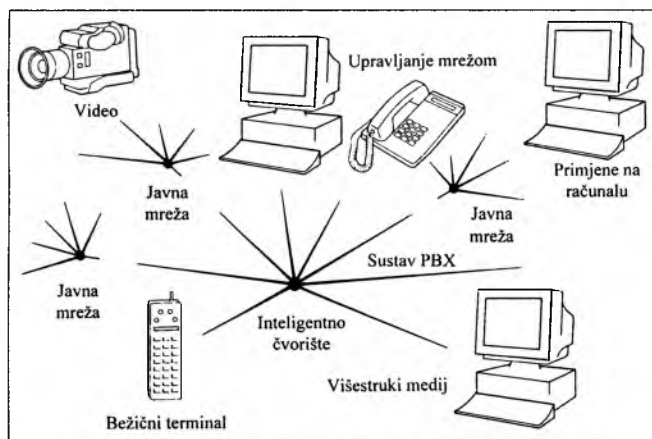
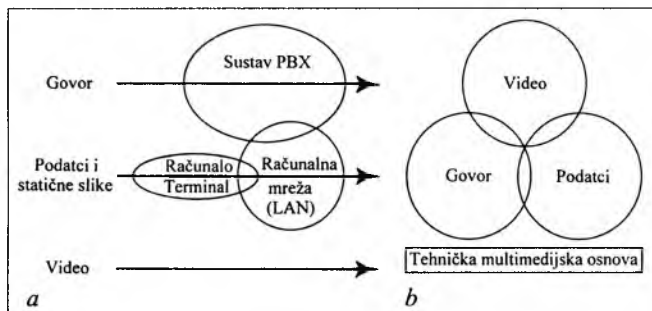


Sl. 5. Okružje koje spaja suvremeni poslovni komunikacijski sustav (primjer kućne centrale Business Phone tvrtke Ericsson Nikola Tesla d. d., Zagreb)



Sl. 6. Povezivanje više sustava u jedinstvenu komunikacijsku mrežu



Sl. 7. Ujedinjavanje nekoliko medija pri zbirnom komuniciranju. *a* današnje stanje, *b* očekivano stanje u skoroj budućnosti proširenjem mreže ISDN i primjenom tehnologije ATM

te povezivanje s računalnim mrežama unutar jedne ili više zgrada (npr. jednog poduzeća), te spajanje na vanjske mreže (sl. 5). Današnji poslovni komunikacijski sustavi već omogućuju vrlo složena povezivanja raznih vrsta komunikacija (sl. 6).

Očekuje se da će se uskoro još više ujediniti prijenos govora, računalnih podataka, statičke slike i videa u cjelovit multimedijski prijenos (sl. 7). Osim toga, znatno bi se trebalo razviti i multimedijski proširiti komuniciranje u pokretu, kao što su danas bežični telefon i mobitel. Tome će tehnička osnova biti razvijanje današnjih uskopojasnih digitalnih mreža zbirnih službi (engl. Integrated Service Digital Network, ISDN) te nova tehnologija asinkronog prijenosa za širokopojasno komuniciranje (engl. Asynchronous Transfer Mode, ATM). U bliskoj će budućnosti zbirni komunikacijski sustavi omogućivati svakom korisniku multimedijske komunikacije jednako kao što je to doskora bio samo razgovor telefonom.

Uredništvo

ZEMLJANE GRAĐEVINE, građevinski objekti nastali iskopavanjem ili nasipavanjem materijala tla koji ne sadrže primjese umjetnih sredstava radi ostvarenja trajnog ili privremenog povezivanja. Te su građevine od samih početaka imale važnu ulogu u razvoju ljudskog društva. Nastambe, sustavi za natapanje poljoprivrednih područja i putovi ostvareni su pretežno od zemlje, pa su one i danas jednako važne za gospodarski opstanak i napredak ljudske zajednice.

Prve su se civilizacije na Zemlji pojavile u dolinama velikih rijeka u Egiptu, Mezopotamiji i Kini, gdje je obilje vode omogućilo razvoj poljodjelstva prijeko potrebnog za život velikog broja ljudi. Kako kiše u tim područjima gotovo uopće nema (Egipat) ili je nema velikim dijelom godine, za natapanje polja iskorištavala se voda iz rijeka. U to su doba nastale prve zemljane građevine: kanali za natapanje i nasipi za obranu obrađenih površina od poplave. Zemlja je također bila osnovni materijal za građenje stalnih nastamba. U suvremenom, tehnološki razvijenom društvu zemljane građevine ne samo da nisu izgubile na važnosti nego imaju i znatan udio u građevinskoj djelatnosti. To su velike građevine vodoprivredne i prometne infrastrukture: građevine za reguliranje i kanaliziranje velikih i malih rijeka, nasipi za obranu od poplave, veliki i mali sustavi za natapanje s kanalima, nasipima i branama za reguliranje riječnog protoka, velike zemljane građevine za sve gušću mrežu autocesta, glavnih i sporednih cesta, željeznica i zračnih luka, akumulacijska jezera za reguliranje vodnog protoka radi proizvodnje električne energije itd. Od zemlje se grade i stambene zgrade, osobito u nerazvijenim i manje razvijenim zemljama, ali također i neke javne i privatne zgrade u razvijenim zemljama.

Veliki je zamah razvoju zemljanih građevina u novije doba omogućila moderna mehanika tla, tj. racionalno projektiranje, pouzdano predviđanje slijedne sigurnosti temelja ispod teških građevina i sigurnosti kosina visokih nasipa i dubokih usjeka u različitim vrstama tla, od rahloga sipkog do stjenovitog materijala (v. *Mehanika tla*, TE 8, str. 235) te vrlo djelotvorna mehanizacija za izvođenje zemljanih radova.

Najčešći su zemljani radovi razmjerno plitki i uski *iskopi* za temelje zidova zgrada, što ne predstavlja poseban problem za projektiranje i građenje. Suvremene velike zgrade s više podzemnih etaža, za koje su potrebni duboki iskopi, često se nalaze u geotehnički nepovoljnim okolnostima. Za projektiranje takvih iskopa potrebno je temeljito istražiti geotehnička svojstva tla i podzemne vode, utvrditi parametre za proračun osiguranja iskopane jame od urušavanja stijena te za proračun uređaja za crpljenje podzemne vode. Iskopi radi planiranja zemljišta za velika industrijska postrojenja te radi stvaranja planuma za ceste i željeznice zemljani su radovi velikog opsega. Projektiranju tih radova obvezno prethode inženjerskogeološke i geotehničke studije terena, osobito kad su usjeci duboki, pa utvrđivanje racionalnih nagiba kosina usjeka znatno utječe na troškove građenja. Veliki su zemljani radovi i iskopi za hidrotehničke građevine za reguliranje riječnog toka, za dovodne i odvodne kanale, hidroelektrane i sl.

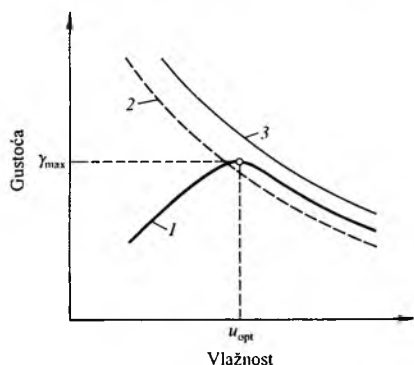
Građenje *nasipa* vrsta je zemljanih radova koji se izvode materijalom što se dobiva iz pozajmišta u blizini građevine ili iz usjeka pri građenju prometnica. S obzirom na probleme projektiranja i građenja nasipi se dijele na niske (~5·8 m) i visoke (viši od 8 m). Prema namjeni razlikuju se nasipi za ceste, željeznice i uzletišta, nasipi za melioraciju poljoprivrednih površina i nasipi za visoke nasute brane koje zatvaraju akumulacijska jezera. Projektiranju i građenju svake od tih građevina prethodi istraživanje terena i podzemnih voda, ispitivanje uzoraka materijala u podlozi nasipa i onih koji se nasipavaju, s posebnom pažnjom na način ugrađivanja i opseg zbijanja.

