

## **II. HIDROTEHNICKI OBJEKTI**

### **II-1. Uvod**

*Hidrotehnicki objekti(konstrukcije) cine hidrotehnicki sisteme koji sluze za upravljanje(gazdovanje) vodama ili sluze za zastitu od njih:*

**1)objekti za upravljanje i gazdovanje vodama su:**

- brane,
- crpne stanice,
- rezervoari,
- kanali,
- cevovodi,
- kaskade,
- sifoni

**2)objekti za zastitu od voda su:**

- Nasipi,
- kejski zidovi,
- regulacioni objekti...

#### **II-1.1 Glavne osobine**

*Glavne osobine hidrotehnickih objekata po kojima se razlikuju od ostalih objekata visokogradnje(stambeni,poslovni,industrijske hale,silos,...) I niskogradnje(putevi,tuneli,mostovi) su:*

**1.stalno ili povremeno delovanje vode na objekat kroz sledece oblike**

**a)mehanicko dejstvo**

*-hidrostaticki pritisak i uzgon u objektu I po konturi objekta*

*-hidrodinamicki pritisak koji se odrzava preko "inercijalnih" sila,fluktacije pritiska,udara talasa I*

*sila od vode koju je uzrokovao zemljotres*

*-sila od leda koja moze da bude staticka I dinamicka*

*-sufozija I bubrenje zemljista ispod I oko objekta uzrokovano dejstvom vode*

*-erozija konture objekta usled strujanja vode brzinama vecim od 3-5(m/s) ili korozije celicnih delova koja moze da iznosi 0.02-0.06(mm godisnje)*

**b)hemijsko dejstvo**

*usled raznih hemijskih supstanci rastvorenih u vodi ona moze da razorno deluje na beton ili ostale delove konstrukcije*

**c)biolosko dejstvo**

*se ogleda u negativnom uticaju raznih organizama u vodi kao sto su alge koje se nalaze na površinama I smanjuju proticajni profil pa preko gnjilenja drvenih konstrukcija pa do bakterioloske korozije metala.*

**2.projektovanje ovih konstrukcija je znatno slozenije I zahteva detaljne istrazne radove I podloge.**

**3.izgradnja ovih objekata je znatno slozenije jer zahteva kvalitetno izvodenje u otezanim uslovima kao sto je gradjenje pod vodom I to vrlo cesto tekucim(reka),gradjenje u delovima gde nema saobracaoja I ostale komunikacije,u krajevima sa nepovoljnim klimatskim uslovima a pri tome ovi radovi se vrlo cesto izvode vise godina.**

*4. staticka I funkcionalna sigurnost ovih objekata mora biti velika jer posledice od njihovog rusenja mogu da budu katastrofalne, ne samo finansijske vec i u ljudskim zivotima, a sa druge strane ovi objekti su u finansijskom smislu jako skupi pa promasaji u funkcionisanju povlace sa sobom velika materijalna sredstva.*

*5. vecina ovih objekata se zbog konkretnih topografskih, geoloskih I drugih uslova ne moze tipski projektovati*

## **II-1.2 Podela hidrotehnickih objekata**

*Podela hidrotehnickih objekata moze biti visestruka i to:*

### **1. Prema mestu na kome se grade:**

*-recni objekti (unutar i na obali)*

*-jezerski*

*-morski*

*-unutar hidrotehnickih sistema (vodovodi, kanalizacije, navodnjavanje, odvodnjavanje...)*

### **2. Prema uslovima koriscenja**

*-stalni*

*-privremeni*

*Stalni objekti imaju svoj vek trajanja ne manji od 25-30 godina, a postoje primeri brana u Indiji koje*

*traju I po nekoliko hiljada godina. Ovo podrazumeva stalno investiciono odrzavanje.*

*Privremeni objekti grade se kao pomoc, da bi se izgradio stalni objekat (zagati, pregrade... ) ili*

*da bi se poplavio ili rekonstruisao postojeci.*

### **3. Prema delovanju na prirodni tok I rezim vode**

*-objekti koji menjaju razim vode (brane, nasipi, regulacione gradjevine)*

*-objekti koji stvaraju nove tokove (kanali, cevovodi, vodozahvati, ispusti, prelive...)*

### **4. Prema nameni:**

*-objekti opste namene koji imaju za zadatak uredjenje rezima recnog korita I njegovog najekonomicnijeg koriscenja (brane, nasipi, kejski zidovi) I regulacione gradjevine...*

*-objekti posebne namene koji se nalaze na hidrotehnickim sistemima kao sto su:*

*a) koriscenje vodnih snaga (hidroelektrane, hidrotehnicki tuneli)*

*b) hidrotehnicke melioracije (odvodnjavanje I navodnjavanje poljoprivrednog zemljista), kanali, crpne stanice, cevovodi*

*c) vodosnabdevanje naselja I industrije (zahvati, cevovodi, crpne stanice, rezervoari...)*

*d) odvodjenje upotrebljenih voda (cevovodi, kolektori, kanali, UPOV)*

*e) saobracaj navodi (kanali, prevodnice, pristanista)*

## **II-1.3 Podloge i istrazni radovi**

*Kao sto smo ranije istakli kod projektovanja i gradjenja hidrotehnickih objekata neophodne su znacajne aktivnosti na prikupljanju potrebnih podloga i pripremi ulaznih parametara preko istraznih radova. Istrazni radovi se rade u cilju prikupljanja sto boljih geoloskih i geomehanickih podloga.*

*a) podloge u cilju sagledavanja postojecih resursa u vodi koje se nazivaju hidroloske i*

## **meteoroloske.**

**a1)** opste geografske i hidrografske podloge za definiciju sliva

(vegetacija, vrstazemljista, padavine, temperature, vlažnost vazduha, vetrovi, ETP...)

**a2)** podaci o merenim vodostajima i proticajima u zadnjih 20-40 godina statistickom obradom

(velike vode) povratnog perioda 1000;100;50;10;2;(godine)

**a3)** podaci o biologskom minimumu za dati vodotok

**a4)** podaci o nanosu(suspendovani i vuceni)

**a5)** krive trajanja vodostaja i proticaja sa krivama verovatnoce pojave

## **b) topografske podloge**

**b1)** situacione karte sliva i vodotoka(hidrogeografska karta) pogodne razmere 1:100 000 do 1:25 000

**b2)** poduzni i poprecni profil vodotoka i akumulacionog bazena(doline)

## **c) geoloske i geomehanicke podloge**

ove podloge definisu osobine zemljista na kome ce se graditi objekat, tu se misli na opsta fizicka

svojstva zemljista i na specificna

**-opsta fizicka svojstva su:**

granulometrija, zbijenost, ugao

unutrasnjeg

trenja, kohezija, nosivost, deformabilnost, poroznost, otpornost na smicanje...

**-specificna svojstva su:**

Ocena vododrzivosti akumulacije(ispucalost, privilegovani tokovi, nivoi P.V), stabilnost bokova dolina, mogucnost koriscenja okolnog tla za izgradnju.

## **II-2. BRANE HIDROTEHNICKI OBJEKTI**

### **II-2.1 Uvod**

Podizanjem pregrade na reci stvara se visinska razlika izmedju nivoa ispred i iza te pregrade. Takodje se stvara i mogucnost akumulisanja vode ispred pregrade tako da u periodima za zahvat vode iz reke za neke potrebe(vodovod, navodnjavanje...) kolicina zhvacene vode moze da bude i veca od trenutnog dotoka rekom jer imamo na raspolaganju ranije pomenutu dodatnu zapreminu vode. Osim ove prednosti izgradnja brane i tako stvorene denivelacije gornje i donje vode moze se koristiti I za proizvodnju elektricne energije.

$$N=Q*H*\gamma*\eta \text{ [kw]}$$

$$E=N*T \text{ [kwh]}$$

$\gamma$ -specificna tezina vode(KN/m<sup>3</sup>)

$Q$ -proticaj kroz turbine

$H$ -denivelacija vode ispred i iza brane

$\eta$  –stepen korisnog dejstva turbine,  $\eta < 1$  I najcesce je **0.7**

$E$ -proizvedena energija

$N$ -snaga hidroelektrane

$T$ -vreme rada turbina (h)

$\eta$ -predstavlja odnos iskoriscenosti energije toka u odnosu na proizvedenu elektricnu energiju

Pregrade mogu da sluze i radi regulisanja uzvodnog nivoa i to u svrhu bezbedne plovidbe pri manjim vodostajima i u svrhu gravitacionog zahvata vode iz reke. Takav primer je hidrocvor Becej i brana na Tisi.

**Elektricna energija** proizvedena na hidroelektranama je najcesce **vrсна energija**, odnosno proizvodi se samo u periodima dana kada su najveće potrosnje elektricne energije. **Osnovna energija (bazna)** je proizvedena u **termoelektranama**.

Brane zajedno sa akumulacionim prostorom su hidrotehnicki objekti, odnosno imaju visenamensku ulogu u hidrotehnickim sistemima:

- proizvodnja elektricne energije (vršana energija)
- akumulisanje vode za susne periode (naselja, navodnjavanje poljoprivrednih kultura, industrija)
- aktivna zastita od poplava
- ribarstvo
- turizam i rekreacija
- poboljsanje kvaliteta vode nizvodno od brane pri malim prirodnim proticajima u nekim periodima g.
- plovidba pri malim proticajima (Djerdap)

Brane koje sluze za proizvodnju elektricne energije mogu da budu **protocne** kada stvaraju isključivo denivelaciju, a ne akumulisu vodu.

Drugi tip su **akumulacione** kada se u periodima smanjene potrosnje voda akumulise za period kada je porosnja struje velika odnosno kada je proticaj kroz turbine veci od trenutnog doticaja rekom.

U slucaju da postoji mogucnost izgradnje akumulacije iznad postojeće brane na vodotoku pojavljuje se I treci tip to su **revirzibilne akumulacije**. U periodu kada imamo veće doticaje rekom nego sto je potrebno stvara se visak elektricne energije koji se koristi za rad crpne stanice koja pumpa vodu u revirzibilnu akumulaciju. U drugom periodu kada su doticaji mali voda se sa istom cevi vraca nazad na turbine I proizvodi dodatnu elektricnu energiju.

### **Tipovi brana**

Po svojim konstruktivnim karakteristikama, nacinu prihvatanja opterećenja od vode I prenosnja na tlo,

Brane mogu biti:

- 1) **Gravitacione**
- 2) **Olaksane**
- 3) **Lucne**
- 4) **Nasute**

Od prethodno nabrojanih tipova najzastupljenije su **nasute i betonske brane**. Statistika pokazuje da je oko 90% brana na svetu nasutih, bilo od zemlje ili kamenog nabacaja. Ovo je posledica dobrih osobina nasutih brana, pocev od malih zahteva za nosivoscu temelja, do obicno lako dostupnog prirodnog materijala za nasip, koje se efikasno ugradjuje mocnom mehanizacijom.

Prema konvenciji Medjunarodnog udruženja za visoke brane ICOLD, brane se **po velicini** mogu svrstati u:

- 1) **Visoke brane**
- 2) **Niske brane**

Pod **visokim** smatraju se brane cija **gradjevinska visina** (od najnize kote temelja do krune) prelazi 15m, ako im je dužina u kruni veća od 500m, ili stvaraju akumulaciju veću od 1 000 000 (m<sup>3</sup>), ili

su im evakuacioni organi dimenzionisani na proticaje vece od 2000(m<sup>3</sup>/s).

Prema nacinu evakuacije velikih voda brane mogu biti:

1)**Prelivne**-kod kojih voda preliva preko posebno oblikovanog preliva(pri evakuaciji velikih voda) Preko posebno oblikovanog prelivnog dela.

2)**Neprelivne**-koje nisu predvidjene za prelivanje,pa se za evakuaciju velikih voda koristi poseban objekat(na primer:prelivna brana)

3)**Kombinovane**-kod kojih je deo brane prelivan,dok ostatak konstrukcije nije predvidjen za prelivanje (betonske brane)

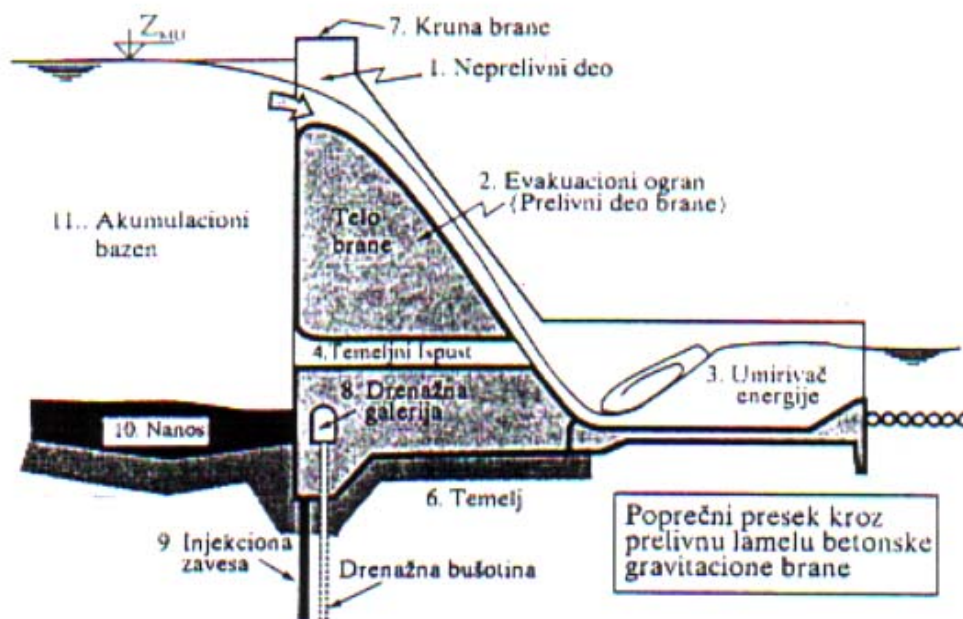
## II-2.2 Osnovni elementi brane

Nezavisno od tipa,velicine i namene vecina brana ima odredjene “obavezne elemente.

**1.Neprelivni deo** brane,je sama brana-pregrada za stvaranje akumulacije.

**2.Evakuacioni organ** je objekat koji omogućava kontrolisanu evakuaciju velikih voda(moze biti u sklopu brane ili nezavistan objekat)

**3.Umirivac energije** je sastavni deo evakuacionog organa,koji služi da umiri energiju prelivne vode,da ne bi doslo do potkopovanja temelja,i rusenja brane.



**4.Temeljni ispust** omogućava praznjenje akumulacije i ispiranje nanosa.

**5.Temelj** sacinjava sredina(stena ili tlo) ispod i oko objekta,koja je usled opterecenja i prisustva vode,kao i usled geotehnickih radova(injektiranje,dreniranje),promenila naponsko i fizicko stanje.

**6.Kruna brane** je horizontalna “traka” na vrhu brane duz koje je omogucen saobraćaj preko brane.

**7.Drenazni sistem** omogućava smanjenje uzgona u brani i temelju,i kontrolisano odvodjenje provirne vode iz brane i temelja.Sastoji se od drenaznih busotina,galerija(po potrebi,pumpi i neophodne opreme),ili slojeva tucanika zasticenog filtrom,zavisno od tipa brane i tipa drenaze.

**8.Injekciona zavesa** i/ili **zastor** sprecava ili produzava put provirnoj vodi,cime smanjuje uzgon i provirni proticaj kroz branu I temelj.

Pored nabrojanih elemenata same brane treba pomenuti:

**9.Nanos** koji se,kako je napred objasnjeno,ne moze izbeci,i na koji uvek treba racunati.

**10.Akumulacioni basen** zbog koga se brana gradi

### **II-2.3 Izbor pregradnog profila**

**Izbor pregradnog profila**-mesta na kome ce se brana podici-je prvi zadatak pri projektovanju svake brane,s obzirom da mesto brane odredjuje mogucu zapreminu akumulacije i velicinu sliva,a time i hidrolski potencijal raspoloziv za mogucu potrošnju.Uz to,geoloske i geomehanicke osobenosti tla na mestu pregradnog profila bitno uticu na uslove fundiranja koji su jedan od najvaznijih cinilaca za odredjivanje tipa brane.Zato je neophodno da izabrani profil bude optimalan.

**Najvazniji ciniooci pri izboru pregradnog profila (profila brane) su:**

**1.Kolicina vode** na profile(koja,uz odgovarajuce izravnanje,treba da zadovolji zahteve korisnika).Da bi se utvrdila kolicina vode neophodni su pouzdana hidrolski podaci kojima se dokazuje postojanje ocekivanih proticaja-niz srednjih mesecnih (nedeljnih) proticaja za period od najmanje 20 godina (pozeljno je 40 i vise godina)

Pored kolicine vode bitan je i **kvalitet**,pa se odgovarajucim analizama mora utvrditi:

- a)da li je voda dobra za koriscenje
- b)da li je voda agresivna za objekat

**2.Topografija terena** koja odredjuje:

- a)**Zapreminu akumulacije**,V, zavisno od visine brane H (sto veci odnos V/H to bolje).
- b)**Sirinu pregradnog profila** (duzinu brane),od cega zavisi zapremina brane,a cesto i tip i kostonje brane
- c)**Dispoziciju** (raspored) i tip brane i evakuacionih organa,zahvata,I ostalih objekata.

Psto je odredjena makro lokacija,brana se najcesce projektuje nesto nizvodnije od **najuzeg preseka doline**.Ovim se omogucava bolje upiranje bokova objekta na strane doline.

**3.Geoloski i geomehanicke uslovi** koji utvrđuju:

a)**Stanje sredine za temelj brane i temelje pratećih objekata.**

Neophodno je odrediti otpornost na smicanje,nosivost,deformabilnost i vododrživost sredine.Ove

osobine su cesto klucne pri izboru mikrolokacije pregradnog profila,kao i pri odredjivanju najpovoljnijeg tipa brane.

b)**Vododrživost akumulacije** moze potpuno kompromitovati lokaciju,a takodje se mora voditi racuna i o

**stabilnosti bokova akumulacije** (treba imati na umu akumulaciju Vajont gde je cello brdo skliznulo u

akumulaciju,izazvalo katastrofalni poplavni talas)

**4.Dostupnost gradjevinskih materijala** odgovarajuce kolicine i kvaliteta.Laka dostupnost odredjenog materijala utice na cenu,i moze da ima presudan uticaj na izbor profila za branu,kao i tipa brane.

**5.Troskovi eksproprijacije zemljišta** i izmestanje naselja,industrije i saobracajnica.

## 6. Ekoloski, kulturni i politicki cinioci.

### **II-2.4 Izbor tipa brane**

Izbor tipa brane tesno je povezan sa izborom pregradnog profila. Za odredjeni profil (sa svojim topografskim, hidrološkim, geološkim, i geomehanickim osobinama), trazi se tehnicki i ekonomski najpovoljniji tip brane. (i ovde ponekad uticu drustveno-politicki cinioci, ili ekologija, sto moze da izmeni ekonomsku odluku.)

Da bi se moglo diskutovati o izboru tipa brane, neophodno je kratko upoznavanje sa prednostima i nedostacima najzastupljenijih tipova brana (betonske: lucne i gravitacione, i nasute: zemljane i kamene).

#### Prednosti nasutih brana su:

a) **Minimalni zahtevi za uslove fundiranja** (narocito kod zemljanih brana), kako sa gledista nosivosti, tako i sa gledista sleganja. **Prilagodljivost gotovo svim vrstama terena**, kako geološkim tako i topografskim: od stene do aluviona, od siroke ravninarske doline do uske klisure (naravno pod uslovom da se moze obezbediti proctor za evakuaciju velikih voda).

b) Mogucnost **koriscenja raznovrstnog i heterogenog materijala za nasip**, cesto raspolozivog u blizini pregradnog profila.

c) **Jeftino i brzo ugradjivanje** koriscenjem mehanizacije, sto zajedno sa prethodnim, omogucava malo koštanje po jedinici zapremine brane.

#### Mane nasutih brana su:

a) **Velika osetljivost na prelivanje** (spoljasnju eroziju)

b) **Velika osetljivost na nekontrolisano procurivanje i ispiranje materijala** (unutrasnja erozija)

c) Kao posledica prve dve mane: za **evakuaciju velikih voda**, kao i za temeljni ispuš i zahvat potrebni su posebni betonski objekti van tela nasipa, a evakuacioni organ mora se dimenzionisati na veci proticaj nego kod betonskih brana zbog osetljivosti nasipa na prelivanje.

d) **Veliki obim radova** usled blagih kosina uzvodnog i nizvodnog lica, sto se cesto nadoknadjuje niskom jedinicom cenom.

