

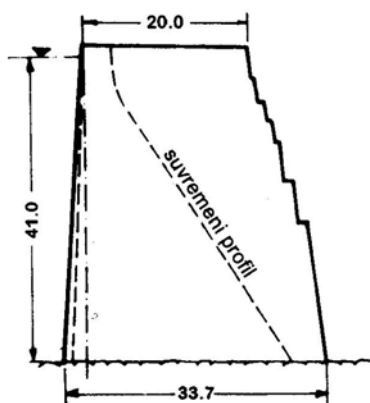
3.3. BRANE

Brana (pregrada) je građevina kojom se pregrađuje riječna dolina ili korito rijeke radi zadržavanja ili zahvaćanja vode, zadržavanja nanosa, odlaganja jalovine i drugo

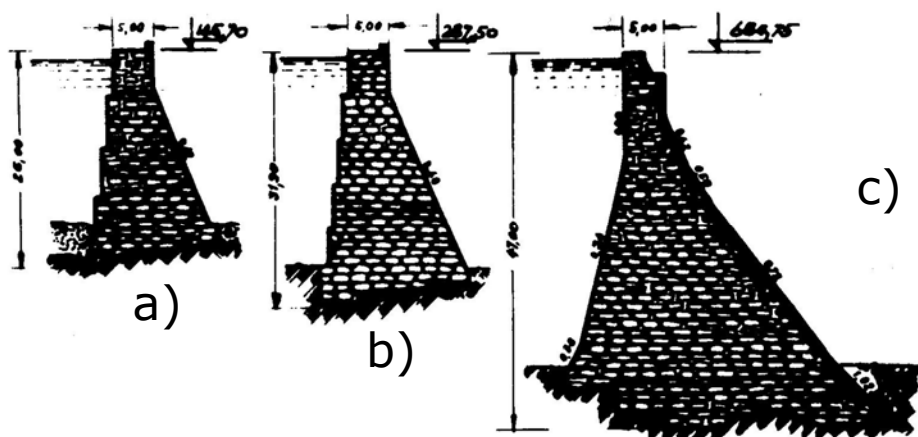
Povijest

Još oko 5000 g. p.n.e na rijekama Eufrat, Tigris, Nil počelo se zadržavati vodu za potrebe navodnjavanja (kanali, kopani bazeni s nasipima,...). U Egiptu, Perziji, Jemenu, Indiji i Kini građene su prve nasute i zidane brane. Najstarija poznata brana (zidana) **Saad el Kafara** sagrađena je u Egiptu 2700. g. p.n.e., visine 15 m, a sa svrhom kontrole i zaštite od poplava. U sjevernom Jemenu brana **Marib** je zidana od lave, vapna i pijeska u VIII. st. p.n.e. sa svrhom navodnjavanja; ponovno je izgrađena 1986. Najstarija nasuta je brana **Gukow** u Kini – visine 30 m, izgrađena 240. g. p.n.e. Najveći broj starih brana koje postoje i danas (cca. 60 brana) izgrađeno je u periodu 500-1300 g.n.e. Oblik brana se kroz povijest mijenjao.

Neki primjeri brana su dani na sljedećim slikama:



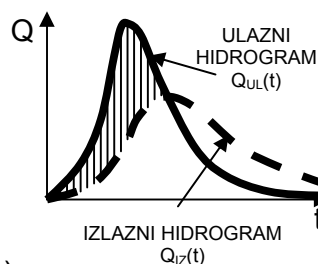
brana **Alicante** (Španjolska) visine 43 m izgrađena 1580 g. – gravitacijska zidana



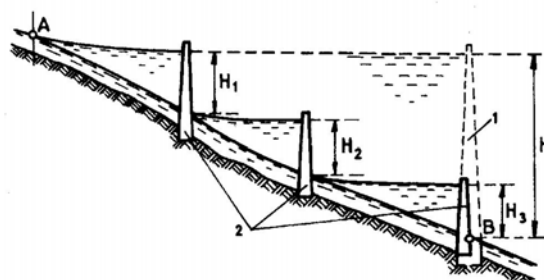
Brane u Italiji: a) Corongiu (1863.-1886.), b) Bunnari (1874.-1879.), c) Lago Lungo (1877.-1901.)

Podjela prema svrsi/namjeni

- Akumulacijske (jednonamjenske, višenamjenske)
- Retencijske (privremeno zadržavanje vode)



- Zahvat vode (vodoopskrba, navodnjavanje, ...)
- Kanaliziranje rijeka (brane u nizu-veće dubine/plovnost)



- Zadržavanje nanosa – pragovi
- Jalovišta (nema u RH)
- Nasipi (obrana od poplava)

Podjela prema materijalu

Nevezani materijal – **NASUTE BRANE**:

- **zemljane** brane od prirodnih materijala:
 - homogenog presjeka bez zaptivnog tijela
 - heterogenog presjeka s nepropusnom glinenom vertikalnom ili kosom jezgrom, ili s jezgrom nekog drugog nepropusnog ili slabo propusnog materijala ili vodonepropusnom oblogom



injektiranje

- 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, ljevani asfalt, geomembrane,...)

Vezani materijal – **BETONSKE BRANE**

- AB (rijetko)
- od drugih materijala (u prošlosti): drvo metal, zidanje

Podjela prema veličini

- **VELIKE BRANE**: $H \geq 15$ m
 $5 \leq H \leq 15$ m ako je $V_{ak} = 3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (volumen akumulacije)

Stari kriterij: $H \geq 10$ m uz jedan od slijedećih uvjeta:

$$L \geq 500 \text{ m}$$

$$V_{ak} = 10^6 \text{ m}^3$$

$$Q_{preljeva} \geq 2000 \text{ m}^3/\text{s}$$

složeni uvjeti temeljenja

(Stranice Hrvatskog društva za velike brane (HDVB-CROCOLD)

www.elektroprojekt.hr/hdvvb)

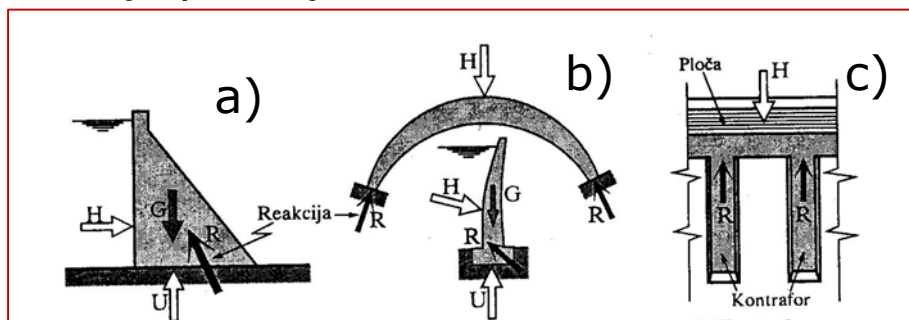
(Kriteriji prema ICOLD-International Commission on Large Dams)

- **MALE BRANE**: sve ostale

Za velike brane su stroži kriteriji projektiranja i korištenja u odnosu na male brane.
 (WCD-World Commission on Dams)

Podjela prema načinu prenošenja opterećenja

- Gravitacijske (a,c)
- Lučne (b)



Podjela prema utjecaju na rijeku

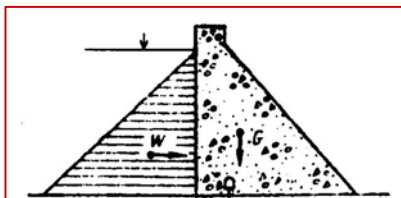
- dolinska pregrada
- brana

Podjela prema evakuaciji vode

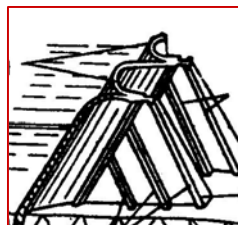
- prelivne – preliv na tijelu brane
- neprelivne – preliv izvan tijela brane

Podjela BETONSKIH BRANA prema prijenosu opterećenja i konstrukciji**Gravitacijske**

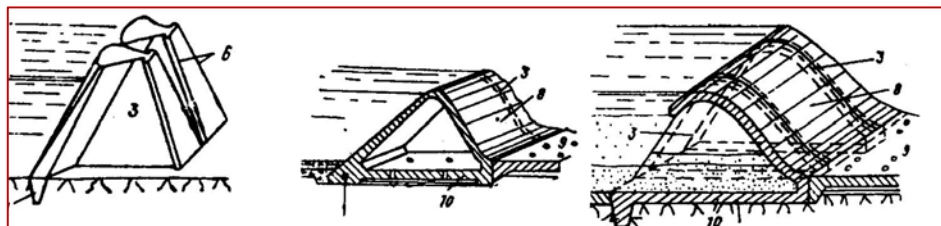
- masivna



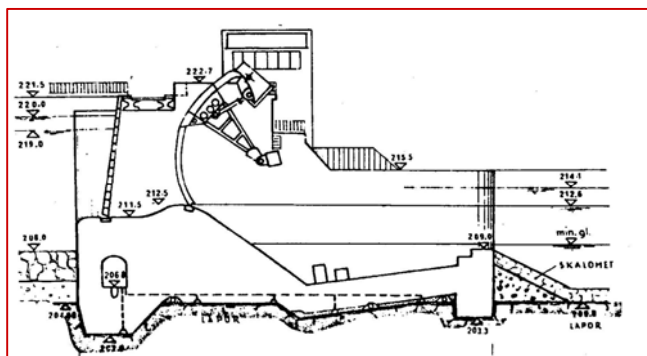
- olakšane gravitacijske:
 - višelučne



- raščlanjene (s kontraforim, pločama i sl.)

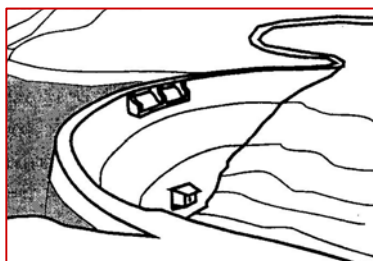


- pokretne riječne



- prednapregnute

Lučne



Statistika

U svijetu danas, prema ICOLD-ovom registru, ima više od 40.000 velikih brana, od čega se u Hrvatskoj nalazi 29. 50% brana izgrađeno je u Kini. 75% čine brane do 30 m visine, a 92% čine brane do 60 m visine.