Materijali za zemljane građevine. Materijali od kojih se grade zemljane građevine i u kojima se ostvaruju zemljani radovi prirodni su sastojci Zemljine kore, nastali stalnim fizikalnim i kemijskim procesima transformiranja i trošenja kroz dugotrajna geološka razdoblja. U našem mjerilu vremena to su najpostojaniji materijali u prirodi, a s inženjerskog gledišta to su stijene i materijali tla. Ovi potonji konačan su proizvod raspadanja čvrstih stijena i njihovih fragmenata zbog mehaničkog raspucavanja i kemijskog trošenja. Zemljani se materijali mogu svrstati u 22 vrste sličnih fizikalnih svojstava, koje su utvrđene u struci prihvaćenim sustavom jedinstvene klasifikacije (v. *Mehanika tla*, TE 8, str. 240). U njih se ubraja 10 vrsta koherentnih materijala s česticama promjera do 60 μm koje su u suhom i u vlažnom stanju međusobno povezane privlačnim silama. Što su čestice sitnije, više ih je u jedinici obujma i stvaraju to veći otpor svome međusobnom pomicanju, pa materijal ima svojstva krutog tijela. Stijenke iskopa u koherentnom materijalu mogu biti uspravne do određene visine i bez razupiranja. Sipki materijali sadrže čestice promjera većeg od 60 μm koje u suhom stanju nisu međusobno povezane privlačnim silama. Stijenke iskopa u sipkom materijalu ne mogu biti uspravne bez razupiranja, pa moraju biti kose. Samo su u vlažnom sitnozmatom materijalu (pijesak) mogući iskopi uspravnih stijenki do manje visine bez razupiranja zbog djelovanja kapilarnih sila između sitnih čestica.

Za projektiranje zemljanih radova i građevina potrebno je poznavati svojstva materijala. To su čvrstoća na smicanje, specifične deformacije u smjeru koordinatnih osi, deformacije obujma, distorzijske deformacije i tlak vode u porama. Svojstva se materijala utvrđuju laboratorijskim mjerenjima na neporemećenim uzorcima ili iz korelacija parametara s otporom prodiranja dinamičke sonde ili statičke konične sonde.

Pokusi za ispitivanje stišljivosti i čvrstoće na smicanje tla detaljnije su opisani u članku *Mehanika tla*, TE 8, str. 245 i 249. Za projektiranje i izvođenje zemljanih građevina potrebno je poznavati odnose između vrsta materijala, načina njegova ugrađivanja i zbijanja te vlage u porama. Kopanje, utovarivanje, prevoženje i nasipavanje razrahljuju materijal, pa je nasip od takva materijala sklon jakom slijezanju kroz dulje vrijeme, dok ponovno ne postigne gustoću koja odgovara naprezanju što se stvara zbog težine gornjih slojeva nasipa. Naknadno se slijezanje nasipa sprečava prikladnim zbijanjem tijekom ugrađivanja u slojevima. Učinak zbijanja ovisi o vrsti materijala, njegovoj vlažnosti, debljini ugrađenog sloja, te o načinu rada i energiji utrošenoj na zbijanje.

Gustoća tla prilikom zbijanja ovisi o njegovoj vlažnosti. Što je vlažnost veća, to je manji otpor u međusobnom pokretanju čestica tla, pa se poroznost lakše smanjuje. Pri vrijednostima višim od određene vlažnosti (optimalna vlažnost, u_{opt}) povećava se ukupni obujam pora zbijenog tla, pa se gustoća tla opet smanjuje (sl. 1). Ovisnost gustoće tla o vlažnosti određuje se *Proctorovim pokusom* ili pokusom AASHO (engl. American Association of Highway Officials). Za pokus se pripremi pet uzoraka suha materijala prosijana kroz sito promjera 6mm kojemu se dodaju različite količine vode da bi se vlažnost pojedinih uzoraka razlikovala za ~2% i da bi najvlažniji uzorak imao 2·4% veću vlažnost od granice tečenja. Nakon 24 sata svaki se uzorak puni u metalni cilindar promjera 100mm u tri ili 5 slojeva i svaki se sloj nabija maljem uz određenu težinu malja, broj udaraca i visinu pada (tabl. 1). Nabijeni se uzorak važe, suši na 105 °C, ponovno važe, pa se iz razlike težine izračuna udio vlage. Dobiveni se



Sl. 1. Ovisnost gustoće tla o vlažnosti prilikom zbijanja (1) te pri djelomičnoj (2) i potpunoj zasićenosti neopterećenog tla (3)

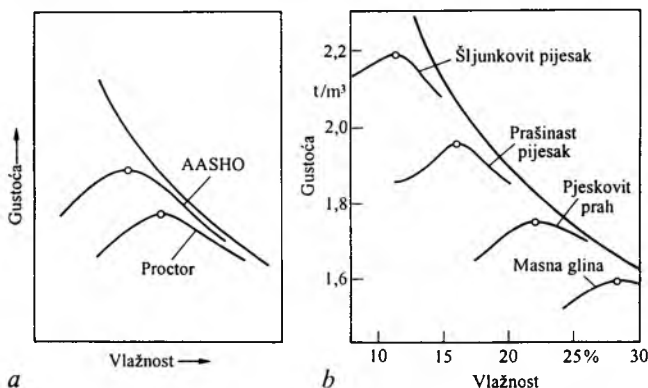
podatci unose u dijagram ovisnosti gustoće o vlažnosti (krivulje zbijanja), pa se grafički utvrđuje optimalna vlažnost i maksimalna gustoća.

Tablica 1
SPECIFIKACIJE ZA POKUSE ZBIJANJA TLA

Uvjeti pokusa	Proctorov standard	Modificirani standard prema AASHO*
Masa bata	2,5 kg	4,5 kg
Visina pada bata	30,4 cm	42,5 cm
Broj udaraca po sloju	25	25
Broj slojeva	3	5

*engl. American Association of Highway Officials

Prema rezultatima Proctorovih pokusa i pokusa AASHO (sl. 2a) optimalna je vlažnost istoga materijala pri jačem zbijanju manja a gustoća veća. Međutim, krivulje zbijanja različitih materijala tla (sl. 2b) pokazuju da se s porastom plastičnosti materijala povećava optimalna vlažnost za ugrađivanje, a smanjuje se gustoća. Stupanj je zasićenosti vlagom zbijenog materijala veći ako se on ugradi s vlagom većom od optimalne, jer se time pri opterećenju povećava tlak u porama. Stoga su za ugrađivanje u visoke nasipe najbolji materijali s optimalnom vlažnosti. Ako se ugradi materijal s vlažnosti mnogo manjom od optimalne, može se on pri potapanju nasipa usporenim vodom ili oborinama dodatno slijezati. Podaci o karakteristikama zbijanja materijala služe za utvrđivanje tehničkih uvjeta za ugrađivanje i zbijanje materijala u nasipe. Pri većim se radovima na početku građenja najprije načini probno polje u kojem se provjerava učinak zbijanja, najpovoljniji raspon vlažnosti i debljina slojeva, pa se na osnovi toga propisuje standard za ugrađivanje materijala u nasip.



