

3.3-2 Nasute brane

Nasute se brane grade od prirodnog materijala, koji se može pronaći u blizini pregradnog profila. Koriste se sve vrste tala (zemljane nasute brane) i drobljena stijena (kamene nasute brane).

Nasute brane se mogu podijeliti na:

- **Zemljane brane** od prirodnih materijala:

- Homogenog presjeka,

- Heterogenog presjeka s nepropusnom glinenom vertikalnom ili kosom jezgrom, ili s jezgrom nekog drugog nepropusnog ili slabo propusnog materijala, s uzvodnim vodonepropusnim ekranom ,

- Nasute brane od **kamenog nabačaja**:

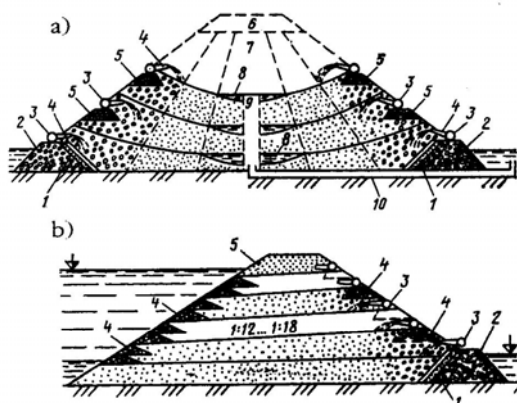
- S vertikalnom ili kosom nepropusnom jezgrom od prirodnih materijala,

- S vertikalnom dijafragmom od umjetnih ili pripremljenih materijala,

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

Razvoj nasutih brana započeo je u suhim predjelima (Egipat, Srednji istok, Indija,...) gdje je sezonske padaline trebalo sačuvati za sušne periode.

Nasute brane se sastoje od potpornog tijela i sustava za ostvarenje vododrživosti. Mogu se graditi na bilo kojem tlu (zemljane) kao i u potresnim područjima. Grade se od priručnog materijala (prahovi, glina, prašinsti pijesci, pijesak, šljunak, drobljeni kamen/stijena,...).



Slika 2.2.3. Hidraulički nasuta brana

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

b) nasipanje s jedne strane: 1. obrnuti filtri, 2. kamena oslonačka prizma, 3. "pulpovod", 4. porozni nasip od lomljenog kamena

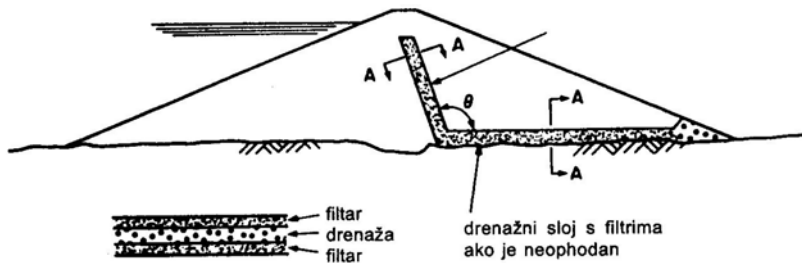
Način izvedbe nasutih brana:

- Nasipavanje i zbijanje u suhom,
- Hidrauličko nasipavanje.

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

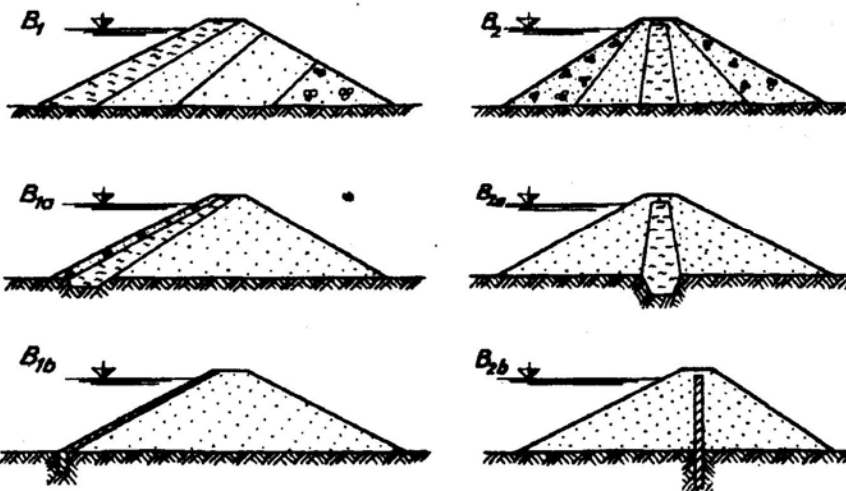
Zemljane brane mogu biti:

- homogene



Slika 2.2.2. Nasuta brana homogenog presjeka s drenažom

- heterogene

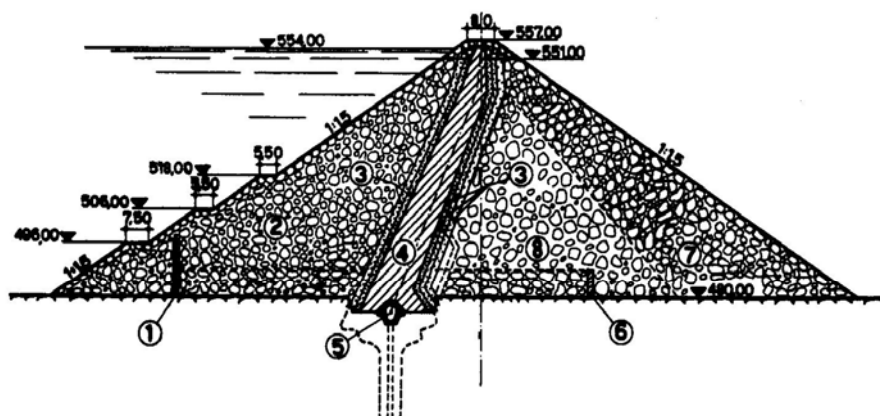


- mješovite (kameni nabačaj i zemlja)



Brane od kamenog nabačaja mogu biti:

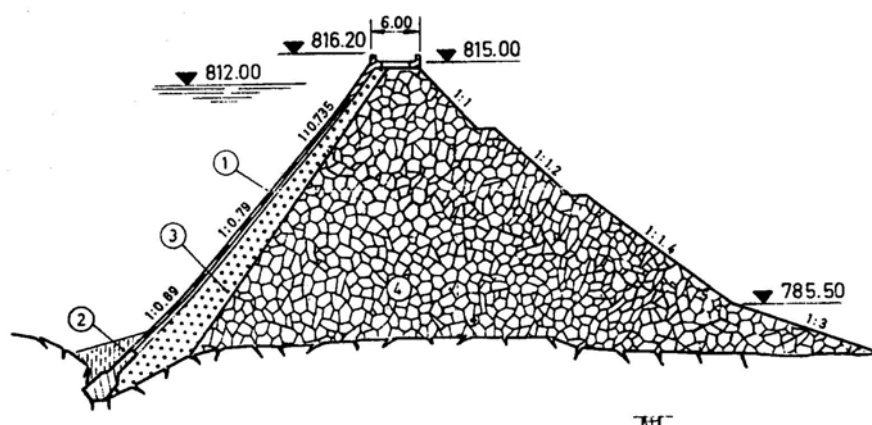
- s vertikalnom ili kosom nepropusnom jezgrom (glina, pjeskovita ilovača, prašina i sl.) ili dijafragmom (geomembrane i sl.)



Slika 2.2.4. Brana Sklope - poprečni presjek

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

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



Evakuacija velikih voda

Nasute brane su NEPRELJEVNE što znači da se koriste preljevi na boku doline i slobodnostojeći preljevi. Prelijevanje preko nasute brane, pogotovo ukoliko je ono dugotrajno, uzrokuje erodiranje nizvodnog pokosa što može rezultirati rušenjem brane. Da se spriječi prelijevanje potrebno je dobro:

- odrediti visinu krune brane,
- odrediti mjerodavni vodni val (velike vode),
- dimenzionirati, izvesti i održavati evakuacijske organe

Ako je nizvodno područje **naseljeno** evakuacijski organi se dimenzioniraju **na maksimalnu veliku vodu**. Ako je nizvodno područje **nenaseljeno** te pri poplavlivanju ne može doći do ugrožavanja ljudskih života evakuacijski organi se dimenzioniraju na **1000-godišnju veliku vodu**.

Hidraulička stabilnost brane

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

- Vodonepropusnost tijela brane,
- Vodonepropusnost temeljnog tla

Treba također osigurati **hidrauličku stabilnost brane**:

- zaštitu od UNUTRAŠNJE EROZIJE,
- zaštitu od REGRESIVNE EROZIJE.

Unutrašnja erozija

Unutrašnja erozija je ispiranje čestica sitnijeg materijala kroz šupljine većih čestica. Bolja zbijenost materijala uvjetuje manju mogućnost ispiranja čestica. Do unutrašnje erozije dolazi na kontaktu različitih materijala. Za sprječavanje unutrašnje erozije izvode se

zaštitni prijelazni slojevi (filtarski slojevi). Moguće je izvesti jedan ili više prijelaznih slojeva. Svrha prijelaznih slojeva je da spriječe unutrašnju eroziju brane i pronos sitnih čestica u smjeru toka vode. Filtarski slojevi trebaju ispunjavati slijedeće uvjete:

- Propusnost filtra treba biti znatno veća od propusnosti materijala iz kojeg voda dotječe,
- Granulacija filtarskih slojeva mora biti takva da spriječi dalje prenošenje sitnih čestica kroz filter,
- Granulacija materijala filtra ne smije dozvoliti unutrašnju eroziju filtra.

Granulacija filtarskih slojeva određena je **FILTARSKIM PRAVILOM**.

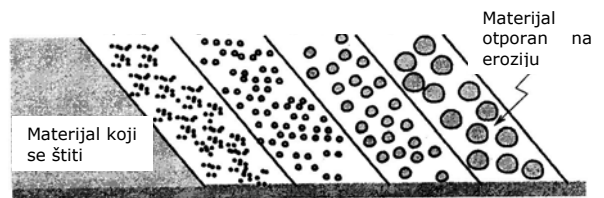
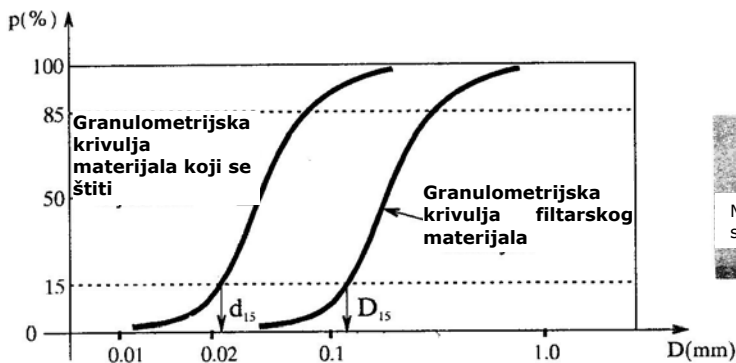
Filtarsko pravilo (definirano HRN U.C5.020. 1980):

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

Orientaciono (prema US Corps of Army):

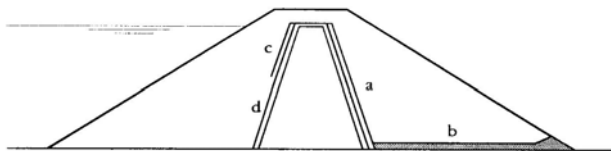
- 1.) $D_{15}^F : D_{15}^O > 5$ - onemogućava se začepljenje filtra
- 2.) $D_{15}^F : D_{85}^O \leq 5$ - onemogućava se ispiranje
- 3.) $D_{85}^O : \text{otvor} \geq 2$ – promjer zrna dva puta veći od otvora na drenažnoj cijevi
- 4.) što ujednačeniji granulometrijski sastav (da bi se ostvarila željena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

Primjer: Glina ima $D_{85}^O = 0.015$ mm, u filtru D_{15}^F 15 % mora biti manje od 0.075 mm.



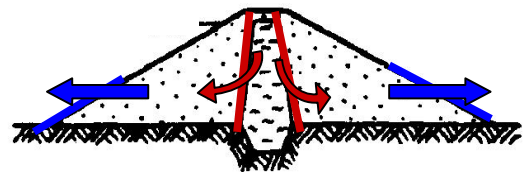
Princip filtarske zaštite

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



Slika 2.2.7. Filtri u zonama nasute brane s vertikalnom jezgrom

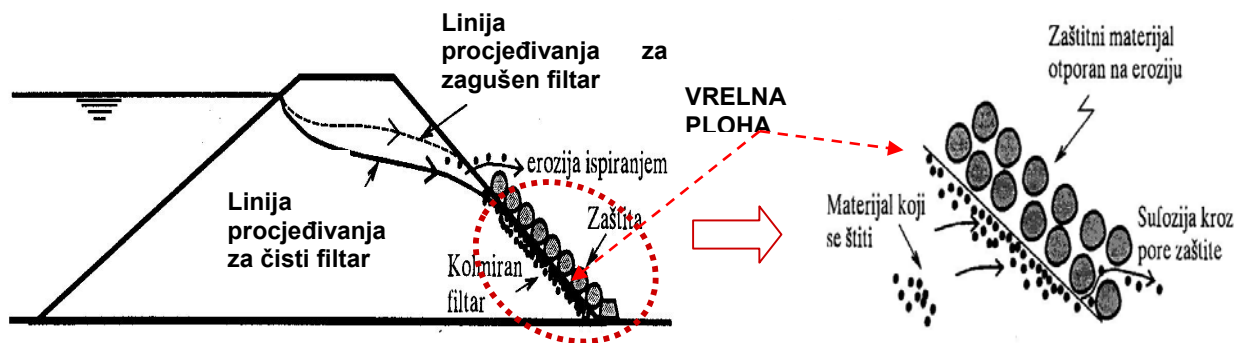
- a - nizvodna granica između jezgre brane i potpornog nasipa,
- b - područje nizvodno od jezgre gdje može nastati erozija na granici između temelja i tijela brane,
- c - uzvodna granica u gornjem dijelu jezgre gdje mogu nastati pukotine u jezgri (paralelne, poprečne i kose),
- d - uzvodna granica između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



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

Regresivna erozija – “tunnelling” efekt

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

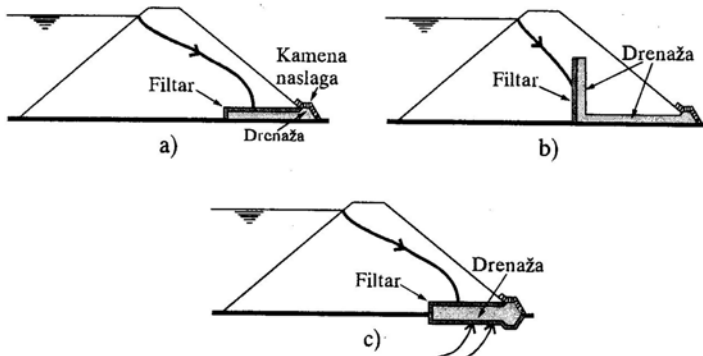


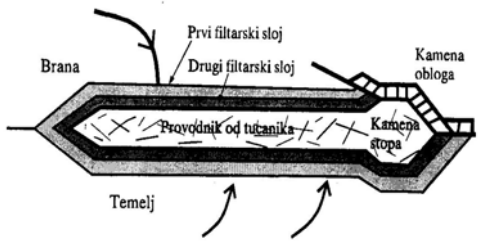
Ako je izlazni gradijent i veći od kritičnog gradijenta i_{KR} dolazi do regresivne erozije:

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

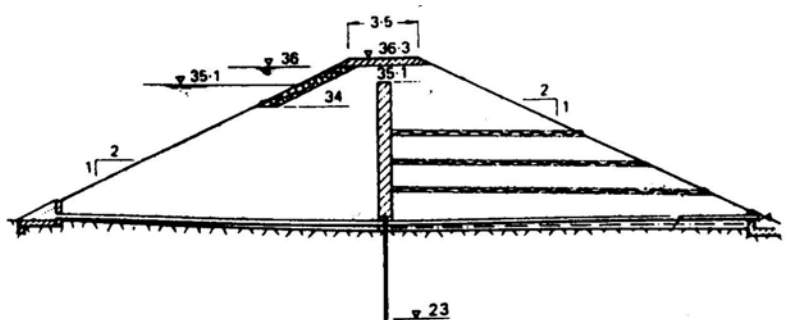
n – mjera šupljikavosti

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

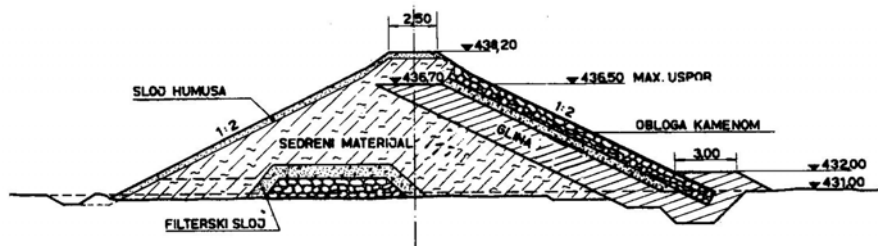




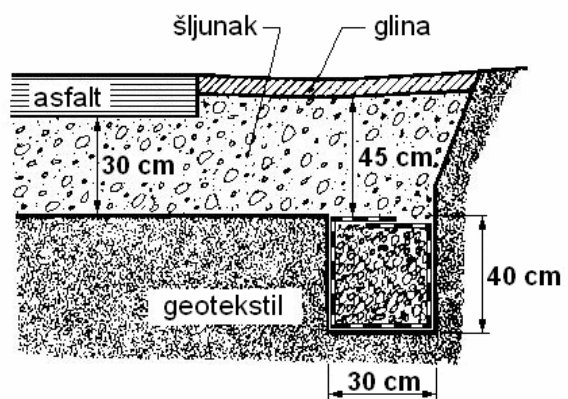
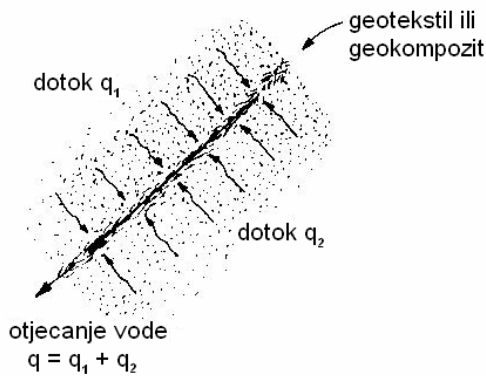
Brana Roquebrune - Nizozemska



Nasip u Gusić polju



Danas se za drenažu koriste i drenovi od geotekstila.

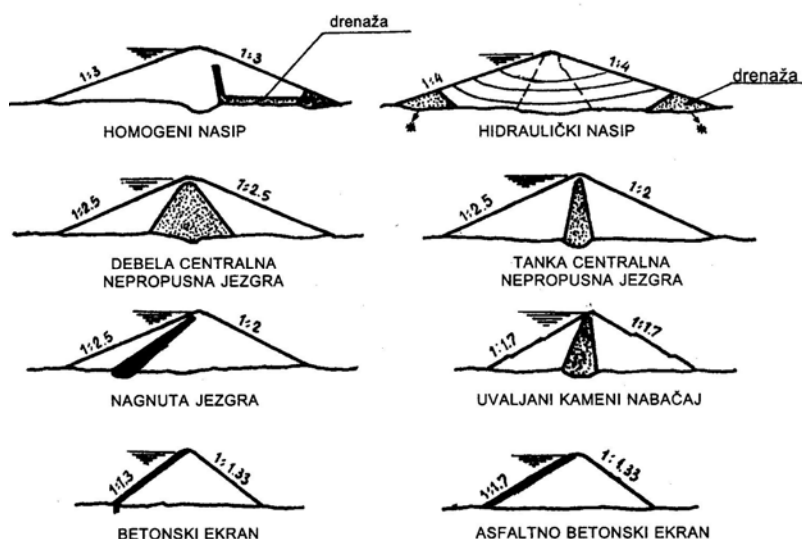


SPRJEČAVANJE/SMANJENJE PROCJEĐIVANJA (VODODRŽIVOST)

- Vododrživost tijela brane

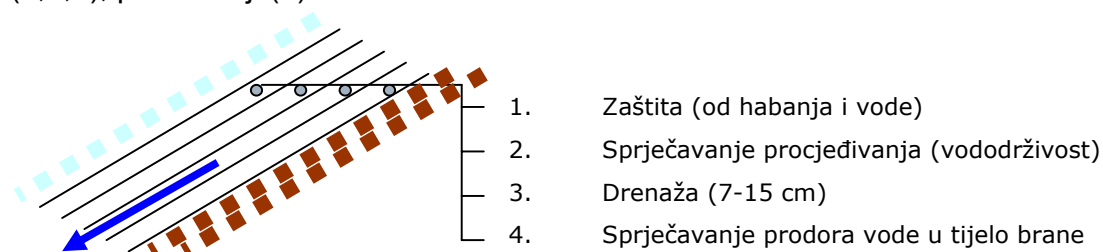
Homogene zemljane brane su dobro vododržive (potporno tijelo je vododrživo).

Heterogene brane imaju potporno tijelo koje nije dovoljno vododrživo pa se treba osigurati vododrživost brane izvođenjem vododržive jezgre ili ekrana (zemljani/glineni, betonski, asfalt-betonski, čelični, geomembrane,...). Na sljedećoj slici su prikazani primjeri osiguranja vododrživosti brana.



Na sljedećoj slici je prikazana složena 4 - slojna asfalt-betonska obloga:

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



Zbog skupoće često se izvode samo jedan ili dva sloja.

- Asfalt-betonski ekrani:

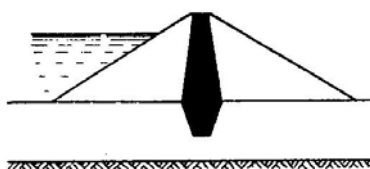
- Pogodan s aspekta slijeganja materijala,
- Dobra vododrživost,
- Lako se oštećuju,
- Ne mogu se uvijek ugrađivati (ne smije biti vlage, niti temperatura $<10^{\circ}\text{C}$,...)
- Cement-betonski i AB ekrani:
 - Ekran se izvodi u pločama 2-5 m,
 - Moraju se ostavljati fuge koje se zatvaraju kitom (npr. bitumenom),
 - Debljina sloja $d=20-50$ cm,
 - Podloga se radi što nepropusnija da voda ne probije u tijelo brane ukoliko dođe do pucanja ekrana.
- Glineni ekrani ako se postavljaju na uzvodnoj strani moraju biti zaštićeni.

UZVODNI POKOS nasute brane mora biti zaštićen od djelovanja valova i atmosferilija (posebno leda) pa se oblaže kamenim nabačajem ili ako se koristi asfalt-betonski, cement-betonski ili AB ekran tada on ima i zaštitnu funkciju.

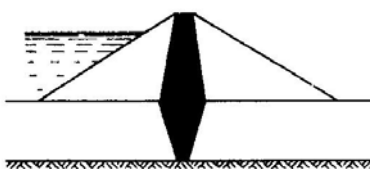
NIZVODNI POKOS zemljane nasute brane najčešće se zatravljuje (nanošenje nanosa). Ako je brana kamena ne treba zatravljivati, iako se ponekad zatravljuje iz estetskih razloga (uklapanje u okoliš, npr. brana na Lokvarskom jezeru).

- Vododrživost temeljnog tla (produljenje procjdnog puta)

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



Djelomični temeljni klin

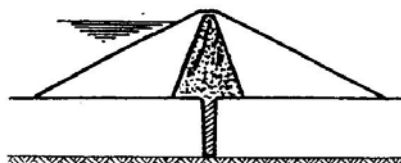


Temeljni klin do nepropusnog sloja

- Uzvodni glineni zastor

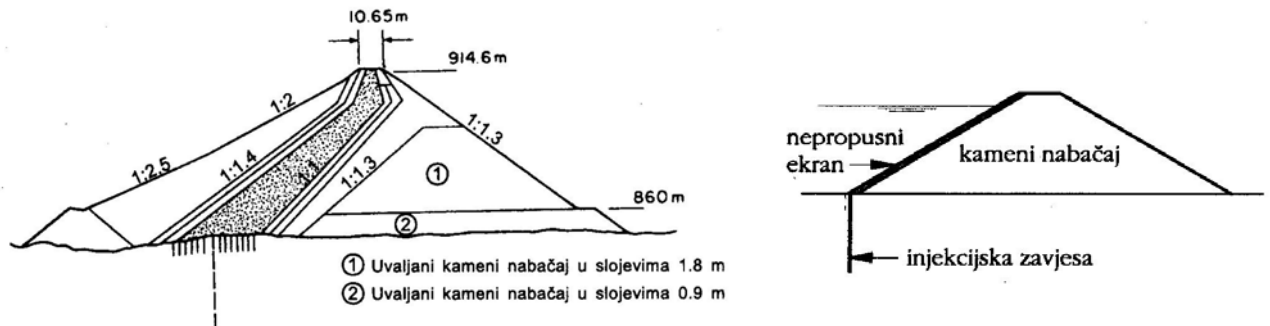


Uzvodni glineni zastor



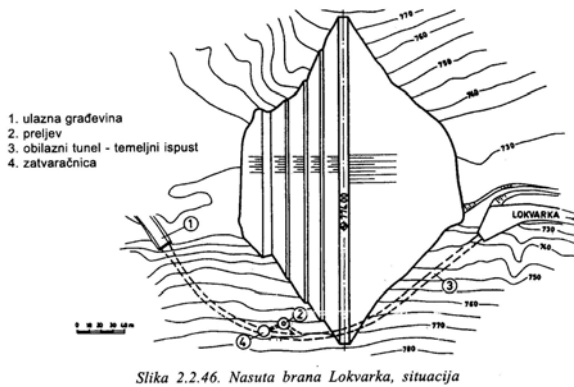
Dijafragma

- Dijafragma

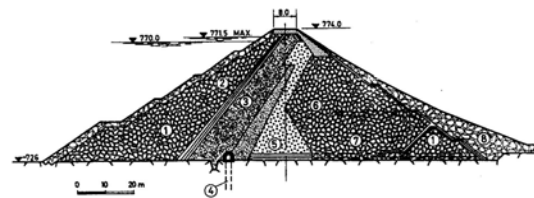


Osnovno pravilo:

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



Slika 2.2.46. Nasuta brana Lokvarka, situacija



Slika 2.2.47. Nasuta brana Lokvarka, poprečni presjek

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

Nosivost i stabilnost brana - mehanička stabilnost brana

Brana preuzima hidrostatičko opterećenje i sa svojom vlastitom težinom prenosi ga na temeljno tlo.

MEHANIČKA STABILNOST brana podrazumijeva:

- Stabilnost kosina i
- Stabilnost temeljnog tla.

Stabilnost zemljanih nasipa (Coulomb, 1773.g.) opisuje zakon otpora vezanog zemljišta na smicanje dan jednadžbom:

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

tj. kohezijom ($c = \text{const.}$) i unutarnjim trenjem (φ); a $\operatorname{tg} \varphi$ ovisi od normalnog naprezanja (σ) u ravnini smicanja. Prema Terzaghi-ju, po principu efektivnih napona, otpor zemljišta dan je izrazom:

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

gdje je:

- u – neutralni napon kod opterećenja (porni tlak),
- σ – ukupni napon,

$$\sigma' = (\sigma - u) - \text{efektivni napon}$$

Nagibi uzvodnih i nizvodnih kosina temelje se na parametrima osobina materijala koji se ugrađuju u tijelo brane i koji se utvrđuju na principima MEHANIKE TLA.

Analize stabilnosti kosina nasutih brana danas se provode korištenjem:

- Metode granične ravnoteže,
- Metode teorije plastičnosti,
- Metode konačnih elemenata.

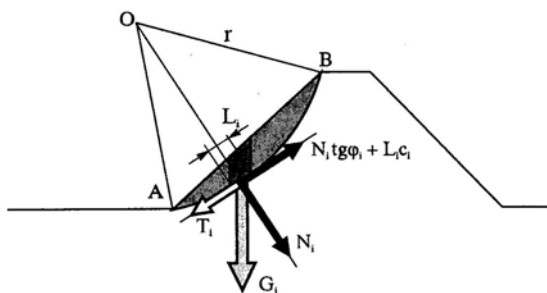
METODE GRANIČNE RAVNOTEŽE:

- Rezultantna metoda:

- Metoda kruga trenja,
- Metoda logaritamske spirale,
- Grafička metoda.

- Metoda lamela:

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



Švedska metoda momenata

METODA TEORIJE PLASTIČNOSTI

Ovom metodom određuje se granično stanje naprezanja, odnosno analiziraju se uvjeti koji dovode do stvaranja plastičnih deformacija na kosinama. Primjena teorije plastičnosti temelji se na korištenju diferencijalnih jednadžbi ravnoteže u ravnini i Coulomb-Mohrovom uvjetu sloma.

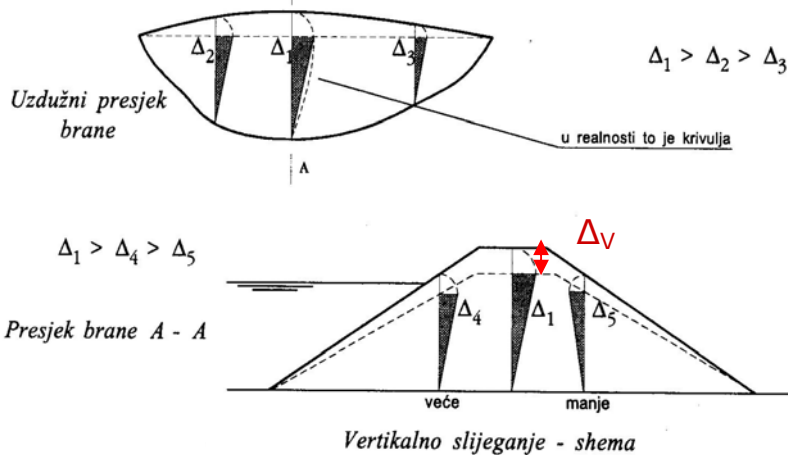
Metode: - Postupak Sokolovskoga,
- Limitna analiza.

