

# **NASUTE BRANE**

1. UVOD
2. OSNOVNI ELEMENTI GRAĐEVINE
3. RAZLICITI KONCEPTI - PRIKAZ
4. TEMELJ BRANE (POTREBNA SVOJSTVA I ISPITIVANJA)
5. ZONE BRANE
6. OSNOVNI ZAHTJEVI NA JEZGRU
7. FILTERI
8. POZAJMIŠTA MATERIJALA
9. IZVEDBA SLOJEVA OD TLA
10. OSNOVE PRORACUNA
11. MJERENJA I OPAŽANJA

## 1.UVOD

Brane su privremeni ili trajni objekti (gradevine) kojima se pregrađuje riječno korito u cilju ostvarenja akumulacije za energetske potrebe, navodnjavanje ili reguliranje protoka. Nasute brane izvode se od tla, kao homogeni ili zonirani objekti prilagođeni lokalnim uvjetima: geološkim, topografskim, hidrološkim, geotehničkim, seizmickim, meteorološkim, raspoloživim materijalima. Svaka je takva gradevina i po obliku i po gradi uvjetovanja lokalnim uvjetima, gore navedenim.

Uz mostove to su jedina dva značajna i tehnički visoko zahtjevna objekta koje u svim dijelovima kontroliraju građevinski inženjeri. Oni se u projektiranju i izvedbi takvih objekata dokazuju i kao projektanti, i kao graditelji i kao arhitekti - u oblikovanju gradevine prilagođene tehničkim zahtjevima a uklopljene u krajobraz.

Tijelo brane treba osigurati:

- prihvatljive deformacije koje neće ugroziti funkcionalnost i sigurnost objekta
- sigurnost protiv sloma u temelju ili u dijelovima brane
- sigurnost protiv erozijskog djelovanja procjednih voda i vode iz jezera
- visinu krune brane koja sprječava preplavljivanje

Projektom brane obuhvaćaju se i obrađuju: geološki uvjeti na mjestu pregrađivanja i oko njega, istražni radovi na terenu i u laboratoriju, proračuni i dokazi stabilnosti od statičkih i dinamičkih djelovanja za sva mjerodavna opterećenja, za djelovanja procjedne vode; detaljne tehničke prikaze, tehničke specifikacije u uvjete izvedbe.

Projektu brane prethode opsežni istražni radovi. Svejedno, nova saznanja u tijeku izvedbe i promjene u svojstvima materijala utjecu na prilagođavanje projekta promijenjenim uvjetima, pa je uobičajeno da se osnovno projektno rješenje mijenja tijekom izvedbe.

Uvijek se provodi opažanje pomaka, sila i prornih tlakova u tijelu brane, kako bi se uspostavila veza između pretpostavki projektnog rješenja i stvarnih uvjeta koji vladaju u tijelu brane. Sigurnost brana mora biti neupitna, jer njihov slom može izazvati katastrofalne posljedice: smrt mnoštva ljudi i ogromne gospodarske štete.

## 2. OSNOVNI ELEMENTI GRAĐEVINE

Brane se u pravilu grade od različitih materijala posebnih namjena i svojstava. Da bi zadržale vodu moraju biti nepropusne (glineni materijali), mora se osigurati stabilnost pokosa (cvršće potporne zone nekoherentnog tla), mora se osigurati dreniranje zaostalih tlakova u porama (filteri-nekoherentni materijali) a potrebno je zaštititi pokose od razornog djelovanja valova i eventualnog prelijevanja (krupni kameni nabacaj).

Na slici 1. prikazani su osnovni dijelovi brane sa slijedecim značenjem (Nonveiller, 1982.):

kruna brane - gornja vodoravna površina gradevine što spaja dvije obale doline u kojoj se nalazi brana

kosine brane- vanske kose površine na uzvodnoj i nizvodnoj strani koje omeđuju gradevinu

os brane - simetrala krune brane u tlocrtu i okomica kroz sredinu u poprecnom presjeku brane

bokovi brane - plohe bocnih oslonaca brane u dolini

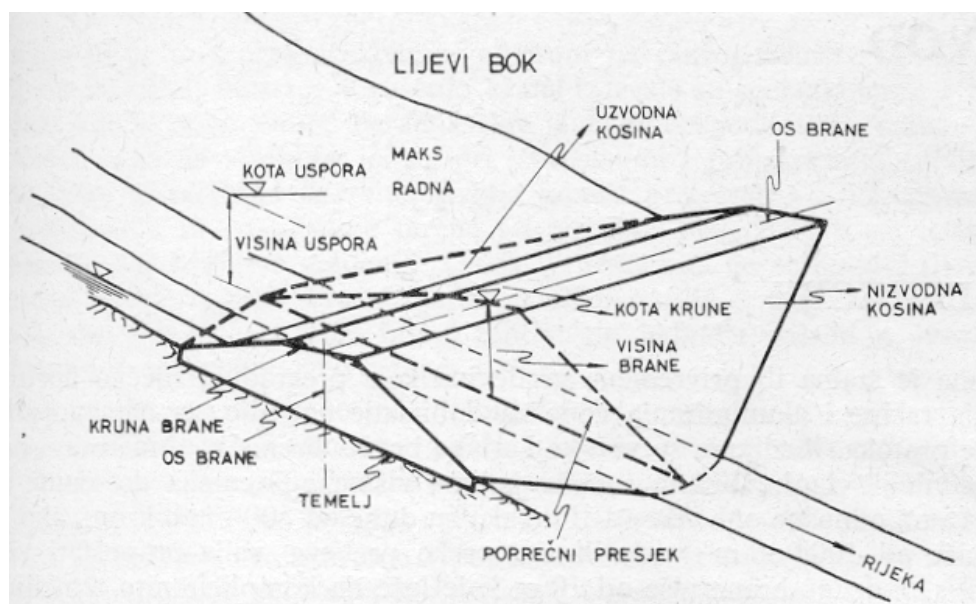
temelj brane - tlo ispod brane na koje se ona oslanja, zajedno s konstruktivnim dijelovima ispod razine temelja kojima se kontrolira procjeđivanje vode

tijelo brane - volumen materijala omeden krunom, pokosima, bokovima i temeljnom plohom.

visina brane - razmak između prvobitne razine terena (ili dna iskopa za temelj) i najviše kote krune brane

visina uspora - razlika između razine vodotoka prije izgradnje i najviše racunske visine vode u novom jezeru

kota uspora - razina vode u jezeru uzvodno od brane



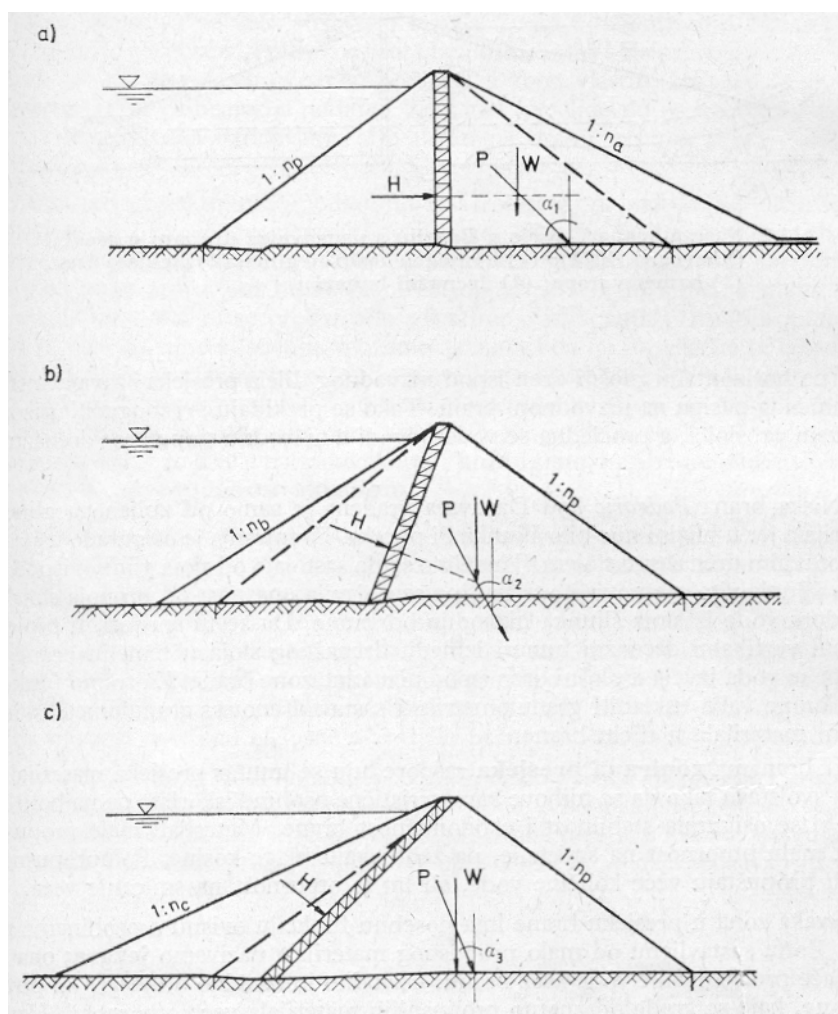
slika 1. Osnovni dijelovi nasute brane (Nonveiller, 1982.)