Sl. 2. Krivulje zbijanja istog materijala prema različitim standardima zbijanja (a) i različitih materijala prema jednom standardu zbijanja (b)

Kvaliteta nasipa kontrolira se vađenjem malih neporemećenih uzoraka pomoću kojih se ispituje postignuta gustoća i vlažnost ugrađenog sloja. Ako rezultati ne odgovaraju propisanom standardu, ugrađeni se sloj mora dodatno obraditi (sušiti, vlažiti ili valjati). Za dimenzioniranje debljine kolnika služi pokus kojim se mjeri tzv. vrijednost CBR (engl. California Bearing Ratio). To je omjer (u postotcima) između naprezanja σ_1 , odnosno σ_2 , pri kojima se opterećeni klip propisane veličine sliježe na površini uzorka za 2,5 mm, odnosno 5 mm, i naprezanja od 210, odnosno 320 kN/m², koja uzrokuju toliko slijezanje na sloju standardno zbijenog drobljenca:

$$CBR 1 = \frac{\sigma_1}{\sigma_{210}} \cdot 100, \quad (1)$$

$$CBR 2 = \frac{\sigma_2}{\sigma_{320}} \cdot 100. \quad (2)$$

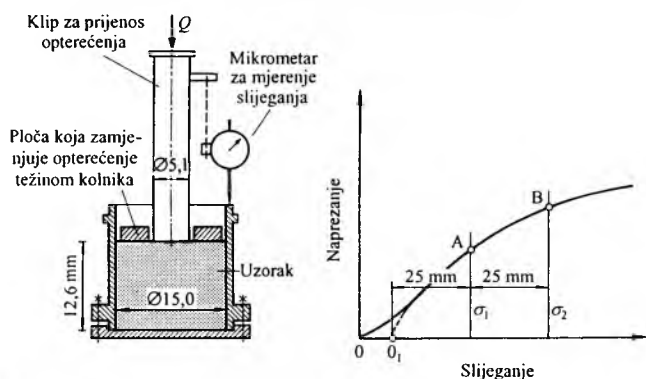
Mjerodavna je veća od tih vrijednosti.

Uzorci za mjerenje vrijednosti CBR pripremaju se zbijanjem triju ili pet slojeva materijala u cilindru kao za Proctorov pokus. Donja se ploča cilindra zamijeni pločom s rupicama, uzorak se uroni u vodu i ostavi da bubri četiri dana uz opterećenje gornje

površine pločom standardne težine. Nakon toga izmjeri se visina bubrenja, a gornja se ploča zamijeni pločom s kružnim otvorom u sredini (sl. 3a). U otvor se stavi klip promjera 51 mm i opterećuje silom Q koja raste tako da je brzina slijezanja klipa ~ 1 mm/min. Svaki se pola minute bilježi sila i slijezanje klipa, a podaci se ucrtavaju u dijagram (sl. 3b). Točke A i B daju naprezanja σ_1 i σ_2 koja služe za izračunavanje vrijednosti CBR prema izrazima (1) i (2). U nekim se metodama dimenzioniranja kolnika upotrebljava modul reakcije tla k_n , koji se utvrđuje opterećenjem površine nasipa okruglom krutom pločom. Mjeri se naprezanje σ (u N/cm^2) pri kojem se ploča promjera 75 cm slegne za 0,12 cm, pa je modul reakcije tla (u N/cm^3):

$$k_n = \frac{\sigma_1}{0,12} \quad (3)$$

Kvaliteta se nasipa kontrolira ispitivanjem uzoraka iz svakoga sloja. Provjerava se vrsta i granulometrijski sastav materijala, te gustoća i vlažnost. O tim svojstvima ovise i ostala svojstva za proračun stabilnosti kosina nasipa i njegove deformacije, tj. svojstva koja su propisana za sve vrste nasutog materijala, te propusnost materijala ugrađenog u hidrotehničke nasipe. Projektom se propisuje broj uzoraka koji se uzima iz svakog sloja te ispitivanja u laboratoriju. Rezultati se obrađuju statistički, posebno za svaki materijal, mjesečno i kumulativno od početka gradnje.

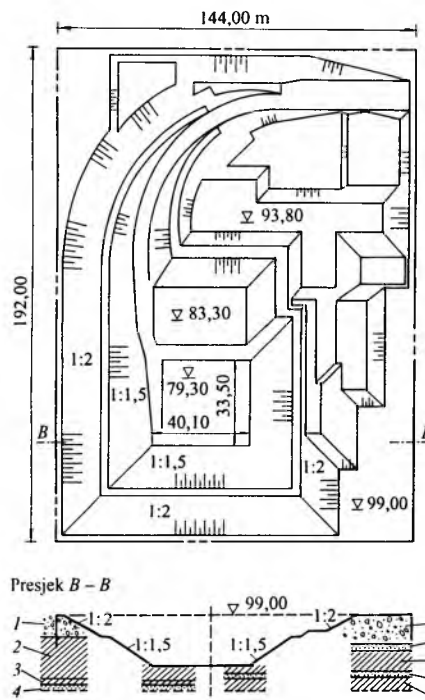


Sl. 3. Presjek uređaja (a) i dijagram otpora prodiranju pri mjerenju vrijednosti CBR (b)

Duboke građevne jame. Duboki se iskopi mogu osigurati od urušavanja kosinama uz cijeli opseg jame u nagibu koji ima potrebnu sigurnost od sloma klizenjem te pomoću uspravnih potpornih stijena koje su međusobno razuprte unutar jame ili su pomoću zatega usidrene u okolno tlo. Koji će od tih načina biti povoljniji, ovisi o vrsti materijala u kojem se kopa, o hidrogeološkim prilikama i raspoloživom prostoru oko građevne jame.

Mehanizaciju za iskopavanje čine bageri za kopanje i utovar, dizalice za dizanje iskopana materijala iz jame s uspravnim stijenama na površinu, vozila za otpremu i istovar na odabrano odlagalište i buldozeri za planiranje i zbijanje na odlagalištu. Ako jama doseže do podzemne vode, potrebno je vodu ukloniti. To se može postići crpkama koje crpe vodu iz sabirnih bunara na dnu iskopane jame ili filtarskim bunarima u tlu oko građevne jame. Oni snižuju razinu podzemne vode u okolnom tlu i sprečavaju njezino dotjecanje u jamu.

Primjer je velike građevne jame iskop za temeljenje nuklearne elektrane u Krškom. Na slobodnom ravnom terenu uz obalu Save bilo je moguće iskopati duboku jamu s prirodnim kosinama (sl. 4). Opsežnim ispitivanjima terena bušenjem i laboratorijskim ispitivanjem uzoraka pokazalo se da se teren sastoji od dva izražena sloja: dobro graduirane šljunkovito-pjeskovite riječne naplavine duboke 8...11 m, te ispod nje jako zbijene uslojene naslage praha s promjenljivim udjelom sitnog pijeska i gline i s mjestimičnim tankim prosljocima prašnasta pijeska. Slojevi te naslage nagnuti su $\sim 24^\circ$ prema jugu (sl. 5), što je posljedica geološki mlade tektonike, a materijal je jako prekonsolidiran i krt. Geotehnički su proračuni pokazali da je siguran nagib kosina iskopane jame 1:2 u sloju šljunka i 1:1,5 u prašnastom sloju. Budući da



Sl. 4. Tlocrt i presjek građevne jame za temeljenje nuklearne elektrane u Krškom. 1 šljunak, 2 prašnasto tlo, 3 glina, 4 pijesak

razina podzemne vode u sloju šljunka prati razinu Save koja je oko 50 m udaljena od ruba jame i doseže do 3,5 m ispod površine terena, odlučeno je da se uz vanjski obris jame sagradi pregrada od glinovita betona debljine oko 0,8 m, ukopana 2...4 m u naslagu zbijena praha. Tako je spriječeno prodiranje veće količine vode u građevnu jamu kroz propusni sloj šljunka, pa je za održavanje suhog dna jame postavljena crpka kojom se na površinu izbacuje procjedna i oborinska voda. Bio je predviđen i jedan red filtarskih bunara uz rub dna jame radi osiguranja od hidrauličnog sloma dna, ali se naknadnim ispitivanjima pokazalo da to nije potrebno. Iskop građevne jame dubine 20 m i ukupnog obujma oko 170 000 m^3 za temelje elektrane ostvaren je na opisani način bez ikakvih teškoća.