#### Prednosti betonskih brana su:

a) Znacajna izdržljivost na prelivanje i procurivanje, sto omogucava da se evakuacioni organi i zahvati grade u sklopu same brane, kao i da se dimenzionisu na manji proticaj (sto smanjuje koštanje).

b) **Utrosak male kolicine materijala** u odnosu na nasute brane, s obzirom na daleko strmiji nagib kosina, posebno kod lucne brane.

#### Mane betonskih brana su:

a) **Visoki zahtevi za uslove fundiranja** (visoka nosivost i otpornost na smicanje, a niska deformabilnost).

b) **Visoka jedinica cena**, s obzirom na potrebe dovoženja cementa, ponekad i agregata, i na relativno spor rad, koji zahteva brojniju radnu snagu nego u slucaju nasutih brana.

c) Kod lucnih brana se, pored **stabilnosti bokova i dna doline**, zahteva jos i odgovarajuci odnos visine brane i sirine doline (jer je zbog nacina prenosjenja opterećenja lucna brana podesna samo za relativno uske doline).

## **II-2.5 Uzroci rusenja brana**

Brane se mogu srusiti, rusenja su se, na zalost desavala u proslosti. Najvazniji uzroci rusenja brana su:

### **1. Nepredvidjeno prelivanje brane**

Do prelivanja brane moze doci usled kvara na ustavama, ili greske pri upravljanju ustavama, ili usled nedovoljnog kapaciteta evakuacionih organa. Betonske brane se u tom slucaju mogu “prevrnuti” (tacnije “odlomiti” i smaknuti), a nasute brane stradaju od progresivne erozije tela brane.

Da bi se izbeglo prelivanje brane neophodno je:

- a) Obezbediti pouzdana hidroloske podloge i racunati sa poplavnim talasom odgovarajuce velicine
- b) Ispravno odrediti tip i kapacitet evakuacionih organa, i takav kapacitet postici pravilnim izvodenjem i odrzavanjem objekta.
- c) Ako se za evakuaciju velikih voda koriste prelive sa ustavama, obavezno je predvideti visе pogonskih mehanizama, rezervna prelivna polja (za slucaj da neka od ustava otkaze), kao i odgovarajuci nacin upravljanja ustavama i osigurati bezbedan prilaz ustavama

### **2. Unutrasnja erozija materijala brane ili njenih temelja**

Nedovoljno poznavanje osobina materijala na kome se brana fundira ili material od koga je brana

Izgradjena, kao I neodgovarajuci tretman temelja I tela brane moze dovesti do nekontrolisanog prelivanja vode kroz temelj ili telo brane, sto izaziva ispiranje (unutrasnju eroziju) materijala, I konacno rusenja objekta. Cesto se javi “privilegovan” put vode pored cevi temeljnih ispusta ili drugih “stranih” tela u nasipu brane.

Zato je neophodno:

- a) Sto potpunije poznavanje osobina sredine u kojoj se brana temelji, kao i materijala od koga se brana gradi.
- b) Izbegavati resenja koja bi mogla da izazovu nekontrolisano procurivanje (cevi u telu nasipa brane)
- c) Ispravno izvodenje, osmatranje i odrzavanje svih osetljivih mesta gde bi mogao da se stvori “privilegovan” put vode, ako je vec neophodno da se takva mesta (slabe tacke) uopste projektuju.

### **3. Neispravan staticki proracun prilikom projektovanja brane**

Najcesce je u pitanju zanemarivanje ili potcenjivanje nekih od sila koje narusavaju stabilnost brane-sile uzgona u prvom redu.

Na svim znacajnijim branama ugradjuju se uredjaji preko kojih se osmatra ponasanje brane u toku eksploatacionog perioda (uredjaji za oskultaciju). Beleze se sleganja brane, nastanak i sirenje prslina i pukotina u brani i temelju, proviranje i pritisak vode, I slicno.



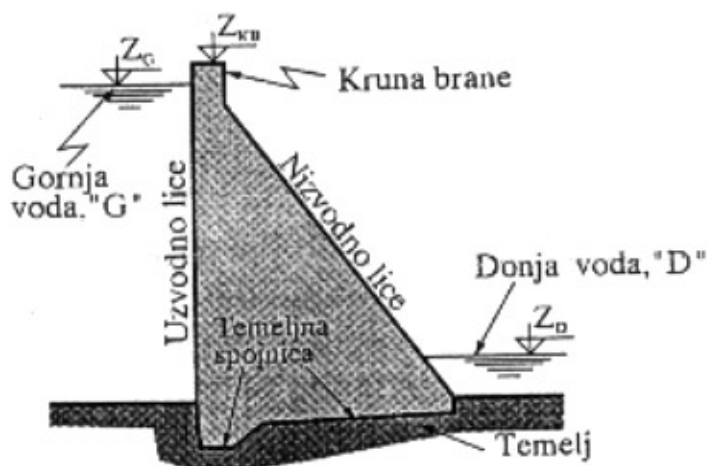
Pracenje i analiza osmotrenih velicina omogućava da se na vreme uoce, i po mogucstvu otklone, uzroci ostecenja ili rusenja brane. Takodje, trebalo bi uporediti stvarno ponasanje brane i temelja sa rezultatima proracuna iz projekta, cime se stice dragoceno iskustvo za buduće objekte.

Da bi se ublazile posledice eventualnog rusenja brana, prema propisima mnogih drzava (ukljucujuci I nasu) za svaku visoku branu obavezno je proceniti (fizickim ili matematickim modelom) prostiranje poplavnog talasa koji nastao usled rusenja brane, i na terenu obeleziti granicu ugrozenog podrucja odakle se stanovnistvo mora evakuisati u slucaj da dodje do opasnosti od rusenja brane.

## II-2.6 Betonske gravitacione brane

**Betonska gravitaciona brana suprostaavlja se spoljasnjim silama sopstvenom tezinom.** I nasute brane formalno spadaju u tip gravitacionih brana, jer se opterecenju suprostaavlja tezinom, ali je uobicajeno da se termin "gravitacione" odnosi na betonske brane, pa ce se tako I ovde postupiti.

Gravitacione (betonske) brane grade se na tlu koje ima dovoljnu nosivost da primi tezinu brane I opterecenja koje brana prenosi u temelj.



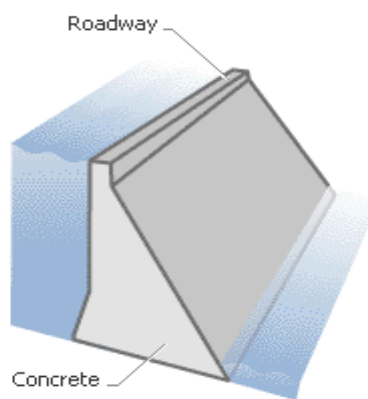
Poprečni presek neprelivnog dela betonske gravitacione brane

### sl.1

Poprečni presek gravitacione brane ima oblik približno pravouglog trougla, sa dužom katetom kao uzvodnim licem. Ovakav oblik preseka proizilazi iz uslova stabilnosti, o čemu ce biti reci kasnije.

Po pravilu ove brane su **prelivno-neprelivne**, što znaci da se jedan deo brane (prelivni deo) oblikuje se tako da se preko njega voda može slobodno ili kontrolisano prelivati u nizvodno korito. Sta više, gravitacione brane se cesto koriste kao prelivni objekti (evakuacioni organi) nasutih brana.

## Betonska gravitaciona brana



**Concrete gravity dam**

***Betonska gravitaciona brana***



### ***II-2.6.1 Opterecenja koja deluju na gravitacionu branu***

*Prvi zadatak pri dimenzionisanju brane je da se odrede opterecenja koja na objekat deluju (analiza opterecenja). Najvaznija opterecenja kod brana su:*

- 1) Hidrostaticki pritisak na uzvodno i nizvodno lice brane***
- 2) Uzgon (porni pritisak)***
- 3) Dinamicki pritisak vode usled vetra i talasa***
- 4) Pritisak leda***
- 5) Pritisak nanosa***
- 6) Sile od zemljotresa***
- 7) Tezina brane (i temelja)***

8) **Reakcija brane (temelja)**-sila iste jacine  $I$  pravca, a suprotnog smera od rezultante spoljnih sila (nabrojanih od 1-7)

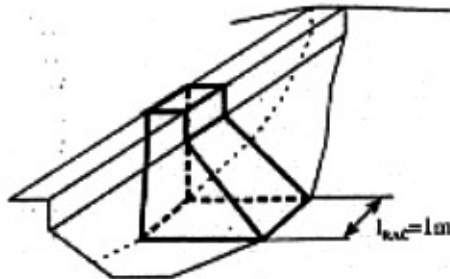
**Obicno se opterecenja klasifikuju.**

- a) **Osnovna** (sva navedena opterecenja pri normalnim pogonskim uslovima, izuzv zemljotresa)
- b) **Dopunska** (uticaj temperature, od tecenja  $I$  skupljanja betona, od deformacije temelja isl.)
- c) **Izuzetna** (sva navedena opterecenja, ali izuzetne jacine) i zemljotres
- d) **U toku gradjenja**
- e) **U toku pregleda i popravki**

Gravitacione brane se grade kao niz vertikalnih konzolnih nosaca medjusobno razdvojenih razdelnicama

Zato je svaka konzola (lamela) brane nezavisna  $I$  mora da bude za sebe stabilna. S obzirom na malu sirinu konzola (obicno 6 do 16(m)), moze se smatrati da je zadatak ravanski, pa se opterecenja i stabilnost izrazavaju i racunaju za  $1$  metar duzni brane. ( $l_{rac} = 1m$ ). **Obicno se analiza opterecenja sprovodi za presek sa najvecom visinom, a** po potrebi se analiziraju  $I$  drugi preseki (u osloncima, ili na mestu promene uslova fundiranja)

Preglednosti radi, uobicajeno je da se svaka od razmatranih sila rastavi na **horizontalnu i vertikalnu** komponentu, odakle se dobija horizontalna i vertikalna komponenta **rezultante svih sila**. Pri analizi opterecenja je pogodno "figure" kojima se predstavljaju pritisci, tezine, ili uzgon izdeliti na proste geometrijske oblike (trougao, pravougaonik, deo kruga i sl.).



**Racunski segment brane jedinične dužine**

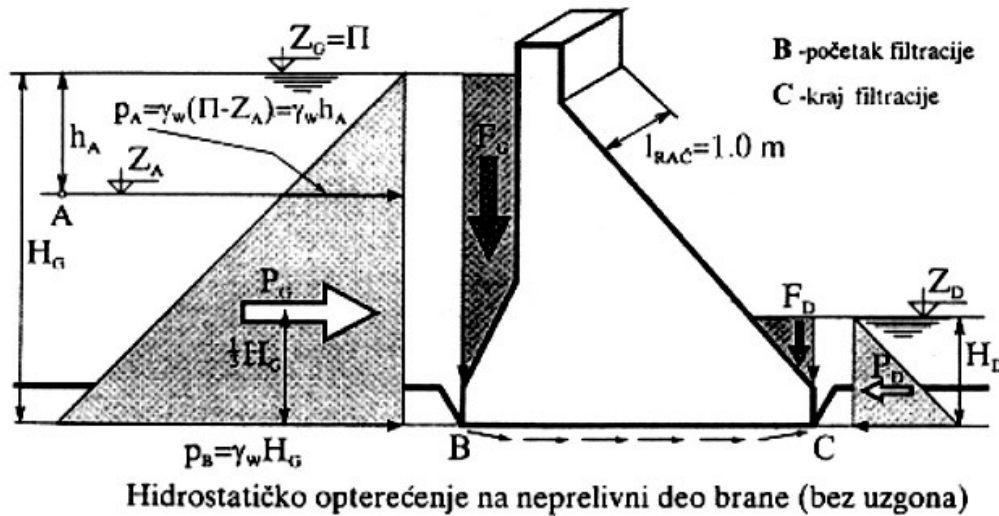
sl.2

- **Hidrostaticki pritisak**

**Hidrostaticki pritisak, odnosno sila hidrostatičkog pritiska, je najznacajnije opterecenje koje deluje na branu.** Ovo je takozvani spoljni pritisak vode (unutrasnji pritisak vode je uzgon-porni pritisak).

Prema osnovnoj jednačini hidrostatičke, hidrostatički pritisak u nekoj tacki tecnosti jednak je visinskoj razlici pijezometarske kote i položajne kote posmatrane tacke, pomnozeno sa specifičnom težinom vode,  $\gamma_w$ . Ako je tecnost u dodiru sa atmosferom, kao na slici, pijezometarska kota je ujedno i kota slobodne površine tecnosti ( $\Pi = ZG$ ), pa je hidrostatički pritisak jednak dubini vode u tacki pomnozeno sa specifičnom težinom ( $p = \gamma_w \cdot h$ ). Treba imati na umu da je ovo tzv. relativni pritisak, kod koga se izostavlja uticaj atmosferskog pritiska (pritiska sloja vazduha iz atmosfere), za razliku od apsolutnog pritiska, gde se ukljucuje i atmosferski pritisak ( $p_{abs} = p + p_{atm}$ ). U praksi se najcesce radi sa relativnim pritiskom, s obzirom da prakticno isti atmosferski pritisak deluje u svim tackama objekata.

Pritisak integrisan po površini na koju deluje daje silu hidrostatičkog pritiska-hidrostaticku silu. Hidrostatičke sile se računaju po nacelima hidrostatičke. Horizontalna komponenta,  $P$ , hidrostatičke sile na neku površinu jednak je hidrostatičkoj sili na vertikalnu projekciju te površine, upravno na pravac dejstva tražene horizontalne komponente. Vertikalna komponenta,  $F$ , hidrostatičke sile na površinu jednaka je težini tečnosti u zapremini između razmatrane površine i horizontalne projekcije površine u ravni pijeziometarske kote.



sl.3

Za ravanski zadatak treba odrediti silu koja deluje na jedan dužni metar površine, jer je opterećenje isto u svim ravnama upravno na razmatranu površinu. Tako je horizontalna komponenta hidrostatičke sile po jedinici dužine na uzvodnom licu brane,  $P_G$  (Indeks "G" označava gornju vodu), jednaka površini trougla koji predstavlja raspored pritiska po dubini, pomnožen sa specifičnom težinom vode:

$$P_G = \gamma_w * H_G^2 / 2$$

Gde je dubina gornje vode,  $H_G$ , merena od nivoa vode ispred brane do kote spojnice na kojoj počinje filtracija (na prethodnoj slici filtracija počinje na uzvodnoj ivici temeljne spojnice). Sila  $P_G$  deluje na rastojanju od  $1/3 H_G$ , od kote na kojoj počinje filtracija (u težistu površine opterećenja koje sila predstavlja-zamenjuje). Horizontalna komponenta hidrostatičke sile na uzvodnom licu,  $P_D$  (horizontalna sila od donje vode), je:

$$P_D = \gamma_w * H_D^2 / 2$$

a deluje na rastojanju od  $1/3 H_D$  iznad kote spojnice na kojoj se filtracija završava (nizvodna ivica temeljne spojnice na prethodnoj slici)

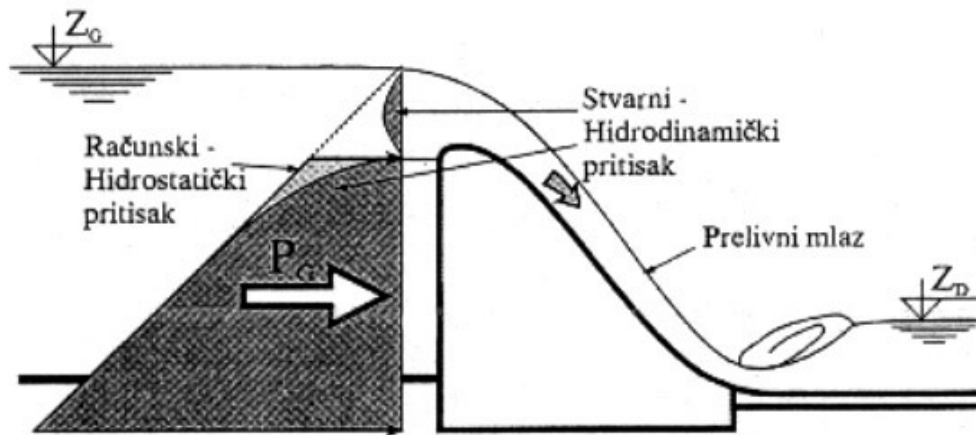
Vertikalna komponenta hidrostatičke sile (po jedinici dužine) na uzvodnom licu brane je:

$$F_G = \gamma_w * V_G$$

I deluje u težistu "zapremine"-površine,  $V_G$ , (u težistu trapeza), a vertikalna sila na uzvodnom licu je:

$$F_D = \gamma_w * V_D$$

I deluje u težistu trougla iznad nizvodnog lica.



Hidrostatičko opterećenje na prelivni deo brane (bez uzgona)

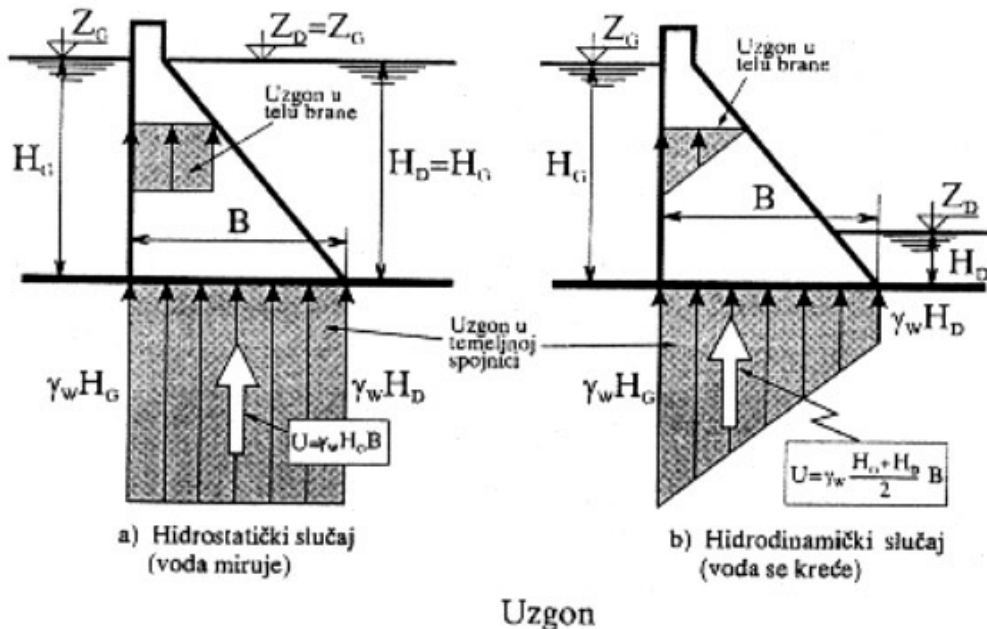
sl.4

Kod prelivnog (prethodna slika) dela brane obično se pretpostavlja da prelivni mlaz ne deluje na branu. Ovo je na strani sigurnosti, jer je pritisak na donjoj ivici mlaza jednak nuli pri računskom proticaju, dok je pri manjim proticajima pozitivan, što doprinosi stabilnosti. Na strani sigurnosti je i pretpostavka o hidrostatičkom rasporedu pritiska na uzvodnom licu brane, jer stvarni-tzv. hidrodinamički pritisak manji.

- **Uzgon**

Beton i stena su manje ili više porozne sredine, prozete mnoštvom povezanih mikro i makro supljina (pore, prsline, pukotine) u koje se voda zavlaci i kroz koje provire (filtrira). Uzgon je opterećenje kojim voda u supljinama betona i temeljne sredine potiskuje objekat navise. Uzgon deluje i pri hidrostatičkom stanju (kada voda u supljinama miruje), i pri hidrodinamičkom (kada se kreće-filtrira).

