

# KORIŠTENJE VODNIH SNAGA

**BRANE**

**(ponavljanje HG)**



# Podjela prema materijalu:

---

- **NASUTE BRANE**

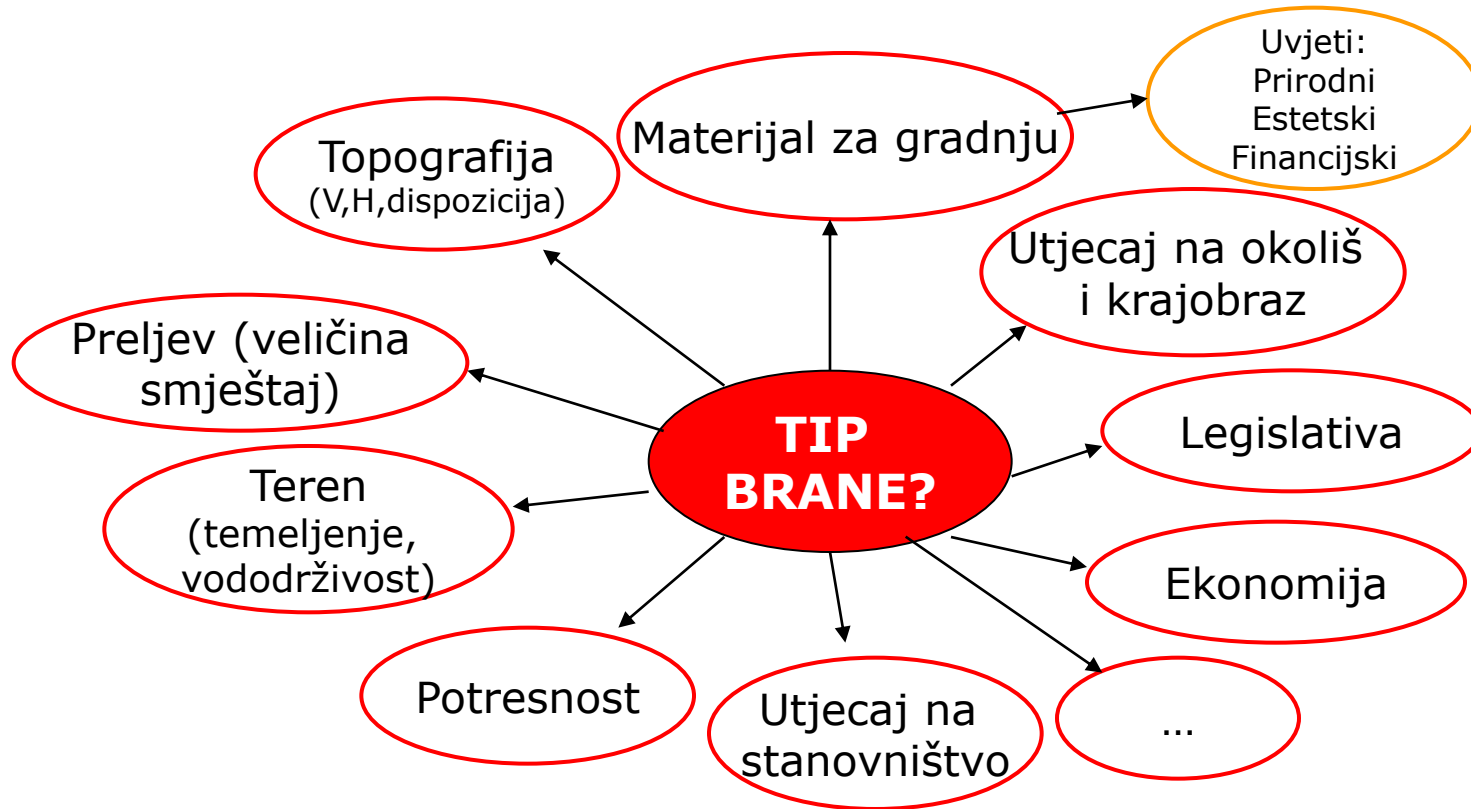
- **zemljane** brane

- od **kamenog nabačaja**

- **BETONSKE BRANE**

# Faktori koji utječu na izbor tipa brane:

---



# IZBOR (I)

---

## □ **NASUTE BRANE**

### ■ **PREDNOSTI:**

- Minimalni zahtjevi kod temeljenja i prilagodljivost skoro svim vrstama terena
- Mogućnost korištenja raznovrsnog i heterogenog materijala za nasip
- Jeftino i brzo ugrađivanje

### ■ **MANE:**

- Osjetljivost na prelijevanje
- Osjetljivost na procjeđivanje i ispiranje materijala (unutrašnja i regresivna erozija)
- Za evakuaciju velikih voda potrebni su posebni betonski objekti izvan brane
- Veliki obim radova (zbog blagih kosina)

# IZBOR (II)

---

## □ **BETONSKE BRANE**

### ■ **PREDNOSTI:**

- Izdržljivost na prelijevanje i procjeđivanje
- Manje količine materijala (strm nagib)

### ■ **MANE:**

- Visoki zahtjevi za temeljenje (visoka nosivost tla, niska deformabilnost, nepovoljne u izrazito potresnoj zoni)
- Visoka jedinična cijena (spor rad i brojnija radna snaga)
- Za lučne brane s obzirom na veliko opterećenje bokova doline potrebna jedra nosiva stijena

# Djelovanja na branu:

---

- **stalna**
  - vlastita težina brane, tlak vode u porama, tlak vode, uzgon, tlo, sve stalne mase (oprema) na brani,
- **promjenjiva**
  - temperaturne promjene, stezanja betona, smrzavanja vode u betonu, opterećenje ledom, valovi, povremena/pokretna opterećenja (kranovi, strojevi i sl.)
- **izvanredna**
  - potres

# BETONSKE GRAVITACIJSKE BRANE



**Grande Dixence**, Švicarska, najviša masivna gravitacijska brana visine 285 m, izgrađena 1961.

- Betonske gravitacijske brane suprotstavljaju se vanjskim silama vlastitom težinom.
- Važno je da tlo na kojem se grade:
  - ima dovoljnu nosivost da primi težinu brane i opterećenja koje brana prenosi na temelj,
  - jednoliko slijegavanje
  - malu vodopropusnost
  - monolitnu strukturu (bez pukotina)
- Nisu pogodne za potresna područja.