Pri projektiranju nasutih brana treba analizirati sljedeće slučajeve:

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

Deformacije brane i temelja - stišljivost

Stišljivost predstavlja slijeganje brane, tj. deformacije tijela brane. Kod određivanja konstruktivnih dimenzija nasutih brana treba analizirati slijeganje brane i njene podloge, da bi se moglo odrediti potrebno nadvišenje krune brane. Potrebno je poznavati modul stišljivosti sloja koji se sliježe i rasprostiranje naprezanja. Koristi se Boussinesquova teorija za homogeni i izotropan elastičan međuprostor. Na osnovi koeficijenata konsolidacije i vremena trajanja konsolidacije određuje se vremenski tijek slijeganja. Kod slijeganja brane i tla dolazi do vertikalnih ($0.01H$) i horizontalnih pomaka ($0.005H$).



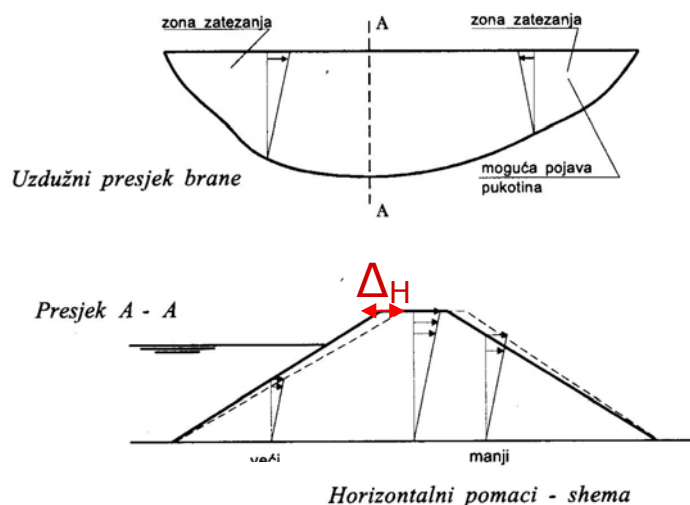
Nadvišenje brane zbog slijeganja:

$$\Delta V = 0.01H$$

Horizontalni pomak koji se treba uzeti u obzir:

$$\Delta H = 0.005H$$

Najveći horizontalni pomaci javljaju se pri prvom punjenju akumulacije.



Slijeganje je više izraženo kod nasutih zemljanih brana nego kod brana od kamenog nabačaja. Tijekom eksploatacije potrebno je mjeriti pomake i slijeganje brane.

Problemi koji se mogu pojaviti:

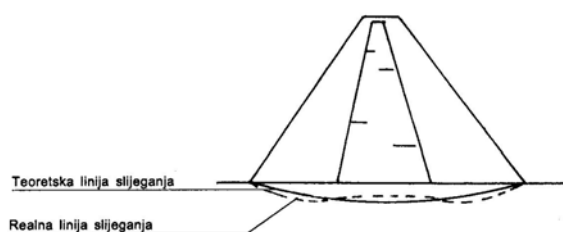
- Neravnomjerno slijeganje:

- Nastaje uslijed asimetrije profila, strmih bokova, naglih lomova u temeljnoj spojnici, slijeganjem temelja i sl. – stvaranje pukotina;

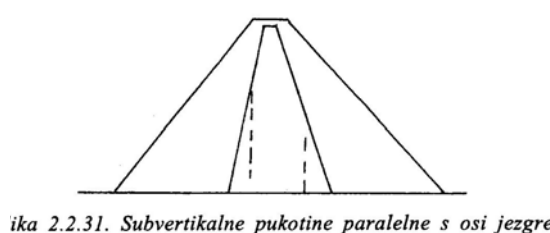
- Potrebno je koristiti visokoplastičnu glinu za jezgru;

- Posebno su osjetljive nasute brane s vododrživim ekranom .

- Veća stišljivost jezgre od susjednih zona – “vješanje jezgre” o susjedne zone.



2.2.30. Poprečni presjek - subhorizontalne pukotine u glinenoj jezgri



ika 2.2.31. Subvertikalne pukotine paralelne s osi jezgre

- Razlike u slijeganju susjednih zona.

Geometrijske i konstruktivne karakteristike

Standard HRN U.C5.020. 1980.:

Projektiranje nasutih brana i hidrotehničkih nasipa: Tehnički uvjeti

OS brana je većinom u pravcu, mada suvremena rješenja usvajaju konveksno zakrivljenu os brane.

ŠIRINA KRUNE BRANE ovisi o radnom prostoru koji je potreban u izvedbi i korištenju prometnica, te o visini brane.

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

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

NADVIŠENJE KRUNE BRANE – ovisi o visini valova (h_V) i visini penjanja valova (h_{PV} ; ovisi o nagibu pokosa i obradi površine), te sigurnosnoj visini ($h_S = 0.5-0.7$ m):

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

Za brane $H \leq 15$ m visine minimalno nadvišenje iznosi 1.5 m.

Za brane $H > 15$ m visine minimalno nadvišenje iznosi 2 m.

VISINA VALA se određuje na temelju:

- Usvojene brzine, pravca i trajanja vjetra koji djeluje okomito na os brane,
- Vrijednosti efektivne dužine razgona vjetra za pravac $\pm 45^\circ$ od pravca djelovanja mjerodavnog vjetra prema izrazu:

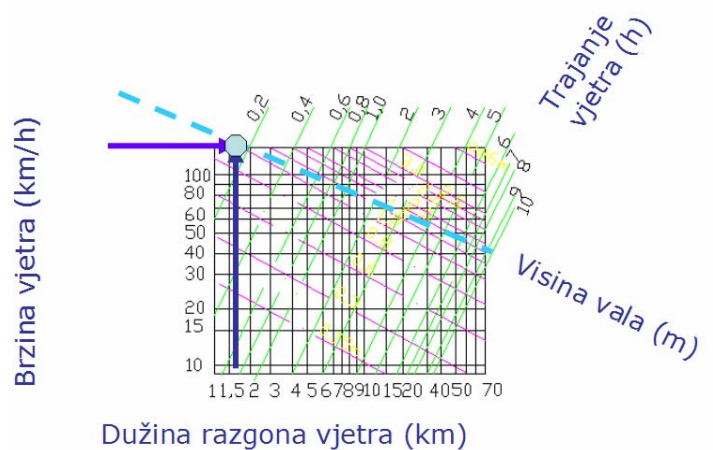
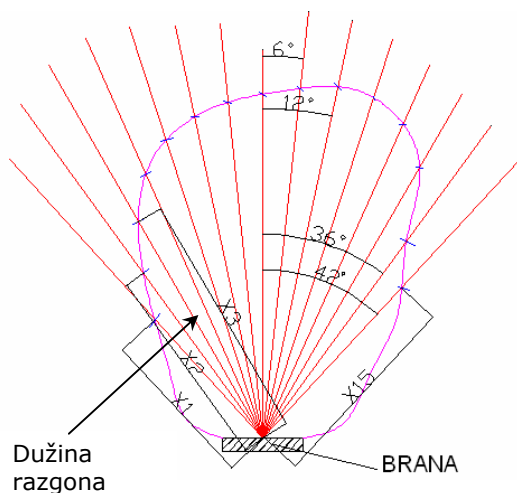
$$L_{EF} = \frac{\sum_i X_i \cos \alpha_i}{\sum_i \cos \alpha_i}$$

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

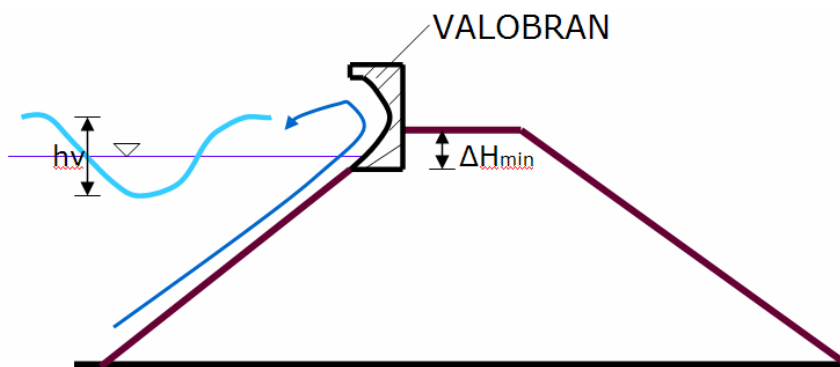
X_i = odgovarajuće dužina razgona,

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

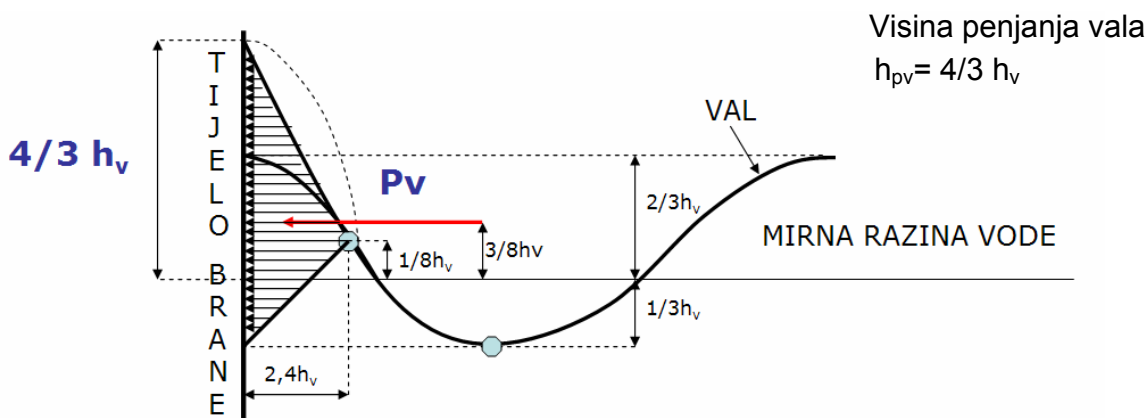
Za poznate L_{EF} i brzinu (npr. $L_{EF} = 5$ km u $v_{vjetra} = 100$ km/h) uz korištenje dijagrama određuje se visina vala cca. 1.5 m.



VISINA PENJANJA VALA

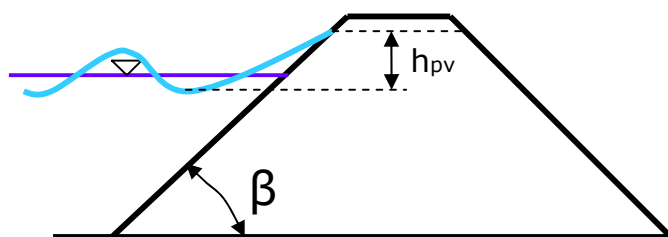


VALOVI USLIJED VJETRA

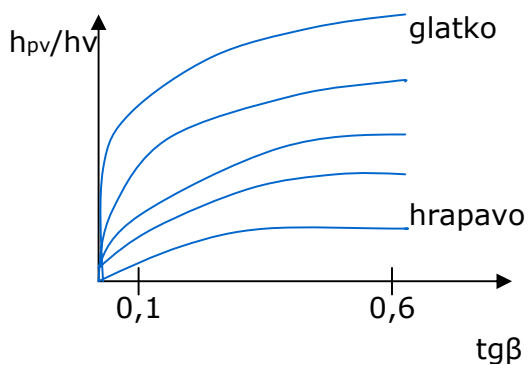


Visina penjanja h_{pv} :

- ovisi o pokosu (nagibu) brane

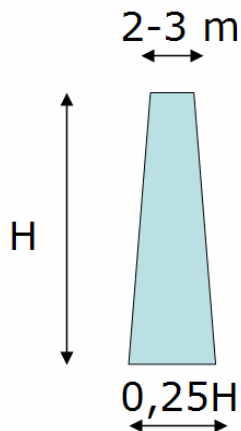


- ovisi o obradi materijala (veće vrijednosti za glatki materijal)

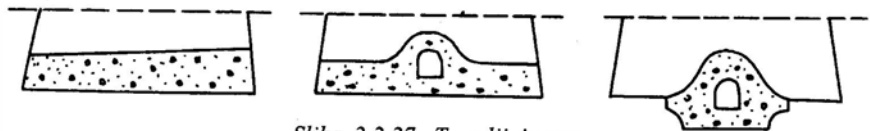


Prema ICOLD-u trebalo bi dodati još visinu uslijed seiche efekta.

DIMENZIJE JEZGRE



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

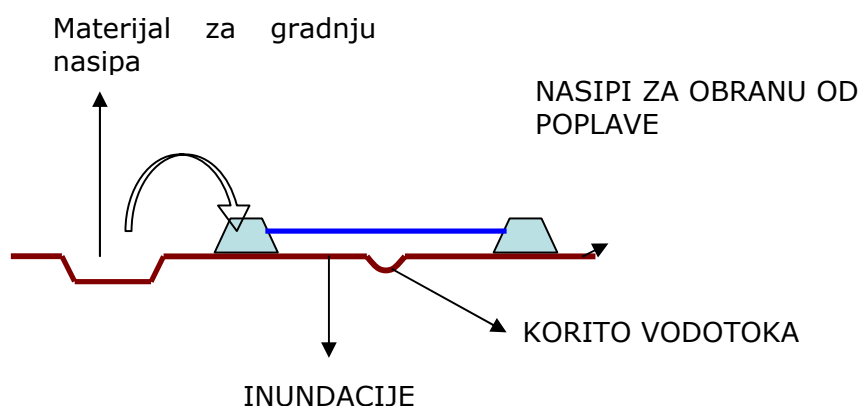


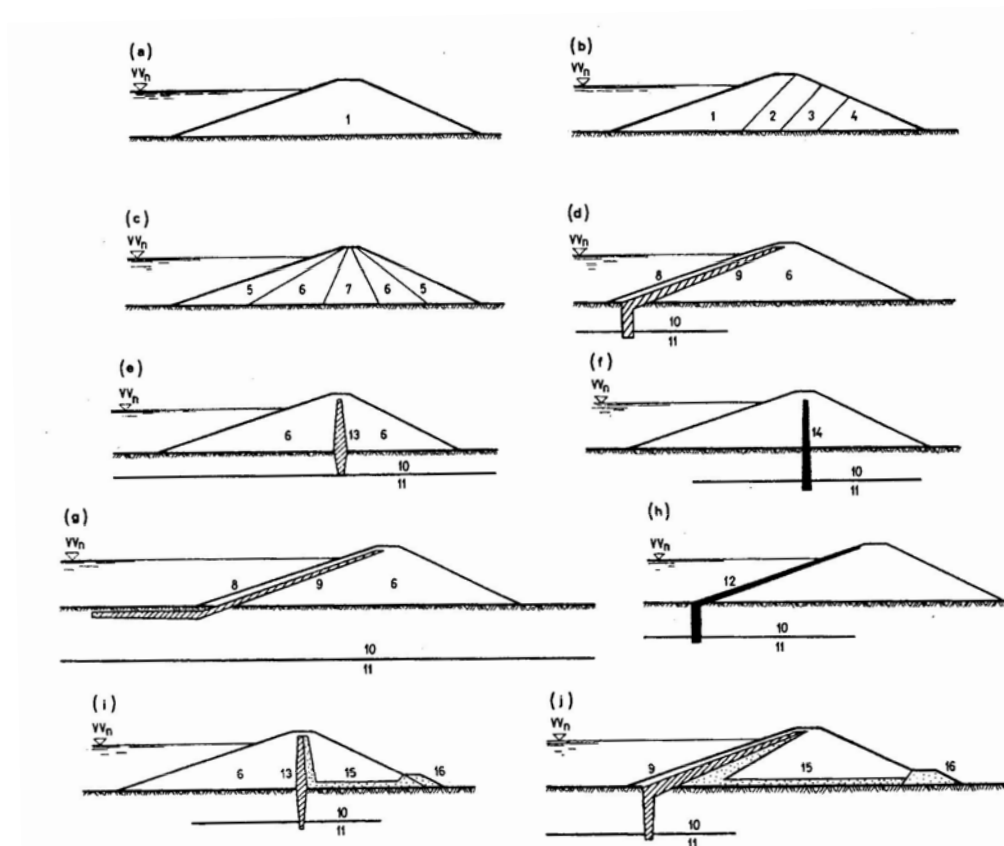
Slika 2.2.27. Temelji jezgre

3.3-2.1 Nasipi obrane od poplava

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

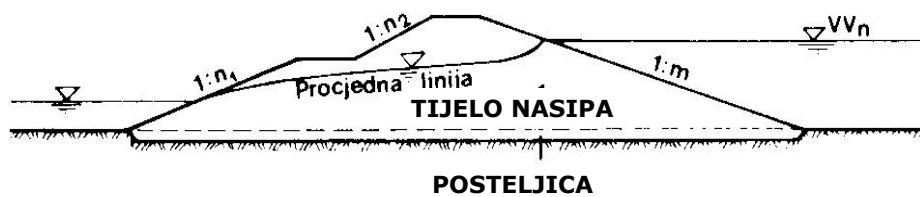
Javljaju se slični problemi kao kod nasutih brana (npr. regresivna erozija).



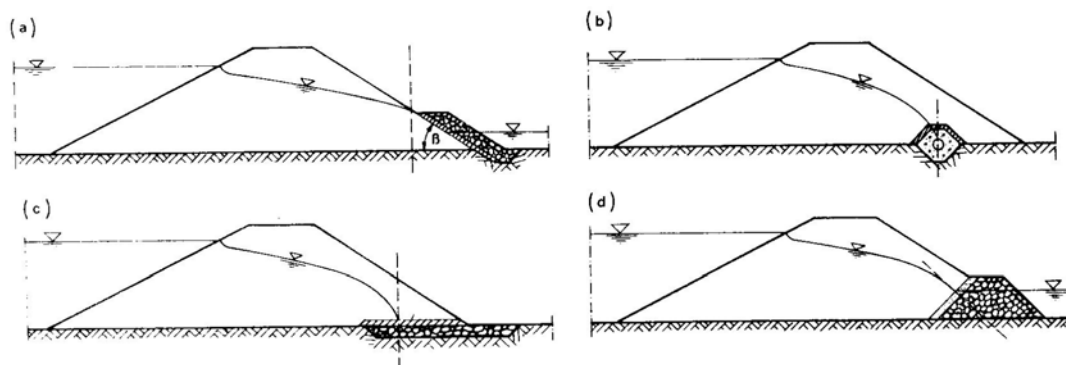


Slika 6.6.:24 Primjeri presjeka nasipa, [04]

1 - pjeskovita glina; 2 - glinoviti pijesak; 3 - pijesak; 4 - šljunak; 5 - vodopropusni materijal;
 6 - slabo vodopropusni materijal; 7 - vodonepropusni materijal; 8 - zaštitni sloj; 9 - vodonepropusna obloga;
 10 - vodopropusno tlo; 11 - vodonepropusni podsloj; 12 - kruta vodonepropusna obloga; 13 - vodonepropusna jezgra;
 14 - kruta vodonepropusna jezgra; 15 - vodopropusni filtar; 16 - drenažna stopa

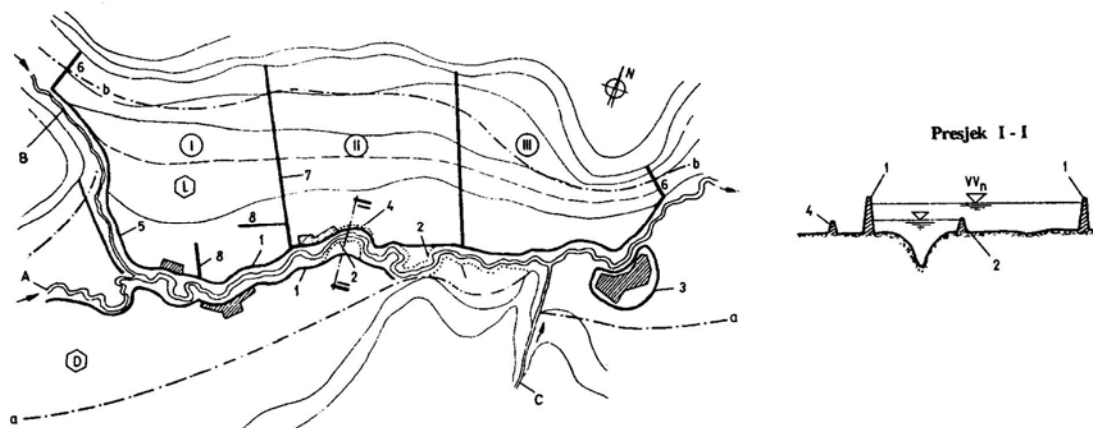


Procjedna linija kroz nasip



Primjeri dreniranja nasipa

- a) Pomoću obratnog filtera i kamene obloge
- b) Pomoću drenažne cijevi
- c) Pomoću horizontalnog drenažnog sloja
- d) Pomoću drenažnog nasipa od kamenog nabačaja



Slika 6.6.:20 Situacijska shema rasporeda nasipa prema njihovoj namjeni, [04]

A - matični vodotok; B - lijevi pritok; C - desni pritok;

D - desna inundacija (područje između vodotoka A i granice inundacije a - a);

L - lijeva inundacija (područje između vodotoka A i granice inundacije b - b)

1 - glavni nasip; 2 - ljetni nasip; 3 - obuhvatni nasip; 4 - dolmice; 5 - usporni nasip; 6 - priključni nasip;

7 - poprečni nasip; 8 - pristupni nasip; I, II i III - polderi

3.3-3 Obrana gradilišta od velikih voda

Brane se grade u riječnom koritu, stoga je neophodno poduzeti mjere kojima će se osigurati suha građevinska jama (potrebno je postaviti drenažni sustav za crpljenje vode koja procjeđuje u jamu). Način evakuacije voda za vrijeme građenja ovisi o:

- Topografiji terena,
- Geološkim i hidrogeološkim uvjetima,
- Tipu i veličini brane,
- Tipu stalnih evakuacijskih organa,
- Hidrološkim i hidrometeorološkim karakteristikama sliva.

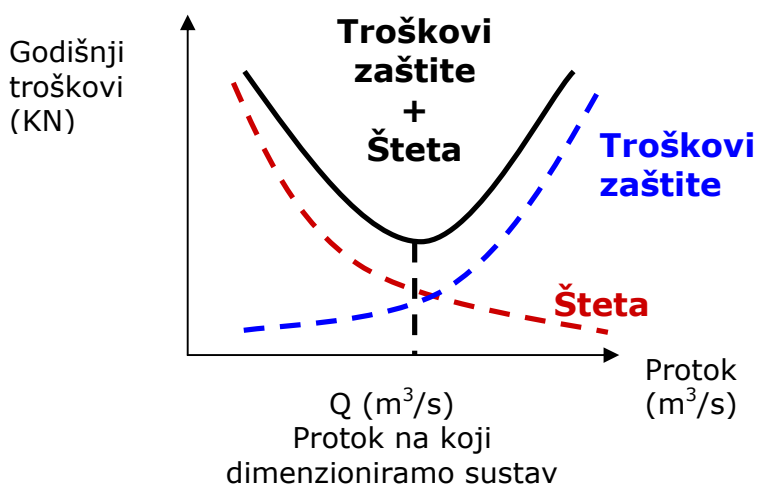
Postupci:

- **Privremeno skretanje toka,**
- **Postupno građenje u koritu,**
- **Građenje van korita.**

Izbor mjerodavne velike vode za zaštitu građevne jame:

Temeljne jame **nasutih brana** se osiguravaju orijentaciono na **20-godišnju** veliku vodu što je ujedno i količina vode (protok) koji treba evakuirati obilaznim tunelom. Posljedice plavljenja **betonskih brana** su manje u odnosu na nasute pa se građevinske jame za gradnju betonskih brana osiguravaju orijentaciono na **10-godišnju** veliku vodu.

Izbor provedbom OPTIMIZACIJE – kriterij izbora je minimum ulaganja i spriječenih šteta.



Izbor na osnovi kriterija rizika

- Sigurnost da se u vrijeme građenja neće pojaviti velika voda:

$$S = 1 - p(x),$$

gdje je

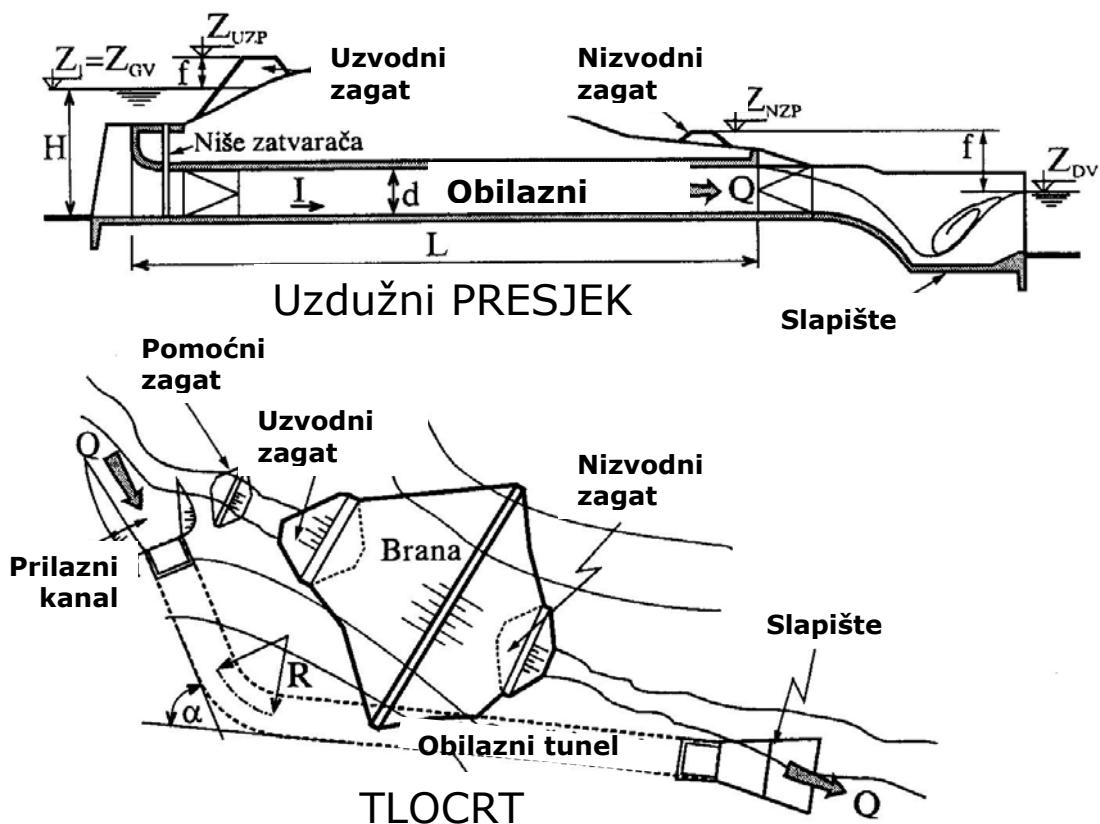
$$p(x) = 1 - (1 - p)^n,$$

p je vjerojatnost pojave velike vode,

n je vrijeme građenja.

Privremeno skretanje toka

Primjenjuje se često kod uskih dolina sa strmim bokovima gdje se može postaviti kratak tunel (do 500 m dužine). Grade se uzvodni i nizvodni zagati (predbrane-pomoćne brane). Uzvodni zagat pregrađuje korito i usmjerava vodu u obilazni tunel, dok se nizvodni zagat gradi po potrebi i to u svrhu sprječavanja povrata vode uslijed uspora (ako je teren relativno blag i/ili se radi o velikoj količini vode...). Uzvodni i nizvodni zagat mogu se graditi kompletno izvan tijela brane ili mogu biti ugrađeni u tijelo brane. Ako se grade samostalno tada se nakon izgradnje brane mogu srušiti, uzvodni se može potopiti.

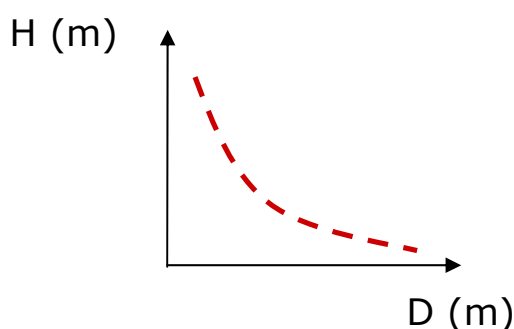


Redoslijed gradnje:

1. **Obilazni tunel** – gradi se za vrijeme malih voda (uz izgradnju pomoćnog zagata)
2. **Uzvodni zagat** - prije nailaska velikih voda
3. **Nizvodni zagat** – po potrebi

Po završetku brane tunel se može zatvoriti ili preurediti u temeljni ispust, dovod za korisnike ili odvod bunarskog preljeva.

Za definiran protok (veliku vodu) promjer tunela i visina uzvodnog zagata su međusobno zavisni, jer promjer tunela određuje površinu protočnog profila, a visina uzvodnog zagata određuje pad, tj. brzinu u tunelu.