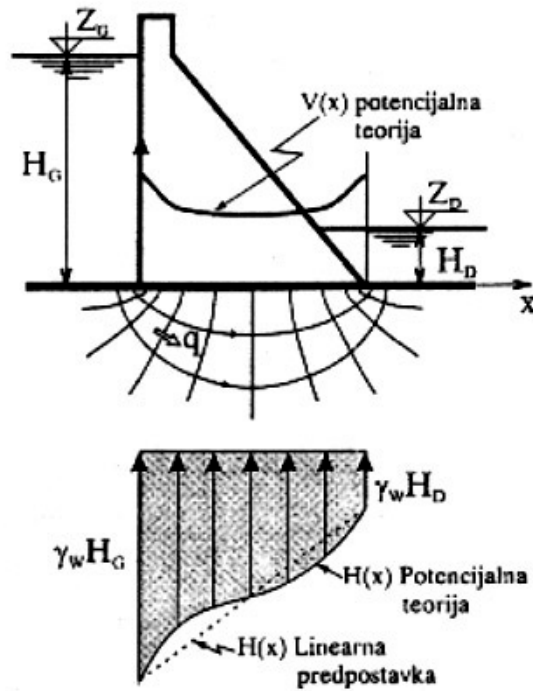
Pri hidrostatičkim uslovima uzgon je (kao i svaka vertikalna hidrostatička sila) jednak težini vode između površine na koju deluje (kontakt brane i tla na prethodnoj slici pod a)) i horizontalne projekcije površine u ravni pijezometarske kote. Za ravanski zadatak, težina po jedinici dužine je jednaka površini između linije dodira duž koje deluje uzgon, i pijezometarske linije, pomnoženo sa specifičnom težinom vode. Uobičajeno je da se ta površina, odnosno dijagram opterećenja, crta ispod linije dodira (u smeru dejstva opterećenja), bas kao što je i prikazano na prethodnoj slici.



### Sl.5

*I pri hidrodinamičkim uslovima (kada se voda kreće) uzgon se racuna na isti nacin-nema razloga da bude drugacije. Jedina razlika je u tome sto sada pijeziometarska kota nije vise horizontalna, vec opada u smeru tecenja jer se energija troši na gubitke pri proviranju vode (prethodna slika pod b)).*

*U homogenoj i izotropnoj sredini brzina vode ispod brane je priblizno konstantna (sem u blizini uzvodne i nizvodne ivice (na narednoj slici prikazano), pa se obicno usvaja da pritisak, odnosno pijeziometarska linija, opada linearno. Ovakva pretpostavka je cesto na strani sigurnosti, jer sila uzgona racunata po linearnoj teoriji, ULIN, daje veci momenat prevrtanja oko nizvodne ivice, od sile racunate po potencijalnoj teoriji UPOT (krak obrtanja "linearnog uzgona", rLIN, veci je od odgovarajuceg kraka "potencijalnog uzgona", rPOT, sl.7). Medjutim, primenom linearne teorije dobice se potcenjene vrednosti uzgona za deo objekta na nizvodnom kraju provirnog puta (za dno umirujućeg bazena na pr.). Takodje, pri proceni filtracione stabilnosti tla u temelju, treba imati na umu da se filtracione brzine znacajno povecavaju u blizini uzvodne i nizvodne ivice brane (slika 6)*



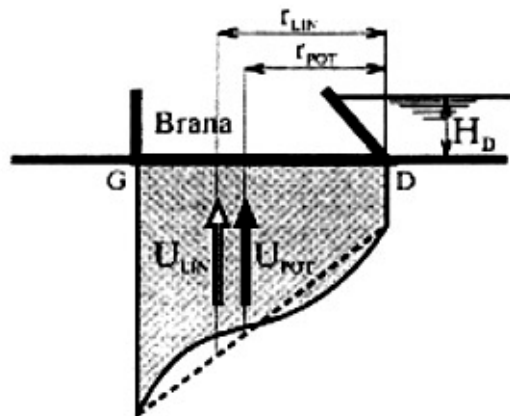
### Poređenje potencijalne teorije sa linearnom teorijom

sl.6

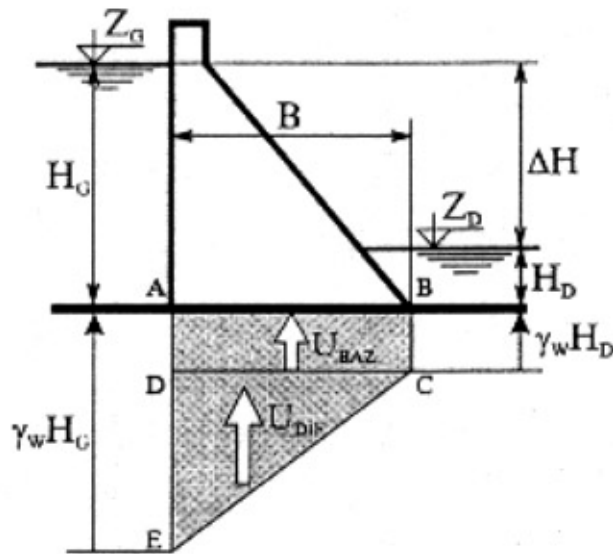
Ako se prihvati pretpostavka o linearnoj promeni pijezometarske kote duz svake manje-vise homogene deonice filtracionog puta, sila uzgona,  $U$ , se moze predstaviti kao površina mnogougaonika (pravougaonog trapeza ABCE za slucaj na sl. 8), pomnozeno specifičnom težinom vode:

$$U = \gamma_w \cdot B \cdot ((HG + HD) / 2)$$

Sila deluje u tezistu površine.



sl.7



Bazni i diferencijalni deo uzgona

sl.8

- a) Bazni uzgon (potisak),  $U_{BAZ}$ , koji odgovara hidrostatičkom pritisku donje vode, i  
 b) Diferencijalni uzgon,  $U_{DIF}$ , koji odgovara pijeziometričkoj razlici između gornje i donje vode ( $\Delta H = H_G - H_D$ )

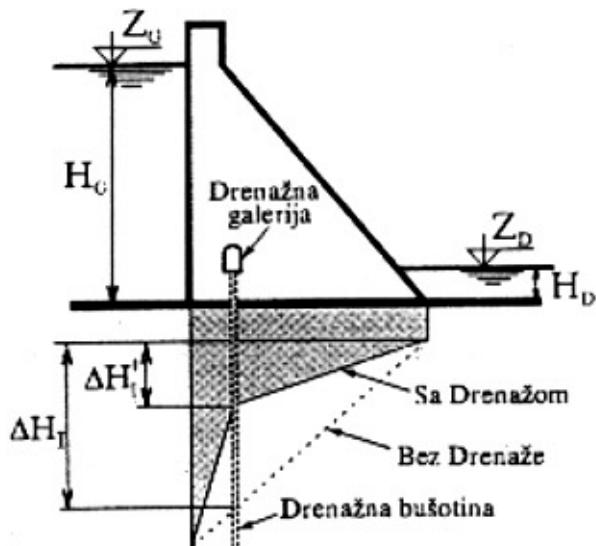
$$U = U_{BAZ} + U_{DIF} = \gamma_w \cdot B \cdot H_D + \gamma_w \cdot B \cdot \Delta H / 2$$

Nema ekonomičnog načina da se eliminiše bazni uzgon ( $U_{BAZ}$ ), ali ima dosta načina da se smanji diferencijalni uzgon ( $U_{DIF}$ )

**1. Dreniranjem vode iz pukotina i pora** smanjuje se filtracioni proticaj, a time i filtraciona brzina nizvodno od drenaze, pa opada i gubitak energije, odnosno opada pijeziometrička razlika na potezu od drenaze do nizvodnog lica brane (uporediti pijeziometričke razlike sa drenazom,  $\Delta H'$ ; i bez drenaze,  $\Delta H$ , na sl.9). Ovim drenazom obara pijeziometrički nivo, čime smanjuje pritisak provirne vode - smanjuje diferencijalni uzgon. U stenovitim temeljima voda se često drenira mrežom drenaznih busotina. Ako bi busotine bile gusto raspoređene jedna uz drugu (u granicnom slučaju formirao bi se kontinualni "rov" kroz temelj brane), nivo podzemne vode iza drenaze bio bi veoma blizak nivou donje vode, pa diferencijalnog uzgona iza drenaze ne bi ni bilo. Jasno je da drenazu treba postaviti što bliže uzvodnom licu brane, kako bi se deo preseka na kome je pritisak umanjen učinio što većim.

Na delu preseka uzvodno od drenaze gradijent pritiska (pad pijeziometričke linije) je veći nego u slučaju da drenaza ne postoji (tackasta linija na slici 9), što povećava provirni proticaj na potezu od uzvodnog lica do drenaze (u odnosu na slučaj bez drenaze). Provirna voda se iz drenaznih busotina odvodi u donju vodu kroz kanale u drenaznoj galeriji (gravitacijom ili pumpanjem).



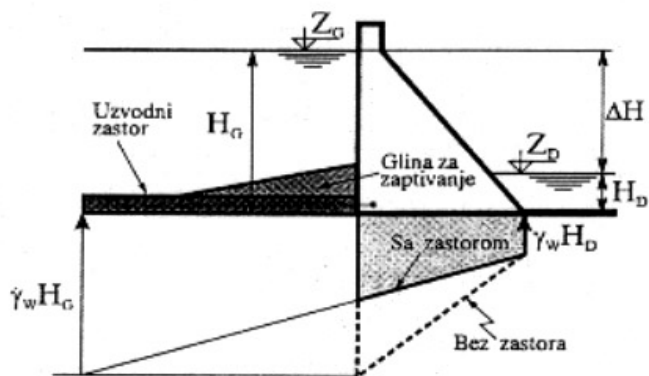


Smanjivanje uzgona drenažom

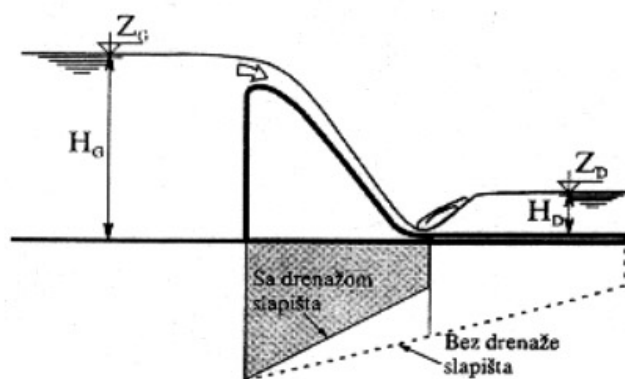
sl.9

2. Kada se produzi put proviranja vode uzvodnim horizontalnim, ili vertikalnim zastorom, umanjice se pritisak (odnosno uzgon) ispod brane (sl.10). Treba voditi racuna da se u zastoru na jave pukotine, inace efekat se smanjuje, ili sasvim izostaje (zavisno od položaja i velicine pukotine). S druge strane, ispod slapista (umirujućeg bazena) se javlja nezeleni efekat "nizvodnog" zastora sa povećanim uzgonom (sl.11). Dreniranje slapista, je rizicno, zbog mogućnosti pojave opasnih pulzacionih hidrodinamickih opterećenja, pa se slapisne ploce obicno osiguravaju od isplivavanja ankerima.

sl.10



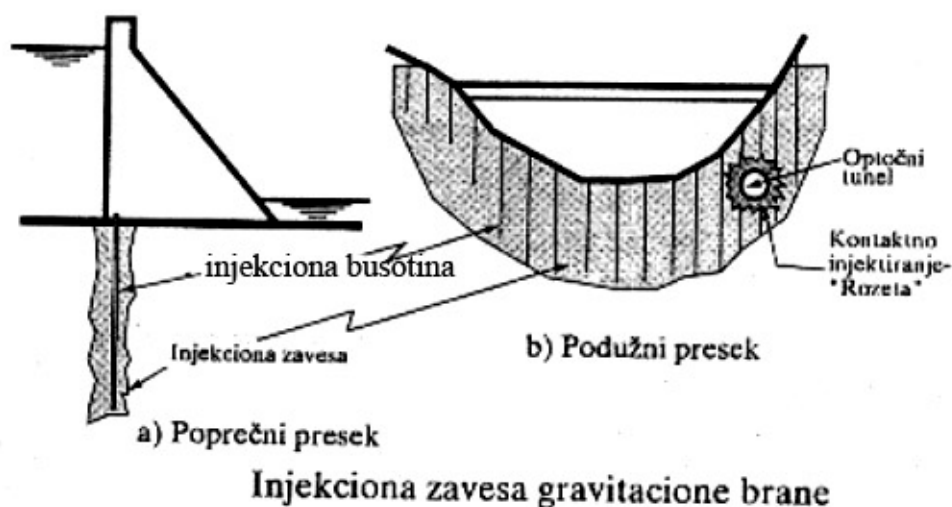
Smanjivanje uzgona horizontalnim zastorom



Uzgon kod prelivnog dela brane i slapišta

3) U zoni velike vododrživosti površina otvora kroz koje voda provire je mala, pa su otpori tecenja veliki i pijezometarska linija brzo opada. Odatle ideja da se materijal blizu uzvodnoj ivici učini što vododrživijim, čime se povećavaju gubici pada, i obara pijezometarska linija na početku provirnog puta, što, kao i kod dreniranja, smanjuje silu uzgona (sl.13c), (injekciona zavesa).

Kod stenovitih sredina vododrživost se povećava injektiranjem. Injekciona masa se pod pritiskom utiskuje u busotine, odakle prodire u pukotine i pore koje popunjava, stvarajući pregradu visoke vododrživosti-injekcionu zavesu (sl.13). Kod tla (vezanog i nevezanog) vododrživost se povećava zbijanjem. Kod nevezanog tla često se koriste dijafragme i priboji.



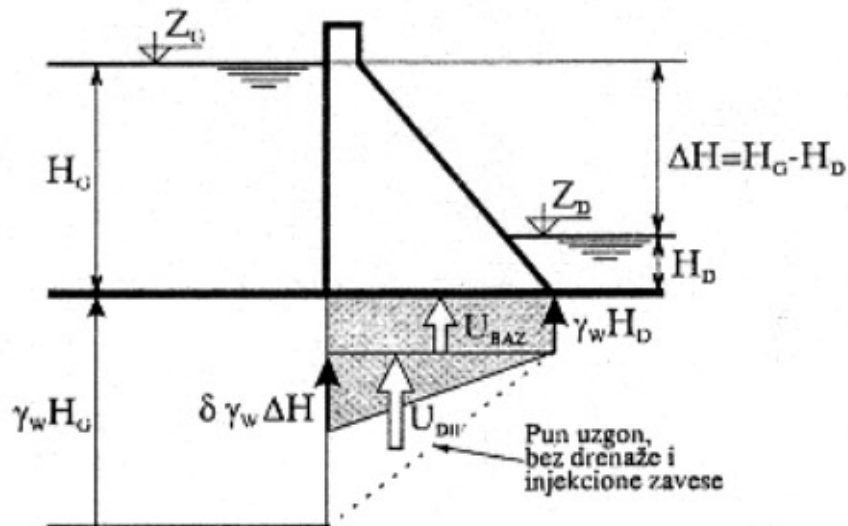
sl.13

Povećanje otpora proviranju injektiranjem (zaptivanjem) na uzvodnom delu preseka, uz smanjenje otpora dreniranjem nizvodno od injekcione zavesa (zaptivke) stvara heterogenost materijala čime se postiže maksimalno smanjenje uzgona.

Injektiranjem (zaptivanjem) i dreniranjem može se značajno smanjiti diferencijalni deo uzgona, pa se izraz za uzgon aproksimira sa:

$$U = \gamma_w * B * HD + \delta * (\gamma_w * B/2) * \Delta H$$

Gde koeficijent "δ" kvantifikuje dejstvo drenaze i zaptivanja na smanjenje diferencijalnog uzgona ( $0 < \delta < 1$ ). U idealnom slučaju, kada su drenaza i injekciona zavesa maksimalno efikasni  $\delta = 0$ , a za slučaj bez drenaze i injektiranja javlja se pun diferencijalni uzgon ( $\delta = 1$ ).

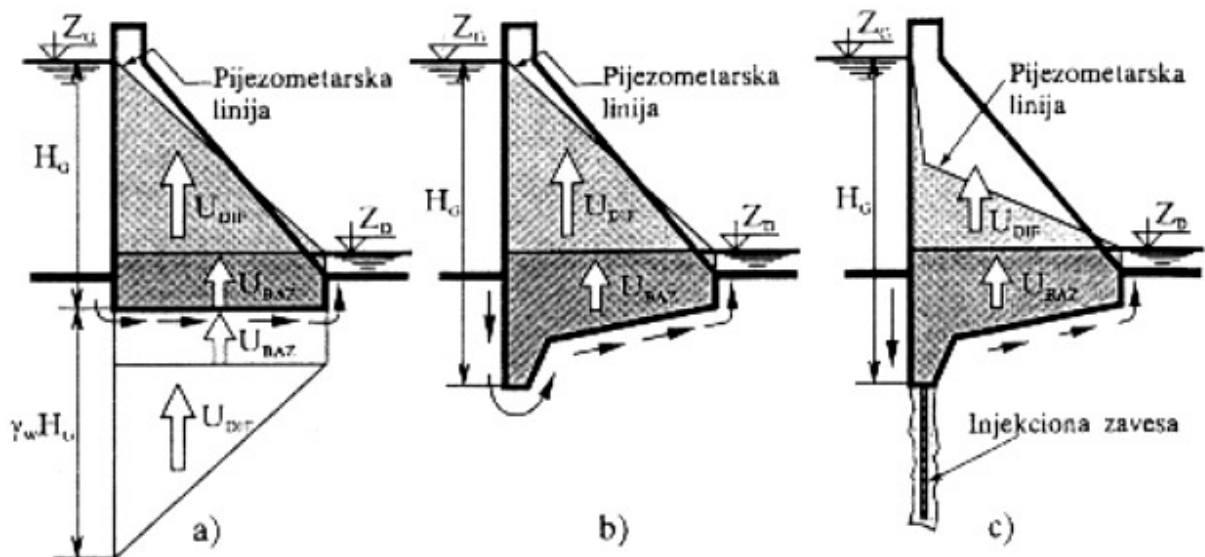


Linearna aproksimacija diferencijalnog uzgona

sl.14

Vrednost koeficijenta “ $\delta$ ” obicno se uzima u granicama izmedju  $0.33 < \delta < 1.0$ , s tim sto je  $\delta=0.33$  samo kod zdravih stena i to kada je predvidjeno i dreniranje i zaptivanje; u ostalim slucajevima (ostecena stena, predvidjeno samo injektiranje, ili samo dreniranje) uzima se  $0.5 < \delta < 0.67$

Za slozenu liniju dodira (sredina brane, ili neki drugi presek) uzgon se dobija preko površine izmedju linije dodira i pijezometarske linije (sl.15), odnosno konture temelja i pijezo linije koja se dobija spajanjem gornje i donje vode. Na slici 15a uzgon je prikazan sa obe strane linije dodira: sa gornje strane kao površina izmedju linije dodira i pijezometarske linije, i sa donje strane, kao opterecenje koje potiskuje branu navise (kako se uobicajeno pretstavlja).



Proračun uzgona za razne oblike temelja

sl.15

Polozaj pijezometarske linije moze se i preciznije odrediti nego sto je prikazano na prethodnoj slici (sl.15), narocito za slucajeve kada je dubina zuba znacajna, pa utice na produzenje provirnog puta vode, a time i na smanjenje pritiska po konturi temeljne ploce.

Takodje, treba zapaziti da postoji i horizontalna komponenta sile pritiska provirne vode, koja se mora ukljuciti u analizu opterecenja.

Uzgon koji se javlja u porama i prslinama u telu brane, moze se smanjiti uzvodnom zaptivanjem i/ili vertikalnom denazom. Racuna se isto kao i uzgon u temeljnoj spojnici, a efekat zaptivanja (ili drenaze) najcesce se izrazava kroz koeficijent  $\delta=0.3$

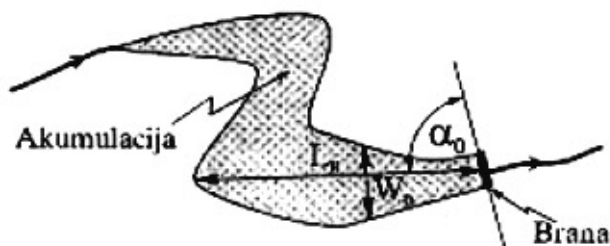
Uzgon je opterecenje koje karakterise mnoge hidrotehnicke objekte.

- **Dinamicki pritisak vode i talasa**

Talasi izazvani vetrom znacajni su pri dimenzionisanju brane, ne toliko zbog opterecenja koje udarom izazivaju (dosta projektanata zanemaruje dinamicko dejstvo talasa), koliko zbog odredjivanja kote krune brane (sl.17). Na kotu maksimalnog uspora u akumulaciji treba dodati I visinu merodavnog talasa koji se penje uz uzvodno lice brane, uz obaveznu rezervu od 0.5 – 1.0 m.

Kao merodavna visina obicno se uzima tzv. **“znacajna” visina talasa, hT**. To je visina talasa koji je visi od 87% talasa (a nizi od 13% talasa) pri odredjenoj “talasnoj slici”, koju izaziva vetar merodavne jacine (brzine) I pravca na razmatranjoj akumulaciji.

