o namjeni: buldozeri za razastiranje tla, plugovi za trganje i rahljenje tvrdog tla i pripremu iskopa, bageri za utovar i iskop, valjci za valjanje i td. Najpogodniji izbor tih strojeva ovisi o vrsti tla, opsegu radova i namjeni buduće građevine.

Prilikom iskopa tlo se razrahljuje i povećava volumen. Ako se ponovno ugrađuje, treba ga zbiti, a u pojedinim slučajevima mu treba prije zbijanja promijeniti vlažnost, bilo smanjiti sušenjem ili povećati prskanjem. Zbijanjem tlo obično zauzima manji volumen od onog kojeg je zauzimalo u prirodnom stanju. Sve te promjene volumena utječu na određivanje potrebnih količina materijala i radova pri njihovom projektiranju i novčanom vrednovanju (Slika 7-2).

Od posebne važnosti za izgradnju nasipa su strojevi za zbijanje obzirom na različite mogućnosti zbijanja pojedinih vrsta tla. Obzirom da se zbijanje tla izvodi s njegove površine, a učinak rada stroja naglo opada sa dubinom ispod površine, nasipi se izvode nasipanjem i razastiranjem tla u tanjim slojevima. Najpogodnija debljina razastrtog sloja tla priređenog za zbijanje ovisi o vrsti tla te učinku i kapacitetu stroja za zbijanje. Ponekad je vlažnost iskopanog tla pre velika za učinkovito zbijanje pa ga treba sušiti, ili je pre mala pa ga treba dodatno vlažiti. U prvom slučaju to se radi razastiranjem i



Slika 7-1 Tipični strojevi za zemljane radove: (a) bageri za iskop i utovar, (b) utovarivač za utovar iskopanog tla, (c) dumper za prijevoz tla, (d) dozer za razastiranje s plugom za plućenje, (e) skrejper za grubo ravnanje i razastiranje, (f) grejder za fino ravnanje, (g) valjak sa stopama za gnječenje i zbijanje sitnozrnog tla
 prirodnim sušenjem za lijepog vremena, što znatno ograničava takvu aktivnost, a u drugom se razastrtom tlu dodaje voda prskanjem.



Slika 7-2 Od iskopa do ugradnje: tipične promjene volumena pojedinih komponenti tla pri iskopu i prijevozu (povećanje volumena) te ugradnji i zbijanju (smanjenje volumena)

Da bi se ispravno odredile mjere pripreme tla za zbijanje, potrebno je u laboratoriju utvrditi karakteristike tla koje utječu na izbor optimalnog načina zbijanja.

7.3. Zbijanje tla u laboratoriju

Utjecaj vlažnosti na mogućnost zbijanja

Učinak zbijanja tla ovisi o količini energije koja je uložena u to zbijanje. Energija se može uložiti nabijanjem, gnječenjem, pritiskom ili vibriranjem. Dok je nabijanje, gnječenje i pritisak učinkovit postupak za sitnozrna tla, gnječenje i pritisak gotovo nema učinka za krupnozrna tla. Za krupnozrna tla najučinkovitiji postupak zbijanja je vibriranje, a manje nabijanje.

U slučaju da se zbijanje postiže slobodnim padom nekog malja-utega, uložena energija zbijanja jednaka je umnošku visine pada i težine malja. Za ostale vidove zbijanja, energiju koja je utrošena na zbijanje nije jednostavno odrediti.

Jedna od mjera zbijenosti je suha gustoća¹, ρ_d , definirana kao masa čvrstih čestica u jediničnom volumenu tla². Zbijenost je to veća što je suha

¹ Pojam suhe gustoće treba razlikovati od pojma gustoće osušenog tla. Suha gustoća je izraz žargona koji opisuje određeno stanje tla, dok je gustoća osušenog tla stanje tla nastalo nakon određenog procesa, sušenja.

² Suha gustoća pokazala se kao vrlo pogodna mjera zbijenosti u praksi. S druge strane, gustoća tla ne može poslužiti kao mjera zbijenosti jer ovisi o stupnju zasićenosti pora vodom.

gustoća veća. Suha gustoća tla može se izraziti pomoću parametara faznih odnosa na razne načine, na primjer kao

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} = \frac{\rho}{1 + w} \quad (7.1)$$

ili

$$\rho_d = \frac{G_s S_r}{S_r + w G_s} \rho_w \quad (7.2)$$

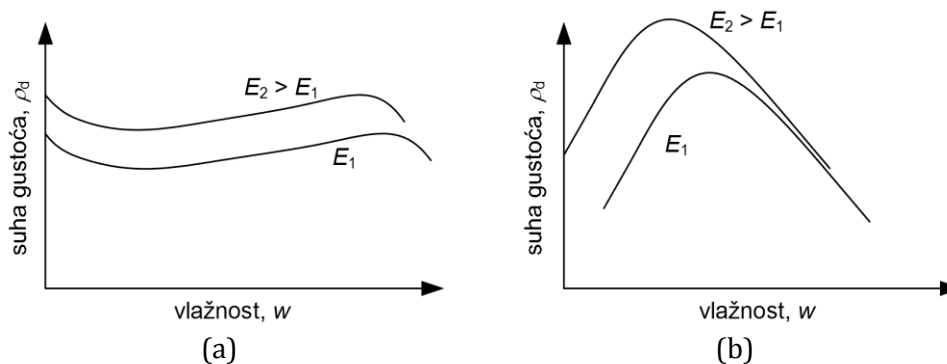
ili

$$\rho_d = \frac{G_s(1 - A)}{1 + w G_s} \rho_w \quad (7.3)$$

gdje su m_s i V masa čvrstih čestica odnosno volumen uzorka tla, $\rho = m/V$ i $w = m_w/m_s$ su gustoća odnosno vlažnost uzorka tla (kao omjer, a ne postotak), $m = m_s + m_w$, m i m_w su masa uzorka odnosno masa vode u uzorku, $G_s = \rho_s/\rho_w$ je relativna gustoća čvrstih čestica, ρ_s i ρ_w su gustoća čvrstih čestica odnosno gustoća vode, $S_r = V_w/V_V$ je stupanj zasićenosti (kao omjer, a ne postotak), V_w i V_V su volumen vode odnosno volumen pora u uzorku, $A = V_a/V$ je udio zraka u uzorku, a V_a je volumen zraka u uzorku. Izraz (7.1) je pogodan za brzo određivanje suhe gustoće iz jednostavno mjerljive gustoće i vlažnosti tla, dok su izrazi (7.2) i (7.3) pogodni za grafičke prikaze utjecaja zasićenosti pora za određene kombinacije suhe gustoće i vlažnosti.

Utjecaj početne vlažnosti na postignutu suhu gustoću pri zbijanju obično se prikazuje krivuljama zbijanja koje prikazuju odnos suhe gustoće i vlažnosti tla pri istoj energiji zbijanja (Slika 7-3). Krivulje zbijanja razlikuje se između krupnozrnih i sitnozrnih. Krupnozrna tla, za razliku od sitnozrnih, vrlo se slabo zbijaju nametanjem statičkog opterećenja. Zbijanje se jedino može ostvariti pomicanjem kontakata među zrnima. To pomicanje ometaju meniskusi na sučelju vode i zraka u porama koji međusobno napinju susjedne čestice tla. Zbog toga će najveći učinak zbijanja pokazivati ili gotovo suha struktura zrna ili struktura zrna koja je gotovo zasićena vodom. To se može uočiti na slici 7-3a.

Za razliku od krupnozrnog tla, sitnozrno tlo ima gotovo uvijek jasno izraženu najveću zbijenost pri jednoj vlažnosti (slika 7-3b). Ta se vlažnost naziva *optimalnom*. Zbog vrlo malih dimenzija čestica, sile napinjanja u



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

meniskusima kapilarne vode pri malim zasićenostima pora su vrlo velike pa su uobičajene energije zbijanja nedovoljne da pomaknu čestice u zbijeniji razmještaj. To je razlog što vrlo malo vlažna sitnozrna tla nije moguće dobro zbijati uobičajenim sredstvima.

Očito je iz ovog prikaza da zbijenost ovisi o uloženoj energiji zbijanja, da sitnozrno tla ima jasno izraženu najveću zbijenost za neku optimalnu vlažnost pri danoj energiji zbijanja, a da ta najveća zbijenost kao i optimalna vlažnost ovisi o energiji zbijanja i nisu konstante tla. Što je veća energija zbijanja maksimalna suha gustoće bit će veća, a optimalna vlažnost manja. Parovi vrijednosti ($\rho_{d \max}$, w_{opt}) slijede približno paralelno krivulji potpne zasićenosti ($S_r = 1$) koja slijedi iz izraza (7.2)

$$\rho_d = \frac{G_s}{1 + wG_s} \rho_w \quad (7.4)$$

Utjecaj vlažnosti na mogućnost zbijanja te određivanje najveće zbijenosti i optimalne vlažnosti za neku danu energiju zbijanja ispituje se standardnim i modificiranim Proctorovim pokusom.