Do 1950. sagrađeno je 5300 brana, ostale (86%) su izgrađene u periodu od 1950. do danas.

Visina (H)	Broj brana (cca)
15-30	30 000
30-60	7 000
60-100	1 500
100-120	350
150-200	100
>200	30

Opis brane

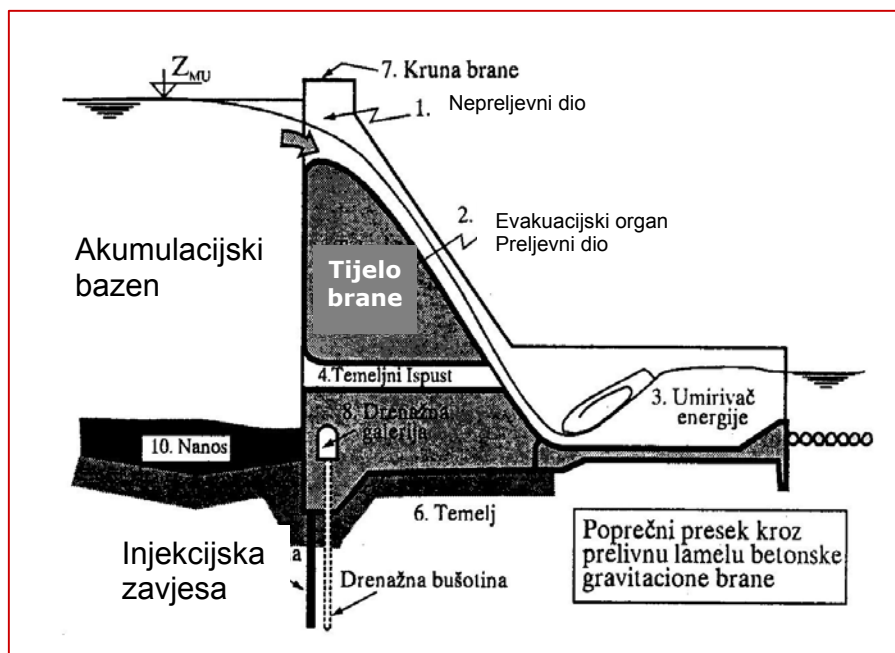
Svaka brana mora osigurati osnovnu namjenu te omogućiti siguran prolaz voda kroz pregradni profil te mora sadržavati slijedeće dijelove:

- Tijelo brane
- Evakuacijski organ (preljev)
- Temeljni ispust (pražnjenje vode i ispiranje nanosa) i

osigurati vododrživost.

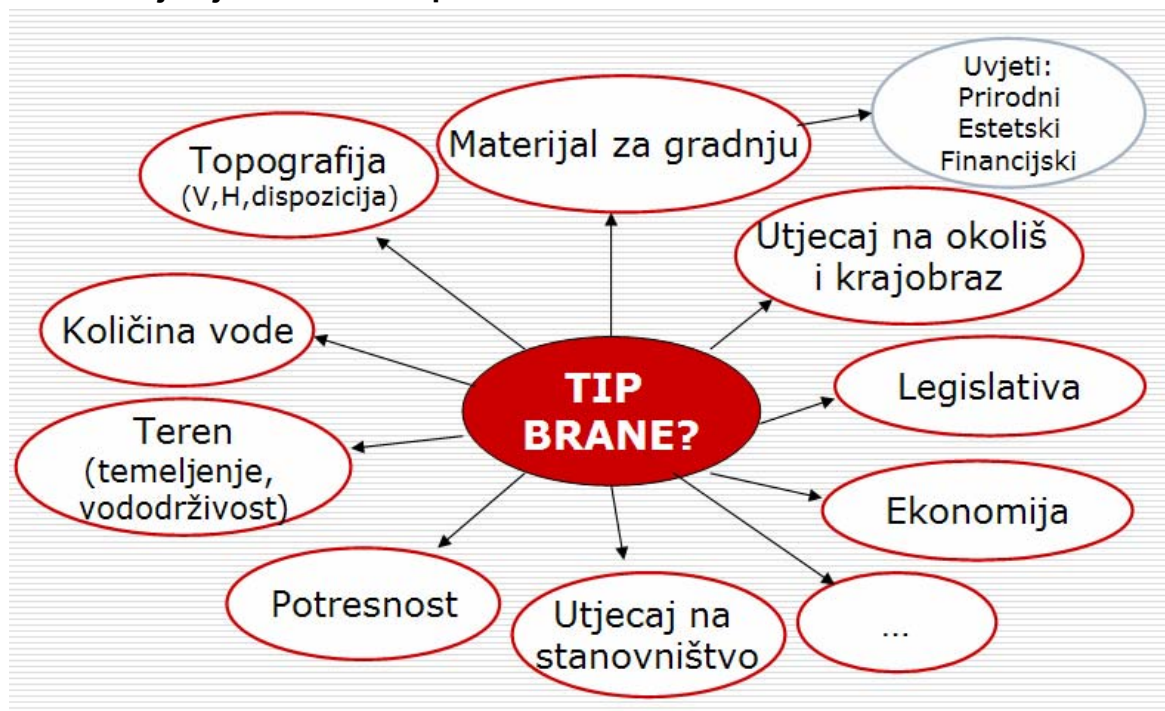
Osnovne dimenzije brane su:

- **Os** brane
- **Visina** brane (od temelja do krune)
- **Hidraulička visina** brane (razlika kote maksimalnog uspora i kote dna rijeke prije izgradnje)
- **Duljina** brane u kruni



Primjer betonske gravitacijske masivne brane

Faktori koji utječu na izbor tipa brane



Fizički faktori pri izboru tipa brane

Izbor tipa brane ovisi o mnogo čimbenika (faktora) te je potrebno veliko iskustvo pri samom izboru. U ovom materijalu kratko je ukazano na osnovna pitanja pri izboru tipa brana.

1. Topografija (oblik pregradnog profila)

Topografija globalno definira u prvom koraku tip brane. Uska dolina ukazuje na betonsku preljevnu branu, dok je široka dolina povoljna za nasute i rašlanjene brane.

2. Geologija i uvjeti temeljenja (jedra stijena, šljunak, prah, pijesak, glina, nejednolični uvjeti temeljenja)

Ovisno o temeljnom tlu bira se i tip brane. Na stijeni se mogu temeljiti sve brane, dok se na prahu, pijesku i glini može temeljiti samo zemljana nasuta brana

3. Raspoloživi materijal

Budući da se u branu ugrađuje velika količina materijala važno je da je potreban materijal u području izgradnje, te je time definirana brana.

4. Veličina preljeva i njegova lokacija

Ovisno o količini vode koja se mora propustiti kroz pregradni profil ovisi rješenje preljeva (evakuacije velikih voda), te u određenim uvjetima to može definirati tip brane (preljevna, nepreljevna i sl).

5. Potres

Opasnost od potresa može dati prednost nasutim branama, ali ne treba isključiti i betonske.

Izbor brane

Prednosti **NASUTIH** brana su:

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

Mane **NASUTIH** brana su:

- 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).

Prednosti **BETONSKIH** brana su:

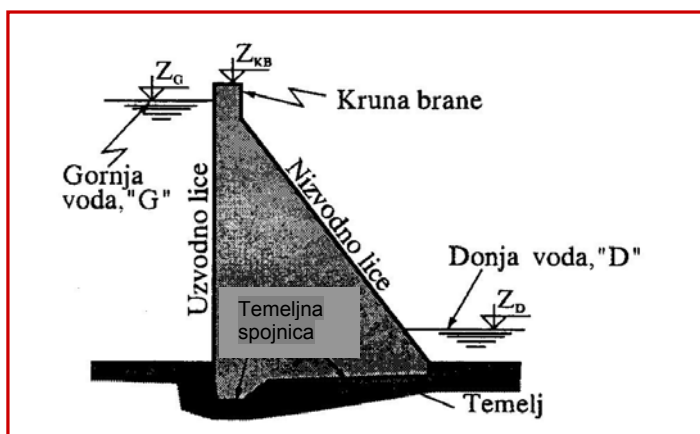
- Izdržljivost na prelijevanje i procjeđivanje,
- Male količine materijala (strm nagib).

Mane **BETONSKIH** brana su:

- Visoki zahtjevi za temeljenje (visoka nosivost tla, niska deformabilnost, ne u potresnoj zoni),
- Visoka jedinična cijena (spor rad i brojna radna snaga),
- Za lučne brane provjerava se odnos visine brane i širine doline.

U cilju kontrole stanja brane zbog pravovremenog uočavanja promjena na brani i pravovremene provedbe eventualno potrebne sanacije provodi se **TEHNIČKO PROMATRANJE (MONITORING, OSKULTACIJE)** brane:

- Vizualna kontrola (uočavanje svih vidljivih promjena, npr. pukotina, oštećenja i sl.),
- Praćenje procjeđivanja i pritiska vode,
- Mjerenje horizontalnih i vertikalnih pomaka (npr. slijeganja brane) i sl.