### 3. RAZLICITI KONCEPTI - PRIKAZ

Odabir mjesta pregradivanja rijecnog korita vrlo je znacajan, jer se time definira velicina objekta, uvjeti temeljenja, oslanjanja na bokove i grada objekta.

Ovdje necemo govoriti o hidrotehnickim gradevinama u sklopu brane (derivacijski tuneli, preljevi, zahvatna gradevina, elektrana i sl.), ali se treba znati da se i na njih bitno utjece izborom mjesta pregradivanja.

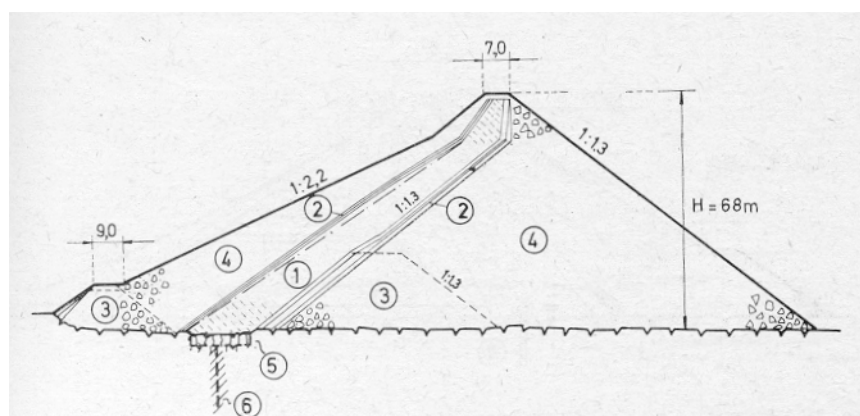
Nepropusna jezgra je najcesce u sredini objekta, vertikalna ili nagnuta u temeljnom dijelu uzvodno. Ponekad se izvode i brane s uzvodnim ekranom (i u asfaltu ili betonu). Položaj jezgre uvjetuje nagibe pokosa iz razloga stabilnosti vezanih na procjedivanje i strujne sile (slika 2).



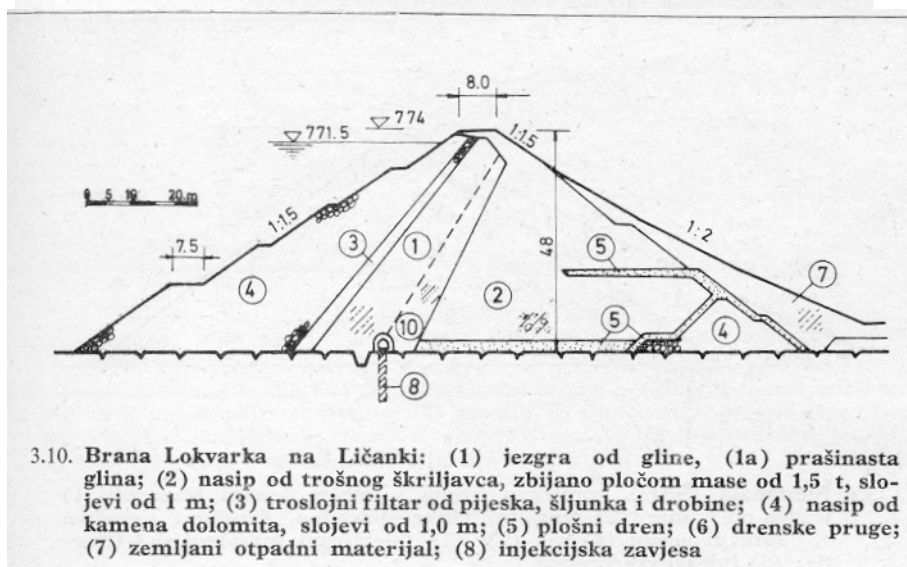
slika 2. Utjecaj položaja tanke jezgre na volumen brane: a) uspravna jezgra povećava nizvodni volumen brane, b) nagib jezgre dozvoljava prirodni nagib ( $n_b$ ), c) blaži nagib jezgre zahtijeva povećani volumen u uzvodnom dijelu ali ne i u nizvodnom dijelu; (prema Nonveiller, 1982.)

Filterima se smanjuje tlak vode u porama, pa se osigurava bolja stabilnost pokosa i racionalnija konstrukcija. Potporne zone (i u fazi izvedbe kao privremene i kao stalne zone za buduci objekt) imaju prvenstveni zadatak osigurati stabilnost objekta.

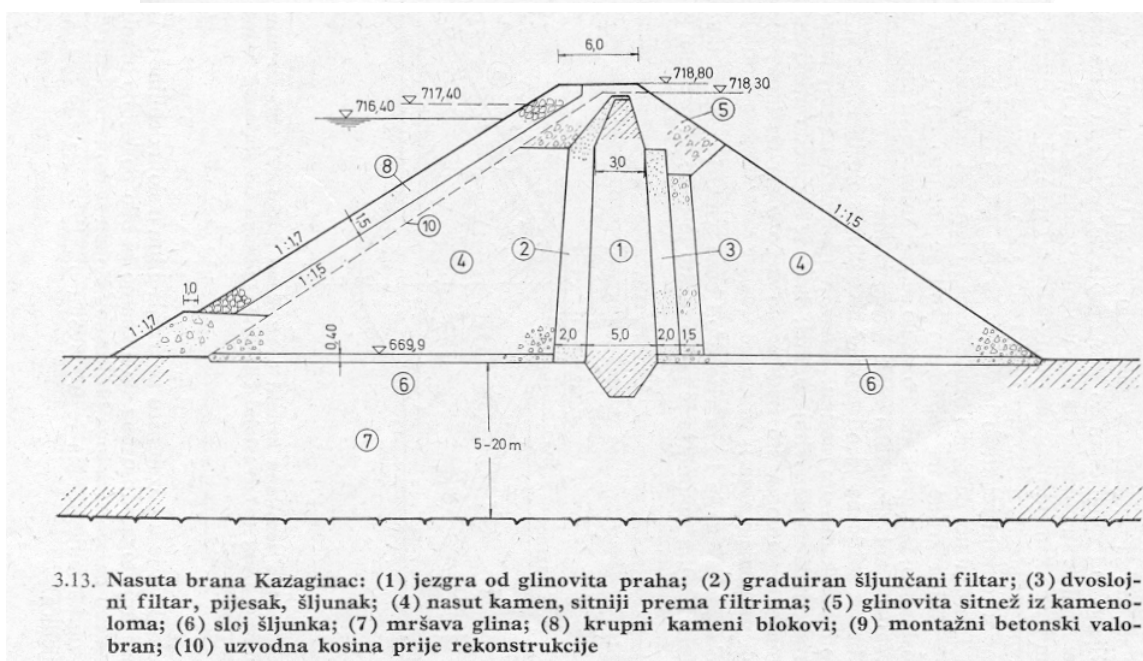
Na slici 3. prikazani su neki primjeri rješenja brana u nas i u svijetu.



