

Poglavlje 3

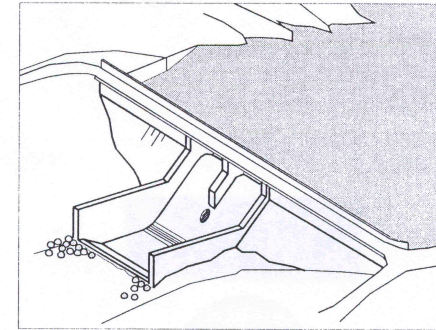
BRANE I PRATEĆI OBJEKTI



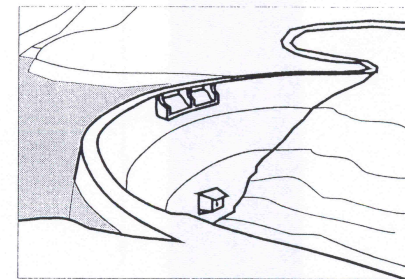
1.OPĆENITO O BRANAMA

1.1 Namjena brana

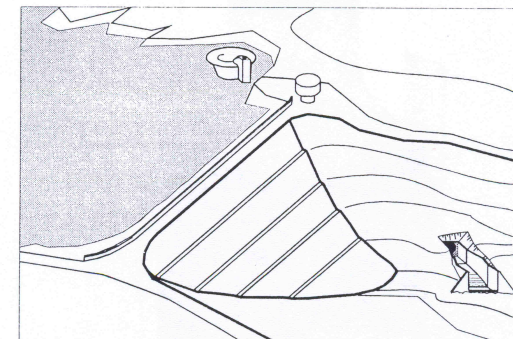
- stvaranje akumulacijskih bazena za izravnavanje protoka u riječnoj dolini
- stvaraju uspor za kontrolirano zahvaćanje vode iz vodotoka
- omogućavaju koncentraciju pada kod pribranskih hidroelektrana
- pad stvoren branom može se iskoristiti za gravitacijsku vodoopskrbu naselja, industrije i drugih korisnika, kao i za održavanje razine potrebne za plovidbu



a) Betonska gravitaciona



b) Lučna



c) Nasuta

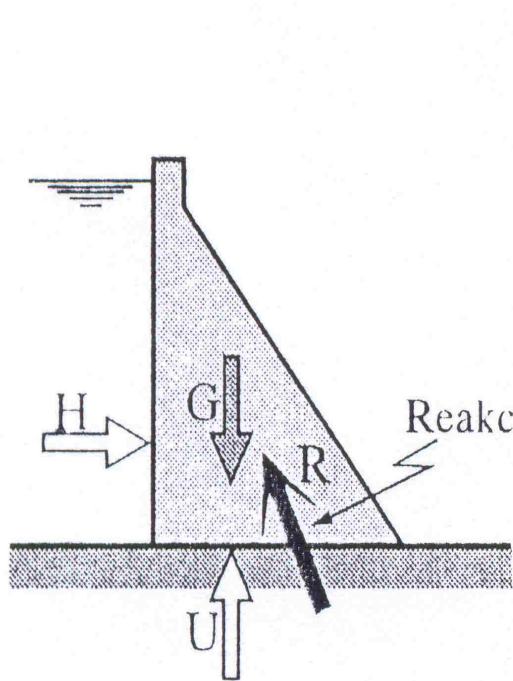
- Brane spadaju među najstarije hidrotehničke građevine, i među najstarije građevine uopće.
- Pojava brana proteže se unatrag do prvih dana civilizacije.
- Tehnologija projektiranja i izgradnje brana i dalje napreduje, mada se može reći da je doživjela vrhunac u prvoj polovici 20-tog stoljeća.
- Smatra se da trenutno u svijetu postoji oko 300 000 brana, od kojih je preko 30 000 tzv. visokih brana.
- Brane se proučavaju ne samo zbog svog značaja i zastupljenosti, već i da bi se na njihovom primjeru sagledali problemi, opterećenja, i moguća rješenja u projektiranju i izgradnji ostalih hidrotehničkih objekata. Tako su nasute brane slične nasipima, a betonske gravitacijske brane mogu biti primjer projektiranju većeg broja betonskih hidrotehničkih konstrukcija.

1.2. Tipovi brana

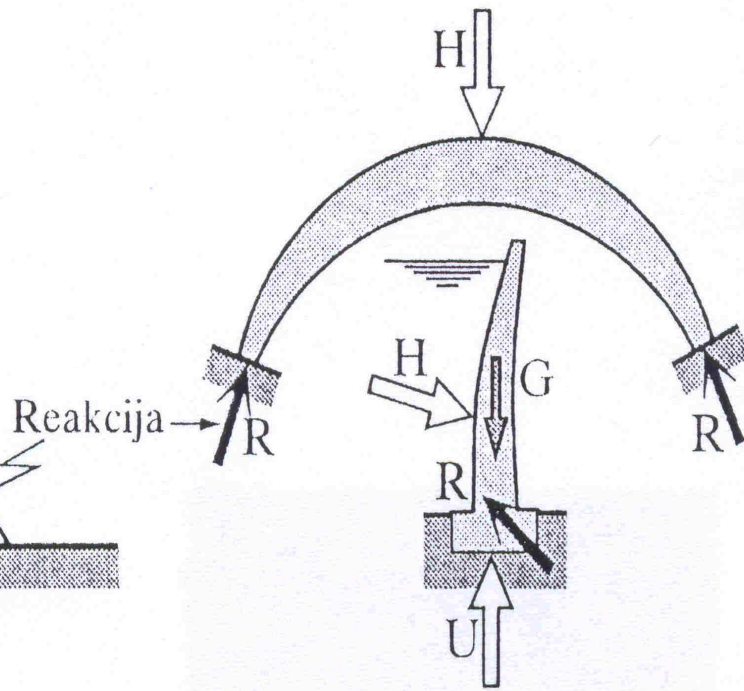
Postoji više podjela brana, a ovdje ćemo navesti samo najopćenitije:

a) Prema načinu prenošenja opterećenja brane se dijele na:

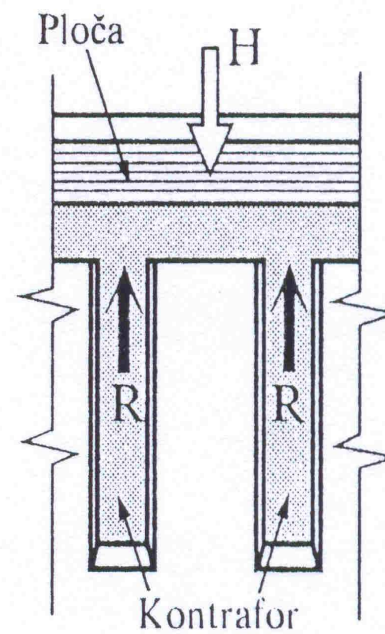
- 1) Gravitacijske, koje se suprotstavljaju opterećenju vlastitom težinom koju, zajedno s opterećenjem, prenose na tlo u temelju.
- 2) Lučne, koje se opiru opterećenju lučnim djelovanjem, a sile (opterećenje) prenose u bokove i dno doline.
- 3) Kontraforne, koje se opiru opterećenju grednim djelovanjem, a grede (koje mogu biti armirano-betonska platna, zatvarači-ustave, ili svodovi-lukovi) prenose opterećenje na zidove – kontrafore, koji ga dalje prenose u temelj.
- 4) Kombinirane: Olakšane i Lučno –gravitacijske



1. Gravitaciona



2. Lučna



3. Kontrafora

b) Prema materijalu od koga se grade brane mogu biti:

- 1) Betonske (od klasičnog betona ili "valjanog" betona - "rolkrita")
- 2) Nasute zemljane brane
- 3) Nasute kamene brane – (od kamenog nabačaja ili "valjanog" kamena)
- 4) Zidane brane (od kamena vezanog cementnim malterom)
- 5) Drvene brane
- 6) Metalne brane

Od prethodno nabrojanih tipova najzastupljenije su nasute i betonske brane pa će se one proučavati u daljem izlaganju.

Statistika pokazuje da je oko 90% brana u svijetu nasutih, bilo od zemlje ili kamenog nabačaja → posljedica dobrih osobina nasutih brana :

- mali zahtjevi za nosivošću temelja,
- laka dostupnost prirodnog materijala za nasip,...

c) Prema konvenciji međunarodnog udruženja za visoke brane ICOLD (International Commission on Large Dams) brane se po veličini mogu svrstati u:

1) Visoke brane → građevinska visina (od najniže kote temelja do krune) prelazi 15 m

(Visoke brane mogu biti i niže od 15 m, ako im je dužina u kruni veća od 500 m, ili stvaraju akumulaciju veću od 100 000 m³, ili su im evakuacijski organi dimenzionirani na protok veći od 2000 m³/s).

2) Niske brane

d) Prema načinu evakuacije velikih voda brane mogu biti:

1) Preljevne, kod kojih se voda preljeva (pri evakuaciji velikih voda) preko posebno oblikovanog preljevnog dijela.