Djelovanja na branu:**stalna**

– vlastita težina brane, tlak vode u porama, tlak vode, uzgon, tlo, sve stalne mase (oprema) na brani,

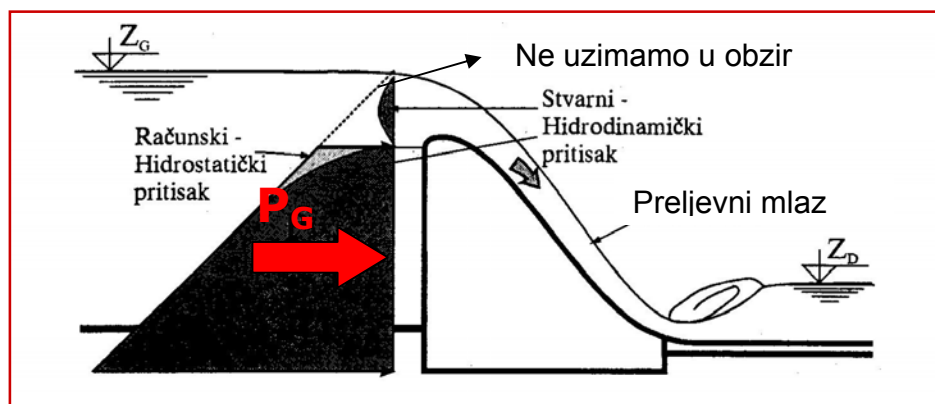
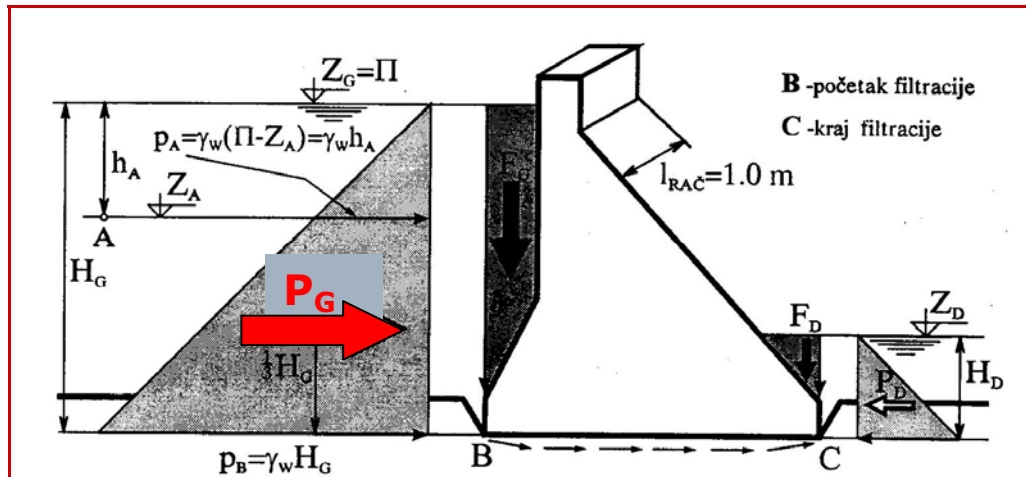
promjenjiva

– temperатурne promjene, stezanja betona, smrzavanja vode u betonu, opterećenje ledom, valovi, povremena/pokretna opterećenja (kranovi, strojevi i sl)

izvanredna

- potres

Tlak vode $P_G = \gamma_w \frac{H_G^2}{2}$



Uzgon $U = \gamma_w \frac{H_G + H_D}{2} B$

3.3-1 Betonske brane

PODJELA:

Gravitacijske

- Masivne
- Olakšane gravitacijske: Raščlanjene (s kontraforima, pločama i sl.)
Višelučne

- Prenapregnute
- Riječne pokretne

Lučne

3.3-1.1 Gravitacijske betonske brane

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 slijeganje
- malu vodopropusnost
- monolitnu strukturu (bez pukotina).

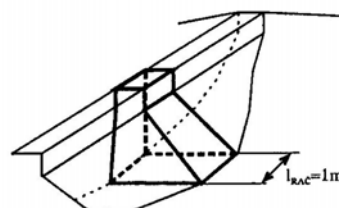
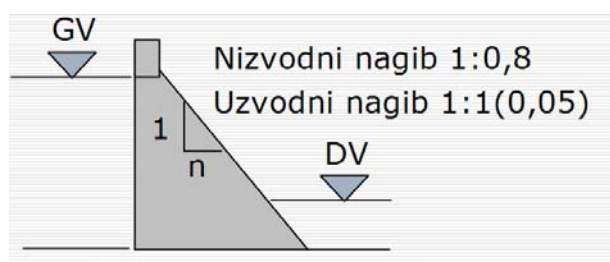
Gravitacijske betonske brane nisu pogodne za potresna područja.

Betonska masivna gravitacijska brana

Osnovni poprečni presjek betonske gravitacijske masivne brane je pravokutni trokut.

Često se grade kao niz vertikalnih konzolnih nosača - lamela (širine 6-16 m) međusobno razdvojenih razdjelnicama, te svaka lamela je nezavisna i mora biti stabilna.

Kontrola stabilnosti na najnepovoljnijem presjeku (presjek najveće visine) može se raditi za 1 m dužni brane s obzirom da je to prevladavajući presjek.



Početni izbor dimenzije brane

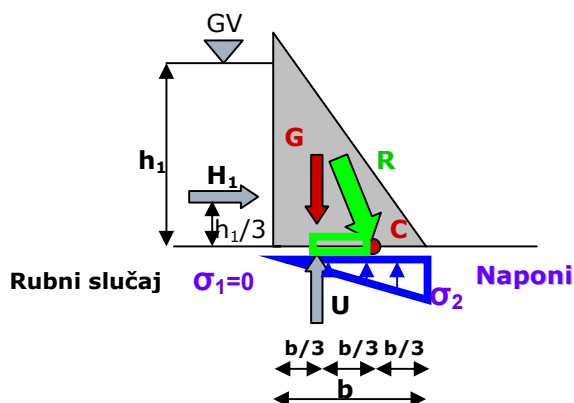
Brana je kruto tijelo koje u principu nije izloženo savijanju. Izuzetak čine oslabljenja u tijelu brane (galerije, drenažna okna i sl), koja se posebno proračunavaju i odgovarajuće se armiraju.

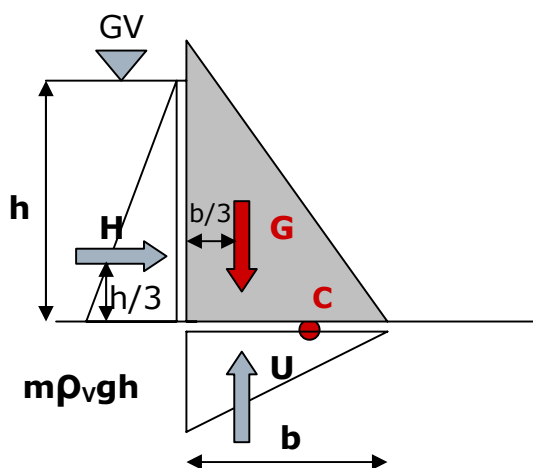
Svi presjeci brane u pravilu trebaju biti tlačno naprezani. Bez obzira na to, zbog latentne topline kod betoniranja, betonske je brane potrebno konstruktivno armirati s oko 100 kg/m³ prostornom armaturom.

Ispod brane ne dozvoljavaju se vlačna naprezanja u tlu, a tlačna moraju biti manja od propisom dozvoljenih.

Taj je uvjet zadovoljen ako rezultanta (R) svih sila prolazi jezgrom presjeka nožice brane. Granično je stanje kada rezultanta prolazi nizvodnim rubom jezgre i tome odgovara najmanji presjek brane odnosno najmanja širina nožice brane (b).

PUNA AKUMULACIJA





Uvjet $\sum M_C = 0$

$$H \frac{h}{3} = (G - U) \frac{b}{3}$$

$$G - U = \rho_B g \frac{hb}{2} - m \rho_V g \frac{hb}{2} = \frac{hb}{2} g (\rho_B - m \rho_V)$$

$$b = \sqrt{\frac{\rho_V}{\rho_B - m \rho_V}} \cdot h \quad \text{uz} \quad \frac{\rho_B}{\rho_V} = 2.4$$



$$b = \frac{h}{\sqrt{2.4 - m}}$$

Koeficijent redukcije uzgona (m):

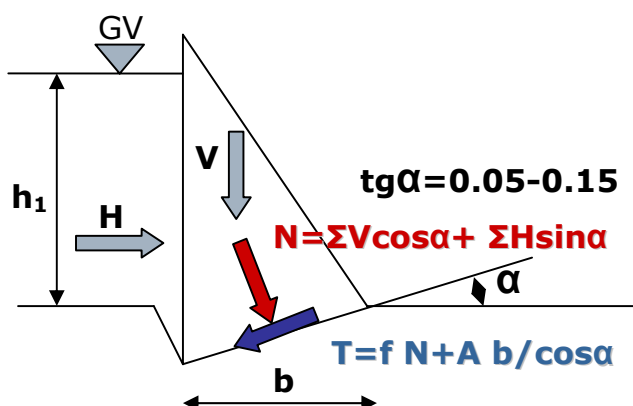
- $m=2/3$; **$b=0.76h$**
- $m=0$, nema uzgona; **$b=0.65h$**
- $m=1$, uzgon u punoj vrijednosti; **$b=0.85h$**

Provjera sigurnosti za stabilnost betonske masivne gravitacijske brane

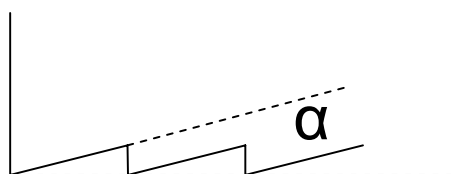
U okviru kontrole graničnog stanja nosivosti provodi se provjera:

- stabilnosti na prevrtanje i
- stabilnosti na klizanje.

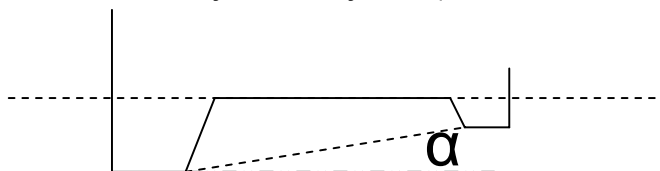
Ako stabilnost na klizanje ne zadovoljava radi se zakošenje temeljne spojnice.



