

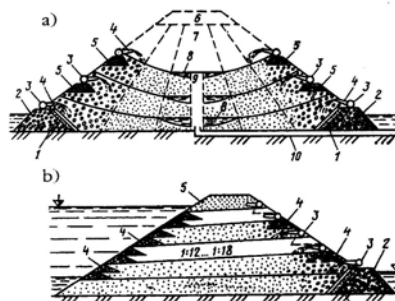
NASUTE BRANE

- **PODJELA:**
 - **Zemljane brane** od prirodnih materijala:
 - **Homogenog presjeka**
 - **Heterogenog presjeka** s nepropusnom glinenom vertikalnom ili kosom jezgrom, ili s jezgrom nekog drugog nepropusnog ili slabo propusnog materijala, s uzvodnim vodonepropusnim ekranom
 - **od kamenog nabačaja:**
 - S vertikalnom ili kosom nepropusnom jezgrom od prirodnih materijala
 - S vertikalnom dijafragmom od umjetnih ili pripremljenih materijala
 - S uzvodnim vodonepropusnim ekranom (AB, asfalt-betonski, lijevani asfalt, geomembrane,...)

- Razvoj nasutih brana započeo je u suhim predjelima (Egipat, Srednji istok, Indija,...) gdje je sezonske padaline trebalo sačuvati za sušne periode.
- Nasute brane se sastoje od:
 - potpornog tijela i
 - sustava za ostvarenje vododrživosti
- Mogu se graditi na bilo kojem tlu (zemljane) kao i u potresnim područjima.
- Grade se od priručnog materijala (prahovi, glina, prašinski pijesci, pijesak, šljunak, drobljeni kamen/stijena,...).
- Način izvedbe:
 - Nasipavanje i zbijanje u suhom
 - Hidrauličko nasipavanje

- **HIDRAULIČKO NASIPAVANJE**

- Koristi se materijal pomiješan sa vodom koji se transportira cijevima (iskop se vrši plovnim bagerima).
- Suspenzija u omjeru 1:7–1:9 (materijal:voda).
- Ovakav način nasipanja je jeftiniji ukoliko se radi o velikim količinama materijala koji se nasipa.
- Pri nasipavanju može doći do segregacije.

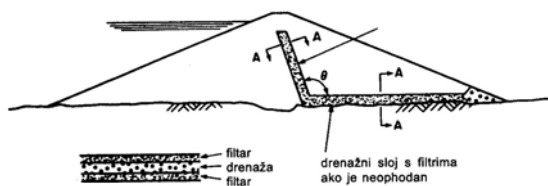


Hidraulički nasuta brana

- a) nasipanja s dvije strane: 1. obrnuti filtri, 2. kamena oslonična prizma, 3. "pulpovod", 4. mlaznica, 5. porozni nasip od lomljenog kamena, 6. nasip brane, 7. jezgro nasipa (glinasta i prašnasta frakcija), 8. taložno jezero, 9. drenažni bunar, 10. odvodna cijev.
- b) nasipanje s jedne strane: 1. obrnuti filtri, 2. kamena oslonična prizma, 3. "pulpovod", 4. porozni nasip od lomljenog kamena

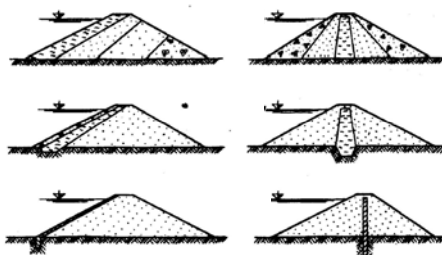
- **ZEMLJANE BRANE**

- **HOMOGENE**



Nasuta brana homogenog presjeka s drenažom

- **HETEROGENE**



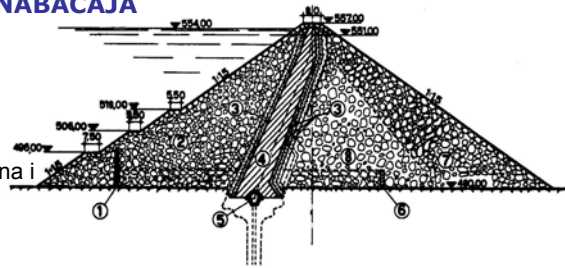
- **MJEŠOVITE**

(kameni nabačaj i zemlja)



□ BRANE OD KAMENOG NABAČAJA

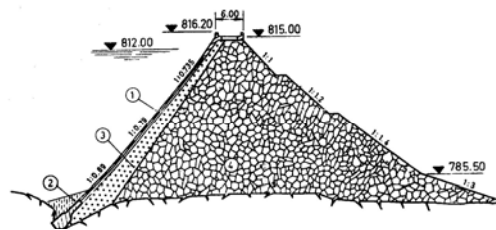
- S vertikalnom ili kosom nepropusnom jezgrom (glina, pjeskovita ilovača, prašina i sl.) ili dijafragmom (geomembrane i sl.)