# Provjera sigurnosti za stabilnost betonske masivne gravitacijske brane

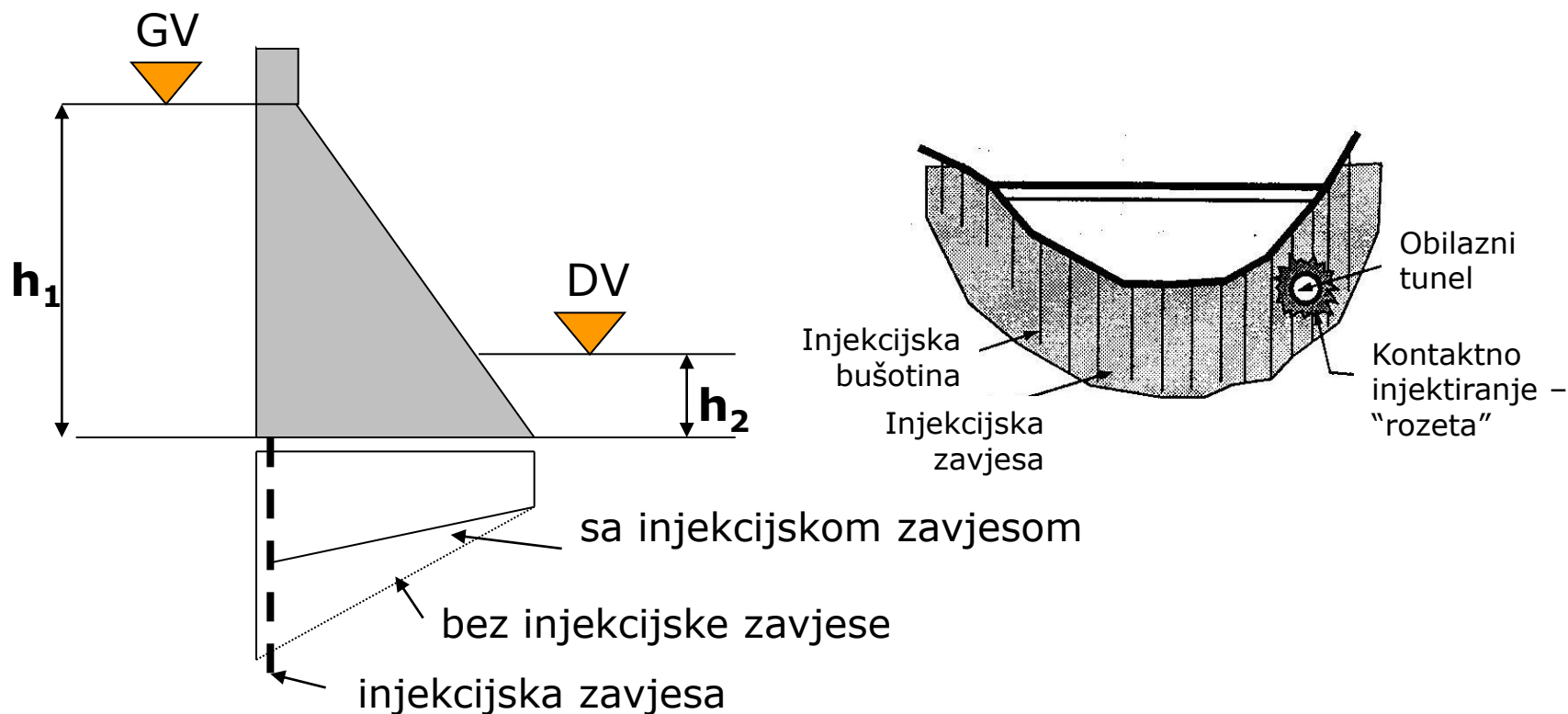
---

- U okviru kontrole graničnog stanja nosivosti provodi se provjera:
  - stabilnost na prevrtanje i
  - stabilnost na klizanje.



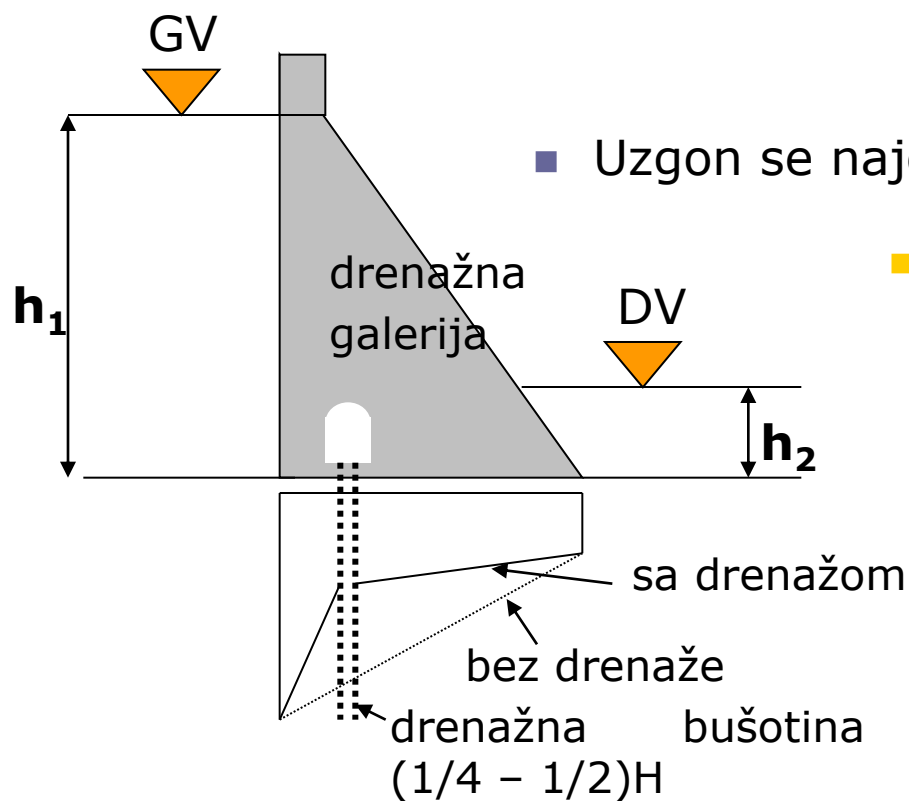
# Smanjenje uzgona

- 1.) Izvođenjem injekcijske zavjese
  - Injektira se smjesa za povećanje vododrživosti.



# Smanjenje uzgona

## 2.) Dreniranjem iza inekcijske zavjese

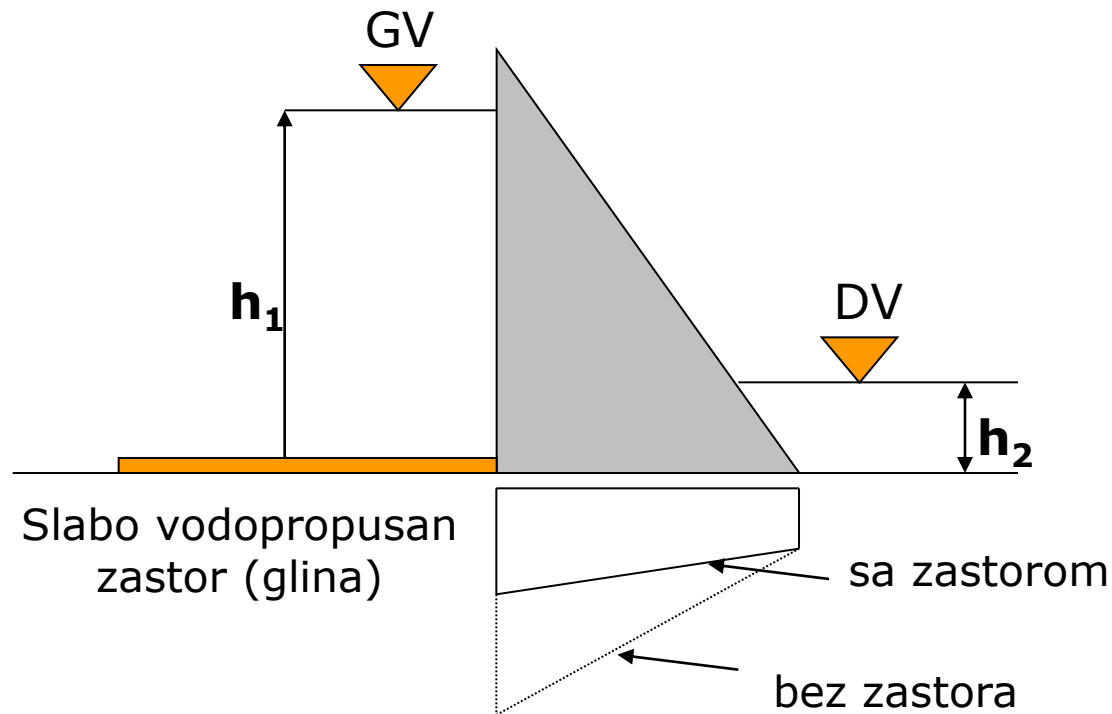


■ Uzgona se najčešće ukupno reducira na 1/3

■ Galerije služe za kontrolu stanja brane (procjeđivanje,...) i omogućuju dodatno injektiranje i dreniranje.

# Smanjenje uzgona

- 3.) Produžavanje puta izvodi se izvođenjem horizontalnog slabo vodopropusnog zastora



# Izgradnja brane - latentna toplina

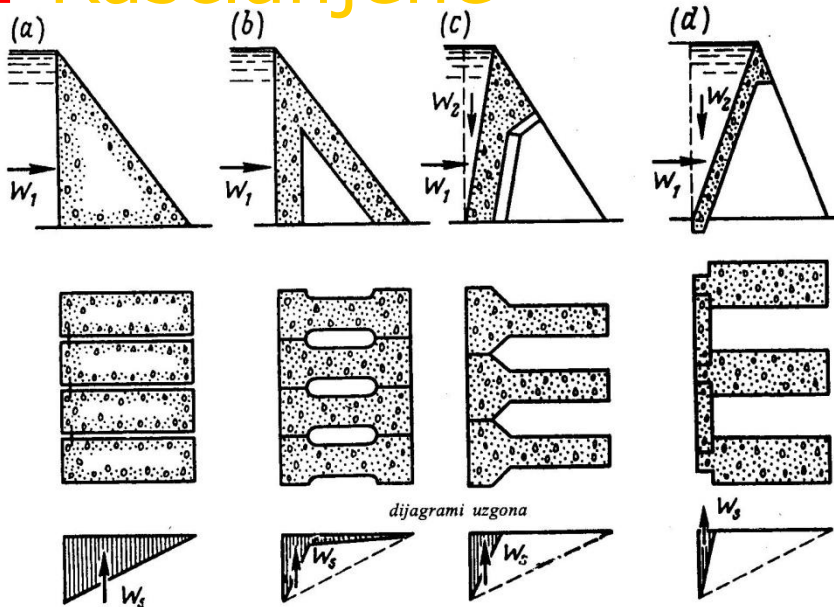
---

- Problem visokih hidratacijskih temperatura i širenja betona u prvoj fazi te stezanje betona u završnoj fazi
- Problem se rješava tehnologijom ugradnje i održavanjem svježeg betona
  - Koriste se posebni cementi (s manjom hidratacijskom toplinom i s odgovarajućim dodacima)
  - Koristi se beton s manjom količinom cementa (ali da se s time ne ugrozi nosivost i vododrživost betona)
  - Koriste se posebni recepti za spremanje betona (kombiniranje različitih granulacija i korištenje krupnijih frakcija)
  - Omogućuje se hlađenje betona nakon ugradnje ili se snizuje temperatura betonske mješavine korištenjem hladne vode (dodavanje leda u vodu) i agregata koji nije izložen suncu
  - Betoniranje ne smije biti kontinuirano – betonira se u blokovima (12-15m)

- 
- Beton treba biti:
    - Dovoljne čvrstoće
    - Otporan na smrzavanje
    - Dovoljno vododrživ
    - Niske hidratacijske temperature
    - Niske cijene koštanja
  
  - Zoniranje: na višim kotama beton slabije čvrstoće nego na nižim kotama, beton veće čvrstoće na uzvodnom i nizvodnom (habanje) dijelu brane, preljevima i sl.