Ako je teren stijena (manji iskop)



Ako je teren šljunak (nevezani materijal)



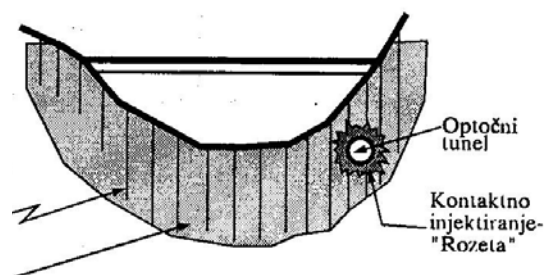
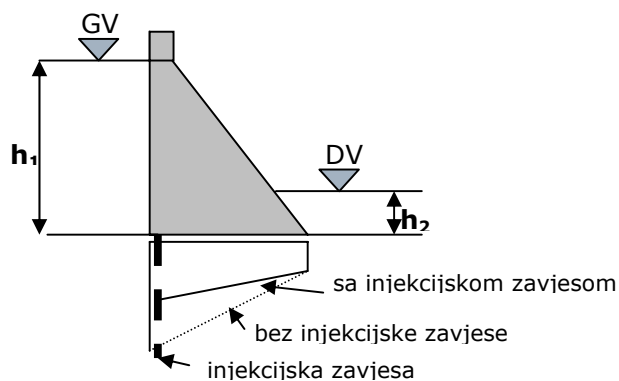
Tako se povećava sila trenja, a smanjuje smičuća sila.

Stabilnost na klizanje izračunava se prema:

$$\frac{f(\sum V \cos \alpha + \sum H \sin \alpha) + \frac{A \cdot b}{\cos \alpha}}{\sum H \cos \alpha - \sum V \sin \alpha} \geq F_s$$

Smanjenje uzgona

1. Izvođenjem injekcijske zavjese – injektira se smjesa za povećanje vododrživosti.

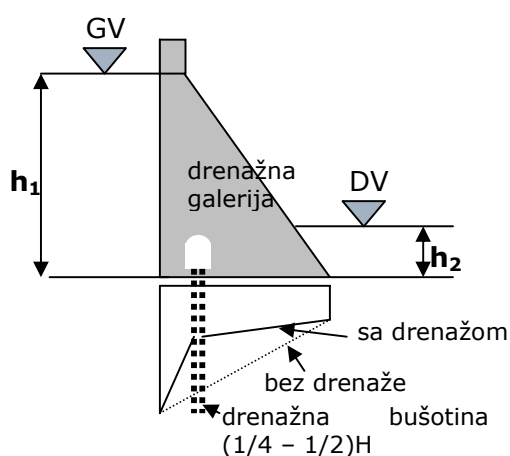


Primjena ove metode je kod stjenovitih tala. Za nevezana tla koriste se dijafragme.

Injektiranje može biti:

- Za povećanje vododrživosti
- KONSOLIDACIJSKO – za povećanje nosivosti stjenovitog tla
- VEZNO (kontaktno) - za povezivanje konstrukcije s okolnim stjenovitim terenom i sprječavanje ispiranja materijala na kontaktu brana-tlo.

2. Dreniranjem iza injekcijske zavjese



Uzgon se najčešće ukupno reducira na 1/3.

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

Dimenzije galerija su:

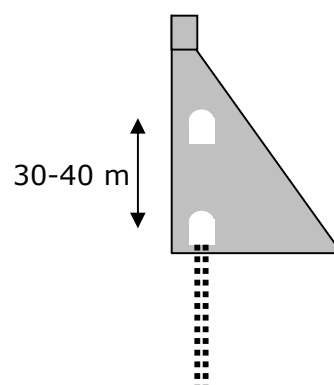
- uobičajeno 2x2 m
- ako treba prolaziti mehanizacija $H=2,5-3$ m
- za injektiranje $H=4-5$ m.

Za više brane može se izvesti nekoliko galerija.

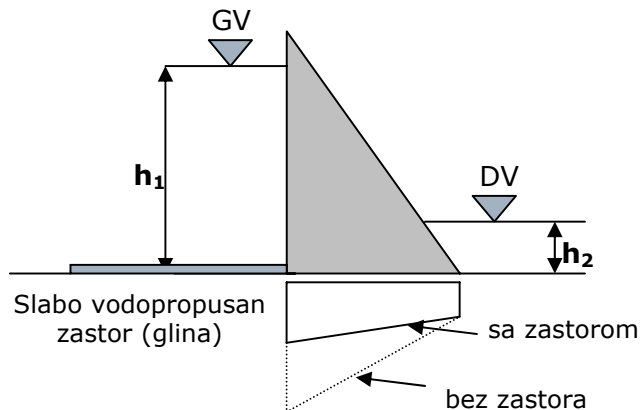
Kroz galerije može se drenirati voda iz tijela brane čime se postiže smanjenje purnog tlaka (horizontalni i vertikalni drenovi, promjera $d=10-20$ cm, na udaljenosti od 3-5 m).

Smanjenje procjeđivanja kroz tijelo betonske gravitacijske brane ostvaruje se korištenjem:

- kvalitetnijeg betona (veće vododrživosti) na uzvodnoj strani
- te njegoj betona da se ne pojave pukotine,



- izvođenjem bitumenskog sloja ili postavljanjem vodonepropusne folije na uzvodno lice.
- 3. Produžavanjem puta koje se izvodi izvođenjem horizontalnog slabo vodopropusnog zastora.



Izgradnja brane - latentna toplota

U brane se ugrađuju velike količine betona, te se pojavljuju problemi koji nastaju tijekom sazrijevanja betona javljanjem visokih hidratacijskih temperatura i širenja betona u prvoj fazi te stezanjem betona u završnoj fazi

Problem se rješava tehnologijom ugradnje i održavanjem svježeg betona

Koriste se posebni cementi (s manjom hidratacijskom toplotom i s odgovarajućim dodacima)

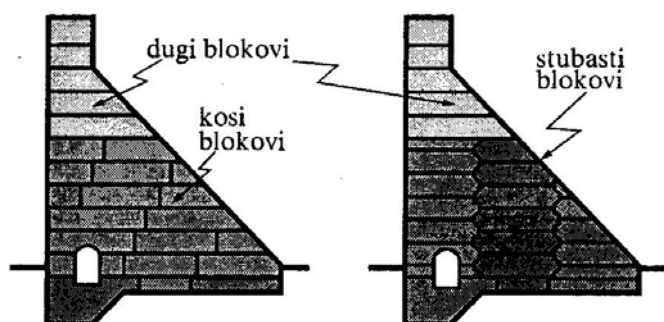
Koristi se beton s manjom količinom cementa (ali da se s time ne ugrozi nosivost i vododrživost betona)

Koriste se posebni recepti za spremanje betona (kombiniranje različitih granulacija i korištenje krupnijih frakcija)

Omogućuje se hlađenje betona nakon ugradnje ili se snižava 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)

Betoniranje ne smije biti kontinuirano jer se u velikoj masi betona vanjski slojevi hlade brže od unutrašnjih, što uzrokuje stvaranje napona i pojavu pukotina. Stoga se rade prekidi betoniranja – radne razdjelnice kako bi se beton ravnomjerno hladio i skupljao bez većih pukotina. Širina bloka je jednaka širini lamele.



Beton treba biti:

- Dovoljne čvrstoće,
- Otporan na smrzavanje,
- Dovoljno vododrživ,
- Niske hidratacijske temperature,
- Niske cijene koštanja.

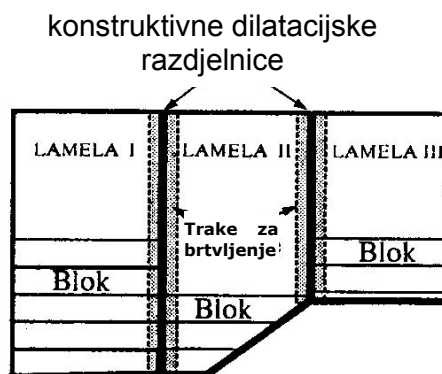
Zoniranje: na višim kotama treba koristiti beton slabije čvrstoće nego na nižim kotama, beton veće čvrstoće na uzvodnom i nizvodnom (habanje) dijelu brane, prelivima i sl.

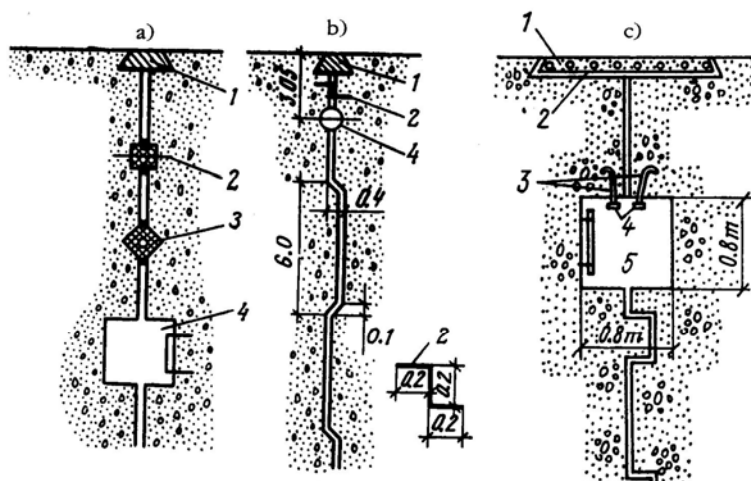
Radne razdjelnice (spojnice) između blokova (mjesto na kojima se nastavlja betoniranje) treba pripremiti za nanošenje novoga sloja da bi se ostvarilo dobro prijanjanje novog i starog bloka (pjeskarenje te premazivanje cementnim mortom u debljini 2 cm). Radne razdjelnice se injektiraju dok **konstruktivne dilatacijske razdjelnice** između lamela ostaju fleksibilne.

Otvori konstruktivnih dilatacijskih razdjelnica omogućavaju da se:

- Rasterete termički naponi i spriječi pojava pukotina uslijed tih napona,
- Spriječi pojava pukotina uslijed nejednolikog slijeganja.

Vododrživost na dilatacijama osigurava se trakama za brtvljenje (bakreni lim, guma, PVC i sl.).