Sl. 5. Pogled na jugoistočni ugao građevne jame nuklearne elektrane u Krškom

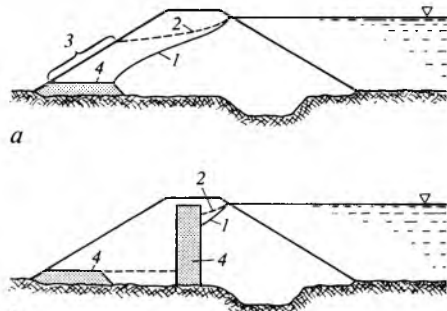
Nasipi za zaštitu od poplave. Nasipi se grade da bi spriječili razlijevanje vode kad vodostaj rijeke naraste iznad razine okolnog terena. To su uglavnom niski i dugi objekti građeni od najbližega materijala tla. Tradicija i iskustvo gradnje nasipa često su temelj i današnjoj gradnji. Stari su nasipi ponekad bili predimenzionirani, katkad su i zatajili, ali su se uzastopnim popravljivanjem postupno postizale zadovoljavajuće dimenzije i sigurnost. Danas, kad su poznate metode mehanike tla i karakteristike materijala tla,

jednostavne metode projektiranja i tehnologija građenja, nasipi za zaštitu od poplave trebali bi biti pouzdani.

Osnova za projektiranje sigurnih nasipa za obranu od poplave jest ispitivanje svojstava materijala u temelju, te materijala za građenje uzduž trase nasipa i utvrđivanje vjerojatnoga najvišeg vodostaja rijeke. Elementi za dimenzioniranje poprečnog presjeka nasipa jesu: širina je krune nasipa 3,0 m, ili više ako nasipom teče promet, visina je krune nasipa barem 0,5 m iznad utvrdenoga najvišeg vodostaja rijeke, ili više ako su hidrološki podaci nepouzdana ili se ne mjere dovoljno dugo, nagib je uzvodne i nizvodne kosine odabran na osnovi računa stabilnosti s faktorom sigurnosti protiv klizenja $F_s = 1,50$ za potpuno zasićen materijal uzvodne i nizvodne kosine.

Materijal za gradnju nasipa uzima se iz najbliže okolice i raspoređuje tako da se manje propustan materijal ugradi u uzvodnom, a propusniji u nizvodnom dijelu poprečnog presjeka nasipa. Najbolji je koherentni materijal male propusnosti. Ako u blizini nema dovoljno koherentnog materijala, može se u nasipe visine do 4,0 m ugraditi i šljunkovito-pjeskoviti materijal propusnosti $k < 10^{-2}$ cm/s, pri čemu bi protok u štice područje bio reda veličine $\sim 10\,000\text{ m}^3$ na dan za svaki kilometar duljine nasipa. Taj se protok može znatno smanjiti ugradnjom glinovite obloge debljine 1...2 m na uzvodnoj kosini nasipa. Veliku pozornost treba obratiti na sastav tla na kojem leži nasip. Ako u tlu ima propusnih proslojaka koji su u vezi s obalom rijeke, ta se mjesta također pokrivaju nasutim, malo propusnim materijalom kako bi se spriječio prodor vode u štice područje, erozija i urušavanje nasipa.

Opasnost od rušenja obrambenih nasipa postoji ili kad je vodostaj u rijeci viši od krune nasipa, pa nastaje erozija materijala koja vrlo brzo može odnijeti velike dijelove nasipa, ili kad erozija materijala nastupa zbog odnošenja sitnih čestica kroz nasip i nizvodnu kosinu, pa se povećava propusnost i proces se ubrzava do potpunog proloma nasipa. Preplavlivanje sprečava kruna nasipa koja je dovoljno viša od razine poplavne vode. Gdje je kruna nedovoljno visoka, preplavlivanje se sprečava stavljanjem vreća s pijeskom uz uzvodni rub krune nasipa. Erozija materijala procjeđivanjem vode kroz tijelo nasipa može se spriječiti ugrađivanjem *drena* od prikladno građurana filtarskog materijala (sl. 6). Pri tome treba uzeti u obzir da materijal koji je ugrađen u nasip nije izotropno propustan, te da propusnost u vodoravnom smjeru može biti i do deset puta veća nego u okomitom. Zato procjedna linija pri dugotrajno visokoj razini rijeke može izaći na nizvodnoj kosini iako je ugrađen plošni dren u nizvodnoj stopi nasipa (sl. 6a), što može uzrokovati eroziju i oštećenje nizvodne kosine. Uspravan dren sprečava visok položaj procjedne linije na nizvodnoj kosini (sl. 6b). Nasipe od koherentnog materijala potrebno je zaštititi od prosušivanja površine da ne bi nastale pukotine od stezanja. Takva površina postaje vodopropusna, što pospješuje eroziju krune i kosina u kišovitom razdoblju. Najbolja je zaštitna kosina nasipa od prosušivanja sadnja trave suvremenim mehaniziranim postupcima (hidrosjetva).

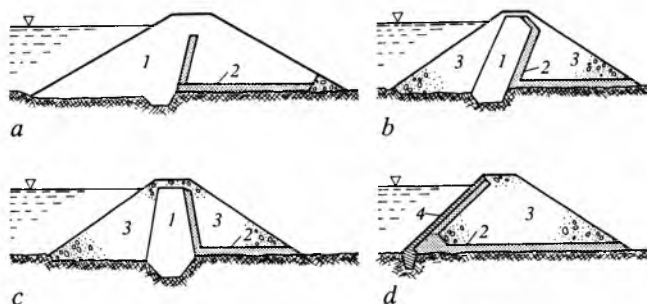


Sl. 6. Nasip s nizvodnim plošnim drenom (a) i s uspravnim drenom u sredini presjeka te s plošnim drenom (b). 1 procjedna linija u izotropno propusnom nasipu, 2 procjedna linija u anizotropno propusnom nasipu, 3 vretna ploha, 4 dren od filtarskog materijala

Visoke nasute brane pregrađuju rijeke ili riječne doline i uzvodno stvaraju umjetno jezero koje služi za reguliranje protoka rijeka i osiguranje zalihе vode za proizvodnju električne energije, natapanje i opskrbu vodom. Brane se grade od različitih materi-

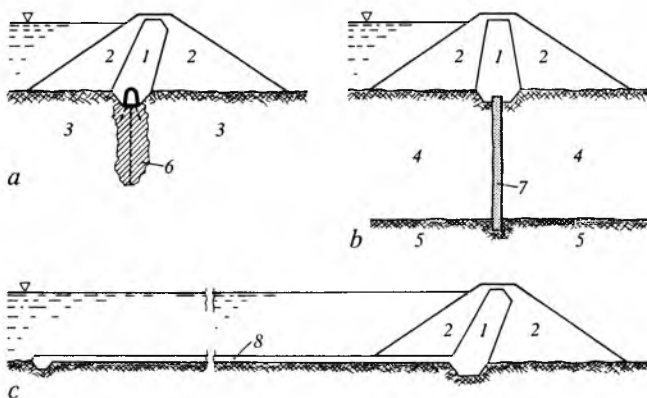
jala tla. Prema međunarodnom dogovoru u toj su kategoriji nasipi viši od 15 m ili niži ako su dulji od 500 m u kruni, ako jezero ima obujam veći od $100\,000\text{ m}^3$ ili se preko preljeva ispušta protok veći od $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$. Visokim se smatraju i brane više od 10 m kojima su uvjeti temeljenja iznimno složeni.