Brana Sklope - poprečni presjek

1. uzvodni betonski zagat; 2. kameni nabačaj; 3. višeslojni filter;
4. glineno jezgro; 5. injekcijska galerija; 6. nizvodni zagat; 7. bolji
kvalitet kamena; 8. lošiji kvalitet kamena

- s uzvodnim vodonepropusnim ekranom (AB, asfalt-betonski, lijevani asfalt, geomembrane,...)



Brana Radoinja, H - 42 m, L - 361 m, V - 115 · 10³ m³

1. asfalt betonski ekran, 2. glinovita ispuna,
3. kamen ručno sagan, 4. kameni nabačaj

Evakuacija velikih voda

- Nasute brane su NEPRELJEVNE što znači da se koriste preljevi na boku doline i slobodnostojeći preljevi
- Prelijevanje preko nasute brane, pogotovo ukoliko je ono dugotrajno izrokuje erodiranje nizvodnog pokosa što može rezultirati rušenjem brane.
- Da se spriječi prelijevanje potrebno je dobro:
 - odrediti visinu krune brane
 - odrediti mjerodavni vodni val (velike vode)
 - dimenzionirati, izvesti i održavati evakuacijske organe
- Ako je nizvodno područje **naseljeno** evakuacijski organi se dimenzioniraju **na maksimalnu veliku vodu**.
- Ako je nizvodno područje **nenaseljeno** te pri poplavlivanju ne može doći do ugrožavanja ljudskih života evakuacijski organi se dimenzioniraju na **1000-godišnju veliku vodu**.

Hidraulička stabilnost brane

- Uz sve mjere i rješenja vododrživosti voda se procjeđuje kroz tijelo brane, temeljno tlo ili stijenu, i uzduž kontakata temelja brane s tlom ili stijenom. Procjeđivanje vode ukoliko nije u projektiranim granicama i nije kontrolirano može biti uzrok proboja vode i rušenja nasutih brana ("piping" ili "tunnelling" efekt).
- Ispiranje čestica se javlja kada se one ne mogu (svojom težinom ili oslanjanjem na druge čestice) oduprijeti hidrodinamičkoj sili procjedne vode.
- Treba osigurati:
 - Vodonepropusnost tijela brane
 - Vodonepropusnost temeljnog tla
- Treba osigurati **hidrauličku stabilnost brane**:
 - zaštitu od **UNUTRAŠNJE EROZIJE**
 - zaštitu od **REGRESIVNE EROZIJE**

UNUTRAŠNJA EROZIJA

- Unutrašnja erozija je ispiranje čestica sitnijeg materijala kroz šupljine većih čestica.
- Bolja zbijenost materijala manja mogućnost ispiranja čestica.
- Do unutrašnje erozije dolazi na kontaktu različitih materijala. Za sprječavanje unutrašnje erozije izvode se zaštitni prijelazni slojevi (filtarski slojevi). Moguće je izvesti jedan ili više prijelaznih slojeva.
- Svrha prijelaznih slojeva je da spriječe unutrašnju eroziju brane i pronošenje sitnih čestica u smjeru toka vode,
- Filtarski slojevi trebaju ispunjavati slijedeće uvjete:
 - Propusnost filtra treba biti znatno veća od propusnosti materijala iz kojeg voda dotječe,
 - Granulacija filtarskih slojeva mora biti takva da spriječi dalje prenošenje sitnih čestica kroz filter,
 - Granulacija materijala filtra ne smije dozvoliti unutrašnju eroziju filtra.
- Granulacija filtarskih slojeva određena je **FILTARSKIM PRAVILOM**.

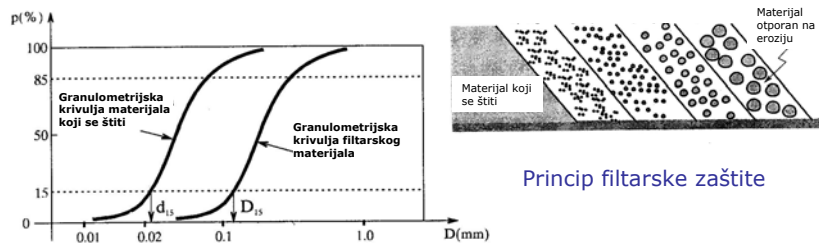
- **FILTARSKO PRAVILO** (definirano normom HRN...):

(F-filtarski materijal, O-bazni materijal: tlo, jezgra, prethodni filtarski sloj)

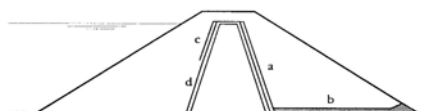
Orientaciono:

- 1.) $D_{15}^F : D_{15}^O > 5$ - onemogućava se začepljenje filtra
- 2.) $D_{15}^F : D_{85}^O \leq 5$ - onemogućava se ispiranje
- 3.) $D_{85}^O : \text{otvor} \geq 2$ – promjer zrna dva puta veći od otvora na drenažnoj cijevi
- 4.) što ujednačeniji granulometrijski sastav (da bi se ostvarila željena vodopropusnost i izbjegla segregacija pri čuvanju, transportu i ugrađivanju)

Primjer: Glina ima $D_{85}^O = 0,015$ mm, u filtru D_{15}^F 15 % mora biti manje od 0,075 mm.