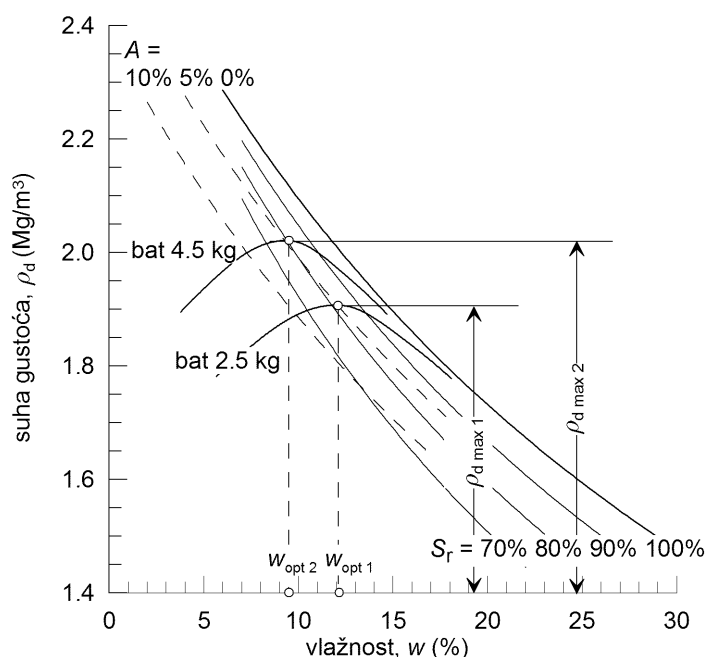
Proctorovi pokusi i najveća zbijenost sitnozrnih tla

U standardnom kao i u modificiranom Proctorovom pokusu tlo neke izabrane vlažnosti ugrađuje se u slojevima u cilindrični kalup unutrašnjeg promjera 10.2 cm, visine 11.75 cm i volumena 944 cm³, te se izloži zbijanju

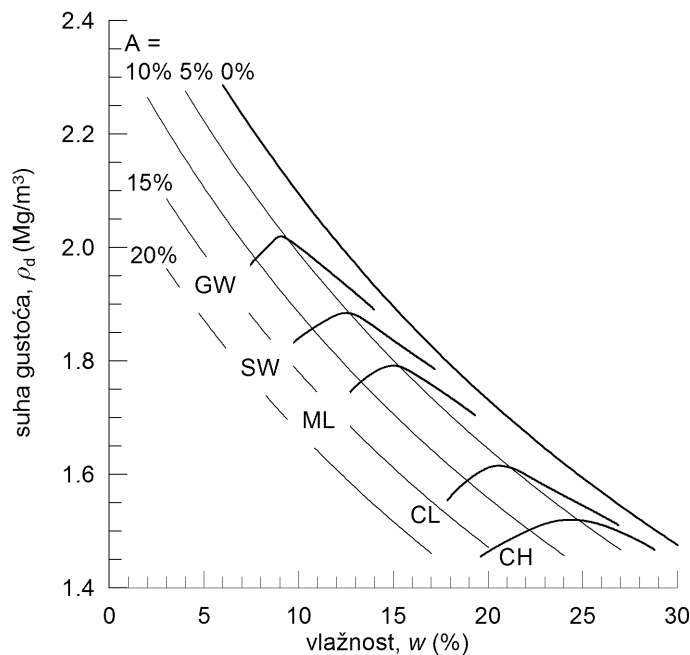
Tablica 7-1 Osnovne karakteristike standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa prema standardima SAD (ASTM)

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

pomoću određenog broja udara slobodno padajućeg bata promjera 5.1 cm zadane mase sa zadane visine za svaki sloj ponovno. Nakon nabijanja, uzorku tla se odredi suha gustoća. Pokus se ponavlja nekoliko puta pri različitim vlažnostima tla da bi se dobio utjecaj na veličinu suhe gustoće tla kao mjere zbijenosti. Tipični izgled krivulja zbijanja za standardni i za modificirani Proctorov pokus prikazuje slika 7-4. Osnovne razlike standardnog i modificiranog Proctorovog pokusa prikazuje tablica 7-1. Vidi se da je energija zbijanja u modificiranom pokusu oko 4.5 puta veća nego u



Slika 7-4 Utjecaj vlažnosti na postignute suhe gustoće pri zbijanju u standardnom Proctorovom pokusu (bat 2.5 kg) i u modificiranom Proctorovom pokusu (bat 4.5 kg) za isto sitnozrno tlo; slika nacrtana za $G_s = 2.65 \text{ Mg/m}^3$; približno vrijedi: $\rho_{d \max 2} - \rho_{d \max 1} \sim 0.11 \text{ Mg/m}^3$.

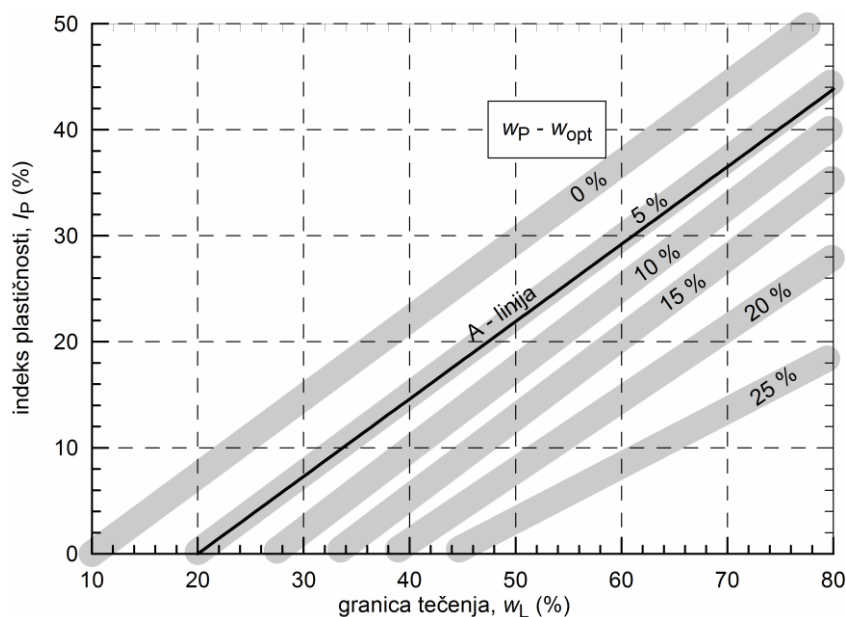


Slika 7-5 Tipične krivulje zbijenosti prema standardnom Proctorovom pokusu za različite vrste sitnozrnih tla; slika nacrtana za $G_s = 2.65 \text{ Mg/m}^3$

standardnom. Korisno je napomenuti da par vrijednosti (w_{opt} i $\rho_{d \text{ max}}$) leži na krivulji koja približno odgovara stupnju zasićenosti od oko $S_r = 80 \%$, a s povećanjem vlažnosti preko optimalne krivulja zbijenosti se asimptotski približava krivulji $S_r = 100 \%$, ali je nikada ne dotiče (zbijanjem nije moguće istisnuti sav zrak iz uzorka).

Očito je da povećanje energije zbijanja povećava najveću zbijenost (suhu gustoću $\rho_{d \text{ max}}$), dok optimalna vlažnost, pri kojoj se postiže najveća zbijenost, pada s povećanjem energije zbijanja. Treba upozoriti da krivulje zbijenosti (ρ_d/w) leže ispod krivulje potpune zasićenosti tla vodom ($A = 0 \%$ ili $S_r = 100 \%$). Relativni položaja krivulja zbijenosti i krivulja koje označavaju stupanj zasićenosti (S_r) ili volumenski udio zraka u uzorku (A) potvrđuje da ovako zbijena tla nisu potpuno zasićena. U porama je prisutan zrak što znači na se na sučelju zraka i vode javljaju kapilarni meniskusi te da je voda u porama u režimu negativnog kapilarnog tlaka. Ovaj negativni kapilarni tlak doprinosi čvrstoći tla, posebno kod manjih stupnjeva zasićenosti. Kad se ovakvo tlo potopi pod vodu, kapilarni tlak će se izgubiti i taj doprinos čvrstoći će se izgubiti.

Krivulje zbijanja ("Proctorove" krivulje) za različite vrste tla međusobno će se razlikovati (Slika 7-5). Njihov oblik, osim što ukazuje na optimalnu vlažnost, može upućivati i na pogodnost pojedine vrste tla za



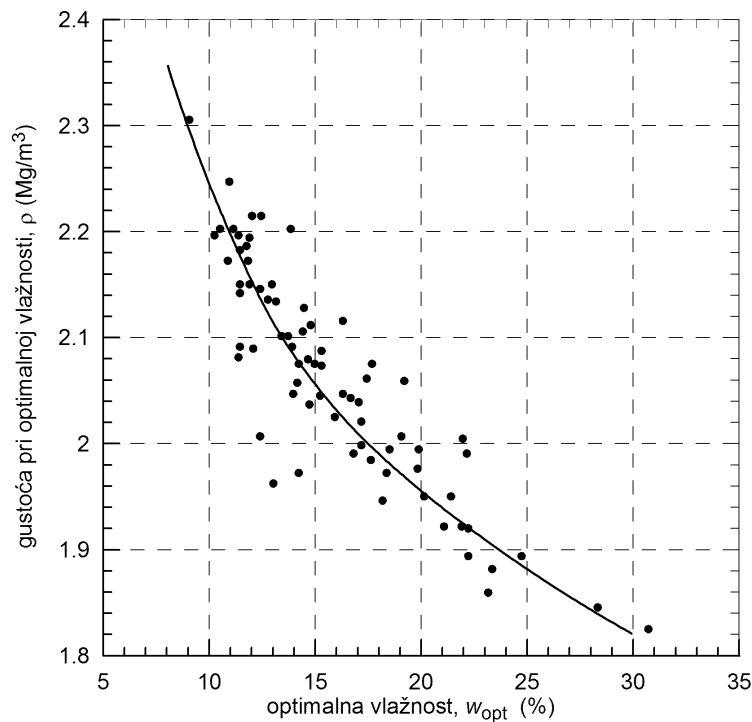
Slika 7-6 Približne razlike između granice plastičnosti i optimalne vlažnosti za standardni Proctorov pokus za sitnozrna tla (prerađeno prema McDonald, 1972, i Schroeder i dr., 2004)

ugradnju u nasipe. One manje osjetljive na promjenu vlažnosti bit će pogodnije za ugradnju jer će postojati veća tolerancija za vlažnost potrebnu za optimalno zbijanje.