Razumno je ocekivati da visina talasa, hT, bude srazmerna brzini vetra VV, i duzini vodene površine u pravcu brzine, L0 (duzine na kojoj se stvara talas, sl.16).



sl.16 Veličine koje određuju visinu talasa

Prema literaturi znacajna visina talasa, hT, je:

$$(5.8): \quad hT = 0.00513 * (VV^{1.06}) * (K * L_0)^{0.47}$$

a talasna duzina je, LT je:

$$(5.9): \quad LT = 0.187 * (VV^{0.88}) * (K * L_0)^{0.56}$$

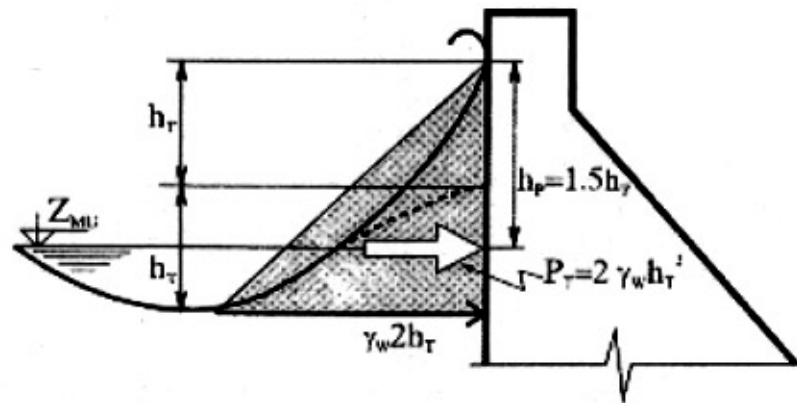
gde su: HT i LT izrazeni u metrima, brzina vetra, VV u kilometrima na cas, a duzina pravca, L0, u kilometrima. Koeficijent, K, zavisi od odnosa srednje sirine akumulacije (na razmatranom pravcu), I duzine pravca (W0/L0):

W0/L0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.0	2.0
K	0.00	0.26	0.40	0.51	0.67	0.83	0.90	1.00

Tab.1 Koeficijent, K, zavisno od odnosa W0/L0

Merodavna brzina i pravac vetra biraju se sa ruze vetrova. Obicno se za osnovno opterecenje racuna sa vetrom povratnog perioda od 20 godina, a usvaja se pravac koji daje najveću visinu talasa u izrazu 5.8. Za izuzetno opterecenje se uzima povratni period od 50 – 100 godina. Talase strvara srednja jacina vetra, a ne izrazito jaki udari, pa u racunu treba

koristiti srednju brzinu, a ne brzinu udara. Jednacine 5.8 I 5.9 vaze ako je voda uzvodno od brane dovoljno duboka, tj. ako je  $HG > \frac{1}{4} LT$ ; ( $HG$ -dubina vode ispred brane).  
(slika.17) Visina talasa, i sila od talasa na gravitacionu branu



Sl. 5.17 Visina talasa, i sila od talasa na gravitacionu branu

Treba imati na umu da se talas koji naidje na prepreku “penje” iznad visine koju ima u vodi udaljenoj od prepreke (obale). Pri udaru o vertikalnu prepreku talas dostize visinu od  $h_P = 1.5 h_T$  iznad nivoa mirne vode (Sl.17), pa prema ovoj visini treba I odrediti kotu krune brane. S obzirom da je dno talasa za  $0.5 h_T$  ispod nivoa mirne vode, to je ukupna visina kojom talas udara (pritiska) vertikalnu prepreku (kao sto je uzvodno lice gravitacione betonske brane na slici):

$$(10): \quad h = 1.5h_T + 0.5h_T = 2h_T$$

Ako se usvoji hidrostatički raspored pritiska u talasu, moze se prihvatiti da je sila od talasa, na 1(m) duzine brane

$$(11): \quad P_T = \gamma W * (2 * h_T)^2 / 2 = 2 \gamma W h_T^2$$

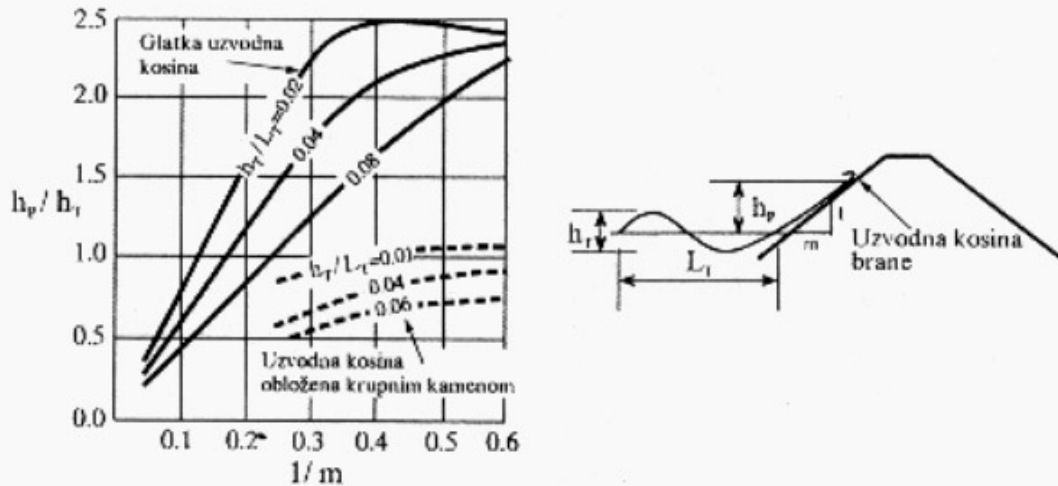
Obicno se uzima da sila deluje na koti nivoa mirne vode

Ako pravac vetra zaklapa ugao  $\alpha_0$  sa pravcem osa brane, sila ce biti (Sl.16):

$$(12): \quad P_T = 2 * \gamma W * h_T^2 \sin \alpha_0$$

U slucaju kosog uzvodnog lica (kod nasipa), penjanje talasa uz konturu moze biti znatno vise kod vertikalnog lica. Utvrdjeno je da odnos penjanja,  $h_T$ , zavisi od nagiba kosine “m” (slika.18), hrapavosti podloge, i odnosa visine talasa i talasne duzine,  $h_T/LT$

(slika.18) Penjanje talasa uz kosinu



Sl. 5.18 Penjanje talasa uz kosinu

Neki projektanti ne uzimaju u obzir silu od talasa uz obrazlozenje da je:

- a) mala u odnosu na "glavne sile" i
- b) da se talasi nece jednovremeno javiti po celoj duzini brane.

Sila od talasa obicno se "dodaje" na kotu maksimalnog uspora, jer se moze ocekivati da talasi nastanu za vreme nepogoda koje izazivaju poplave i podizanje nivoa vode u akumulaciji.

- **Pritisak leda**

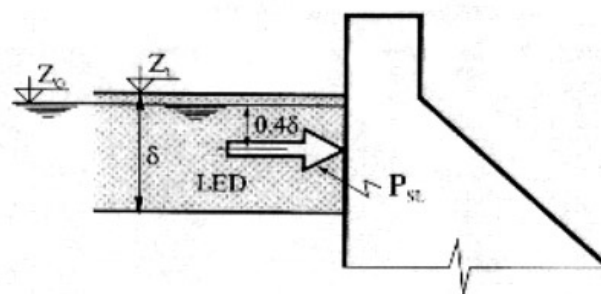
Led moze delovati na branu na dva nacina:

- a) **Pritiskom cvrstog pokrivaca – staticki pritisak leda i**
- b) **Silom koju izaziva udar ledene sante – dinamicki pritisak leda.**

**a) Staticki pritisak leda**

Staticki pritisak leda nastaje usled sirenja ledenog pokrivaca pri naglom otopljenju. Led se ponasa kao sva cvrsta tela, pa se pri snizavanju temperature skuplja i stvara pukotine u pokrivacu u koje prodire voda i stvara novi gusci led. Ako nastupi naglo otopljenje, led se siri, i ukoliko nema kud (krute – stenovite obale akumulacije) pocinje da pritiska branu. Pritisak od leda se moze javiti i usled spustanja nivoa vode ispod vec formiranog ledenog pokrivaca.

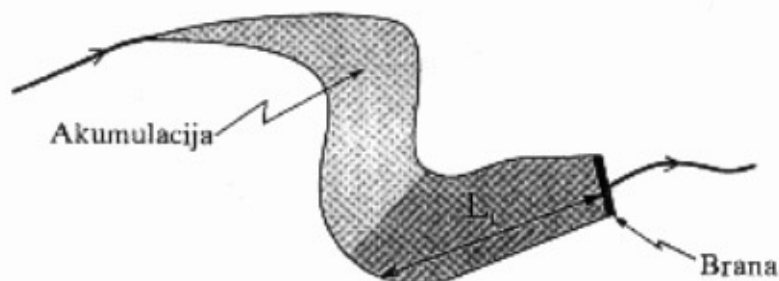
(slika.19) Staticki pritisak leda



sl.19 Statički pritisak leda

Pritisak je proporcionalan prirastu temperature i debljini leda. U stranoj literaturi postoje nomogrami i empirijske formule za određivanje statickog pritiska leda, ali se oni zasnivaju na iskustvu vezanu za određenu geografsku oblast, ili se u njima koriste podaci o velicinama koje se ne mere u nasoj zemlji.

U nasoj literaturi postoje uputstva na bazi ruske literature, za procenu staticke sile leda, PSL, za najnepovoljnije temperaturne uslove, a zavisno od duzine prostiranja ledenog pokrивaca izmedju brane i "oslonca" na suprotnoj strani, LL (sl.20), i debljine leda  $\delta$  (tabela 2) (slika.20) Staticki pritisak leda – osnova



sl. 20 Statički pritisak leda - osnova

Procenjeno je da u najostrijim klimatskim uslovima u nasim podrucjima, debljina ledenog pokrивaca

ne moze preci  $\delta = 0.4 - 0.6 \text{ m}$  ( sa izuzetkom Dunava), pa je maksimalna staticka sila leda s kojom bi trebalo racunati  $PSL \approx 150 \text{ kN/m}$ . Treba imati na umu da staticka sila ne moze delovati u isto vreme kada i sila od talasa.

Debljina leda (m)	Staticka sila leda PSL (kN/m)			
	LL>150m	LL=100m	LL=75m	LL=50m
1.00	150	190	230	270
0.70	100	130	170	200
0.50	70	80	100	130

Tab.2 Zavisnost staticke sile leda od debljine i duzine pokrивaca

### **b)Dinamicki pritisak leda**

**Dinamicka sila leda PDL**, nastaje usled udara santi leda u branu ili mostovski stub za vreme topljenja leda (ledohoda). I za proracun dinamicke sile leda koriste se empirijski izrazi. Ovde se navodi obrazac Kuznjecova:

$$(13): \quad PDL = K * VL * \delta \sqrt{AL},$$

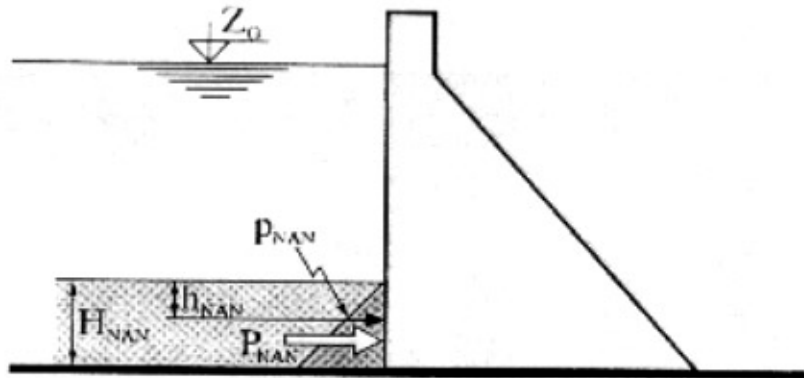
gde su: VL = brzina kretanja leda (m/s),  $\delta$  = debljina leda (m), AL = površina osnove karakteristicne sante leda ( $\text{m}^2$ ), K = koeficijent koji zavisi od granicne cvrstoce leda pri robljenju.

Graniczna cvrstoca leda na drobljenja ( $\text{kN/m}^2$ )	300	500	600	700
K ( $\text{kNs/m}^3$ )	23.6	30	33	43

Tab.3 Koeficijent, K, zavisno od granicne cvrstoce leda na drobljenja

- **Pritisak nanosa (mulja)**

Nanos izlozen ispred uzvodnog lica brane pritiska branu, i doprinosi njenoj nestabilnosti.



sl. 21 Sila od nanosa

**Pritisak nanosa** u nekoj tacki na dubini,  $h_{NAN}$ , od gornje ivice sloja. (sl.21) racuna se kao aktivni pritisak tla:

$$(14): \quad P_{NAN} = (\gamma_{NAN} - \gamma_W) h_{NAN} \operatorname{tg}^2 (45 - \varphi/2)$$

gde je:  $h_{NAN}$  = zapreminska teжина nanosa u zasicenom stanju, a  $\varphi$  = ugao unutrašnjeg trenja nanosa pod vodom  $0 < \varphi < 30^\circ$  (najcesce je  $\varphi = 20^\circ - 30^\circ$ , tj. ugao unutrašnjeg trenja priblizno je isti kao i u nepotopljenom stanju.

**Horizontalna sila od nanosa** po metru duznom brane dobija se integrisanjem pritiska po celoj debljini sloja  $H_{NAN}$  pa iznosi:

$$(15): \quad P_{NAN} = ((\gamma_{NAN} - \gamma_W) * H^2_{NAN} / 2) (\operatorname{tg}^2 (45 - \varphi/2))$$

**Treba imati na umu da sila od nanosa ne umanjuje vrednost hidrostaticke sile PG, s obzirom da voda "prodire" kroz pore u nanosu i "naleze" na površinu uzvodnog lica brane.**

Kod zakosenog uzvodnog lica, sila od nanosa se razlaze na horizontalnu I vertikalnu komponentu. Vertikalna sila se cesto ne uzima u razmatranje, sto je na strani sigurnosti.

- **Sile od zemljotresa-seizmicke sile**

Zemljotres predstavlja snazno oscilatorno pomeranje zemljine kore koje moze znacajno da ugrozi stabilnost brane.

Pomeranje se preko temelja prenosi na branu. Brana dobija ubrzanje,  $a$ , koje stvara inercijalnu **seizmicku silu, PS**, srazmernu ubrzanju I masi brane,  $M$ . Ako se pretpostavi da svaki delić brane dobija isto ubrzanje, seizmiccka sila se moze izraziti kao:

$$(16): \quad PS = a * M = KS * g * M = \alpha * G,$$



gde su:  $g$  = ubrzanje zemljine teže (gravitaciono ubrzanje),  $G$  = težina brane,  $KS = a/g$  = koeficijent seizmicnosti (ubrzanja) = odnos ubrzanja zemljotresa i ubrzanja zemljine teže. Vrednost koeficijenta seizmicnosti zavisi od moguće seizmicke aktivnosti razmatranog područja.

Stepen	1	3	5	7	8	9	10	11
KS	0.0003	0.0010	0.0051	0.0255	0.0510	0.1020	0.2548	0.5100

Tab.4 Zavisnost koeficijenta seizmicnosti od jacine zemljotresa

Tektonski pokret koji stvara zemljotres može imati proizvoljan pravac delovanja.

**Pokret u pravcu ose brane, tj. u y-pravcu neće imati mnogo uticaja na stabilnost gravitacione brane, s obzirom da su bokovi brane poduprti stenskom masom doline na koju se naslanjaju. (Za kontraforne brane i druge vrste olaksanih brana, mora se voditi racuna i o ovom pravcu delovanja, jer nema bočnog ukrucenja od sredine).**

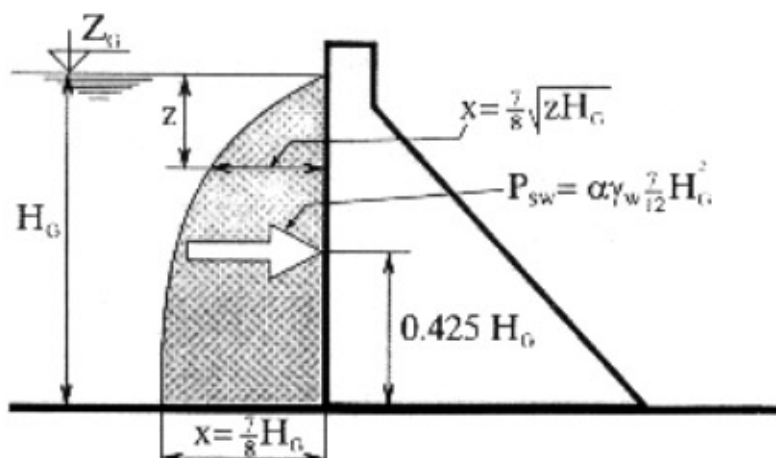
**Pokret u vertikalnom z-pravcu može izazvati uzlaznu silu koja “smanjuje” težinu brane, a time i njenu stabilnost. Ubrzanje u vertikalnom pravcu,  $a_V$ , obično je manje od horizontalnog ubrzanja,  $a$ ; koeficijent seizmicnosti iznosi  $K_{SV} \approx 0.5 - 0.75 K_s$ , a vertikalna sila (koja “smanjuje” težinu brane) je:**

$$(16a): \quad PSV = a_V \cdot M = K_{SV} \cdot g \cdot M = K_{SV} \cdot G$$

**Najopasniji je pokret u horizontalnom x-pravcu.** jer pored inercijalne seizmicke sile od oscilovanja same brane,  $PS = KS \cdot G$ , nastaje i dodatna inercijalna (dinamička) sila od oscilovanja vode u akumulacionom basenu uzvodno od brane. Opterećenje u horizontalnom x-pravcu **uvek se uzima u analizu opterećenja.**

**Seizmicka sila od vode,  $PSW$ , racuna se primenom Zangarove ili Vestergradove metode.** Ovde je opisana Vestargradova metoda, koja vazi samo za vertikalnu konturu uzvodnog lica brane.

Slika.23 Seizmicka sila vode prema Vastergardu



sl. 23 Seizmicka sila vode prema Vestergardu

Prema Vastergardu sirina vodene mase “x” koja na dubini “z” osciluje zajedno sa branom moze se aproksimirati jednačinom parabole:

$$(17): \quad x(z) = \sqrt[3]{z \cdot HG} \quad , \text{ pa je pritisak vode od zemljotresa u pojedinim tackama:}$$

$$(18): \quad p_{SW}(z) = K_S \cdot \gamma_W \cdot \sqrt[3]{z \cdot HG}$$

Na dnu akumulacije (prema jednačini 5.18) seizmicki pritisak je:

$$(19): \quad p_{SW}(HG) = K_S \cdot \gamma_W \cdot \sqrt[3]{HG^3},$$

pa je ukupna seizmickasila od vode jednaka površini parabole:

$$(20): \quad PSW = K_S \cdot \gamma_W \cdot \frac{7}{12} \cdot H^2 G,$$

a deluje na rastojanju od **0,425 HG** od dna akumulacije (sl.23).

Kod manjih objekata i za nize faze projekata moze se koristiti jednostavna “metoda koeficijenata”, zasnovana na napred navedenim postavkama. Kod visokih brana postoji opasnost od rezonance brane i tla, pa je u završnim fazama projekta potrebno primeniti složenu dinamičku analizu.

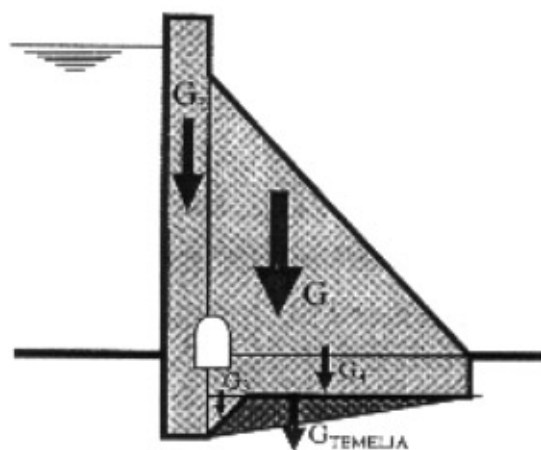
- Tezina brane i temelja

**Tezina brane G**, je najvažnija stabilizujuća sila kod gravitacionih brana. Racuna se kao zapremina (odnosno, površina poprečnog preseka na 1m dužini), pomnoženo sa zapreminskom težinom betona:

$$(21): \quad G = \gamma_B \cdot A \quad [\text{kN} / \text{m}],$$

gde je A - površina poprečnog preseka brane, a  $\gamma_B$  = zapreminska težina betona, obično  $\gamma_B = 24 \text{ (kN} / \text{m}^3)$ . Sila deluje u težištu preseka (Sl.24).