Poželjno je naći **optimalno rješenje = minimalni ukupni troškovi izgradnje zagata i tunela.**

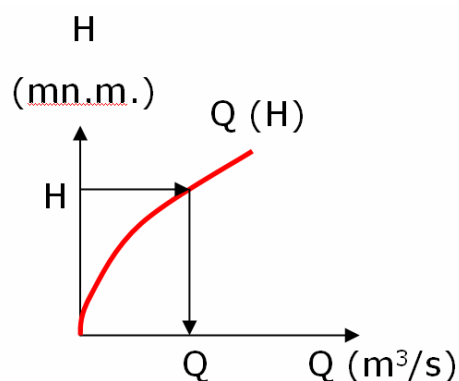
Promjer tunela je često definiran konačnom namjenom (promjer temeljnog ispusta ili odvoda bunarskog preljeva).

Ograničenja:

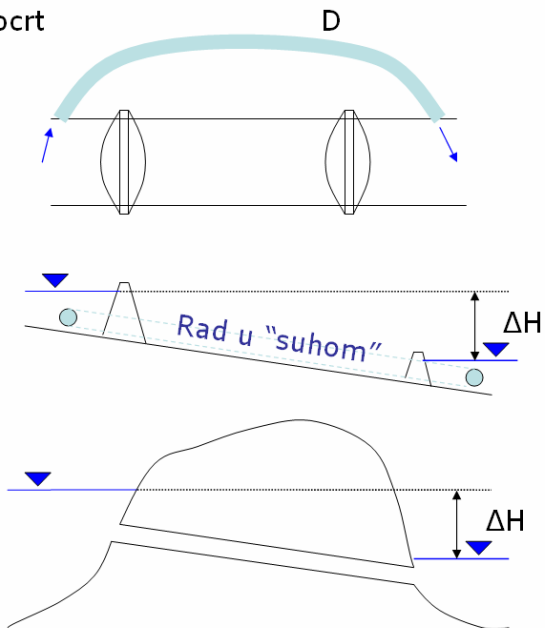
- Udaljenost nožice zagata od nožice brane (ukoliko zagat nije dio brane) treba bi iznositi cca 20 m za nesmetano kretanje mehanizacije.
- Minimalni promjer tunela iznosi 2 m, da ga se može kontrolirati (prolaz kroz tunel pješice).
- Nadvišenje zagata nad projektnom velikom vodom 1-1.5 m.
- Zagati viši od 1 m u kruni su široki barem 3 m da se nasipanje može provoditi korištenjem mehanizacije.

Proračun:

1. Visina nizvodnog (donjeg) zagata očitava se iz Q-H krivulje.
2. Odabire (pretpostavlja) se promjer tunela - D.
3. Izračunava se ΔH potreban za evakuaciju projektne količine kroz odabrani promjer tunela (za tečenje pod tlakom).



Tlocrt



Tečenje pod pritiskom

Proračun:

$$Q = \mu \cdot F \cdot \sqrt{2g\Delta H}$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_{\text{LOK}} + \sum \xi_{\text{LIN}}}}$$

gdje je:

Q – protok

 μ – koef. gubitaka

F – površina poprečnog presjeka tunela

 ξ_{LOK} – lokalni gubici ξ_{LIN} – linijski gubici

Tečenje u tunelu (ovo vrijedi i za PROPUSTE) može biti:

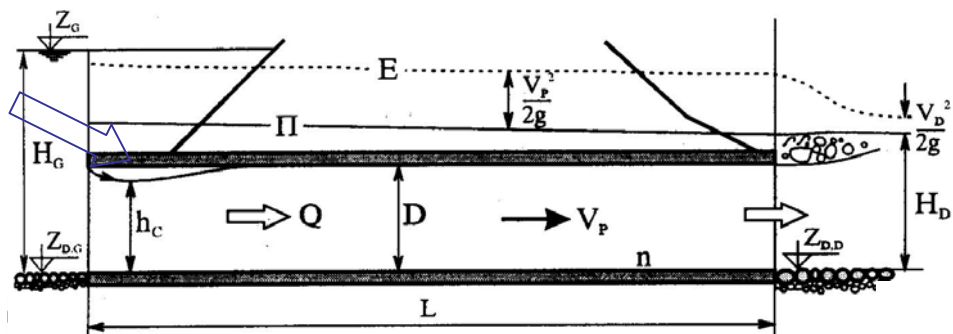
- **pod pritiskom,**
- **sa slobodnim vodnim licem.**

Ulaz u cijev u oba slučaja može biti:

- **Potopljen** (s ime da je potopljen ulaz češće korišteno rješenje jer se potapanjem ulaza postiže veća brzina u cijevi te s ime i veći protok za isti protjecajni profil),
- **Nepotopljen.**

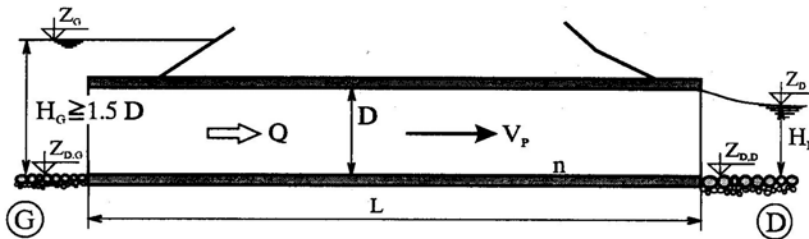
Ako je gornji i donji dio tunela potopljen i $H/d > 1.5$ tečenje je pod pritiskom.

Moguće odvajanje mlaza.

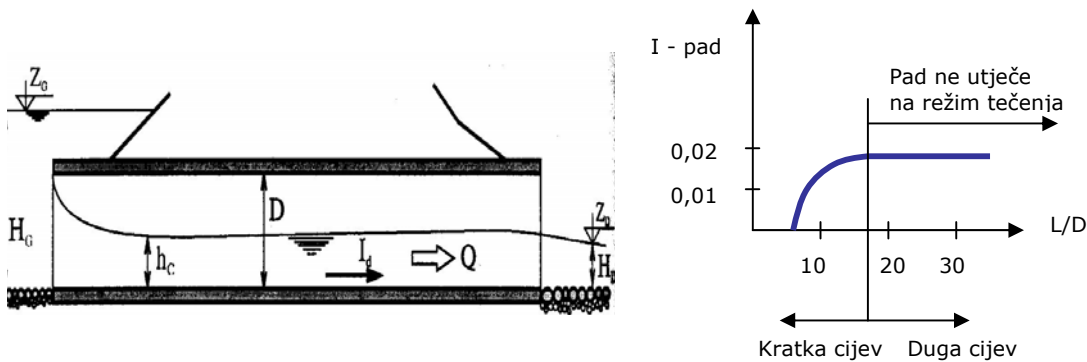


Ako je gornji dio tunela potopljen, a donji nepotopljen i zadovoljeni su uvjeti $H/d > 1.5$, ovisno o obliku ulaza, dužini cijevi i padu dna te hrapavosti površine:

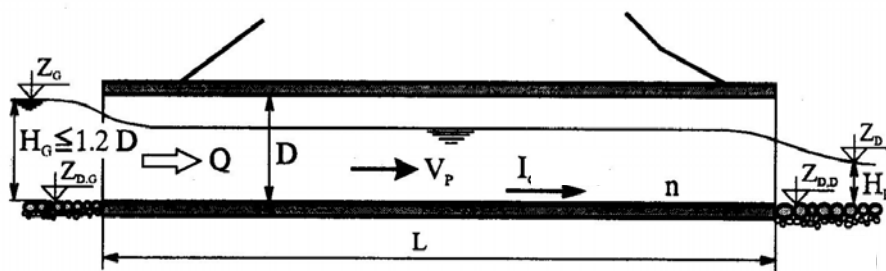
- Dugi tunel - tečenje je pod pritiskom



- Kratki tunel - tečenje je sa slobodnim vodnim licem



Ako je gornji dio tunela nepotopljen ili potopljen uz uvjet $H/d < 1.2$, a donji dio nepotopljen, tečenje je sa slobodnim licem.



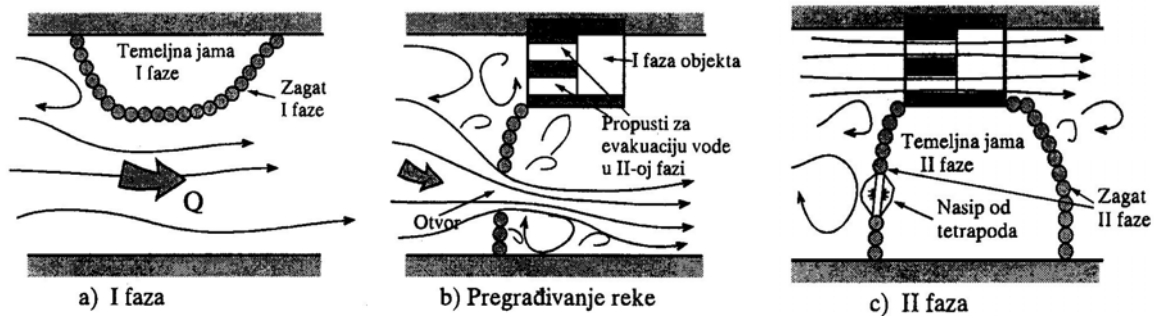
Ako je gornji dio tunela potopljen pod uvjetom $1.2 \leq H/d \leq 1.5$, a donji nepotopljen, tečenje je u nestalnom prijelaznom režimu.

Postupno građenje u koritu – parcijalno pregrađivanje toka

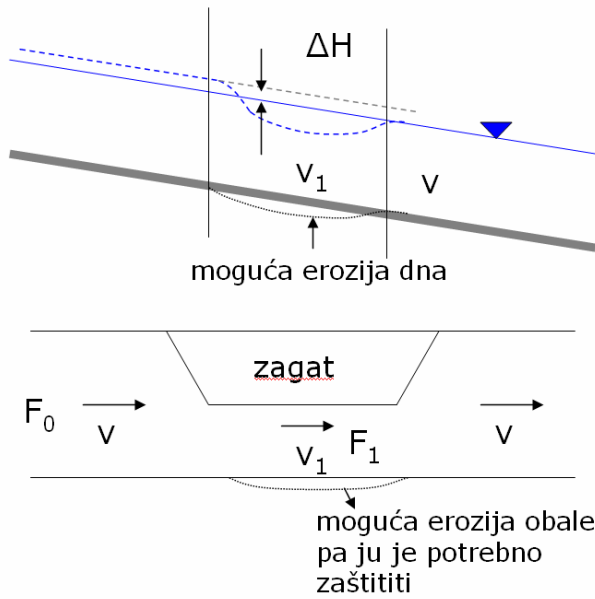
Primjenjuje se kod izgradnje brana u širokim dolinama velikih rijeka, rješenje s obilaznim tunelom je u ovom slučaju ekonomski i tehnički nepovoljno. Temelji se na gradnji barem u dvije faze.

I FAZA – pregrađivanje dijela korita i izgradnja dijela brane s evakuacijskim organom do visine objekta kojom se osigurava njegova stabilnost.

II FAZA – uklanjanje zagata iz I faze i pregrađivanje rijeke u cilju formiranja suhe građevinske jame za gradnju drugog dijela brane. U trenutku potpunog pregrađivanja (izvedba zagata) problem predstavlja velika brzina toka i jaka vučna sila pa se koriste veliki kameni ili betonski blokovi.



Jasno da se treba osigurati vododrživost zagata pa se stoga nasipi od blokova “začepljaju” nepropusnim materijalom. U građevinskoj jami potrebno je osigurati crpljenje vode koja procjeđuje. Voda se odvodi kroz evakuacijski organ (koji može biti: preljev, temeljni ispust, dovod za turbinu itd). Zagati se mogu izvoditi od zemljanog i kamenog materijala, korištenjem žmurja ili ćelija, betonskih blokova, kontraformnih betonskih zidova i sl. Visina zagata ovisi o razini vode u koritu (koja ovisi o protoku i geometriji protjecajnog profila).



$v < 1,8 - 2 \text{ m/s}$ (za plovidbu)

$$\Delta H \approx \frac{1}{\varphi^2} \frac{v_1^2 - v^2}{2g}$$

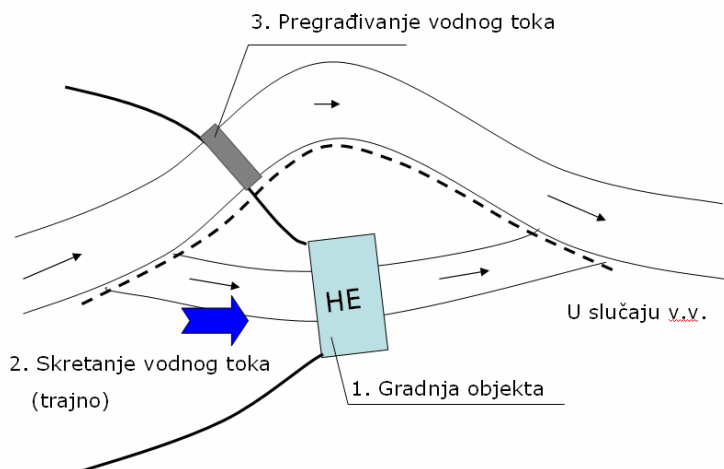
φ - koeficijent suženja

$\varphi =$	0,75-0,8	0,8-0,85	0,8-0,9

$$\frac{F_1}{F_0} = 30 - 60\%$$

Građenje van korita

Objekt se gradi izvan korita pa se nakon izgradnje voda skrene prema njemu.



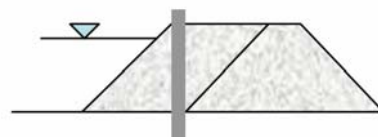
ZAGATI

Vrijednost zagata iznosi oko 10% vrijednosti građevine (brane).

Zagati imaju istu funkciju kao i brane osim što su privremeni objekti, s obzirom na privremenost mogu djelomično i propuštati.

Izvođe se od:

- nasutog materijala
- betona
- žmurja (drvenih i metalnih)
- kombinirano žmurje + nasip



Ako branu gradimo tako da uklopimo i zagate, onda moramo eliminirati vododrživost donjeg zagata te omogućiti drenažu. Kod zagata dozvoljeno je povremeno poplavljanje. Poplavljanje betonskih zagata ne predstavlja problem, dok kod poplavljanja nasutih zagata treba paziti da ne dođe do erozije, pa koristimo slijedeću formulu:

$$q_i = k \cdot d^{3/2} (\rho - 1)$$

gdje je:

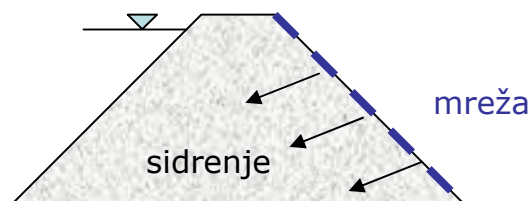
- q_i – količina koja se može prelići preko postojećeg zagata
 $q_i = \text{cca } 0.5-1.0 \text{ (m}^3/\text{s/m}^2\text{)}$
- k – koeficijent oblika (0.1-0.25)
- d – promjer zrna/kamena
- ρ – gustoća kamena

Za preljevni mlaz visine:

$\Delta H \leq 3 \text{ m}$ masa kamena iznosi cca 3 tone

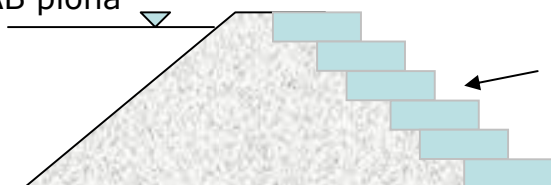
$\Delta H \leq 6 \text{ m}$ masa kamena iznosi cca 20 tona (betonski blokovi)

$\Delta H \leq 10 \text{ m}$ koristi se armirani kameni nabačaj



Može se koristiti i oblaganje gabionima.

AB ploha



GABIONI

Za $10 < \Delta H < 30 \text{ m}$

Pregrađivanje rijeke

Zatvaranjem toka povećava se brzina vode, kinetička energija i pritisak vode, pa raste i ugrožavanje stabilnosti zagata.

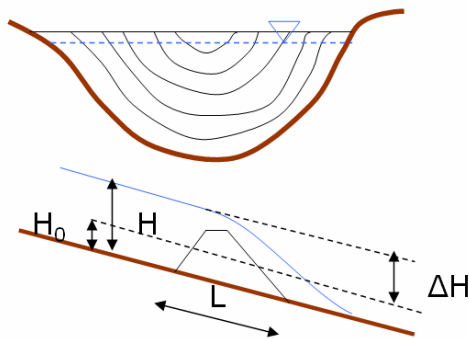
Načini nasipavanja:

- Nasipavanje u slojevima,
- Nasipavanje sa čela,
- Specijalni načini (npr. miniranjem stijena u kanjonu).

NASIPAVANJE U SLOJEVIMA

Koristilo se 60-tih godina prošlog stoljeća.

Bila je potrebna kranska staza ili most.



NASIPAVANJE SA ČELA

Korištenjem mehanizacije moguće je donošenje i razastiranje značajnih količina materijala u kratkom vremenskom roku. Zbog suženja protjecajnog profila raste brzina vode, pa treba paziti da ne dođe do erozije korita s druge strane i erozije dna. Može se vršiti i nasipavanje s obje strane istovremeno.

Masu kamena/bloka treba izračunati.

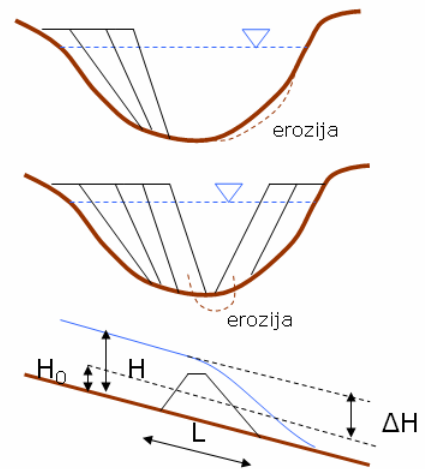
Nasipavanje se provodi u dvije faze:

- I faza – MIRNO tečenje

$\Delta H \sim 1/3 H_0$, $v=0.8-1.0$ m/s – kamena sitnež

- II (završna) faza – SILOVITO tečenje

$\Delta H < 1/3 H_0$ – krupni blokovi



ΔH (m)	Masa blokova	
	Uz gubitak	Bez gubitka
0,5	2-10kg	10kg
1	60kg	120kg
2	500kg	1-3t
3	3t	4t
4	-	8t

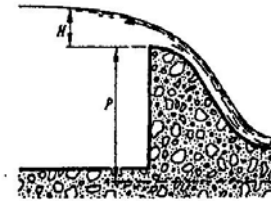
3.3-4 Preljevi

Podjela prema položaju:

- Na objektu,
- Na boku doline,
- Samostojeće građevine.

Podjela prema načinu upravljanja:

- Fiksni (nema zapornice),



- Sa pokretnim uređajem zapornicom

DIJELOVI:

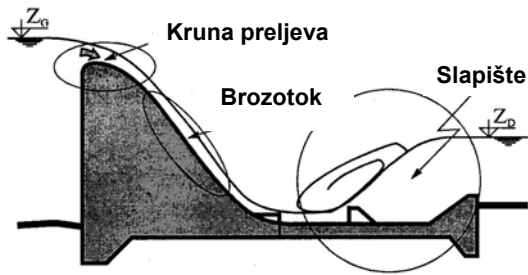
- Kruna preljeva,
- Korito – brzotok (za transport vode od krune preljeva do slapišta),
- Slapište – bučnica (za umirenje vode).

Na izbor proračunskog protoka (PP) utječe:

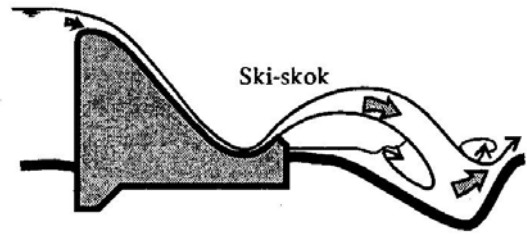
- Ugroženost nizvodnog područja,
- Značaj brane,
- Tip brane,
- Tip preljeva,
- Pouzdanost hidroloških podataka,
- Retencijske mogućnosti akumulacije.

Najčešće se uzima **1000** (i provjerava **10 000**)-**godišnja velika voda** za proračun, iako se ukoliko su ugroženi životi ljudi koji žive nizvodno može uzeti i **maksimalno moguća velika voda** (SAD).

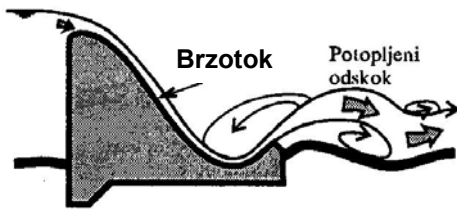
Preljevi na objektu



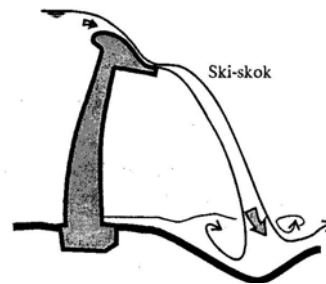
1. Preljev sa slapištem



2. Preljev s nepotopljenim odskokom (ski-jump)

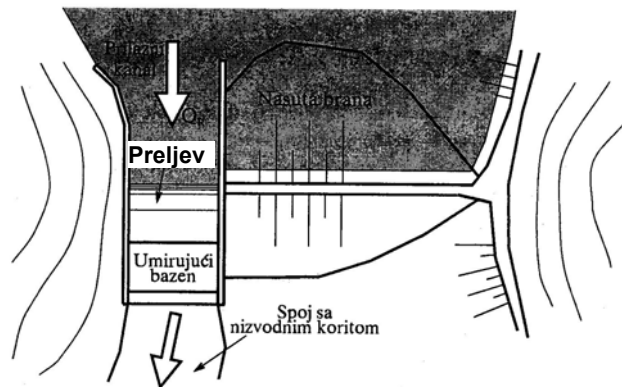


3. Preljev s potopljenim odskokom



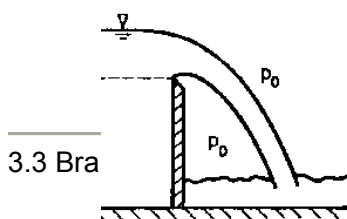
4. Preljev sa odskokom na lučnoj brani (ski-jump)

Betonske brane najčešće imaju preljev preko tijela brane, dok se kod nasutih može dio brane izvesti u betonu kao preljev.



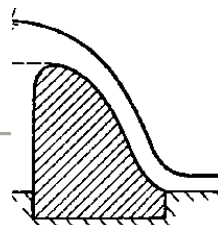
Vrste slobodnih preljeva:

- S oštrim bridom
- Sa širokim pragom
- Praktičnog profila (prati konturu mlaza koji nastaje kod preljevanja preko oštrobridnog preljeva)



3.3 Bra

Oštrobridni



Preljev praktičnog

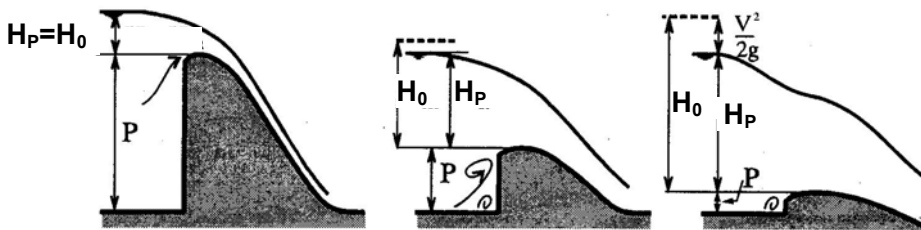
preljev

profila

Slobodni preljev:

$$Q_p = C_p \cdot L \cdot \sqrt{2g} H_0^{3/2}$$

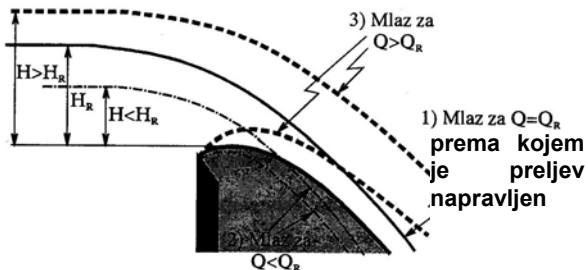
C_p - koef. preljevanja ovisan o tipu preljeva
 L – duljina preljeva



$$P \geq 1.33 H_p \rightarrow \frac{v^2}{2g} \text{ je malo} \rightarrow H_p = H_0$$

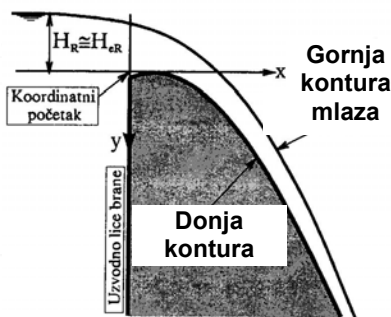
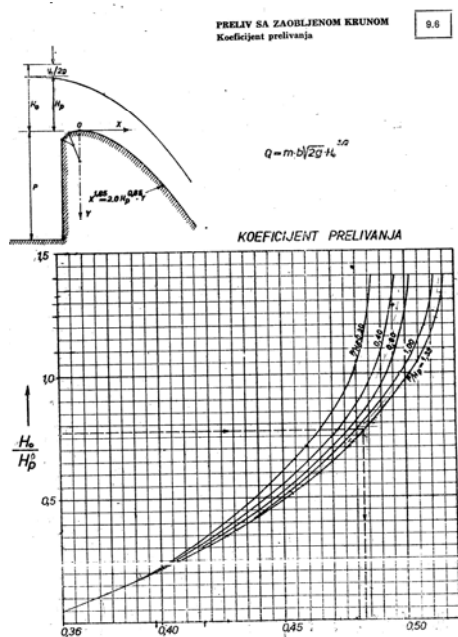
Vakumski preljev

Ako je protok veći od protoka na koji je dimenzionirana kontura preljeva, mlaz se odlepljuje od konture preljeva, javlja se podtlak (dozvoljeno do $-2mVS$ zbog kavitacije) što rezultira povećanjem brzine i protoka preko preljeva (u odnosu na oštrobridni preljev).



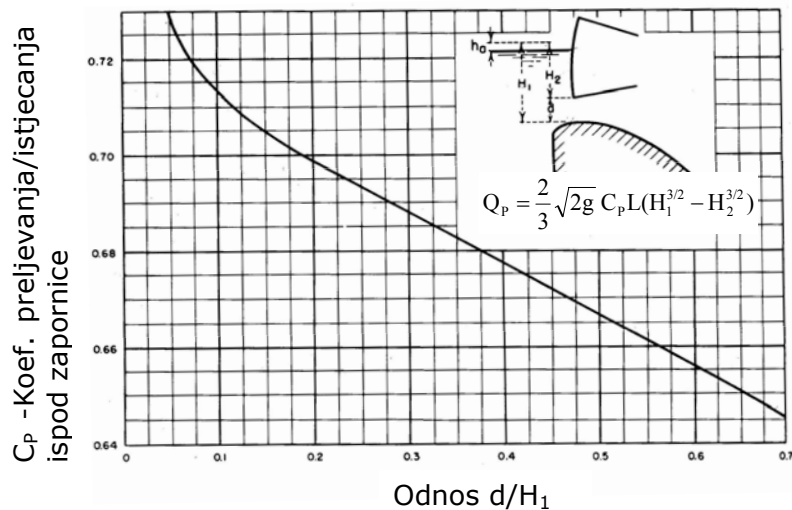
Oblik konture preljeva praktičnog profila – Creagerov preljev ($C_p=0.49$)

(nema vakuma jer prelivni profil ulazi u tijelo brane):



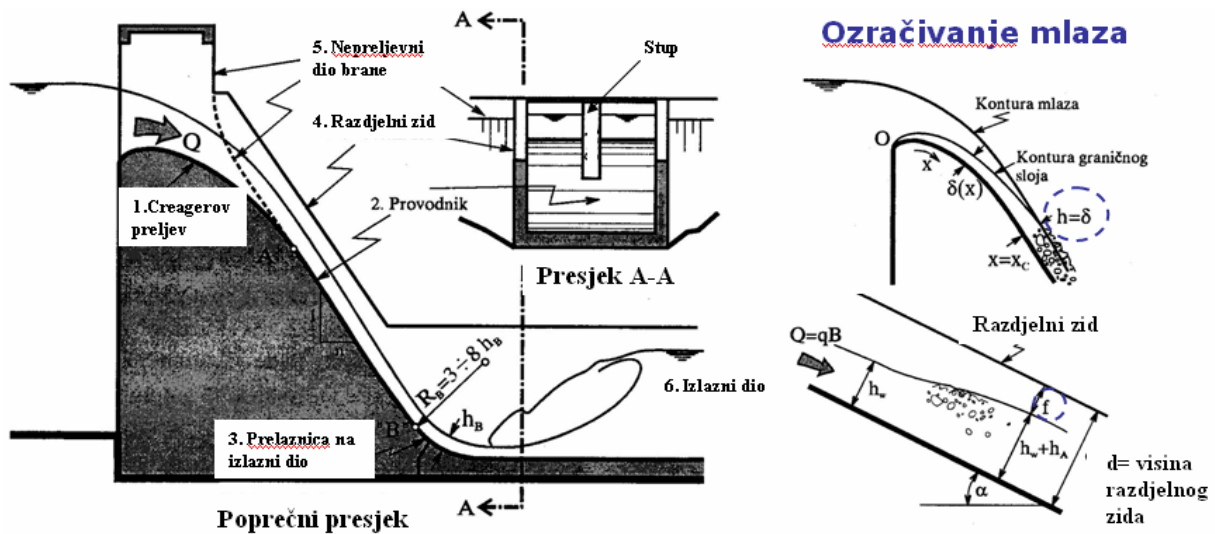
x/H _R	Koordinate mlaza	
	Donja kontura mlaza	Gornja kontura mlaza
0.0	0.126	-0.831
0.1	0.036	-0.803
0.2	0.007	-0.772
0.3	0.000	-0.740
0.4	0.007	-0.702
0.6	0.063	-0.620
0.8	0.153	-0.511
1.0	0.267	-0.380
1.2	0.410	-0.219
1.4	0.590	-0.030
1.7	0.920	0.305
2.0	1.310	0.693
2.5	2.100	1.500
3.0	3.110	2.500

Preljevi sa zapornicama - istjecanje ispod zapornice



Prelivna polja

Preljevna polja omeđuju se zidom koji služi za usmjeravanje toka vode.