# OLAKŠANE BRANE

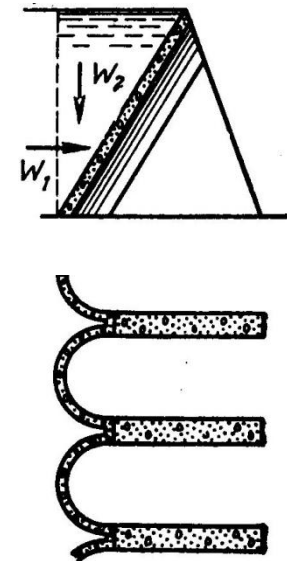
## □ Raščlanjene



Razvojni tok olakšano gravitacijskih brana

- a) masivna gravitacijska brana,
- b) olakšano gravitacijska brana (sa šupljinom),
- c) brana s kontraforima i masivnom glavom,
- d) brana s kontraforima i ravnom pločom

## □ Višelučne



### □ Prednosti olakšanih brana nad gravitacijskim:

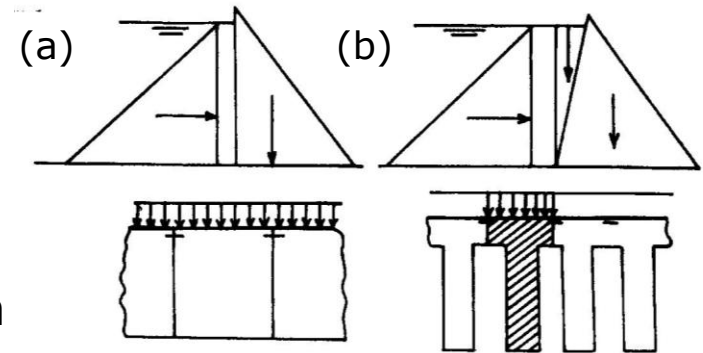
- 20-40% manji volumen betona u tijelu brane (manji troškovi 15-35% jer je beton, zbog složenosti izgradnje, skuplji 5-10%)
- Manji utjecaj temperature hidratacije i skupljanja
- Bolje iskorištene fizičko-mehaničke karakteristike materijala
- Mogu se graditi na "lošijem" tlu

# Raščlanjene brane - kontraforne

- Uz vlastitu težinu kod olakšanih brana prevrtanju i klizanju se suprotstavlja vertikalna komponenta hidrostatičke sile (težina vode iznad uzvodnog lica).

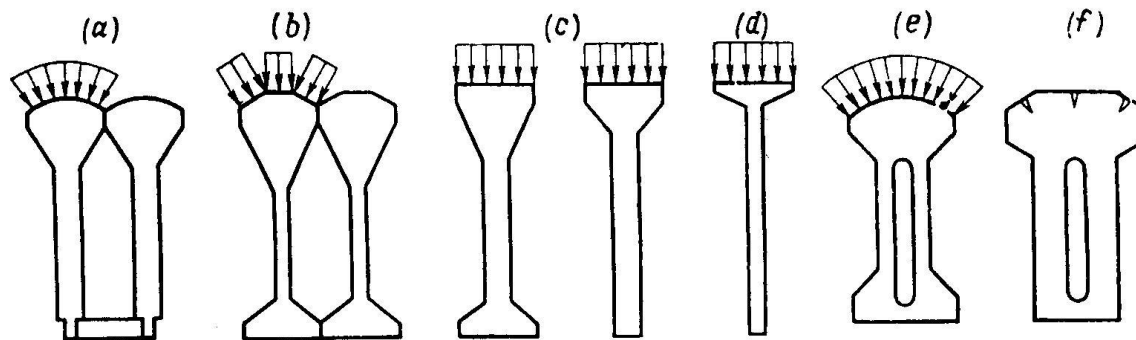
Gravitacijska brana (a)

Brana s kontraforima "T"-oblik (b)



- Vrste:

- S kontraforima s masivnom glavom
- S pločama i kontraforima



Horizontalni presjek kontrafora s masivnom glavom

a) zakrivljena glava i jednozidni kontrafor, b) poligonalna (dijamantna) glava i jednozidni kontrafor, c - d) ravna glava i jednozidni kontrafor, e) zakrivljena glava i šuplji ili dvozidni kontrafor, f) poligonalna glava i šuplji ili dvozidni kontrafor

# Brana Roselend - Francuska

## BRANA

- visina 150 m
- duljina 804 m
- Širina krune 3 m
- Širina stope 22 m

## AKUMULACIJA

- Volumen  $187 \times 10^6 \text{ m}^3$
- Površina  $3.2 \text{ km}^2$

## HE

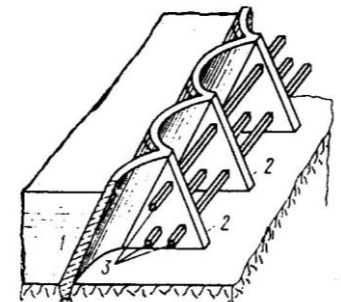
- Pad 1,250 m
- Instalirana snaga  $6 \times 91 \text{ MW} = 546 \text{ MW}$  (Pelton turbine)





# Višelučne brane

- Korištene su u prošlosti gdje raspoloživog materijala za gradnju nije bilo u blizini i čija je doprema bila vrlo skupa, a ljudski rad jeftin.
- Danas se grade visoke višelučne brane od armiranog betona.
- Lučna brana koristi "efekt luka" te opterećenja prenosi preko bokova na oslone (na bokove doline).
- Višelučna se nastoji od više lukova, a opterećenja se sa lukova prenose na kontrafore i preko kontrafora na temeljno tlo.
- Lukovi se grade pod kutem u odnosu na vertikalu.
- Masivni kontrafori se grade na udaljenosti 10-20 m.
- Višelučne brane se grade na "dobrom" temeljnom tlu-stijena.
- Prva višelučna brana, Meer Allum, je izgrađena u Indiji 1802.g