- Minimalna debljina horizontalnog filtra iznosi 30 cm ili 50 promjera zrna D_{15} (izabire se veća vrijednost), dok vertikalni ili kosi filter ne bi smio iznositi manje od 2-3 m.



Slika 2.2.7. Filtri u zonama nasute brane s vertikalnom jezgrom

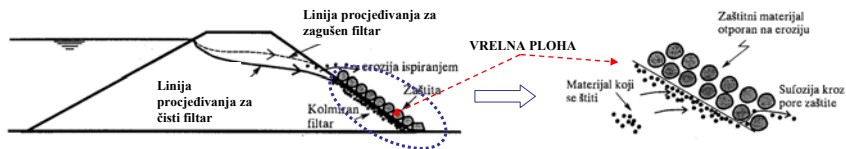
- a - nizvodna granica između jezgre brane i potpornog nasipa,
- b - područje nizvodno od jezgre gdje može nastati erozija na granici između temelja i tijela brane,
- c - uzvodna granica u gornjem dijelu jezgre gdje mogu nastati pukotine u jezgri (paralelne, poprečne i kose),
- d - uzvodna granica između jezgre i uzvodnoga potpornog tijela.



- Problem unutrašnje erozije (ali i regresivne) javlja se i pri pražnjenju akumulacije kada do izražaja dolazi funkcija uzvodnih filtarskih slojeva uz jezgru brane.

REGRESIVNA EROZIJA – “tunnelling” efekt

- Regresivna erozija nastaje na nizvodnoj zračnoj plohi na kojoj se pojavljuje tečenje vode (vrelna ploha) i tamo gdje su izlazni gradijenti veći od kritičnih, te dolazi do ispiranja čestica nasipa.

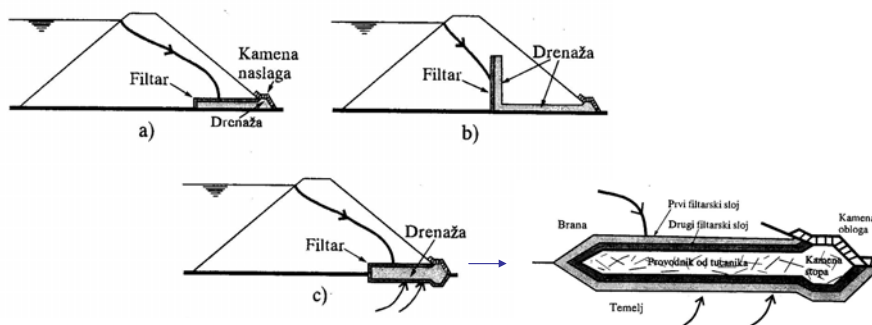


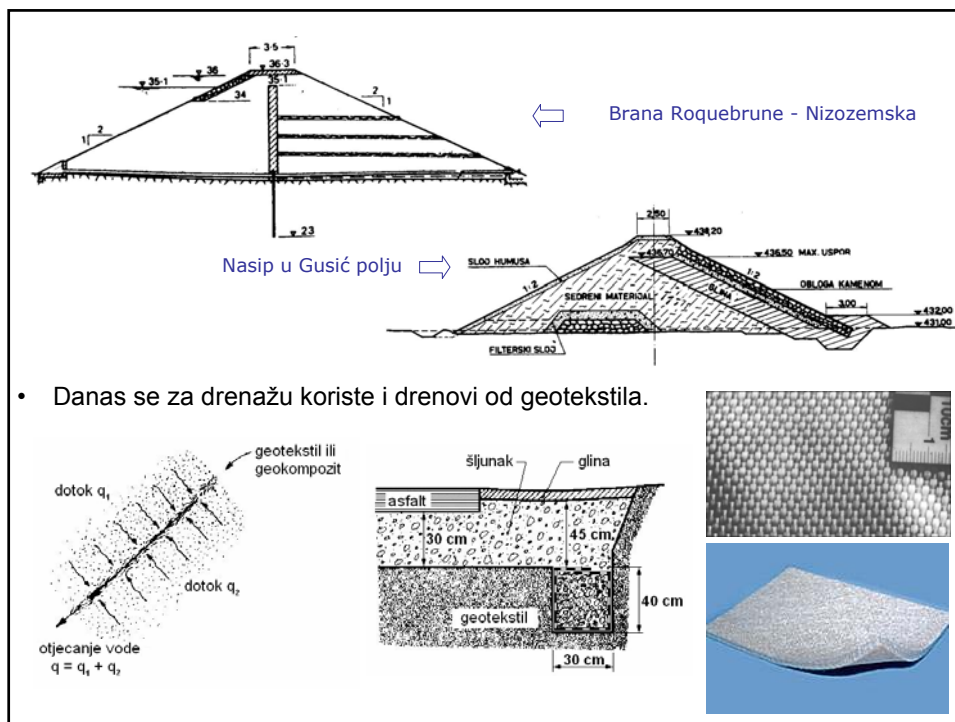
- Ako je izlazni gradijent i veći od kritičnog gradijenta i_{KR} dolazi do regresivne erozije:

$$i = \frac{\Delta h}{\Delta L}; \quad i_{KR} = (1-n) \frac{\rho_{\text{MATERIJALA}} - \rho_V}{\rho_V}; \quad i > i_{KR}$$

n – mjera šupljikavosti

- Ispiranje čestica na nizvodnoj kosini može se priječiti ugradnjom drenaznog sustava. Drenovi služe za kontroliranu odvodnju procjedne vode pri čemu materijal drena ima veći kritični gradijent od osnovnog materijala brane (povećane i_{kr}).
- Druga je mjera zaštite od regresivne erozije produljenje puta procjeđivanja (L), te time smanjenje izlaznog gradijenta.
- Zaštita nizvodnog pokosa i stabilnosti nožice - primjeri drenaznog sustava.

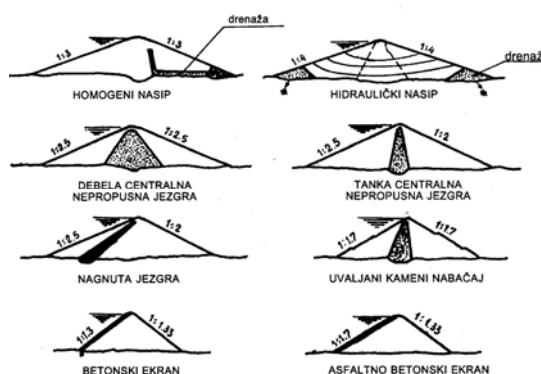




SPRJEČAVANJE/SMANJENJE PROCJEĐIVANJA (VODODRŽIVOST)

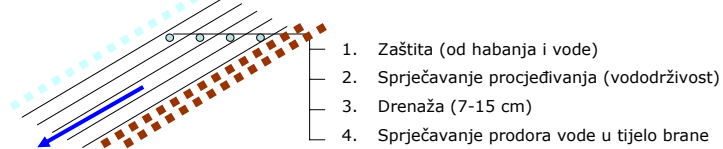
VODODRŽIVOST TIJELA BRANE

- Homogene zemljane brane su dobro vododržive (potporno tijelo je vododrživo).
- Heterogene brane imaju potporno tijelo koje nije dovoljno vododrživo pa se treba osigurati vododrživost brane izvođenjem vododržive jezgre ili ekrana (zemljani/glineni, betonski, čelični, geomembrane,...).



Osiguranje vododrživosti brana

- Asfalt-betonska obloga:
- Kada se izvede uzvodni vodonepropusni ekrani/obloge vanjski slojevi su vodonepropusni (1,2,4), predzadnji (3) služi kao drenaža.



- Zbog skupoće često se izvede samo jedan ili dva sloja.
- Asfalt-betonski ekrani:
 - Pogodan s aspekta slijegavanja materijala
 - Dobra vododrživost
 - Lako se oštećuju
 - Ne mogu se uvijek ugrađivati (nesmije biti vlage, niti temp. $<10^{\circ}\text{C}$,...)
- Cement-betonski i AB ekrani:
 - Ekran se izvodi u pločama 2-5 m
 - Moraju se ostavljati fuge koje se zatvaraju kitom (npr. bitumenom)
 - Debljina sloja $d=20-50$ cm
 - Podloga se radi što nepropusnija da voda ne probije u tijelo brane ukoliko dođe do pucanja ekrana

- Glineni ekrani ako se postavljaju na uzvodnoj strani moraju biti zaštićeni.
- UZVODNI POKOS nasute brane mora biti zaštićen od djelovanja valova i atmosferilija (posebno leda) pa se oblaže kamenim nabačajem ili ako se koristi asfalt-betonski, cement-betonski ili AB ekran tada on ima i zaštitnu funkciju.
- NIZVODNI POKOS zemljane nasute brane najčešće se zatravljuje (nakošenje nanosa). Ako je brana kamena ne treba zatravljivati, iako se ponekad zatravljuje iz estetskih razloga (uklapanje u okoliš, npr. brana na Lokvarskom jezeru).



- **VODODRŽIVOST TEMELJNOG TLA (produljenje procjednog puta)**

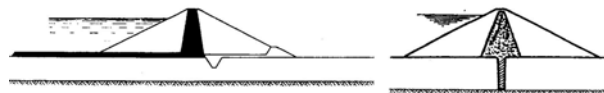
- Djelomična ili potpuna zamjena tla – produženje jezgre/temelnog klina



- Uzvodni z

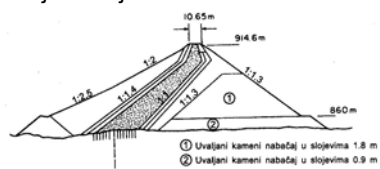
Djelomični temeljni klin Temeljni klin do nepropusnog sloja