3.8. Nantahala (SAD), zonirana brana s uskom kosom jezgrom: (1) jezgra od gline; (2) troslojni filter nizvodno, dvoslojni uzvodno; (3) kameni nasip; (4) kao (3); (5) injektirani kontakti sloj temelja; (6) injekcijska zavjesa

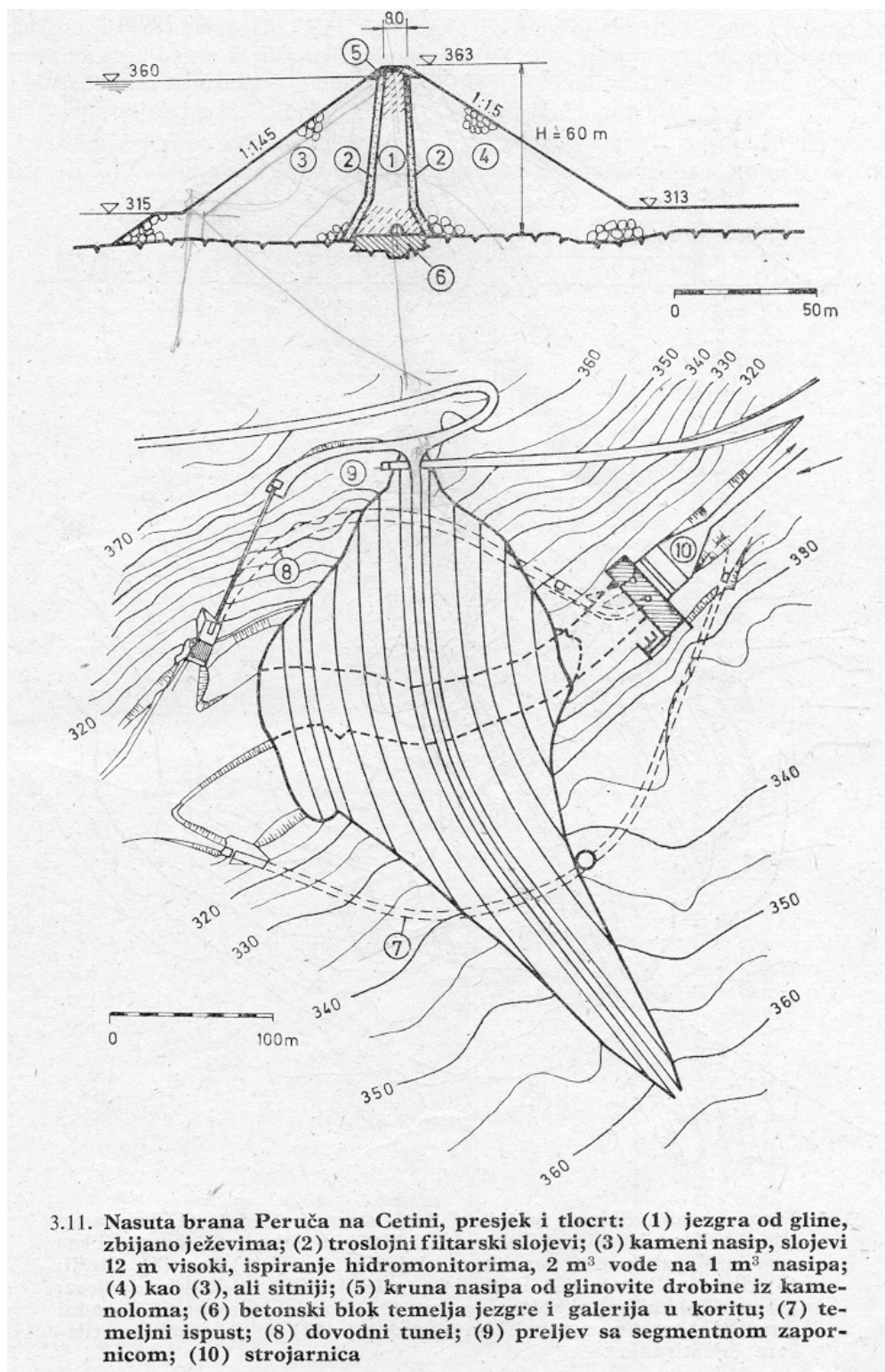


3.10. Brana Lokvarka na Ličanki: (1) jezgra od gline, (1a) prašnasta glina; (2) nasip od trošnog škriljavca, zbijano pločom mase od 1,5 t, slojevi od 1 m; (3) troslojni filter od pijeska, šljunka i drobine; (4) nasip od kamena dolomita, slojevi od 1,0 m; (5) plošni dren; (6) drenske pruge; (7) zemljani otpadni materijal; (8) injekcijska zavjesa



3.13. Nasuta brana Kazaginac: (1) jezgra od glinovita praha; (2) graduiran šljunčani filter; (3) dvoslojni filter, pijesak, šljunak; (4) nasut kamen, sitniji prema filtrima; (5) glinovita sitnež iz kamenoloma; (6) sloj šljunka; (7) mršava glina; (8) krupni kameni blokovi; (9) montažni betonski valobran; (10) uzvodna kosina prije rekonstrukcije

slika 3 - primjeri poprečnih presjeka brana složenog presjeka



slika 3 - nastavak - brana Peruca, cuvena i po tome što je izdržala vandalski cin diverzije eksplozivom tijekom domovinskog rata (sve prema Nonveiller , 1982.)

Poprečni presjek brane razlikuje se u geometrijskim odnosima u različitim ravninama presjeka, a osnovni odnosi mogu ali ne moraju biti sacuvani. Važno je gradu brane prilagoditi raspoloživim materijalima i uvjetima u tlu. Nepropusne zavjese izvode se u cilju zaštite objekta od sila procjediivanja i erozije koju one mogu izazvati.

#### 4. TEMELJ BRANE (POTREBNA SVOJSTVA I ISPITIVANJA)

Kao i za druge građevine temelj brane mora biti dovoljno nestišljiv, ali i nepropustan. Opsežnim ispitivanjima utvrđuje se grada i raspored slojeva u podlozi brane (geofizicka ispitivanja, hidrogeološka istraživanja, geološka istraživanja, geotehnicka istraživanja), te njihova propusnost i mehanicka svojstva.

Cesto se trebaju napraviti i raskopi ili velike jame kako bi se ustanovili potrebni podaci za ispravno temeljenje brane i uzimanje uzoraka za ispitivanja u laboratoriju.

Mehanicka svojstva temeljnog tla utvrđuju se u bušotinama, na uzorcima tla u laboratoriju, na sraslom tlu u raskopima te u posebnim tunelima (ispitivanja deformabilnosti stijenske mase raznim postupcima). Ta ispitivanja mogu biti jako skupa, ali se moraju obaviti na potrebnom nivou.

Nepropusnost podloge mora se ustanoviti jer ona zajedno s jezgrom brane treba osigurati male gubitke vode (protjecanje) izlazne gradijente koji ne izazivaju eroziju.