# Brana Daniel Johnson - Kanada

---

## BRANA

- visina 214 m
- duljina 1,314 m
- Širiona krune 3 m
- Širina stope 22.5 m

## AKUMULACIJA

- Volumen  $142 \text{ km}^3$
- Površina  $1,950 \text{ km}^2$

## HE

- Instalirana snaga  
1,592 MW + 1,064 MW



# Bartlett dam

## Type of dam

Concrete, multiple-arch  
buttress

Height

94.0 m

Length

251 m

Crest width

1.4 m

Base width

2.3 m

Volume

171,087 m<sup>3</sup>

Type of spillway

Service, gate-controlled

Spillway capacity

8,140 m<sup>3</sup>/s

Reservoir

Creates

Bartlett Lake

Capacity

219,789,000 m<sup>3</sup>

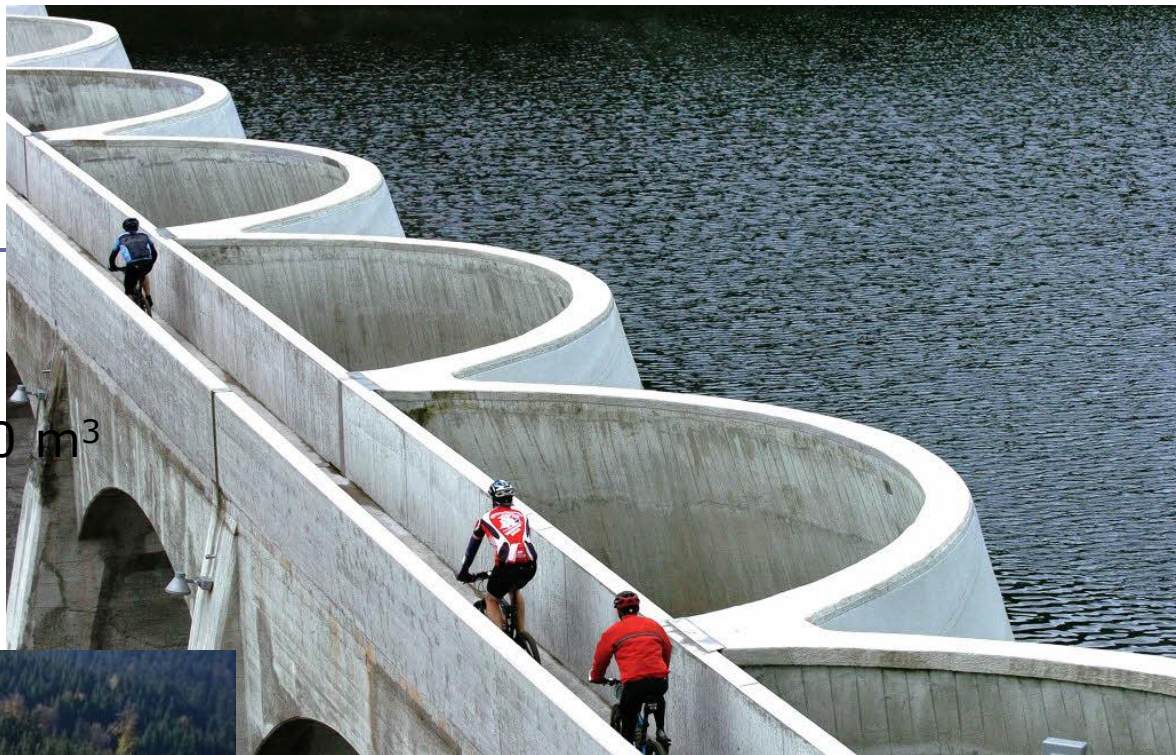
Surface area

11 km<sup>2</sup>

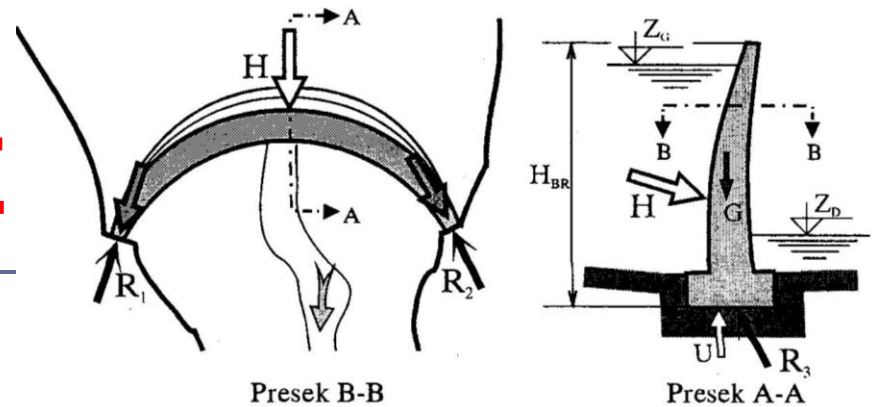


# Linach

visina	30.40 m
duljina	143.90 m
vol. akumulacije	1 100 000 m <sup>3</sup>
širina u kruni	0.4 m
širina u temelju	0.6 m



# LUČNE BRANE

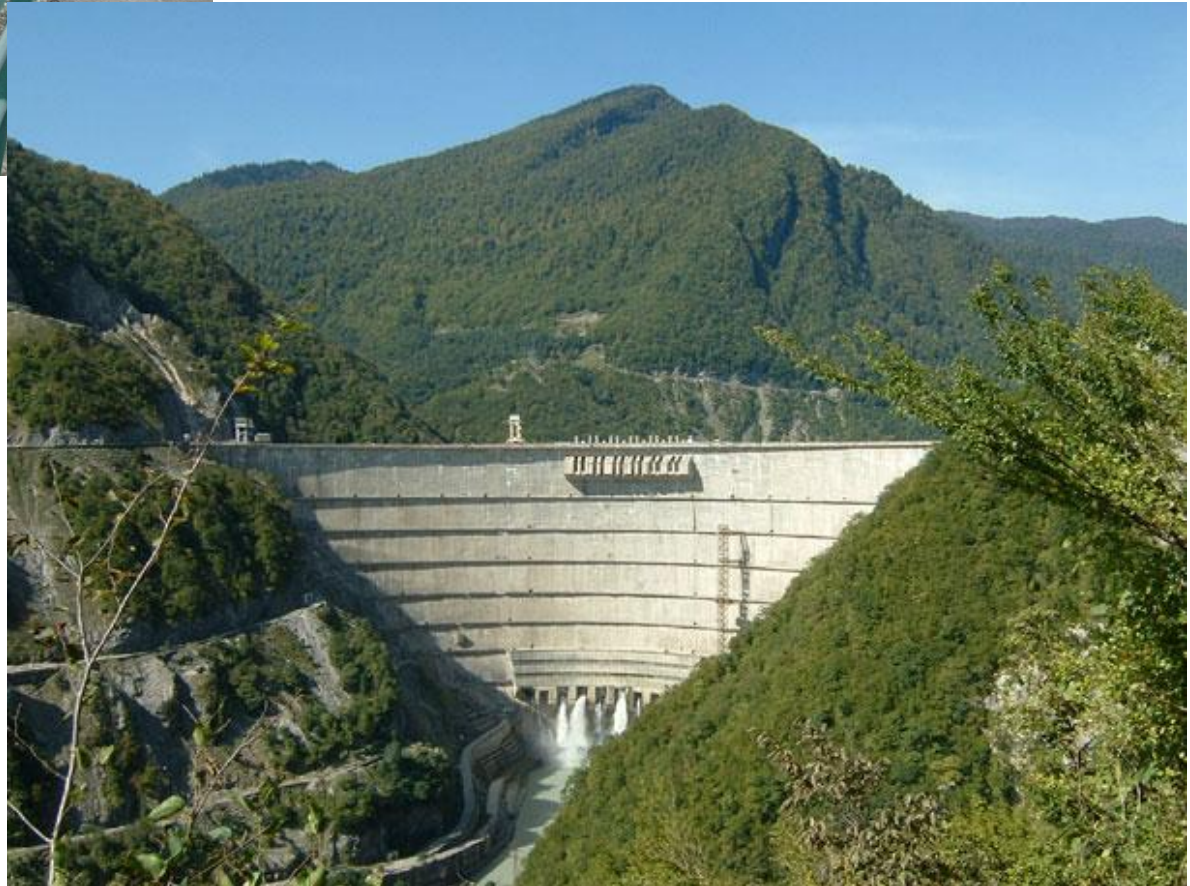


- Lučnim branama nazivaju se brane čiji je horizontalni presjek krivolinijskog oblika, u obliku luka. Opterećenje prenose uglavnom na bokove doline.
- Sigurnost i stabilnost konstrukcije ovisi o fizikalno-mehaničkim karakteristikama materijala u konstrukciji i nosivosti temelja.
- Lučne brane su u pravilu nearmirane (betoni sa 230-300 kg cementa po  $m^3$ ). Armiranje se koristi samo kod otvora i u kruni brane.
- Prednosti:
  - 40-60% su ekonomičnije od gravitacijskih
  - brže se grade
- Nedostaci:
  - zahtijevaju dobre uvjete temeljenja
  - zahtijevaju visokorazvijenu tehnologiju pripreme i ugradnje betona
  - zahtijevaju savjestan i iskusan nadzor i strogu kontrolu tijekom građenja i eksploatacije



Brana Letaj (Boljunčica)