- Dijafragma



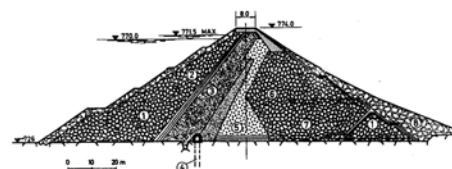
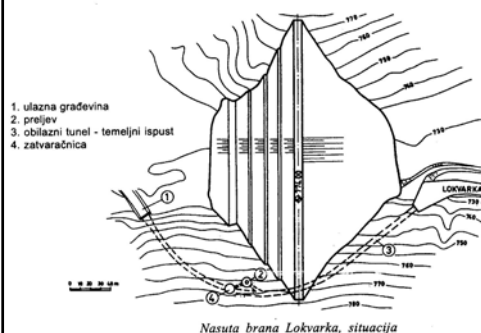
Uzvodni glineni zastor Dijafragma

- Injektiranjem



- **Osnovno pravilo:**

Treba težiti da se porni tlakovi u jezgri i procjedna linija u nizvodnom potpornom tijelu snize na minimum, a procjedne vode treba skupiti na dnu i preko zaštićenog drenážnog sustava izvesti izvan brane.



1. kameni nasip - dolomit, 2. troslojni filter, 3. glina, 4. injekcijska zavjesa, 5. kameni nasip - trošni škiljac, 6. jedri škrljac, 7. drenáža, 8. balast

Nosivost i stabilnost brana - mehanička stabilnost brana

- Brana preuzima hidrostatsko opterećenje i sa svojom vlastitom težinom prenosi ga na temeljno tlo.
- MEHANIČKA STABILNOST brana podrazumijeva:
 - Stabilnost kosina
 - Stabilnost temeljnog tla
- Stabilnost zemljanih nasipa (Coulomb, 1773.g.), zakon otpora vezanog zemljišta na smicanje dan je jednačinom:

$$\tau = c + \sigma \cdot \operatorname{tg} \varphi$$

tj. kohezijom ($c=\text{const.}$) i unutarnjim trenjem (φ); a $\operatorname{tg} \varphi$ ovisi od normalnog naprezanja (σ) u ravni smicanja.

- Prema Terzaghi-ju, po principu efektivnih napona, otpor zemljišta dan je izrazom:

$$\tau = c + (\sigma - u) \operatorname{tg} \varphi$$

gdje je:

u – neutralni napon kod opterećenja (povni tlak)

σ – ukupni napon

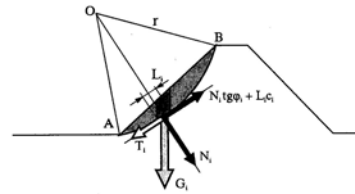
$\sigma' = (\sigma - u)$ – efektivni napon

- Nagibi uzvodnih i nizvodnih kosina temelje se na parametrima osobina materijala koji se ugrađuju u tijelo brane i koji se utvrđuju na principima MEHANIKE TLA.
- Analize stabilnosti kosina nasutih brana danas se provode korištenjem:
 - Metode granične ravnoteže
 - Metode teorije plastičnosti
 - Metode konačnih elemenata

- METODE GRANIČNE RAVNOTEŽE:

- Rezultantna metoda:

- Metoda kruga trenja
 - Metoda logaritamske spirale
 - Grafička metoda



- Metoda lamela:

- Grafička metoda
 - Analitička metoda (Švedska metoda momenata – kružni oblik klizne plohe, Bishopova metoda za heterogeni presjek – kružni oblik klizne plohe i metode s proizvoljnim oblikom klizne plohe: Nonveiller, Spencer, Carter)

- METODA TEORIJE PLASTIČNOSTI

- Ovom metodom određuje se granično stanje naprezanja, odnosno analiziraju se uvjeti koji dovode do stvaranja plastičnih deformacija na kosinama.

- Primjena teorije plastičnosti temelji se na korištenju diferencijalnih jednačbi ravnoteže u ravnini i Coulomb-Mohrovom uvjetu sloma.

- Metode:

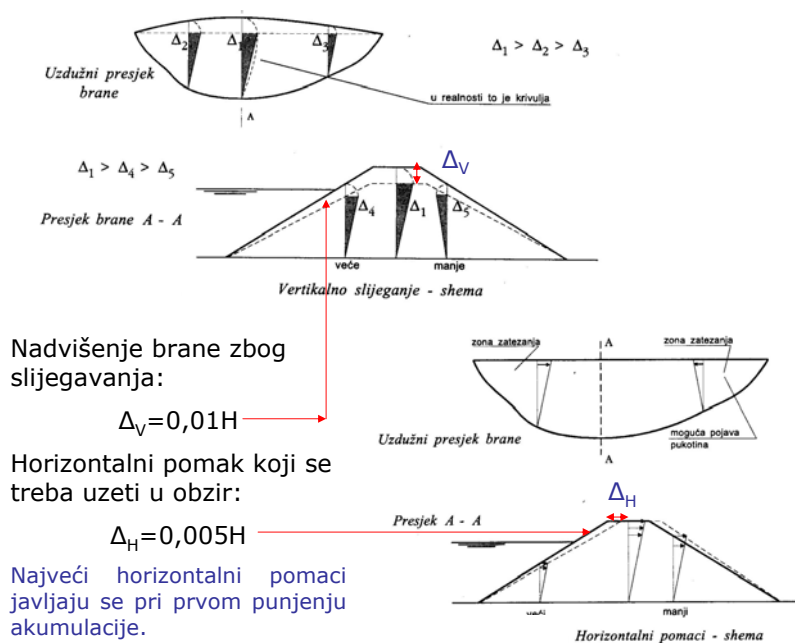
- Postupak Sokolovskoga
 - Limitna analiza