Sl.24 Sila težine



sl. 24 Sila težine

Tezina dela temelja (sredine ispod ili oko brane),  $G_T$ , takodje moze biti uzeta u racun pri analizi stabilnosti (npr. pri proracunu sigurnosti protiv klizanja). Kod nekih objekata (slapista, površinskih zahteva, kanala i dr.) cesti su primeri da se vezivanjem ankerima za sredinu temelja postize zeljena stabilnost.

## **Reakcija temelja**

Prema zakonu “akcije i reakcije”, svaka sila koja deluje na objekat (na branu kao celinu, na temelj brane, ili na neki deo brane), izazvace reakciju iste jacine i pravca, sa suprotnim smerom. Reakcija se ne uzima kao opterecenje, jer se razmatraju uticaji sredine na objekat, a ne obrnuto.

### **II-2.6.2 Kombinacije opterecenja**

Sva navedena opterecenja ne mogu se istovremeno javiti. Ne moze u isto vreme delovati staticki pritisak leda, i sila od udara talasa. Isto tako, nije razumno ocekivati da ce se kratkotrajna opterecenja male verovatnoce pojave (kao sto su, na primer, poplavni talas maksimalno velike vode i katastrofalni zemljotres maksimalne jacine za razmatrano podrucje) javiti jednovremeno. Postavlja se pitanje izbora kombinacije opterecenja, jer je od interesa za stabilnost objekta da se obuhvate realno najnepovoljnije kombinacije opterecenja. Za izbor merodavnih kombinacijaopterecenja, bar za sad, ne postoje unapred utvrdjeni recepti koji mogu da pokriju sve slucajeve. U nastavku su ukratko prikazana uputstva koja preporucuju nasi projektanti, a prema kojima je objekat najcesce dovoljno dimenzionisati primenom cetiri kombinacije opterecenja:

**Prazna akumulacija, neposredno po zavrsetku gradjenja, deluje samo tezina brane**  
**Normalno opterecenje** : Nivo u akumulaciji na koti normalnog uspora (ZNU), donja voda sa maksimalnim ili minimalnim nivoom koji se pri tome moze da javi, a koji daje nepovoljnije opterecenje, pun pritisak nanosa I leda ili talasa, drenazni sistem radi (ako ga ima), a injekcioni radovi su završeni (ako su predvidjeni).

**I. Izuzetno opterecenje od vode (Vanredno opterecenje)**: Nivo u akumulaciji na koti maksimalnog uspora (ZMU), donja voda maksimalna ili minimalna (zavisno sta je nepovoljnije), pun pritisak nanosa talasa, drenazni sistem NE radi.

**II. Izuzetno opterecenje od sezmike** : Nivo u akumulaciji na koti normalnog uspora, donja voda kao pri normalnom opterecenju, pun pritisak nanosa I leda, drenazni sistem radi, sezmicki uticaji pri merodavnim zemljotresima (verovatnoce pojave 0.5% i 0.1%) za razmatano podrucje.

Kod pojedinih konstrukcija je pogodno proveriti I neke druge kombinacije opterecenja (tzv. “projektantova merodavna kombinacija’), kao npr.:

**III. Prazna akumulacija, sa zemljotresom**

**IV. Normalno opterecenje (kombinacija II) ali bez uzgona**

**V. Izuzetno opterecenje, drenazni sistem NE radi, i druge.**

### **II-2.6.3 Opsta stabilnost gravitacionih betonskih brana**

***Gravitaciona betonska brana je stabilna ako se moze odupreti klizanju(smicanju),uzgonu i preturanju. Za mnoge hidrotehnicke objekte vazan uslov stabilnosti je i otpornost na***

isplivavanje,sto je kad gravitacionih brana,po pravilu ispunjeno.Uz to da bi brana bila otporna na opterecenja i uticaje,neophodno je da naponi I pomeranja u brani I temelju budu u dozvoljenim granicama.Odsustvo napona zatezanja na uzvodnom licu je cesto merodavan uslov pri dimenzionisanju gravitacione betonske brane.

Navedeni uslovi moraju biti zadovoljeni pri svim razmatranim kombinacijama opterecenja,sa zahtevanim koeficijentom sigurnosti.Koeficijenti sigurnosti (na smicanje,prevrtanje,dovoljene napone u tlu i betonu i sl.) razlikuju se zavisno od kombinacije opterecenja.Tako se za vanredno i izuzetno opterecenje dozvoljavaju nize vrednosti koeficijenata sigurnosti nego pri normalnom opterecenju.

U pocetnim fazama projektovanja se proverava samo tzv. "opsta stabilnost" brane,sto podrazumeva odredjivanje stabilnosti na klizanje i preturanje,kao i proracun napona i sleganja u temeljnoj spojnici.

U visim fazama projektovanja je potrebno odrediti naponsko stanje i pomeranja u konstrukciji i temelju,za sta se kod visokih brana primenjuje metoda konacnih elemenata.Brana i sredina koja cini temelj se izdele na elemente odgovarajuceg oblika.Zatim se iz uslova ravnoteze sila,i veze napona i deformacija,za zadate kontrurne uslove odredjuju pomeranja inaponi za svaki element brane i temelja.

- **Stabilnost protiv klizanja (smicanja)**

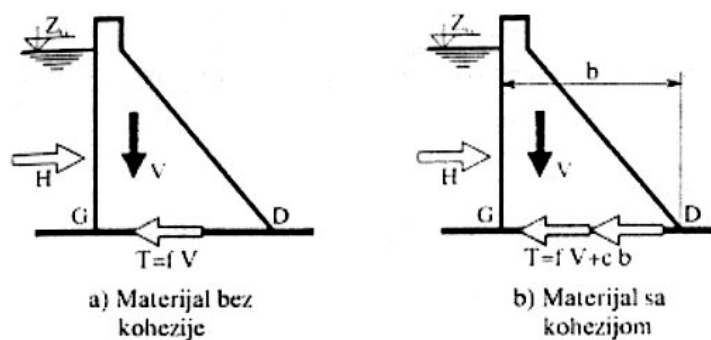
**Stabilnost protiv klizanja (smicanja) je cesto najkriticniji od navedenih uslova.Klizanje (smicanje) moze nastati:1)na kontaktu brane i sredine,2)u sredini-temelju i 3)u preseku tela brane.Treba proveriti sve potencijalno opasne ravni klizanja u temelju (pukotine,proslojke gline,i sl.).**

Razlikuju se uslovi klizanja u temeljnoj spojnici kod brana fundiranih na steni,i kod brana na nekoherentnom (nevezanom) tlu.

**a)Kod nevezanog tla nema otpora smicanju usled kohezije unutar materijala,pa se pomeranju protivi jedino trenje.Do smicanja ne dolazi ako je smicuca sila (za horizontalni presek to je horizontalni presek,kao na sl.25)manja od sile trenja,T,koja je ravna proizvodu normalne sile (vertikalne komponente rezultante,V,za horizontalni presek,kao na sl.25) i koeficijent trenja,"f"**

**Obicno se uslov ravnoteze uvodi i zahtevani faktor-koeficijent sigurnosti protiv smicanja (klizanja),CS,koji zavisi od kombinacije opterecenja (CS=1-3) pa za nevezano tlo:**

$$f \cdot V / CS > H$$



sl. 25 Stabilnost protiv klizanja (smicanja)

Može se iz odnosa stabilizujućih sila i sila smicanja odrediti raspoloživi faktor sigurnosti koji mora biti veći od zahtevanog faktora,  $CS$ :

$$f \cdot V / H > CS$$

Koeficijent trenja,  $f$ , zavisi od ugla unutrašnjeg trenja materijala:

$$f = \operatorname{tg} \varphi$$

, gde je  $\varphi$  - ugao unutrašnjeg trenja (ugao pri kome je kosina stabilna).

Za materijale koji su pogodni za fundiranje gravitacione brane  $\varphi = 20-35^\circ$

**b) U vezanom koherentnom materijalu (stena, beton) smicanju se pored trenja, suproavlja i kohezija (otpor na smicanje usled veza između čestica materijala). Sila kohezije,  $TC$ , (po metru dužnom brane) jednaka je:**

$$TC = c \cdot b$$

$c$  - kohezija materijala. Sada se uslov stabilnosti protiv smicanja u horizontalnom preseku  $G-D$ , može se napisati kao:

$$f \cdot V + c \cdot b > H$$

Raspoloživi faktor (koeficijent) sigurnosti protiv smicanja može se izraziti kao odnos stabilizujućih, i smicajućih sila kao i kod nevezanog materijala:

$$(f \cdot V + c \cdot b) / H > CS$$

, gde je  $CS$  zahtevani faktor sigurnosti, i iznosi  $CS = 1.3$  do  $4$ , zavisno od kombinacije opterećenja.

Koeficijent trenja,  $f$ , često se određuje na uzorku glatkih stranica. Tada je  $f$ , približno  $0.7$  za kontakte beton-beton, i beton-stena. Koriscenje ovako niskog koeficijenta trenja već daje određeni faktor sigurnosti, s obzirom da su površine duž kojih se smicanje odvija u prirodi po pravilu hrapave.

Pri proveru smicanja za koherentni (vezani) materijal uobicajen je sledeći postupak:

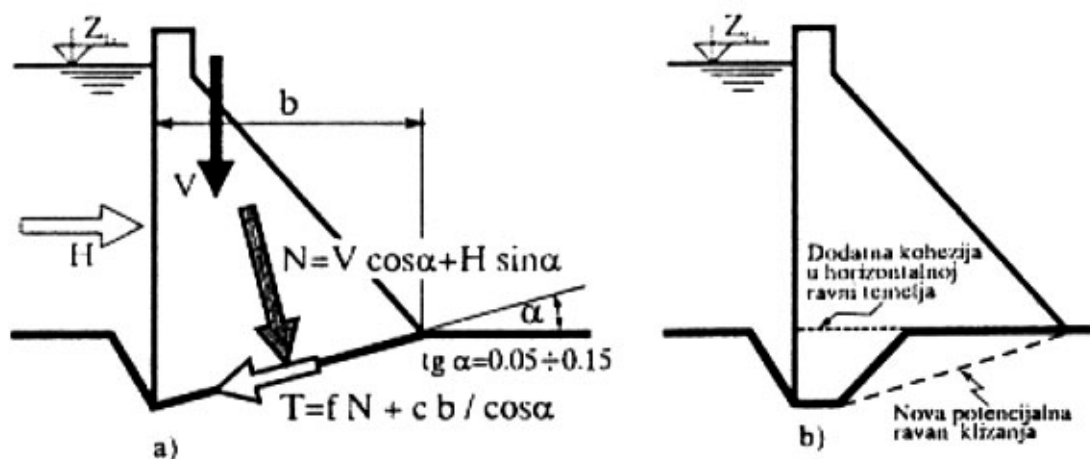
1) Prvo se proveru stabilnost **bez kohezije** koriscenjem obrasca ( $f \cdot V / H > CS$ ), s tim što se dozvoljava nizak koeficijent sigurnosti,  $CS = 1$  do  $1.3$ , ako se na ovaj način zadovolji stabilnost, nema potrebe za daljim proveravanjem.

2) Ako uslov stabilnosti nije postignut, uvodi se u racun i **kohezija**, pa se primenjuje izraz ( $f \cdot V + c \cdot b > H$ ). Sada se trazi da koeficijent sigurnosti bude znatno veci nego za slucaj kohezije ( $CS=4$  za normalno, do  $1.3$  za izuzetno opterecenje)

3) Ako ni tada nije postignuta zahtevana sigurnost na smicanje, mora se povecati sirina temeljne spojnice,  $b$ , ili se primenjuje neka druga mera za povecanje otpora smicanju.

Jedan od nacina da se poveca stabilnost na smicanje je i zakosavanje temeljne spojnice (sl.26). Ovim se povecava sila trenja, a smanjuje se smicuca sila (u odnosu na slucaj sa horizontalnom spojnicom). Uslov stabilnosti na smicanje sada glasi:

$$((f \cdot (V \cos \alpha + H \sin \alpha) + c \cdot b \cdot 1 / \cos \alpha) / (H \cos \alpha - V \sin \alpha)) > CS$$



sl. 26 Kosa ravan klizanja (smicanja)

Otpornost na klizanje (smicanje) moze se povecati i „zub” na uzvodnom delu spojnice (sl.26b). U horizontalnoj ravni temelja dobija se dodatna otpornost na mestu zuba, dok se u nizim ravnima temelja u otpor ukljucuje i sredina.

- **Stabilnost protiv preturanja**

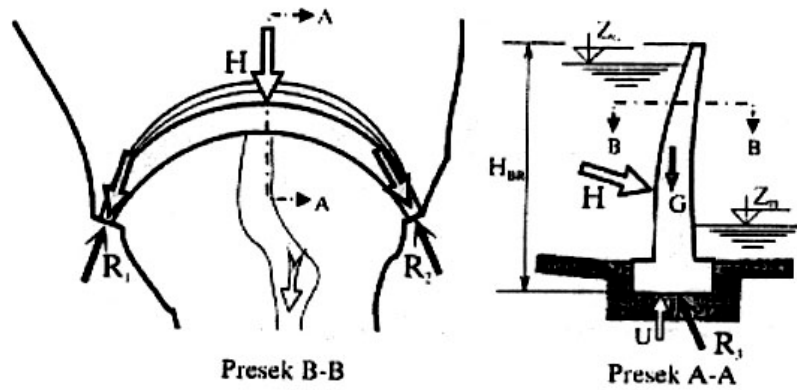
Stabilnost protiv preturanja podrazumeva da stabilizujuci momenat vraćanja,  $M_v$ , oko najnize nizvodne ivice brane premasi destabilizujuci momenat preturanja,  $M_p$ , i to sa zahtevanim stepenom (tj. koeficijentom) sigurnosti:

$$M_v / M_p > C_p$$

$C_p$ -koeficijent sigurnosti na preturanje. Dozvoljene vrednosti koeficijenta sigurnosti zavise od kombinacije opterecenja i krecu se od  $1.5$  za normalno opterecenje do  $1.1$  za izuzetno. Uzimamo priblizno  $1.3$

## II-2.7 Lucne brane

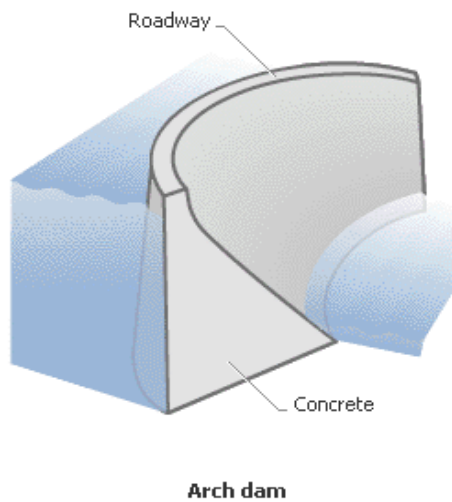
Osnovno je kod lucne brane da se pritisku vode konstrukcija ne suprotavlja svojom tezinom vec upiranjem u bokove doline. Ovo zahteva da su bokovi i dno doline dobre nosivosti (stena) i da je dolina relativno uska.



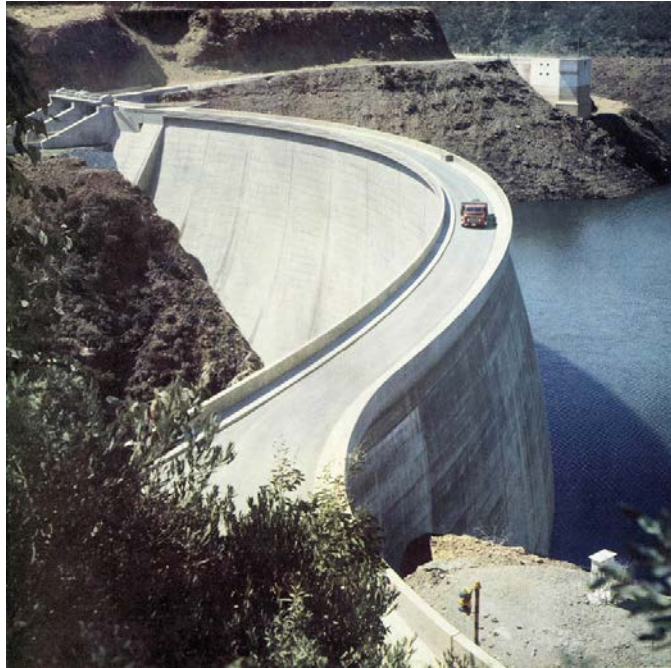
Lučna brana

*Površina brane je zakrivljena u oba pravca, a u statickom smislu predstavlja površinski nosac, odnosno u vertikalnom pravcu deluje kao konzola, a u horizontalnom pravcu deluje kao ukljesten luk. Kod ovakve brane nema uzgona, ali se osim opterećenja od vode mora obratiti pažnja naročito na temperaturne uticaje, jer je sa uzvodne strane brana rashladjena vodom koja nekada može da bude 5-10°C, a sa nizvodne strane izložena je delovanju sunca tako da temperatura može da bude 40°C, pa postoji temperaturna razlika. Ako se u bokovima brane javе prosljoci loših filtracionih karakteristika (porozan materijal), onda se takav prosljak injektira.*

Lucna brana



Lucna brana



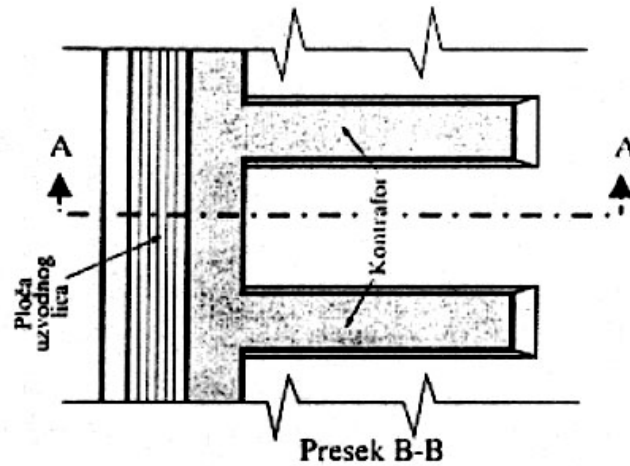
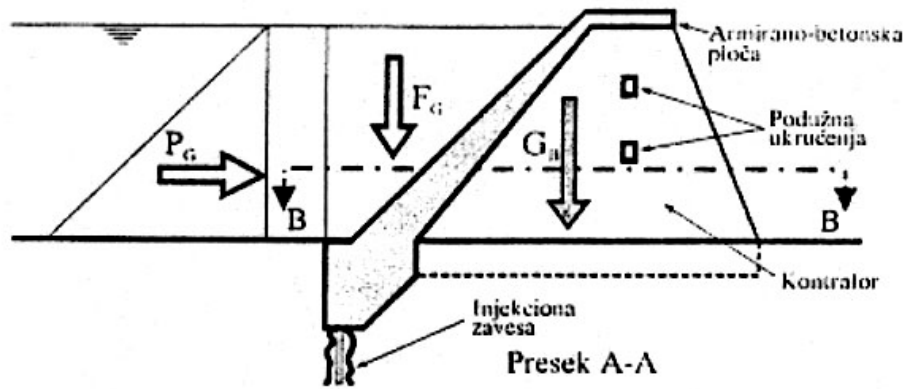
*Lucna brana*



### *II-2.8 Olaksane brane*

*Ukoliko se predvidi dobar drenazni sistem koji ce znatno smanjiti uzgon (temelj brane je celom duzinom izmedju stubova dreniran) i ukoliko je dobro nosivo tlo vrlo cesto se projektuju olaksane brane.*





Kontraforna brana

*Ovakve brane se retko grade jer pored svojih prednosti u smanjenju kolicine materijala imaju svoje mane u smislu slozenosti konstrukcije, podlozne su raznim uticajima, teze su za izvodjenje sto dovodi do toga da se prednost daje gravitacionim branama.*

Olaksana brana



## *Olaksana brana*



### *II-2.9 Nasute brane*

*Grade se kontrolisanim nasipanjem i zbijanjem dostupnog materijala, a spoljnim silama se odupiru sopstvenom tezinom. Nasute brane mogu se shvatiti kao visoki nasipi koji su stalno u dodiru sa vodom.*

*Velika prednost nasutih brana u odnosu na betonske je sto prenose opterecenje na tlo preko znatno vece površine, cime se znacajno smanjuju naponi u tlu. Cesto su nasute brane jedino resenje za nasuto tlo. Uz to, nasute brane su i manje osetljive na sleganje temelja od betonskih brana.*