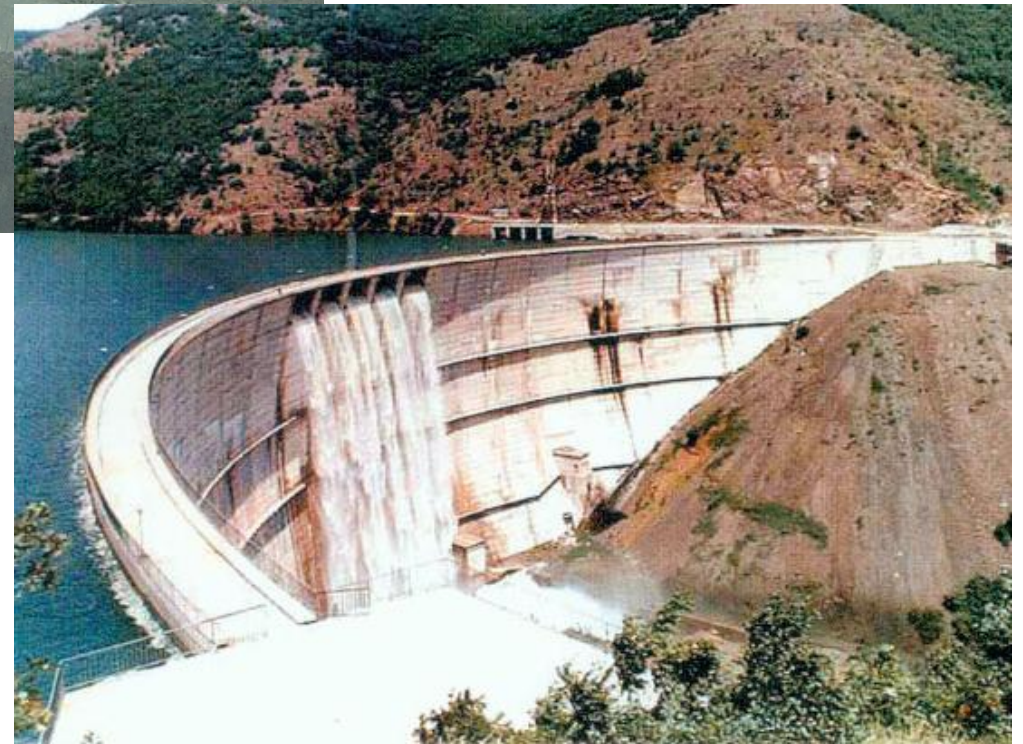
**Inguri**, Gruzija najviša  
lučna brana 272 m,  
izgrađena 1984. →





← **Hoover**, Colorado,  
Arizona-Nevada, SAD,  
lučna visine 223 m,  
izgrađena 1936.

**Glažnja**, Makedonija →

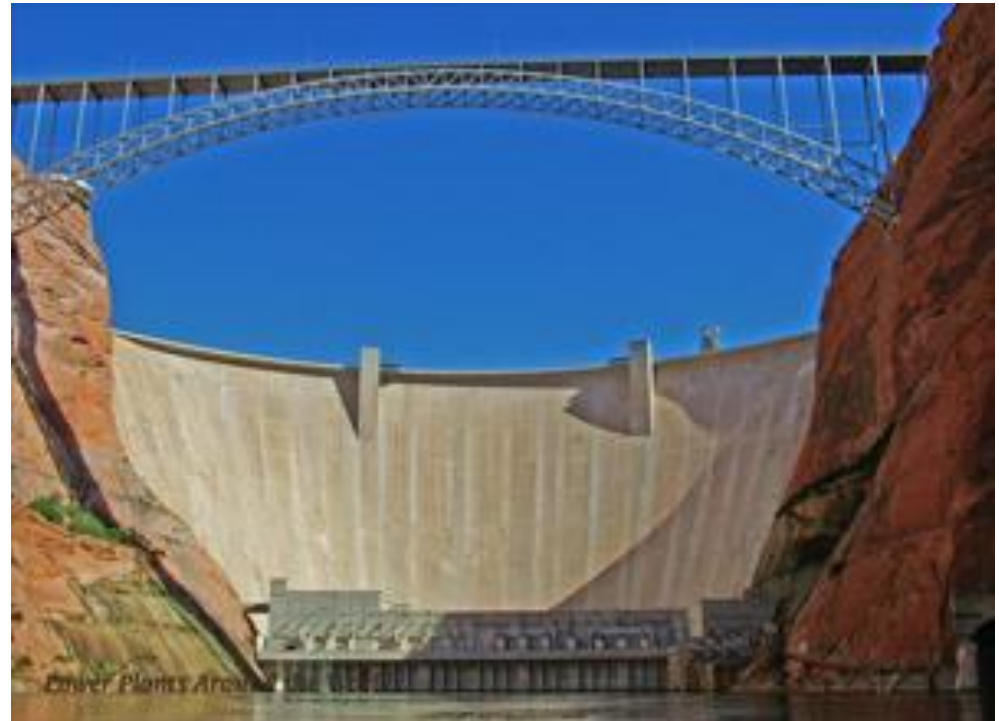




← **Brana Gordon,** →  
Australija



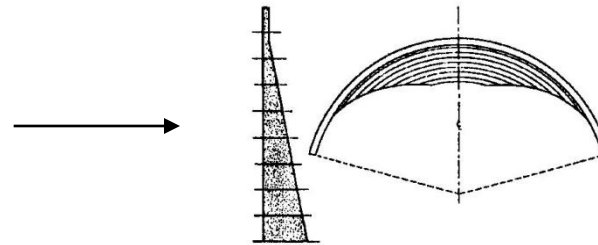
**Glen Canyon,** druga po visini lučna brana u SAD →



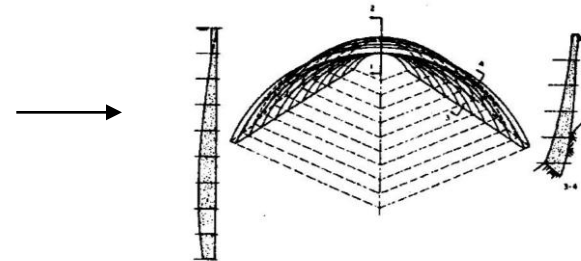


□ Vrste lučnih brana:

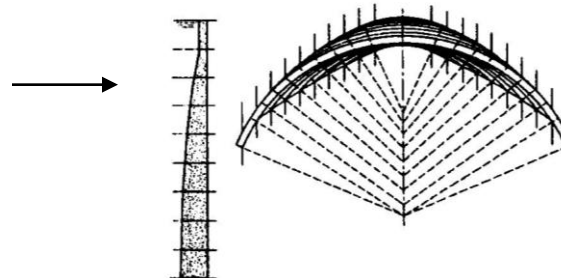
- s konstantnim radijusom



- s promjenjivim radijusom i konstantnim centralnim kutom



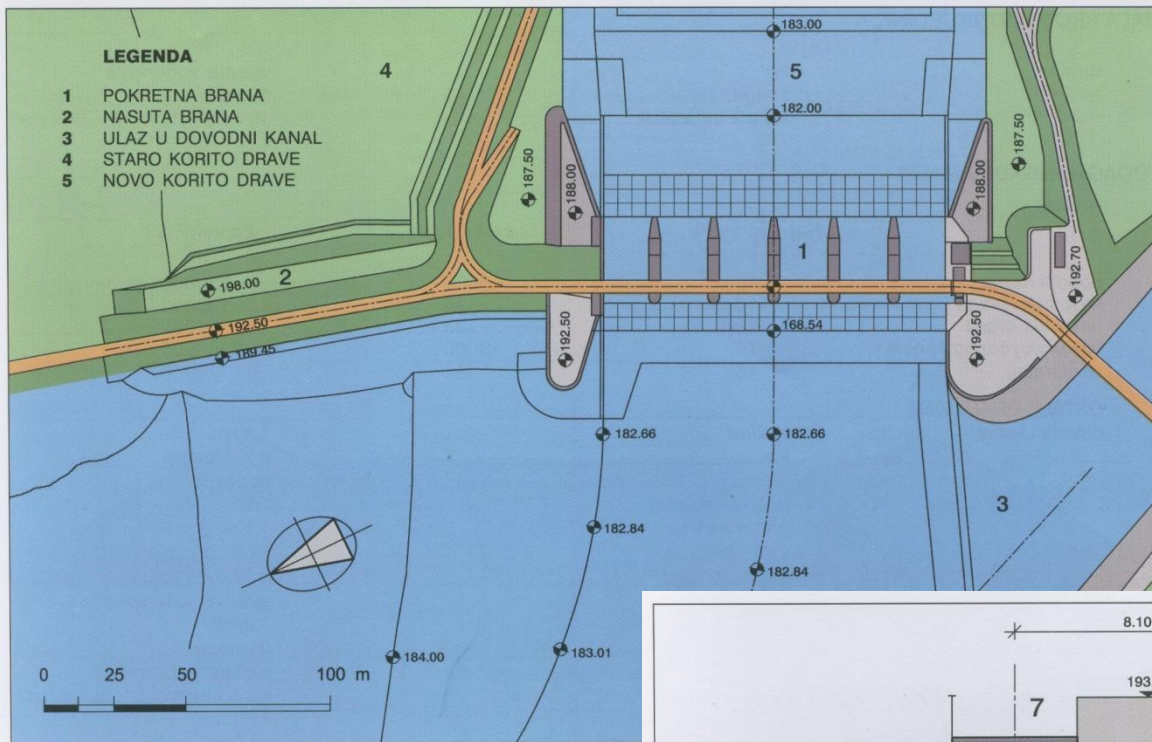
- s promjenjivim radijusom i promjenjivim centralnim kutom