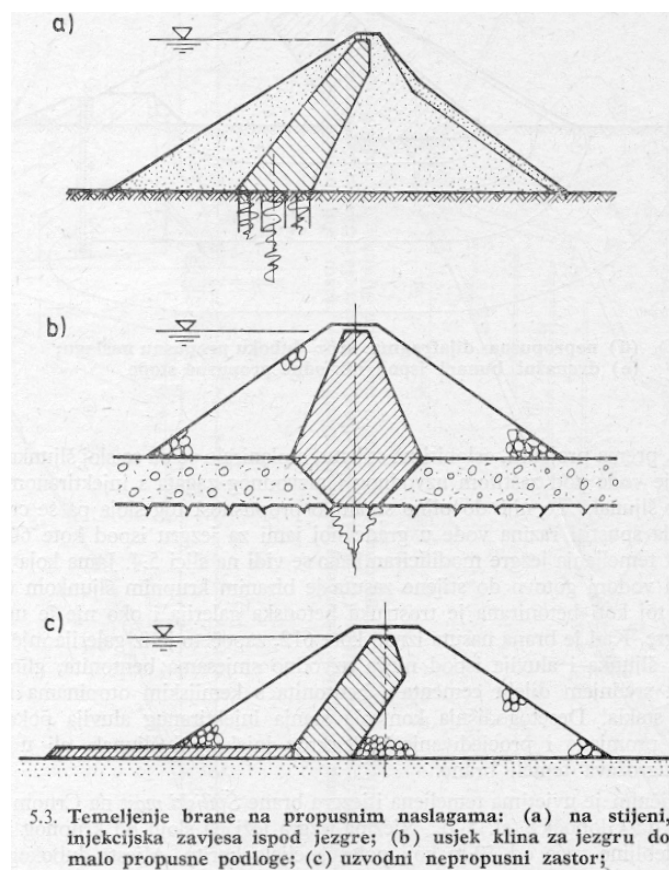
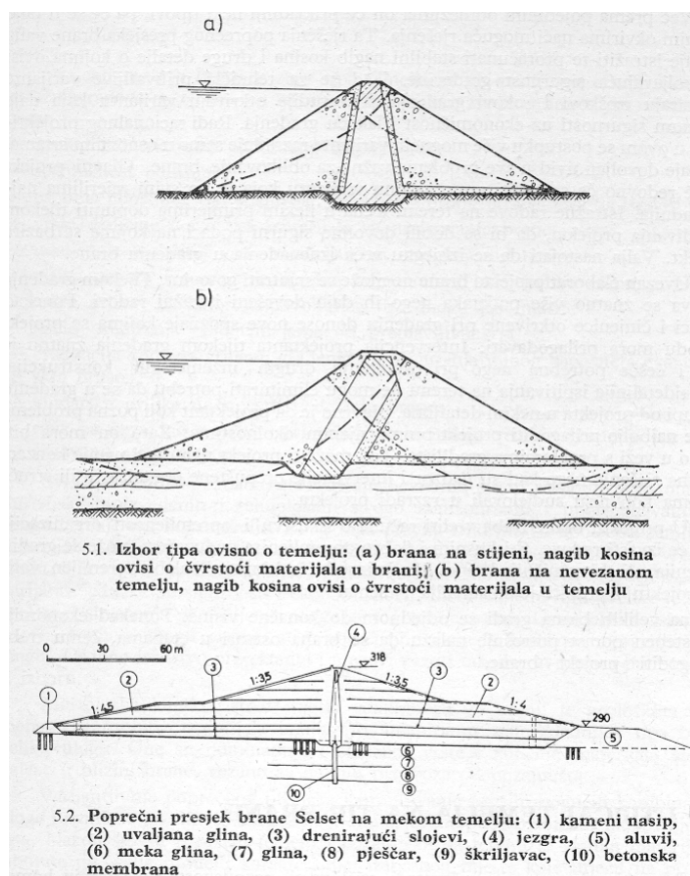
Nepropusnost osnovnog terena ispituje se u bušotinama, tako da se mjeri istjecanje vode kroz dno bušotine ili kroz stijenke (bocno) bušotine. Time se odredi i moguća anizotropija u propusnosti u vertikalnom u odnosu na horizontalni smjer. Poznati su postupci ispitivanja propusnosti po Lugeon-u i po Lefrancu. U oba postupka se promatra gubitak tekucine iz bušotine pod nekim razlikama tlaka koje se kontroliraju. Ponekad se u nekoherentnim tlima moraju izvoditi probna crpljenja bunarima za određivanje propusnosti tih naslaga.

Ukoliko se pokaže da je temeljno tlo prevelike propusnosti izvodi se nepropusna zavjesa (injekciona zavjesa - kada se injektira). Ona može biti izvedena i kao glineno-betonska dijafragma. Ponekad se ti radovi odvijaju iz galerije, tj. magb tunela koji se kao betonska konstrukcija izvede u jezgri. Nakon što se brana izgradi i postignu dovoljni tlakovi u tlu (iznad i ispod galerije) injektira se pod velikim tlakom bentonitno-cementna suspenzija u tlo kroz bušotine, obicno u više redova da se postigne dobro zapunjavanje prostora.

Sama temeljna ploha u zoni kontakta s jezgrom od gline mora biti jako cista i bez labavo oslonjenih komada; nepravilne manje pukotine zapunjavaju se betonom. Izbjegavaju se kontakti na plohama koje su vertikalne i tvore male prostore kako bi se bolje ostvarila veza gline iz jezgre i podloge pri zbijanju.

Dobar kontakt gline i podloge je vrlo važan. Ako se vertikalne plohe ne mogu izbjeći te se plohe izvode u profiliranom obliku da se poveća kontaktna ploha.

temelji mogu utjecati na koncepciju brane po svojoj stišljivosti i po propusnosti. Povećana stišljivost zahtijeva blaže pokose, a povećana propusnost temeljnog tla nepropusne zavjese ili nepropusne tepihe (slika 4.).



slika 4. Ilustracija utjecaja temeljnog tla na branu zbog stišljivosti (lijeva slika) i zbog propusnosti (desna slika)

## 5. ZONE BRANE

Vec je spomenuto da branu cine cetiri osnovne zone materijala, prema funkciji:

- nepropusna jezgra, filterski drenažni slojevi, potporne zone, kameni nabacaj na pokosima.

Oblik i raspored tih zona može biti tipican, ali i ne mora, što ovisi i o raspoloživim materijalima, o topografiji, o načinu izvedbe i o seizmickim aktivnostima u regiji. Obično je jezgra u sredini, s jedne ili s obje strane su filterski slojevi, a između njih i pokosa su potporne zone. Postoje i zone u brani koje ne sudjeluju u njenom životu značajno (npr. zona u donjem dijelu nizvodne kosine). U te se zone mogu staviti materijali iz iskopa kojih je ponekad previše. Oni moraju biti relativno nedeformabilni, ali ne sudjeluju u kliznim plohama i sprečavanju propusnosti.

Dio brane su i manje brane koje se izvode kod pregrađivanja riječnog korita (tzv. predbrane, koje mogu biti uzvodne i/ili nizvodne). One za sebe moraju izdržati sva stanja stabilnosti, a nakon što se počne u suho (zahvaljujući njima) izvoditi jezgra brane, njihova funkcija opada i postaju samo dio tijela brane.

Pojedini dijelovi brane će se u ovom tekstu posebno obraditi na nivou zone, svojstava, ispitivanja i izvedbe.



Materijali koji se koriste za pojedine zone brane moraju se promatrati kroz svojstva i ulogu tih zona, svojstva materijala i način njihove ugradnje.

U posljednje vrijeme pojedini dijelovi brane grade se od **valjanog betona**. To je po svemu klasičan beton, osim što se koristi vrlo malo cementa i što agregat može biti različite cvrstoće (od cvrste stijene do škriljevaca i glinaca-pješčenjaka). Za tzv. mršavi beton koristi se  $100 \text{ kg/m}^3$ , a za masni-nepropusni  $250 \text{ kg/m}^3$ , dok je vodocementni faktor oko 1.

Pojava ovog materijala predstavlja važan napredak u gradnji brana i njihovoj sanaciji. Ovaj materijal može biti u tijelu brane, jezgri, na pokosima i slično, za cvrstocu i obranu od erozije.

Gradnja s njim podrazumijeva odlično planiranje i tehnologiju izvedbe. Rubovi zona koje se izvode valjanim betonom moraju imati oplatu, što znači da se javljaju reške koje se moraju savladati ovisno o njihovoj ulozi u propusnosti i cvrstoci.

Slojevi se izvode u debljini 25-50 cm, valjaju se vibrovaljcima, tako da se svježi novi sloj valja na neosušeni prethodni, kako ne bi nastala horizontalna reška. Priprema materijala, doprema i valjanje moraju biti pod stalnom kontrolom. Izvedba ovim materijalom je skupa, ali je uz dobru organizaciju moguća konkurentnost prirodnim materijalima jer su pokosi strmiji pa se koristi manje materijala.