*Grade se od lokalno dostupnih materijala, uz potpuno mehanizovano ugradjivanje, pa su troskovi po jedinici zapremine brane znacajno nizi u odnosu na betonske brane. S druge strane zapremina nasute brane je veća od zapremine alternativne betonske brane.*

*Najveća mana nasutih brana je velika osetljivost na eroziju od vode, bilo površinsku bilo unutrašnju.*

*Osnovna posela nasutih brana je na:*

*1) Zemljane brane*

*2) Brane od kamena (kamenog nabacaja)*

*Tri najcesce uzroka rusenja nasutih brana su:*

*1) Prelivanje, praceno spoljasnjom erozijom*

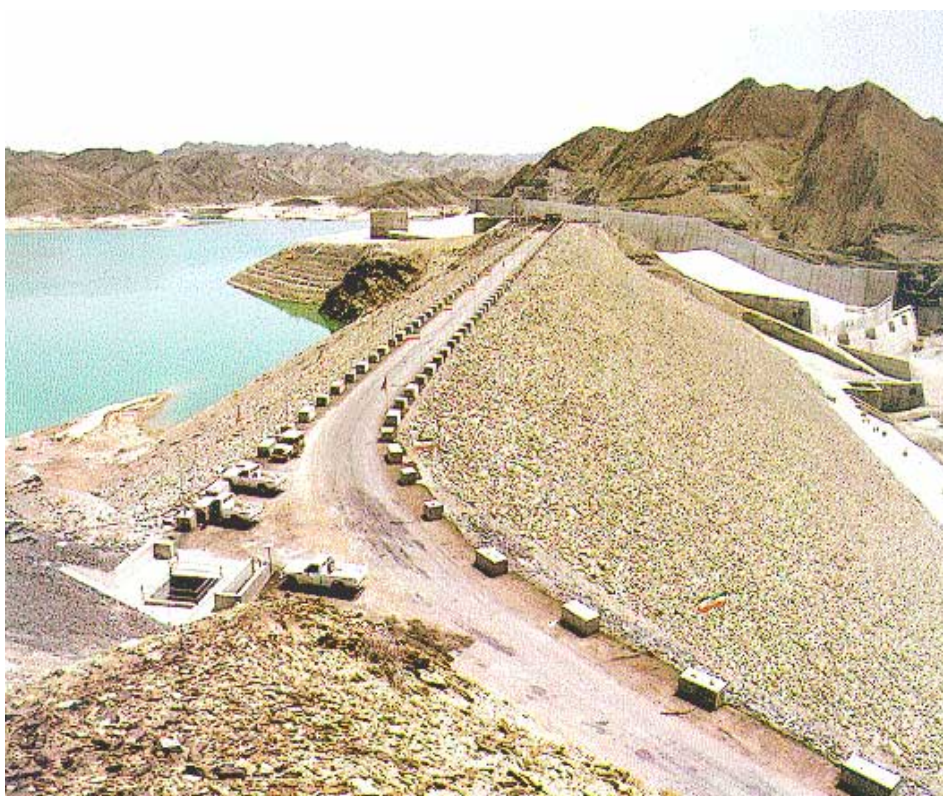
*2) Ispiranje materijala nasipa-unutrašnjea erozija*

*3) Klizanje kosina*

## *Nasuta brana*



## *Nasuta brana*



### *II-2.9.1 Unutrasnja erozija*

*Unutrasnja erozija je posebno opasna kod zemljanih brana. Nastaje odnosenjem cestica nevezanog materijala koje ne mogu da se odupru hidrodinamickoj sili provirne vode. Unutrasnja erozija obicno se deli na:*

## 1) Ispiranje (sufoziju)

## 2) Podizanje (fluidizaciju)

### • Ispiranje-sufozija

*Provirna voda odnosi cesticu (tla, nasipa) koje nemaju oslonca iza sebe, a svojom težinom se ne mogu odupreti sili toka. Ova pojava se naziva Ispiranje-sufozija. Može biti isprana čestica na nizvodnom licu, iza koje nema čestica da je podupru, ili čestica iz unutrašnjosti nasipa koja je suviše sitna da bi je okolne krupnije čestice mogle zadržati (tj. Može se provući kroz prostor-pore između susednih čestica). Ovaj drugi vid ispiranja redovno se javlja na direktnom kontaktu sitnozrnog i kriupnozrnog materijala-tzv. sufozija na kontaktu (naravno ukoliko je smer filtracije ka krupnozrnim sloju).*

*Ispiranje jedne frakcije čestica iz brane ili temelja ne mora uvek da bude opasno. Sitnije čestice mogu biti isprane iz heterogene mesavine bez narušavanja stabilnosti objekta ako preostale čestice nisu ugrožene rezultujućim povećanjem brzine proviranja vode, i ako su održale poduprt sistem (tj. ako čestice naležu jedna na drugu). U ovakvom slučaju, prvobitno mutna provirna voda, će se izbistriti kada sve čestice budu isprane. Naprotiv, povećanje mutnoće i provirnog proticaja, znači da je erozija dobila na intenzitetu (da se ispira sve veći broj čestica), pa će, ako se nestone preduzme doći do potpunog ispiranja tla i rusenja objekta.*

*Hidrodinamička sila kojom voda deluje na česticu tla srazmerna je filtracionoj brzini,  $vD$ , a ova zavisi od gradijenta filtracije,  $I$ , i koeficijenta filtracije (koeficijenta vodopropusnosti),  $K$ . Gradijent filtracije predstavlja pad pijezometarske linije duž provirnog puta, a u praksi se često aproksimira kao količnik pijezometarske razlike,  $h = -\Delta\Pi$ , i dužine provirnog puta,  $L = \Delta I$ , na kome se razlika  $h$  ostvari:*

$$vD = K \cdot I = K \cdot (-d\Pi/dL) = K \cdot (-\Delta\Pi/dl) = K \cdot h/L \quad (\text{znak „-“, označava da pijezometarska linija, } \Pi, \text{ opada u smeru tecenja})$$

*Opasnost da čestica određene krupnoće bude isprana (usled dejstva hidrodinamičke sile) raste sa povećanjem gradijenta,  $I$ , i sa porastom koeficijenta filtracije,  $K$ . Gradijent pri kome dolazi do sufozije razmatranog tla naziva se **kritični gradijent filtracije na sufoziju,  $IKR$** .*

*Zbijanje po pravilu nije dovoljno pa se ugroženi materijal nasipa redovno štiti filtrim. Filtar služi da onemogući ispiranje sitnih čestica kroz pore krupnih čestica u susednoj zoni-sloju (sufozija na kontaktu). Filtar čine slojevi različite krupnoće zrna. Krupnoca raste idući u smeru toka vode, tako da materijal iz prethodnog (uzvodnog) sloja ne može biti ispran kroz naredni (nizvodni).*

### • Fluidizacija

*Fluidizacija (podizanje, "ključanje", "tečenje") tla nastaje kada hidrodinamička sila vode koja provire navise postane veća od težine tla. Tlo u potpunosti gubi nosivost-dolazi do sloma tla. Bez obzira na slom tla bubrenje se odvija na kontaktu vode i tla, i upravo ovo stvara eroziju kontaktne površine.*

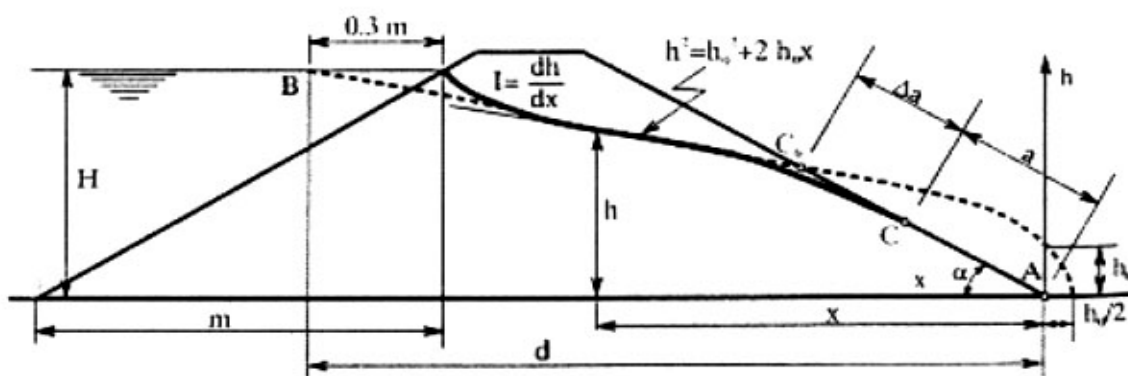
## II-2.9.2 Proviranje kroz branu i provirna linija

Provirna linija (filtraciona linija) predstavlja liniju slobodne površine vode u nasipu. Poznavanje položaja provirne linije omogućava da se:

- 1) Utvrdi težina i kohezija svih delova brane
- 2) Odredi mesto za drenazu i filtre
- 3) Proceni kolicina provirne vode (filtracioni proticaj)

Uobicajeno je da se u hidrotehnickoj praksi koristi Kasagrandeov postupak za odredjivanje provirne linije na bazi Kozenijevog resenja.

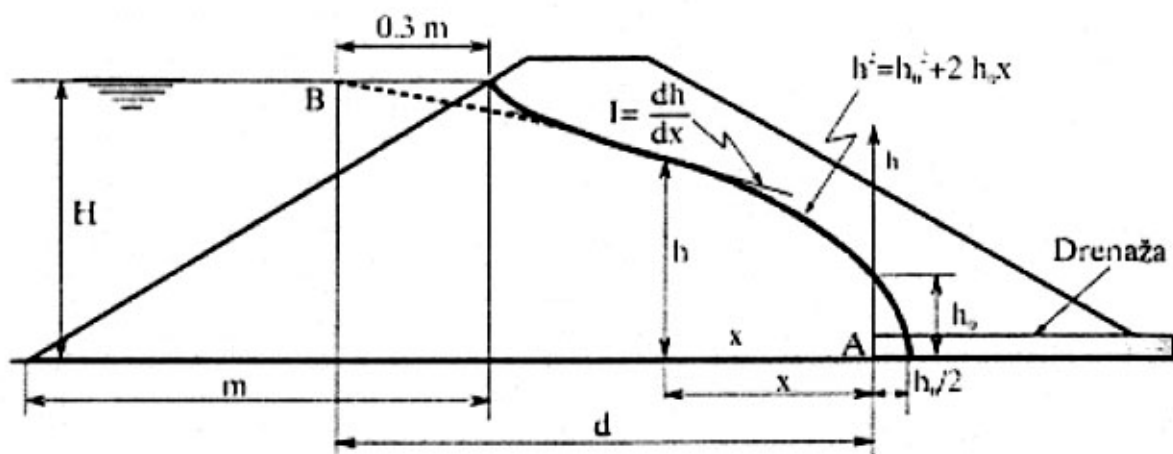
Na sl.10 prikazana je provirna linija za nasip bez drena.



Sl. 10 Provirna linija za nasip bez drena

### Kozenijevo analiticko resenje

Na slici 8, prikazano je Kozenijevo resenje položaja provirne linije za homogenu branu (branu od homogenog materijala) fundiranu na vododrživom temelju sa horizontalnim drenom na nizvodnom kraju.



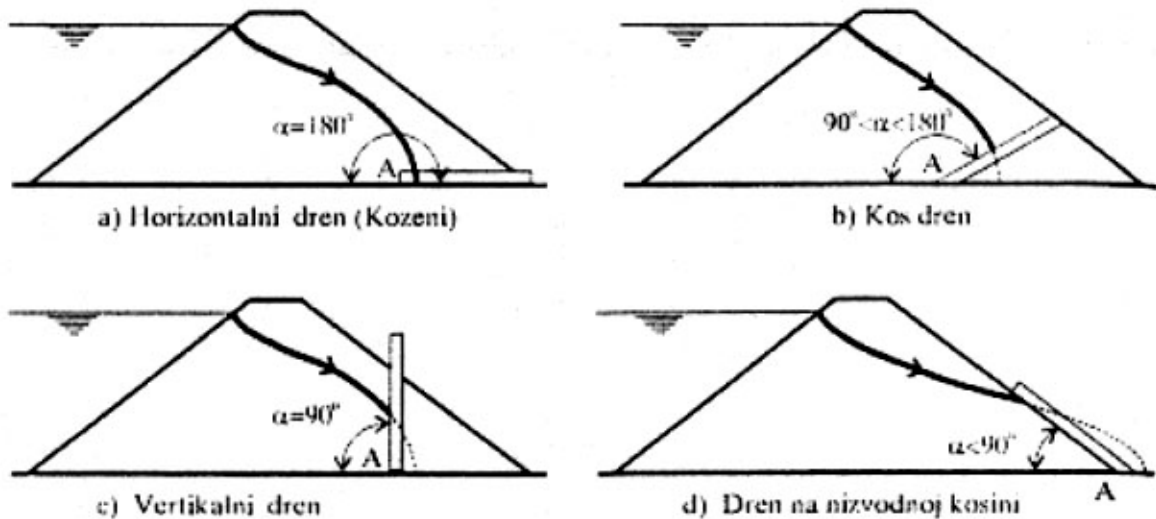
Sl. 8 Kozenijevo analitičko rešenje

Proticaj provirne vode (filtracioni proticaj) po metru dužnom nasipa,  $q$ .

$$q=ho * K=K*(\sqrt{(H^2+d^2)}-d)$$

*Provirna linija se spusta (obara) pomeranjem drenaze uzvodno. Ovim se povecava stabilnost brane na klizanje, jer je povecan nepotopljen deo nasipa (koji nije olaksan).*

*Kasagrande je prosirio Kozenijevo resenje za proracun provirne linije (sa horizontalnim drenom) na slucajeve sa proizvoljnim položajem drena.*

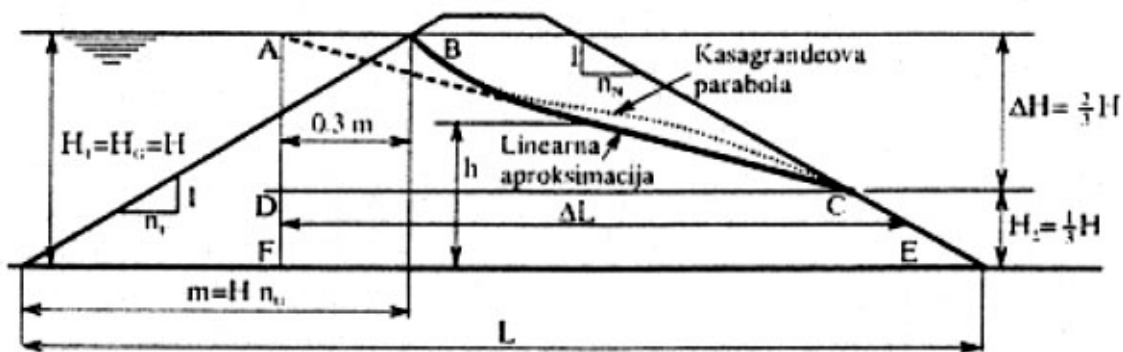


Sl. 9 Mogući položaji drena kod Kasagrandeovog postupka

- *Linearna Aproksimacija*

*Cesto se u praksi provirna linija kroz nasip bez drena aproksimira pravom linijom umesto parabolom.*

*Razmatra se filtracija kroz homogenu izotropnu nasutu branu na vododrživoj podlozi (sl.14). Treba proceniti položaj provirne linije i filtracioni proticaj (po metru duznom brane).*



Sl. 14 Linearna aproksimacija provirne linije

### II-2.9.3 Proviranje kroz branu sa slozenim-viseslojnim presekom

*Brane i nasipi se najcesce ne grade kao homogeni objekti (od jedne vrste materijala). Obicno se vododrziv materijal koristi kao pregrada-jezgro za smanjenje proviranja, a oko njega se nasipa krupniji materijal (sa vecim uglom unutrasnjeg trenja), koji je znatno stabilniji od jezgra, ali i znatno manje vododrziv.*

*Na sl.15 prikazana je filtracija kroz branu sa glinenim jezgrom. Proticaj kroz branu diktira usko grlo („kontrolni presek”), a to je najvododrzivija deonica (deonica sa najmanjim koeficijentom filtracije), odnosno jezgro (zona II). Tu su otpori tecenju veliki, pa se sa raspolozivom denivelacijom moze propustiti relativno mali proticaj, sto i jeste uloga jezgra.*

*Tako mali proticaj prema jednacini kontinuiteta, tece i kroz vodonepropusne zone I i III uzvodno i nizvodno od jezgra, gde stvara male gubitke zbog velikog koeficijenta filtracije. Zato je provirna linija u zoni I horizontalna, dok zona III prakticno predstavlja dren kojim provirna voda otice izvan brane (naravno, nekada je potrebno nizvodnu nozicu zastititi od sufozije odgovarajucom zastitom-filtar i kameni nabacaj ili kamena stopa).*



Sl. 15 Linija proviranja kroz branu sa glinenim jezgrom

## II-2.9.4 Proviranje ispod betonske brane u homogenom tlu ogranicene dubine

*Do procene filtracionog proticaja i vrednosti uzgona moze se doci linearizacijom pijezometarske linije u temelju. Ovim se mnogo ne utice na tacnost procene uzgona, ali se znacajno potcenjuje izlazni gradijent proviranja sto treba nadoknaditi odgovarajucim koeficijentom sigurnosti pri proveru filtracione stabilnosti temelja (na sufoziju i fluidizaciju).*

*Filtracioni proticaj za linearnu aproksimaciju se racuna kao:*

$$q = K \cdot T \cdot \Delta H / L$$

### *Horizontalna temeljna ploca sa pribojem*

*Radi smanjenja uzgona, filtracioni proticaja i izlaznog gradijenta cesto se u temelj pobijaju vertikalni zastori-proboji-kojima se proizvoda filtracioni put vode (sl.18). Filtraciona duzina,  $L$ , moze se racunati kao zbir svih dodirnih „povrsina“ (duzina) izmedju objekta i tla:*

$$L(o) = 2 \cdot L \cdot L_p + LBR \quad \text{gde je: } L_p \text{ - dubina priboja (zastora), } LBR = B \text{ - sirina temelja.}$$

*Uzimajuci u obzir anizotropnost koeficijenta filtracije ( $K_x \gg K_y$ ), i mogucnost lokalnih sleganja duz horizontalnog dela temeljne spojnice, predloženo je da se duzina filtracije u temeljima redukuje i racuna kao zbir:*

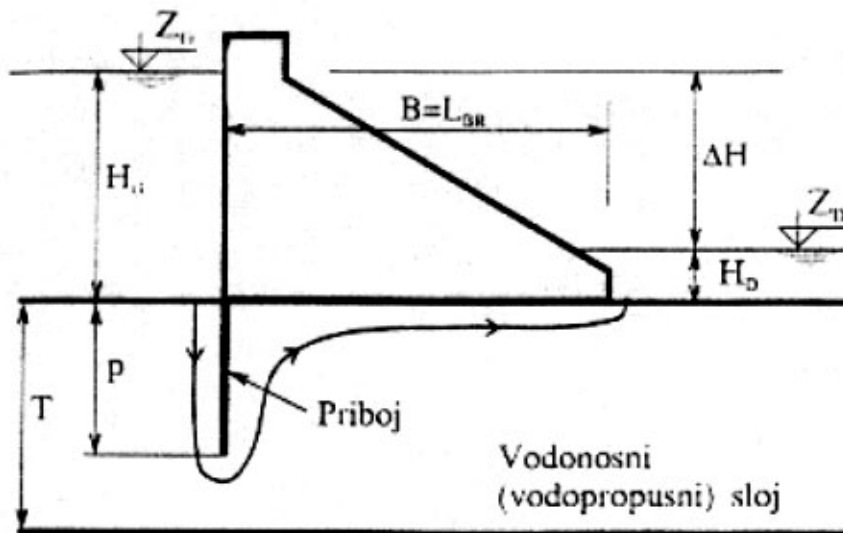
**1) Punih (ne redukovanih) duzina po svim vertikalnim kontaktima objekta i temelja, i svim kosim kontaktima sa nagibom strmijim od 45**

**2) Duzina redukovanih na jednu trecinu stvarne duzine za horizontalne kontakte i kose kontakte sa nagibom blazim od 45**

*Za proračun gradijenata proviranja (sa ciljem da se procni opasnost od sufozije i fluidizacije tla na kontaktu brane i temelja i neposredno nizvodno od brane) treba koristiti redukovanu duzinu proviranja  $L(L)$ , jer je kraca pa daje veci gradijent.*

*Za proračun uzgona treba koristiti „obicnu“ duzinu proviranja, sa ne redukovanim horizontalnim duzinama jer se tako dobija veci uzgon.*