- PRI PROJEKTIRANJU NASUTIH BRANA TREBA ANALIZIRATI SLIJEDEĆE SLUČAJEVE:

- Analizu stabilnosti izgrađenog objekta (kraj građenja)
 - Analizu opterećenog objekta (puna akumulacija)
 - Analizu naglog pražnjenja akumulacije

Deformacije brane i temelja - stišljivost

- Stišljivost – slijeganje brane – deformacije tijela brane
- Kod određivanja konstruktivnih dimenzija nasutih brana treba analizirati slijeganje brane i njene podloge, da bi se moglo odrediti potrebno nadvišenje krune brane.
- Potrebno je poznavati modul stišljivosti sloja koji se sliježe i rasprostiranje naprezanja.
- Koristi se Boussinesquova teorija za homogeni i izotropan elastičan međuprostor.
- Na osnovi koeficijenata konsolidacije i vremena trajanja konsolidacije određuje se vremenski tijek slijeganja.
- Kod slijeganja brane i tla dolazi do vertikalnih (0,01H) i horizontalnih pomaka (0,005H).



- Slijeganje je više izraženo kod nasutih zemljanih brana nego kod brana od kamenog nabačaja.
- Tijekom eksploatacije potrebno je mjeriti pomake i slijegavanje brane.
- Problemi:
 - Neravnomjerno slijeganje:
 - Nastaje uslijed asimetrije profila, strmih bokova, naglih lomova u temeljnoj spojnici, slijeganjem temelja i sl. – stvaranje pukotina
 - Potrebno je koristiti visokoplastičnu glinu za jezgru
 - Posebno su osjetljive nasute brane s vododrživim ekranom
 - Veća stišljivost jezgre od susjednih zona – “vješanje jezgre” o susjedne zone.



Geometrijske i konstruktivne karakteristike

- Standard HRN U.C5.020. 1980. :
Projektiranje nasutih brana i hidrotehničkih nasipa: Tehnički uvjeti
- Os brana je većinom u pravcu, mada suvremena rješenja usvajaju konveksno zakrivljenu os brane.
- **ŠIRINA KRUNE BRANE** – ovisi o radnom prostoru koji je potreban u izvedbi i korištenju prometnica, te o visini brane.

$$b_K = 1,1\sqrt{H} + 1(\text{m})$$

- Minimalna širina iznosi 3 m, a za brane duže od 500 m širina iznosi barem 6 m.

- **NADVIŠENJE KRUNE BRANE** – ovisi o visini valova (h_V) i visini penjanja valova (h_{PV} ; ovisi o nagibu pokosa i obradi površine), te sigurnosnoj visini ($h_s = 0,5-0,7$ m):

$$h_{NAD} = h_V + h_{PV} + h_s$$

- Za brane $H \leq 15$ m visine minimalno nadvišenje iznosi 1,5 m.
- Za brane $H > 15$ m visine minimalno nadvišenje iznosi 2 m.
- **VISINA VALA** se određuje na temelju:
 - Usvojene brzine, pravca i trajanja vjetra koji djeluje okomito na os brane
 - Vrijednosti efektivne dužine razgona vjetra za pravac $\pm 45^\circ$ od pravca djelovanja mjerodavnog vjetra prema izrazu:

$$L_{EF} = \frac{\sum_i X_i \cos \alpha_i}{\sum_i \cos \alpha_i}$$

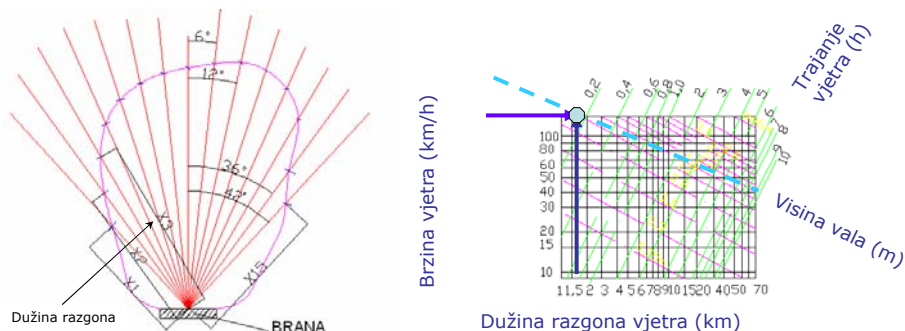
- gdje je: $\alpha_i = 0; \pm 6^\circ; \pm 12^\circ; \pm 18^\circ; \pm 24^\circ; \pm 30^\circ; \pm 36^\circ; \pm 42^\circ$

X_i = odgovarajuće dužina razgona

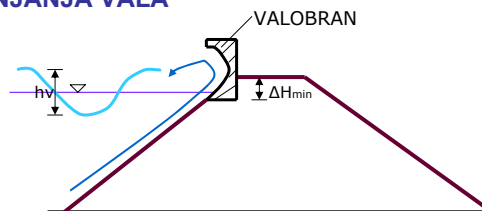
$$\sum \cos \alpha_i = 13,15$$

$\alpha_i = 0$ odgovara okomici na pravac pružanja brane

- Za poznate L_{EF} i brzinu (npr. $L_{EF} = 5$ km u $v_{vjetra} = 100$ km/h) uz korištenje dijagrama određuje se visina vala cca 1.5 m.