Za nasipanje brane upotrebljavaju se svi materijali tla i lomljeni kamen u blizini mjesta građenja. Tijelo brane može biti homogeno, od glinovita ili prašinsto-glinovita materijala, a može biti i složeno, i to od takva materijala u jezgri ili na uzvodnoj kosini nasipa, a od šljunkovita materijala ili nasuta kamena u nizvodnoj i uzvodnoj potpornoj zoni presjeka.



Sl. 7. Osnovni tipovi nasutih brana. a homogeni nasip od slabo propusna materijala, b propustan nasip s kosom jezgrom u uzvodnom dijelu, c propustan nasip s jezgrom u sredini, d propustan nasip s nepropusnim ekranom na uzvodnoj kosini. 1 slabo propustan materijal, 2 dren od filtarskog materijala, 3 propustan materijal, 4 nepropustan ekran

Prema vrstama materijala i njihovom rasporedu u poprečnom presjeku nasute se brane mogu svrstati u brane homogenog presjeka od slabo propusna materijala, brane složenog presjeka sa zonom od slabo propusna materijala unutar uzvodnog dijela pa do sredine nasipa od propusna materijala, te brane od propusna materijala s uzvodnom nepropusnom membranom od armiranog betona ili od asfalta (sl. 7). Rasporedom materijala kao na slici 7 osigurava se da procjeđivanje vode kroz nasip bude podnošljivo i pri najvišem vodostaju jezera. Procjeđivanje vode kroz materijal u temeljnom tlu ispod brane rješava se već prema vrsti tla. Ako se brana gradi na stjenovitom tlu, ispod nepropusne zone nasipa injektira se zavjesa kojom se smanjuje propusnost terena. Kroz bušotine se ubrizgava suspenzija cementa i dodataka u vodi koja pod tlakom ispunjava pukotine i sprečava procjeđivanje vode kroz tu zonu (v. *Injektiranje*, TE 6, str. 483). Ako je temelj od nevezana propusna tla, upotrebljava se dijafragma od glinovita betona ili zastor od nabijene gline na dnu i na bokovima doline uzvodno od jezgre brane (sl. 8).



Sl. 8. Smanjenje protjecanja vode kroz temelj ispod nasute brane injektiranjem zavjese u stjenovitoj podlozi (a), dijafragmom od glinovita betona u sloju propusna šljunka (b) i uzvodnim zastorom od zbijene gline (c). 1 slabo propusna jezgra, 2 propusne potporne zone nasipa, 3 raspucana propusna stijena, 4 propustan pjeskovit šljunak, 5 slabo propustan materijal, 6 injekcijska zavjesa, 7 dijafragma, 8 zastor

Nagib uzvodne i nizvodne kosine brane kojim se postiže dovoljna sigurnost od klizenja ovisi o rasporedu materijala u poprečnom presjeku brane, o njegovoj čvrstoći na smicanje, te o svojstvima materijala na kojem brana leži.

Dimenzije poprečnog presjeka brane moraju biti takve da se zadovolji sigurnost brane pri najnepovoljnijim opterećenjima.

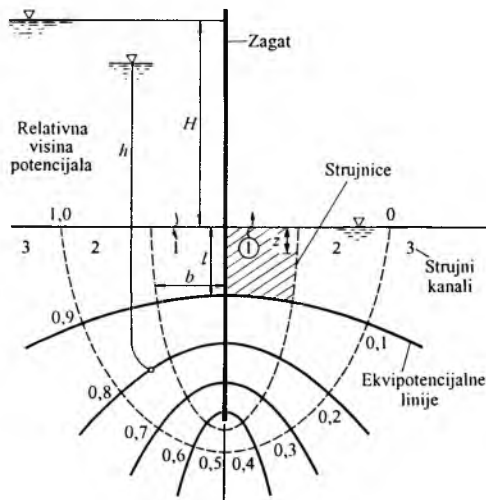
Redovita su opterećenja gravitacija, hidrostatičke i hidrodinamičke sile od vode pri najvišoj razini usporene vode u jezeru, a izvanredna opterećenja nastaju prilikom potresa. Kruna brane mora biti viša od najviše moguće razine vode usporene u jezeru da bi se spriječilo prelijevanje vode preko brane i oštećenje krune zbog djelovanja najviših mogućih valova pri jakom vjetru.

Širina krune brane mora biti najmanje tolika da se po njoj mogu bez smetnje kretati vozila za dopremu i zbijanje materijala. Ona može biti i uvjetovana potrebom za nesmetanim kretanjem vozila ako preko brane prolazi javna cesta, ili vozila za pogon i redovito održavanje hidrotehničke opreme koja je dostupna s krune brane. Širina je krune to veća što je brana viša. Time se povećava sigurnost od prodora usporene vode ako pri jakom potresu nastanu oštećenja koja su najveća upravo na kruni. Širina krune brane visoke do 20 m ne bi trebala iznositi manje od 3,0 m, a najveća širina visokih nasutih brana približno iznosi

$$B_b = 1,65 \sqrt{H_b}, \quad (4)$$

gdje je H_b visina brane.

Procjeđivanje usporene vode kroz tijelo nasute brane i temeljno tlo neizbježno je i ono može uzrokovati eroziju materijala i odlazak sitnih čestica tla kroz veće pore, što vodi urušavanju dijelova brane i njezinu potpunom rušenju. Projektom brane moraju se predvidjeti mjere za sprečavanje erozije da bi se osigurala sigurnost i trajnost brane. Rješenje se tog problema osniva na D'Arcyjevom zakonu strujanja vode kroz poroznu sredinu i na Laplaceovoj diferencijalnoj jednadžbi hidrodinamičkog potencijala strujanja vode kroz porozno sredstvo. Tako se dobiva hidrodinamički potencijal, gradijent hidrodinamičkog tlaka i brzina vode u svakoj točki, pa se može ustanoviti gdje brzina vode i gradijent tlaka premašuju kritičnu veličinu, tj. koja je područja potrebno zaštititi od erozije.



Sl. 9. Strujna mreža oko zagata u propusnom tlu i uzlazna struja vode na elementu uz površinu terena nizvodno od zagata

Za procjeđivanje usporene vode kroz temeljno tlo, u kojem se nalazi nepropustan zagat, važno je polje hidrodinamičkog potencijala, koje se grafički prikazuje strujnom mrežom (sl. 9). Ono se sastoji od strujnica i ekvipotencijalnih linija koje ih sijeku ortogonalno i dijele površinu u četverokutna polja stalnog odnosa stranica u cijelom polju. Hidrodinamički potencijal na nekom mjestu u polju iznosi

$$h = H - \frac{Hj}{n_p}, \quad (5)$$

gdje je H razlika potencijala između uzvodne i nizvodne granice polja, n_p broj jednakih inkremenata na koje je H razdijeljen, a $j=0, 1, 2, \dots, n_p$ redni broj ekvipotencijalne linije na koju se h odnosi. Na slici 9 uz ekvipotencijale su navedene normalizirane vrijednosti potencijala, $h/H = 1 - j/n_p$.