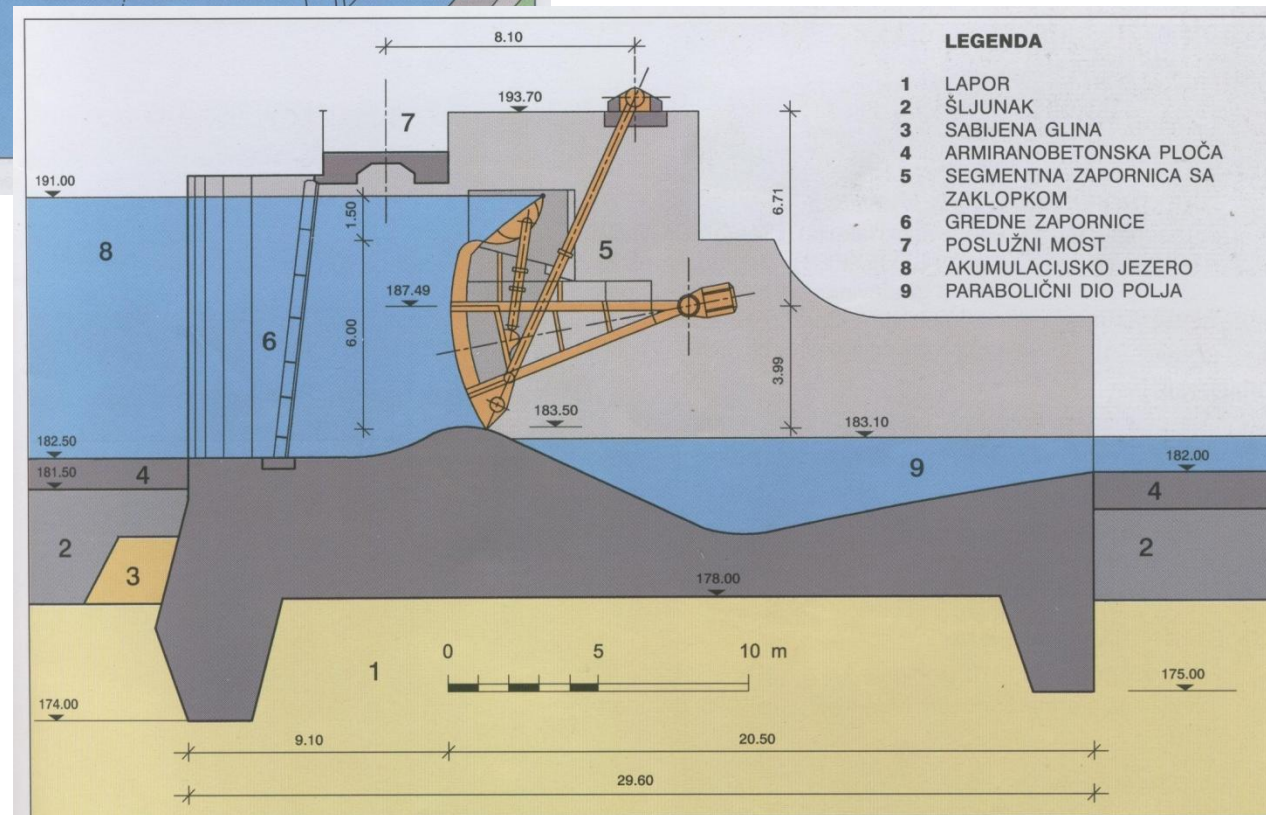
# RIJEČNE POKRETNE BRANE

---

- Grade se u nizinskim dijelovima rijeka, gdje su korita široka i pretežno se temelje na nekoherentnim materijalima. Najčešće se nalaze na plovnim putovima (brodske prevodnice) ili grade u cilju energetskog iskorištavanja vodotoka.
- Sastoje se od:
  - stabilnog (čvrstog) betonskog dijela: bokova, stabilnog preljevnog dijela sa slapištem, stupova, mostova (za komunikaciju lijeve i desne obale) i
  - pokretnog dijela kojim se regulira razina vode: veći broj protočnih polja s ustavama (zapornicama), koje preuzimaju hidrostatičko opterećenje i prenose ga na stupove



Brana na Dravi izgrađena za potrebe HE Varaždin



PRESJEK KROZ PROTOČNO POLJE POKRETNNE BRANE



← Brana na Dravi  
izgrađena za potrebe  
HE Varaždin

Brana na Dravi  
izgrađena za potrebe  
HE Dubrava



# 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,...)

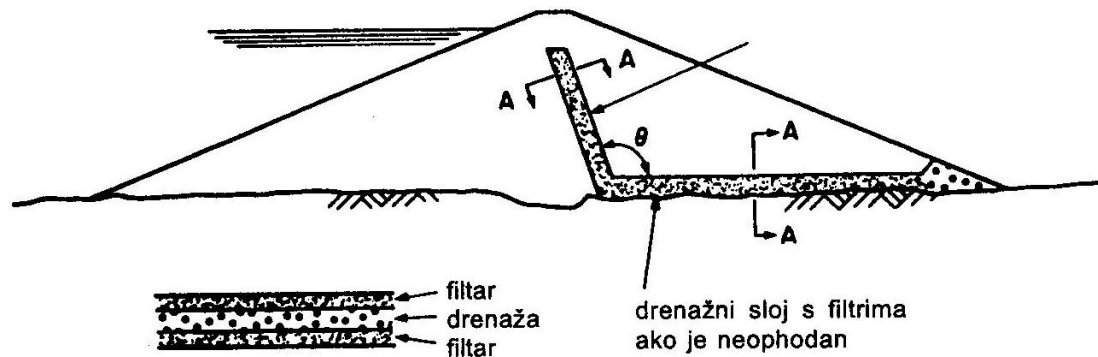
Height	260.5 m
Length	575 m
Crest width	20 m
Base width	1,128 m
Reservoir	
Capacity	2.6 km <sup>3</sup>
Surface area	52 km <sup>2</sup>

# Theri dam India



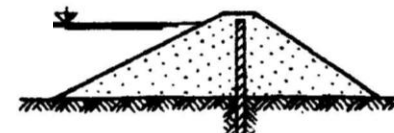
# ■ ZEMLJANE BRANE

## ■ HOMOGENE



*Nasuta brana homogenog presjeka s drenažom*

## ■ HETEROGENE

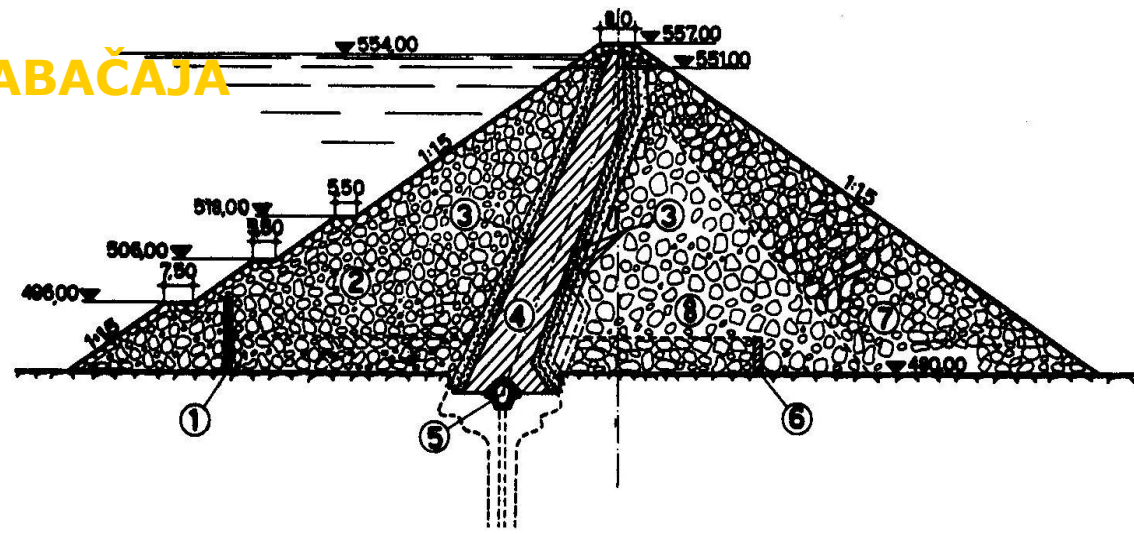


■ MJEŠOVITE  
(kameni nabačaj i zemlja)