Dubina vode na preljevu može se izračunati primjenom Bernoullijeve jednadžbe, također treba procijeniti da li će doći do ozračivanja/bubrenja mlaza (što nastaje zbog snažne turbulencije na površini vode tj. kada turbulentni granični sloj δ izbije na površinu) te i to treba uzeti u obzir.

Visina zida određena je nadvišenjem iznad maksimalne razine vode na brzotoku $f = 0.5 - 0.7$ m.

Za osiguravanje prometa preko krune brane preljev se često dijeli stupovima preko kojih se gradi most.

Na brzotocima može doći do pojave kavitacijske erozije, kao i do abrazije. Abrazija je erozija koja nastaje habanjem konture objekta (ili opreme) nanosom.

3.3-4.1 Slapište

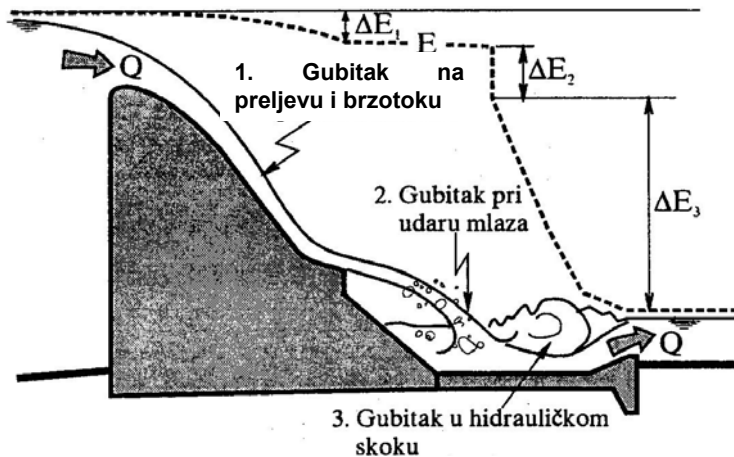
Slapište služi za disipaciju (rasipanje ili uništenje) ili odbacivanje energije. Sva energija koja se akumulirala duž usporenog toka treba se potrošiti na malom prostoru nizvodno od brane.

Disipacija energije kod evakuacijskih organa:

- Mali dio energije utroši se na trenje duž brzotoka (ΔE_1)
- Ako se preljevni mlaz odbaci u zrak, gdje se dijelomično rasprši i odzrač, dio energije se utroši na stiskanje mjehurića uvučenog zraka pri udaru mlaza o vodenu površinu nizvodnog toka (ΔE_2)

- Najveći dio akumulirane energije troši se u vrtlozima (turbulenciji) koji nastaju prilikom prelaska mlaza iz silovitog u mirno tečenje (ΔE_3)

U slapištu se ne disipira sva energija već manji dio energije u obliku vrtloga odlazi nizvodno pa treba zaštititi još jedan dio korita nizvodno (kamena obloga, gabioni,...).

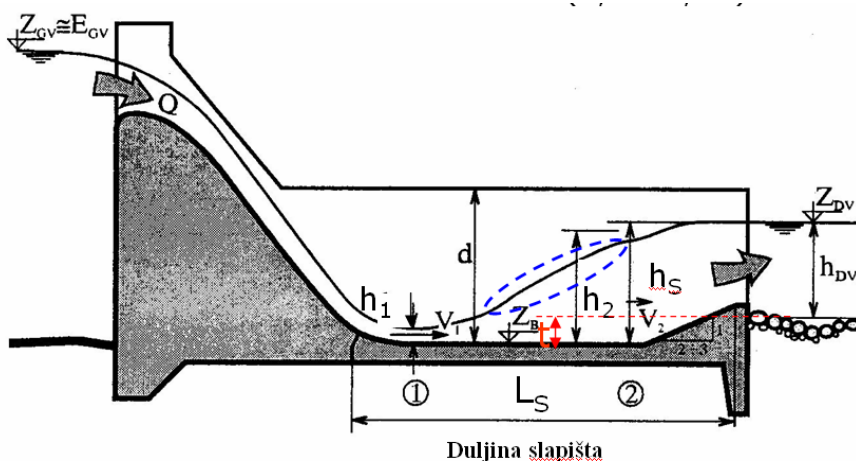


SLAPIŠTE – umirujući bazen

Koristi se za padove do 50 m. U njemu se javlja vrtložni valjak hidrauličkog skoka.

Kod slapišta (umirujućeg bazena) treba odrediti:

- Širinu slapišta B,
- Duljinu slapišta L_S ,
- Kotu dna,
- Visinu bočnih zidova d,
- Dimenzije i raspored dodatnih elemenata za umirenje (disipaciju) energije.



Proračun:

1. Izračunati h_1 .

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left(\sqrt{8Fr_1^2 + 1} - 1 \right) ; \quad Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot h_1}}$$

2. Izračunati h_2 :

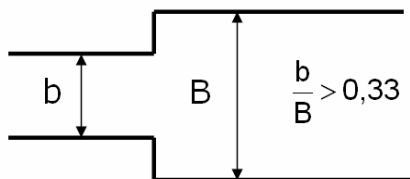
3. Usporedba h_2 s dubinom donje vode h_{DV} .

Ukoliko je $h_{DV}/h_2 \geq 1.05$ ne treba bučnica, u suprotnom se izvodi bučnica dubine t .

$h_s/h_2 \geq \sigma$ – skok je POTOPLJEN

σ - koef.potopljenosti (1.05-1.10) – postoji nizvodni prag
(1.20-1.25) – ako nema nizvodnog

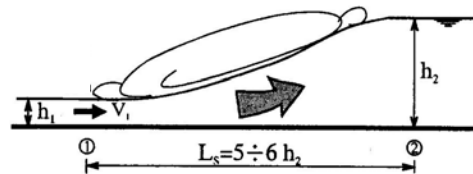
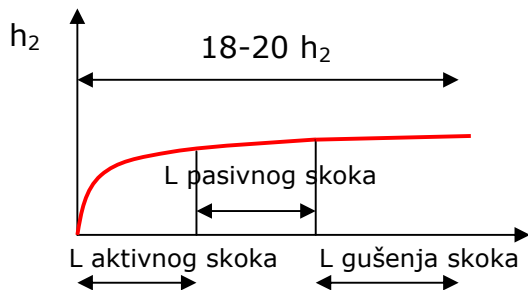
Slapište se može i proširiti.



$$h_2 = \frac{h_1}{2} \sqrt{\frac{b}{B} (\sqrt{8Fr_1^2 + 1} - 1)} ; Fr_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot h_1}}$$

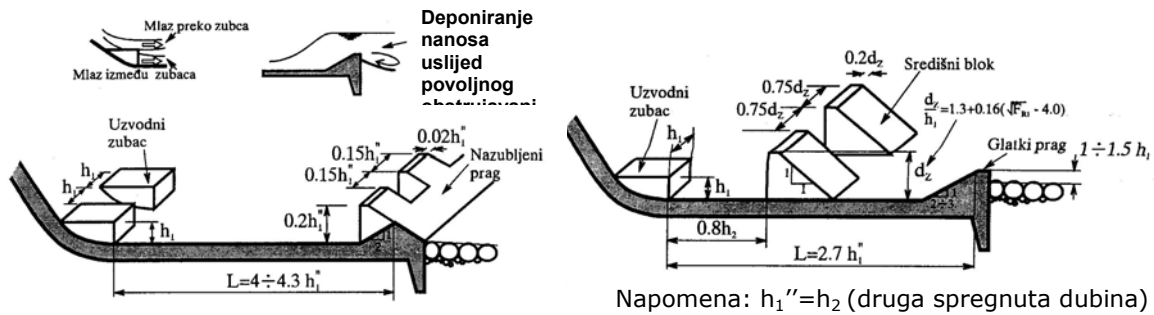
Duljina slapišta

Duljina slapišta bi trebala biti jednaka duljini hidrauličkog skoka, međutim ako se u slapištu izvedu razbijači energije (zubci, pragovi, blokovi,...) duljina slapišta može biti nešto kraća.



Potrebna duljina slapišta može se skratiti na $(2.5-4)h_2$. Skraćenje slapišta moguće je ostvariti korištenjem:

- Uzvodnih zubaca – mlaz se razbija na veći broj manjih uskih mlazeva, stvara se sila otpora koja doprinosi stabilizaciji mlaza i “smanjenju” druge spregnute dubine,
- Nizvodnog praga – koji može biti gladak ili nazubljen, podiže mlaz na izlazu iz slapišta da bi se postiglo povratno strujanje koje onda ne uzrokuje potkopavanje temelja),



- Središnjih zubaca-blokova – zadržavaju skok u slapištu i omogućuju znatno kraći bazen nego kod ostalih tipova, također se smanjuje i druga spregnuta dubina u odnosu na slapište bez disipatora energije.

Razbijači energije povezani su s Froudivim brojem:

- $Fr < 2.5$ slapišta nisu nužna
- $2.5 < Fr < 4.5$ ovaj dio se izbjegava
- $4.5 < Fr < 9$ potrebno je urediti slapište

Slapište treba obložiti betonom (kamenom u betonu), ne smiju se ostavljati otvori između ploča slapišta, spojeve treba izvoditi kao utor i pero, pažljivo armirati i betonirati, obavezno izvoditi dilatacijske spojnice i sl., sve u cilju izbjegavanja pojave pukotina pri izvođenju i korištenju objekta.

Visina bočnih zidova:

$$h_z = h_2 + f; f = 0.5 - 0.7 \text{ m}$$

Kod definiranja oblika i dimenzija slapišta treba uzeti u obzir slijedeće uvjete:

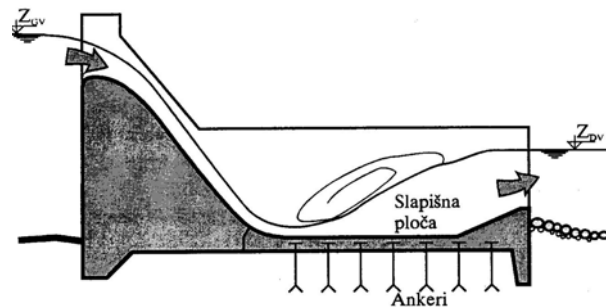
- Širinu riječne doline,
- Topografiju terena i dispoziciju objekta,
- Oblik protočne krivulje donje vode,
- Geološki sastav temeljnog tla slapišta (zbog erozije nizvodnog korita i nosivosti temeljnog tla).

U slapištu se mogu pojaviti dinamička opterećenja:

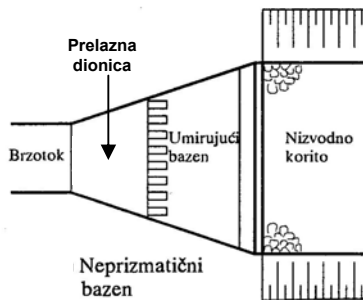
- Dinamički uzgon,
- Kavitacija,
- Vibracije.

Vibracije i kavitacija se pojavljuju u slapištu kao rezultat fluktuacije brzina i pritiska u mlazu i vrtložnom valjku. Za suprotavljanje dinamičkom uzgonu, ali i preventiva protiv vibracija:

- Ploče slapišta se mogu sidriti
- Provodi se drenaža ispod ploče slapišta



Kavitaciji su najviše izloženi bridovi blokova (najviše središnjih blokova), ali i ostali dio slapišta. Ukoliko su brzine veće od 25 m/s treba izbjegavati neravnine u slapištu. U slapištima postoji i mogućnost pojave abrazije ako se u njemu nalazi vučeni nanos koji je tamo dospio temeljnim ispustom.



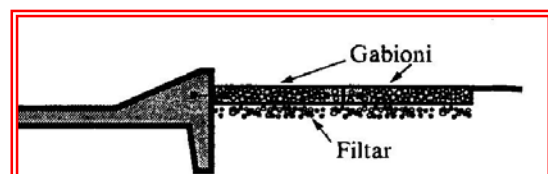
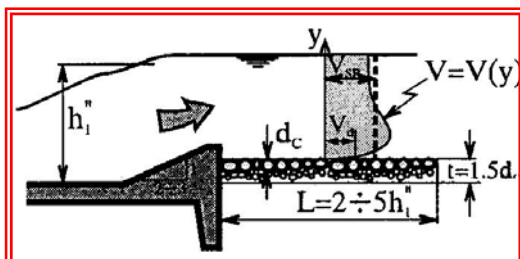
Zaštita korita nizvodno od slapišta

Ekonomski je neisplativo umiriti svu energiju u slapištu pa dio neuništene energije djeluje nizvodno od slapišta, stoga se dno mora zaštititi na duljini od $(2-5)h_2$ (na slici h_1'').

Zaštita se izvodi korištenjem:

- Kamenih obloga, rip-rap

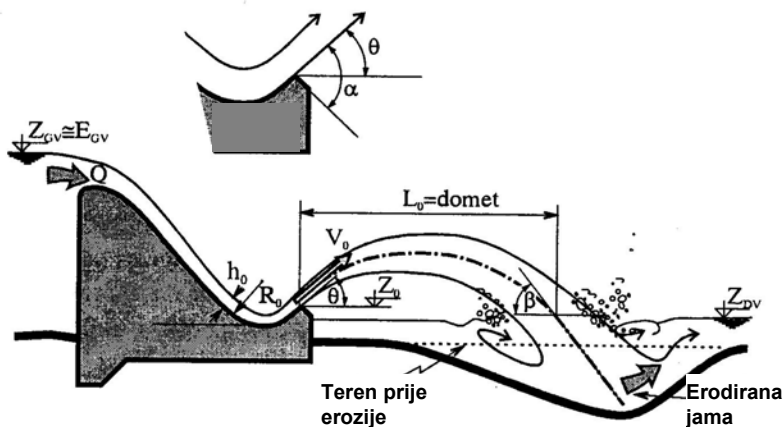
Gabiona i sl.



SKI JUMP-odbačeni skok

Jednostavan i jeftin, često se koristi kao izlazni dio evakuacijskih organa, pogotovo kod visokih brana, kod kojih velike brzine stvaraju velike probleme u slapištu (kavitacija, vibracije,...). Može se koristiti ukoliko je brana temeljena na stijeni i ako se dokaže da erozijska jama koju mlaz iskopa u koritu rijeke neće potkopavati temelje okolnih objekata (brane, brzotoka, tunela) i ugroziti njihovu stabilnost. Potrebno je odrediti:

- Visinski položaj tjemena odskoka Z_0 ,
- Radijus odskoka $R_0=(3-8)h_0$,
- Kut odskoka θ ,
- Duljinu odskoka L_0 ,
- Kut udara u donju vodu β .



Putanja mlaza se određuje proračunom kosog hica za kruto tijelo.

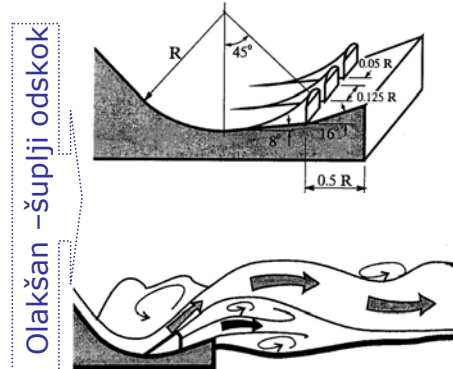
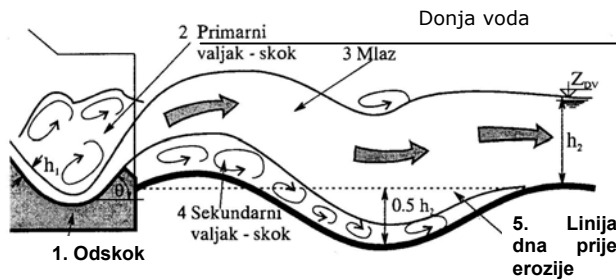
Ski-jumpom se mlaz nastoji odbaciti što dalje od objekta. Dio energije se disipira u zraku gdje se javlja ozračivanje mlaza, drugi dio pri komprimiranju mjehurića zraka u mlazu pri udaru o dno korita i treći dio uslijed vrtložjenja u koritu. Neminovno je formiranje erozijske jame u koritu koja ima ulogu umirujućeg slapišta.

Potopljeni skok

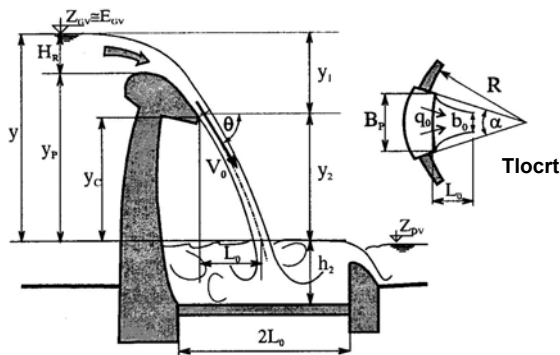
Mlaz vode se ne odbacuje u atmosferu, već se kontrolirano potapa donjom vodom. Može se koristiti ako je brana temeljena na stijeni i ako je donja voda dovoljno visoka (potrebna je veća dubina vode nego kod klasičnog slapišta). Manjih je dimenzija i jednostavnije konstrukcije nego klasično slapište. U odnosu na klasični ski-jump manja je erozija korita nizvodno.

Treba odrediti:

- Radijus odskoka $R \geq h_1$
- Kut odskoka $\theta = 45^\circ$



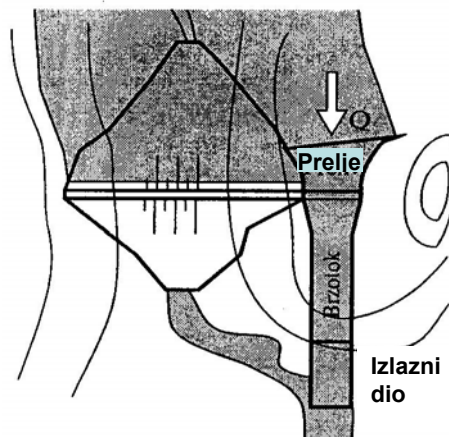
PRELJEV LUČNIH BRANA nema brzotoka.



PRELJEVI KOD NASUTIH BRANA – Preljevi s brzotokom (kanalom)

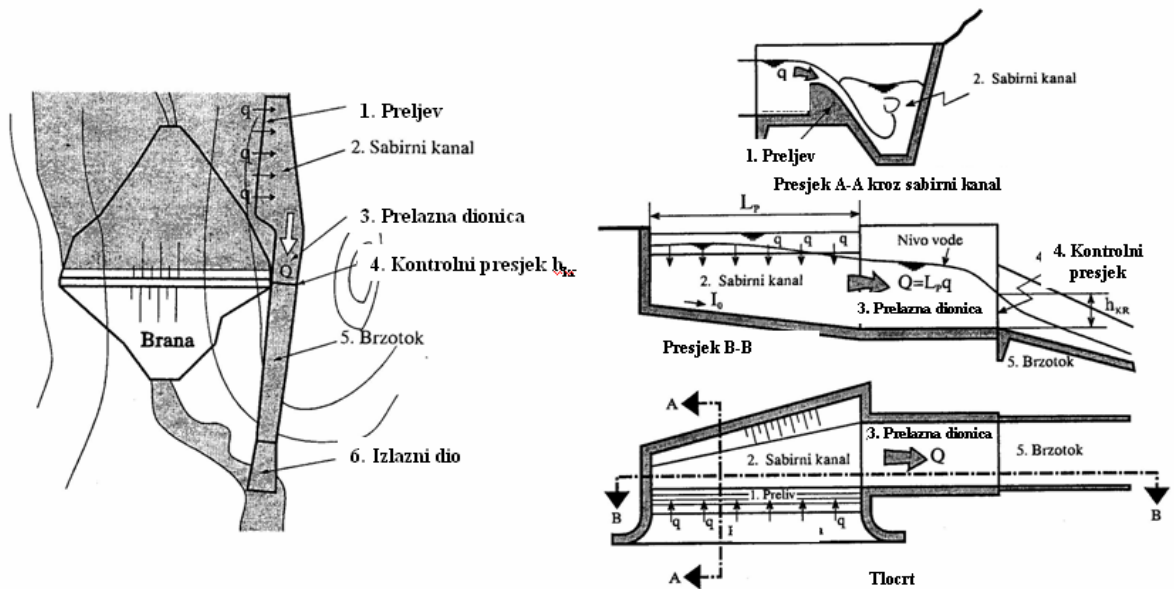
A) Čeoni preliv:

Brzotok - ozračivanje mlaza, zakošenje vodnog lica ako je brzotok izveden u krivini. Sastoji se od ploče dna i zidova brzotoka. Nastoji se što manje mijenjati pad nivelete i izvesti izravnane zemljanih masa (iskopa/nasipa).

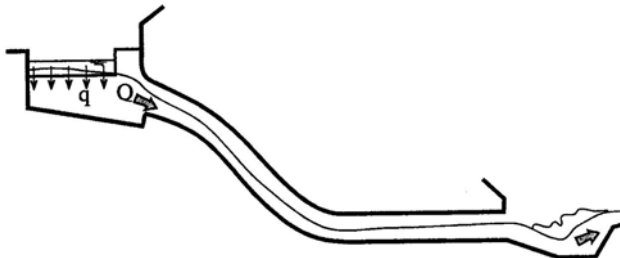


B) Bočni preljev:

Bočni preljev sa sabirnim kanalom

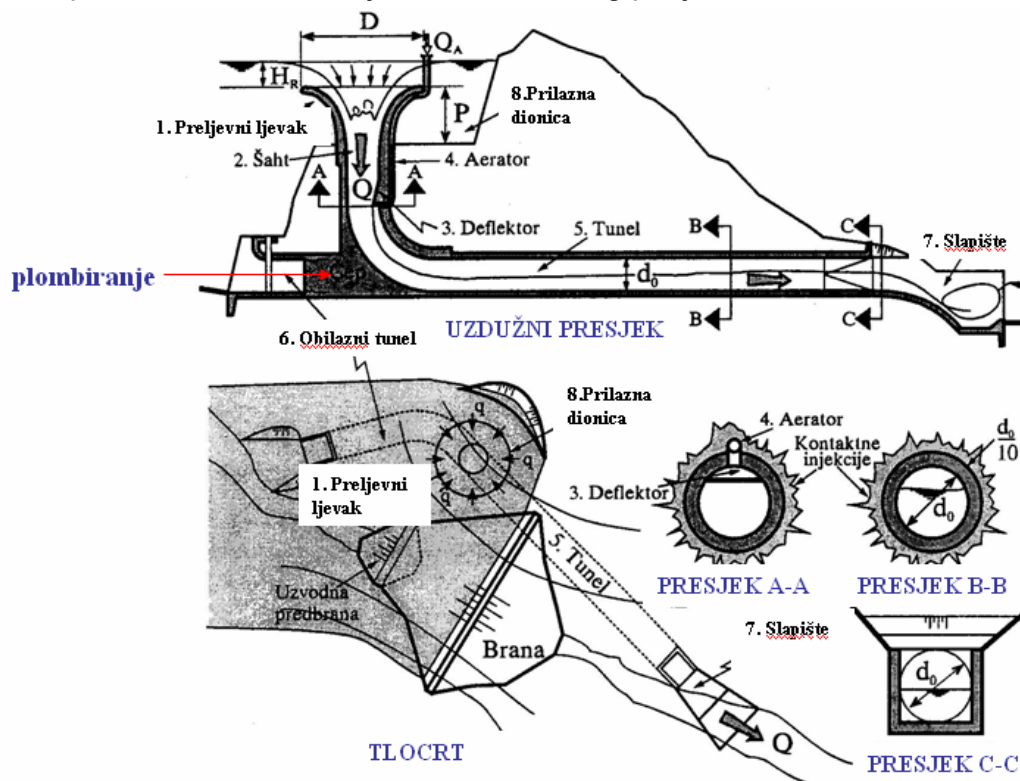


Bočni preljev sa tunelskim provodnikom



C) Bunarski (šahtni) preljev:

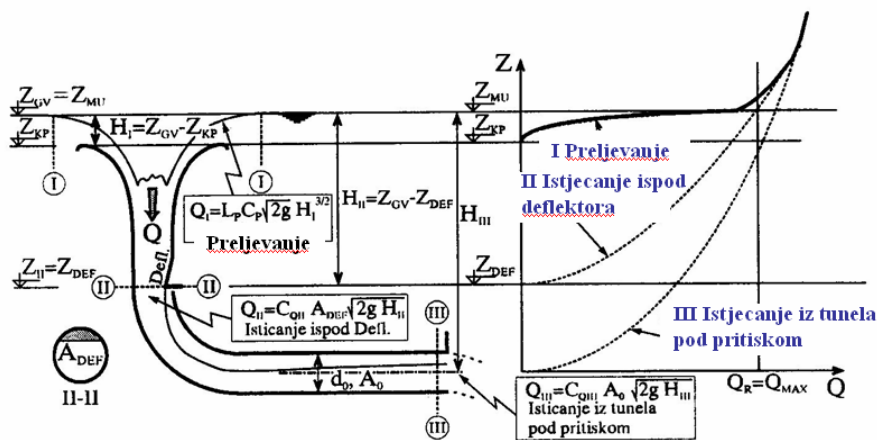
Koristi se ako je izgrađen obilazni tunel za evakuaciju vode za vrijeme gradnje pa ga se može preurediti za odvođenje vode bunarskog preljeva.



Proračun bunarskog preljeva

Potrebno je provesti proračun za tri presjeka:

1. Preljev,
2. Istjecanje ispod deflektora,
3. Istjecanje iz tunela pod pritiskom.



3.3-5 Temeljni ispusti

Temeljni ispust mora biti postavljen ispod minimalne radne razine.

Služi za pražnjenje akumulacije:

- radi pregleda i popravaka,
- kao evakuacijski organ za vrijeme velikih voda,
- za pražnjenje nanosa koji se istaložio.

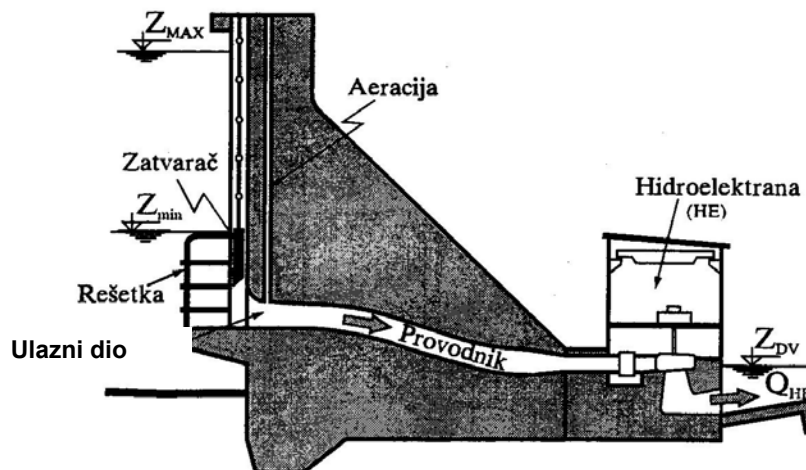
Postavlja se:

- **Kroz tijelo brane** (kod betonskih),
- **Oko brane - kroz teren** (kod nasutih i ponekad kod betonskih),
- **Ispod brane** (koristi se rijetko).

Temeljni ispust se sastoji od:

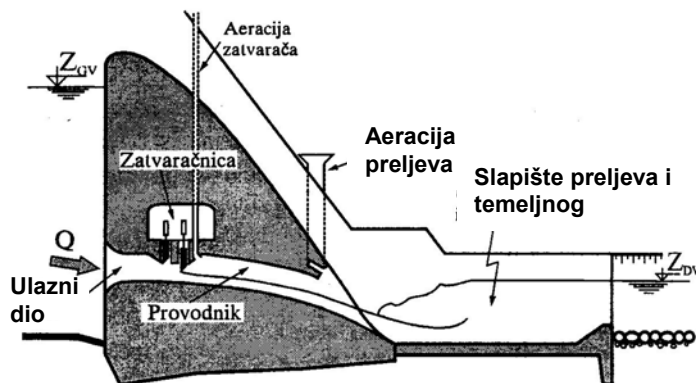
- Ulazne građevine,
- Provodnika,
- Kontrolnog dijela – za regulaciju – zatvaračnica sa zatvaračem,
- Izlaznog dijela,
- Slapišta.

Uz svaku branu izvodi se i zahvat vode koji se može rješavati u okviru temeljnog ispusta ali i ne mora.



Temeljni ispušt kroz tijelo brane

Radi se kod betonskih gravitacijskih, kontrafornih, olakšanih i lučnih brana. Ulaz je na uzvodnom licu brane. Havarijski i remontni zatvarač radi se na uzvodnom licu. Regulacijski zatvarač izvodi se na nizvodnom kraju ili u zatvaračnici u tijelu brane. Može se koristiti slapište preljeva, pod uvjetom da se ne koriste istovremeno.