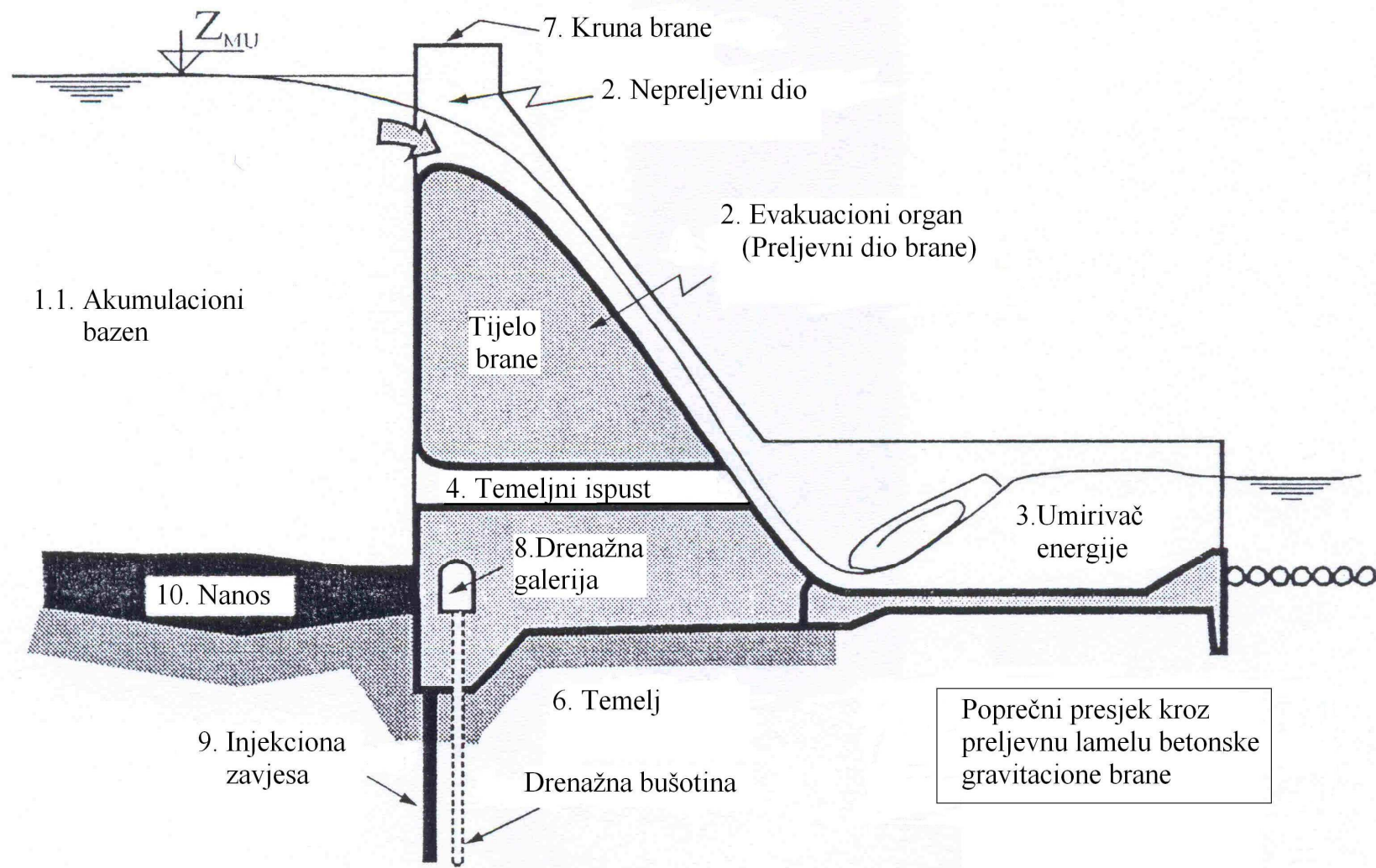
2) Nepreljevne, koje nisu predviđene za prelijevanje pa se za evakuaciju velikih voda koristi poseban objekt (pr. preljevna brana)

3) Preljevno-nepreljevne, kod koji je dio brane preliven, dok ostatak konstrukcije nije predviđen za prelijevanje (betonske brane).

1.3. Osnovni elementi brane

Neovisno o tipu, veličini i namjeni, većina brana ima određene obvezne elemente, koji su prikazani na slici 1.3:

1. Nepreljevni dio brane, je sama brana – pregrada za stvaranje akumulacije.
2. Evakuacijski organ je objekt koji omogućava kontroliranu evakuaciju velikih voda (može biti u sklopu tijela brane, ili neovisan objekt).
3. Umirivač energije je sastavni dio evakuacijskog organa, koji smiruje energiju preljevne vode, kako ne bi došlo do potkopavanja temelja, i rušenja brane
4. Temeljni ispust omogućava pražnjenje akumulacije i ispiranje nanosa
5. Zahvat omogućava kontrolirano zahvaćanje vode za korisnike iz akumulacije



6. Temelj sačinjava *sredina* (stijena ili tlo) ispod i oko objekta, koja je uslijed opterećenja i prisustva vode, kao i uslijed geotehničkih radova (injektiranje, dreniranje), promijenila naponsko i fizičko stanje.

7. Kruna brane je horizontalna traka na vrhu brane duž koje je omogućen promet preko brane

8. Drenažni sustav omogućava smanjenje uzgona u brani i temelju, i kontrolirano odvođenje filtracijske vode iz brane i temelja. Sastoji se od drenažnih bušotina, galerija (po potrebi, pumpi i ostale neophodne opreme) ili slojeva tucanika zaštićenog filtrom, ovisno o tipu brane i tipu drenaže.

9. Injekcijska zavjesa i/ili zastor sprečava ili produžava put filtracijskoj vodi, čime smanjuje uzgon i filtracijski protok kroz branu i temelj.

Pored nabrojenih elemenata brane treba spomenuti i :

10. Nanos koji se, kako je naprijed objašnjeno, ne može izbjeći, i na koji uvijek treba računati.

11. Akumulacijski bazen zbog kojega se brana gradi.

12. Upravna zgrada za upravljanje branom i pratećim objektima.

13. Objekti za skretanje rijeke tijekom gradnje, koji omogućavaju kontrolirano skretanje vode uz korita u kojem se nalazi temeljna jama.

Potrebno je još definirati i:

14. Os brane, kao zamišljenu ravan duž brane

15. Građevinsku visinu brane, kao razliku između kote krune brane i najniže kote u temelju.

16. Hidrauličku visinu brane, kao razliku između kote maksimalnog uspora kote dna rijeke u profilu brane prije izgradnje.

17. Dužinu brane u kruni, kao udaljenost između obala, mjereno po osi brane.

1.4. Izbor pregradnog profila

pregradni profil – mjesto na kojem će se brana podići :

- Prvi je zadatak pri projektiranju svake brane → brane određuje mogući volumen akumulacije i veličinu sliva, a time i hidrološki potencijal raspoloživ za moguću potrošnju.
- Geološke i geomehaničke karakteristike tla na mjestu pregradnog profila bitno utječu na uvijete fundiranja, koji su jedan od najvažnijih činitelja za određivanje tipa brane. Zato je neophodno da odabrani profil bude **optimalan**.
- Zahtjeva se da volumen akumulacije bude što veći, a sa što jeftinijom branom.
- Traži se da mjesto brane omogući zahvaćanje dovoljne količine vode za podmirenje potreba korisnika, to jest da pokrije što veći sliv.
- Treba zadovoljiti tehnički dio zahtjeva: **stabilnost** objekta je, svakako, najvažnija, ali se ne smije zaboraviti ni **vododrživost**, kao ni **dostupnost građevinskih materijala**.

- Ekonomskom analizom svih potencijalnih profila, a na osnovi učinjenih tehničkih rješenja, dolazi se do optimalnog pregradnog profila.
- Rezultat ekonomske analize nije jedini mjerodavan za izbor profila. Često odluku donose faktori okoline (ekologija i kulturno naslijeđe), kao i politički činitelj.

Prema gore navedenom, najvažniji činitelji pri izboru pregradnog profila (profila brane) su:

1. Količina vode na profilu (koja, uz odgovarajuće izravnavanje, treba da zadovolji zahtjeve korisnika). Kako bi se utvrdila količina vode neophodni su pouzdani hidrološki podaci kojima se dokazuje postojanje očekivanih protoka – niz srednjih mjesečnih (tjednih) protoka za period od najmanje 20 godina (poželjno je 40 i više godina).

Pored količine vode bitna je i kvaliteta pa se odgovarajućim analizama mora utvrditi:

- a) Da li je voda dobra za uporabu, i
- b) Da li je voda agresivna za objekt.

2. Topografija terena koja određuje:

- a) Volumen akumulacije, V , ovisno o visini brane H (što veći odnos V/H to bolje).
- b) Širinu pregradnog profila (dužina brane) od čega zavisi volumen brane, a često i tip i sama cijena brane.
- c) Dispoziciju (raspored) i tip brane i evakuacijskih organa, zahvata, i ostalih objekata.

Pošto je određena makro lokacija, brana se najčešće projektira nešto uzvodnije od najužeg presjeka doline. Time se omogućava bolje upiranje bokova objekta na strane doline.

3. Geološki i geomehanički uvjeti koji utvrđuju:

a) stanje sredine za temelje brane, i temelje pratećih objekata. Neophodno je odrediti otpornost na smicanje, nosivost, deformabilnost i vododrživost sredine. Ove osobine su često ključne pri izboru mikrolokacije pregradnog profila, kao i pri određivanju najpovoljnijeg tipa brane.

b) Vododrživost akumulacije može u potpunosti kompromitirati lokaciju, a također se mora voditi računa i o stabilnosti bokova akumulacije (treba imati na umu akumulaciju Vaiont, u sjevernoj Italiji, gdje je cijelo brdo sklizilo u akumulaciju i izazvalo katastrofalni poplavni val).

4. Dostupnost građevinskih materijala odgovarajuće količine i kvalitete.

Laka dostupnost određenog materijala utječe na cijenu, i može imati presudan utjecaj na izbor profila za branu, kao i tipa brane.

5. Troškovi eksproprijacije zemljišta i premještanja naselja, industrije i prometnica.

6. Ekološki, kulturni i politički činitelji

1.5 Izbor tipa brane

Izbor tipa brane usko je povezan s izborom pregradnog profila.