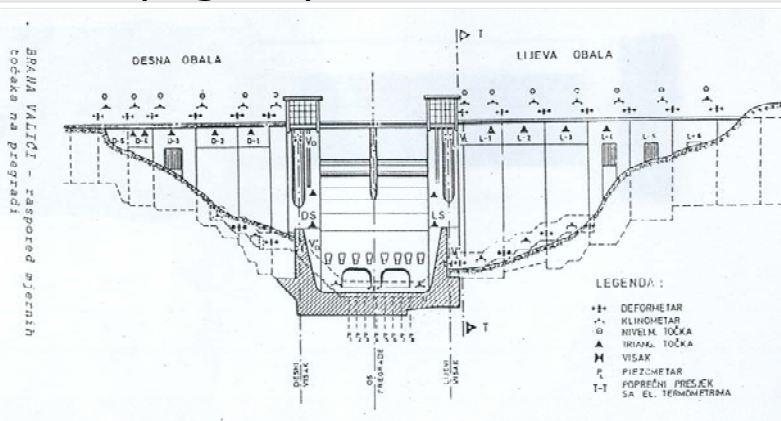


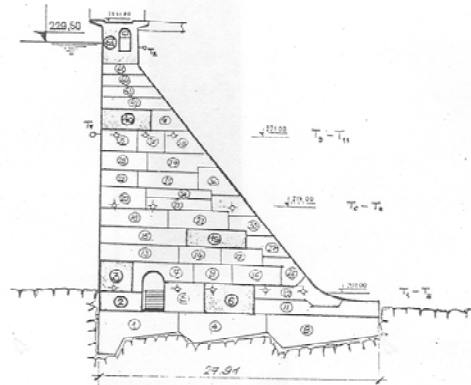


Slika 2.3.55. Uzvodno lice gravitacijske brane - specijalni tipovi brtvi

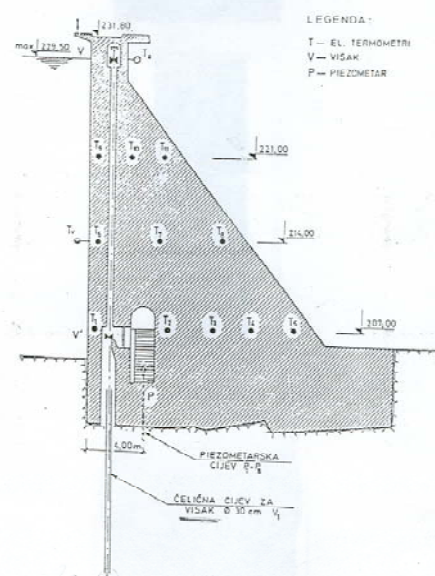
- a) ravna dilatacijska spojnica, b) rebrasta dilatacijska spojnica: 1. uzvodno "konturno" brtвило, 2. glavno vodonepropusno brtвило, 3. dopunsko brtвило s električnim zagrijavanjem, 4. drenažna bušotina i okno za drenažu i inspekciju.
- c) rebrasta dilatacijska spojnica: 1. armiranobetonska ploča, 2. bitumenska ispuna, 3. sidra, 4. bakrena traka, 5. okna za drenažu i penjalice

Brana Valići – HE Rijeka - pogled prema uzvodno -



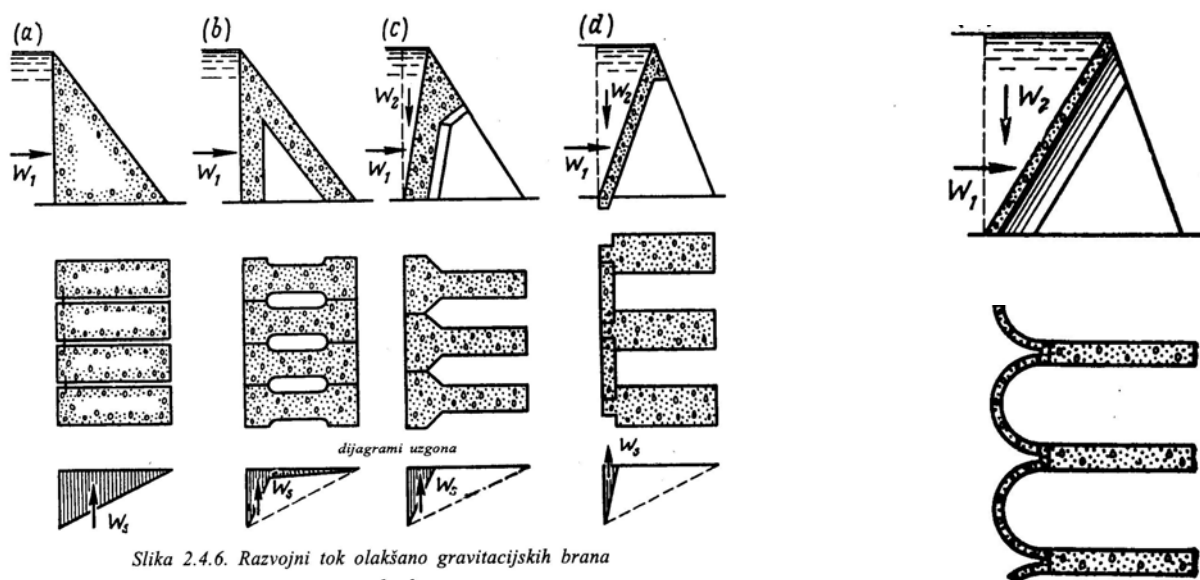


Slika 48. Skica karakterističnog poprečnog presjeka BRANE VALIČI (L-S-1) s označenim fazama betoniranja blokova



Slika 29. Raspored mjernih točaka u poprečnom presjeku BRANE VALIČI

3.3-1.2 Olakšane brane (raščlanjene i višelučne)



Slika 2.4.6. Razvojni tok olakšano gravitacijskih brana

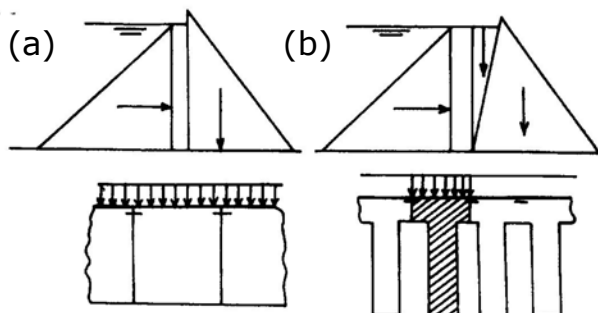
- a) masivna gravitacijska brana,
 b) olakšano gravitacijska brana (sa šuplinom),
 c) brana s kontraforima i masivnom glavom,
 d) brana s kontraforima i ravnom pločom

Prednosti olakšanih brana nad gravitacijskim su:

- 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 hidrostatske sile (težina vode iznad uzvodnog lica).

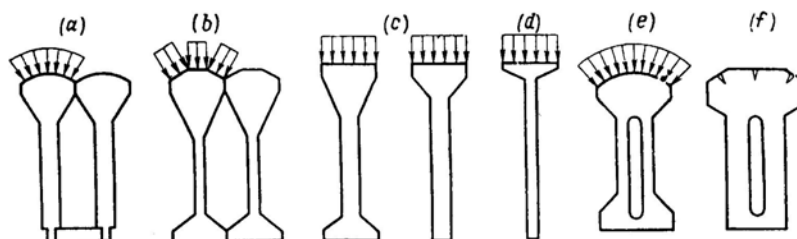


Gravitacijska brana (a)

Brana s kontraforima "T"-oblik (b)

Vrste:

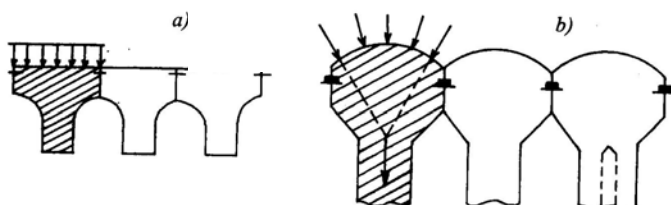
- S kontraforima s masivnom glavom,
- S pločama i kontraforima.



Slika 2.5.5. Horizontalni presjek kontrafora s masivnom glavom

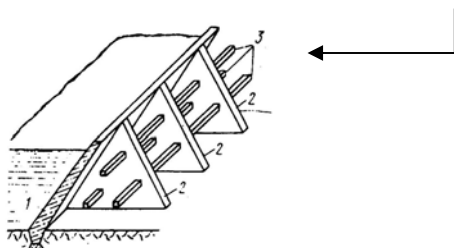
a) zakrivljena glava i jednozidni kontrafor, b) poligonalna (dijamantna) glava i jednozidni kontrafor, c - d) ravna glava i jednozidni kontrafor, e) zakrivljena glava i šuplji ili dvozidni kontrafor, f) poligonalna glava i šuplji ili dvozidni kontrafor

Kontrafori sa zaobljenjima se rade da bi se izbjegla koncentracija naprezanja na lomovima, da bi se izbjegao moment savijanja na glavi kontrafora koja djeluje kao konzola, te da bi se rezultanta hidrostatičkog pritiska na glavi usmjerila prema osi kontrafora.