## 6. OSNOVNI ZAHTJEVI NA JEZGRU

Jezgra brane mora biti nepropusna ali i dovoljno nedeformabilna i neosjetljiva na relativna slijeganja.

Nepropusnost se postiže izborom gline (obično nepropusnosti oko  $10^{-8}$  do  $10^{-9}$  m/s). Gline koje ovo zadovoljavaju imaju do 10% pijeska, visoke su plasticnosti, ugrađene na optimalnoj ili nešto višoj vlažnosti, te dobro zbijene na propisani način.

Glinena jezgra trpi slijeganja kao i njena okolina, ali trup brane se manje sliježe pa se glina može "objesiti" o potporne zone i dobiti pukotine kroz koje može procuriti voda i izazvati porast tlakova vode i eroziju tla.

Posebna se pažnja mora pokloniti porastu pornih tlakova u glini tijekom izvedbe. Zbijanjem vlažne gline povećavaju se porni tlakovi koji s vremenom disipiraju i izazivaju slijeganje. Često se postavljenjem piezometara u glinenoj jezgri mjeri razvoj pornih tlakova tijekom izvedbe i konsolidacije, te polje pornih tlakova pri visokim nivoima jezera. Neki autori predlažu da vlažnost gline bude manja od optimalne u donjem dijelu jezgre (manja stišljivost, manji porast pornih tlakova tijekom izvedbe), a da bude veća od optimalne u gornjem dijelu (plastičnija glina za bolje podnošenje deformacija bez pukotina).

Glinena jezgra se može izvoditi i kao deblja ili od dvije zone (viskoplastična + niskoplastičnaglina) ako se brana izvodi u težim uvjetima, npr. jako potresnom području (brana Sidi Yacoub u Alžiru, npr.).

Jezgra mora biti jako dobro prionjiva na temeljnoj plohi, u kontaktu s bokovima i s galerijom (beton). U tu se svrhu glina može navlažiti do potrebne vlažnosti, u prvom sloju. Potrebno je kvasiti i podlogu gline da ne bi isušila glinu prilikom zbijanja i u periodu bez vode (dulji period izgradnje).

Stalnim kontrolama svojstava gline može se osigurati dobar materijal i dobra ugradnja. Glina se ugrađuje u tanjim slojevima, debljine 15-20 cm u zbijenom stanju. Za zbijanje treba koristiti valjke s bodljama jer oni izazivaju posmicne deformacije u glini koje pomažu boljoj izvedbi sloja (boljoj zbijenosti).

Posebna pozornost mora se pokloniti ispitivanju erodibilnosti gline ili drugog materijala za jezgru. U posebnom pokusu, koji je najčešće u uporabi, pušta se voda kroz tanku rupu proizvedenu u uzorku i promatra se protoka kod raznih gradijenata te boja vode. Za slabo povećanje protoke s gradijentom i nezamucenost vode kaže se da je materijal neosjetljiv na eroziju (nedisperzivan). U protivnom se ocjenjuje njegova disperzivnost.

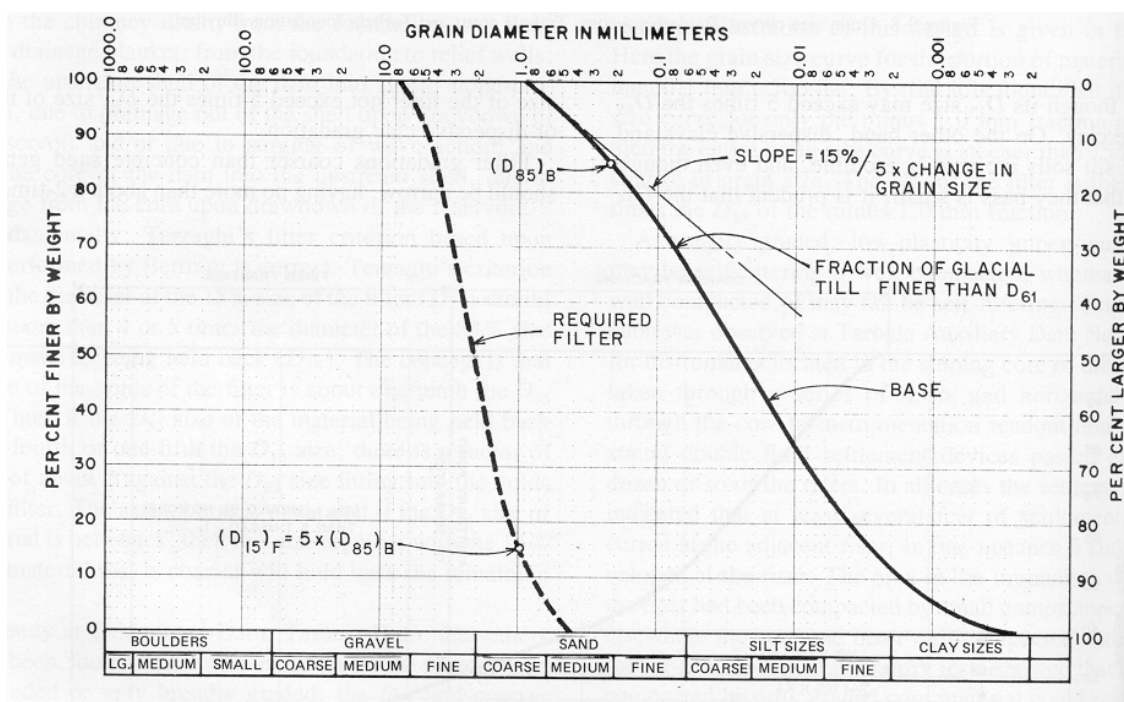
## 7. FILTERI

Filteri su posebno važan dio brane. O njihovom dobrom funkcioniranju ovisi raspodjela pornih tlakova u brani, a to znaci i cvrstoca i stabilnost pokosa.

Oni moraju zadovoljiti slijedece kriterije:

- imati propusnost barem 100 puta vecu od osnovnog materijala
- zadržati cestice osnovnog materijala

Mehanizmi koji se mogu razviti u osnovnom tlu su: erozija osnovnog tla (kod prevelikih pora u filteru), premoštenje u osnovnom tlu (pore u filteru odgovaraju velicini cestica tla) i ispiranje cestica u osnovnom tlu (male pore u filteru - osnovni materijal gubi sitne cestice koje se talože uz filter - interno nestabilna tla).



slika 5. Primjer određivanja materijala za filter dobro graduiranom osnovnom materijalu (prema Jansen, 1988.)

Na temelju teoretskih i eksperimentalnih istraživanja izradene su preporuke za granulometrijski sastav filtera u ovisnosti o materijalu koji se štiti. Tako se granulometrijski sastav gline i filtera uspoređuje preko promjera koji odgovaraju nekoj

zastupljenosti zrna u materijalu (npr.  $d_{15}$  označava promjer od koga je 15% materijala sitnije).

Na slici 5. prikazani su neki odnosi granulometrijskog sastava filtera i osnovnog materijala. Prema suvremenim shvaćanjima potrebno je kontrolirati i promjenu nagiba gr. krivulje osnovnog tla na razini peterostruke promjene promjera zrna (ne smije biti

veća promjena nagiba krivulje od 15% na tom razamku ako je filter samozaštitni. Opcenito se u praksi koriste odnosi  $d_{85}$ ,  $d_{15}$ ,  $d_{50}$ , te  $D_{15}$  i  $D_{50}$ . Oznakom "d" označava se osnovni materijal kojega štiti filter oznake "D".