Gradijent tlaka na površini terena nizvodno od zagata mjeravan je za procjenu opasnosti od regresivne erozije i hidrauli-

čnog sloma. Ako se u obzir uzme djelovanje sile na element tla (1) na slici 9 u kojem voda teče uspravno prema gore, dobiva se efektivno naprezanje u dubini z :

$$\sigma' = \sigma - u = (\gamma - \gamma_v)z - h_z \gamma_v, \quad (6)$$

gdje je σ ukupno naprezanje, γ gustoća tla, a γ_v gustoća vode. Element tla postat će nestabilan kad je efektivno naprezanje $\sigma' \leq 0$, pa je kritična visina potencijala h_c u dubini z

$$h_c = (\gamma - \gamma_v) \frac{z}{\gamma_v}, \quad (7)$$

a kritični je gradijent tlaka

$$i_c = \frac{h_c}{z} = \frac{\gamma - \gamma_v}{\gamma_v}. \quad (8)$$

Prosječna je gustoća tla $\gamma = 2 \text{ t/m}^3$, a gustoća vode $\gamma_v = 1 \text{ t/m}^3$, pa kritični gradijent koji uzrokuje hidraulični slom uz neopterećenu vodoravnu površinu nekoherentnog tla približno iznosi

$$i_c = 1. \quad (9)$$

Dopušteni hidraulični gradijent za te uvjete smije biti samo dio kritičnoga gradijenta, pa se zbog nehomogenosti tla u praksi usvaja da iznosi

$$i = \frac{i_c}{6}, \quad (10)$$

a može se usvojiti i veća vrijednost ako su podaci o svojstvima tla pouzdaniji. Protok je vode u kanalu između dviju susjednih strujnica konstantan i iznosi

$$q = i k b, \quad (11)$$

gdje je k D'Arcyjev koeficijent propusnosti, a b širina kanala. Uz visinu l četverokutnog polja, dopušteni je hidraulički gradijent

$$i = \frac{H}{n_p l}, \quad (12)$$

pa je

$$q = \frac{H k b}{n_p l}. \quad (13)$$

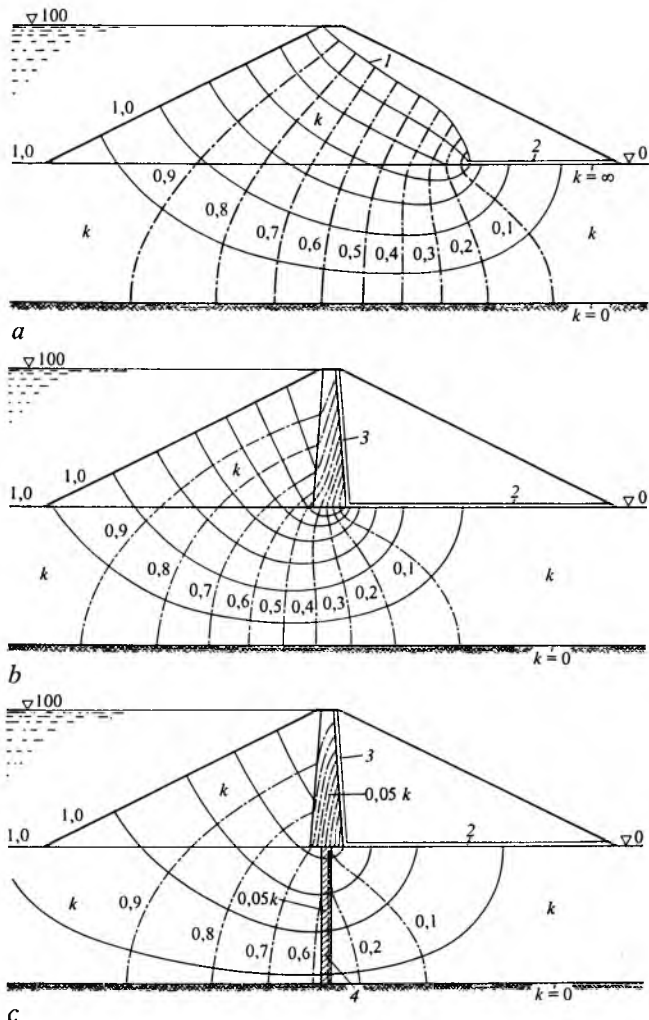
Kako u mreži ima n_f kanala, ukupni protok kroz polje po jedinici debljine iznosi

$$Q = \frac{H k n_f b}{n_p l}. \quad (14)$$

Polja potencijala za dva tipična primjera nasutih brana prikazana su na slici 10. U prvom je primjeru homogeno propusna brana na isto takvom temelju jednake propusnosti (sl. 10 a). Ispod nizvodne kosine brane nalazi se plošni dren kako bi se spriječilo da procjedna linija izađe na nizvodnoj kosini gdje bi mogla početi erozija. Najveći se gradijent tlaka pojavljuje na početku plošnog drene, a na nizvodnom kraju sloja i na dnu nizvodne kosine gradijent mora biti manji od kritičnoga, što je moguće regulirati duljinom plošnog drene. Da bi se spriječila erozija na početku plošnog drene, gdje je gradijent tlaka najveći, granulometrijski sastav sloja mora odgovarati uvjetima za filtarske slojeve.

Drugi je primjer brana zonirana presjeka s uspravnom jezgrom u sredini na propusnom sloju ispod kojega je malo propustan sloj kao u prvom primjeru (sl. 10 b). Jezgra je brane malo ukopana u podlogu i u njoj nema zahvata za smanjenje propusnosti temeljnog tla. Druga je mogućnost da je ispod jezgre dijafragma od glinovita betona jednake propusnosti kao i jezgra (sl. 10 c).

Primjenom izraza (14), a uz $n_p = 10$ i $b/l = 1$, za homogenu branu na homogenom temelju jednake propusnosti dobiva se $n_f = 6,85$, pa je normalizirani protok po jedinici duljine brane $Q/(kH) = 0,685$ (sl. 10 a). Jednako je tako za branu s uskom uspravnom jezgrom $n_f = 7,6$, pa je $Q/(kH) = 0,76$ (sl. 10 b), a za branu s uskom uspravnom jezgrom i dijafragmom $n_f = 5,2$, pa je $Q/(kH) = 0,52$ (sl. 10 c).



Sl. 10. Primjeri strujne mreže u nasutoj brani i temeljnom sloju. a homogeno propusna brana na propusnom temelju, b brana s uspravnim jezgrom na propusnom tlu, c brana s uspravnim jezgrom na propusnom tlu i s dijafragmom kroz temeljno tlo do slabo propusnog sloja. 1 - prosječna linija, 2 - plošni dren, 3 - filterni sloj na nizvodnoj strani jezgre, 4 - slabo propusna dijafragma, k - koeficijent propusnosti

Na granici sitnozrnatog materijala jezgre (materijal baze), iz kojega voda istječe u materijal krupnijeg zrna, treba spriječiti eroziju i odnošenje sitnih čestica kroz pore krupnijega materijala. Zbog toga se između dvaju materijala ugrađuje nekoliko slojeva filternskog materijala posebnoga granulometrijskog sastava.

Suvremena su ispitivanja dala kriterije za izbor granulometrijskog sastava materijala filtra (F) s obzirom na materijal baze (B) (tabl. 2). U skupinu 1 pripadaju prašnasta i glinovita tla, u skupinu 2 prašnast i glinovit pijesak, u skupinu 3 prašnast i šljunkovit pijesak s manje od 15% zrna promjera 0,075 mm, a u skupinu 4 materijal između skupina 2 i 3. Pri svrstavanju uzoraka tla treba zanemariti frakciju šljunka promjera >2 mm, pa ako uzorak npr. sadrži 20% šljunka, izračunava se granulometrijska krivulja za preostalih 80% finijih čestica.