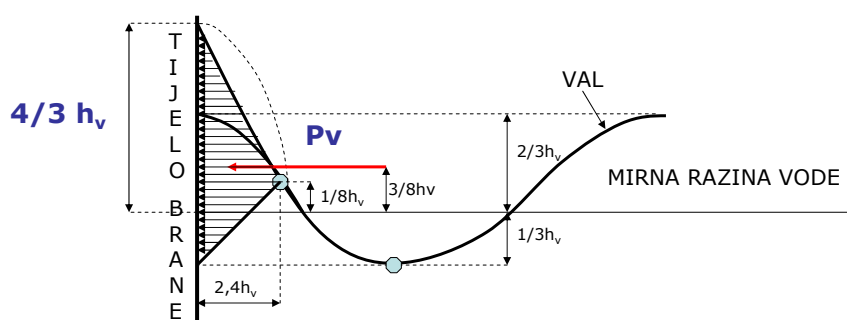
- **VISINA PENJANJA VALA**



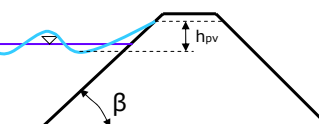
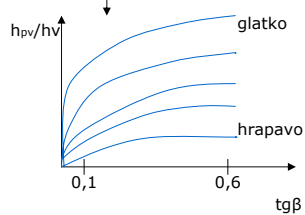
• VALOVI USLIJED VJETRA

Visina penjanja vala

$$h_{pv} = 4/3 h_v$$

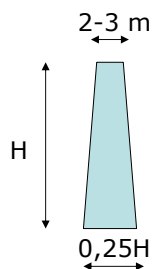


- Visina penjanja h_{pv} :
 - ovisi o pokosu (nagibu) brane
 - ovisi o obradi materijala (veće vrijednosti za glatki materijal)



Prema ICOLD-u trebalo bi dodati još visinu uslijed seiche efekta.

□ DIMENZIJE JEZGRE



- Kod nasutih brana se također mogu izvoditi kontrolne galerije.
- One se izvode u temeljima jezgre.



Temelji jezgre



Sklope brana i HE, rijeka Lika,
jezero Kruščica

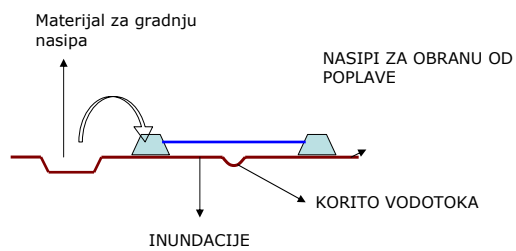
NASIPI OBRANE OD POPLAVE

- Grade se paralelno s vodotokom i sprječavaju razlijevanje velikih voda.
- Nasipi su samo povremeno (za vrijeme velikih voda) u funkciji.
- Ukoliko štite naselja od poplave dimenzioniraju se na **1000**-godišnju veliku vodu, a ako štite samo poljoprivredne površine na **100**-godišnju veliku vodu ili se velika voda određuje na temelju ekonomskih analiza.
- Nasipi su najčešće homogeni (mogu imati drenažu uz vanjsku nožicu).
- Ako dolazi do porasta vode iznad kote nasipa postavljaju se vreće s pijeskom na krunu nasipa.



- Nasipi za obranu od poplava obično su zatravljeni s obje strane (zaštita od erozije i poboljšanje vodonepropusnosti).