- Za određeni profil traži se tehnički i ekonomski najpovoljniji tip brane. (I tu ponekada utječu društveno – politički činitelji, ili ekologija, što može izmijeniti ekonomsku odluku).
- Da bi se moglo raspravljati o izboru tipa brane, neophodno je kratko upoznavanje s prednostima i nedostacima najzastupljenijih tipova brana

betonske: lučne i gravitacijske

nasute: zemljane i kamene

Prednosti nasutih brana su:

- a. Minimalni zahtjevi za uvjete fundiranja (naročito kod zemljanih brana), kako sa stajališta nosivosti, tako i sa stajališta slijeganja.
- b. Prilagodljivost gotovo svim vrstama terena, kako geološkim tako i topografskim: od stijene do aluvija, od široke ravničarske doline do uske klisure (naravno pod uvjetom da se može osigurati prostor za evakuaciju velikih voda).
- c. Mogućnost korištenja raznovrsnog i heterogenog materijala za nasip, često raspoloživog u blizini pregradnog profila.
- d. Jeftino i brzo ugrađivanje korištenjem mehanizacije, što zajedno s prethodnim omogućava malu cijenu koštanja po jedinici volumena brane.

Nedostaci nasutih brana su:

- a. Velika osjetljivost na prelijevanje (vanjsku eroziju)
- b. Velika osjetljivost na nekontrolirano procjeđivanje i ispiranje materijala (unutrašnju eroziju)
- c. Kao posljedica prve dvije mane: za evakuaciju velikih voda, kao za temeljni ispust i zahvat potrebni su posebni betonski objekti izvan tijela nasipa, a evakuacijski organ se mora dimenzionirati na veći protok nego kod betonskih brana zbog osjetljivosti nasipa na prelijevanje.
- d. Veliki opseg radova uslijed blagih kosina uzvodnog i nizvodnog lica, što se često nadoknađuje niskom jediničnom cijenom.

Prednosti betonskih brana su:

- a. Značajna izdržljivost na prelijevanje, istjecanje, što omogućava gradnju evakuacijskih organa i zahvata u sklopu same brane, kao i da se dimenzioniraju na manji protok (što smanjuje cijenu koštanja).
- b. Utrošak male količine materijala u odnosu na nasute brane, obzirom na daleko strmiji nagib kosina, posebno kod lučne brane.

Nedostaci betonskih brana su:

- a. Visoki zahtjevi za uvijete fundiranja (visoka nosivost i otpornost na smicanje, niska deformabilnost)
- b. Visoka jedinična cijena, obzirom na potrebu dovoženja cementa, ponekad i agregata, i na relativno spor rad, koji zahtjeva brojniju radnu snagu nego u slučaju nasutih brana.
- c. Kod lučnih brana se, pored stabilnosti bokova i dna doline, zahtjeva još i odgovarajući odnos visine brane i širine doline (jer je zbog načina prenošenja opterećenja lučna brana pogodna samo za relativno uske doline).

Može se zaključiti da će za određivanje tipa brane od velikog utjecaja biti:

a) Osobine tla na kome se brana fundira, odnosno dozvoljeni naponi u tlu, smičuća čvrstoća, dozvoljene deformacije temelja.

b) Povećanje visine brane povećava i napone u tlu, što za slabije nosiva tla daje prednost nasutim (prvenstveno zemljanim) branama.

S visinom brane se povećava i hidraulički gradijent filtracijske vode pa time raste i opasnost od ispiranja tla nizvodno od brane.

Ovo ide u prilog nasutim branama, obzirom da je kod njih hidraulički gradijent manji, jer je širina temeljne stope, a time i dužina filtracijskog puta, znatno veća.

b) Debljina naslaga aluvija i/ili drobine u riječnom koritu → ekonomski se ne isplati uklanjati naslage da bi se betonska brana fundirala na zdravoj stijeni (pogotovo za debljine aluvija veće od 5-6 m) pa prednost opet ima nasuta brana.

c) Blizina i dostupnost potrebnih količina odgovarajućih građevinskih materijala.

d) Dozvoljena vrijednost slijeganja brane, opet daje prednost nasutoj brani (osim ako je nasip od kamena s uzvodnim armirano-betonskim ekranom).

e) Topografija terena. Uske doline od zdrave stijene dobre nosivosti često daju značajnu prednost lučnoj brani zbog malog utroška materijala.

f) Uvjeti za evakuaciju velikih voda favoriziraju betonske brane, posebno u uskim dolinama, u kojima je ograničen prostor za razvijanje preljevnog ruba (betonskih) preljevnih konstrukcija nasute brane.

g) Klimatski činitelji mogu značajno utjecati na izbor . Niske temperature i veliki broj kišnih dana daju prednost branama od kamena (u odnosu na zemljane i betonske brane).

1.6 Uzroci rušenja brana

Najvažniji uzroci rušenja brana su:

1. Nepredviđeno prelijevanje brane

Do prelijevanja brane može doći uslijed kvara na ustavama, ili greške pri upravljanju ustavama, ili uslijed nedovoljnog kapaciteta evakuacijskih organa. Betonske brane se u tom slučaju mogu "odlomiti", a nasute brane stradaju od progresivne erozije tijela brane.

Kako bi se izbjeglo prelijevanje brane neophodno je :

- a) Osigurati pouzdane hidrološke podloge i računati s poplavnim valom odgovarajuće veličine.
- b) Ispravno odrediti tip i kapacitet evakuacijskih organa, i takav kapacitet postići pravilnim izvođenjem i održavanjem objekta.
- c) Ako se za evakuaciju velikih voda koriste preljevi s ustavama, obvezno je previdjeti više pogonskih mehanizma, rezervna preljevna polja (u slučaju da neka od ustava otkaže) kao i odgovarajući način upravljanja ustavama i osigurati siguran prilaz ustavama.

2. Unutrašnja erozija materijala brane ili njenih temelja

Nekontrolirano filtriranje vode kroz temelje ili tijelo brane izaziva ispiranje (unutrašnju eroziju) materijala, i konačno rušenje objekta.

Često se javlja "privilegirani" put vode pored cijevi temeljnih ispusta ili drugih "stranih" tijela u nasipu brane.

Zato je neophodno:

a) Što potpunije poznavanje osobina sredine u kojoj se brana temelji, kao i materijala od kojeg se brana gradi.

b) Izbjegavati rješenja koja bi mogla izazvati nekontrolirano istjecanje (cijevi u tijelu nasipa brane, na pr.).

c) Ispravno izvođenje, osmatranje i održavanje svih osjetljivih mjesta gdje bi mogao stvoriti "privilegirani" put vode, ako je već neophodno da se takva mjesta (slabe točke) uopće projektiraju.

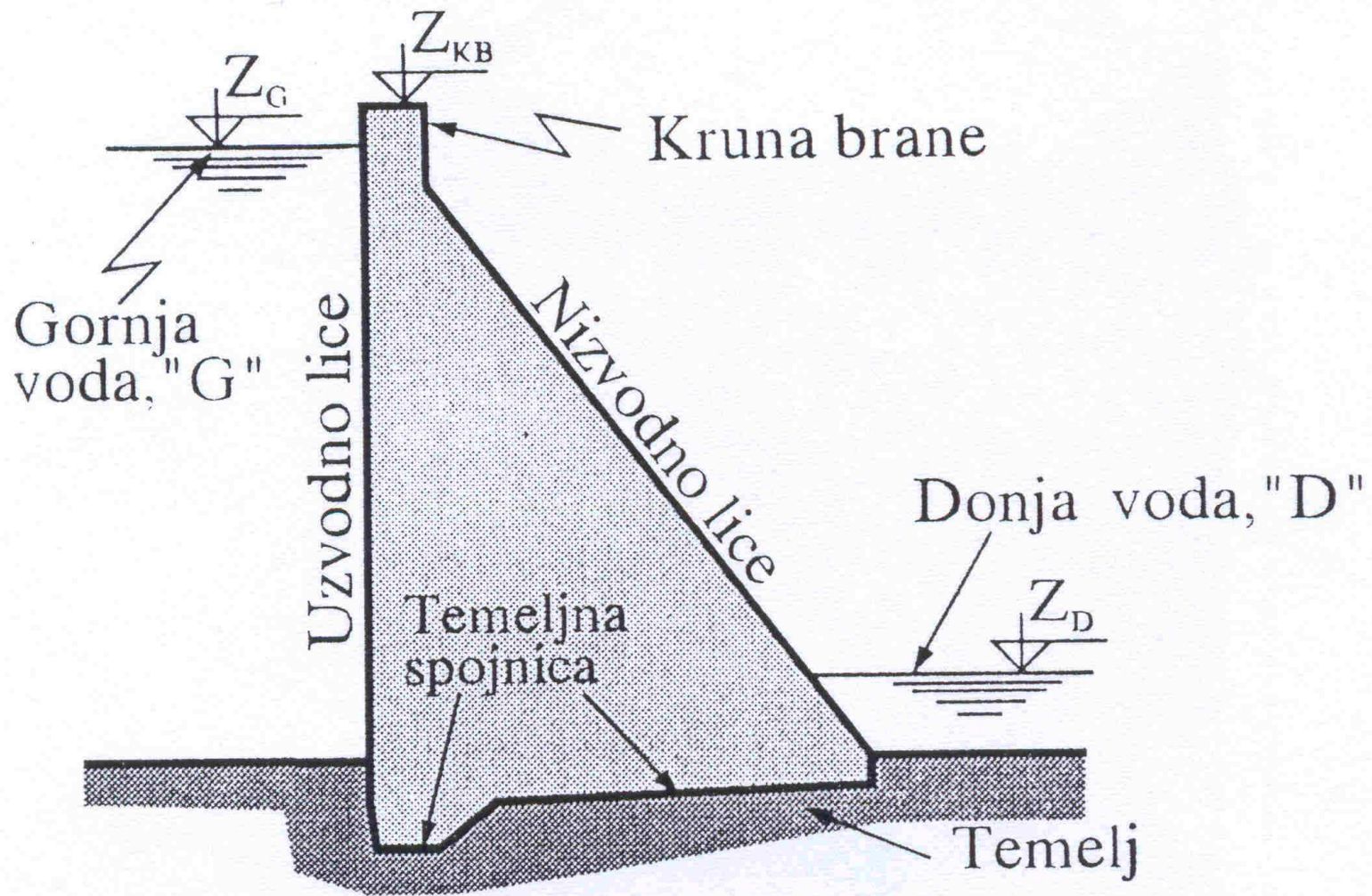
3. Neispravan statički proračun prilikom projektiranja brane