Na temelju analize literature, pokusa i stanja struke Petrovic (1985.) sistematizira slijedeće preporuke za filtere od prirodnog materijala:

a. filter za sitnozrne materijale (glina i prah)

- $D_{15}/d_{85} \leq 5$  dobar za materijale sa znatno sitnog pijeska
- $D_{15}/d_{85} \leq 10$  daje dovoljnu kvalitetu za dobro graduirane prašine i gline bez puno pijeska
- $D_{50}/d_{50}$  i  $D_{15}/d_{15}$  nisu opravdani i ne treba ih koristiti
- granulometrijska krivulja filtera ne mora imati sličan oblik gr. krivulji osnovnog materijala

b. filteri za zaštitu pijeska

- $D_{15}/d_{85} \leq 5$  treba koristiti kao glavni kriterij
- $D_{50}/d_{50}$  i  $D_{15}/d_{15}$  nisu opravdani i ne treba ih koristiti
- isti filterski kriteriji koriste se i za filtere s uglatim i za filtere sa zaobljenim zrnima
- filterski kriteriji se mogu koristiti i za vibrirane filtere jer je utjecaj vibracija na filtere neznatan

Terzaghi predlaže da se za jednoliko graduirana tla koristi kriterij

$$D_{15}/d_{85} \leq 4-5$$

Za materijale koji su sami sebi filteri predlaže se kriterij

$$5d_{15} \leq d_{85}$$

Nonveiller (1982.) preferira prirodne materijale nad geosinteticima jer su oni bolje prilagođeni uvjetima koji vladaju u tlu i imaju stabilan mineraloški sastav i fizikalna svojstva (za razliku od geosintetika koji se nedovoljno dugo koriste).

## GEOTEHNICKE ANALIZE

- STABILNOST POKOSA
- SLIJEGANJE OBJEKTA
- PROCJEĐIVANJE

## STABILNOST

- UZVODNI I NIZVODNI POKOS
- NEDRENIRANA I DRENIRANA ANALIZA
- DJELOVANJE POTRESA
- BRZO SPUŠTANJE VODE U JEZERU
- PARAMETRI TLA
  - ISTRAŽNI RADOVI – TEMELJNO TLO
    - ISPOD BRANE
    - NA BOKOVIMA
    - BUŠOTINE , GEOFIZIKA, PENETRACIJE
    - GRAĐA TLA – RASPORED I SASTAV SLOJEVA TLA
    - CVRSTOČA, STIŠLJIVOST
    - PROPUSNOST
  - POZAJMIŠTE – IZVORIŠTE
    - BUŠOTINE
    - ISTRAŽNE JAME

## UZORCI TLA U LABORATORIJU

- CVRSTOČA – TROOSNI POSMIK, DREN. I NEDR.
- NA UZORCIMA PO PROCTOR-U ( $w_{opt}$ ,  $w_{opt} \pm 2-3\%$ )
- STIŠLJIVOST – EDMETAR
- PROPUSNOST – EDMETAR, VDP – APARAT

## REDOSLIJED ANALIZA:

- PROCJEĐIVANJE
- PONI TLAKOVI ZA STABILNOST
- PONI TLAKOVI I KONSOLIDACIJA ZA SLIJEGANJE

## 8. POZAJMIŠTA MATERIJALA

Posebno je važno odrediti mjesta odakle će se materijal uzimati i pripremati za ugradnju u branu. Pozajmišta se istražuju u istražnoj fazi (prije projektiranja), ali i u doba eksploatacije. Nakon što se ustanovi koliko i kakvog materijala postoji na raspolaganju i nakon što se u laboratoriju utvrde potrebna svojstva ugrađenog tla, može se u izvedbi planirati eksploatacija pozajmišta.

To podrazumijeva odabir načina iskopa, pripreme i transporta materijala-tla. Za gline je važno da se vlažnost dotjera u potrebne granice, da se na mjestu ugradnje ne čeka i ne zaustavlja rad. S toga se često u pozajmištu organiziraju plohe na kojima se dotjeruje vlažnost gline, tako da se transportira samo pripremljena glina. Svojstva gline u pozajmištu moraju se dovoljno unaprijed znati da bi se dobro planiralo eksploataciju (položaj i dubina dobrih i loših slojeva).

Šljunak se često vadi iz riječnog korita ili se dobiva iz materijala iz kamenoloma (za potporne zone i za filtere). Može se obaviti sijanje (odvajanje) većih čestica puštanjem ukupnog materijala na rešetke, na kojima zaostaju velika zvrna koja se mogu drobiti ili koristiti za kamene potporne zone.

Priprema materijala za ugradnju (iskop, priprema i transport) najvažniji su za učinak ugradnje i tempo izgradnje brane. Problemi koji se propuste riješiti u toj fazi iziskuju naknando odgađanja i neopravdane troškove.

## 9. IZVEDBA SLOJEVA - NASUTE GRAĐEVINE – ZBIJANJE TLA

Svi materijali se ugrađuju u slojevima. Brana raste u horizontima, pa se u jednom trenutku ugrađuje više materijala jedan do drugoga.

Glina se ugrađuje u tankim slojevima (15-20 cm u zbijenom stanju). Pijesak se ugrađuje u slojevima oko 50-70 cm, a šljunak u slojevima oko 100 cm debljine.-

Kameni materijal može se ugrađivati u slojevima debljine i nekoliko metara , ovisno o krupnoci zrna.

Za svaki se tip tla određuje efikasnost valjka putem probne dionice.

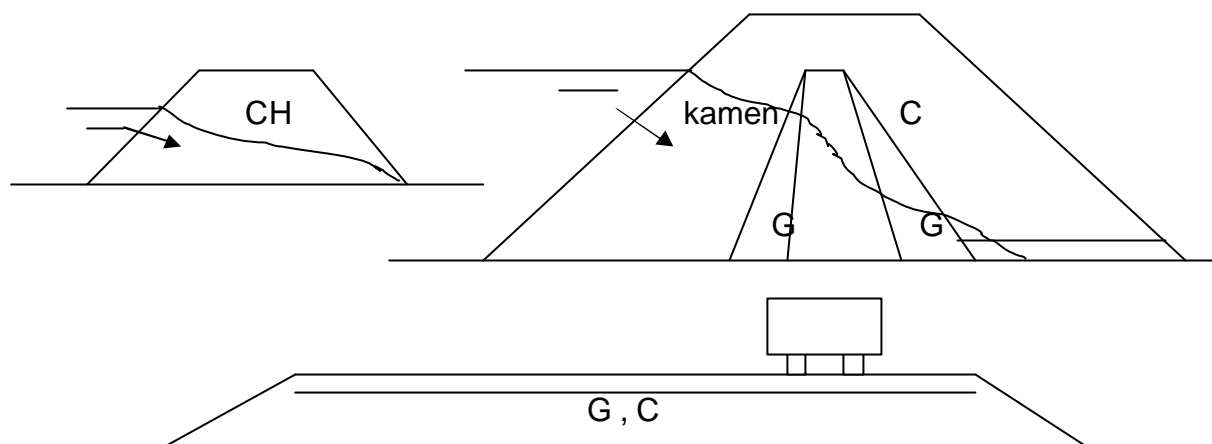
Kvalitet izvedbe slojeva dnevno se kontrolira uzimanjem uzoraka ili ispitivanjem na terenu, ili na oba načina. Posebni specijalisti obavljaju taj zadatak, dovoljno brzo i točno da se ne zaustave radovi a da se osigura predviđeni kvalitet objekta.

## GRAĐEVINE OD NASUTOG TLA

Najčešće se spominju građevine:

NASIPI  
BRANE  
PROMETNICE

Ovo su uz mostove jedine građevine u kojima je građevinski inženjer i u ulozi arhitekta (nema klasičnog arhitekta).



## PRINCIPI ZBIJANJA TLA

Tlo koje služi za izvedbu nasute građevine prolazi slijedeće procese:

iskop u pozajmištu  
transport do mjesta ugradnje  
priprema za ugradnju  
razastiranje  
zbijanje

Tlo se zbija u slojevima:

glina i koherentna tla: visina slojeva 20-25 cm u zbijenom stanju  
nekoherentna tla (G,S): 30-100 cm, u zbijenom stanju  
krupni kamen: 100-200 cm

Strojevi za zbijanje

Izbor stroja za zbijanje ovisi o tipu tla, uvjetima zbijanja (blizina građevine ne dopušta vibracije), debljini slojeva, tipu konstrukcije.

statičko zbijanje: bez vibracija, tipično za koherentna tla, (ježeви, glatki i gumeni valjci)

zbijanje uz vibracije: nekoherentna tla

Izbor vrste stroja i režima rada (broj prelaza, način vibriranja) utvrđuje se na pokusnoj dionici.