Pri provedbi Proctorovog pokusa, standardnog ili modificiranog, obično se izvodi pet pokusa zbijanja pri različitim vlažnostima, približno pri vlažnostima $w_{opt} - 4\%$, $w_{opt} - 2\%$, w_{opt} , $w_{opt} + 2\%$ i $w_{opt} + 4\%$. Pri tome, za standardni pokus, za približno određivanje optimalne vlažnosti mogu poslužiti korelacije sa slika 7-6 i 7-7 dobivene iz niza ispitivanja različitih vrsta sitnozrnog tla. Za modificirani Proctorov pokus slične korelacije nisu poznate, ali može poslužiti podatak da je maksimalna suha gustoća po modificiranom Proctorovom pokusu veća od one po standardnom pokusu za oko 0.11 Mg/m^3 (Schroeder i dr., 2004), što prema slici 7-4 ukazuje da je optimalna vlažnost prema modificiranom pokusu manja za oko 2 % do 3 % od one po standardnom.

Laboratorijski Proctorovi pokusi prema relevantnim ASTM standardima izvode se na tlima koja ne sadržavaju šljunak ili veća zrna³ zbog

³ ASTM D698 i D1557 (za standardni odnosno modificirani Proctorov pokus) određuju postupak za tlo koje čitavo prolazi kroz njihovo standardno sito br. 4 (4 otvora po dužnom inču) čija je veličina otvora 4.74 mm, znači nešto veći od 2 mm koji uobičajeno označava granicu šljunka i pijeska u nas.



Slika 7-7 Odnos gustoće tla pri optimalnoj vlažnosti prema standardnom Proctorovom pokusu i optimalne vlažnosti za niz različitih sitnozrnih tla (prerađeno prema Hilf, 1957, i Schroeder i dr. 2004)

ograničene veličine kalupa za uzorke. Ukoliko u tlu, koje se ugrađuje u nasip, ima zrna većih od pijeska u manjim količinama (točnije: da manje od 30 % težine tla čine zrna promjera većeg od 3/4 inča ili 19 mm), traži se korekcija ispitane vlažnosti i suhe gustoće ugrađenog tla u nasip da bi ti rezultati bili usporedivi sa rezultatima laboratorijskih ispitivanja iz Proctorovih pokusa. Za veće količine zrna većih od pijeska standardi nisu primjenjivi zbog pre malog promjera kalupa za izradu uzorka. Korekcija rezultata za slučaj manje količine pre velikih zrna je potrebna jer se pretpostavlja da ona „plivaju“ u masi osnovnog materijala od sitnih čestica, koje „vežu“ pore i vodu uza se, pa krupne frakcije ne doprinose zbijenosti osnovnog materijala u tlu.

Korekcija rezultata ispitane vlažnosti i suhe gustoće ugrađenog tla u nasip provodi se na slijedeći način. Pretpostavimo da je izmjerena vlažnost w i suha gustoća ρ_d uzorka izvađenog iz ugrađenog tla u nasip. Pretpostavimo da p % mase osušenog uzorka iz ugrađenog nasipa za ispitivanje vlažnosti i

suhe gustoće ima promjer čestica većih od pijeska⁴. U tom je slučaju vlažnost uzorka iz nasipa određena iz izraza

$$w = \frac{m_w}{m_s} \quad (7.5)$$

gdje je m_w masa vode, a m_s je masa čvrstih čestica u uzorku, a suha gustoća tog uzorka iz izraza

$$\rho_d = \frac{m_s}{V} \quad (7.6)$$

gdje je V volumen ispitanog uzorka iz nasipa. Masa krupne frakcije Δm_s u uzorku, koja nije obuhvaćena laboratorijskim Proctorovim pokusom, tada iznosi $\Delta m_s = \frac{p}{100} m_s$, a volumen te krupne frakcije, ΔV_s , se može dobiti kao $\Delta V_s = \frac{\Delta m_s}{\rho_s} = \frac{p m_s}{100 G_s \rho_w}$, gdje su ρ_s gustoća čvrstih čestica, G_s relativna gustoća čvrstih čestica, a ρ_w gustoća vode. Korigirana vlažnost (ili vlažnost frakcija manjih od šljunka) ugrađenog tla u nasip tada iznosi

$$w_{\text{korigirano}} = \frac{m_w}{m_s - \Delta m_s} = \frac{w}{1 - \frac{p}{100}} \quad (7.7)$$

Na sličan se način može dobiti i korigirana suha gustoća (ili suha gustoća frakcija manjih od šljunka) ugrađenog tla u nasip

$$\rho_{d \text{ korigirano}} = \frac{m_s - \Delta m_s}{V - \Delta V_s} = \frac{\left(1 - \frac{p}{100}\right) \rho_d}{1 - \frac{p}{100} \frac{\rho_d}{G_s \rho_w}} \quad (7.8)$$

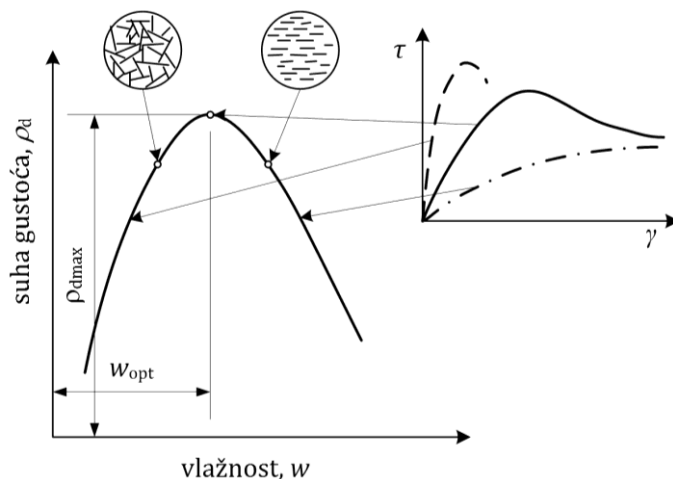
Korigirana vlažnost iz izraza (7.7) i korigirana suha gustoća iz izraza (7.8) su reprezentativni parametri uzorka iz nasipa koje treba usporediti s zahtijevanom vlažnošću i suhom gustoćom iz projekta nasipa, parametrima koji su određeni iz Proctorovih pokusa u kojima krupna frakcija nije bila zastupljena. Iz prikazane analize je očito da će općenito biti $w_{\text{korigirano}} \geq w$ i

⁴ ili promjer veći od sita br. 4 prema ASTM D698 standardu ako je taj primjenjen pri provedbi Proctorovog pokusa, ili promjera sita koje je poslužilo za odvajanje krupnih frakcija od uzorka za provedbu Proctorovog pokusa po nekom drugom standardu.

ρ_d korigirano $\leq \rho_d$. To znači da će bez provedene korekcije tlo nasip djelovati manje vlažno i više zbijeno nego što je objektivno slučaj.

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

Istraživanja su pokazala da se zbijanjem sitnozrnog tla stvara različita struktura čvrstih čestica, ovisno da li je vlažnost manja ili veća od optimalne. U slučaju manje vlažnosti od optimalne stvara se flokulirana struktura (raspršeni razmještaj čestica), dok se pri vlažnosti većoj od optimalne stvara dispergirana struktura (ujednačeni razmještaj čestica), kao što prikazuje slika 7-8. Flokulirana struktura ima veću čvrstoću, krutost i vodopropusnost od dispergirane, ali je ponašanje krto za razliku od dispergirane strukture kod koje je mehaničko ponašanje duktilno. Zbijanje tla pri vlažnosti manjoj od optimalne može biti problematično usprkos većoj čvrstoći jer se pri zasićenju tla vodom, koje se događa pri potapanju, gubi visoki kapilarni tlak, struktura tla se djelomično urušava što uzrokuje dodatna slijeganja nasipa, a i čvrstoća pada. Kako je duktilno ponašanje materijala u gotovo svakoj konstrukciji daleko poželjnije od krto, a manja vodopropusnost od veće, često se pri izradi brana i drugih vrsta nasipa traži ugradnja sitnozrnog tla nešto vlažnija od optimalne.



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

Indeks gustoće krupnozrnih tla

Mehanička svojstva krupnozrnih tla, pijesaka i šljunaka, dobrim dijelom ovise o *indeksu gustoće*, dok vlažnost takvih tla, tako dugo dok je količina sitnih čestica mala, recimo ispod 15 %, ne igra bitnu ulogu. Indeks gustoće se definira kao

$$I_D(\%) = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} \times 100 = \frac{\rho_{d \max}}{\rho_d} \frac{\rho_d - \rho_{d \min}}{\rho_{d \max} - \rho_{d \min}} \times 100 \quad (7.9)$$

gdje su e_{\max} i $\rho_{d \min}$ te e_{\min} i $\rho_{d \max}$ koeficijenti pora i suhe gustoće koji odgovaraju nekoj standardiziranoj⁵ minimalnoj odnosno maksimalnoj zbijenosti krupnozrnog tla. Ove se standardizirane zbijenosti dobiju posebnim standardiziranim pokusima čije osnovne značajke prikazane na tablici 7-2. Indeks gustoće od 0 % odnosno od 100 % označava najrahlije odnosno najzbijenije krupnozrno tlo u odnosu na standardizirano najrahlije odnosno najzbijenije stanje⁶.