- ❖ Najčešće je u pitanju zanemarivanje ili podcjenjivanje nekih od sila koje narušavaju stabilnost brane – sile uzgona u prvom redu.
- ❖ Na svim značajnim branama ugrađuju se uređaji preko kojih se prati ponašanje brane u toku eksploatacijskog razdoblja (uređaji za oskultaciju).
- ❖ Bilježi se slijeganje brane, nastanak i širenje prsnuća i pukotina u brani i temelju, filtriranje i pritisak vode, i slično.
- ❖ Praćenje i analiza promatranih veličina omogućava da se na vrijeme uoče, i po mogućnosti otklone, uzroci oštećenja ili rušenja brane.
- ❖ Trebalo bi usporediti stvarno ponašanje brane i temelja s rezultatima proračuna iz projekta, čime se stječe dragocjeno iskustvo za buduće objekte.

- ❖ Za svaku visoku branu obavezno je procijeniti (fizičkim ili matematičkim modelom) širenje poplavnog vala koji bi nastao uslijed rušenja brane
- ❖ Na terenu treba označiti granicu ugroženog područja odakle se stanovništvo mora evakuirati u slučaju da dođe do opasnosti od rušenja brane.
- ❖ Danas se razvijaju specijalni kriteriji za analizu rizika. Oni su temeljeni na kvantificiranju nepouzdanosti i probabilističkom pristupu (**stohastičke metode**).

2. Betonske gravitacijske brane

- Suprotstavlja se vanjskim silama **vlastitom težinom**.
- I nasute brane formalno spadaju u tip gravitacijskih brana, jer se opterećenju suprotstavljaju težinom, ali je uobičajeno da se pojam "gravitacijske brane" odnosi na betonske brane.
- Grade se na **tlu** koje **ima dostatnu nosivost** kako bi primio težinu brane i opterećenja koja brana prenosi u temelj.
- Poprečni presjek ima oblik približno pravokutnog trokuta, s duljom katetom kao uzvodnim licem. Ovakav oblik presjeka proizlazi iz uvjeta stabilnosti.
- Po pravilu su prelivno-nepreljevne, što znači da se jedan dio brane (prelivni dio) oblikuje tako da se preko njega voda može slobodno ili kontrolirano prelijevati u nizvodno korito.
- Često se koriste i kao prelivni objekti (evakuacijski organi) nasutih brana.



3.1. Opterećenja koja djeluju na gravitacijsku branu

Prvi zadatak prilikom dimenzioniranja brana je analiza opterećenja.

Najvažnija opterećenja kod brana su:

- 1) Hidrostatički pritisak na uzvodno i nizvodno lice brane.
- 2) Uzgon (porni pritisak vode)
- 3) Dinamički pritisak vode uslijed vjetra i valova.
- 4) Pritisak leda.
- 5) Pritisak nanosa.
- 6) Sile od potresa.
- 7) Težina brane (i temelja).
- 8) Reakcija brane (temelja) - sila iste jačine i pravca, a suprotnog smjera od rezultante vanjskih sila (nabrojanih od 1 do 7).

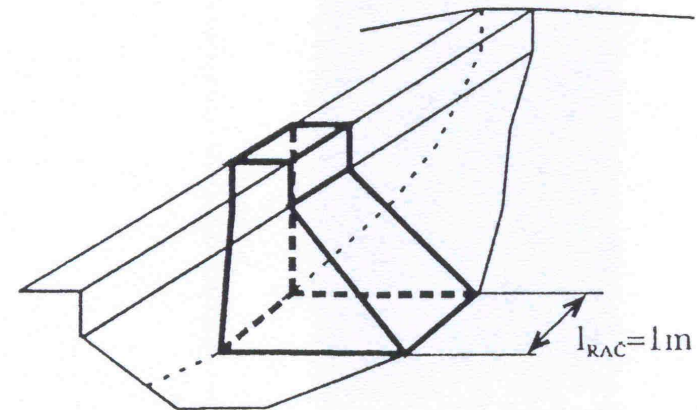
Gravitacijske brane se grade kao niz vertikalnih konzolnih nosača međusobno odvojenih razdjelnicama. Zato je svaka konzola (lamela) neovisna i mora biti stabilna za sebe.

Obzirom na malu širinu konzola (obično 6 -16 m), može se smatrati da je zadatak ravninski, pa se opterećenja i stabilnost izražavaju i računaju za 1 m dužine brane.

Obično se analiza opterećenja provodi za presjek s najvećom visinom, a po potrebi se analiziraju i drugi procesi (u osloncima, ili na mjestu promjene uvjeta fundiranja).

Zbog preglednosti, uobičajeno je svaku od promatranih sila rastaviti na horizontalnu i vertikalnu komponentu, otkuda se dobije horizontalna i vertikalna komponenta rezultante svih sila.

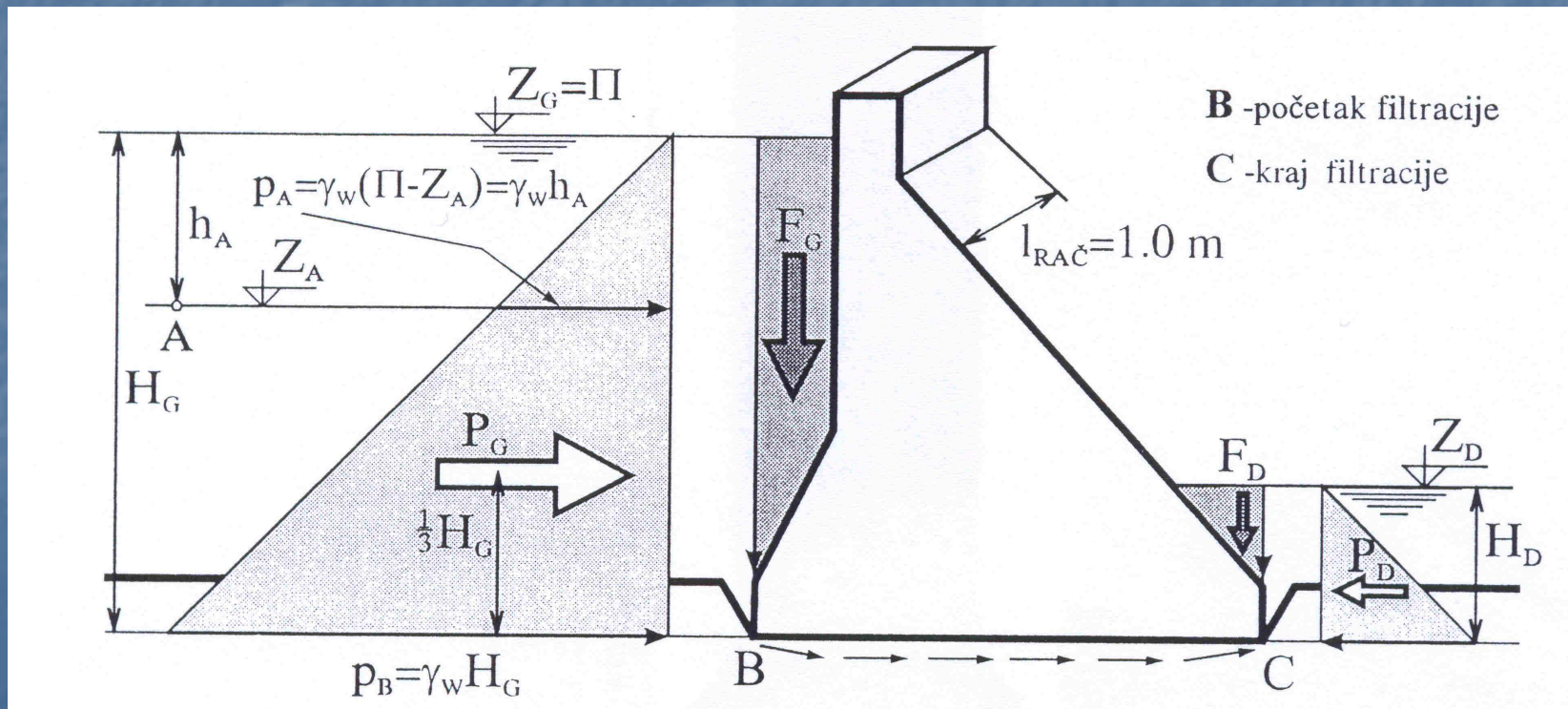
Pri analizi opterećenja pogodno je " figure" kojima se predstavljaju pritisci, težine, ili uzgon razdijeliti na jednostavne geometrijske oblike (trokut, pravokutnik, dio kruga).