## BRANE OD KAMENOG NABAČAJA

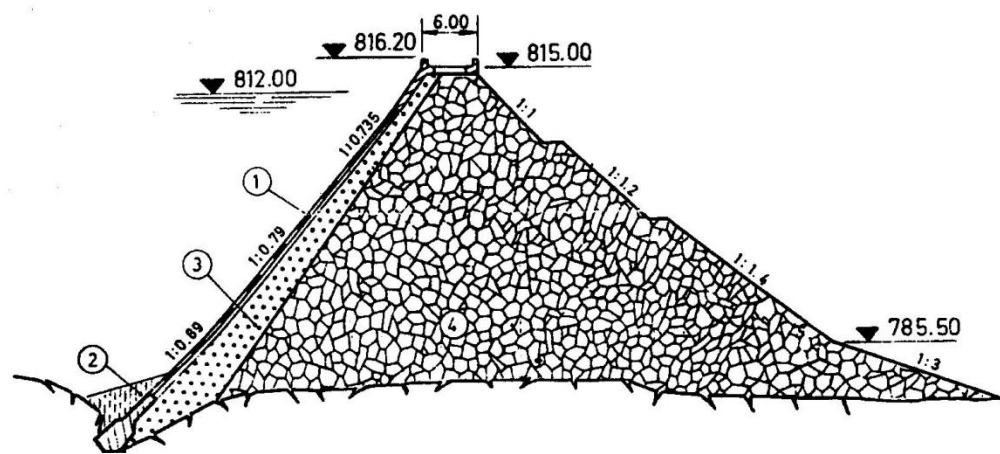
- S vertikalnom ili kosom nepropusnom jezgrom (glina, pjeskovita ilovača, prašina i sl.) ili dijafragmom (geomembrane i sl.)



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 · 10<sup>3</sup> m<sup>3</sup>

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



# Hidraulička stabilnost brane

---

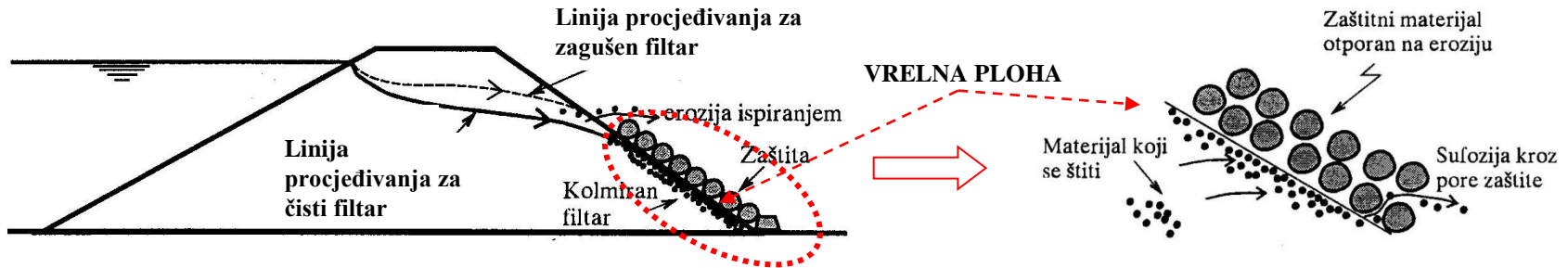
- Uz sve mjere i rješenja vododrživosti voda se procjeđuje kroz tijelo brane, temeljno tlo ili stijenu, i uzduž kontakata temelja brane s tlom ili stijenom. Procjeđivanje vode ukoliko nije u projektiranim granicama i nije kontrolirano može biti uzrok proboja vode i rušenja nasutih brana ("piping" ili "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

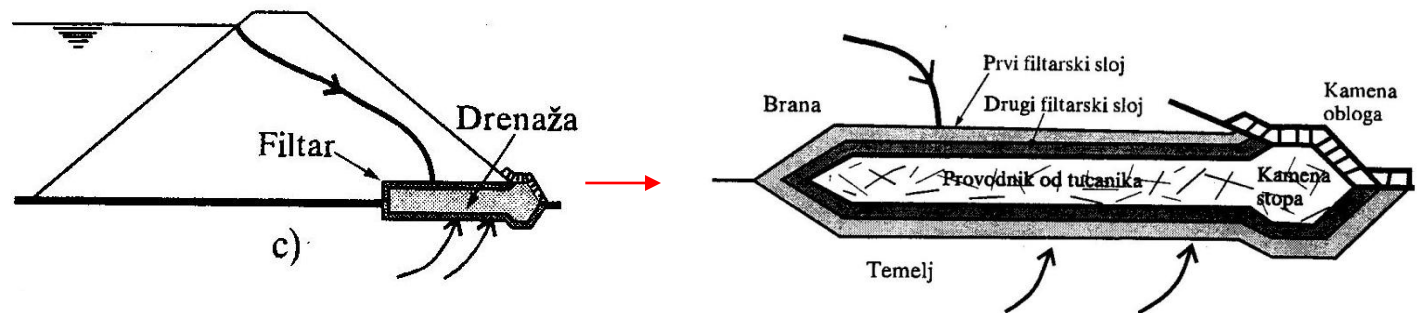
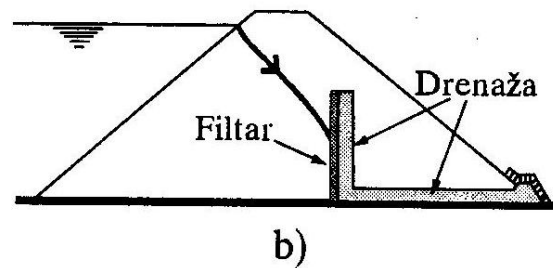
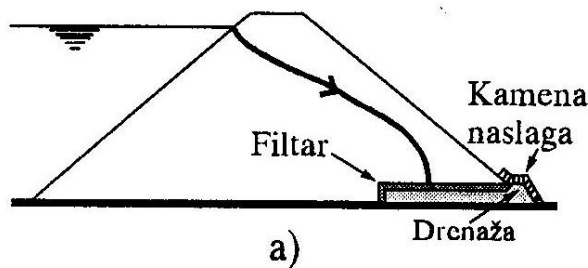
- Unutrašnja erozija je ispiranje čestica sitnijeg materijala kroz šupljine većih čestica.
- 
- Bolja zbijenost materijala manja mogućnost ispiranja čestica.
  - Do unutrašnje erozije dolazi na kontaktu različitih materijala. Za sprječavanje unutrašnje erozije izvode se zaštitni prijelazni slojevi (filtarski slojevi). Moguće je izvesti jedan ili više prijelaznih slojeva.
  - Svrha prijelaznih slojeva je da spriječe unutrašnju eroziju brane i pronošanje 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.
  - **FILTARSKO PRAVILO**

# 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.



- Ispiranje čestica na nizvodnoj kosini može se priječiti ugradnjom drenažnog 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 drenažnog sustava.

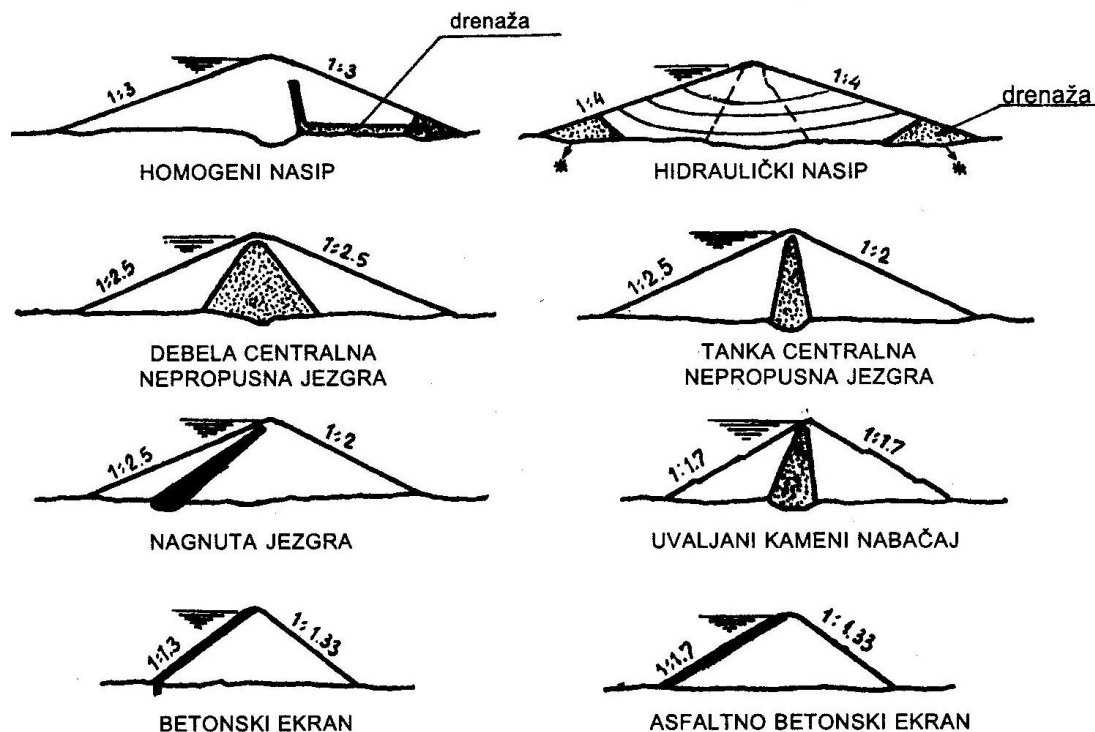


# SPRJEČAVANJE/SMANJENJE PROCJEĐIVANJA (VODODRŽIVOST)

## ■ VODODRŽIVOST TIJELA BRANE

Homogene zemljane brane su dobro vododržive (potporno tijelo je vododrživo).