Zanimljivo je napomenuti da su najveće suhe gustoće iz modificiranog Proctora i iz pokusa najveće zbijenosti za krupnozrna tla približno iste, a da obje premašuju najveću suhu gustoću po standardnom Proctorovom pokusu

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

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

⁵ Teoretski, minimalna zbijenost odgovarala bi beskonačno rahloj strukturi koja bi imala beskonačno veliki koeficijent pora, a teoretski maksimalna zbijenost odgovarala bi materijalu s koeficijentom pora jednakim nuli. No, u prvom slučaju takva struktura bi u našem gravitacijskom polju bila nestabilna, dok bi strukturu u drugom slučaju tražila da zrnaca idealno dodiruju bez međusobnih praznina, što praktički nije moguće. Zato se pribjegava nekim praktičnim i standardiziranim pokusima koji u „normalnim“ okolnostima daju minimalnu odnosno maksimalnu zbijenost.

⁶ U američkoj se literaturi indeks gustoće naziva relativnom gustoćom i označava s D_r .

za oko 0.11 Mg/m^3 .

Indeks gustoće se u praksi rjeđe koristi u kontroli zbijenosti nasipa.

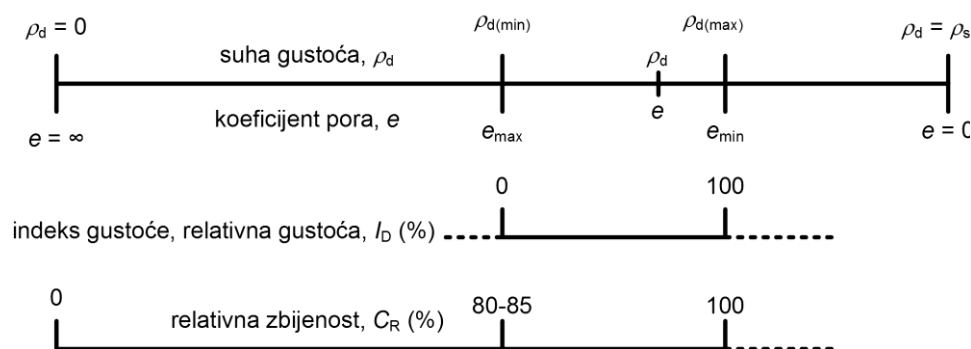
Relativna zbijenost

Stupanj zbijenosti tla u nasipu često se u praksi izražava preko *relativne zbijenosti* koja se definira kao

$$C_R(\%) = \frac{\rho_d}{\rho_{d \max}} \times 100 \quad (7.10)$$

gdje je ρ_d gustoća zbijenog tla, a $\rho_{d \max}$ najveća suha gustoća određena standardnim ili modificiranim Proctorovim pokusom. U primjeni treba naglasiti na koji se od ta dva pokusa relativna zbijenost odnosi. Pojam relativne zbijenosti posebno se koristi pri određivanju kriterija ugradnje zemljanih materijala u nasipe. Tako se može, na primjer, tražiti da tlo u izvedenom nasipu mora imati relativnu zbijenost u odnosu na modificirani Proctorov pokus od najmanje 92 %. To znači da suha gustoća tla ugrađenog u nasip⁷ mora biti barem $0.92 \times \rho_{d \max}$.

Do sada opisane različite mjere zbijenosti imaju slične nazive i mogu izazvati zabunu u primjeni pa ih je korisno u svakom projektu jasno definirati. Slika 7-9 prikazuje međusobne odnose različitih mjera zbijenosti nasutog i zbijenog tla. Iz slike, kao i iz definicija odgovarajućih pojmova, vidljivo je da indeks zbijenosti teoretski može biti i manji od nule i veći od



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

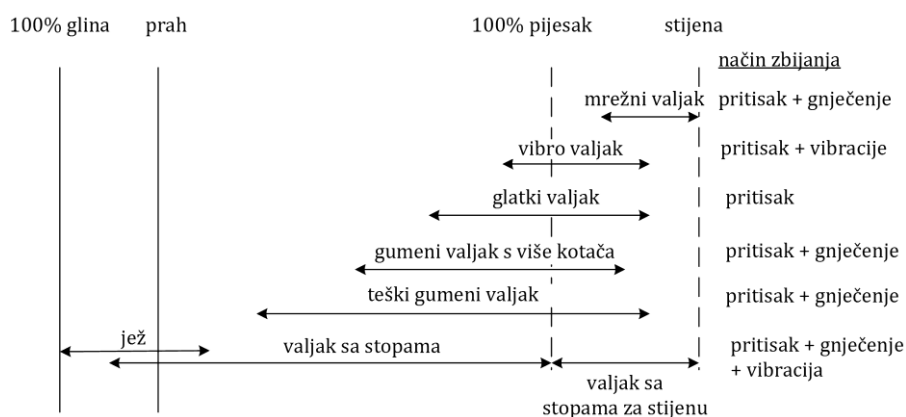
⁷ odnosno njena korigirana vrijednost, ako tlo u nasipu sadrži krupne frakcije koje nisu korištene u modificiranom Proctorovom pokusu; vidi prethodno poglavlje o Proctorovim pokusima

100 %. Isto tako, i relativna zbijenost može teoretski biti veća od 100 %.

7.4. Zbijanje tla na terenu

Strojevi za zbijanje

Strojevi na terenu zbijaju tlo pritiskom, udarcima, vibriranjem i gnječenjem u omjeru i veličini ovisnoj o izvedbi i težini stroja. Slika 7-11 prikazuje različite tipične manje i veće strojeve za zbijanje krupnozrnog i sitnozrnog tla. Za velike zemljane radove u cestogradnji i na izgradnji nasutih brana primjenjuju se i mnogo veći strojevi. Slika 7-10 prikazuje približnu primjenjivost pojedinih strojeva za zbijanje u ovisnosti o granulometričkom sastavu materijala koji treba zbiti. Primjenjivost pojedinih strojeva dobrim dijelom proizlazi iz empirijskih opažanja, ali se općenito može primijetiti da će se krupnozrna tla bolje zbijati glatkim vibrirajućim valjcima koji u tlu izazivaju vibracije uz manje posmične deformacije, dok će se sitnozrna tla bolje zbijati valjcima sa stopama i ježevima koji u tlu izazivaju velike posmične deformacije (gnječenje). Dok utjecaj učinka glatkih valjaka opada s dubinom od površine tla, učinak valjaka sa stopama veći je na dnu stope koja je utonula u tlo, nego pri samoj površini tla. Tako će jež i valjak sa stopama zbijati od dubljih zona prema površini dok u konačnosti tlo ne bude toliko zbijeno da stope više ne prodiru u tlo.



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

vibro-
ploča

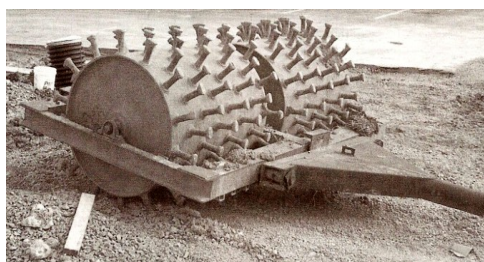
nabijač

reversibilna
pločavaljak sa
stopamaglatki
vibro-valjak

veliki valjak sa stopama



gumeni valjak s više kotača



jež

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

Kontrola zbijenosti

Zbijenost tla i vlažnost ugrađenog i zbijenog tla na terenu treba kontrolirati kako bi se postigle tražene zbijenosti i ujednačena kvaliteta nasipa. Mjerenja se provode na svakih 1 000 m² do 2 000 m² površine netom zbijenog sloja. Ukoliko nije postignuta tražena zbijenost i moguće vlažnost, nastavlja se sa zbijanjem sloja dodatnim prijelazima strojeva. Optimalna debljina nasutog sloja i broj prijelaza stroja za zbijanje prije velikih zemljanih radova provjerava se na *probnoj polju*.

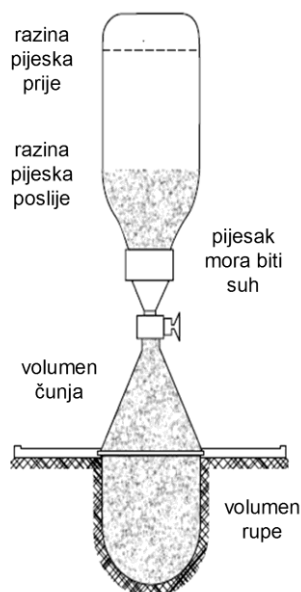
Za kontrolu zbijenosti ugrađenog tla razvijeni su različiti terenski uređaji od kojih su najpoznatiji uređaj s pješčanim konusom, slika 7-12, i uređaj s balonom za mjerenje gustoće ugrađenog tla, tankostijeni cilindar za vađenje uzoraka, nuklearni densimetar, slika 7-13, za posredno mjerenje gustoće i vlažnosti, probna ploča za neposredno mjerenje postignute krutosti tla i neki drugi.