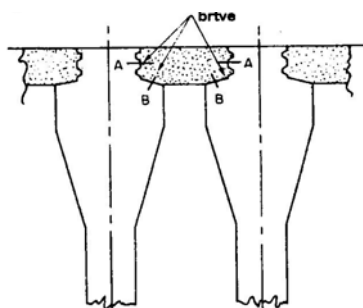


Iz "T" oblika kontrafora razvile su se:

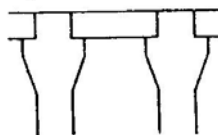
- Brane s masivnom betonskom pločom i kontraforima,
- Brane s tankom armiranobetonskom pločom i vitkim kontraforima:
 - bez razupornih AB greda
 - s razupornim AB gredama



a)



b)

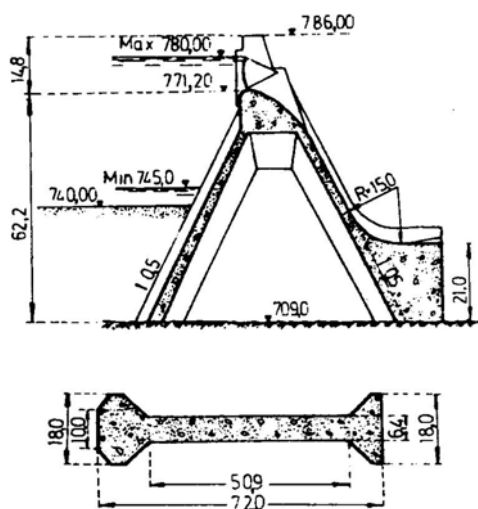


Tip brane Ambursen s:

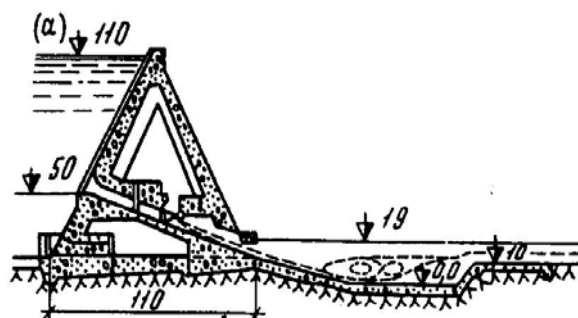
- a) masivnom betonskom pločom
- b) tankom pločom

Karakteristike:

- Širina temeljne stope $b = (1-1.5)H$,
- Širina sredine kontrafora $d = 3-8$ m,
- Širina glave kontrafora:
 - jednostruka rebra $L = 9-20$ m (12-16)
 - dvostruka rebra $L = 15-26$ m (18-22)
- Uzvodna kosina $m_{UZ} = 0,4 - 0,5$ (kotangens kuta nagiba kosine prema nožici),
- Nizvodna kosina $m_{NIZ} = (0,85 - 1) m_{UZ}$,
- Prvi i zadnji kontrafor su klasični gravitacijski betonski blok.



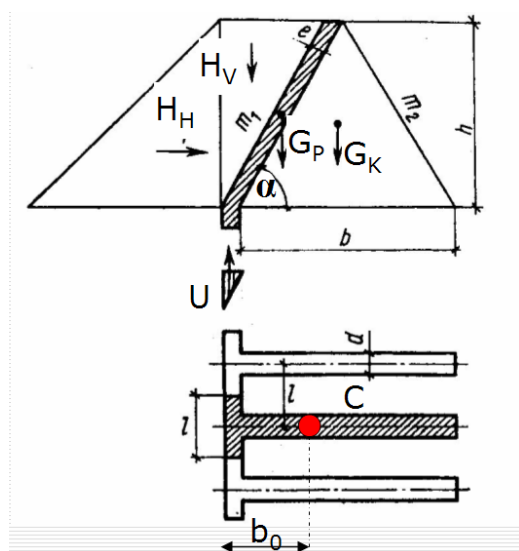
Izvođenje preljeva na kontraforu



Izvođenje temeljnog ispusta u raščlanjenoj brani

Stabilnost na klizanje

(umjesto 1m dužnog brane račun se provodi za jedan članak – modul)



$$H_H = 0,5 \cdot \rho_V \cdot g \cdot h^2 \cdot l$$

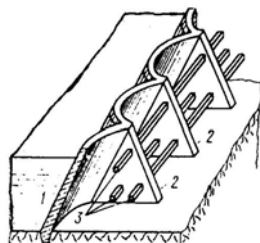
$$H_V = 0,5 \cdot \rho_V \cdot g \cdot h^2 \cdot l \cdot \operatorname{ctg} \alpha$$

$$U = 0,5 \cdot \rho_V \cdot g \cdot h \cdot e \cdot l$$

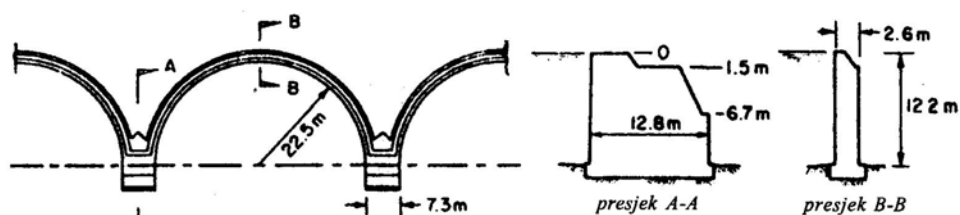
$$G_P = \rho_B \cdot e \cdot l \cdot \frac{h}{\sin \alpha}$$

$$G_K = 0,5 \cdot \rho_B \cdot b \cdot d \cdot h$$

$$F_S = \frac{G_P + G_K - H_V + U}{H_H} \cdot f$$

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 oslonce (na bokove doline). Višelučna brana se sastoji 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



Lukovi mogu biti:

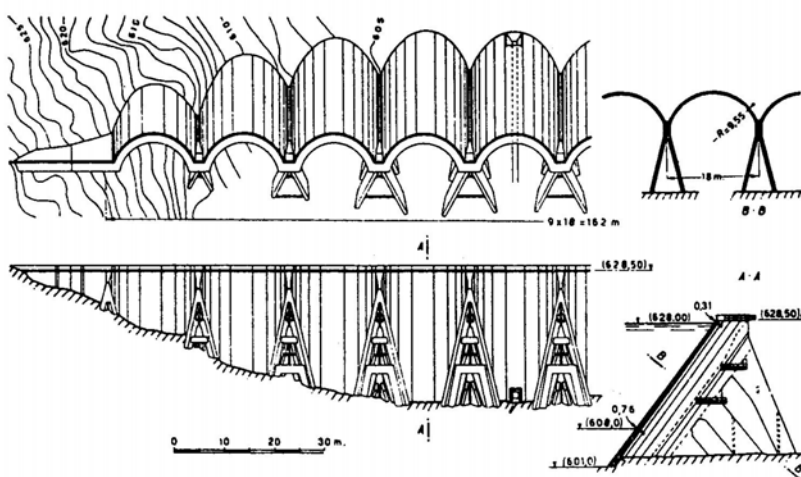
- od betona ili armiranog betona,
- s konstantnom ili s promjenjivom debljinom,
- s centralnim kutem od 160 do 180 stupnjeva.

AB višelučne brane imaju:

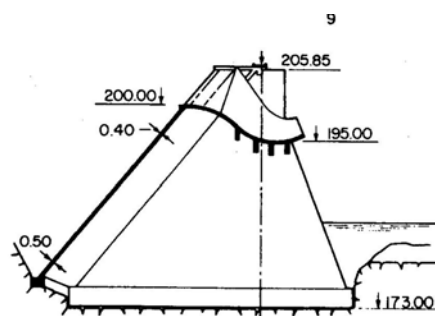
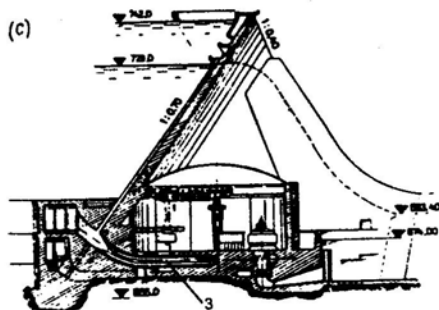
- Uzvodni nagib 1:(0.45-0.9); ($m_1 = 0.45 - 0.9$),
- Nizvodni nagib 1:((1.1-1.3) m_1),
- Debljinu luka:
 - u kruni 0.3-0.4 m, u lošim uvjetima – oštre zime 0.5-1.0 m
 - u temelju 1-3 m.

Betonske višelučne brane imaju:

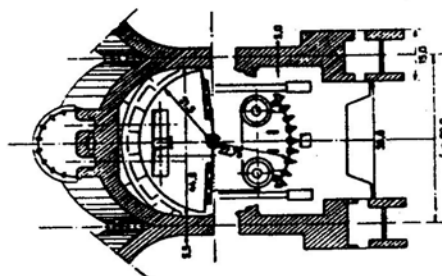
- Uzvodni nagib 1:(0.45-0.7); ($m_2 = 0.45 - 0.7$)
- Nizvodni nagib 1:((0.9-1.2) m_2)
- Debljinu luka:
 - u kruni 1.7-2 m
 - u temelju 4-8 m.



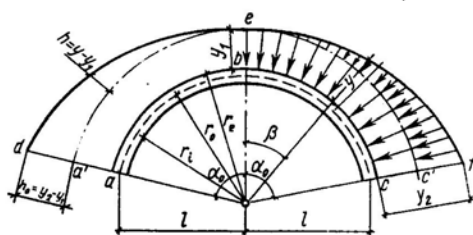
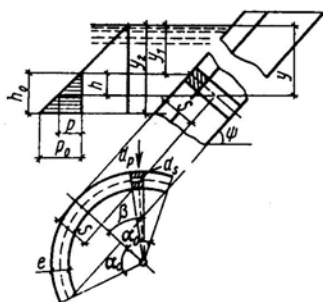
Preljevi, temeljni ispusti i zahvati vode smještaju se u kontrafore i na kontrafore.



Između kontrafora se može smjestiti i hidroelektrana.



Hidrostatsko opterećenje se nejednoliko prenosi po konturi brane zbog nagutosti luka od tjemena prema osloncima.



Pritisak u tjemenu iznosi p_1 a u osloncima p_2 :

$$\begin{aligned} p_1 &= \rho_v \cdot g \cdot y_1 \\ p_2 &= \rho_v \cdot g \cdot y_2 \end{aligned}$$

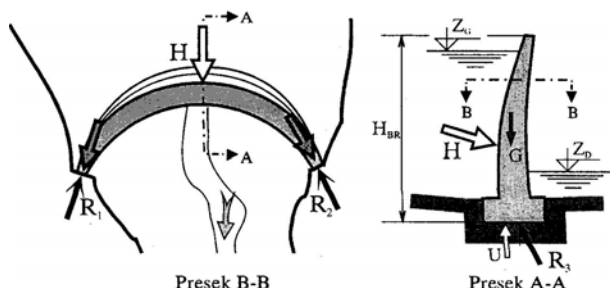
Nejednoliki hidrostatski pritisak mijenja se po zakonu:

$$p = \rho_v \cdot g \cdot R_v \cdot (1 - \cos \beta) \cdot \cos \psi$$

Ukupan hidrostatski tlak u nekom presjeku koji je zadan kutem β iznosi:

$$p_\beta = p_1 + p$$

3.3-1.3 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 m³). Armiranje se koristi samo kod otvora i u kruni brane.