Temeljni ispušt oko/ispod brane - kroz teren

Radi se kod nasutih i ponekad kod betonskih. Radi se kao tunel sa zatvaračnicom na ulazu, blizu sredine ili na kraju.

Proračun

$$Q = \mu \cdot F \cdot \sqrt{2g\Delta H}$$

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \sum \xi_{\text{LOK}} + \sum \xi_{\text{LIN}}}}$$

Q – protok

μ – koeficijent gubitaka

F – površina poprečnog presjeka tunela

ξ_{LOK} – lokalni gubici (uslijed trenja)

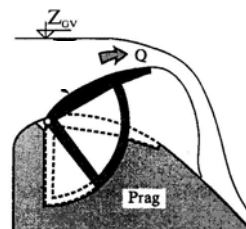
ξ_{LIN} – linijski gubici (na ulazu, rešetci, u krivinama,...)

Ako se za vrijeme gradnje evakuacija vode provodi obilaznim tunelom tada se on nakon završetka brane može adaptirati u temeljni ispust, odvod bunarskog preljeva, dovod na HE,... Ako se obilazni tunel koristi kao temeljni ispust često je prevelikih dimenzija u odnosu na potrebne dimenzije temeljnog ispusta pa se adaptacija provodi u obliku suženja na mjestima zavorača. Dimenzioniranje slapišta se provodi kao kod preljeva (vidi predavanje 3.3-4 *Preljevi*). Kod vrlo visokih brana može se izvoditi i srednji ispust.

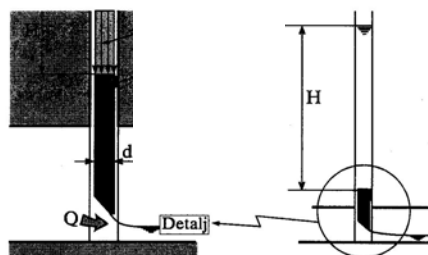
3.3-6 Zapornice i zatvarači

Zapornice i zatvarači služe za regulaciju protoka:

- Na preljevu – **zapornice/ustave**



- Kroz temeljni ispust – **zatvarači**



Projektiranje, izrada, montaža i održavanje zapornica i zatvarača je posao inženjera strojarstva.

3.3-6.1 Zapornice na preljevima

Podjela:

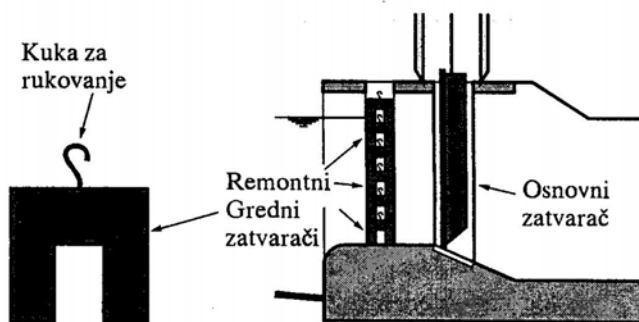
- Zapornice koje se oslanjaju na BOKOVE:
 - GREDNE,
 - PLOČASTE (tablaste),
 - SEGMENTNE,
 - VALJKASTE,
 - KUKASTE.

- Zapornice koje se oslanjaju na KRUNU:

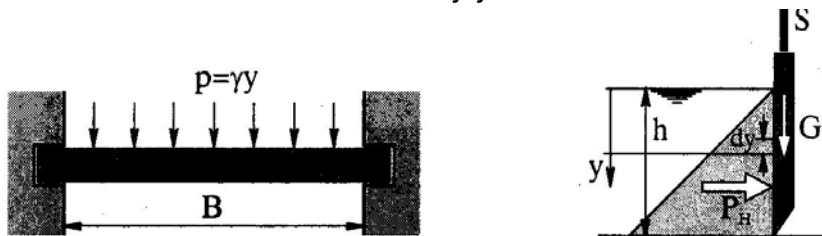
- SEKTORSKE,
- ZAKLOPKE,
- KRUŽNE,
- KROVASTE.

Zapornice koje se oslanjaju na BOKOVE

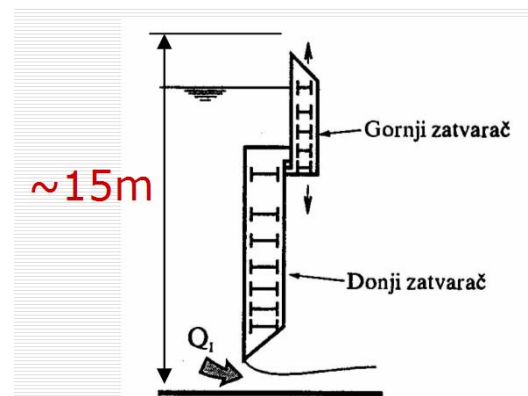
GREDNE ZAPORNICE– izvode se samo kao pomoćni (remontni) zatvarači.

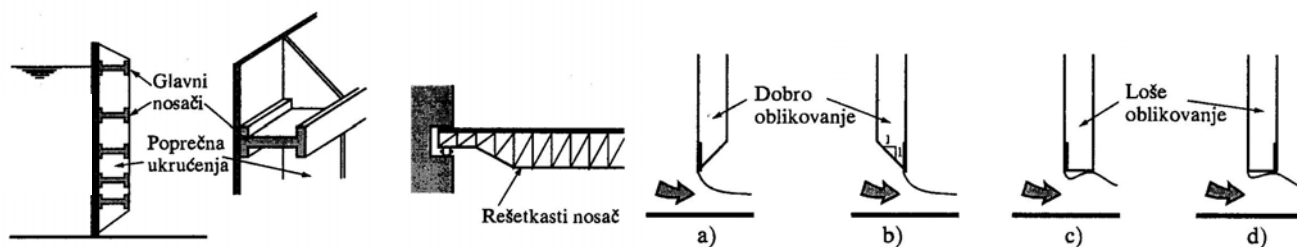


PLOČASTE ZAPORNICE - Postavljaju se u utore tako da klize ili da se kotrljaju.



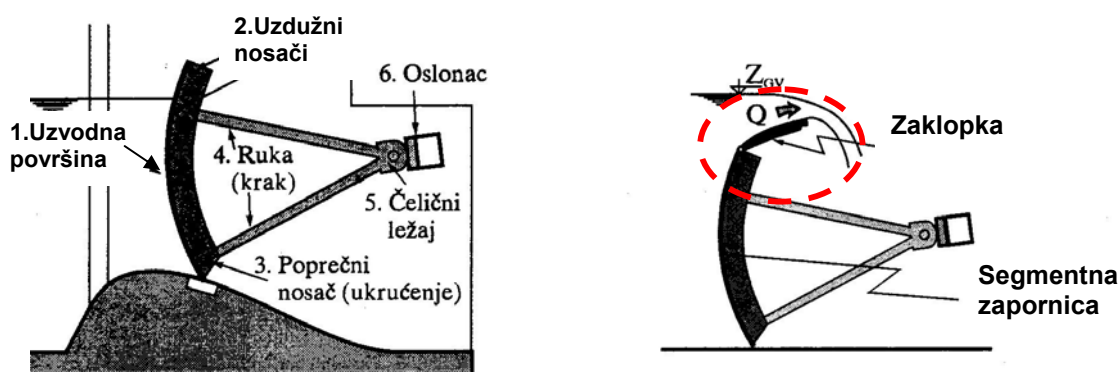
Vododrživost u utorima osigurava se gumenim brtvama. Koriste se za otvore površine do 50 m². Prosječna visina zapornice je 4–5 m. Mana pločastih zapornica je što je potrebna još 2 puta tolika visina za smještaj podignute zapornice te za smještaj uređaja za podizanje. Rjeđe se koriste na preljevima, češće na temeljnim ispuštima. Na donjem bridu zapornice treba osigurati stabilan položaj mlaza.





SEGMENTNE ZAPORNICE – najčešće se koriste kao zapornice na preljevima većih objekata. Zatvaraju površine do 560 m^2 , raspona su $L=15-40 \text{ m}$ i visine $H=12-18 \text{ m}$. Maksimalni raspon izvedene zapornice je $L= 56 \text{ m}$ i $H= 22.5 \text{ m}$.

Na bokovima se nalaze limovi koji omogućuju klizanje zapornice. Brtvljenje se izvodi na bokovima i na dnu korištenjem gumenih traka. Za finu regulaciju na segmentnoj zapornici može se izvesti zaklopka koja omogućuje prepuštanje plutajućih elemenata, leda, granja i sl. Opterećenje hidrostatičkog pritiska prenosi se preko uzvodne površine te krakova na oslonce.



Prednosti segmentnih zapornica:

- Zbog kružnog oblika vanjske površine zapornice (prema vodi), krutost zapornice je velika pa se teško vitoperi, manje je podložna vibracijama i zahtijeva manje materijala od pločastih zapornica.
- Nema utora u stupovima po liniji kontakta sa zapornicom čime se poboljšava strujna slika i izbjegava mogućnost zatrpavanja utora nanosom ili plovećim objektima.
- Tijelo segmentne zapornice predstavlja puno povoljniju strujnu konturu od donjeg brida pločaste zapornice, pa je istjecanje pri manjim otvorima stabilnije (nego kod pločastih).
- Za podizanje zapornice potrebne su relativno male sile (u odnosu na pločaste).
- Nije potrebna visoka konstrukcija za podizanje zapornice.

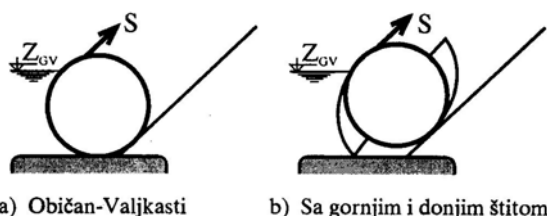
Mane:

- Velika koncentracija naprezanja u okolini oslonca obično zahtijeva prednaprezanje i složenu skupu konstrukciju stupova.
- Konstrukcija same zapornice i ležišta je složena.
- Kraci zapornice zahtijevaju znatno duže stupove nego kod pločastih zapornica.

VALJKASTE ZAPORNICE

Sastoje se od šupljeg cilindra koji se pomoću zupčanika kotrlja (podize i spušta) po kosoj ravni.

Visine su do 10 m.
Dužine su do 50 m.



a) Običan-Valjkasti

b) Sa gornjim i donjim štitom

Na vrhu može biti još i zaklopka.

Prednosti:

- Velika krutost i mogućnost zatvaranja velikih širina otvora.
- Dobra evakuacija leda, plivajućih objekata i nanosa.

Glavna mana je cijena (zbog složenosti).

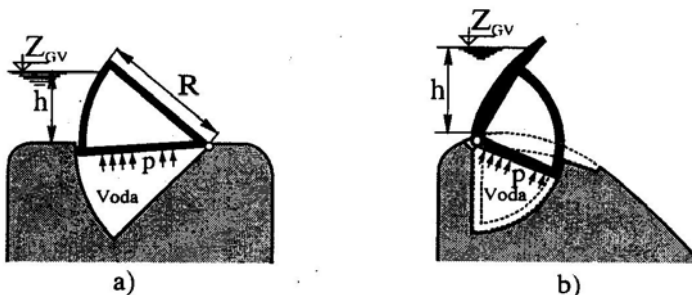
Zapornice koje se oslanjaju na KRUNU

SEKTORSKE ZAPORNICE

Oslanjaju se cijelom dužinom na krunu (prag) objekta, stoga su vrlo krute i imaju mogućnost zatvaranja velikih raspona (preko 50 m). Upuštaju se u utore/otvore na samoj brani.

Položaj oslonca:

- Nizvodno ili
- Uzvodno.

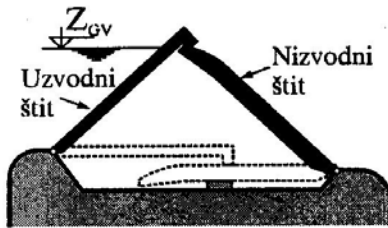


a)

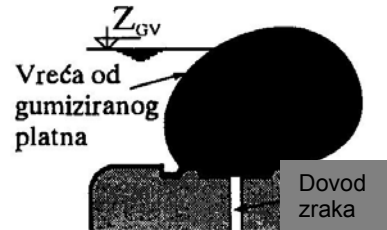
b)

Rad zapornice se zasniva na djelovanju hidrostatičkog pritiska (vidi skice).

KROVNE ZAPORNICE



VREĆASTE ZAPORNICE



3.3-6.2 Zatvarači na temeljnim ispustima, dovodima,...

Kontroliraju (otvaraju/zatvaraju) dovod pod pritiskom. Koriste se još i na dovodnim tunelima, cjevovodima HE, ... koji mogu biti pod pritiskom i sa slobodnim vodnim licem iza zatvarača.

Vrste – 3 grupe:

- PLOČASTI i SEGMENTNI,
- LEPTIRASTI i KUGLASTI (princip otvoreno/zatvoreno),
- IGLASTI i TELESKOPSKI (regulacija - % protoka).

Namjena:

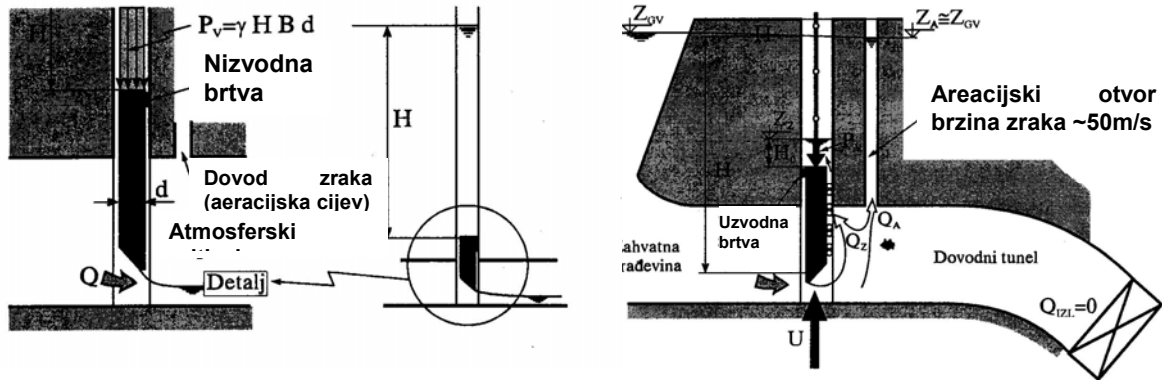
- Za **regulaciju** protoka - koriste se zatvarači koji omogućavaju stabilan rad pri svim proticajima - *segmentni i iglasti*
 - Za **remont**
 - **Brzi havarijski** zatvarač
- } neregulacijski -imaju samo dva položaja:
podignut ili potpuno spušten,
otvoren/zatvoren – *kuglasti, leptirasti, pločasti zatvarači*

O namjeni ovisi tip zatvarača, položaj duž dovoda i način osiguranja vodnopropusnosti/brtvljenje.

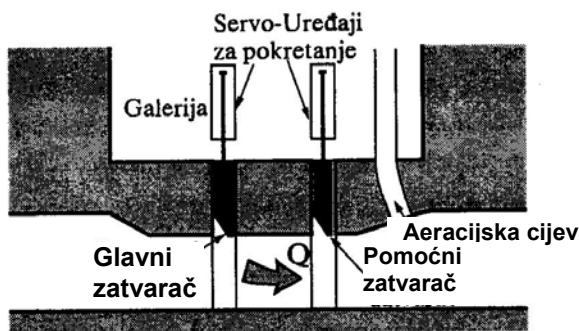
Zajedničke osobine i problemi koji se javljaju:

- Veliki hidrostatički pritisak uvjetuje veliku debljinu (i masu) zatvarača, kao i velike sile za podizanje i spuštanje zatvarača.
- Teško se postiže vododrživost zbog visokog pritiska i potrebe brtvljenja gornjeg brida zatvarača.
- Velike brzine ispod zatvarača, koje su rezultat visokog pritiska povećavaju opasnost od kavitacijske erozije.
- Vibracije mogu nastati zbog periodičnog odljepljivanja mlaza nekontroliranog procurivanja ili nizvodne prepreke (utori, nizvodni zatvarač, ...).
- Teže su pristupačni za ugradnju, rukovanje i održavanje.

- Potrebno je osigurati vezu s atmosferskim pritiskom nizvodno od zatvarača (aeracijska cijev) da ne bi došlo do podtlaka.

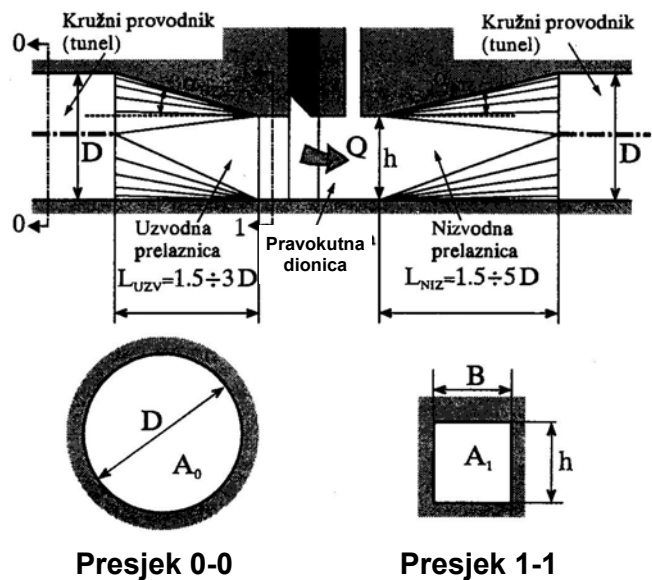


Nizvodno brtvljenje



Dubinska zatvaračnica

Uzvodno brtvljenje



Prelaznice kod dovoda pod pritiskom

Pristup zatvaračima

Pristup je otežan (osim kod zatvarača na nizvodnom kraju dovoda) jer se nalaze u tijelu brane ili u šahtu duboko ispod površine terena.

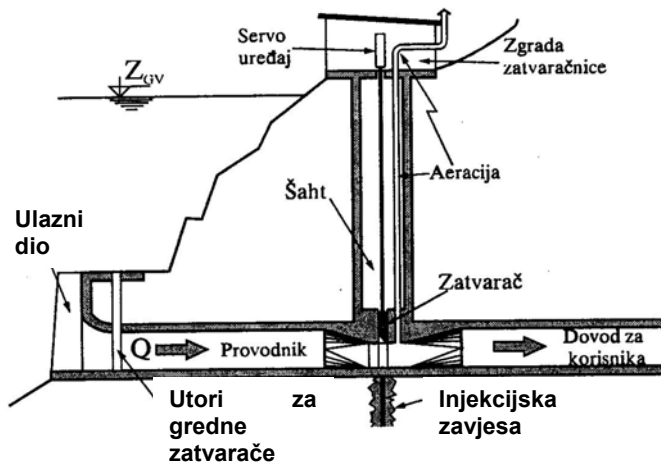
Prilaz:

- Betonske brane – šahtovi i galerije,
- Nasute – šahtovi ili kule sa pristupnim mostovima.

Mehanizam za pokretanje zatvarača može biti:

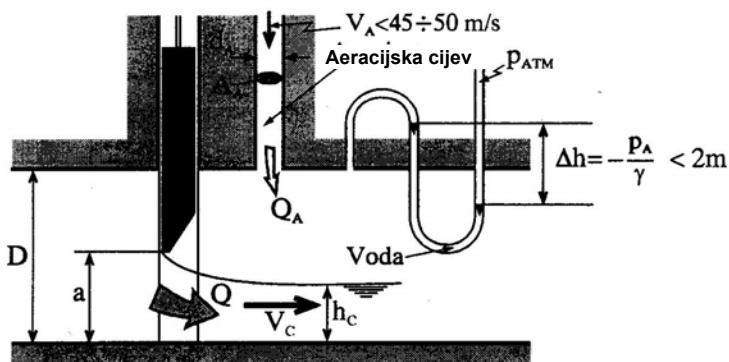
- Neposredno iznad zatvarača – dubinske zatvaračnice,

Iznad razine u akumulaciji – površinske zatvaračnice.



Ozračno okno (aeracijska cijev)

Dovod zraka treba se osigurati iza svakog glavnog i pomoćnog zatvarača (osim zatvarača na kraju cjevovoda). Brzina zraka $\sim 45-50$ m/s.



$$\frac{Q_A}{Q} = 0,04(Fr - 1)^{0,85}$$

$$Fr = \frac{v_c}{\sqrt{gh_c}}$$

Protok zraka raste s pojačanjem turbulencije mlaza, koji uvlači mjehure zraka u vodeni tok, a turbulencija raste sa silovitošću toka koja se kod tečenja sa slobodnim vodenim licem kvantificira Froudeovim brojem.

Promjer aeracijske cijevi se određuje iz uvjeta da podtlak (Δh) ne smije biti više od 2 mVS što je obično zadovoljeno za brzine zraka $v_A \leq 45-50$ m/s.

PLOČASTI I SEGMENTNI ZATVARAČI

Koriste se na dovodima velikog poprečnog presjeka sa pritiscima do 100-njak mVS.

PLOČASTI (u odnosu na segmentni)

Koriste se kao havarijski, remontni i regulacijski.

Prednosti:- Manji gabariti otvora u koji se smješta zatvarač i pogonski mehanizam,

- Jednostavnija i jeftinija konstrukcija,
- Manja naprezanja u osloncu.

SEGMENTNI (u odnosu na pločasti)

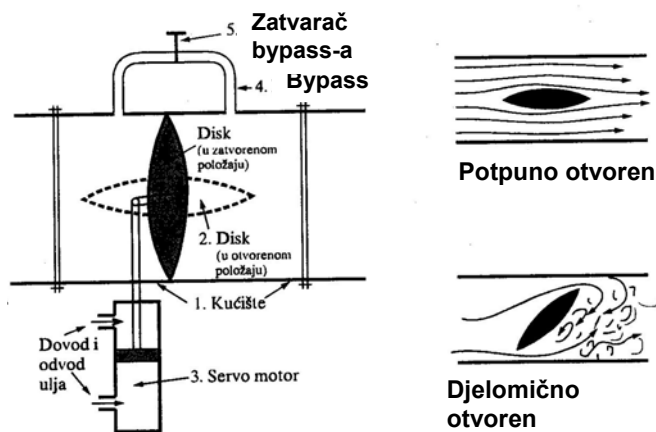
Koriste se kao regulacijski. Postavljaju se najčešće na nizvodnom kraju dovoda gdje prostor za smještanje zatvarača i pogonskog mehanizma nije ograničavajući faktor.

Prednosti: - Manja pogonska snaga za podizanje zatvarača,

- Bolji uvjeti istjecanja zbog oblika konture zatvarača,
- Lakše i pouzdanije brtvljenje,
- Manja mogućnost kavitacije i vibracije, jer nema prepreka / utora,
- Veća krutost konstrukcije i bolja otpornost na vibracije,
- Nema opasnosti od začepljenja utora nanosom.

LEPTIRASTI ZATVARAČ

Opterećenje na objekt prenosi se preko kućišta. Najčešće se koristi kao havarijski na dovodima pod pritiskom, a ne koristi se za regulaciju protoka. Koristi se na padovima do 300m.



Prednosti leptirastog zatvarača: - Dobro brtvi,
 - Jednostavne je konstrukcije,
 - Pouzdan je u korištenju,
 - Relativno lagan i malih gabarita.

Najveći nedostatak leptirastog zatvarača je veliki lokalni gubitak $\xi_{lok} = 0.10-0.25$ kod otvorenog zatvarača.

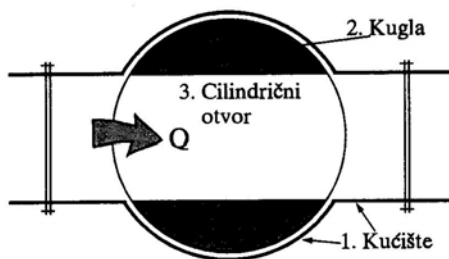
KUGLASTI ZATVARAČ

Sastoji se od sfernog kućišta i kugle s cilindričnim otvorom koji odgovara promjeru cijevi. Može se koristiti i pri vrlo velikim pritiscima (1700 mVS).

Ima dva radna položaja:

- potpuno otvoren,
- potpuno zatvoren

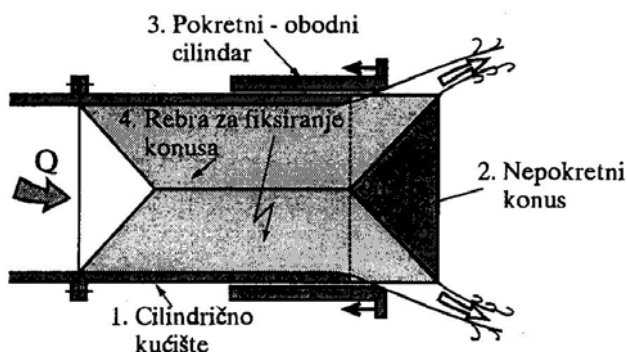
Koristi se kao havarijski zatvarač najčešće kod dovoda za HE. Odlično brtvi i ima vrlo male hidrauličke gubitke, ali je velikih dimenzija, velike težine i visoke cijene, te je za njegovo pokretanje potrebna velika sila.



KONUSNI regulacijski ZATVARAČ – “Howel – Bunger” ili “teleskopski” zatvarač

Sastoji se od:

- Nepokretnog cilindričnog kućišta,
- Hidraulički oblikovanih rebara
- Nepokretnog konusa,
- Pokretnog obodnog cilindra (čijim se pomicanjem mijenja protočna površina na izlazu i time regulira protok).



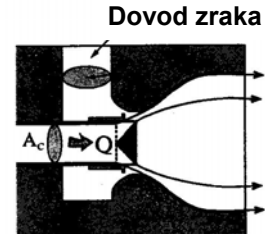
Prednosti:

- Laka i ekonomična konstrukcija,
- Radni dio je u suhom (mehanizam za pokretanje zatvarača),

- Izlazni konus raspršuje mlaz i pri tome se disipira energija,
- Može se ispuštati nanos bez da se zatvarač začepi.

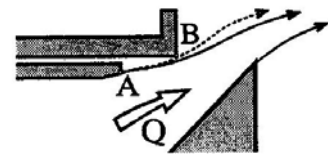
Mane:

- Prskanje vode (može se izvesti skretanje mlaza u kućištu),



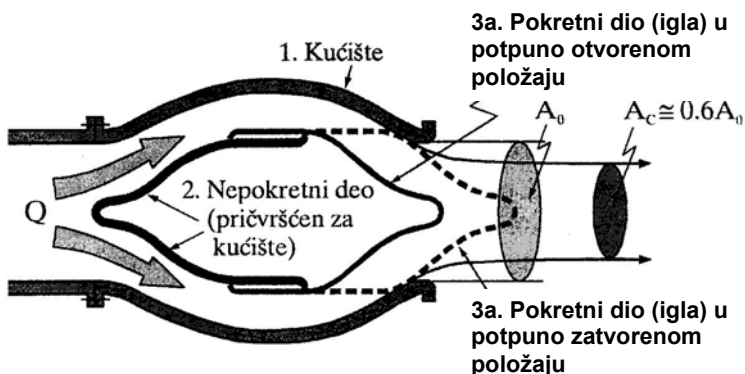
- Vibracije zbog pomicanja točke odljepljivanja mlaza.

Kontrakcija mlaza iznosi 0.75-0.78.



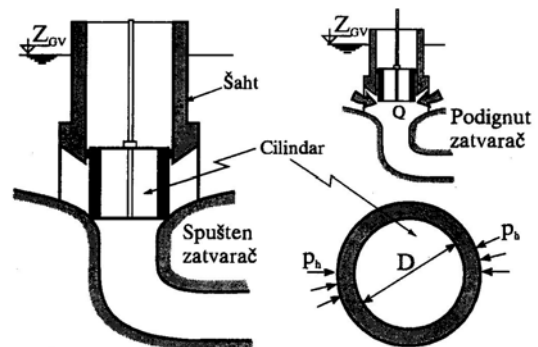
IGLASTI regulacijski ZATVARAČ – “Johnsonov” zatvarač

Koristi se kod lučnih brana, kada se mlaz želi točno usmjeriti bez prskanja. Složene je konstrukcije i vrlo skup, osjetljiv na nanos i kavitaciju na “iglama”. Kontrakcija mlaza iznosi 0.60.



KRUŽNO CILINDRIČNI ZATVARAČ

Koristi se na dubinskim zahvatima u vidu kule ili šahta.



3.4 Akumulacije

Jezera prema načinu formiranja mogu biti:

- Prirodna jezera,
- Umjetna jezera – akumulacije (nastaju pregrađivanjem riječnog toka u dolinama, kotlinama...).