Za primjenu uređaja s pješčanim konusom treba iskopati u zbijenom tlu manju rupu čiji se volumen ispuni suhim pijeskom poznate gustoće. Iz količine pijeska koji je ušao u rupu i konus uređaja na vrhu rupe odredi se volumen rupe. Pomoću tako izmjerene volumena i težine iskopanog tla odredi se njegova gustoća, a pomoću izmjerene vlažnosti iskopanog tla i tražena suha gustoća iz izraza (7.1). Na sličan se način koristi i uređaj s gumenim balonom. Volumen iskopane rupe mjeri se iz volumena vode ili ulja kojim je gumeni balon pritisnut na stijenke rupe.

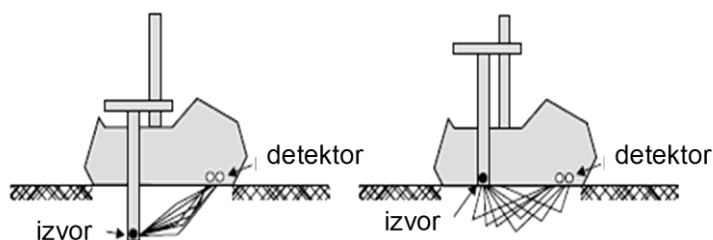
U postupku s tankostijenim cilindrom, posebni se čelični cilindar zabije u zbijeno tlo. Cilindar zarobi uzorak tla koji se daje na ispitivanje suhe gustoće i vlažnosti u laboratoriju.

U postupku s probnom pločom, kružna se čelična ploča vertikalno pritišće na površinu zbijenog tla. Pri tome se mjeri sila kojom se ploča opterećuje kao i slijeganje ploče izazvano tim opterećenjem. Primjenom odgovarajućeg izraza za slijeganje kružne ploče na elastičnom poluprostoru, određuje se ekvivalentna⁸ krutost tla. U tom slučaju ne kontrolira se zbijenost tla neposredno, već parametar, u ovom slučaju krutost, o kojem neposredno ovisi slijeganje budućeg nasipa koje mora ostati u prihvatljivim granicama određenim graničnim stanjem uporabivosti.

⁸ misli se ekvivalentna elastična krutost jer je stvarni odnos naprezanja i deformacija u tlu nelinearan.



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



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

Nuklearni densimetar ima dva osnovna elementa: radioaktivni izvor (obično radioaktivni cezij) i detektor radioaktivnog zračenja. Izvor se postavi na površinu zbijenog tla ili se utisne preko posebne sonde u tlo. Gustoća se određuje temeljem intenziteta prolaska gama zraka kroz tlo. Emisija zračenja koju prima detektor obratno je proporcionalna gustoći tla. Uređaj prethodno mora biti baždaren prema poznatoj gustoći na istoj vrsti tla. Za određivanje vlažnosti koristi se jaki neutronske izvor. Emisija neutrona odbija se od čestica vode što bilježi detektor zračenja. Odbijanje je to jače što je veća vlažnost tla. I to odbijanje treba kalibrirati na istom tlu poznate vlažnosti. Pokus može biti nepouzdan ako su prisutna organska tla i tla s velikim zrnima kamena.

Kriteriji zbijenosti

Projektom treba predvidjeti uvjete koje mora zadovoljiti predviđeni nasip kao i način kako će se ti uvjeti provjeravati. Izbor tih uvjeta obično je kompromis između cijene i kvalitete. Što je veća tražena zbijenost tla, skuplji će biti terenski radovi na zbijanju.

Kriteriji tražene zbijenosti obično se izražavaju preko relativne zbijenosti, na primjer $C_R = 92\%$, i prihvatljivog raspona vlažnosti, na primjer $w = w_{opt} \pm 2\%$. Pri tome treba naznačiti vrstu i standard pokusa za najveću suhu gustoću na koju se odnosi parametar relativne zbijenosti. Za spravljenе uzorke u laboratoriju prema tom kriteriju određuju se mehanička svojstva tla, prvenstveno čvrstoća, krutost i vodopropusnost. Pomoću tih svojstava dokazuje se pouzdanost projektom predviđene konstrukcije nasipa ili brane obzirom na moguća granična stanja nosivosti i uporabivosti.

Tablica 7-3 Uobičajeni kriteriji zbijanja nasipa

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

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

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

U primjeni tijekom izgradnje nasipa nije praktično izvoditi masovna kontrolna ispitivanja traženih mehaničkih svojstava tla, već se pretpostavlja da će ugrađeno tlo imati ta svojstva ako se ugradi pri zbijenosti i vlažnosti pri kojoj su tijekom prethodnih istražnih radova ona utvrđena. Iz tog je razloga nužno da se nasip izvodi tako da zbijenost i vlažnost strogo odgovaraju traženim veličinama. Neke uobičajene tražene veličine relativne zbijenosti, raspone vlažnosti, odgovarajuće pogodne vrste strojeva za zbijanje, te pogodne visine slojeva koji se zbijaju prikazuje tablica 7-3.

Kao primjer navode se u tablici 7-4 i kriteriji zbijanja nasipa Hrvatskih cesta i Hrvatskih autocesta (OTU 2001). Ovi kriteriji omogućuju kontrolu zbijanja ili preko relativne zbijenosti obzirom na najveću zbijenost po standardnom Proctorovom pokusu (!) ili prema postignutoj krutosti (edometerski modul) iz ispitivanja probnom pločom.

Pogodnost tla za ugradnju u nasipe

Mada se svako tlo može ugraditi u nasip, poteškoće u zadovoljenju potrebnih kriterija kao što su krutost, čvrstoća i vodopropusnost, osjetljivost na promjenu vlage izazvane vremenskim prilikama, mogućnost prilagođavanja vlažnosti sušenjem ili vlaženjem radi postizavanja optimalnih uvjeta za ugradnju kao i relativna cijena tih radova čine neka tla pogodnija za ugradnju u određenim okolnostima od drugih. Izbor materijala za ugradnju ovisit će relativnom vrednovanju raspoloživosti, udaljenosti od mjesta iskopa, raspoloživoj količini, kao i drugim ekonomskim i tehnološkim okolnostima nasuprot pogodnosti za ugradnju i pogodnosti mehaničkih svojstava relevantnih za određenu građevinu te kvaliteti izgrađenog nasipa koja se želi postići. U svakom slučaju i bez obzira na pogodnosti trebat će ispitivanjem i odgovarajućim analizama u projektu dokazati da predviđeno tlo za ugradnju zadovoljava predviđena svojstva korištena u analizama dokazivanja pouzdanosti buduće građevine obzirom na moguća granična stanja nosivosti i uporabivosti.

Pri izboru raspoloživih vrsta tla pri izgradnji neke građevine može poslužiti karta relativnih pogodnosti pojedinih vrsta tla razvrstanih prema uobičajenim klasifikacijskim grupama, prikazana na tablici 7-5. Podatke iz ove tablice treba koristiti samo kao okvirne pokazatelje koje treba potvrditi odgovarajućim ispitivanjima u svakom pojedinom slučaju.

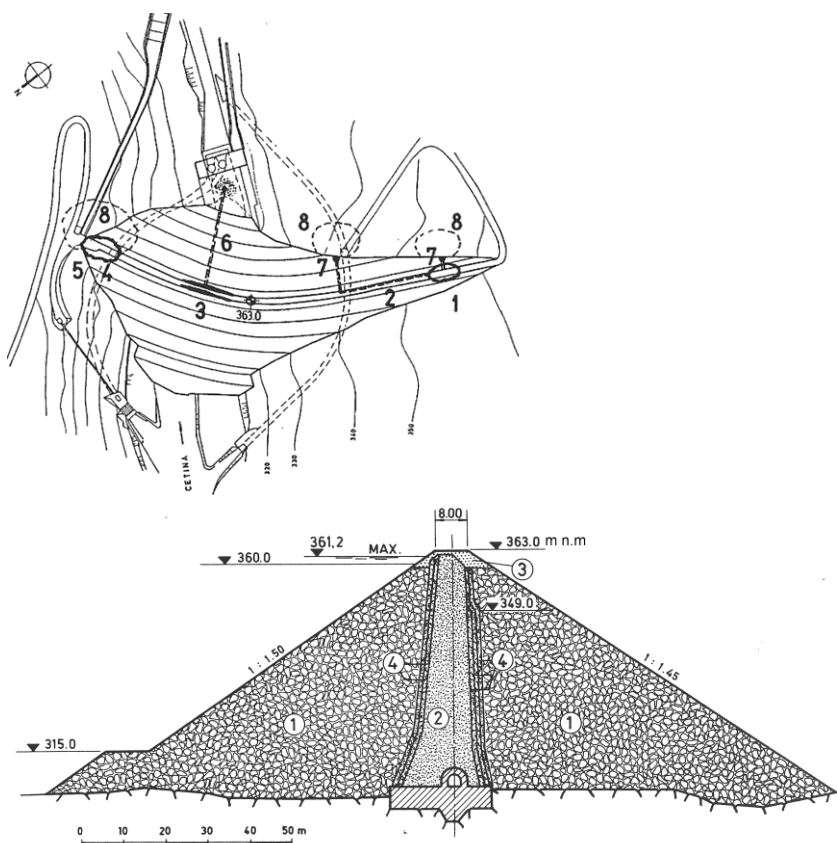
Tablica 7-5 Karta relativne inženjerske uporabivosti pojedinih vrsta tla za nasipanje i zbijanje (NAVFAC, 1982)

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

7.5. Nasute brane

Primjeri, dijelovi i oblikovanje brana

Nasute brane su nasipi koji zadržavaju vodu. Spadaju među najveće i najskuplje građevinske pothvate. Služe za osiguranje od poplava, spremanje vode za navodnjavanje i hidrocentrale, ograničavanje odlagališta tekuće rudarske jalovine kao i za niz drugih namjena. Jezero koje se stvori iza brane naziva se akumulacijom. Brane su skupe i složene građevine, grade se nekoliko godina i svaka, obzirom na lokalne geološke prilike, predstavlja slučaj za sebe. Nekoliko slijedećih slika prikazuju neke od poznatijih brana koje su projektirali i izgradili hrvatski inženjeri i građevinska poduzeća.