2.1.1 Hidrostatski tlak

- Najznačajnije opterećenje.
- Ovo je tzv. vanjski pritisak vode (unutrašnji pritisak vode je uzgon - porni pritisak).
- U nekoj točki tekućine jednak je visinskoj razlici pijeziometarske kote i položajne kote promatrane točke, pomnoženo sa specifičnom težinom vode γ_w
- Ako je tekućina u dodiru s atmosferom pijeziometarska kota je ujedno i kota slobodne površine tekućine ($\pi = Z_G$) pa je jednak dubini vode u točki, pomnoženo sa specifičnom težinom ($p = \gamma_w h$).
- Treba imati na umu da je ovo tzv. **relativni tlak**, kod kojeg se izostavlja utjecaj atmosferskog tlaka (pritisak sloja zraka iz atmosfere), za razliku od **apsolutnog tlaka**, gdje se uključuje i atmosferski tlak ($p^{ABS} = p + p^{ATM}$).
- U praksi se najčešće radi s relativnim tlakom, obzirom da isti tlak djeluje u svim točkama objekta.

- Tlak integriran po površini na koju djeluje daje *silu hidrostatskog tlaka – hidrostatsku silu*.
- Horizontalna komponenta, P , hidrostatičke sile na neku površinu jednaka je hidrostatičkoj sili na vertikalnu projekciju te površine okomito na pravac djelovanja tražene horizontalne komponente.
- Vertikalna komponenta, F , hidrostatske sile na površinu jednaka je težini tekućine u volumenu između promatrane površine i horizontalne projekcije površine u ravnini pjezometarske kote.



- ❖ Za ravninski zadatak potrebno je odrediti silu koja djeluje na jedan dužni metar površine.
- ❖ Opterećenje je jednako u svim ravninama okomitima na promatranu površinu):
- ❖ **Horizontalna komponenta** hidrostatske sile po jedinici dužine na uzvodnom licu brane, P_G , jednaka **površini trokuta** koji predstavlja raspored pritiska po dubini, pomnoženo sa specifičnom težinom vode:

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

Gdje je:

H_G - dubina gornje vode, mjerena od nivoa vode ispred brane do kote spojnice na kojoj počinje filtracija (filtracija počinje na uzvodnom rubu temeljne spojnice).

G - indeks, označava gornju vodu

Sila P_G djeluje na rastojanju od $1/3 H_G$ od kote na kojoj počinje filtracija (u težištu površine opterećenja koje sila predstavlja – zamjenjuje).

❖ **Horizontalna komponenta** na nizvodnom licu, P_D (horizontalna sila od donje vode) je:

$$P_D = \gamma_w \frac{H_D^2}{2}$$

a, djeluje na rastojanju od $1/3 H_D$ iznad kote spojnice na kojoj se filtracija završava (nizvodni rub temeljne spojnice).

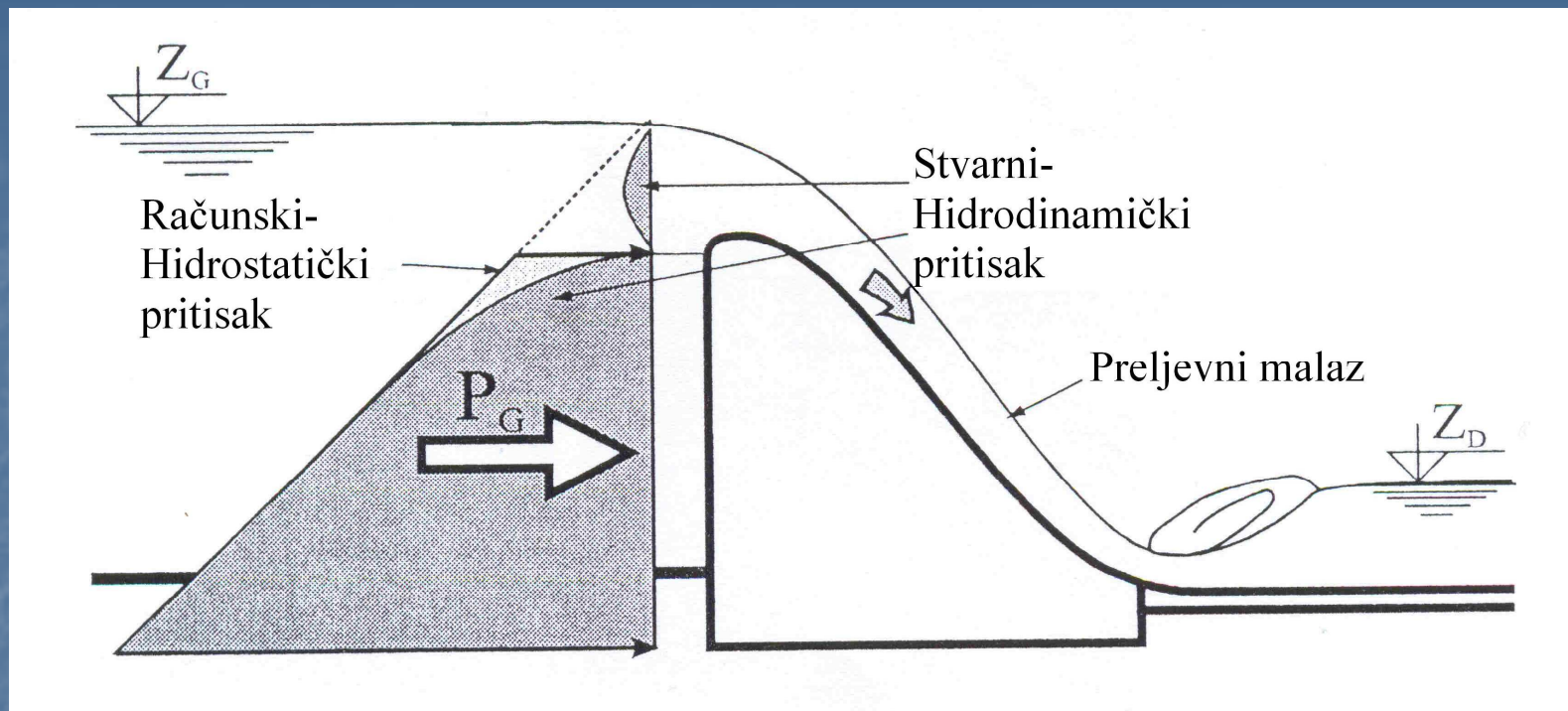
❖ **Vertikalna komponenta** (po jedinici dužine) na uzvodnom licu brane je:

$$F_G = \gamma_w V_G$$

i djeluje u težištu volumena - površine, V_G , (u težištu trapeza), a vertikalna sila na nizvodnom licu je:

$$F_D = \gamma_w V_D$$

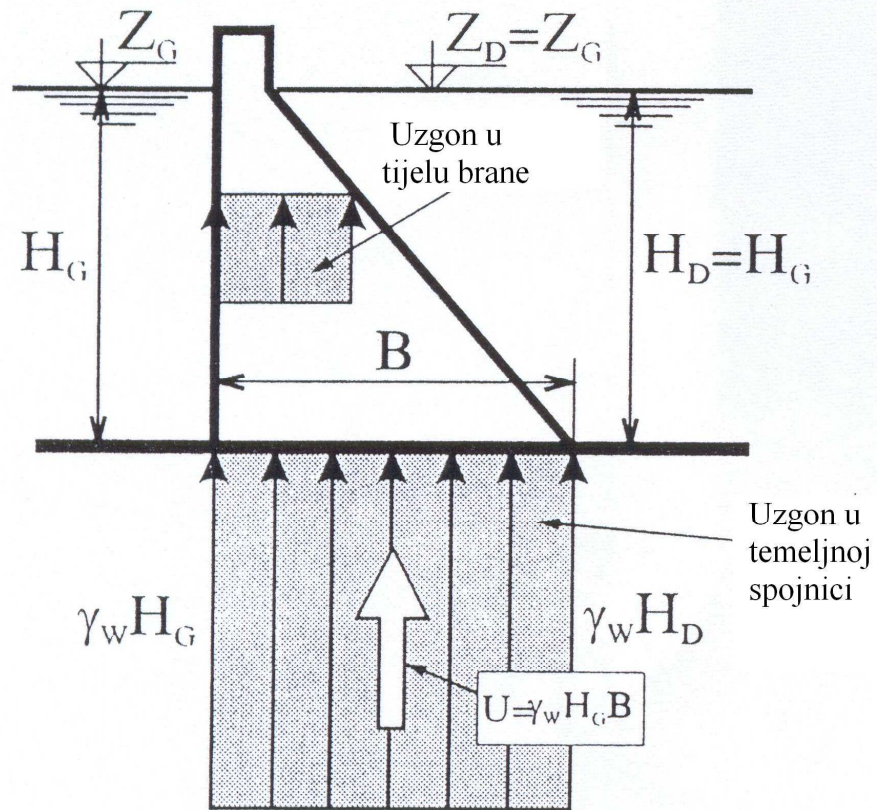
i djeluje u težištu trokuta iznad nizvodnog lica.