Tablica 2

KRITERIJI ZA GRANULOMETRIJSKI SASTAV FILTERSKIH SLOJEVA

Skupina materijala	Udio zrna s promjerom 0,075 mm %	Granične vrijednosti odnosa*
1	80...100	$7 < D_{F15}/D_{B85} < 12$
2	40...85	$0,7 \text{ mm} < D_{F15} < 1,5 \text{ mm}$
3	0...15	$7 < D_{F15}/D_{B85} < 10^{**}$
4	15...40	između D_{F15}/D_{B85} iz skupina 2 i 3, već prema udjelu zrna s promjerom 0,075 mm

* D_{F15} promjer zrna (mm) kojih je maseni udio u filtru 15%,

D_{B85} promjer zrna (mm) kojih je maseni udio u bazi 85%

**donja granica za filter od uglastih i gornja za filter od zaobljenih zrna

Propusnost jednolično građiranog materijala može se dosta pouzdano ocijeniti iz izraza

$$k = 0,35(D_{15})^2, \quad (15)$$

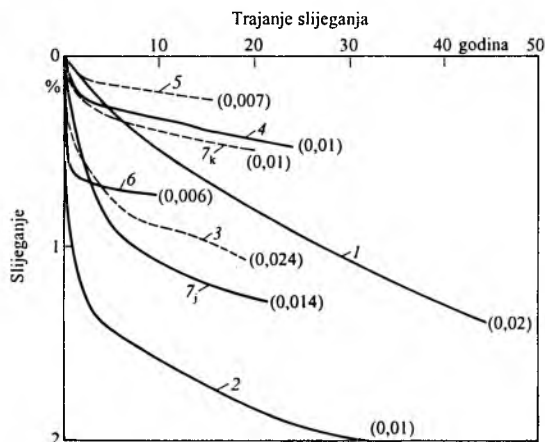
a široko građiranog materijala iz izraza

$$k = 0,18(D_{15})^2, \quad (16)$$

gdje je k D'Arcyjev koeficijent propusnosti (cm/s), a D_{15} promjer zrna (mm) kojih je maseni udio u filtru 15%.

Na prijelazu između sitnozrnatog materijala jezgre i krupnozrnatog materijala potporne zone, posebno ako je zona od lomljena kamena, potrebno je staviti više filternskih slojeva krupnijeg zrna. Granulometrijski se sastav tih slojeva određuje pomoću kriterija iz tablice 2, uzevši kao bazu prethodni sloj filtra. Debljina filternskih slojeva treba biti tolika da pri ugradnji ne može nastati slučajni prekid sloja. Dovoljna je debljina od ~3 m, a ako je materijal filtra skup, debljina se sloja može smanjiti do ~1,5 m, uz posebno pažljivo ugrađivanje. Što je filterni sloj tanji, to točnije treba kontrolirati njegov granulometrijski sastav i širinu sloja. Debljina vodoravnih plošnih drenova ne smije biti manja od 0,5 m.

Svi se materijali ugrađuju u branu u vodoravnim slojevima, kojima debljina ovisi o promjeru najkrupnijeg zrna i o načinu zbijanja. Debljina je slojeva od koherentnih materijala 20...40 cm, od nekoherentnih materijala 40...100 cm, a od lomljena kamena 1,0...2,5 m, što ovisi o strojevima kojima se materijal zbija. Materijal se iskopa u nalazištu, suši ili navlaži do propisane vlažnosti, utovari u vozila, te se na brani istovari na mjestu ugradnje. Sloj se materijala jednolično izravna u potrebnoj debljini i valja određenim brojem prijelaza valjaka. Prije nasipanja novog sloja kontrolira se zbijenost i vlažnost.



Sl. 11. Specifično slijeganje nekih nasutih brana navedenih u tablici 3; u zagradama brzina slijeganja na kraju mjerenja u postocima visine brane. Slovo k označuje kameni nasip, a slovo j jezgru brane.

Svi se viši nasipi dugotrajno sliježu, pa i oni najbolje zbijeni, od šljunka i nasuta lomljena kamena. Neki su primjeri slijeganja nasipa prikazani na slici 11 za brane navedene u tablici 3. Podaci pokazuju da se i nasute brane od lomljena kamena sliježu i više od 40 godina nakon dovršetka gradnje. Brzina je slijeganja 0,01...0,02% godišnje. Zbog toga se kruna brane nasipava za

Tablica 3

PODACI O NASUTIM BRANAMA SA SLIKE 11

Broj na slici 11	Naziv brane	Godina građenja	Visina m	Tip*	Obujam m ³
1	Bowman, SAD	1876.	29	KE	-
2	Swift, SAD	1914.	38	KE	-
3	Strawberry, SAD	1916.	43	K	250 000
4	Dix River, SAD	1925.	82	KB	1 325 000
5	Salt Springs, SAD	1931.	100	KB	2 430 000
6	Bonito, SAD	1943.	28	K	42 000
7	Peruća, Hrvatska	1957.	60	KG	900 000

*K kameni nasip, E ekran, B betonski ekran, G glinena jezgra

1...2% više od projektom određene visine, već prema stišljivosti materijala koji se u nju ugrađuju. Branama od glinovita materijala treba uračunati i konsolidacijsko slijeganje nakon dovršetka gradnje. Gornji dio jezgre ili tijela homogene brane iznad razine redovitoga visokog vodostaja u jezeru treba posebno zaštititi od sušenja u ljetnim mjesecima. Ugradnjom prikladna glinovito-šljunkovita materijala oko jezgre i uz uzvodnu i nizvodnu kosinu homogenih brana smanjuje se isparivanje i sušenje materijala i tako sprečava pojava pukotina od stezanja pri sušenju. Površinu krune brane dobro je zaštititi asfaltnim slojem bez obzira na promet vozila po kruni brane, jer to smanjuje isparivanje vode iz jezgre.

Uzvodnu je kosinu brane potrebno zaštititi od erozije uzrokovane valovima koji pri jačem vjetru mogu dosegnuti veliku visinu i erozijsku snagu. Pri nižem su vodostaju valovi niži pa i zaštitne mjere mogu biti manje stroge u nižim zonama uzvodne kosine. Za zaštitu kosine najčešće služi sloj lomljena kamena kojemu krupnoća i granulacija ovise o visini valova. Ako u blizini gradilišta nema prikladna kamena, može se upotrijebiti zatvorena obloga od asfaltnih ili betonskih ploča, od montažnih elemenata ili sloj stabilizirane zemlje. Hrapava obloga od lomljena kamena raspršuje energiju valova pa je visina zaleta iznad razine usporene vode manja nego u glatke kamene obloge. Nizvodna se kosina brane također treba zaštititi od erozije ako je od manje propusna materijala (šljunak ili sitniji materijal). Za to najbolje služi travnati sloj koji se sije strojnim prskanjem smjese sjemena, gnojiva i sredstava za zaštitu kosine od erozije, dok trava ne postane dovoljno otporna.

Nasipi i usjeci za prometnice. Nasipi za prometnice projektiraju se i grade po istim načelima kao i hidrotehnički nasipi. Metar duljine nasipa ne smije koštati više od iste duljine mosta, što pri visini od 10 m ovisi o lokalnim uvjetima. Izbor materijala i njegov raspored u poprečnom presjeku nasipa ne ovise o propusnosti nasipa, osim za one nasipe koji prolaze poplavnim područjima. Nagib kosina nasipa ovisi o vrsti i svojstvima materijala, a utvrđuje se računom stabilnosti.