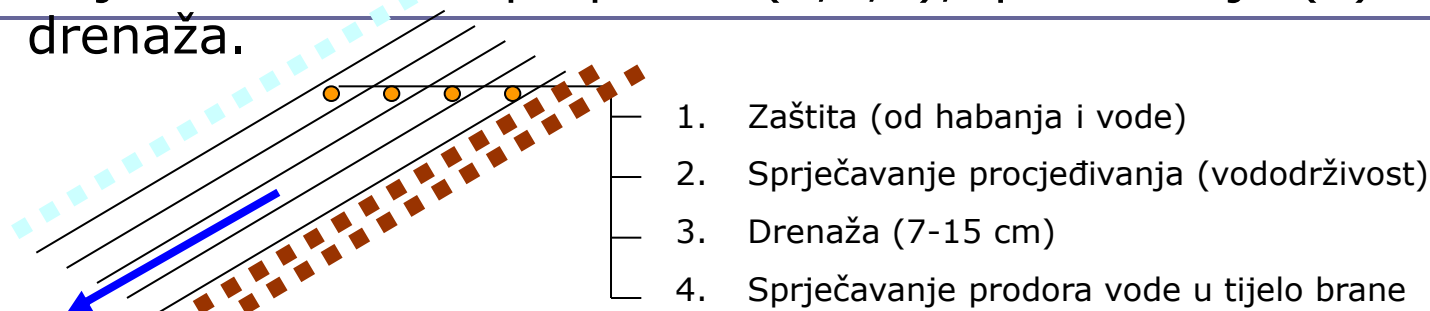
Heterogene brane imaju potporno tijelo koje nije dovoljno vododrživo pa se treba osigurati vododrživost brane izvođenjem vododržive jezgre ili ekrana (zemljani/glineni, betonski, asfalt-betonski, čelični, geomembrane,...).



Osiguranje vododrživosti brana

## ■ Asfalt-betonska obloga:

- Kada se izvode uzvodni vodonepropusni ekrani/obloge vanjski slojevi su vodonepropusni (1,2,4), predzadnji (3) služi kao drenaža.



## ■ 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:

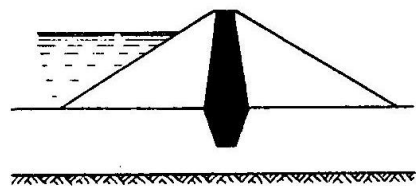
- Ekran se izvodi u pločama 2-5 m
- Moraju se ostavljati fuge koje se zatvaraju kitom (npr. bitumenom)
- Debljina sloja  $d=20-50$  cm
- Podloga se radi što nepropusnija da voda ne probije u tijelo brane ukoliko dođe do pucanja ekrana

- 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 (nanošenje nanosa). Ako je brana kamena ne treba zatravljivati, iako se ponekad zatravljuje iz estetskih razloga

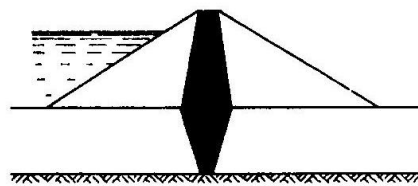


## ■ VODODRŽIVOST TEMELJNOG TLA (produljenje procjednog puta)

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

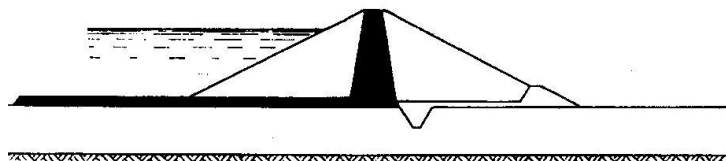


*Djelomični temeljni klin*



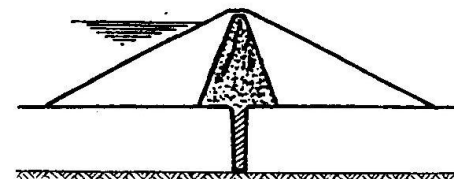
*Temeljni klin do nepropusnog sloja*

- Uzvodni glineni zastor



*Uzvodni glineni zastor*

- Dijafragma



*Dijafragma*

- Injektiranjem



nepropusni ekran  
kameni nabačaj  
injekcijska zavjesa

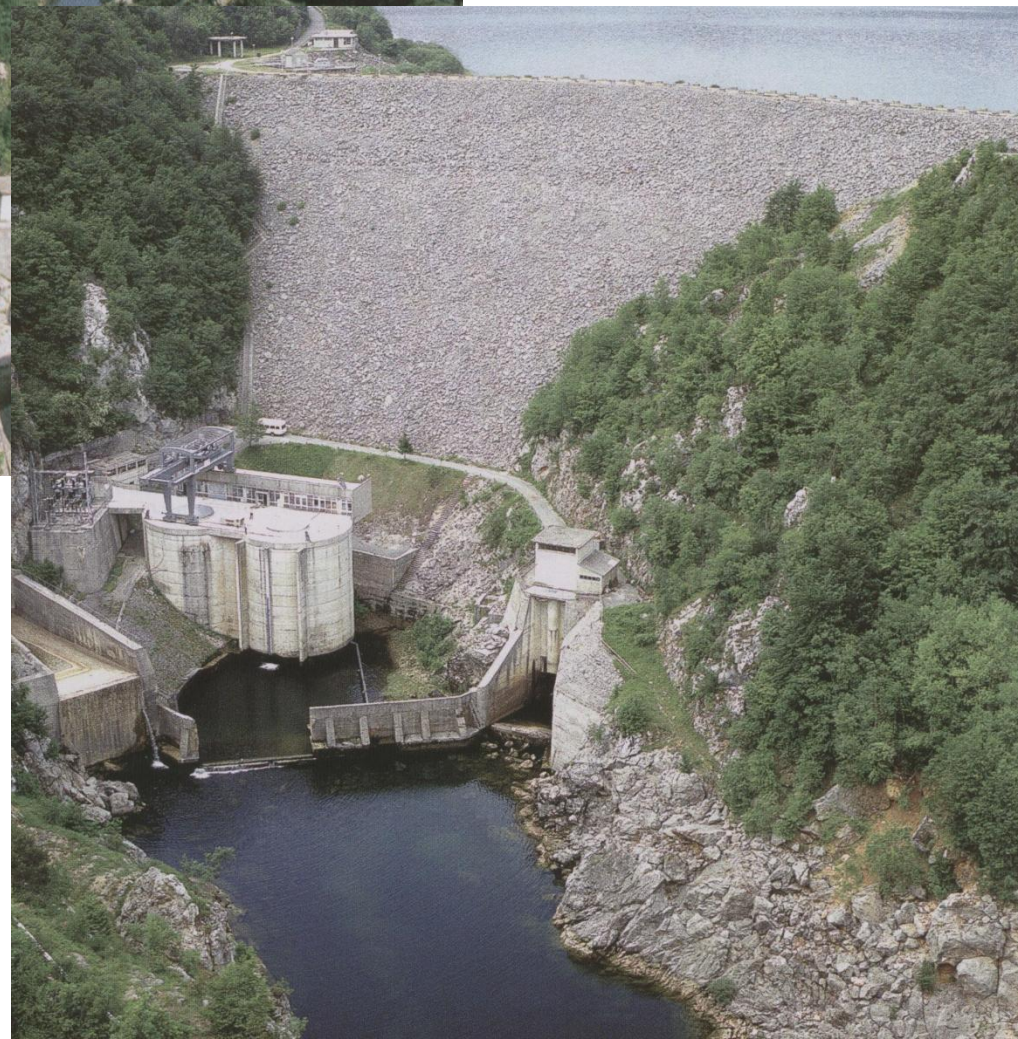


# Deformacije brane i temelja - stišljivost

---

- 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.
- 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.
    - Razlike u slijeganju susjednih zona.



Sklope brana i HE, rijeka Lika,  
jezero Kruščica