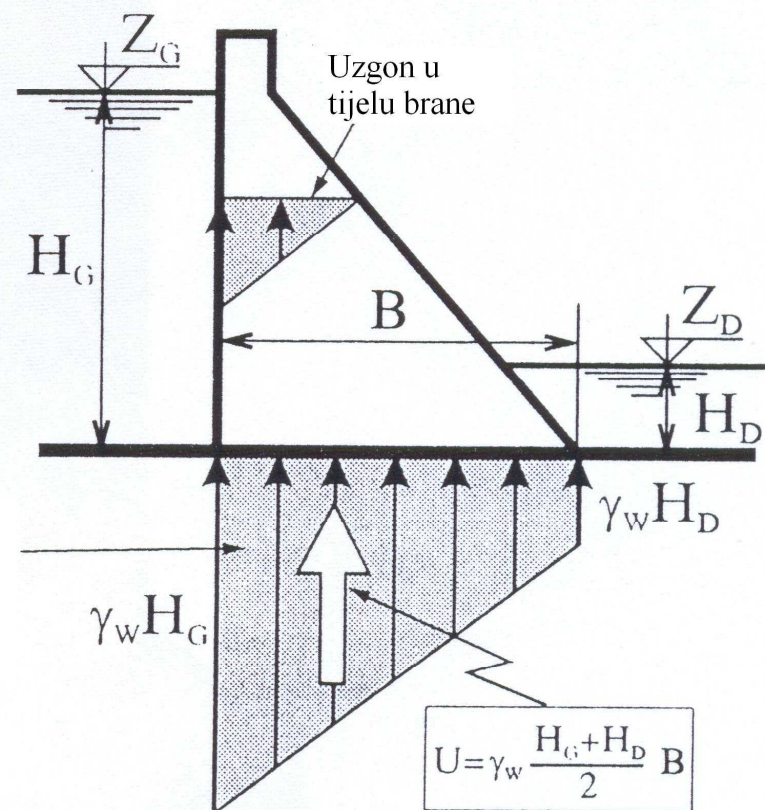
- Kod preljevnog dijela brane obično se pretpostavlja da preljevni mlaz ne djeluje na branu.
- To je zbog sigurnosti, jer je pritisak na donjem rubu mlaza jednak nuli pri računskom protoku, dok je pri manjim protocima pozitivan, što doprinosi stabilnosti.
- Na strani sigurnosti je i pretpostavka o hidrostatskom rasporedu tlaka na uzvodnom licu brane, jer je **stvarni – tzv. hidrodinamički tlak manji**.

2.1.2 Uzgon

- Beton i stijena su manje ili više porozne sredine → voda zavlači i filtrira kroz mnoštvo povezanih mikro i makro šupljina (pora, lomova , pukotina).
- **Uzgon je opterećenje kojim voda u šupljinama betona i temeljne sredine potiskuje objekt prema gore.**
- Djeluje i pri hidrostatskom stanju (kada voda u šupljinama miruje), i pri hidrodinamičkom (kada se kreće – filtrira).
- **Pri hidrostatskim uvjetima** uzgon jednak je težini vode između površine na koju djeluje (kontakt brane i tla) i horizontalne projekcije površine u ravnini pijeziometarske kote.
- Za ravninski zadatak, težina po jedinici dužine jednaka je površini između linije dodira duž koje djeluje uzgon, i pijeziometarske linije, pomnoženo sa specifičnom težinom vode.
- **Pri hidrodinamičkim uvjetima** pijeziometarska linija nije više horizontalna, već opada u smjeru tečenja jer se energija troši na gubitke pri filtraciji vode.

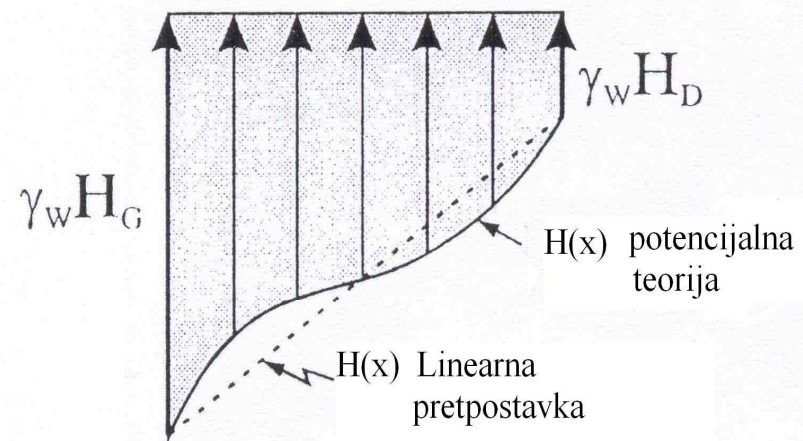
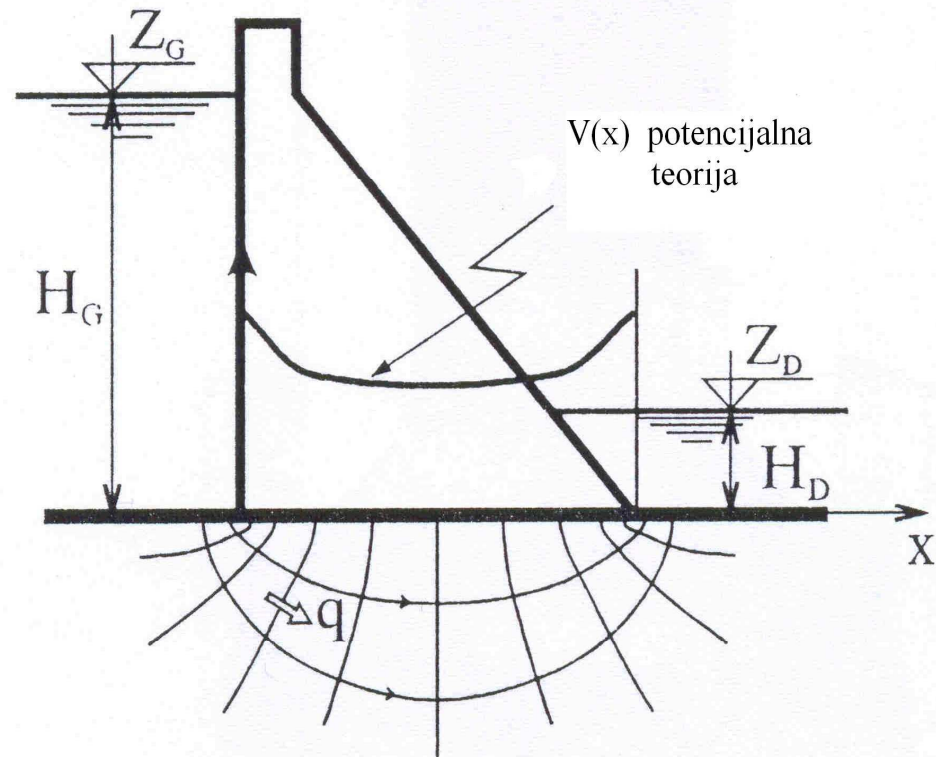


a) Hidrostaticki slučaj
(voda miruje)



b) Hidrodinamčki slučaj
(voda se kreće)

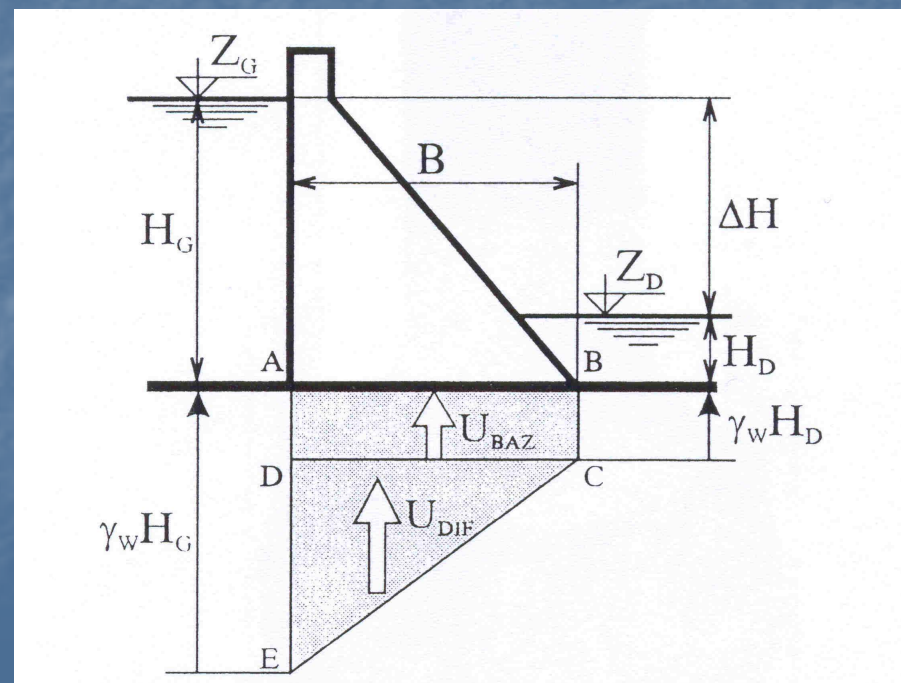
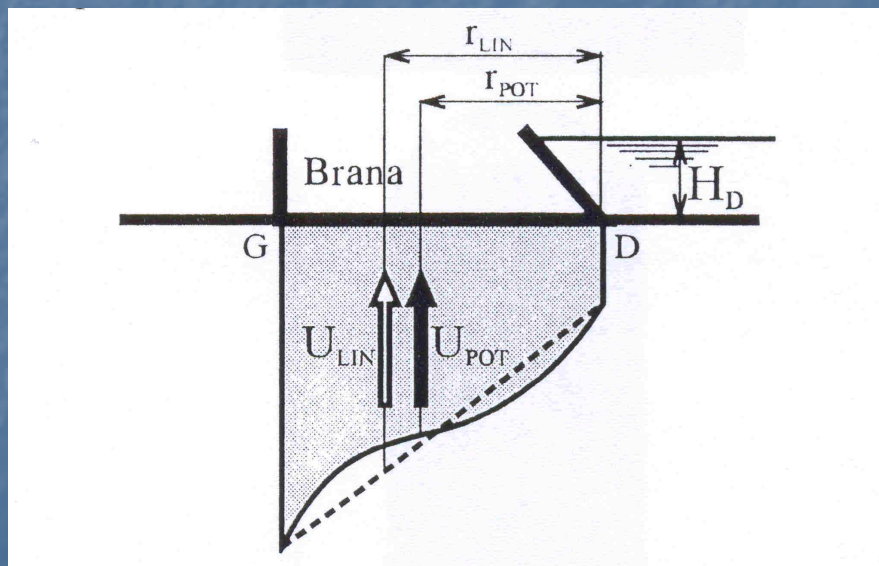
- U homogenoj i izotropnoj sredini brzina filtriranja vode ispod brane približno je konstantna (osim u blizini uzvodnog i nizvodnog ruba) pa se obično uzima da tlak, odnosno pijezometarska linija, opada linearno.
- Ovakva pretpostavka je često na strani sigurnosti, jer sila uzgona računata po linearnoj teoriji, U_{LIN} , daje veći moment prevrtanja oko nizvodnog ruba od sile računate po potencijalnoj teoriji U_{POT} (krak okretanja linearnog uzgona, r_{LIN} , veći je od odgovarajućeg kraka "potencijalnog uzgona", r_{POT}).
- Primjenom linearne teorije dobit će se podcijenjene vrijednosti uzgona za dio objekta na nizvodnom kraju filtracionog puta (za dno umirujućeg bazena).
- Pri procjeni filtracijske stabilnosti tla u temelju, treba imati na umu da se filtracijske brzine značajno povećavaju u blizini uzvodnog i nizvodnog ruba brane.