Legenda: 1 potporne zone od lomljenog nasutog kamena,
2 glinena jezgra, 3 krana brane, 4 višeslojni filtri

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

BRANA PERUĆA

Prva od prikazanih brana je nasuta brana Peruća na Cetini (Slika 7-14), smještena na ulazu u Hrvatačko polje, sedamdesetak kilometara iznad ušća Cetine u more. Građena je od 1956. do 1959. godine.

Brana Peruća s akumulacijom i hidrocentralom instalirane snage 41.6 MW dio je hidroenergetskog sustava sliva rijeke Cetine kojemu još pripadaju hidroelektrane Orlovac (237 MW), Đale (40.8 MW), Kraljevac (67 MW) i Zakućac (486 MW). Čitav je sustav izgrađen radi optimalnog korištenja voda tog područja (Rupčić, 1993).

Brana Peruća izgrađena je kao nasuta brana na podlozi okršenih krednih vapnenaca, uske uspravne jezgre od visokoplastiče gline smještene u sredini presjeka, opasane troslojnim filtarskim slojevima prema potpornim zonama od lomljenog kamena. Uska je glinena jezgra predviđena zbog nedostatka kvalitetne gline u okolici. Kruna brane je na koti 363 m n.m., 58 m iznad dna toka rijeke Cetine, a dužine je 448 m. Strmi pokosi ($v/h = 1/1.5$ uzvodni i $v/h = 1/1.45$ nizvodni) predstavljaju smjelo inženjersko rješenje za branu u seizmički vrlo aktivnom području. U temelju jezgre izgrađena je nearmirana betonska galerija za kontrolu procjeđivanja vode kroz branu kao i za dodatno injiciranje temeljne stijene ako bi se za tim ukazala potreba. Pregradni profil (presjek kroz temeljnu stijenu u osi brane) otješnjen je trorednom, 200 m dubokom, injekcijskom zavjesom radi sprečavanja procjeđivanja vode ispod brane, a time i gubitka vode u akumulaciji. U banu je ugrađeno 105 000 m³ gline, 47 000 m³ filtarskog materijala (pijeska i šljunka), i 722 000 m³ lomljena kamena. Za potrebe injekcijske zavjese, ukupne površine 260 000 m², izbušeno je 160 000 m injekcijskih bušotina. Injekcijska zavjesa ispod brane izvedena je iz temeljne galerije.

Strojarnica brane izgrađena je nizvodno od brane. Dotok na turbine osiguran je tlačnim armiranobetonskim tunelom promjera 6.7 m koji prolazi desnim bokom⁹ kanjona Cetine. Ugrađene su dvije Francisove turbine, svaka kapaciteta 60 m³/s, koje uz projektirani pad potencijala od 41 m daju izlaznu snagu od ukupno 41.6 MW. Godišnja prosječna izlazna energija elektrane je 120 000 MWh.

Od završetka izgradnje brana je besprijekorno radila što dokazuju mnoga opažanja. Slijeganje krune (vrha) brane u tridesetak godina iznosilo je do 90 cm, što je nešto manje od projektom predviđenog¹⁰. Procjeđivanje

⁹ orjenatcijski pojmovi desno i lijevo kod brana se uvijek odnose na strane kad se brana promatra u nizvodnom smjeru

¹⁰ Opažanja mnogih brana pokazuju da im se kruna tijekom godina slegne za oko 2 % visine brane.

kroz branu i temeljnu stijenu (tzv. gubici) nije bilo veće od $0.7 \text{ m}^3/\text{s}$ ili 1.7 % prosječne protoke Cetine na mjestu pregradnog profila.

Brana je vandalski minirana 28. siječnja 1993. godine od strane Jugoslavenske narodne armije, koja ju je držala u okupaciji. Miniranje je izvršeno eksplozivom snage 20 t do 40 t TNT-a postavljenog na nekoliko mjesta u temeljnoj galeriji i na prelivnoj građevini. Srećom, krateri u kruni uz bokove brane, nastali eksplozijom, dosegli su dubinu samo nekoliko desetak centimetara iznad razine vode u akumulaciji, koja je tada bila na koti od 356.28 m n.m. pa do prelijevanja brane i katastrofe, koju bi to prelijevanje izazvalo zbog progresivne erozije nasutog tla, nije došlo.

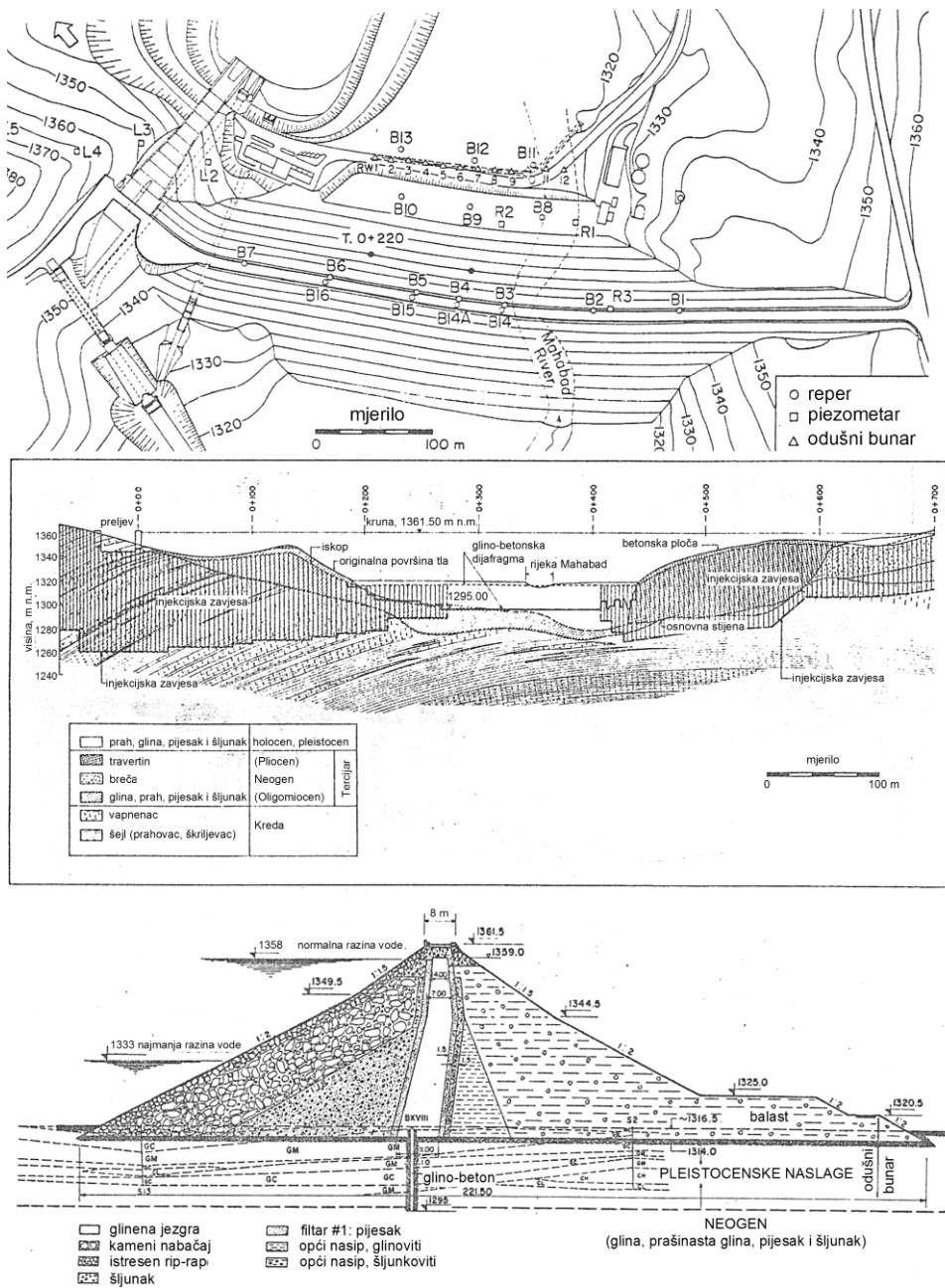
Brzom intervencijom Hrvatske vojske brana je zauzeta pa je odmah započela interventna sanacija. Nakon interventne sanacije, kojom je spriječena progresivna erozija jezgre koja je započela, pristupilo se općoj sanaciji brane. Mjere opće sanacije uključivale su popravak djelomično zarušene galerije, rekonstrukciju krune te desnog i lijevog boka brane te izvedbu glino-betonske dijafragme u jezgri. Kruna brane je nešto povišena uz dosipavanje nizvodnog pokosa brane. To je omogućilo nešto višu normalnu razinu vode u akumulaciji kao i ugradnju nešto jačih turbina i generatora. Brana danas uredno radi unutar hrvatskog energetskeg sustava.