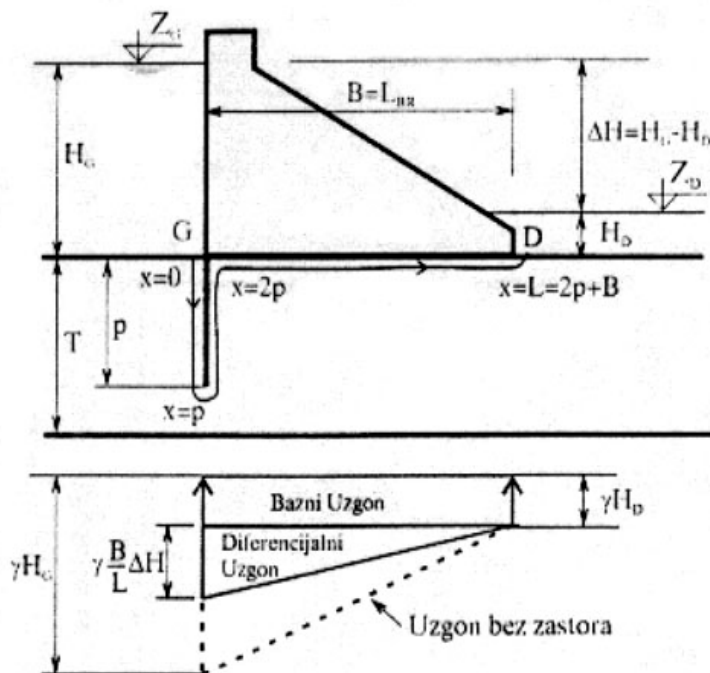


Sl. 18 Filtracija za temelj sa pribojem

Položaj pijeziometarske linije,  $h(x)$ , može se aproksimirati tako što se denivelacija gornje i donje vode,  $\Delta H = H_G - H_D$ , linearno raspoređi duž linije dodira. Linearnom aproksimacijom se dobija:

$$h(x) = H_D + ((L-x)/L) * \Delta H$$

$h(x)$  - "visina" pritiska



Sl. 19 Uzgon ispod brane sa pribojem

U tabeli 3, data je iskustvena zavisnost, bezdimenzionalnog filtracionog proticaja,  $\varphi_q = q/q_0$  ( $q_0$ -proticaj bez priboja), od odnosa dubine priboja  $I$  debljine vodonosnog sloja,  $Lp/T$ . Filtracioni proticaj,  $q$ , se odatle racuna:

$$q = \varphi_q(p/T) q_0 = \varphi_q(p/T) K T \frac{\Delta H}{L_{BK}}$$

$p/T$	1.00	0.95	0.85	0.80	0.60	0.20	0.00	$\varphi_q = \left(1 - \frac{p}{T}\right)^{0.45}$
$\varphi_q$	0.00	0.25	0.42	0.48	0.66	0.90	1.00	

Tab. 3 Zavisnost bezdimenzionalnog filtracionog proticaja od odnosa dubine priboja i debljine vodonosnog sloja

### II-2.10 Objekti uz branu

Voda se moze evakuisati iz akumulacije na mnogo nacina, sto znaci da postoji puno alternativnih tipova I dispozicija evakuacionih organa. Koji ce se od nacina (resenja) razmatrati i/ili usvojiti, zavisi od mnogo cinioca, od kojih su najvazniji:

- 1) Tip brane i visina brane (odnosno denivelacija gornje i donje vode)
- 2) Kolicina vode koja se evakuise (racunski proticaj), i trajanje poplave.
- 3) Pouzdanost prognoze doticaja poplavnog talasa
- 4) Topografskih karakteristika terena na profilu brane i/ili na jos nekom pogodnom mestu
- 5) Geoloski uslovi-uslovi fundiranja, seizmicki uslovi, stabilnost korita u koje se voda upusta
- 6) Raspored i tip ostalih objekata (HE, zahvatne gradjevine i sl.)
- 7) Nacin evakuacije vode za vreme gradjenja
- 8) Znacaj objekta
- 9) Pouzdanost upravljanja objektom
- 10) Nizvodna naseljenost i izgradjenost
- 11) Ekonomski kriterijumi

Osnovna dva objekta koja svaka brana mora da ima su:

- 1) temeljni ispust
- 2) i objekat za prihvatanje i evakuaciju velikih voda (poplavni talas)

Objekti za evakuaciju velikih voda

*Ovi objekti se dimenzionisu na merodavni poplavni talas (MPT),odnosno poplavni talas odredjenog povratnog perioda.Sto je povratni period veci to je sigurnost brane na prihvat poplavnog talasa veca,ali su i preliv i brana skuplji.*

***Povratni period merodavnog poplavnog talasa se bira na osnovu sledecih parametara:***

***-Ugrozenost nizvodnog podrucja***

***-Znacaj samog objekta***

***-Tipa brane***

***-Tipa evakuacionog organa***

***-Pouzdanosti hidroloških podataka***

*Merodavni poplavni talas zavisi od toga da li nizvodno od brane imamo veca naselja ili materijalna dobra.Sa druge strane sto se tice tipa brane treba znati da su zemljane brane mnogo ugrozenije u slucaju prelivanja od betonskih.Takodje su sa aspekta propustanja poplavnog talasa povoljniji „otvoreni” prelive od preлива kao sto je sahtni.Vrlo cesto se brana gradi na neizucenim slivovima tako da raspolazemo sa vrlo malo hidroloških podataka da bi mogli sprovesti tacniju statisticku analizu velikih voda,odnosno polavnih talasa.*

*Kod nas nisu doneti zakonski normativi za dimenzionisanje preliva,odnosno odredjivanja merodavnog poplavnog talasa.Zbog toga se u praksi najcesce koriste preporuke Internacionalnog komiteta za visoke brane,koji preporučuje da se evakuacioni organi dimenzionisu na hiljadugodisnju veliku vodu,a da se evakuacioni organ dimenzionise na hiljadugodisnju veliku vodu,a da rezervna visina  $\Delta h$ ,bude tolika da pri nailasku 1.5 puta veceg poplavnog talasa od hiljadugodisnjeg ne dodje do prelivanja brane.*

*Temeljni ispust ima ulogu,da u slucaju potrebe omoguci praznjenje akumulacije.Potreba za praznjenjem akumulacije moze biti visestruka,kao sto je nailazak ekstremnog poplavnog talasa,odnosno stvaranje prostora da se on bezbedno prihvati.Vrlo cesto se akumulacija prazni i zbog potrebe izlovljavanja ribe iz nje,a i zbog potrebe popravke nekih objekata uz akumulaciju i na brani.Medjutim sam precnik,odnosno kapacitet ispusta se dimenzionise na osnovu potrebnog vremena za praznjenje akumulacije,koje najcesce diktiraju uslovi dobijeni od ministarstva odbrane.Ponekad akumulacije imaju vise temeljnih ispusta(razlicitih kapaciteta,i na razlicitim nivoima),za obavljanje razlicitih namena.Treba voditi racuna da praznjenje akumulacije ne izazove proklizavanje obalnih terena i druge nepozeljne posledice usled naglog obaranja nivoa vode.*

***Dispoziciono gledano evakuacioni organi mogu da budu:***

***1)Kroz telo brane***

***2)Oko brane***

***3)Ispod brane***

*Objekti za evakuaciju velikih voda kao sto je napomenuto imaju zadatak da prihvate i bezbedno sprovedu poplavni talas nizvodno od brane.Osnovni uslov za njihovo dimenzionisanje je da je pre nailaska poplavnog talasa akumulacija bila puna,odnosno do kote preliva,a da pri nailasku poplavnog talasa maksimalana kota vode u akumulaciji bude*

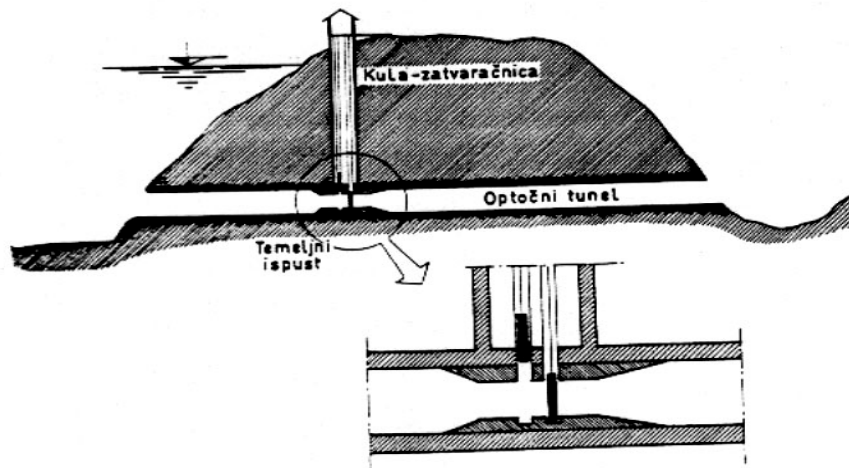
niza od kote krune brane za neku sigurnosnu visinu  $\Delta h$ . Ova sigurnosna visina  $\Delta h$  se najcesce usvaja da bude jednaka maksimalnoj visini talasa.

### 1) Temeljni ispust

Temeljni ispust treba postaviti sto blize ulaznoj gradjevini dovoda, da bi se omogucila efikasna zastita od istalozenog nanosa, jer ispust moze da pokrene nanos samo u ogranicenoj oblasti oko svog ulaza.

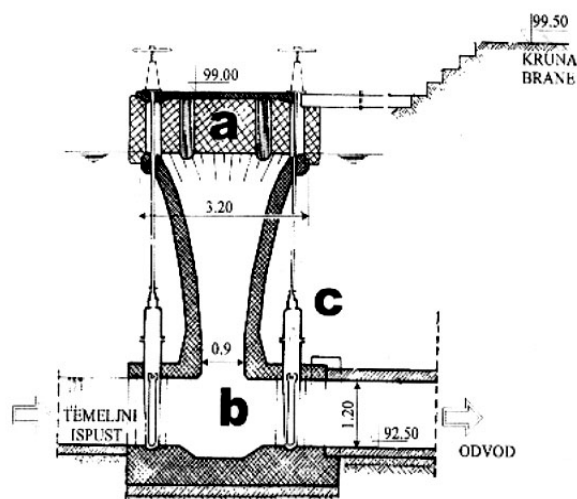
Na nasim akumulacijama u Vojvodini minimalni precnik temeljnog ispusta je 0.6 (m) proistekao iz potrebe ciscenja cevi.

Sam temeljni ispust se moze graditi van tela brane odnosno u samoj kosini brda kada je on prethodno koriscen kao optocni tinel. U drugom slucaju temeljni ispust je u samom telu brane. Kod nasute brane temeljni ispust u sebi sadrzi i kulu zatvaracnicu. Zatvaracnica se postavlja na uzvodnom delu temeljnog ispusta da bi se sprecilo isticanje vode ispod brane, ukoliko bi doslo do pucanja cevi temeljnog ispusta. Pucanje cevi temeljnog ispusta se desava u slucaju nekontrolisanog sleganja tela brane. Obavezno se postavljaju dva zatvaraca zbog sigurnosti.



Optocni tunel po zavrsetku gradjenja moze da se prepravi u temeljni ispust

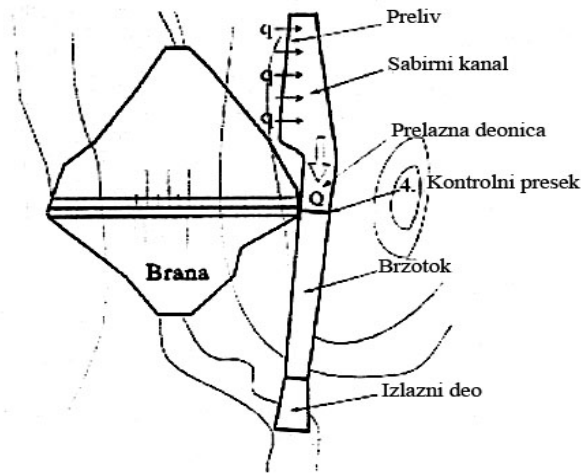
### Kombinacija temeljnog ispusta i sahtnog preliva:



## Bocni preliv

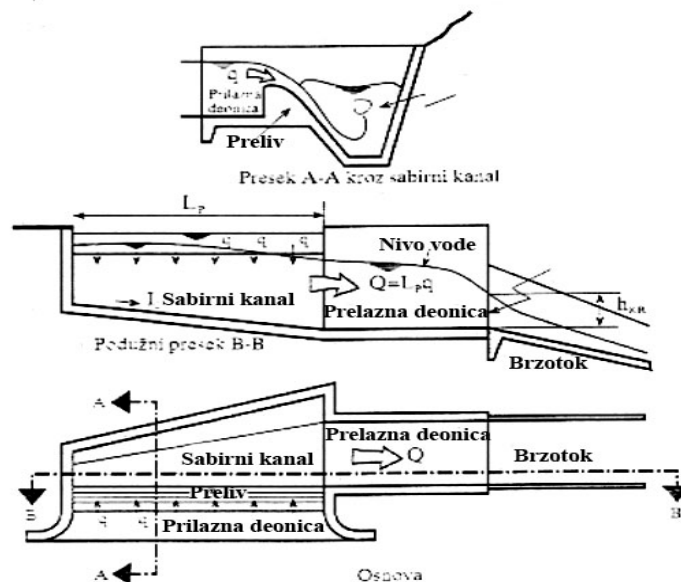
Bocni preliv je evakuacioni organ kod koga je prelivanje upravno na pravac toka u sabirnom kanalu, što omogućava veliku dužinu prelivne ivice (sl.76). Bocni preliv se koristi kada nema dovoljnog prostora da se ceonim prelivom obezbedi potrebna dužina prelivne ivice, obično kod nasutih brana u uskim kanjonima.

### Dispozicija bocnog preliva:



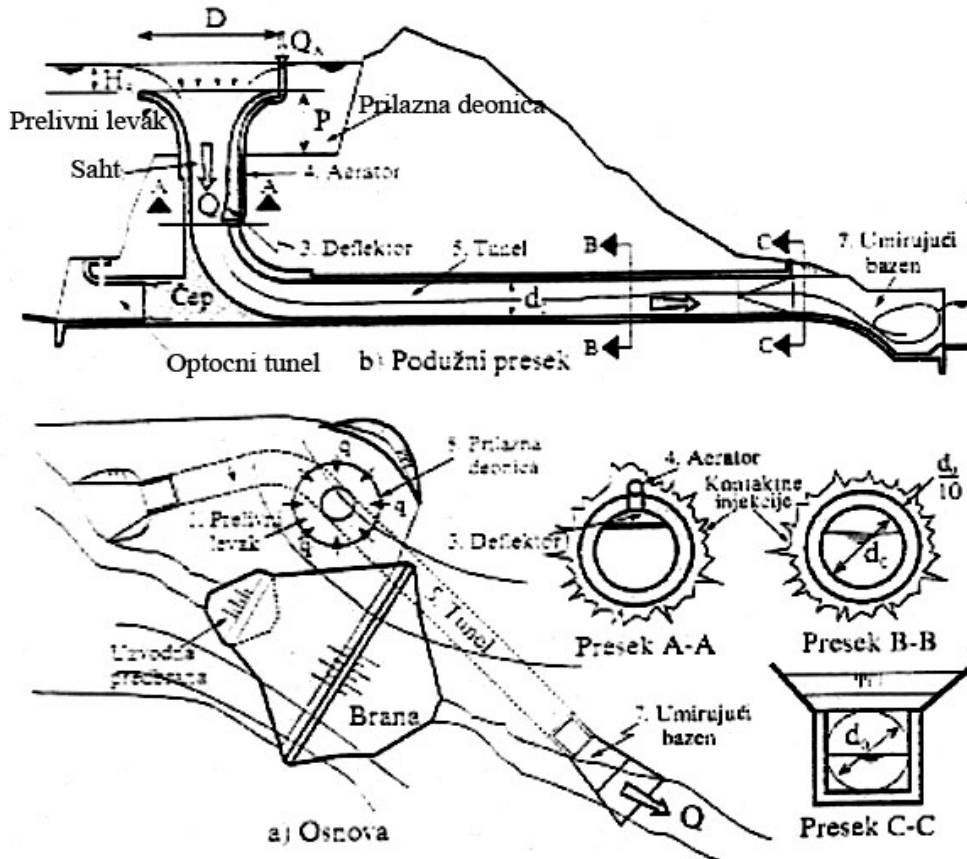
Sl.76 Tipična dispozicija sa bocnim prelivom

### Elementi bocnog preliva:

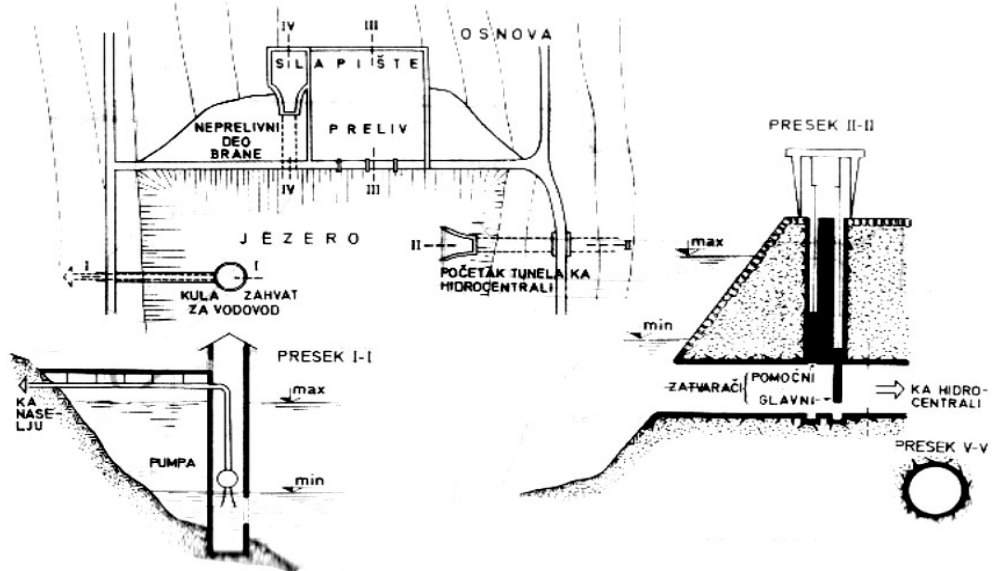


sl.77 Elementi bocnog preliva

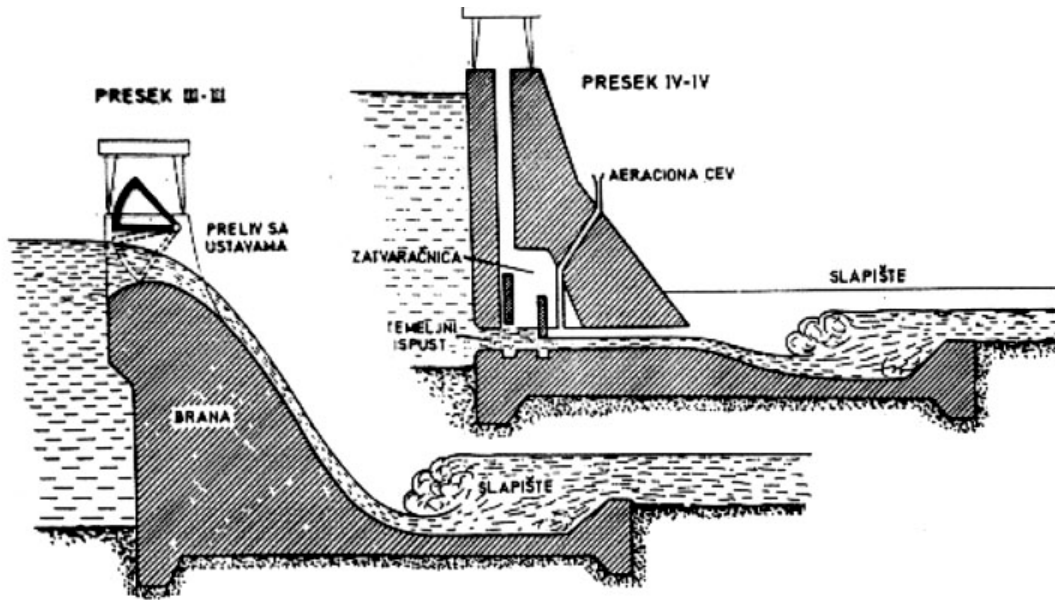
### Sahtni preliv:



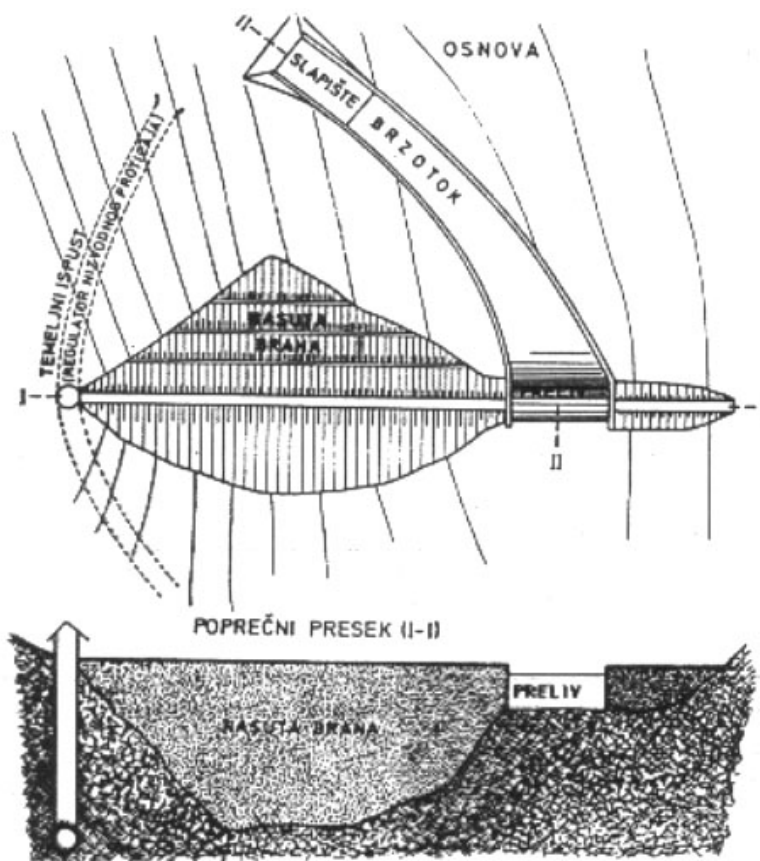
Brana sa Vodozahvatima za hidrocentralu i vodovod



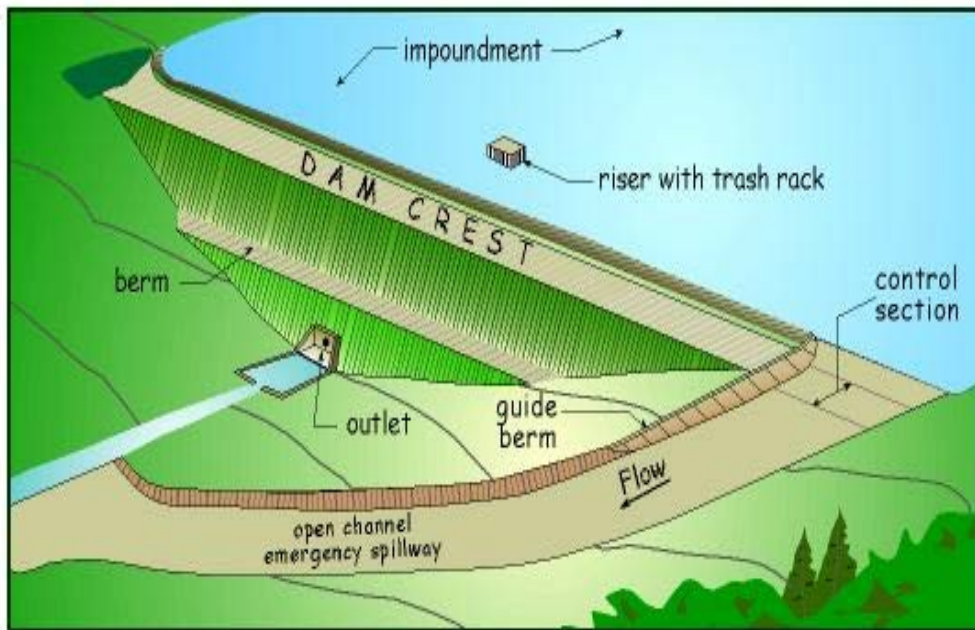
Preliv i temeljni ispust:-Presek III i IV



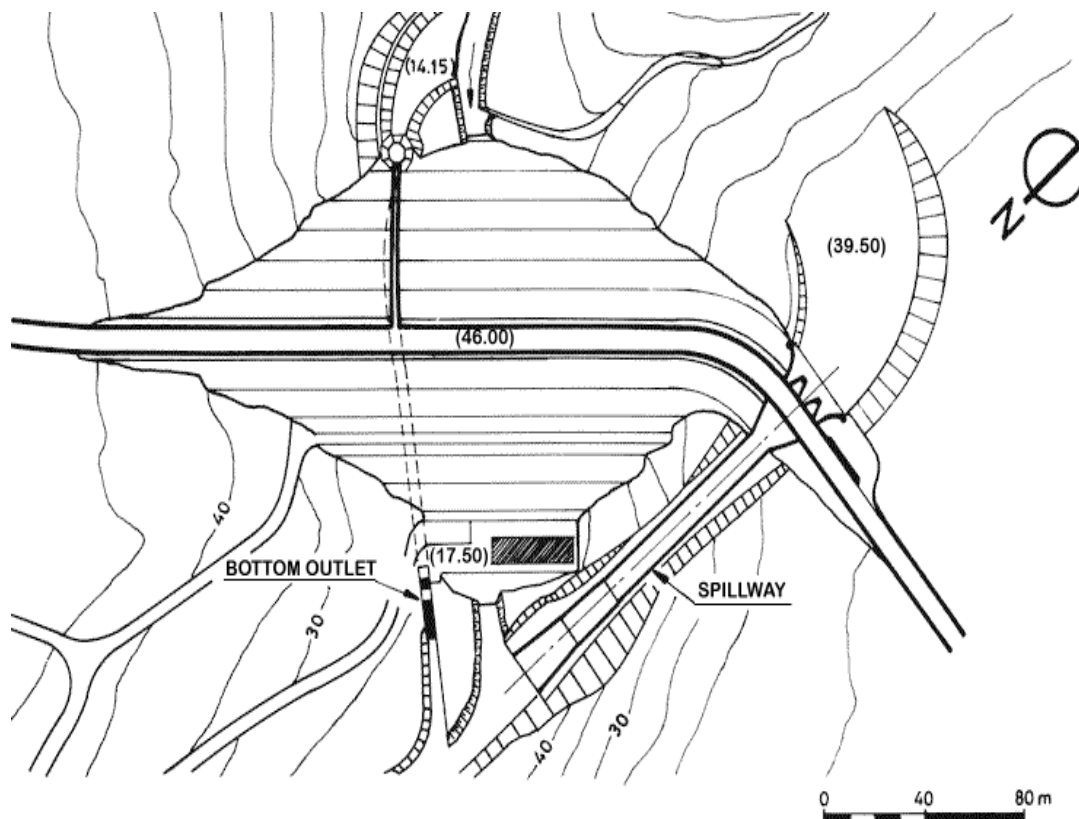
*Preliv uz nasutu branu:*



*Preliv uz nasutu branu*



*Preliv uz nasutu branu*

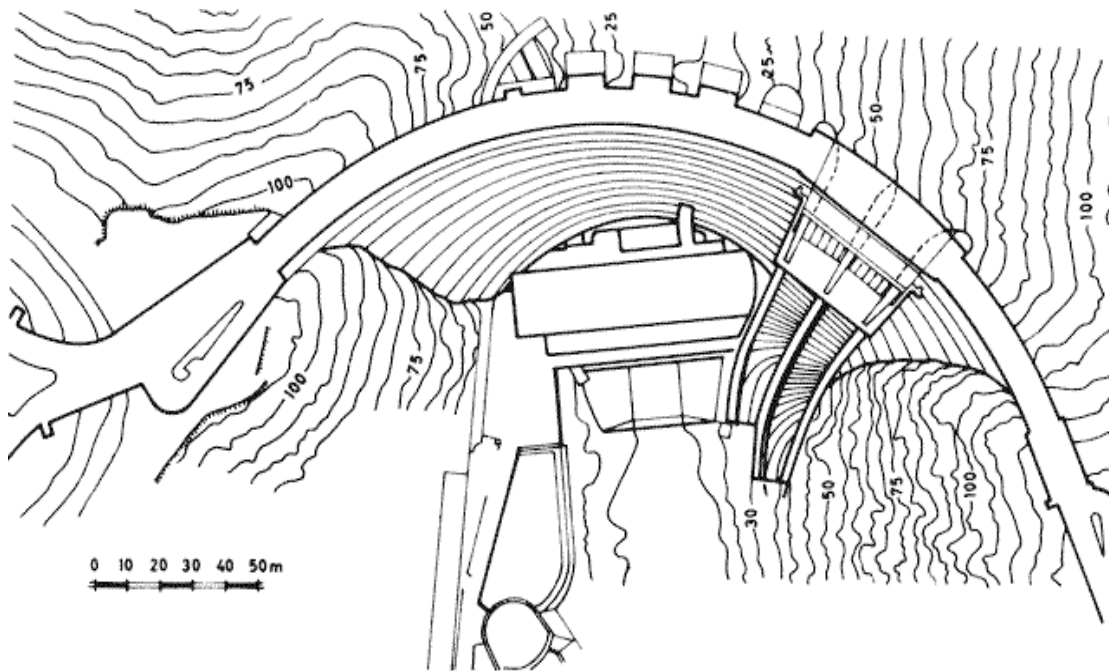




*Preliv- gravitaciona brana*



*Preliv-lucna brana*



## *Preliv-lucna brana*



### *II-2.11 Nacini izgradnje brane*

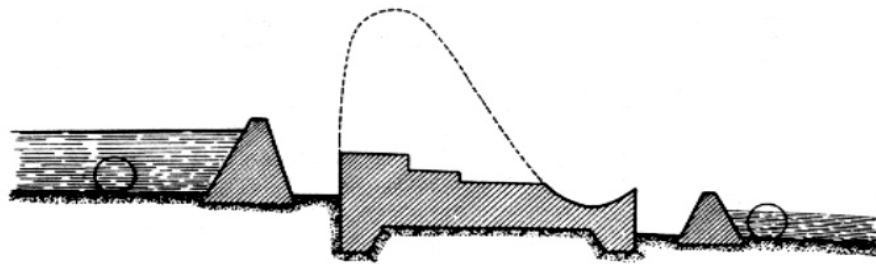
*Pri izgradnji brane postoje dva osnovna nacina:*

#### *a) Privremeno skretanje reke*

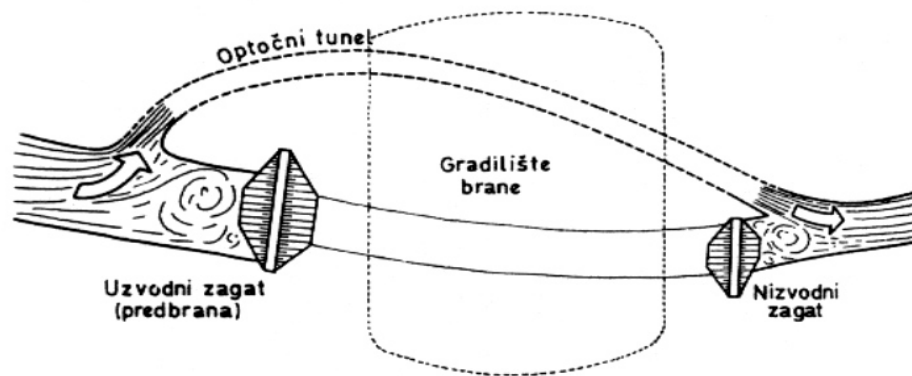
*Za vreme gradjenja brane reka se privremeno mora skrenuti da bi se u koritu reke, ili dela korita, oslobodjenom od vode, mogla podici brana. Za skretanje reke nacelno se razlikuju dve mogucnosti:*

*a1) sprovođenje reke kroz obilazni tunel (optocni tunel), dok korito reke ostaje oslobodjeno od vode, cime se omogućuje gradjenje brane. Ovo zahteva i izgradnju privremene brane, koja se naziva „zagat”, koja zaustavlja vodu i podize nivo cime se stvara mogucnost da voda protice tunelom. Postavlja se i drugi-nizvodni zagat, da se spreči da voda sa nizvodne strane ne dodje u korito gde se gradi brana. Umesto tunela moze da se gradi optocni kanal.*

PRESEK PO KORITU REKE

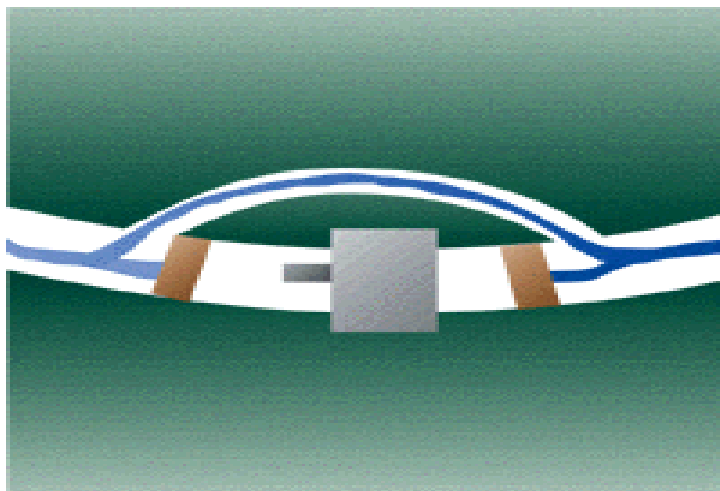


OSNOVA



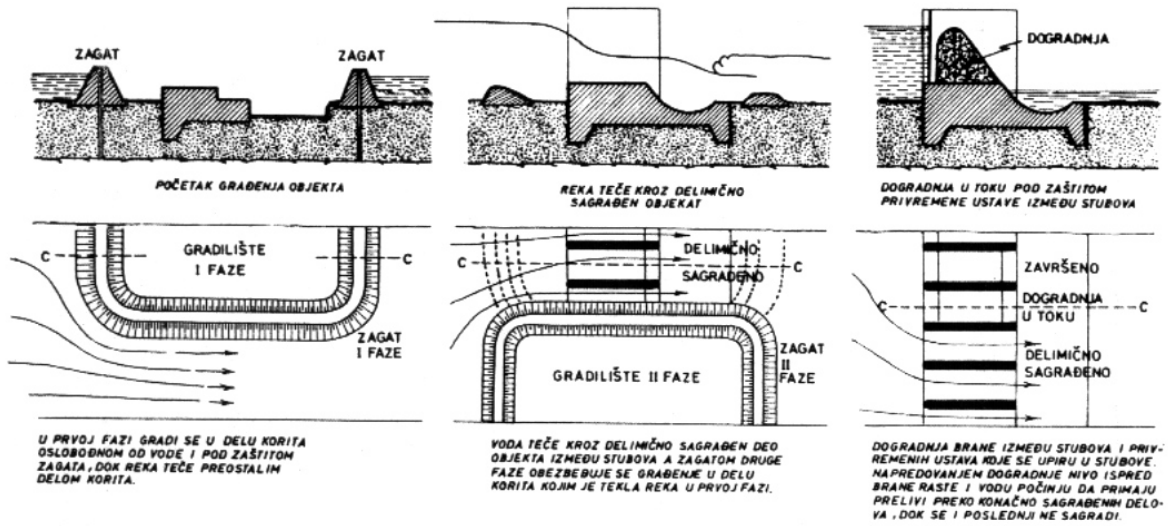
REKA JE SKRENUTA U OPTOČNI TUNEL  
I U KORITU OSLOBOĐENOM OD VODE GRADI SE BRANA.

### Skretanje reke kroz optocni tunel



*a2) gradjenja brane je podizanje zagata kojim se ogradi jedan deo korita i u kome se postoje oslobodi vode grade jedan deo objekta. Kada se on završi toliko da se kroz njega može privremeno propustati reka, reka se tu prebaci i sada se gradi i oslobodi od vode drugi deo korita u kome se gradi preostali deo objekta.*

P r e s e c i



GRAĐENJE BRANE UZ PREBACIVANJA REKE SA JEDNOG DELA KORITA U DRUGI

*Postavljanje zagata*

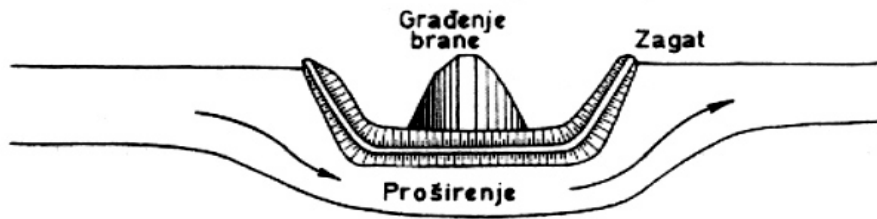


*Zagati*



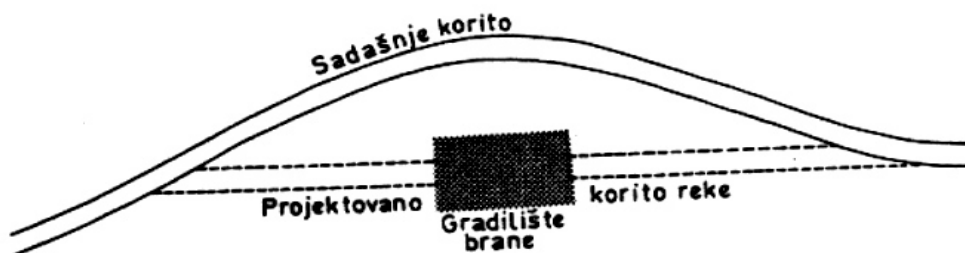
*Voda se privremeno propusta kroz jedne delove objekta, dok se drugi završavaju, pa se onda propusta i kroz definisano sagrađene ispuste i prelive, dok se poslednji delovi završavaju. Sve mora da bude podvrgnuto očekivanim hidrološkim uslovima: za vreme malih voda radovi se mogu obavljati na većem delu objekta, jer je tada reči potrebno manje prostora. Najosetljiviji poduhvati prebacivanja reke obavljaju se tada. Za nailazak perioda velikih voda objekat se privremeno osposobi da ih prihvati, da bi se objekat kasnije intenzivnije dovršavao kada se stvore povoljniji uslovi.*

*Sprovedenje vode tunelom nije prihvatljivo kao rešenje kod izgradnje brana na velikim rekama, jer bi to zahtevalo tunele nerazumno velikih prečnika, i tu se mora precizno prebacivanje reke-vec je opisano. kod manjih vodotoka, upravo svuda gde je to moguće primenjuje se prvi način (optocni tunel), jer to obezbeđuje neometano i neprekidno gradjenje sa redosledom koji je sa stanovišta tehnologije gradjenja najpogodniji, dok prebacivanje reke nameće redosled koji obično prate i iznete teskoce. **Teskoce su narocito izražene ako korito nije dovoljno široko, pa se za gradjenje u pojedinim fazama mora ostaviti malo prostora, zbog toga se ponekad vrši vestacko proširenje korita na mestu gradjenja da bi se veći deo reke ogradio, a reka tekla i kroz stvoreno proširenje.***



**PROŠIRENJE REČNOG KORITA NA MESTU  
GRAĐENJA BRANE**

*Zagaťom se mo¿e ograditi i veći deo korita (da se sagradi prete¿an deo objekta) ako se proticanje reke skrene u iskopano proširenje.*



**GRAĐENJE BRANE U SUVOM**

*Projektovano korito reke prokopaće se pošto se izgradi brana, a tada se zatvara postojeće korito i voda se skrene na sagrađenu branu*

**b) Izgradnja brane u suvom**

Moze se pomenuti i nacin koji dozvoljava da se objekat radi "u suvom". Naime, objekat se gradi pored reke, a onda se reka na njega navede, a postojeće korito se napusti. Ovo se gotovo redovno primenjuje kod izgradnje objekata za vesticke kanale. \*\*Izraze „oslobodjeno od vode” ili „suvo” treba shvatiti uslovno, tj. Mesto gradjenja oslobodjeno od recnog toka, a ne i od vode, ako se u razmatranje ukljuci i filtracija. Ispod i sa strane zagata, kroz stenu izmedju optocnog tunela i gradilista, voda ce prodirati i gradiliste ce se crpljenjem neprekidno boriti sa vodom. Primenjuje se i injektiranje ispod i oko zagata, pobijanje privremenih priboja, dreniranje i obaranje nivoa vode crpljenjem iz bunara koji se buse oko temelja. Najvece teskoce su kod izrade najdubljih temelja, brane i slapista.