## POKUS PROCTOR

Zbijanje tla dovodi do povećanja gustoće, što utječe na promjene fizikalnih i mehaničkih svojstava tla.

Promjena gustoće ovisi o:

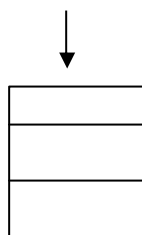
vlažnosti tla  
 primijenjenoj energiji zbijanja  
 načinu zbijanja (udarno, gnjecenjem, sa ili bez posmicnih deformacija)

Pokus kojim se utvrđuju svojstva zbijanja tla ustanovio je inž. Proctor, i po njemu se zove PROCTOR POKUS.

Za koherentna tla koristi se manja energija zbijanja, za oko 4.7 puta nego za nekoherentna tla.

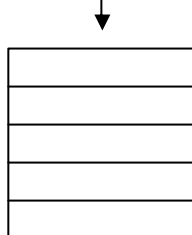
Postupak: u propisanom cilindru nabija se tlo udarcima klipa koji ima propisanu težinu i pada s propisane visine, u slojevima .

PROCTOR STANDARD



koherentno tlo: 3 sloja  
 energija zbijanja E

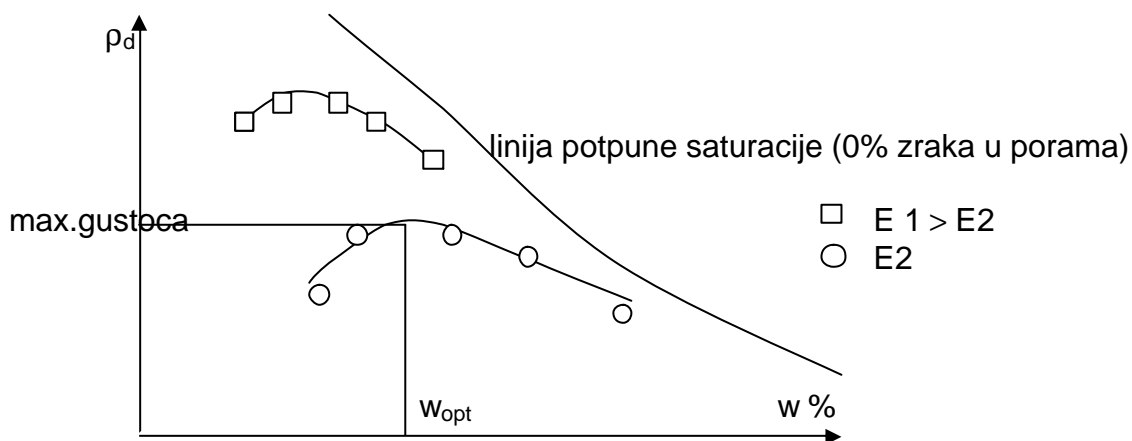
PROCTOR MODIFICIRANI



nekoherentno tlo: 5 slojeva  
 energija zbijanja 4.7xE

Cilj: naci vlažnost (iz nekoliko različitih vlažnosti) na kojoj se tlo uz istu energiju zbijanja najlakše zbija

Postupak: prirediti tlo na pet različitih vlažnosti, zbijati svaki uzorak istom E, mjeriti postignutu gustocu tla. Nacrtati ovisnost postignute gustoce o vlažnosti.



OPTIMALNA VLAŽNOST: vlažnost pri kojoj se zadanom energijom zbijanja postiže najveća gustoca; različita je za različite energije zbijanja.

MAKSIMALNA GUSTOCA: gustoca koja se postiže pri optimalnoj vlažnosti uz zadanu energiju zbijanja  
 primjer:

tlo	$W_{opt}$	$\rho_{dmax}$
CH	18-25%	1.55-1.65 gcm <sup>-3</sup>
CL	15-19%	1.6-1.8
G	3-6%	2-2.2

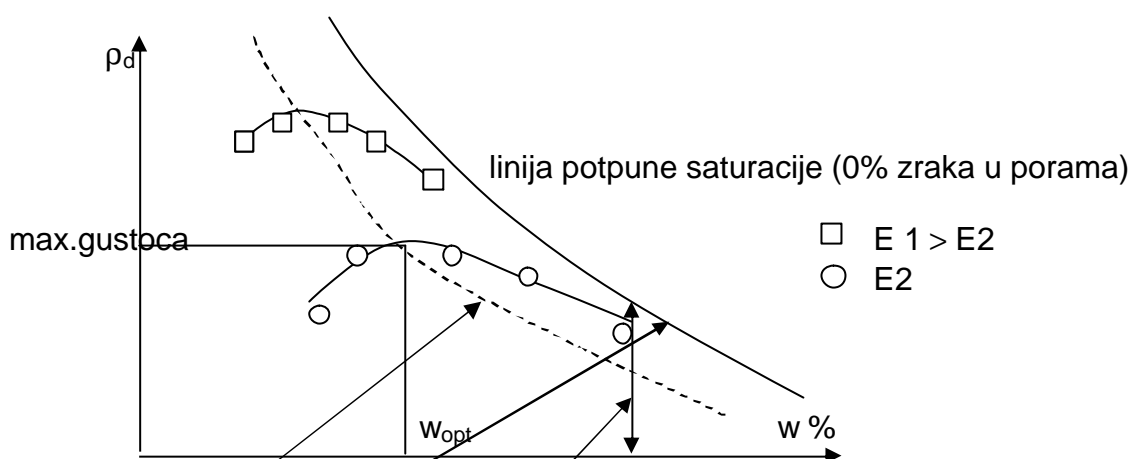
## ZNACAJ VLAŽNOSTI I GUSTOCE TLA

Vlažnost tla utječe na zbijanje tako što o njoj ovisi gustoca koju je moguće postići (bilo kojom energijom zbijanja) te struktura tla koja se ostvaruje (flokulasta, disperzivna) a o kojoj ovise svojstva tla.

Presudan je položaj vlažnosti tla prema optimalnoj vlažnosti (vidi separat)- tj.  $w \geq w_{opt}$ .

Gustoca tla definira fizikalna i mehanicka svojstva: propusnost, stišljivost, cvrstocu.

(vidi separat za naponsko – deformacijska svojstva).



- linija optimalnih vlažnosti za različite energije zbijanja
- linija potpune saturacije označava da se ma kako velikom energijom zbijanja ne može postići veća gustoca od njom određene

## POKUSNA DIONICA

Na pokusnoj dionici utvrđuje se kojim strojem, u kojem režimu (broj prelaza, brzina kretanja, frekvencija i amplituda vibracija), koja debljina sloja se može zbiti na potrebnu gustocu.

/vidi separat/ - u posebnom dijagramu se ilustrira mjerenje slijeganja i gustoće, te se odlučuje o potrebnom režimu rada.

## ZBIJANJE TLA PRI IZVREDBI PROMETNICA

Prometnice se grade kao nasute građevine: temeljno tlo, podložni nosivi sloj (šljunak), nosivi sloj (kruti cementom stabilizirani sloj), kolonicka konstrukcija.