Reguliranje/izravnanje protoka

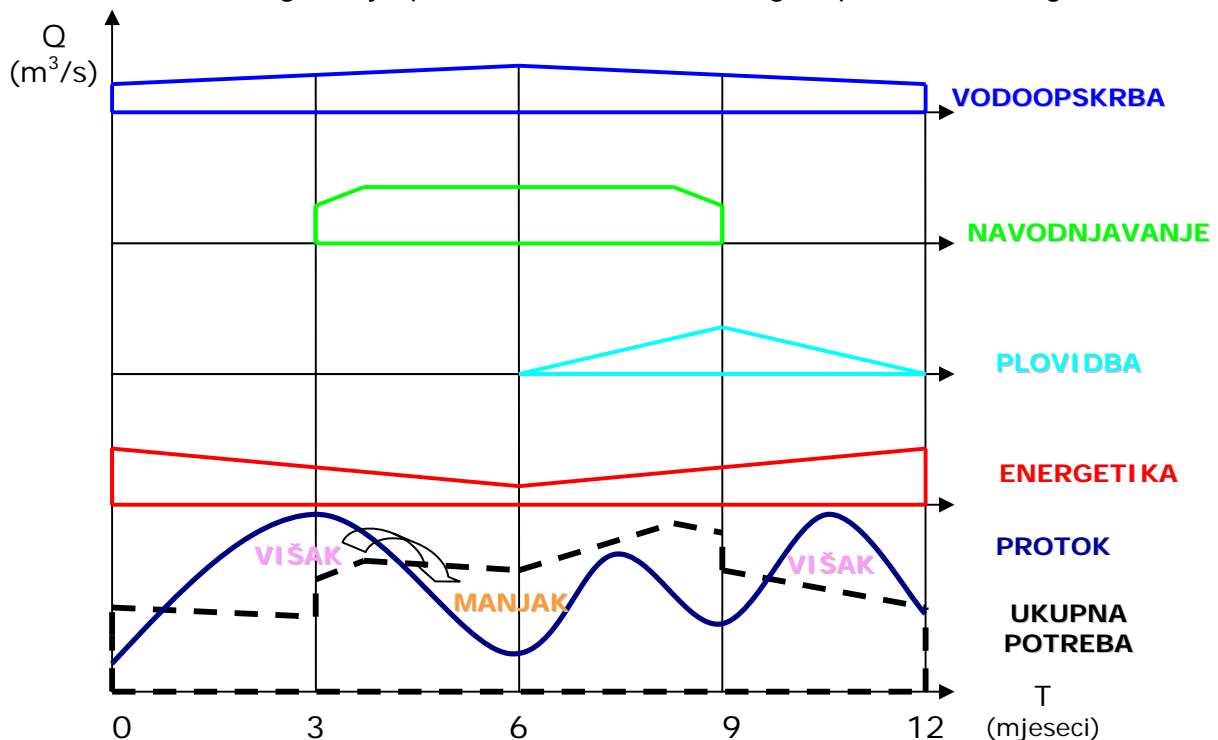
Prostorni i vremenski raspored vode u prirodi razlikuje se od prostornog i vremenskog rasporeda potreba na vodi, te se to rješava promjenom vremenskog rasporeda vode (akumulacija) i transportom vode na područja gdje je voda potrebna.

U određenom trenutku korisniku treba osigurati:

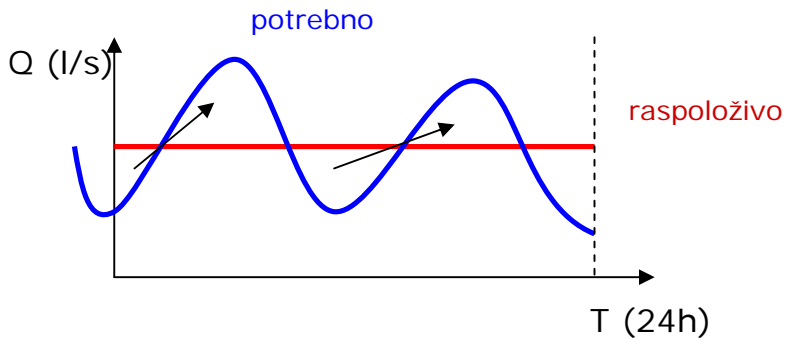
- Potrebne količine vode i
- Odgovarajuću kakvoću vode

U periodu kada ima više vode nego što je potrebno za ostvarenje potreba korisnika ("višak") voda se akumulira u akumulaciji da bi se mogla koristiti kada je sušni period i kada nema dovoljno vode za potrebe korisnika ("manjak").

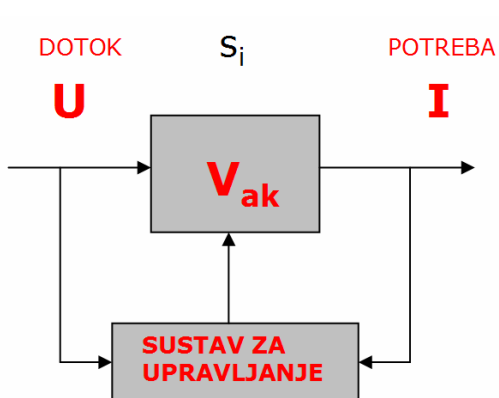
Karakteristike unutargodišnjih potreba vode i vremenskog rasporeda vode u godini



Karakterističan odnos raspoloživih i potrebnih voda unutar dana (na pr. vodoopskrba, hidroenergetika,..)



DIMENZIONIRANJE AKUMULACIJE



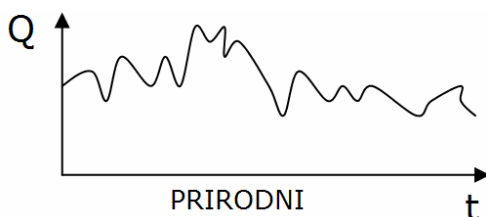
S_i - stanje sustava (ovisno o ulazu, elementima akumulacije, sustavu za upravljanje, prethodnom stanju, izlaznom stanju)

V_{ak} - volumen akumulacije

Stanje se opisuje volumenom $V_{ak i}$ ili visinom kod brane h_i (kod plitkih akumulacija; h_i , Q_i)

- Zahvati (zatvarači)
- Preljev
- Ispuštanje

ULAZ – dotok (prirodni i transformirani - sustav akumulacija)



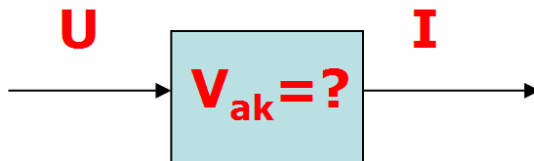
Dotok se prognozira – procjenjuje raznim metodama (npr. može se koristiti metoda MONTE CARLO, gdje niz iz prošlosti preslikamo kao budući niz)

PRISTUPI:

- Deterministički pristup – grafički,
- analitički;
- Stohastički pristup (određuje vjerojatnost) – bolje i kvalitetnije.

TIPOVI ZADATAKA:

1) Ako znamo ulaz i izlaz, kolika mora biti akumulacija?



2) Poznati ulaz i akumulacija, koliki je izlaz?



BILANCNA JEDNADŽBA (JEZERSKA JEDNADŽBA)

$$\int_{t_0}^t Q_{DOR} dt = \int_{t_0}^t Q_{IZ} dt \pm \Delta V$$

$$Q_{DOT} * \Delta t = Q_{IZ} * \Delta t \pm \Delta V,$$

$$V_{DOT} = V_{IZ} \pm \Delta V,$$

Q_{DOT} – ulaz u akumulaciju

ΔV – volumen koji ostaje u akumulaciji

$$V_{DOT} = Q_{DOT} * \Delta t$$

$$V_{IZ} = Q_{IZ} * \Delta t = V_K + V_{PR}$$

V_K – volumen koji koristimo

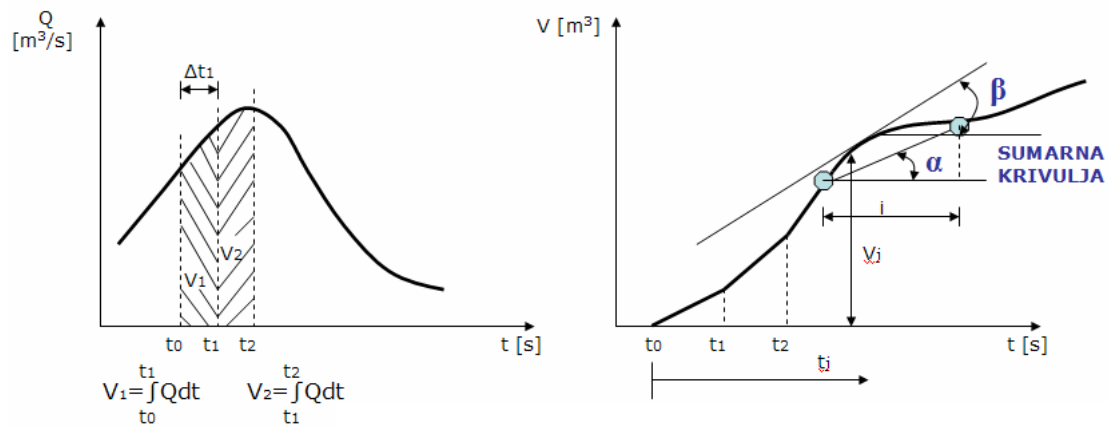
V_{PR} – volumen koji se gubi na preljevu

SUMARNE KRIVULJE: - dotoka,

- ulaza,

- izlaza,

- potreba.



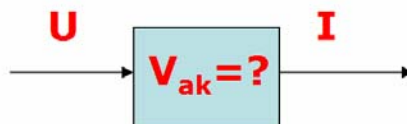
$$V_1 = \bar{Q} \Delta t_1, \quad \Delta t = \text{const.}$$

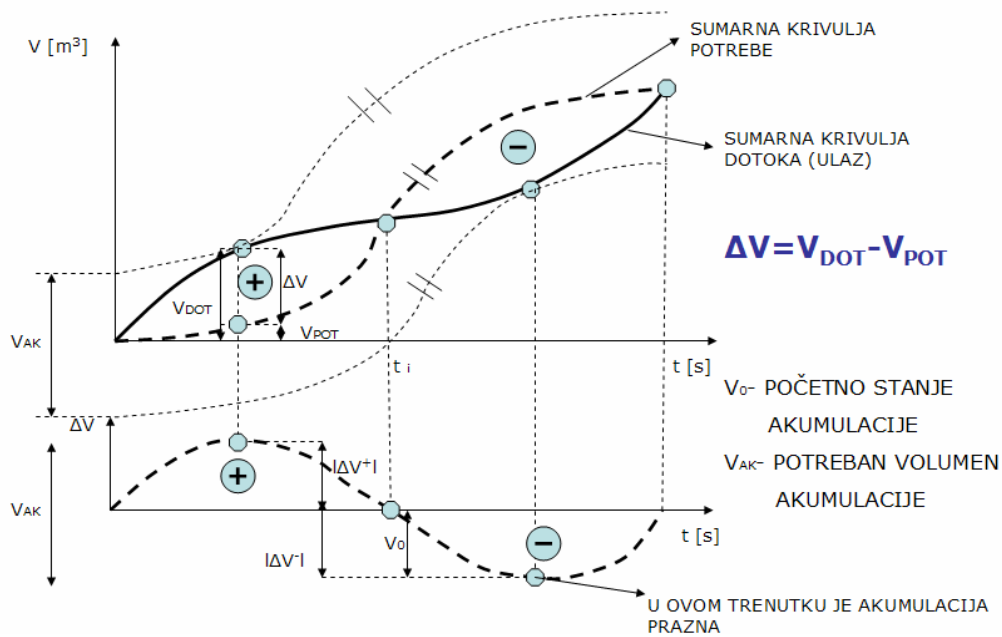
Sumarna krivulja je uvijek rastuća ili horizontalna (npr. za $Q=0$).

$\text{tg}\alpha = \Delta V / \Delta t$ } tangens kuta nagiba sekante predstavlja srednji protok
 $\text{tg}\alpha = Q_{sr \ i}$ } na nekom intervalu

$\text{tg}\beta = Q$ tangens kuta nagiba tangente u bilo kojoj točki odgovara protoku u toj točki

1. TIP ZADATKA:





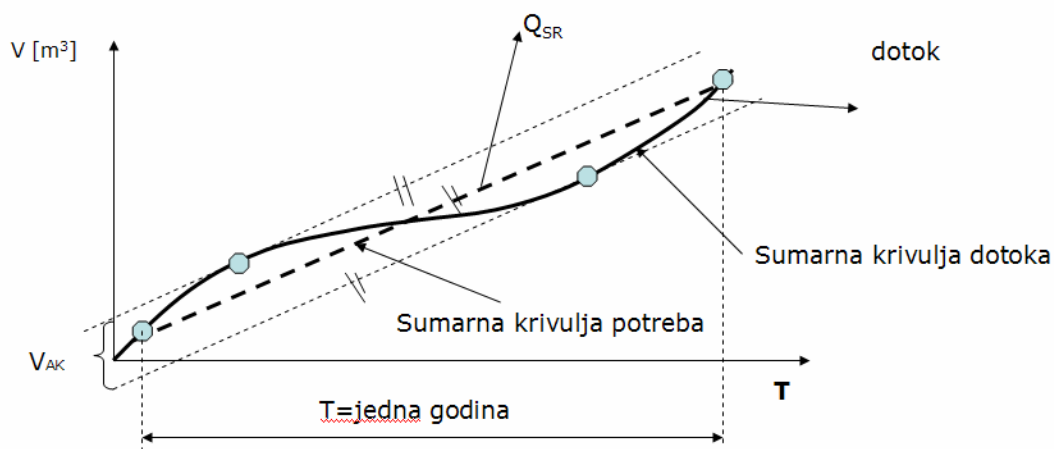
$V_{AK} = |\Delta V^+|_{max} + |\Delta V^-|_{max}$ - model za analitički proračun

V_{DOT}	V_{POT}	ΔV
m^3	m^3	m^3
.....	max
.....
.....
.....	min

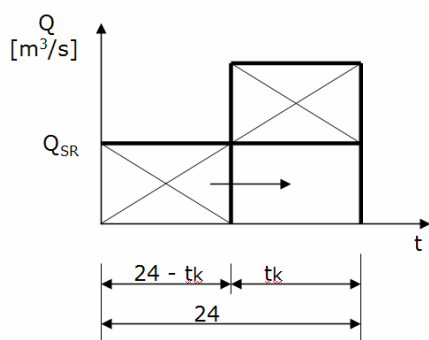
Uzimamo ekstremne vrijednosti

POTPUNO GODIŠNJE IZRAVNANJE:

- poznata nam je potreba Q_{SR}
- unutar godine moramo osigurati prosječni protok



SATNA REGULACIJA (DNEVNA)



Q_{SR} – na osnovu hidrograma

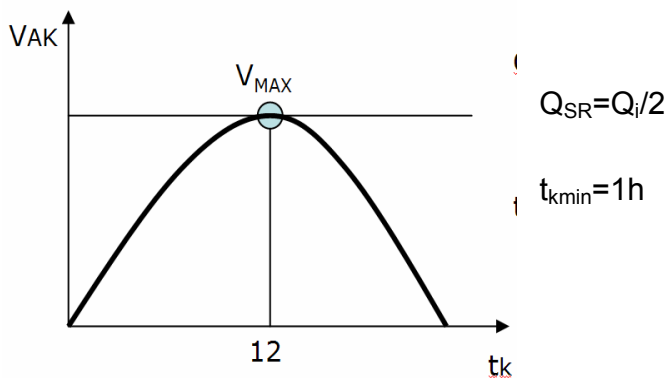
Q_i – instalirani protok ili kapacitet

$$Q_{SR} * 24 * 3600 = Q_i * t_k * 3600$$

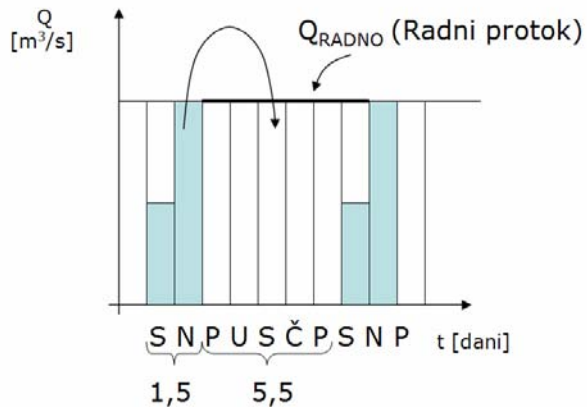
$$Q_{SR} = (t_k / 24) * Q_i$$

$$V_{AK} = Q_{SR} * (24 - t_k) * 3600 = t_k / 24 * (24 - t_k) * Q_i * 3600 = Q_i * 150 * t_k * (24 - t_k)$$

t_k [h]	V_{AK} [m³]
12	21600 Q_i
10	21000 Q_i
...	...
8	19200 Q_i



TJEDNA REGULACIJA



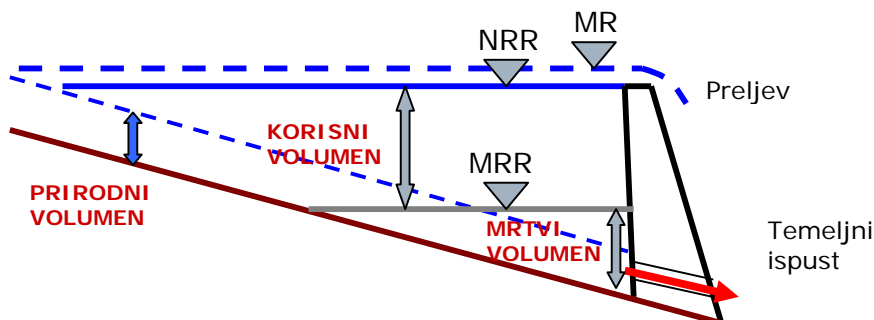
$$Q_{\text{DOT}} * 7 * 86400 = Q_{\text{RADNO}} * 5,5 * 86400$$

$$Q_{\text{DOT}} = 5,5/7 * Q_{\text{RADNO}} ; V_{\text{AK}} = Q_{\text{DOT}} * 1,5 * 86400$$

$$V_{\text{AK}} = 5,5/7 * Q_{\text{RADNO}} * 1,5 * 86400$$

$$= 101828 Q_{\text{RADNO}} \approx 100000 Q_{\text{RADNO}}$$

DIJELOVI AKUMULACIJE



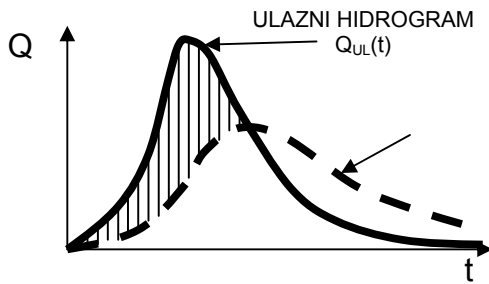
MR – maksimalna razina vode

NRR – normalna/radna razina vode

MRR – minimalna radna razina vode

Korisni volumen akumulacije - volumen predviđen za osiguranje potreba korisnika (vodoopskrba, navodnjavanje, proizvodnja električne energije,...).

U cilju obrane od poplava za zadržavanje dijela vodnog vala koristi se dio volumena između MR i NRR, a može se pravovremeno vršiti predpražnjenje.

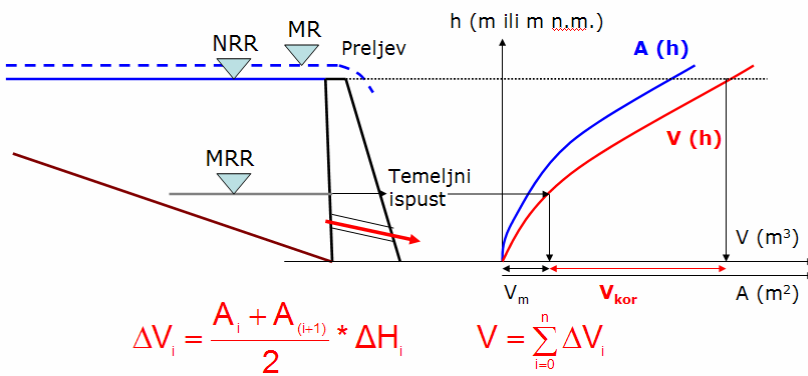


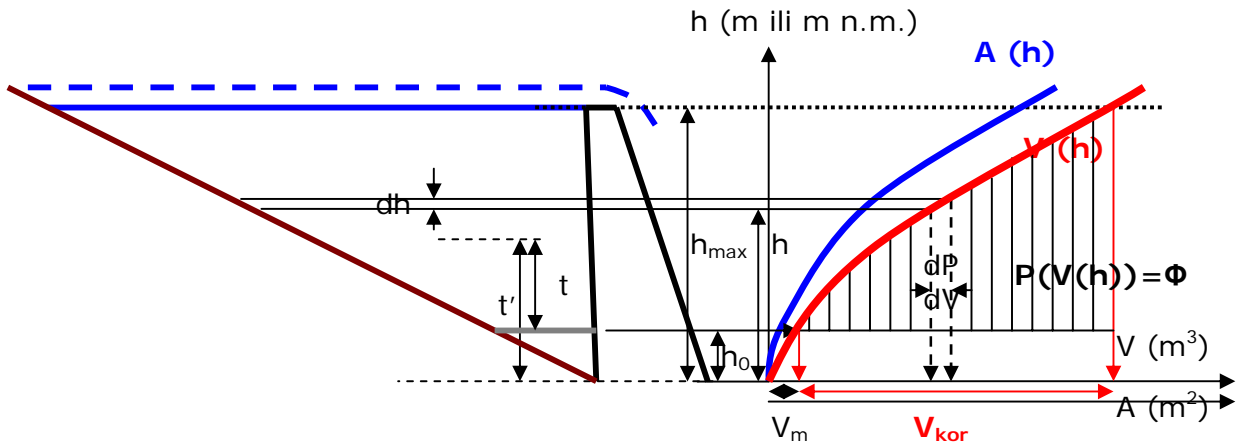
Mrtvi volumen – prostor koji ne možemo koristiti, često je zatrpan nanosom. Preljev služi za evakuaciju velikih voda:



KRIVULJA VOLUMENA I POVRŠINE AKUMULACIJE

Kod **dubokih** akumulacija razina vode je vodoravna.





$$dP = dV = \bar{A} \cdot dh$$

$$\Delta V = \frac{A_i + A_{i+1}}{2} \Delta h$$

$$\int_{h_0}^{h_{max}} A dh (h - h_0) = V_{kor} \cdot t$$

$$t = \frac{\int_{h_0}^{h_{max}} A dh (h - h_0)}{V_{kor}} = \frac{\int_{h_0}^{h_{max}} dV (h - h_0)}{V_{kor}} = \frac{\Phi}{V_{kor}}$$

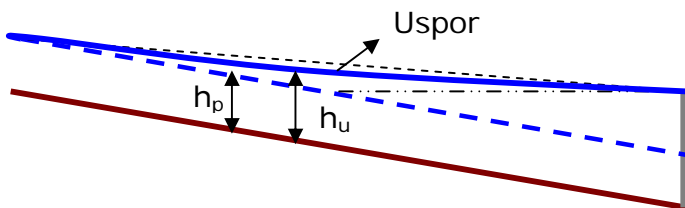
t – težište volumena
ENERGETSKI EKIVALENT korisnog volumena akumulacije u odnosu na: minimalnu razinu:

$$W = \frac{V_{kor} \cdot t}{367} \text{ (kWh)}$$

bilo koju razinu:

$$W = \frac{V_{kor} \cdot (t+z)}{367} \text{ (kWh)}$$

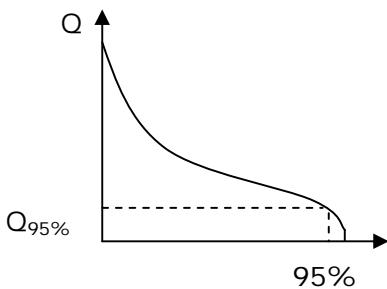
Kod **plitkih** akumulacija volumen nije jednoznačno određen nego je u funkciji uspora i vodotoka.



$$\frac{h_{usp}}{h_{prir}} \leq 1,01 \text{ (1\%)}$$

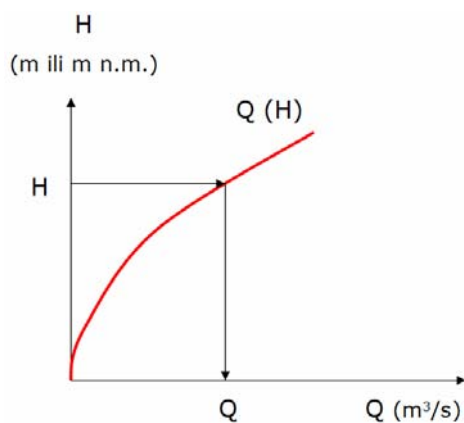
Uspor računamo sa 95% male vode. Dužina uspora $L=f(Q,h)$ proizlazi iz $h_{usp}/h_{prir}=1.01$.

Za 95% korištenja:



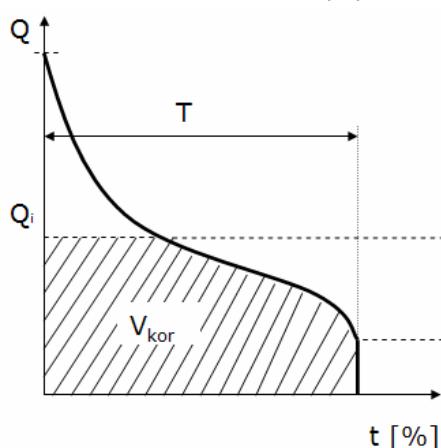
KRIVULJA PROTOKA/PROTOČNA KRIVULJA

Protočna krivulja donje vode predstavlja zavisnost protoka od razine vode u nizvodnom koritu.

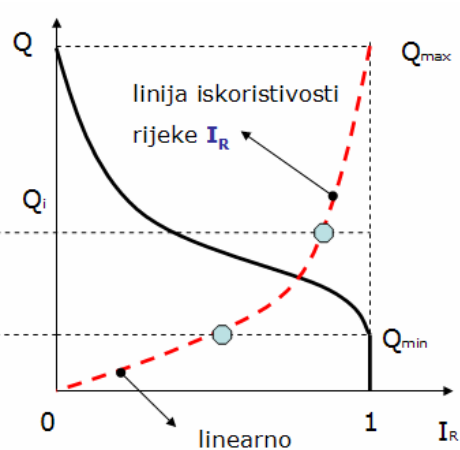


POKAZATELJI:

- Iskoristivost rijeke,
- Iskoristivost izgradnje,
- Iskoristivost rijeke s akumulacijom,
- Doprinos akumulacije,
- Bonitet akumulacije,
- Bonitet usporne građevine,
- Odnos korisnog volumena i ukupnog godišnjeg dotoka,
- Energetska vrijednost akumulacije.

ISKORISTIVOST RIJEKE (I_R)

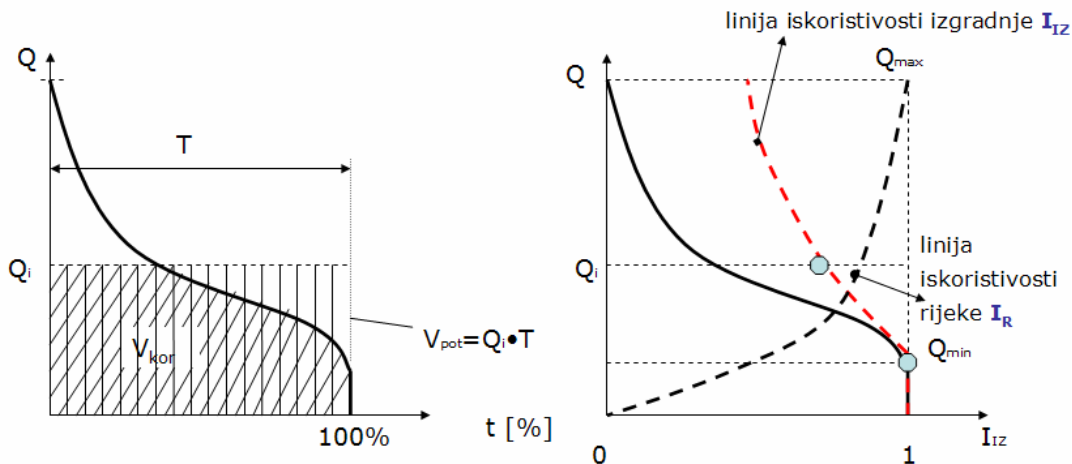
Q_i -instalirani protok, najveći protok vode koji se može koristiti (kapacitet zahvata) = VELIČINA IZGRADNJE



ISKORISTIVOST RIJEKE:

$$I_R = V_{kor} / V$$

V-ukupni volumen vode

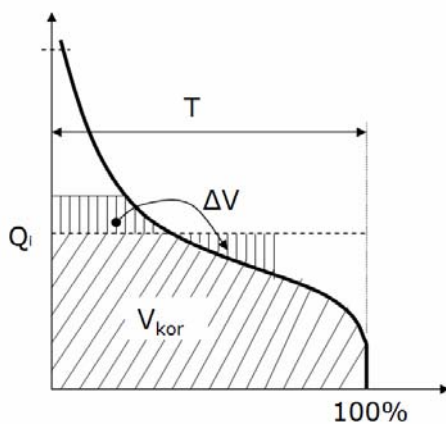
ISKORISTIVOST IZGRADNJE (I_{IZ})

Q_i -instalirani protok, najveći protok koji se može koristiti (kapacitet zahvata)
=VELIČINA IZGRADNJE

ISKORISTIVOST IZGRADNJE:

$$I_{IZ} = V_{kor} / V_{pot} = V_{kor} / Q_i \cdot T$$

V_{pot} -potencijalno moguća iskoristiva voda

ISKORISTIVOST RIJEKE S AKUMULACIJOM (I_R^A)

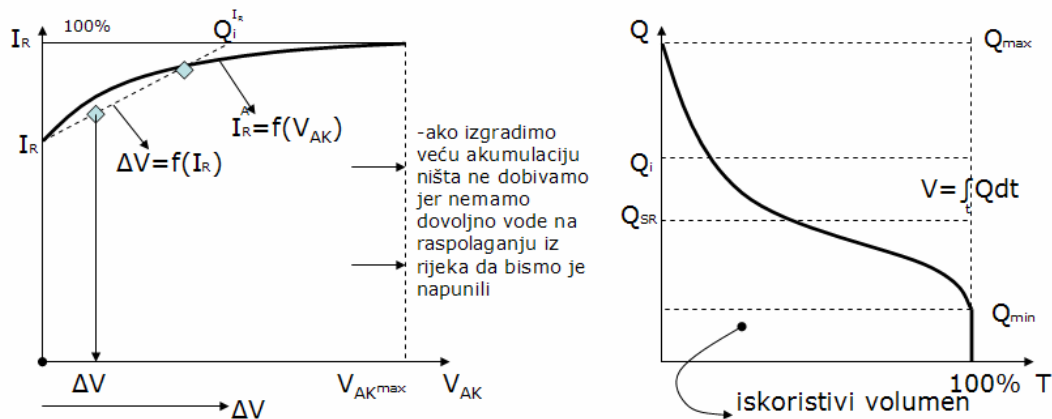
$$I_R^A = (V_{kor} + \Delta V) / V_{UK}$$

V_{KOR} -volumen koji se koristi za instalirani protok Q_i

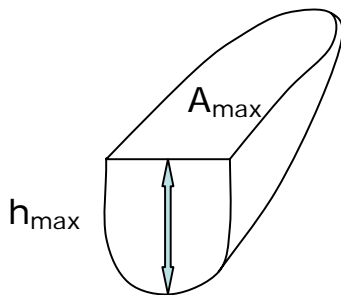
ΔV -volumen koji se dodaje

DOPRINOS AKUMULACIJE (D_{ak}) - omjer dodatnog prema iskorištenom volumenu

$$D_{ak} = (I_R^A - I_R) / I_R = \Delta V / V_{kor}$$



BONITET AKUMULACIJE (β)



$$\beta = \frac{V_{ak}}{A_{max} h_{max}}$$

V_{ak} – volumen akumulacije

Bonitet akumulacije je pokazatelj vrijednosti akumulacije. Važan je s obzirom na cijenu zemljišta (terena). Što je β veći napraviti ćemo veću akumulaciju na istom prostoru.