- ❖ Ako se prihvati pretpostavka o linearnoj promjeni pijeziometarske kote, sila uzgona, U , može se predstaviti kao površina mnogokutnika (pravokutnog trapeza ABCE), pomnoženo specifičnom težinom vode:

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

Sila djeluje u težištu površine.



Uzgon se obično razdvaja na dva dijela:

a) Bazni uzgon (potisak), U_{BAZ} , koji odgovara hidrostatskom tlaku donje vode, i

b) Diferencijalni (filtracijski) uzgon, U_{DIF} , koji odgovara pijeziometarskoj razlici između gornje i donje vode ($\Delta H = H_G - H_D$):

$$U = U_{BAZ} + U_{DIF} = \gamma_W B H_D + \gamma_W B \frac{\Delta H}{2}$$

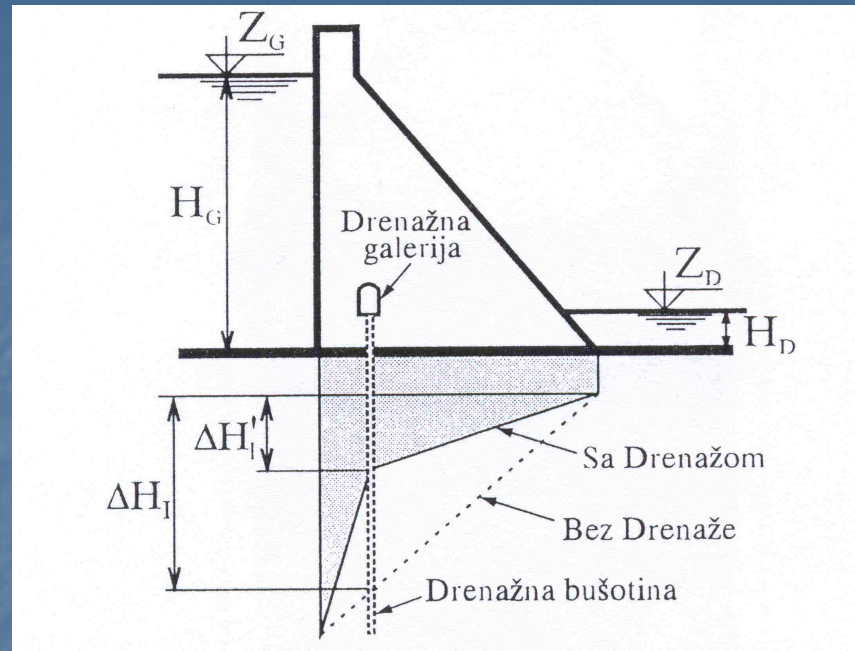
Postoji dosta načina kojima se može smanjiti diferencijalni uzgon (U_{DIF}):

1) Dreniranjem vode iz pukotina i pora:

→ smanjuje se filtracijski protok (a time i filtracijska brzina nizvodno od drenaže)

→ gubitak energije (*opada pijeziometarska razlika na potezu od drenaže do nizvodnog lica brane*).

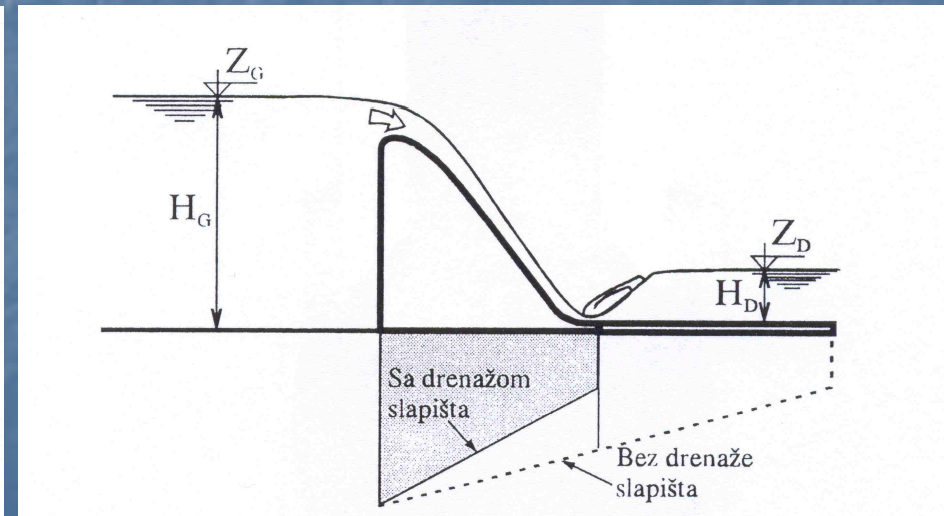
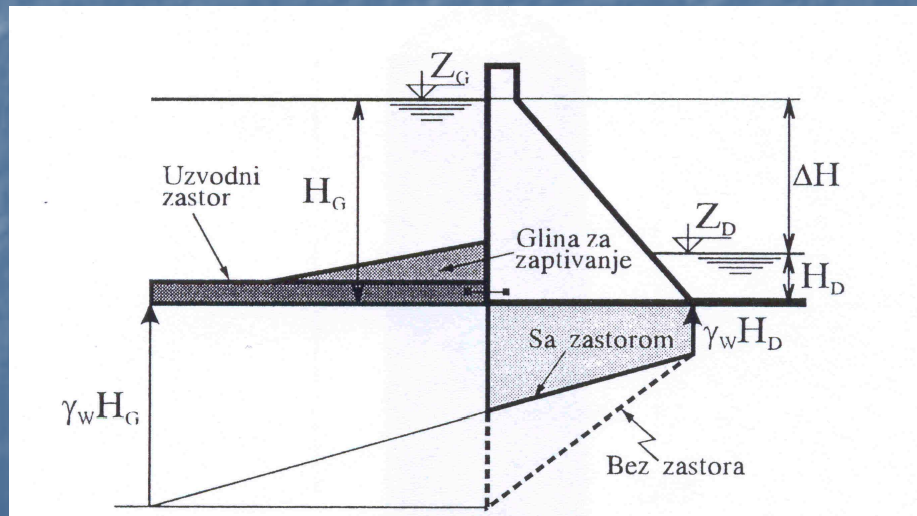
Rezultat: smanjuje se pritisak filtracijske vode tj. smanjuje diferencijalni uzgon