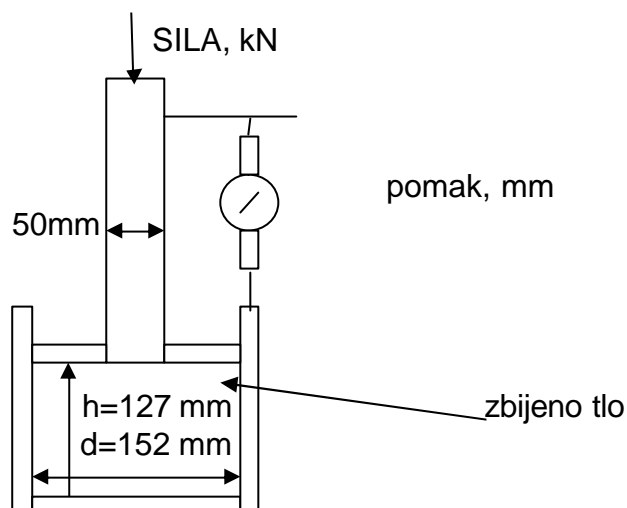


Svaki od ovih slojeva mora imati određenu krutost (proracun) koja se u klasicnom proracunu oslikava parametrom CBR (California Bearing Ratio).

## CBR POKUS

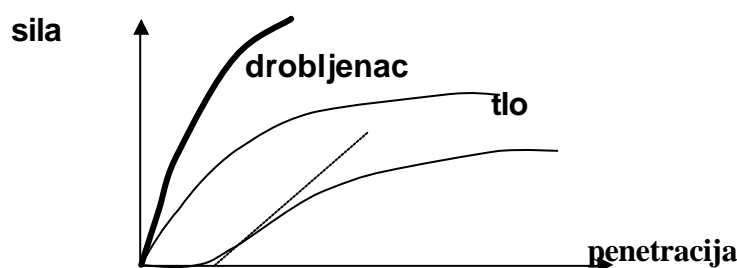
CBR je broj koji pokazuje koliko je neko tlo (u određenom stanju zbijenosti) mekše od cvrsto zbijenog drobljenca za kojeg je CBR=100 (%).

CBR se ispituje na uzorcima formiranim po postupcima Proctor u posebnim cilindrima, mjerenjem dubine utiskivanja propisanog klipa u zbijeno tlo.



**postupak:** tlo se zbjije u cilindar, utiskuje se metalni klip brzinom 1 mm/min; mjeri se sila na svakih 0.25 mm, do 7.5 mm; veca sila od dvije (na 2.5 mm i na 5.0 mm) uzima se kao mjerodavna.

$$\text{CBR} = \frac{P_{\text{tla}}}{P_{\text{kamena}}} \times 100\%, \quad P_{\text{kamena}} = 13.24 \text{ kN (2.5 mm)}, 19.96 \text{ kN (5 mm)}$$



Cesto se ispituje i utjecaj vode na otpornost tla u CBR (što odgovara podložnosti tla na razmekšavanje u nasipu ceste u uvjetima povećane vlažnosti ili potopljenosti).

Cilindar za CBR se drži u vodi tako da mu je potopljen donji dio, i nakon što se utiskuje klip na nepotopljeni dio uzorka to isto se napravi na potopljenom dijelu uzorka (okrene

se cilindar). Time se ustanovi razlika otpornosti koja se promatra u projektiranju prometnice.

**Vrijednosti CBR** za neke uobicajene vrste tla u prirodnom stanju u V.Britaniji:

tip tla	indeks plasticnosti %	CBR (%)	
		dubina vode ispod sloja tla	
		više od 600 mm	600 mm ili manje
plasticne gline	70	2	1
	60	2	1.5
	50	2.5	2
	40	3	2
prašinasta glina	30	5	3
pjeskovita glina	20	6	4
	10	7	5
Prah	-	2	1
pijesak (SP)	bez plast.	20	10
SW	“	40	15
GW/SW	“	60	20

Slican pokus provodi se na terenu, posebnom opremom.

Važno je zapamtiti: CBR je direktno ovisan o nedreniranoj cvrstoci, pa vrijedi  
 $1\% \text{ (CBR)} = 25 \text{ kPa (} c_u \text{)}$

## KONTROLA ZBIJENOG TLA

Tlo ugrađeno u slojeve nasute konstrukcije kontrolira se da bi se :

- ustanovila gustoca i vlažnost ugrađenog tla
- ocijenila eventualna ugroženost ili potvrdile pretpostavke projekta
- konstrukcija bila sigurna sukladno projektnom rješenju

Kontroliraju se slijedeca svojstva:

- vlažnost (uzorak)
- gustoca (volumetar, kalibrirani pijesak, voda u foliji, žito..)
- stišljivost plocom (posebno za cestovne nasipe)
- uzorci tla iz slojeva ispituju se u laboratoriju – smicanje, vodopropusnost, stišljivost
- statisticka obrada podataka

kriteriji:

vlažnost  $w = w_{opt} \pm 2-3\%$

gustoca  $\rho_d \geq 0.95 \rho_{dmax}$

ucestalost ispitivanja: ovisi o karakteru građevine, npr. svakih 1000 m<sup>3</sup>, ili 10 po sloju i slično.

## MOGUĆNOSTI IZBORA STROJEVA ZA ZBIJANJE

tip stroja	prosječni učinak stroja						napomena
	širina trake (mm)	brzina kretanja (m/min)	broj prelaza	kompaktira na površina/h (m <sup>2</sup> /h)	debljina sloja (mm)	učinak (m <sup>3</sup> /h)	
8 t glatki valjak	1800	70	4	1220	150	185	za sva tla, osim vlažne gline i jednoliki pijesak
8 t vibrovaljak	2000	37	4	870	300	265	za sva tla
45 t pneumatski valjak	2400	66	3	4000	250	612	za sva tla, naročito dobar za vlažna koherentna tla
valjak-jež (bez vibriranja)	3700	270	6	8200	225	1875	različiti broj prelaza za gline, pjeskovite gline, pjeskoviti šljunak
			14	3500		804	
			32	1530		350	
13.5 t valjak-mreža (s 80 KS vucen)	1600	135	7	1500	200	300	za sva tla širokog raspona vlažnosti
13.5 t valjak-mreža (s 150 KS samopokretan)	1600	270	8	2640	200	536	nije pogodan za jednoliki pijesak i za vlažne uvjete
4 t vibrovaljak	1700	40	7	485	225	111	za nekoherentna tla

## 10. OSNOVE PRORACUNA

Projektiranje brane podrazumijeva kontrole deformacija i stabilnosti objekta u fazama izvedbe i u konacnici.

Stabilnost se kontrolira provjerom potencijalnih kliznih ploha za kritična stanja opterećenja. Ta mogu biti vezana na brze promjene nivoa vode (tzv rapid draw down), kada se koriste nedrenirane analize, ili za stacionarna stanja tecenja, kada se koriste drenirani parametri cvrstoce.

Ispravan proračun podrazumijeva tocu analizu raspodjele pornih tlakova u tijelu brane kako bi se ustanovili efektivni naponi odgovorni za cvrstocu.

Potrebno je uzeti u obzir i sile od potresa koje umanjuju stabilnost.

Pomake brane dana se utvrđuje analizama pomocu metode konacnih elemenata, za usvojene modele ponašanja tla.

## 11. MJERENJA I OPAŽANJA

Mjerenjima i opažanjima kontrolira se razvoj deformacija, pornih tlakova, procjeđivanje i naprezanja u tijelu brane.

Posebne skupine instrumenata služe za svaku od ovih kontrola.

Porni tlakovi mjere se piezometrima, koji su danas elektronički instrumenti velike preciznosti, u zatvorenim bušotinama.

Deformacije se mjere uredajima za mjerenje slijeganja i ekstenzometrima (mjerenja promjene razmaka), te geodetski. Koriste se i inklinometri kojima se mjeri pomak po dubini bušotine (uocavaju se eventualna klizanja po pojavi i položaju klizne plohe).

Naprezanja se mjere posebnim celijama ispunjenim tekucinom koja osjeća promjene tlaka u saturiranom sustavu.

Svi instrumenti se obično spajaju na mjernu centralu, na jednom mjestu.

Opažanje i mjerenje obavlja se dugo vremena u fazi eksploatacije brane. Takvi podaci dragocijeni su i za praksu (za stjecanje novog iskustva) i za provjeru stanja sigurnosti brane, te eventualno poduzimanje mjera predostrožnosti ili promjene režima rada objekta.