Prednosti:

- 40-60% su ekonomičnije od gravitacijskih,
- brže se grade.

Nedostaci:

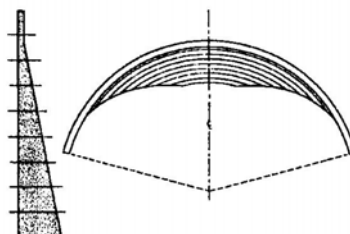
- zahtijevaju dobre uvjete temeljenja,
- zahtijevaju visokorazvijenu tehnologiju pripreme i ugradnje betona,
- zahtijevaju savjestan i iskusan nadzor i strogu kontrolu tijekom građenja i eksploatacije.

Lučna brana može se predstaviti kao “pločasti svod”, koji je sa tri strane oslonjen-ukliješten. To je statički višestruko neodređena konstrukcija, koja se radi lakše analize dijeli na elemente jednostavnih oblika.

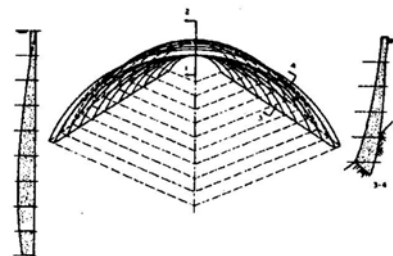
Građenje lukova je vrlo stara vještina (Rimljani).

Vrste lučnih brana:

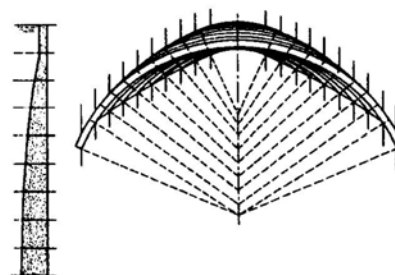
- s konstantnim radijusom



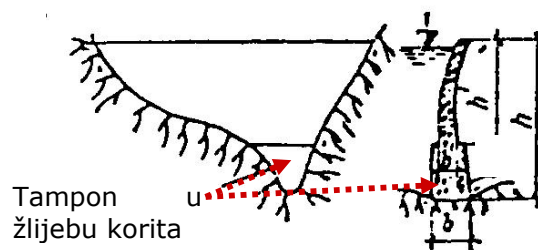
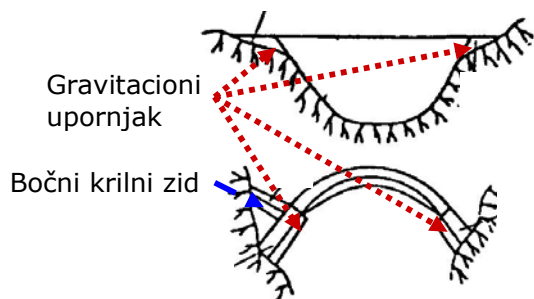
- s promjenjivim radijusom i konstantnim centralnim kutom



- s promjenjivim radijusom i promjenjivim centralnim kutom

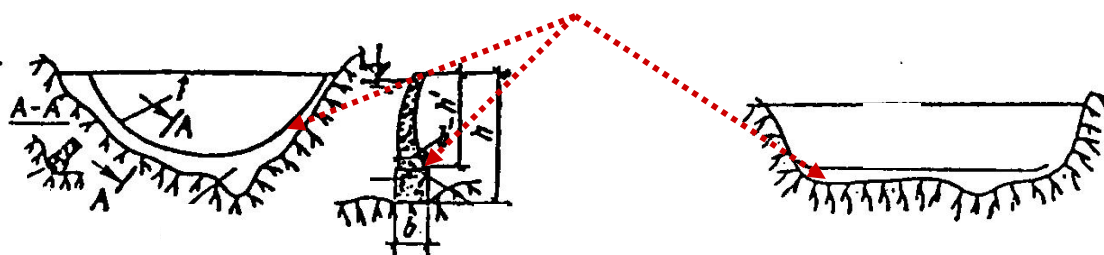


Zbog temperaturnih promjena rade se vertikalne dilatacije i koriste cementi s niskom hidratacijskom temperaturom. Da se izbjegne neravnomjerno rasprostiranje napona brana bi trebala biti simetrična što nije uvijek moguće pa se brane “dotjeravaju” da budu što više simetrične.



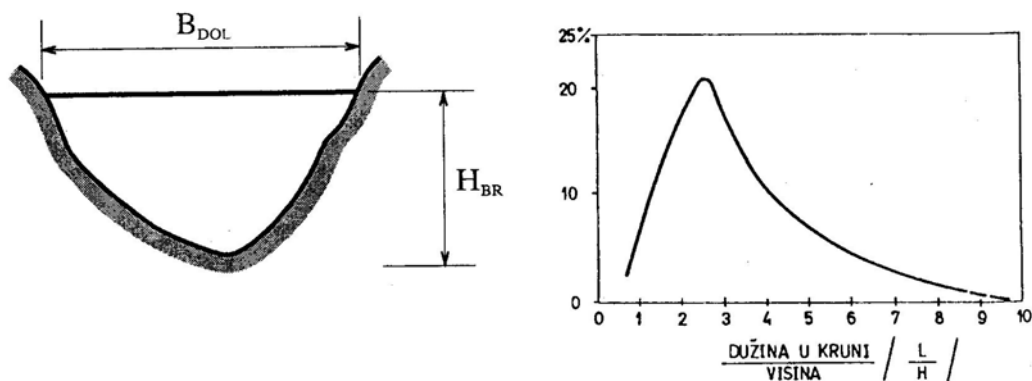
Temeljenje:

- uklanjanje rahlog materijala,
- temeljenje brane na kompaktnoj stijeni,
- po potrebi izvršiti ojačanje tla (injektiranje),
- posebnu pažnju posvetiti dobrom izvođenju kontakta sa materijalom na kojem leži temelj (perimetralna reška-fuga).



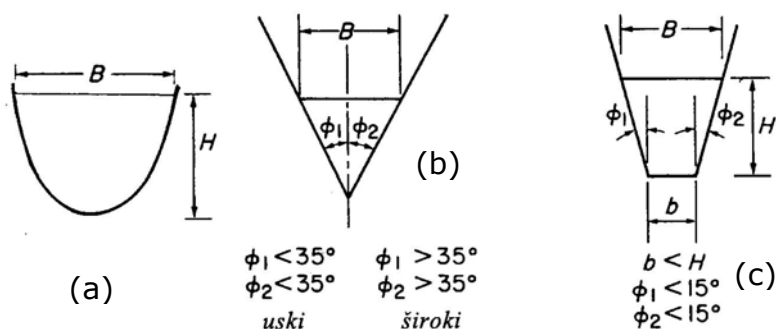
UVJET ZA GRADNJU LUČNE BRANE:

Odnos $L/H = 5-6$ (L -duljina brane u kruni; H -visina brane, npr. širina doline manja od 5 visina brane). Danas i puno smjeliji odnos $L/H=9$ ili 10.



Oblici pregradnog profila:

- Paraboličan (a)
- Trokutni – “V” oblik (b)
- Pravokutni
- “U” oblik (c)
- Kombinirani “U” i “V” oblik
- Složeni oblici

**PODJELA BETONSKIH BRANA PREMA VITKOSTI KONZOLE (β)**

($\beta = d_0/h$; d_0 -debljina konzole/stjenke u temelju, h - visina brane)

- Tankostijene lučne brane: $\beta < 0,2$
- Debelostijene lučne brane: $0,2 < \beta < 0,4$
- Lučnogravitacijske brane: $0,4 < \beta < 0,6$
- Gravitacijske brane: $\beta > 0,6$

VITKOST LUKA (R/d , R -radijus osi luka)

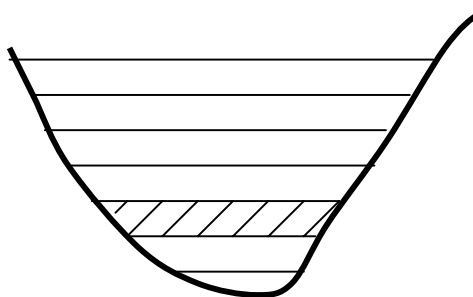
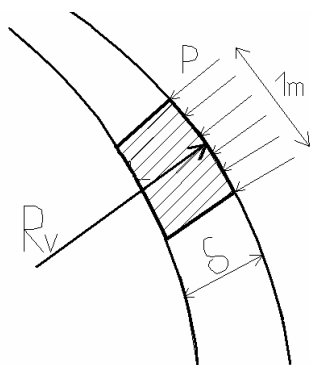
$R/d = 4-5$ debeli lukovi, gubi se lučno djelovanje po cijeloj duljini luka

Osnove proračuna**1. Preliminarno se koristi "KOTLOVSKA" FORMULA** (za cilindrični oblik uzvodnog lica)

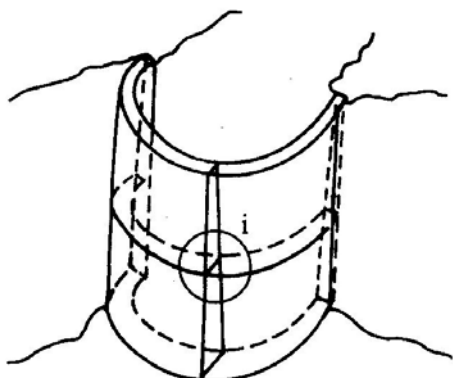
Lučna brana ZOLA visine 37.7; dužine u kruni 62.5 m; izgrađena je 1843. na temelju projekta koji je izradio otac poznatog književnika 1839. koristeći CILINDRIČNU "KOLTLOVSKU" FORMULU (bezmomentna teorija parnog kotla):

$$\boxed{\sigma_{\text{doz}} = \frac{(p \cdot R_v)}{d}} \rightarrow \boxed{\sigma_{\text{doz}} = \frac{(p \cdot R_v)}{d}} \quad \sigma_{\text{doz}} = 12 \text{ MN/m}^2$$

Pretpostavka: horizontalni presjeci se tretiraju kao kruti nezavisni lukovi složeni jedan iznad drugog. U statičkom smislu to predstavlja dezintegraciju jednog površinskog sustava kao niz nezavisnih linijskih sustav.