BRANA MAHABAD

Nasuta brana Mahabad pregrađuje dolinu rijeke Mahabad uzvodno od grada Mahabada u kurdistanskom dijelu sjeverozapadnog Irana (Slika 7-15). Brana, najveće visine 47.5 m i dužine 700 m u kruni, završena je 1971. godine i predstavlja dio višenamjenskog sustava navodnjavanja za više od 20 000 ha poljoprivredne zemlje, a i proizvodi električnu energiju u manjoj priborskoj hidroelektrani.

Geološke prilike na lokaciji brane dosta su složene što uključuje nekoliko desetaka metara debele relativno mekane holocenske i pleistocenske aluvijalne naslage gline, praha pijeska i šljunka koje su uvjetovale oblikovanje brane. Brana ima centralnu uspravnu glinenu jezgru opasanu višeslojnim pješčanim filtrima te uzvodnu i nizvodnu potpurnu zonu izgrađenu iz mješovitog šljunkovitog i zaglinjenog nasutog i zbijenog tla. Površinski dio uzvodne potpurne zone zaštićen je debljim slojem lomljenog kamena koji je ugrađivan uz polijevanje kako bi se potaklo njegovo brzo slijeganje i bolje zbijanje.

Nagibi donjeg dijela uzvodnog i nizvodnog pokosa brane iznose $v/h = 1/2$, a gornjeg dijela $v/h = 1/1.5$. Ovi su pokosi blaži od pokosa brane Peruća dijelom zbog znatno lošije podloge, a dijelom zbog slabijeg materijala u



Slika 7-15 Situacija, uzdužni geološki presjek i poprečni presjek nasute brane Mahabad u sjeverozapadnom Iranu

potpornim zonama. Ispod jezgre brane, prije početka njene gradnje, izvedena je glino-betonska dijafragma radi smanjenja gubitaka vode od procjeđivanja ispod tijela brane.

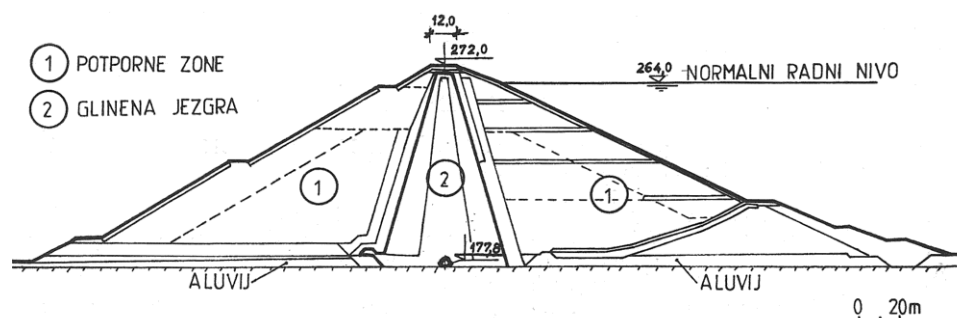
Brana je već tijekom izgradnje doživljavala velika slijeganja pa su njeni pokosi u gornjem dijelu ustrmljeni kako bi se „uhvatila“ zadana visina krune. Akumulacija je nakon završetka brane napunjena i od onda uredno služi svojoj namjeni. Tijekom prvih dvadeset godina kruna brane se slegla više od 1.8 m uz najveći vodoravni nizvodni pomak od 1.6 m. Uzvodni rub krune slegnuo je znatno više od nizvodnog pa je kruna znatno nagnuta prema akumulaciji. Zbog većeg slijeganja brane iznad aluvijalnih naslaga u temeljnom tlu od slijeganja bokova brane temeljenih na krućoj stijeni, u kruni brane, na mjestu prijelaza temelja iz aluvijalnog na stjenovito područje, pojavile su se vlačne poprečne pukotine. Sve to je znatno zabrinulo vlasnika brane, pogotovo uzevši u obzir sigurnost nizvodnog gradića Mahabada.

Nakon provedenih detaljnih analiza (Karbasi i dr., 1993) vrlo opsežnih opažanja deformacije brane i procjednih voda kroz branu, koja su obavljena kroz razdoblje od dvadeset godina, utvrđeno je da je uzrok velikih slijeganja, koja su se ostvarivala kroz duže vremensko razdoblje, prvenstveno uzrokovano kako mekim tlom u podlozi brane tako i relativno slabo zbijenom zaglinjenom općem nasipu u nizvodnoj potpornoj zoni brane. Usprkos opaženim velikim deformacijama, zaključeno je da su se one smirile u vremenu, a da je njihov vremenski tok posljedica dugotrajnog konsolidacijskog procesa, prvenstveno u nizvodnoj potpornoj zoni i u temeljnom tlu. Kako je taj proces pri svom završetku, zaključeno je, nadalje, da je brana sigurna, čak da je danas sigurnija nego tijekom čitavog prethodnog razdoblja počevši od njene izgradnje. Zanimljivo je da usprkos velikim deformacijama i tijela brane i temeljnog tla, nije došlo do povećanog gubitka vode kroz branu ili kroz temeljno tlo što znači da je glino-betonska dijafragma ispod jezgre brane, koja je neminovno morala doživjeti velike deformacije, izdržala i da potpuno obavlja svoju funkciju.

Ove analize nisu, po svemu sudeći, umirile vlasnika brane, koji je nakon toga pokrenuo njenu dogradnju, uglavnom ublažavanjem pokosa nizvodne potporne zone. To upućuje na pouku da racionalni dokazi pouzdanosti konstrukcije mogu biti nedostatni naspram laičkom osjećaju nesigurnosti pa bi i taj osjećaj pri projektiranju trebalo uzeti u obzir.

BRANA SIDI YACOUB

Nasuta brana Sidi Yacoub izgrađena je osamdesetih godina prošlog stoljeća u Alžiru. Brana je smještena u kanjonu rijeke, dužina krune je oko 400 m, a najveće visina u pregradnom profilu joj iznosi oko 85 m. Sastoji se iz središnje troslojne glinene jezgre, izgrađene iz središnje visoko plastične i obodne nisko plastične gline, opasane višeslojnim filtrima, koju podupiru uzvodna i nizvodna potporna zona od kamena, šljunka, i pijeska širokog



Slika 7-16 Poprečni presjek nasute brane Sidi Yacoub u Alžiru

granulometričkog sastava. Temeljno tlo u središnjem dijelu brane je zbijeni aluvijalni šljunak debljine oko 10 m, a ispod njega je osnovna stijena. Ukupno je u branu ugrađeno 3.5 milijuna m³ zemljanog materijala.

Troslojna jezgra izabrana je kao rješenje zbog nedostatka visoko plastične gline za jezgru i nepovoljnosti nisko plastične gline što se tiče njene erozijske stabilnosti pri stalnom procjeđivanju vode kroz branu. Centralnim, visoko plastičnim i slabo propusnim, dijelom jezgre smanjeni su hidraulički gradijenti u vanjskim, nisko plastičnim zonama što smanjuje opasnost od iznošenja sitnih čestica kroz filtre u dobro propusnu nizvodnu potpurnu zonu. Dodatnu sigurnost od iznošenja sitnih čestica nisko plastične gline jezgre pod dugotrajnim silama procjeđivanja, a time i dodatnu sigurnost od mogućeg katastrofalnog proboja jezgre, daje višeslojni nizvodni filtri. Uzvodni filtri su ugrađeni zbog njihovog povoljnog djelovanja poslije mogućeg katastrofalnog potresa. U takvim uvjetima, naime, može zbog velikih deformacija, doći do stvaranja i otvaranja pukotina u jezgri, što pak može dovesti do njenog hidrauličkog prodora. Uzvodni pješčani filter ima tada funkciju da popuni nastale pukotine i smanji visoke i opasne veće brzine toka procjedne vode. Time filter ima ulogu zacjeljenja napukle jezgre.

Posebnost brane je njen smještaj u seizmički vrlo aktivnu zonu s mogućom magnitudom potresa od procijenjenih 7.3 stupnja po Richterovoj ljestvici i najvećom vodoravnom akceleracijom na osnovnoj stijeni veličine 50 % akceleracije sile teže. Osim toga, u neposrednoj blizini brane nalazi se rasjed čija aktivnost nije utvrđena, ali je moguća. Provedene su opsežne i složene seizmičke analize stabilnosti brane (Szavits-Nossan i Ivšić, 1986) te je utvrđeno da se pri najjačem potresu njena kruna može slegnuti do 2.8 m. Iz tih je razloga projektirana visinska razlika između kote krune brane i normalne radne razine vode u rezervoaru u iznosu od 8 m. To se smatra dovoljnom sigurnošću da i pri katastrofalnom potresu ne dođe do neželjenog, i potencijalno katastrofalnog, prelijevanja vode preko krune.

POUKE IZ RUŠENJA NASUTIH BRANA

Kao što je već rečeno, nasute brane su složene i skupe građevine pa im se posvećuje velika pažnja pri projektiranju i izgradnji. Usprkos tome poznato je više rušenja visokih nasutih brana. Neke statistike pokazuju da je oko 1 do 2 % doživjelo manja ili veća pa i katastrofalna oštećenja. Pouke iz tih događaja vrijedan su doprinos napretku struke. Jedan od najgorih scenarija koji mogu pogoditi nasutu branu je njeno prelijevanje. Pri većim količinama vode koja prelijeva krunu dolazi do erozije nasutog tla pod djelovanjem tekuće vode, a time do još većeg protjecanja i veće erozije pa je proces progresivan i obično katastrofalan. Iz tog razloga je potrebno dimenzionirati sigurnosne prelivne građevine dovoljnih dimenzija da mogu preuzeti i najveću protoku vode i u najnepovoljnijim hidrološkim prilikama. Jedno od najvećih rušenja brane prelijevanjem dogodilo se 1889. godine s branom South Fork u Pennsylvaniji, SAD, kad je zbog rušenja brane uslijed prelijevanja poginulo 2 209 ljudi.