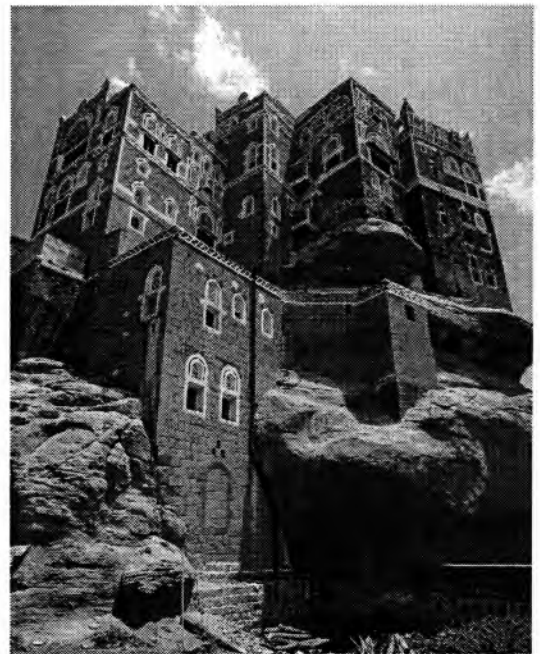
Materijal za nasipanje uglavnom se uzima iz iskopa za usjeka na trasi, a ako je materijala premalo, otvaraju se nalazišta, a na prvom redu stjenovita materijala, jer je tada slijeganje nasipa manje, kosine mogu biti strmije i obujam manji. Materijal se ugrađuje u slojevima uz nabijanje i kontrolu vlažnosti da bi se postigla što veća gustoća i što manje ukupno slijeganje nasipa. Kvaliteta se zbijanja kontrolira, kao i u hidrotehničkih nasipa, na razini planuma opterećenom pločom. Materijal se u dubokim usjecima kopa samohodnim strojevima za razrahljivanje i utovar, prevozi se kiperima i istovaruje na mjesto ugrađivanja. Usjeci u stjenovitu materijalu razrahljuju se miniranjem, a potom se obrađuju kao i sipki materijali. Nagib kosina gotovog usjeka ovisi o vrsti i čvrstoći na smicanje nasuta materijala. Kosine je usjeka potrebno zaštititi od oborinskih voda zasijavanjem trave u sipkom tlu. Sa strmih kosina usjeka u stijeni mogu ispadati rahliji komadi nakon jakih oborina i posebno nakon odmrzavanja, što može ugroziti sigurnost prometa, pa je takve dijelove potrebno zaštititi čeličnim mrežama obješenim na vrhu kosine usjeka.

Utjecaj mehanizacije na zemljane radove. Usavršavanje mehanizacije za zemljane radove posljednjih tridesetak godina omogućilo je da se zemljani radovi obavljaju u mnogo većem opsegu i dalo je nov poticaj izvođenju velikih zemljanih radova. To je pojeftinilo radove i ubrzalo građenje, pa su zemljane građevine postale konkurentne masivnim građevinama i onda kad su masivne imale primat. U zadnjem je desetljeću sagrađeno više velikih nasutih brana. Na Eufratu u Turskoj podignuta je nasuta brana Atatürk od zemljanog i kamenog nasipa, peta po veličini u svijetu, visoka 169 m, duga 1,6 km, obujma 83,4 milijuna m³ nasuta materijala. Materijal za nasipanje brane razvezio se po gradilištu s 200 specijalnih kiperica kapaciteta po 80 t. Na granici Argentine i Paragvaja, na rijeci Parana, podignuta je do 40 m visoka nasuta brana Yacyreta, obujma oko 80 milijuna m³ i duljine oko 70 km. Za nasipavanje je služilo oko 200 kiperica nosivosti 20...40 t. Za gradnju nove pruge za velike brzine od Pariza do Lillea utrošeno je oko 90 milijuna m³ materijala tla, radovi su trajali 30 mjeseci, a za kopanje, prevoženje, nasipavanje i zbijanje služilo je 2000 strojeva. Povećanje opsega i važnosti zemljanih radova potaknulo je industriju da ponudi usavršene tipove građevinskih strojeva za kopanje (bageri i buldozeri), za kopanje i prevoženje (buldozeri i skreperi), za utovarivanje (bageri i utova-

rivači), za prevoženje (kiperi), te za zbijanje nasutog materijala (glatki valjci, ježevi, statički i vibracijski gumeni valjci itd.).

Umjesto mehaničkog prijenosa snage od pogona do radnog stroja, prešlo se u potpunosti na hidraulični prijenos snage. To je pojednostavnilo upravljanje, ubrzalo rad i povećalo sigurnost u radu. Veliki je napredak postignut primjenom elektroničkog upravljanja kojim se kontrolira, regulira i koordinira rad stroja. Time se optimira rad pogonskog agregata koji je ujedno zaštićen od preopterećenja, a upravljanje strojem postalo je jednostavno i sigurno. Zamjenom gusjeničara pneumaticima s niskim tlakom postala je sigurnija vožnja po mekom terenu izvan cesta.

Zemljane nastambe. U riječnim dolinama s razmjerno blagom i suhom klimom, gdje su se razvile prve velike civilizacije, jedini je građevinski materijal bila zemlja i nešto drva. U tim su se uvjetima nastambe gradile od zemlje. Zemlja se vlažila, davala joj se sjeckana slama, pljeva i voda. Smjesa se nabijala u kalupe za opeku, sušila se na suncu i upotrebljavala za zidanje. Drugi je način građenja bio oblaganje skeleta pleterom, te zemljanom masom s obje strane. Zidovi su se na otvorima pojačavali drvenim gredama ili oblicama. Krov je bio blago nagnut na jednu stranu, također od oblica i granja na koje je nasut sloj pripremljene smjese, zbijan i valjan po površini da bi nakon sušenja površina ostala zatvorena i nepropusna za kišu. Na svakom je krovu ostajao kameni valjak radi stalnog održavanja u vrijeme i nakon oborina. I danas se u tim krajevima na taj način gradi većina seoskih kuća pa se može ustvrditi da znatan dio stanovništva još uvijek živi u zemljanim nastambama. U Jemenu se već 2500 godina grade velike kuće i skupine kuća od zemljane opeke sušene na suncu (sl. 12). U suvremenoj je Njemačkoj raširen pokret građenja ekoloških obiteljskih kuća, među kojima ima i onih sa zidovima od gline. To su prizemnice ili jednokatnice od drvenog kostura unutar kojega se u drvenoj oplati grade 30...40 cm debele stijene od nabijene gline. Glina se vlaži, te joj se dodaje sjeckana slama i nešto bentonita i minerala za poboljšanje toplinskih svojstava zidova. Nakon 15 dana skida se unutrašnja oplata i zidovi se žbukaju. Na vanjsku se oplatu pričvrsti bitumenska ljepenka kao izolacija od vode, a zatim vodoravne letve i vanjska uspravna daščana obloga od ariša ili borovine. Velika je prednost takve gradnje što zidovi izvrsno toplinski izoliraju a pritom dišu, provjetravaju i osiguravaju zdravu i ugodnu klimu u prostorijama. Glina regulira vlažnost zraka, smanjuje prašinu u zraku, te nema elektrostatičnog naboja na vanjskim zidovima.



Sl. 12. Zemljane građevine u Jemenu

Lit.: K. Terzaghi, *Erdbaumechanik*. F. Deuticke, Wien 1926. – K. Terzaghi, *Theoretical Soil Mechanics*. J. Wiley and Sons, New York 1943. – E. Nonveiller, *Mehanika tla i temeljenje građevina III*. Školska knjiga, Zagreb 1990.

E. Nonveiller