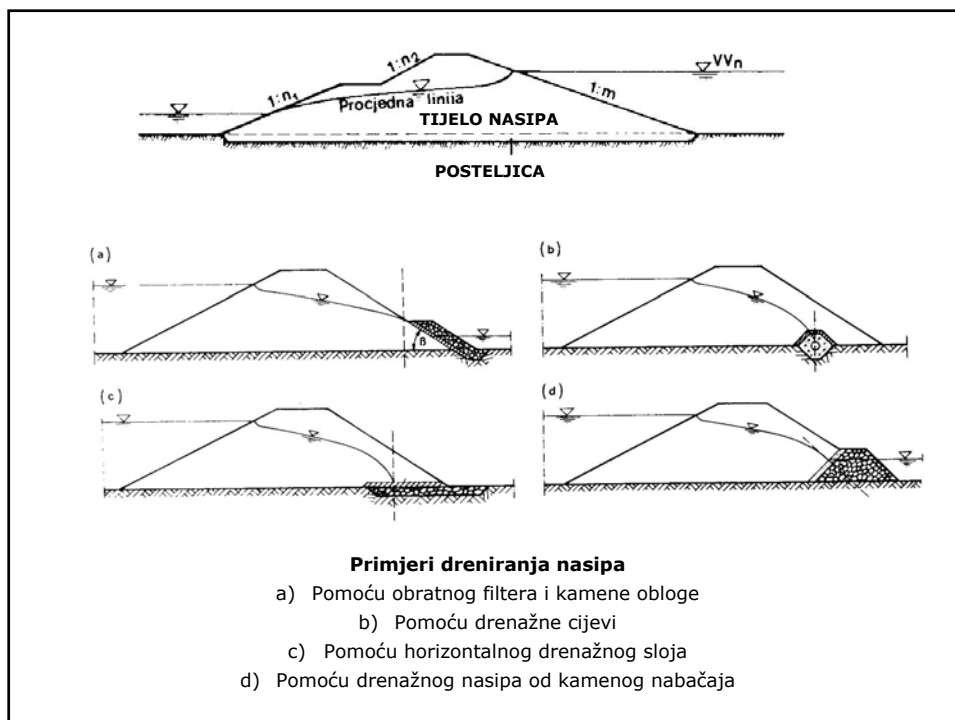
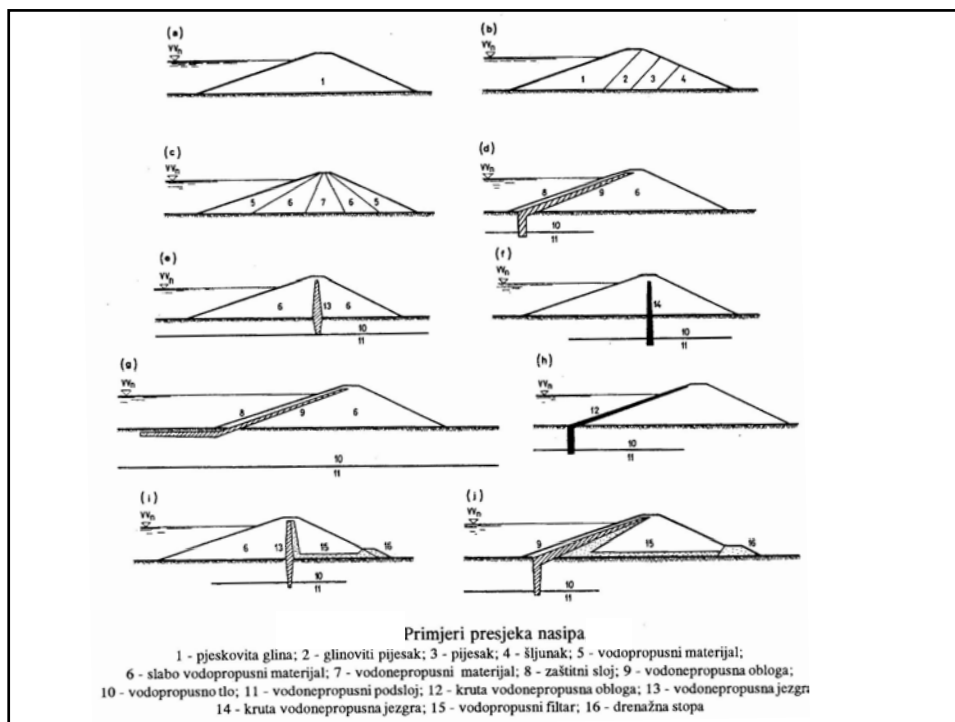
- Javljaju se slični problemi kao kod nasutih brana (npr. regresivna erozija).

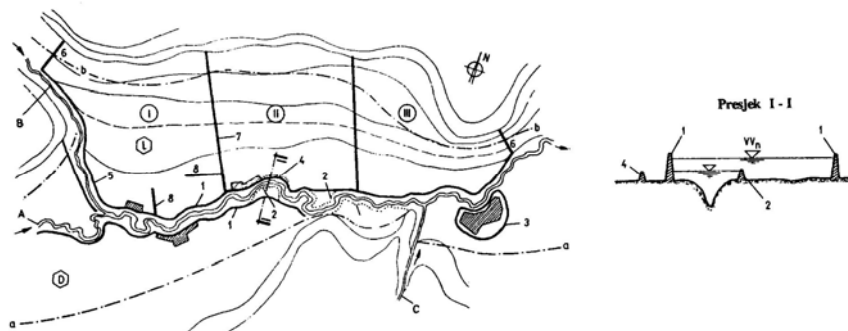


← Nasipi na Mirni

Akumulacijsko jezero, nasipi, pokretna brana za HE Dubrava (Drava) →







Situacijska shema rasporeda nasipa prema njihovoj namjeni

- A - matični vodotok; B - lijevi pritok; C - desni pritok;
D - desna inundacija (područje između vodotoka A i granice inundacije a - a);
L - lijeva inundacija (područje između vodotoka A i granice inundacije b - b)
1 - glavni nasip; 2 - ljetni nasip; 3 - obuhvatni nasip; 4 - dolmice; 5 - usporni nasip; 6 - priključni nasip;
7 - poprečni nasip; 8 - pristupni nasip; I, II i III - polderi