Veliko oštećenje koje je umalo dovelo do prelijevanja brane i katastrofe koja bi nastala probojem akumulacije u nizvodno gusto naseljeno područje doživjela je brana Lower San Fernando 1972 u Južnoj Kaliforniji, SAD. godine. Brana je izgrađena 1918. godine postupkom refuliranja od slabo zbijenog i vodom zasićenog pijeska (taloženjem vodom transportiranog pijeska kroz cijevi). Oštećenje brane u obliku klizanja velikog dijela tijela brane, nastalo je gubitkom čvrstoće pijeska (koji se naziva likvefakcijom) u tijelu brane uslijed jakog potresa. Zbog takvog svojstva slabo zbijenog, a vodom zasićenog, pijeska odustalo se od inače vrlo ekonomičnog načina izgradnje brana refuliranjem.

Poseban primjer rušenja je rušenje brane Teton u južnom Idahu, SAD, 1972. godine. Devedeset tri metra visoka brana srušila se u manje od sat vremena osam mjeseci nakon što je započelo prvo punjenje akumulacije (Slika 7-17). Rušenje je započelo probojem vode uz desni bok brane. Proboj se naglo širio dok nastala bujica nije proširila otvor i konačno odnijela cijelu branu na desnom boku. Cijeli je događaj snimio na filmsku vrpču jedan slučajni promatrač. Rušenje jedne moderne brane, nakon mnogih iskustva iz nebrojenih već izgrađenih brana, projektirane od strane jedne vrlo iskusne i poznate ekipe, izazvala je šok u stručnoj javnosti. Istraživanja koja su slijedila utvrdila su da je do rušenja došlo zbog neprimjerenog injektiranja raspucale temeljne stijene i neprilagođenog sučelja stijene s jezgrom iz nisko plastične gine i praha. Jezgra iz tako nepovoljnog materijala i neadekvatni filtri za sprečavanje progresivne erozije pridonijeli su nastanku katastrofe.



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

Filtri i filtarska pravila

Kao što su primjeri rušenja nasutih brana u prethodnom poglavlju pokazali, svakako treba spriječiti pojavu progresivne erozije sitnih čestica pod stalnim djelovanjem sila izazvanih procjeđivanjem vode kroz tijelo brane ili njene temelje. Posebno osjetljiva mjesta u brani su na sučelju sitnozrnog i krupnozrnog tla ili raspucale stijene i to kada voda brzo teče paralelno s tim sučeljem kroz bolje propusnu sredinu ili kada teče iz slabije propusnu u bolje propusnu sredinu. Bolje propusna sredina ima i veći promjer pora i kanala kroz koje voda teče i kroz koje može odnositi sitnije čestice slabo propusnog tla. Da bi se to spriječilo ugrađuju se filtri kao prijelazni materijal između sitnozrnog i slabije propusnog te krupnozrnog, a time i većih pora, i bolje propusnog.

Svrha filtra je da spriječi pronos sitnih čestica kroz pore krupnozrnog tla. To znači da filtar mora imati dovoljno male pore da spriječi pronos čestica čija erozija se želi onemogućiti, a ujedno da ima dovoljno velike čestice koje ne mogu proći kroz pore krupnozrnog tla. Koji puta taj uvjet nije moguće ostvariti ako je odnos veličina pora krupnozrnog i veličina čestica sitnozrnog tla pre veliki. U tom slučaju treba ugraditi višeslojne filtre tako da se ostvari postupni prijelaz iz sitnozrnog u krupnozrno tlo.

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

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

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

Brojnim istraživanjima su Sherard i suradnici utvrdili kriterije za izbor odgovarajućih filtara, a koje prikazuje tablica 7-6.

Filtre treba predvidjeti i pri projektiranju drenova za sniženje tlakova podzemne vode, koji se koriste kod sanacija klizišta i nestabilnih padina. U takvim se drenovima koriste pijesci i šljunci za dreniranje okolnog sitnozrnog tla. Filtri služe za sprečavanje začepjenja krupnozrnog tla u drenovima koje ugrožava funkciju drena.

7.6. Granična stanja nasipa i brana

Granična stanja nasipa i brana odnose se a stabilnost i uporabivost tijela nasipa i temeljnog tla ispod nasipa. Za nasipe prometnica obično su mjerodavna granična stanja nosivosti za dugotrajnog opterećenja s dreniranim uvjetima u tlu te za kratkotrajna opterećenja neposredno nakon dovršetka brzo izgrađenog nasipa u slučaju slabo propusnog tla kad su mjerodavni nedrenirani uvjeti. Od graničnih stanja uporabivosti za nasipe prometnica mjerodavno je konačno slijeganje od dugotrajnog opterećenja te slijeganje nakon izgradnje kolničke konstrukcije, ako se ova ugrađuje prije završetka dugotrajnog slijeganja. U tom slučaju kolnička će konstrukcija

doživljavati diferencijalna slijeganja zbog kojih može doživjeti oštećenja. U takvim se slučajevima obično propisuje kada se može pristupiti izgradnji kolničke konstrukcije u odnosu na ostvareno slijeganje nasipa.

Za brane se ovim graničnim stanjima dodaju još granična stanja nosivosti od mogućeg naglog sniženja vode u akumulaciji. U tom slučaju poteškoću pri provjeri pouzdanosti nasipa može činiti izbor odgovarajuće nedrenirane čvrstoće mjerodavne za slabo propusna tla, a koja ovisi o efektivnim naprezanjima koja se ostvare nakon dugotrajnog opterećenja. Za taj su slučaj razvijeni posebni postupci proračuna (Duncan i Wright, 2005). Za brane je još bitno granično stanje nosivosti tipa HYD koje se odnosi na hidrauličku i erozijsku stabilnost sitnozrnih tla na sučelju s krupnozrnima kad postoji opasnost od iznošenja sitnih čestica kroz pore krupnozrnog tla, a time i opasnost od progresivne erozije i sloma.

Na ova se granična stanja nosivosti nadovezuju još posebna granična stanja nosivosti od mogućeg opterećenja uslijed potresa.

Reference

- Coduto, D. P. (1999). *Geotechnical Engineering-Principles and Practices*. Prentice Hall, NJ.
- Duncan, J. M., Wright, S. G. (2005). *Soil Strength and Slope Stability*. John Wiley & Sons, NJ
- Hilf, J. W. (1957). A Rapid Method for Construction Control for Embankments of Cohesive Soil. ASTM Special Technical Publication, No. 232.
- Karbasi M., Szavits-Nossan A., Žarković V. (1993), An Evaluation of a 20 Years Old Earth-Rock Fill Dam Behavior. Dam Safety Evaluation, Vol.1 (ur. Kreuzer H., Dungar R., Taylor R.), International Workshop on Dam Safety Evaluation, Grindelwald, , 26.04.1993-28.04.1993., Sutton, Surrey, 1993, 139-150
- McDonald, J. K. (1972). Soil Classification for Compaction. *Proceedings, 10th Annual Engineering Geology and Soils Engineering Symposium*, Moscow, Idaho (citirano u Schroeder i dr. 2004)
- NAVFAC (1982). *Soil Mechanics*. NAVFAC Design Manual 7.2, US Navy, Naval Facilities Engineering Command, Arlington, VA.
- OTU (2001). *Opći tehnički uvjeti za radove na cestama, Knjiga II – Zemljani radovi, odvodnja, potporni i obložni zidovi*. Hrvatske ceste – Hrvatske autoceste, Zagreb
- Proctor, R. R. (1933). Fundamental Principles of Soil Compaction. *Engineering News-Record*, August 31, September 9, September 21, September 28.
- Rupčić, J. (1993). An overview of the Peruča reservoir and its structures. Dam Safety Evaluation, Vol.1 (ur. Kreuzer H., Dungar R., Taylor R.), International

- Workshop on Dam Safety Evaluation, Grindelwald, , 26.04.1993-28.04.1993., Sutton, Surrey, 1993, 5-12.
- SCS (1986). *Guide for Determining the Gradation of Sand and Gravel Filters*. Soil Mechanics Note No. 1, 210-VI, US Department of Agriculture, Soils Conservation Service, Lincoln, NE.
- Schroeder, W. L., Dickenson, S. E., Warrington, Don C. (2004). *Soils in Construction*. 5th Edition. Pearson – Prentice Hall, NJ.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Talbot, J. R. (1984a). Basic Properties of Sand and Gravel Filters. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 6, 684-700.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P., Talbot, J. R. (1984b). Filters for Silts and Clays. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 6, 701-718.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P. (1985). Filters and Leakage Control in Embankment Dams. *Seepage and leakage Control in Embankment Dams*. ASCE, 1-29.
- Sherard, J. L., Dunnigan, L. P. (1989). Critical Filters for Impervious Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 7, 927-947.
- Szavits-Nossan, A., Ivšić, T. (1986), Analiza statičke i seizmičke stabilnosti jedne visoke nasute brane, Saopštenja sa XIII Kongresa Jugoslavenskog društva za visoke brane, Mostar, 20-25 septembra, Jugoslavensko društvo za visoke brane, Knjiga 1, 513-520.