BONITET USPORNE GRAĐEVINE ($\beta_{ak/g}$ / $\beta_{g/ak}$)

Pokazatelj je ugrađenog materijala u akumulacije.

Koliko je m^3 akumulacije ostvareno ugradnjom za $1m^3$ materijala u građevinu:

$$\beta_{ak/g} = \frac{V_{ak}}{V_g}$$

Koliko je m^3 materijala ugrađeno u građevinu za $1m^3$ akumulacije

$$\beta_{g/ak} = \frac{V_g}{V_{ak}}$$

V_{ak} – volumen akumulacije

V_g – volumen građevine

ODNOS KORISNOG VOLUMENA I UKUPNOG GODIŠNJEG DOTOKA

Daje nam predodžbu o stupnju moguće transformacije (izravnanja).

$$\gamma^{GOD} = \frac{V_{AK}}{V_{GOD}}$$

$\gamma > 0,5$ - izjednačavanje volumena u nekoliko godina

$\gamma \sim 0,25$ – izjednačavanje volumena u tijeku jedne godine

Godišnja regulacija:

- Nepotpuna $\gamma = 2-3\%$ (0.02-0.03)
- Potpuna (znači da možemo osigurati srednju godišnju protoku)

$\gamma = 20-30\%$ (0,20-0,30)

Višegodišnja regulacija:

- Nepotpuna $\gamma \sim 50\%$ godišnjeg protoka
- Potpuna $\gamma \geq 100\%$ godišnjeg protoka

Dnevna regulacija:

- Nepotpuna $\gamma \sim 5\%$ potrebe
- Potpuna $\gamma \sim 25\%$ potrebe

$$\gamma^{\text{DN}} = \frac{V_{\text{AK}}}{V_{\text{POT}}^{\text{DN}}}$$

VRSTE AKUMULACIJA

Prema vrsti izravnjanja protoka:

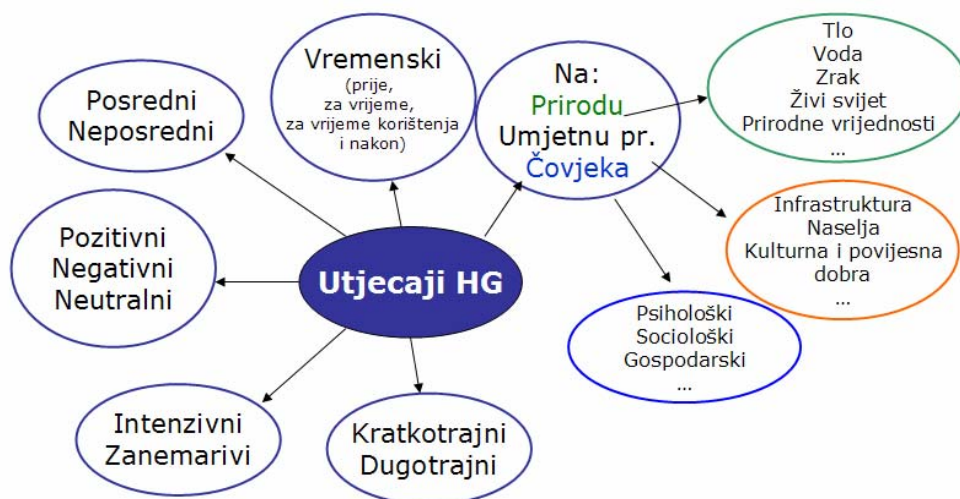
- Višegodišnje (višak vode iz vodnih godina prebacuje se u period sušnih godina),
- Godišnje ili sezonske (višak vode iz vodnih perioda u toku jedne godine prebacuje u sušne periode iste godine),
- Tjedne,
- Dnevne (princip kao kod vodospreme),
- Kompenzacijski bazeni (služi da dotok koji je transformiran vraća u prirodno stanje, npr. mogu se graditi kod vršnih HE za osiguranje “biološkog minimuma” kada HE ne radi).

Prema namjeni:

- Višenamjenske,
- Jednonamjenske.

Prema dubini: duboke i plitke.

PROMJENE U OKOLINI IZGRADNJOM HG (FORMIRANJEM AKUMULACIJA)



Utjecaj na okoliš propisan je zakonima (www.voda.hr, www.mzopu.hr):

- Zakon o vodama
- Zakon o prostornom uređenju
- Pravilnik o procjeni utjecaja na okoliš

Primjeri:

- Rijeka Drava:

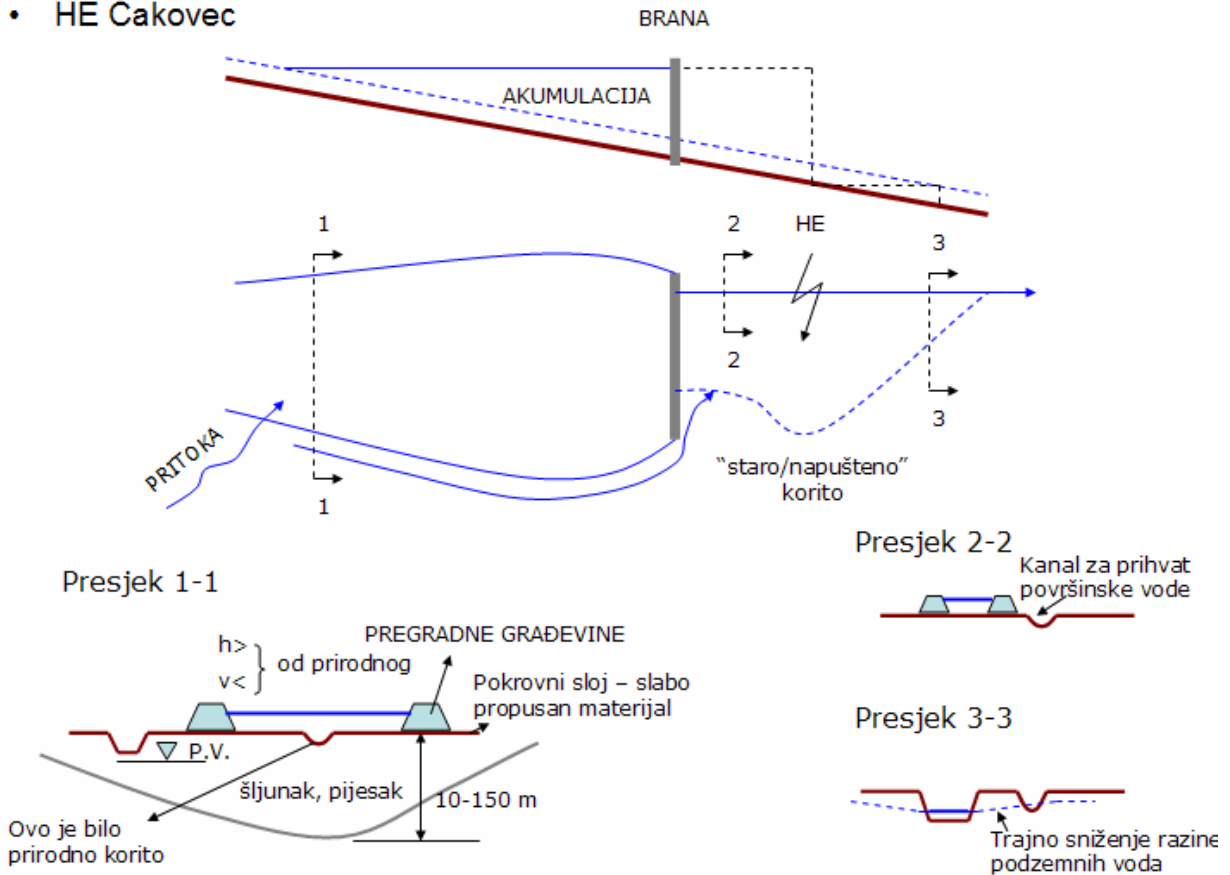
- HE Varaždin (1971-75) – nije trebala studija utjecaja na okoliš,
- HE Čakovec (1975-85) – trebala je studija utjecaja na okoliš (Pravilnik o procjeni utjecaja na okoliš temelji se na iskustvima gradnje HE Čakovec, napravljena malo prije puštanja u rad),
- HE Dubrava (1982-89) - trebala je studija utjecaja na okoliš.

- HE Vinodol (1952):

- Akumulacija Bajer – sva voda ide na HE,
- Ličanka je presušila.

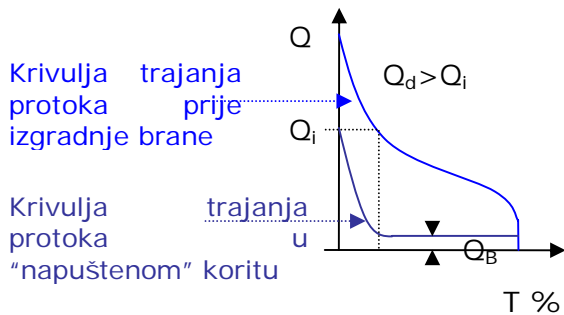
- Lika i Gacka - “stara” korita su suha.

• HE Čakovec



Neposredne promjene:

- tlo: - prenamjena površine,
- zauzimanje zemljišta,
- vode: - površinske (promjene u protocima) → krivulja trajanja protoka (prije i nakon izgradnje brane)



- podzemne - povišenje/sniženje razine podzemnih voda

Posredne promjene

PRIRODA:

- zrak, živi svijet i prirodne vrijednosti,
- mijenjanje mikroklima,
- BIOCENOZA (skup živih organizama-suživot) + BIOTOP (životna sredina),
- EUTROFIKACIJA.

STVORENE VRIJEDNOSTI I UMJETNA PRIRODA:

- Infrastruktura,
- Naselja,
- Kulturna i povijesna dobra (arheološki lokaliteti).

ČOVJEK:

- Psihičke,
- Sociološke,
- Gospodarske .

PROBLEMI VEZANI UZ AKUMULACIJE

- Zatrpavanje nanosom uzvodno od brane:

- erozija korita nizvodno,
- mrtvi prostor,
- vijek trajanja akumulacije (50-200 godina),
- potrebno je smanjiti količinu nanosa koji dolazi u akumulaciju (pregrade na pritocima),
- osigurati ispiranje nanosa kroz temeljne ispuste i preko preljeva,
- osigurati čišćenje nanosa iz akumulacije (ako je moguće);

- Vododrživost akumulacije (procjeđivanje kroz bokove doline i dno), pr. Letaj (Boljunčica);

- Očuvanje kvalitete akumulirane vode;

- Gubitak uslijed isparavanja;

- Utjecaj akumulacije na klimu, ekologiju, kulturno naslijeđe i kvalitetu vode;

- Plavljenje površina (naselja, poljoprivredne površine, infrastruktura,...);

- Porast/sniženje razine podzemnih voda;

- Potpuno ili djelomično rušenje brane može uzrokovati katastrofalne posljedice;

- Punjenje i pražnjenje akumulacije može uzrokovati inducirane potrebe;

- Naglo pražnjenje može izazvati klizišta;

- U korištenju akumulacije postoji sukob interesa različitih korisnika;

- Priprema površina koje će se potopiti nakon izgradnje potapanja

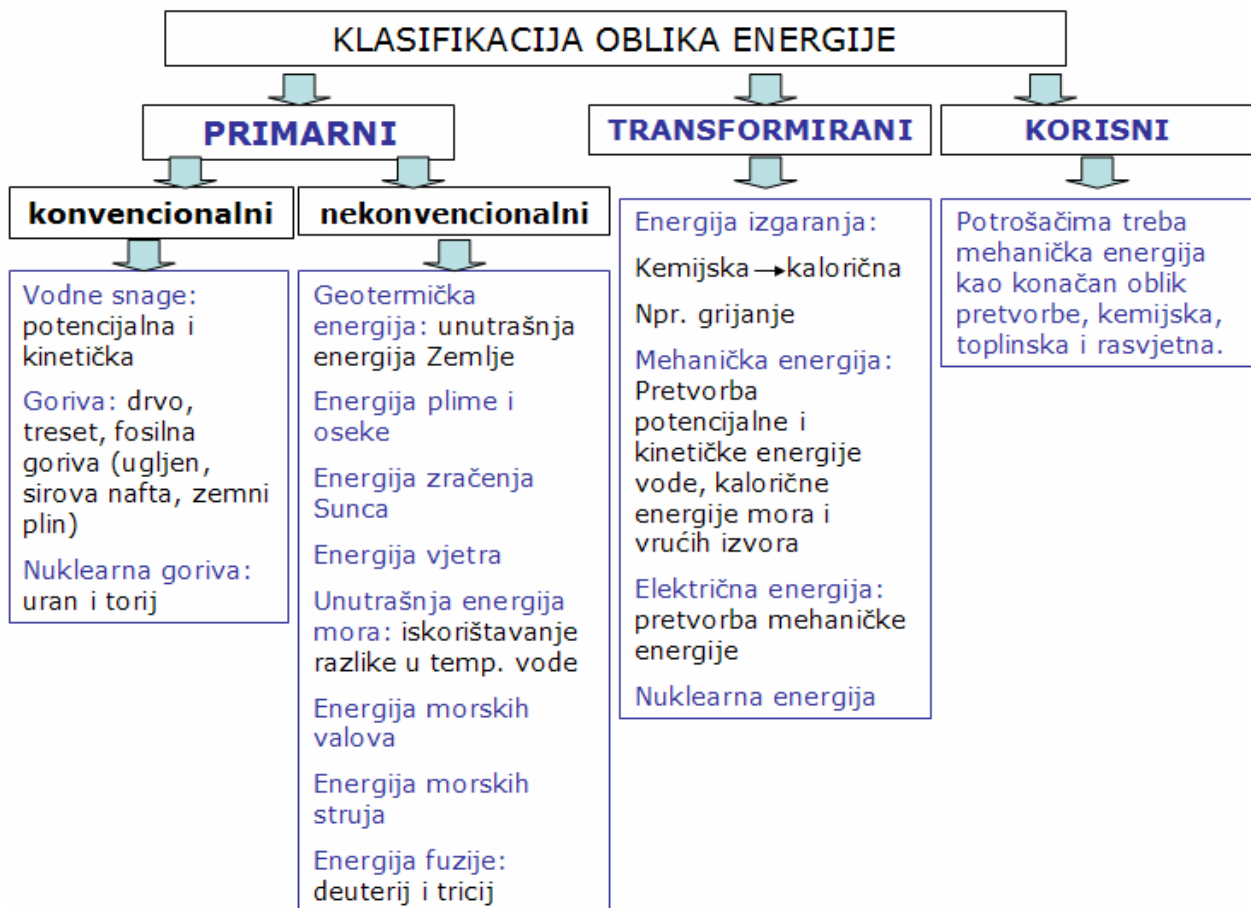
- ...

3.5 Korištenje vodnih snaga

ENERGIJA [Nm]=[J]=[Ws]

Oblici energije:

- Energija položaja - potencijalna energija : $E_p = mgH$
- Energija gibanja - kinetička energija : $E_k = mv^2/2$
- Energija dovođenja ili odvođenja topline – kalorična energija
- Energija izgaranja – kemijska energija
- Energija razbijanja jezgara teških atoma – energija fisije
- Energija spajanja lakih jezgara atoma – energija fuzije



PRIMARNI OBLICI ENERGIJE:

- Mehanička energija: čovjek, životinje
- Kemijska energija: drvo, ugljen, sirova nafta, zemni plin
- Nuklearna energija: uran, torij, deuterij
- Potencijalna energija: vodotoci, plima/oseka
- Kinetička energija: vodotoci, valovi, vjetar, morske struje
- Toplinska energija: geotermalni izvori, toplina mora
- Energija zračenja: Sunčeva energija

OBNOVLJIVI IZVORI ENERGIJE:

- Drvo (posječeno drvo zamijeniti novoposađenim)
- Vodne snage
- Plima i oseka
- Valovi mora
- Toplina mora
- Vjetar
- Sunce
- Toplina Zemlje

Oblici energije koje je tehnički moguće koristiti i danas se dominantno koriste su vodne snage, fosilna i nuklearna goriva. Oblici energije koje je tehnički moguće koristiti, ali su danas ekonomski slabije isplativi: Sunčevo zračenje, energija vjetra, plime i oseke, morskih valova i topline mora. Oblici energije za koje još nije riješen način iskorištavanja: unutrašnja toplina zemlje, fuzija.

La Rance je brana/HE koja koristi energiju plime i oseke. Izgrađena je 1960. blizu St. Malo u Francuskoj. 330 metara je duga i čini bazen od 22 km². Razlika u razini vode za vrijeme plime i oseke iznosi 8 metara.

Korištenje vodnih snaga

Danas se vodne snage i energija dominantno koriste za proizvodnju električne energije, što se i obrađuje u ovom kolegiju. Hidroenergetski potencijal je rad kojeg može izvršiti vodeno tijelo mase $V(\text{m}^3) \cdot \rho(\text{kg}/\text{m}^3)$ na putu H (m) pod djelovanjem sile teže. Energija je sposobnost da se izvrši rad i mjeri se radom koji se može izvesti.

Energija **E**:

$$E = \rho \cdot g \cdot V \cdot H \text{ (Nm, J, Ws)}$$

Snaga **P** je brzina rada (promjena rada/energije u jedinici vremena):

$$P = E/t \text{ (J/s, W)}$$

Vodna snaga:

$$P = \rho V \cdot g \cdot Q \cdot H \text{ (J/s, W)}$$

HE u Hrvatskoj:

<http://www.hep.hr/proizvodnja/osnovni/hidroelektrane/default.aspx>

Pri korištenju vodnih snaga za $\rho V = 1000 \text{ kg/m}^3$ i $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ **snaga** se može izračunati iz izraza:

$$P = 9.81 \cdot Q \cdot H_{\text{neto}} \text{ u (kW)}$$

Energija:

$$E = \int P \cdot dt = 9.81 \cdot \int Q \cdot H_{\text{neto}} \cdot dt \text{ u (kWh)}$$

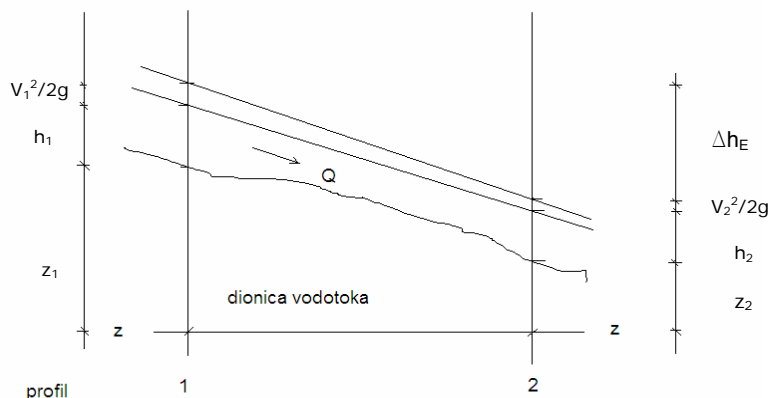
Koeficijent korisnog djelovanja:

Korisni učinak u turbini, generatoru i transformatoru = η_t

$$P = 9.81 \cdot Q \cdot H_{\text{neto}} \cdot \eta_t \text{ u (kW)}$$

Energija koncentriranih tokova

Za korištenje vodne snage i energije dostupna je snaga i energija koncentrirana u vodotocima. Posebno su s energetske stajališta značajne dionice s koncentriranim (usredotočenim) padom – slapovi, kaskade i slično. Na slijedećoj skici prikazan je uzdužni profil dionice vodotoka:



$$dE_1 = P_1 dt = \rho g Q dt (z_1 + h_1 + v_1^2/2g) \text{ [Ws]}$$

$$E_1 = \int P_1 dt \text{ [Ws]}$$

$$dE_2 = P_2 dt = \rho g Q dt (z_2 + h_2 + v_2^2/2g) \text{ [Ws]}$$

$$E_2 = \int P_2 dt \text{ [Ws]}$$

Očigledno je $E_1 > E_2$

Razlika između energije na ulazu i izlazu iz promatrane dionice iznosi:

$$dE_{1-2} = dE_1 - dE_2 = \rho g Q dt \Delta h_E \text{ [Ws]} \text{ (za } dt = 1(s))$$

$$P_{1-2} = \rho g Q \Delta h_E \text{ [W]}$$

$$P_{1-2} = 9.81 Q \Delta h_E \text{ [kW]}$$

$$E_{1-2} = \int P_{1-2} dt \text{ [kWh]} \text{ (uz } dt \text{ [h])}$$

Energija E_{1-2} odgovara radu koji voda obavi u određenom vremenu krećući se od profila 1 do profila 2. Rad je obavljen u savladavanju svih otpora na dionici L te na pronos nanosa.

Iz ove spoznaje proizlazi osnovni princip korištenja snage i energije vode u prirodi – hidrotehničkim građevinama smanjiti rad vode u prirodi i oslobođenu energiju iskoristiti za obavljanje nama korisnog rada – proizvodnju električne energije.

Smanjenje rada vode na nekoj dionici u prirodi ostvaruje se:

A) Usporavanjem (građevine u vodotoku) - Usporavanje se ostvaruje izgradnjom brane, te se na taj način smanjuju brzine vode, vučna sila i u konačnici se smanjuje rad vode na kretanju od profila 1 do profila 2 (duž dionice).

B) Derivacijom - odvajanjem dijela vode iz vodotoka i njenim provođenjem izgrađenim provodnicima. Zahvat se vode ostvaruje na početku dionice (oko profila 1) a povrat vode u vodotok se realizira na nizvodnom kraju dionice (profil 2). Provodnici su u pravilu kraći od vodotoka i manjih su otpora kretanju vode, te se na taj način smanjuje rad vode.

C) Kombinacijom usporavanja i derivacije.

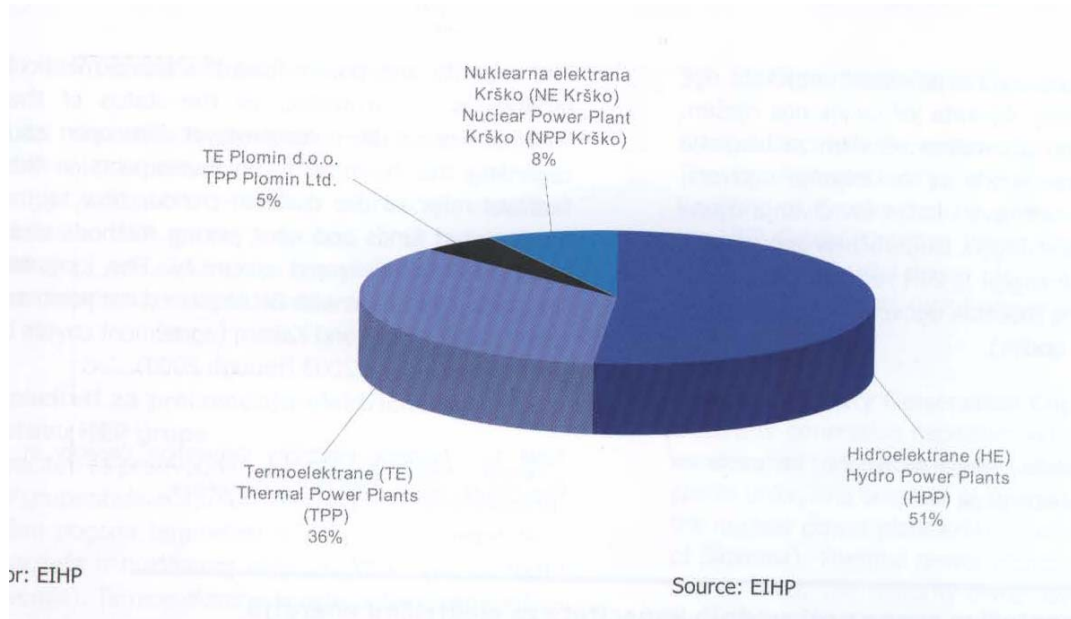
Hidroelektrana, kod koje se koristi samo usporavanje nazivaju se PRIBRANSKE HIDROELEKTRANE, a ostale koje se ostvaruju derivacijom ili kombinacijom usporavanja i derivacije nazivaju se DERIVACIJSKE HIDROELEKTRANE.

Svaka hidroelektrana (HE) sastoji se od 4 glavne grupe građevina:

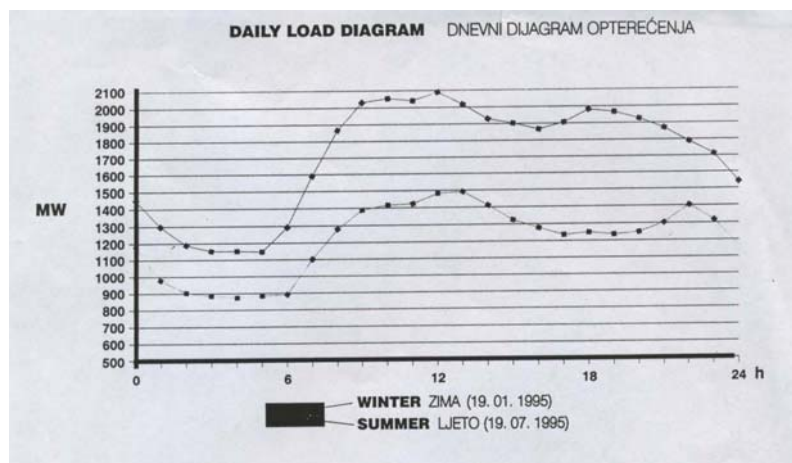
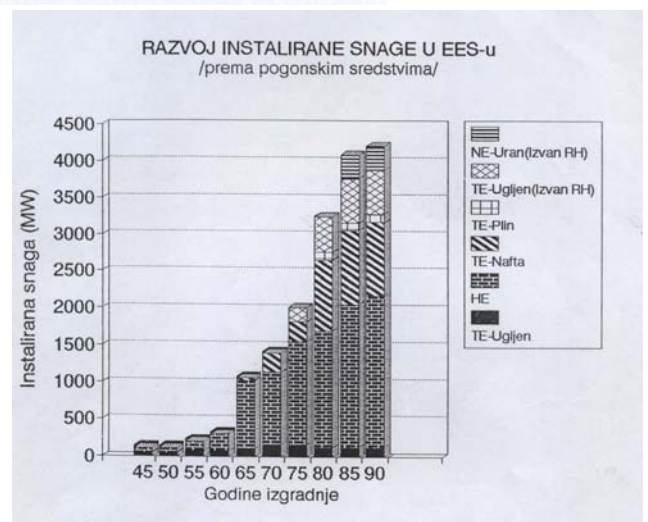
zahvata (brana, ulazni uređaj), dovoda, strojarnice i odvoda.

(U okviru ovog kolegija obrađene su brane i provodnici dok se ulazni uređaji strojarnice obrađuju u okviru hidrotehničkog usmjerenja).