**2. METODA TJEMENE - CENTRALNE KONZOLE** (za cilindrični oblik uzvodnog lica)

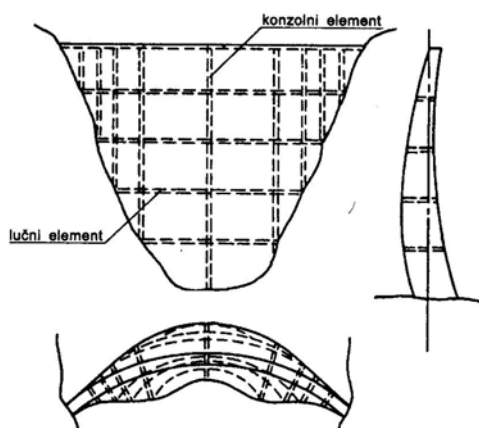
Za proračun sustava *lukovi – tjemena konzola* brana se podijeli na niz horizontalnih lukova, tako da se dobije statički sustav s toliko nepoznanica koliko ima presječnih točaka lukova i tjemene konzole.



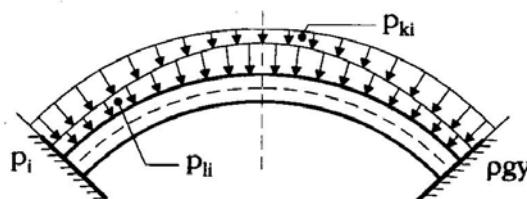
Hidrostatsko opterećenje na branu se podijeli tako da su deformacije lukova od pripadajućeg dijela opterećenja jednake deformacijama konzole od njoj pripadajućeg opterećenja (jednaki progibi). Rješenjem jednačbi dobiva se raspored hidrostatskog opterećenja na lukove i konzolu.

3. METODA VIŠE LUKOVA I KONZOLA

Brane postaju zakrivljene ploče promjenjive debljine u oba pravca. Proračun se vrši diskretizacijom na međusobno okomite pojaseve koji čine jednu složenu konstrukciju. Za rješavanje koriste se jednačbe savijanja krivih grednih i konzolnih nosača. Proračun se zasniva na sukcesivnoj raspodjeli hidrostatskog opterećenja između više lukova i konzola, pri čemu se probno izračunava njihov progib, dok se ne dobije ista vrijednost za lukove i za konzole u analiziranim čvorovima. Prvi put je ova metoda primijenjena na Hoover brani.



Model za proračun

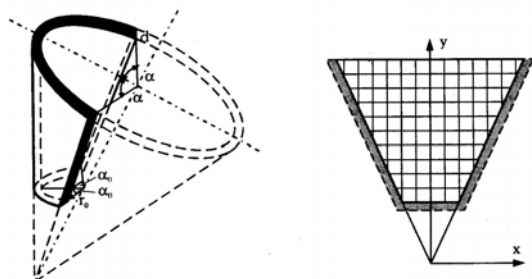


Raspodjela hidrostatskog opterećenja (p_i) na luk (p_{li}) i konzolu (p_{ki})

4. METODE LJUSKE

Više metoda:

- Promatranje brane kao dijela obrnutog kružnog stošca
- Promatranje brane kao cilindrične ljuske promjenjive debljine
- I druge.



5. SUVREMENE NUMERIČKE METODE ANALIZE NAPREZANJA I DEFORMACIJA LUČNIH BRANA

Više metoda:

- Metoda konačnih elemenata:

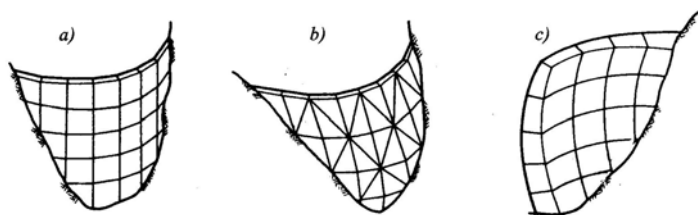
- ravninskih:

- pravokutnih elemenata (a)

- trokutnih elemenata (b)

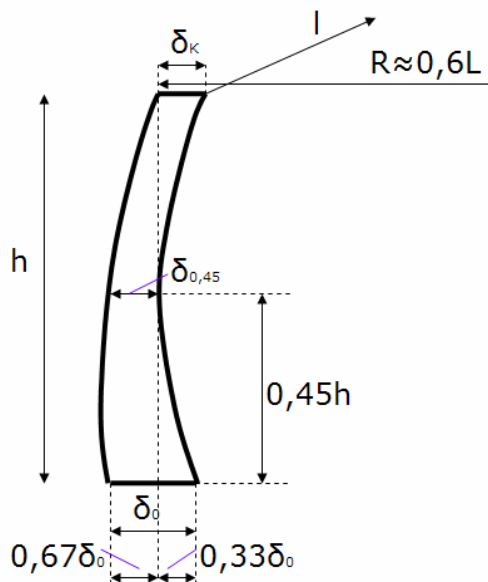
- prostornih (c)

- Metoda konačnih razlika



6. EKSPERIMENTALNE METODE – fizikalni modeli

Iskustveni izbor debljine luka



L - širina doline u kruni brane

$\delta_K = 0,01 \cdot (h + 1,2L)$ [1.5-4m]

$\delta_0 = \sqrt{(0,0012 \cdot h \cdot L \cdot (h/122)^{h/122} \cdot I)}$

I - duljina luka brane

$\delta_{0,45} = 0,95\delta_0$

U pravilu su lučne brane nearmirane ali se armiraju lokalno u donjem dijelu galerije 4-5kg čelika/m³ betona.

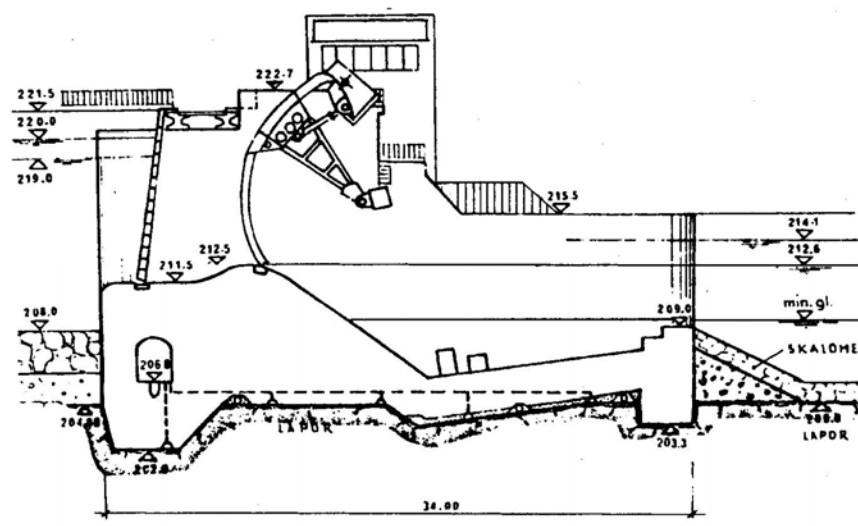
Ponekad i krunu treba armirati jer je ona prilično tanka.

3.3-1.4 Riječne pokretne brane

Grade se u nizinskim dijelovima rijeka, gdje su korita široka i pretežno se temelje na nekoherentnim materijalima. Najčešće se nalaze na plovnom 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 hidrostatsko opterećenje i prenose ga na stupove.



Spajaju se na dilatacijama i ovisno o smještaju dilatacije ovisi statička shema.



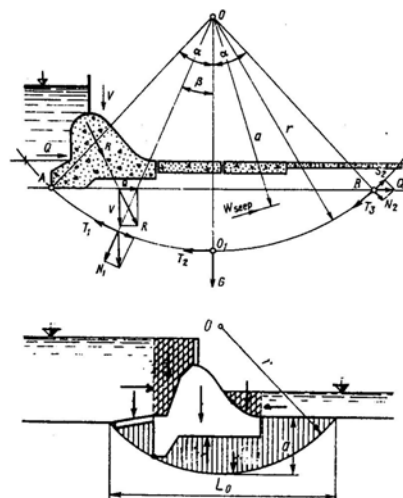
Zapornice su:

- glavne – za rad,
- pomoćne – za remont, nalaze se ispred glavnih

Zapornice su najčešće metalne i relativno lagane, s mehaničkim ili hidrauličkim pogonom.

Za riječne pokretne brane proračunava se:

- Stabilnost na klizanje (vidi betonske gravitacijske brane),
- Stabilnost na smicanje, →
- Stabilnost na isplivavanje,
- Sigurnost od hidrauličkog sloma u temeljnom tlu (ispiranje čestica iz temeljnog tla, pogotovo kod nekoherentnog tla-pijesak, šljunak):
 -(Sigurnost od hidrauličkog loma ostvaruje se produženjem puta procjeđivanja:
 - zastorom od betona ili gline na uzvodnoj strani pregrade,
 - injekcijskom zavjesom kod stjenovitog tla,
 - Izvođenje filtra i drenaže iza nizvodne nožice pregrade.



3.3-1.5 Prednapregnute brane

Vrši se sidrenje brane u tlu, čime se omogućava nadvišenje betonske gravitacijske brane (bez pojave vlačnih naprezanja). Kod prednapregnutih brana postoji ušteda u materijalu 20-40%.