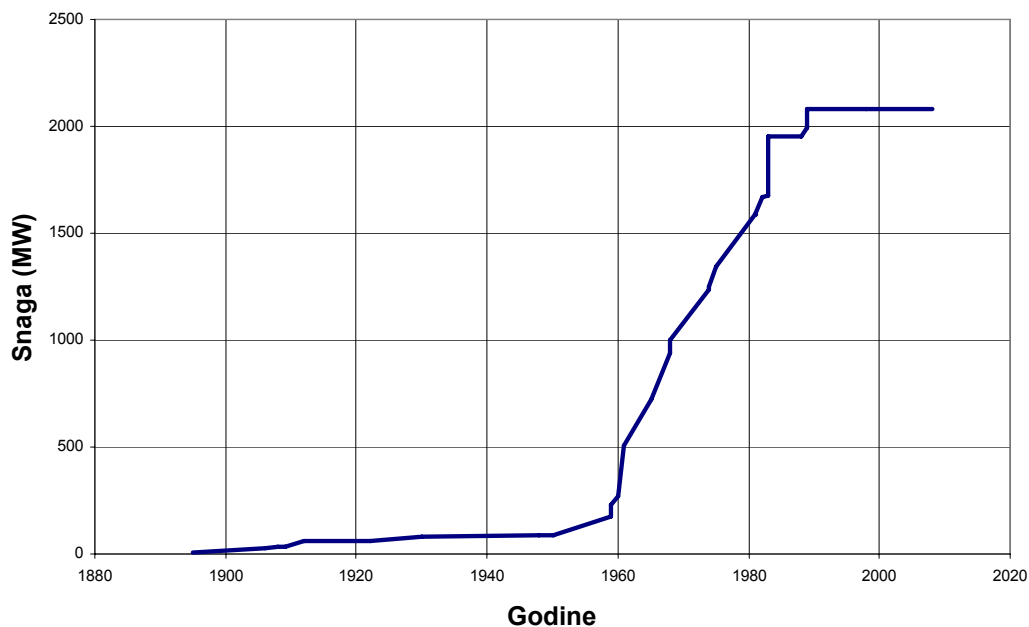
Uloga hidroelektrana (HE) u Hrvatskoj



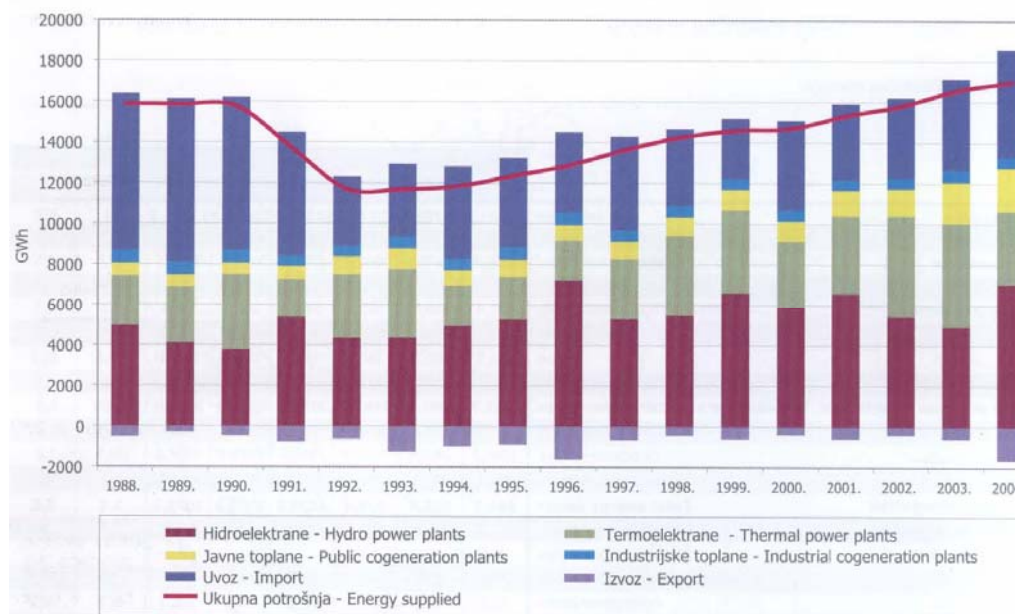
Raspoloživa snaga proizvodnih kapaciteta za električnu energiju Available Electricity Generation Capacity		
	MW	%
Hidroelektrane (HE) Hydro Power Plants (HPP)	2078,6	51
Termoelektrane (TE) Thermal Power Plants (TPP)	1440,5	36
TE Plomin d.o.o. TPP Plomin Ltd.	192	5
Ukupno u RH Total in the Republic of Croatia	3711,1	92
Nuklearna elektrana Krško (NE Krško) – 50% Nuclear Power Plant Krško (NPP Krško) – 50%	338	8
Ukupno Total	4049,1	100



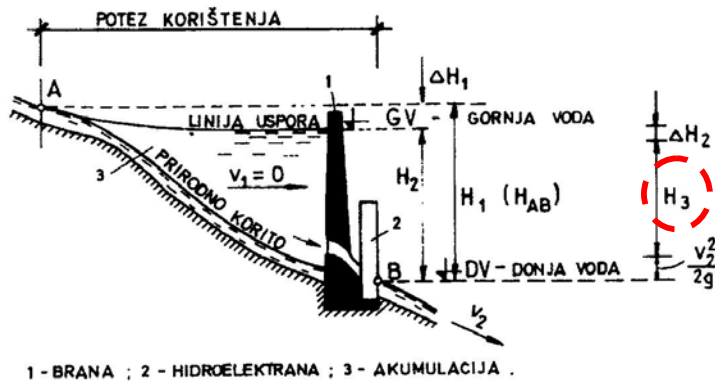
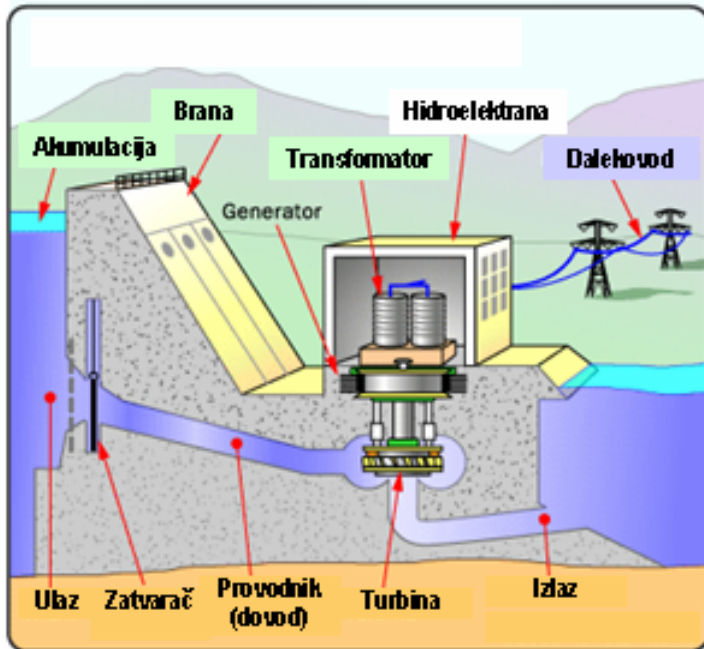
Izgradnja hidroelektrana u Hrvatskoj



Potrošnja i proizvodnja električne energije u Hrvatskoj



Pribranska elektrana



- horizontalna udaljenost između točaka A i B, **potez korištenja**,
- H_1 , pad poteza korištenja,
- H_2 , **statički pad** (GV-DV), u ovom slučaju i koncentrirani pad,

- H_3 , **neto pad**, $H_n = H_2 - (\Delta H_2 + v_2^2/2g)$,
- ΔH_1 , gubitak na padu u području uspora,
- ΔH_2 , gubitak na padu u dovodu do ulaza u turbinu.

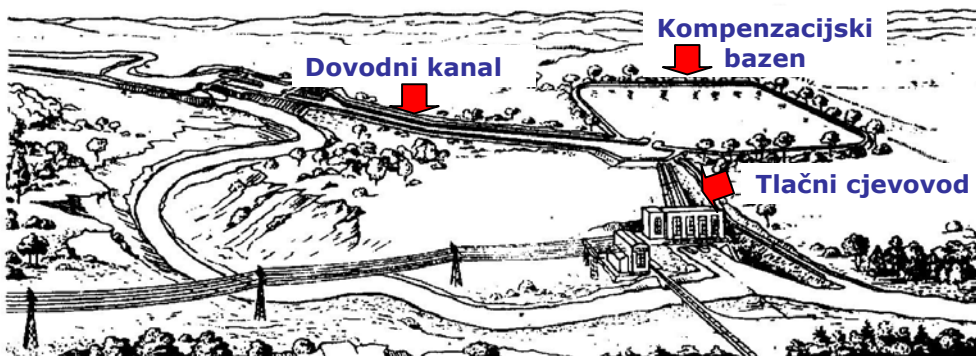
(statički pad = bruto pad)

$$P = 9.81 \cdot Q \cdot H_{\text{neto}} \cdot \eta_t \text{ [kW]}$$

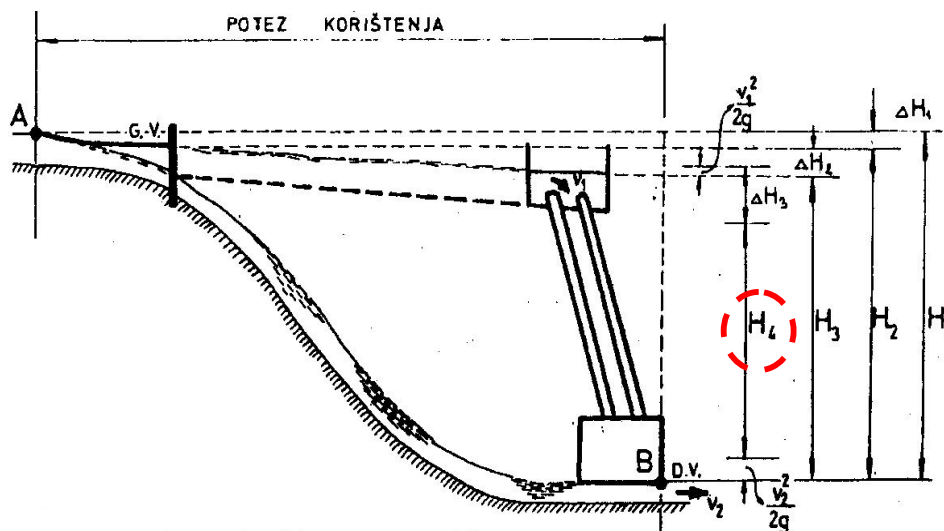
Primjer pribranske HE – HE ĐALE (rijeka Cetina)

HE Đale je pribranska elektrana smještena na rijeci Cetini 5.8 km nizvodno od Trilja. Akumulacija HE Đale služi za dnevno izravnavanje protoka. Puštena je u pogon 1989. god. Betonska gravitacijska brana je visine 40.50 m, zapremnine 3.7 hm³, ukupne dužine 110.0 m, širine u kruni 8.8 m, a u temelju 52.95 m. Preljev je širine 20.0 m opremljen zatvaračem, dva temeljna ispusta su opremljena regulacijskim pločastim zatvaračima, a turbine revizijskim preturbinskim zatvaračima. Strojarnica je smještena u tijelu brane, opremljena s dvije proizvodne grupe, turbine Kaplan, instalirani protok je 220.0 m³/s, pad 21.0 m, instalirana snaga 40.8 MW. Srednja godišnja proizvodnja HE Đale je 107.5 GWh.

Derivacijske hidroelektrane



Derivacijska HE s dovodnim kanalom i tlačnim cjevovodom



Derivacijska hidroelektrana s gravitacijskim dovodom-padovi

- horizontalna udaljenost između točaka A i B, **potez korištenja**,
- H_1 , pad poteza korištenja,
- H_2 , **statički pad** hidroektrane (GV-DV),
- H_3 , **koncentrirani pad**, $H_2 - \Delta H_2$
- H_4 , **neto pad**, $H_n = H_2 + v_1^2/2g - v_2^2/2g - \Delta H_2 - \Delta H_3$,
- ΔH_1 , gubitak na padu u području uspora,
- ΔH_2 , gubitak na padu u derivaciji,
- ΔH_3 , gubitak na padu u dovodu.

$$P = 9.81 \cdot Q \cdot H_{\text{neto}} \cdot \eta_t \quad [\text{kW}]$$

Primjer derivacijske HE s dovodnim kanalom HE DUBRAVA (rijeka Drava)

HE Dubrava je višenamjenska protočno derivacijska hidroelektrana dravskog sliva koja predstavlja posljednju stepenicu na dionici Drave od granice Slovenije do utoka Mure. Hidroelektrana energetski koristi potencijal rijeke Drave za proizvodnju električne energije, povećava zaštitu od poplava, poboljšava odvodnju, omogućuje gravitacijsko natapanje poljoprivrednih površina te ostvaruje uvjete za razvoj športa i rekreacije.

Tip HE: derivacijska s akumulacijom za dnevno i djelomično tjedno uređenje dotoka

Ukupna snaga: 76 MW

Energetski podaci:

instalirani protok: $Q_i = 500 \text{ m}^3/\text{s}$

brutto pad za: Q_i , $H = 17.5 \text{ m}$

maksimalna snaga: $P_{\text{max}} = 76 \text{ (2x38) MW}$

kor. volumen akumul.: 16.6 hm^3

prosječna god. proizvodnja: 350 GWh

Primjer derivacijske HE s tunelskim dovodom sa slobodnim vodnim licem – HE MILJACKA (rijeka Krka)

Opći podaci:

položaj: područje županije Šibensko kninske na rijeci Krki, 15 km nizvodno od Knina

tip hidroektrane: derivacijska

godina početka pogona: 1906.

Energetski podaci:

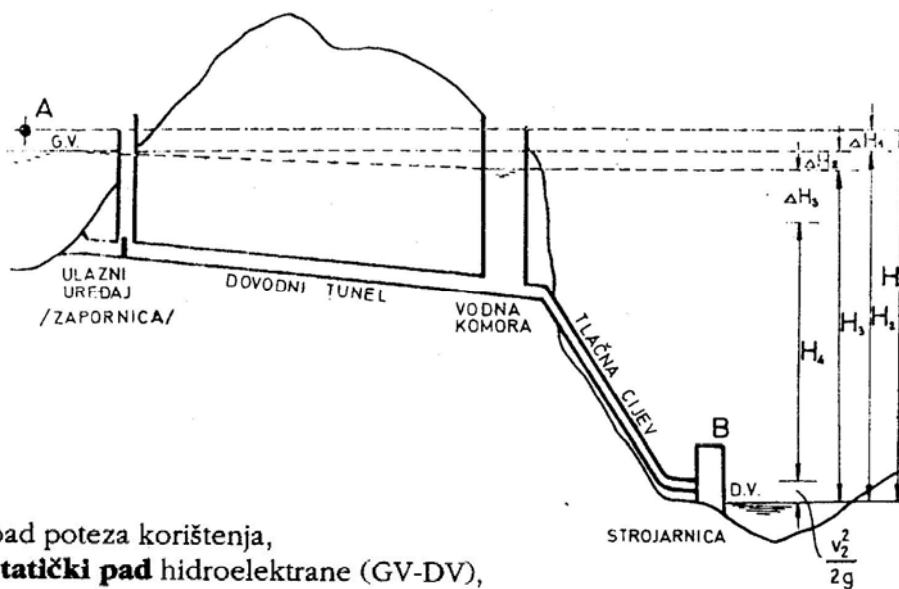
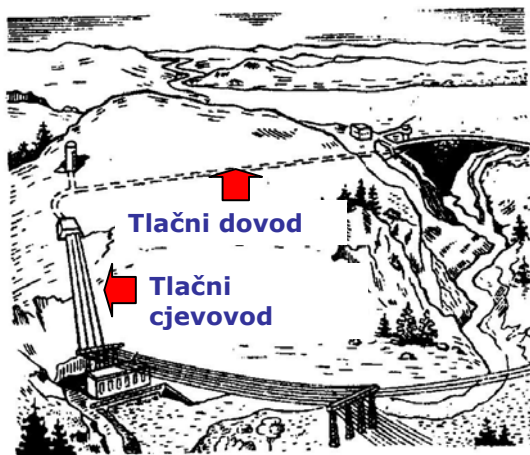
instalirani protok: $Q_i = 30 \text{ m}^3/\text{s}$ (3x8 + 1x6)

konstruktivni pad: $H_t = 102 \text{ m}$

instalirana snaga turbina: 24 MW (3x6,4 + 1x4,8)

maksimalna godišnja proizvodnja: ('81-'97) $E_{\text{max}} = 147 \text{ GWh}$ ('74)

Derivacijska HE s dovodom/derivacijom pod tlakom



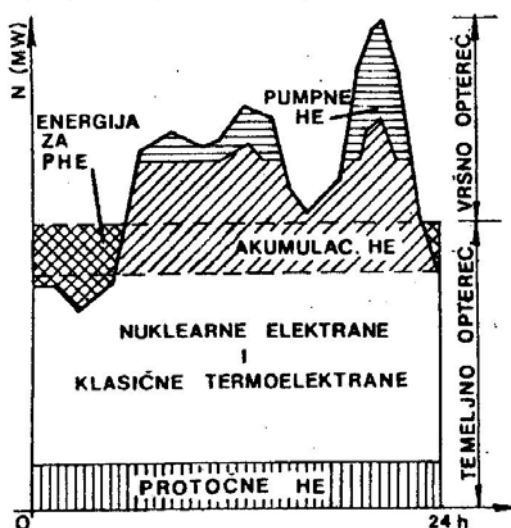
- H_1 , pad poteza korištenja,
- H_2 , **statički pad** hidroelektrane (GV-DV),
- H_3 , **konzentrirani pad**,
- H_4 , **neto pad**,
- ΔH_1 , gubitak na padu u području uspora,
- ΔH_2 , gubitak na padu u derivaciji,
- ΔH_3 , gubitak na padu u dovodu.

$$P = 9.81 \cdot Q \cdot H_{\text{neto}} \cdot \eta_t \text{ u (kW)}$$

Reverzibilne (pumpnoakumulacijske) HE

Crpno – akumulacijske HE (pumpno – akumulacijske HE) koriste se za pohranjivanje energije u vrijeme kada je ima (akumuliranjem vode na višoj razini – energija položaja) i kasnije korištenje u turbinskom pogonu (kada je potrebna ta energija).

U periodu skuplje energije (vršna potreba) na HE se proizvodi el. energija, dovodi se voda na turbine, a voda se sprema u bazen uz HE (na nižoj razini). U periodu jeftinije energije voda se crpi/pumpa u akumulaciju na višoj razini korištenjem energije iz npr. termoelektrana. Zarada je na razlici cijene SKUPE-JEFTINE el. energije. Dijagram energije – dnevno opterećenje prikazan je na sljedećoj slici.



Glavne grupe građevina HE

- ZAHVAT (brana, ulazna građevina) vode u prirodi
- DOVOD vode do strojarnice
- STROJARNICA – proizvodnja električne energije i
- ODVOD – povrat vode u prirodu

HE prema veličini

Razlikujemo standardne HE i male HE. Standardne su HE snage veće od 10 MW, a manje su male HE. One se dalje dijele na

- Male HE, $P < 10$ MW (5 MW),
- Mini HE, $P < 2$ MW,

- Mikro HE, < 500 KW.

Proizvodnja električne energije neposredno se ostvaruje u strojarnici u kojoj su smješteni agregat (turbina i generator), transformator i ostala oprema neophodna za vođenje i kontrolu rada HE.

Koncentrirana energija vode koristi se za pokretanje turbine (turbina). Na osovini turbine nalazi se i rotor generatora, u kojem se inducira električna energija, koja se preko transformatora predaje u elektroenergetski sustav.

TURBINE

Turbine su hidraulički strojevi u kojima se mehanička energija vode - potencijalna i kinetička pretvara u mehaničku energiju vrtnje stroja.

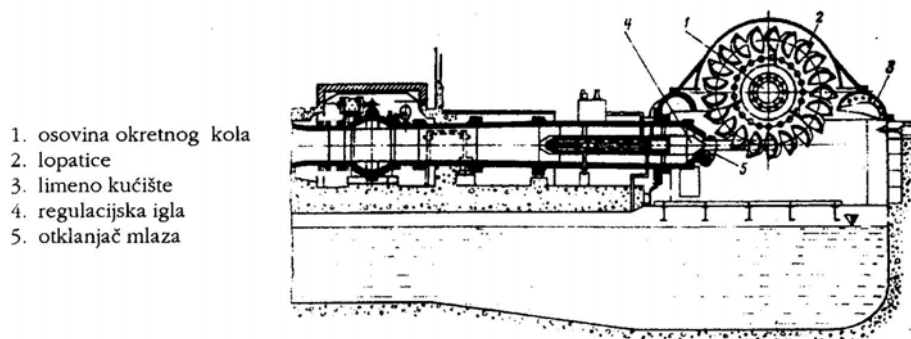
Podjela turbina s obzirom na opći tok strujanja vode kroz rotor turbine:

- Radijalne: Francis,
- Aksijalne: Propeler i Kaplan,
- Tangencijalne: Pelton,
- Radijalno-aksijalne: Dijagonalne.

Podjela turbina s obzirom na način djelovanja:

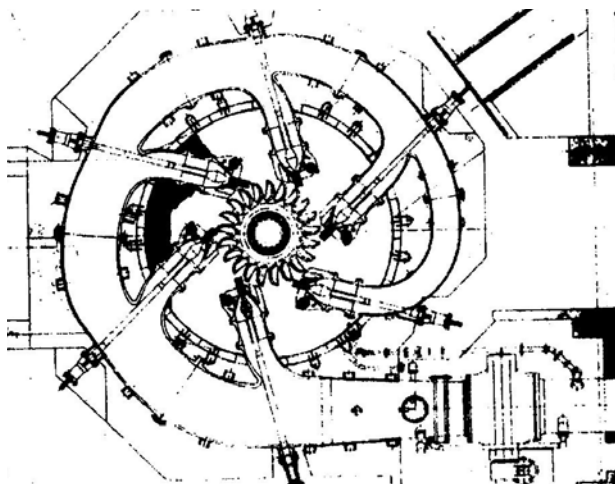
- Turbine slobodnog mlaza - AKCIJSKE: Pelton,
- Predtlačne turbine (s viškom tlaka) - REAKCIJSKE: Francis, Kaplan, Propeler, Dijagonalna.

Pelton turbine (H=400-1600m) primjenjuju se kod vrlo velikih padova (pritisaka).

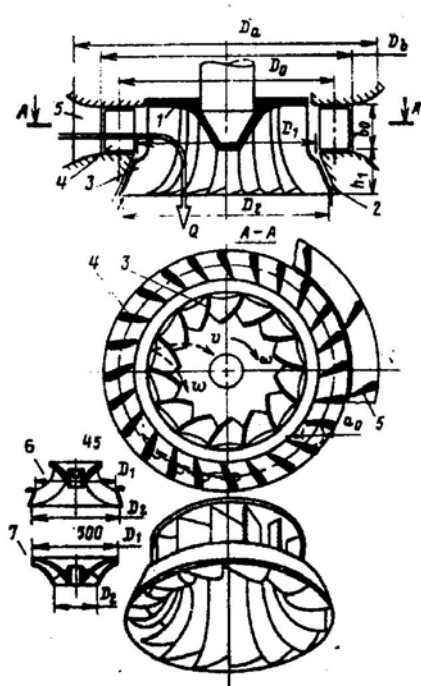


1. osovina okretnog kola
2. lopatice
3. limeno kućište
4. regulacijska igla
5. otklanjač mlaza

Pelton turbina s jednom mlaznicom



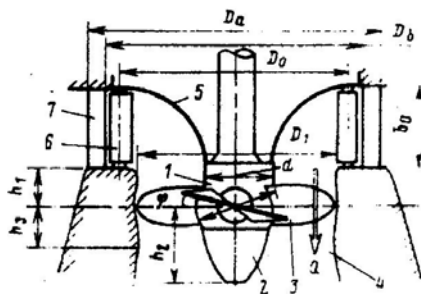
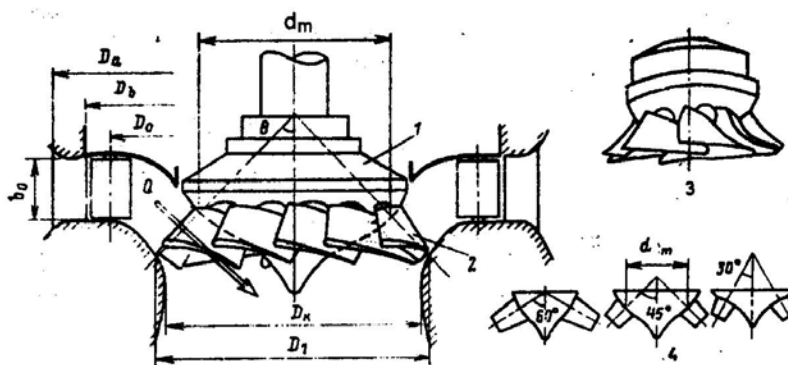
Pelton turbina s 6 mlaznica



Francis turbine ($H=30-700\text{m}$) primjenjuju se kod većih padova (pritiska).

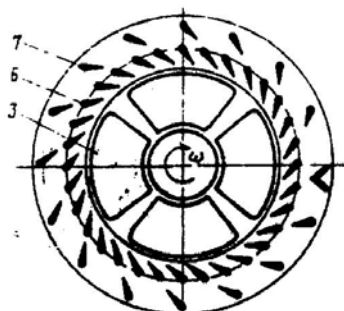
1. poklopac turbine
2. okretno kolo
3. lopatice okretnog kola
4. pokretne lopatice sprovednog kola
5. nepokretne lopatice statora
6. oblik rotora za pad 45 m
7. oblik rotora za pad 500 m

Dijagonalne turbine (H=40-220m)



Kaplan turbine (H=10-80m (propelerna 5-70m))

1. rotor
2. "kapa" okretnog kola
3. pokretne lopatice
4. difuzor
5. gornji poklopac turbine
6. pokretne lopatice sprovodnog kola
7. nepokretne lopatice



Ima rotor u obliku propelera, a lopatice mogu biti pokretne ili nepokretne, ako su nepokretne tada su to

PROPELER turbine. (Propeler turbine se koriste kod riječnih protočnih pribranskih HE).

Cijevne turbine – “bulb” (H=1-16 m)

Karakteristike turbina

Snaga turbine:

$$P = f(Q, H, D, n, g, \rho, \mu, \varepsilon)$$

Q-protok (m^3/s)

H – pad (m)

D – promjer rotora turbine (m)

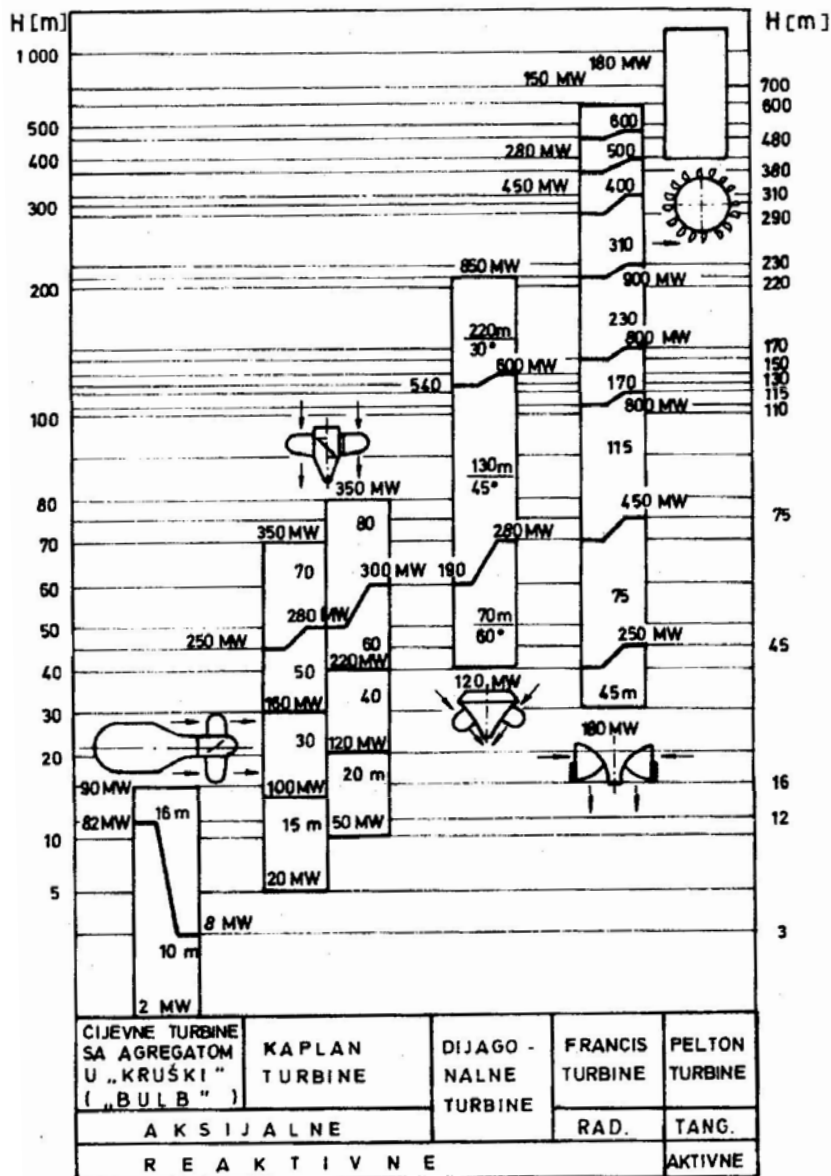
n - broj okretaja (okr/min)

g – ubrzanje sile teže (m/s^2)

ρ – gustoća vode (kg/m^3)

μ – dinamička viskoznost (Pa s)

ε – apsolutna hrapavost površina (m)



Područje primjene turbina u ovisnosti o padu s približnom snagom

Specifičan broj okretaja turbine n_s

Specifičan broj okretaja turbine n_s (u minuti) naziva se SPECIFIČNA BRZINA ILI KOEF. BRZOHODNOSTI TURBINE.

U zavisnosti od specifičnog broja okretaja daju se osnovna svojstva turbina (dimenzije, brzina pobjega, dimenzije neposrednog dovoda i odvoda) te je moguće u prvim

istraživanjima korištenja vodnih snaga na nekom dijelu vodotoka definirati gabarite strojarne u koju se smješta oprema.

Određuje se na temelju modela turbine snage 1 KS (0.73549 kW) i pada 1 m:

- Pelton $n_s = 2-70$
- Francis $n_s = 60-450$
- Propeler, Kaplan i cijevne $n_s = 400-1200$