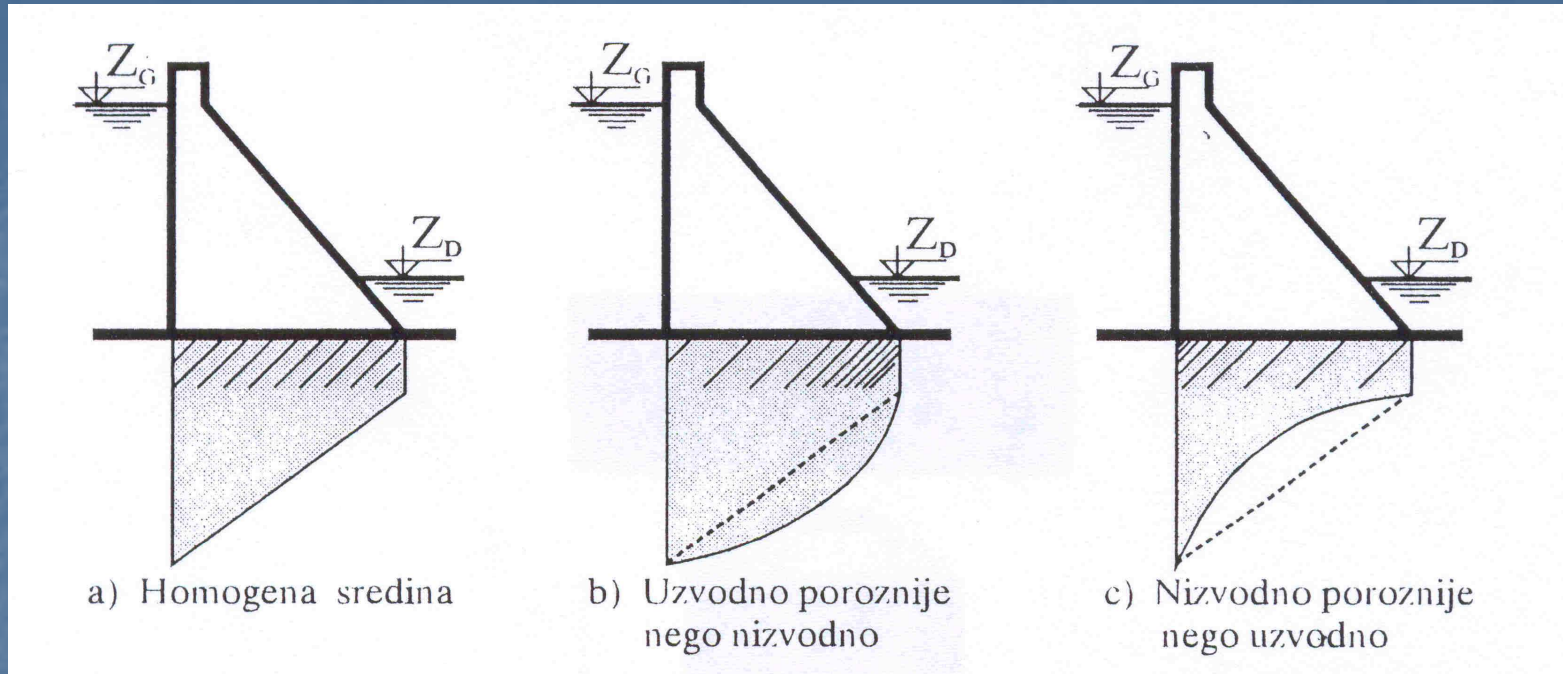


- U stjenovitim temeljima voda se drenira mrežom drenažnih bušotina.
- Drenažu postaviti što bliže uzvodnom licu brane, kako bi se dio presjeka na kome je pritisak umanjen učinio što većim
- Na dijelu presjeka uzvodno od drenaže gradijent pritiska je veći nego u slučaju nepostojanja drenaže (što povećava filtracijski protok na potezu od uzvodnog lica do drenaže)
- Filtracijska voda se iz drenažnih bušotina odvodi u donju vodu kroz kanale u drenažnoj galeriji (gravitacijom ili pumpanjem)

2) produženjem puta filtriranja vode uzvodnom horizontalnom i/ili vertikalnom zavjesom smanjit će se uzgon ispod brane:

- voditi računa da se u zavjesi ne jave pukotine, inače se efekt smanjuje, ili sasvim izostaje
- ispod slapišta (umirujućeg bazena) javlja se neželjeni efekt "nizvodne" zavjese s povećanim uzgonom
- dreniranje slapišta je rizično zbog mogućnosti pojave opasnih pulzacijskih hidrodinamičkih opterećenja pa se slapišne ploče obično osiguravaju od isplivavanja ankerima



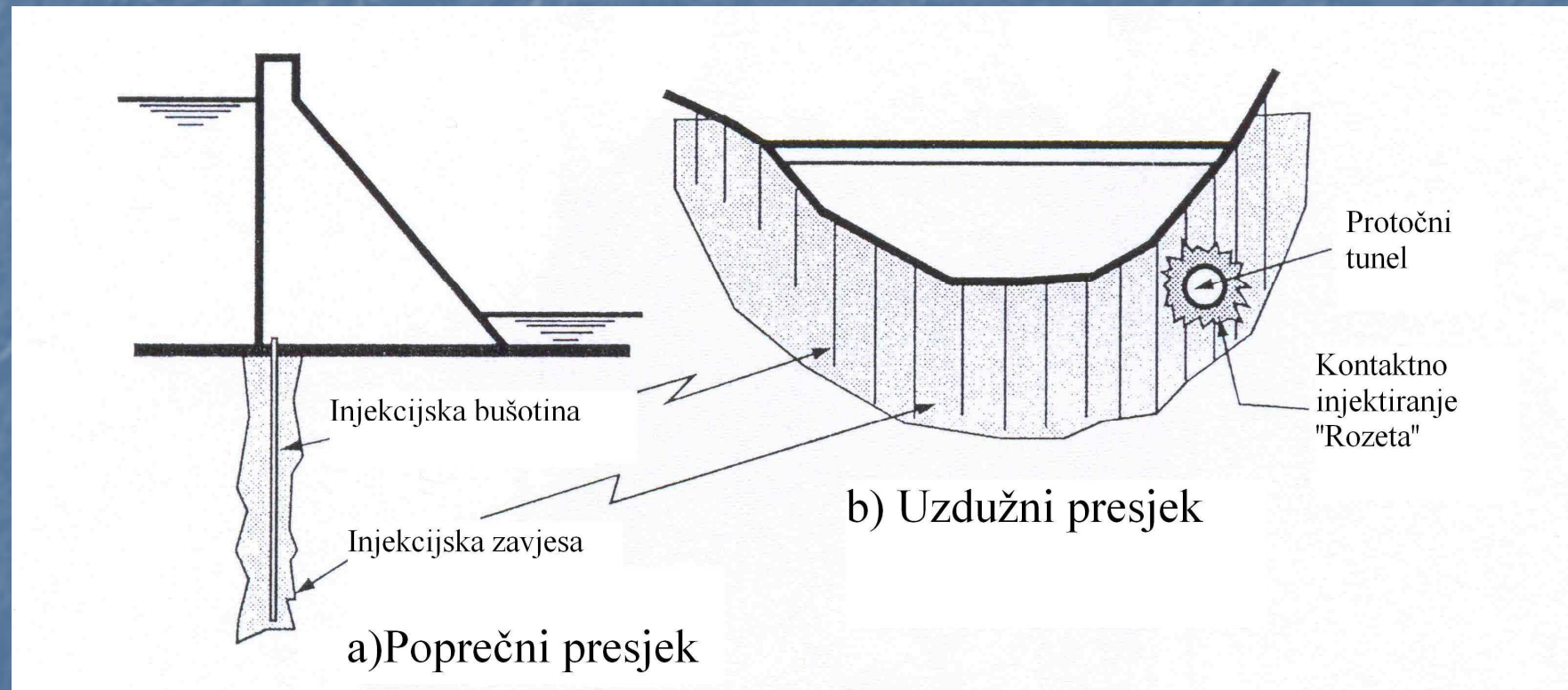


❖ u zoni velike vododrživosti **površina otvora** kroz koje voda filtrira je mala te su **otpori tečenju veliki** i pijezometarska linija brže opada

- povećanje otpora filtriranju injektiranjem na uzvodnom dijelu presjeka
- smanjenje otpora dreniranjem nizvodno od injekcijske zavjese

⇒ **heterogenost materijala** ⇒ maksimalno smanjenje uzgona

- kod stjenovitih sredina vododrživost se povećava **injektiranjem**
- kod tla (vezanog i nevezanog) vododrživost se povećava **zbijanjem**
- kod nevezanog tla često se koriste **dijafragme i priboji**



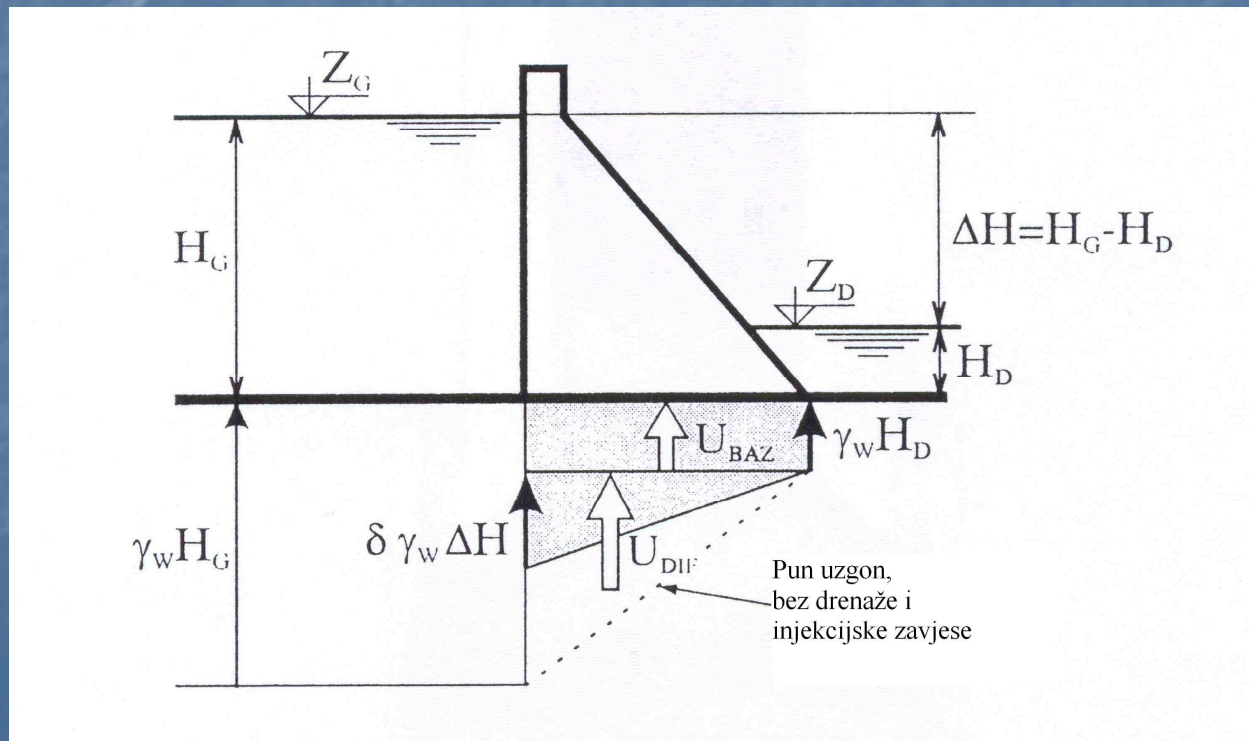
Injektiranjem i dreniranjem može se značajno smanjiti diferencijalni dio uzgona pa se izraz za uzgon aproksimira s:

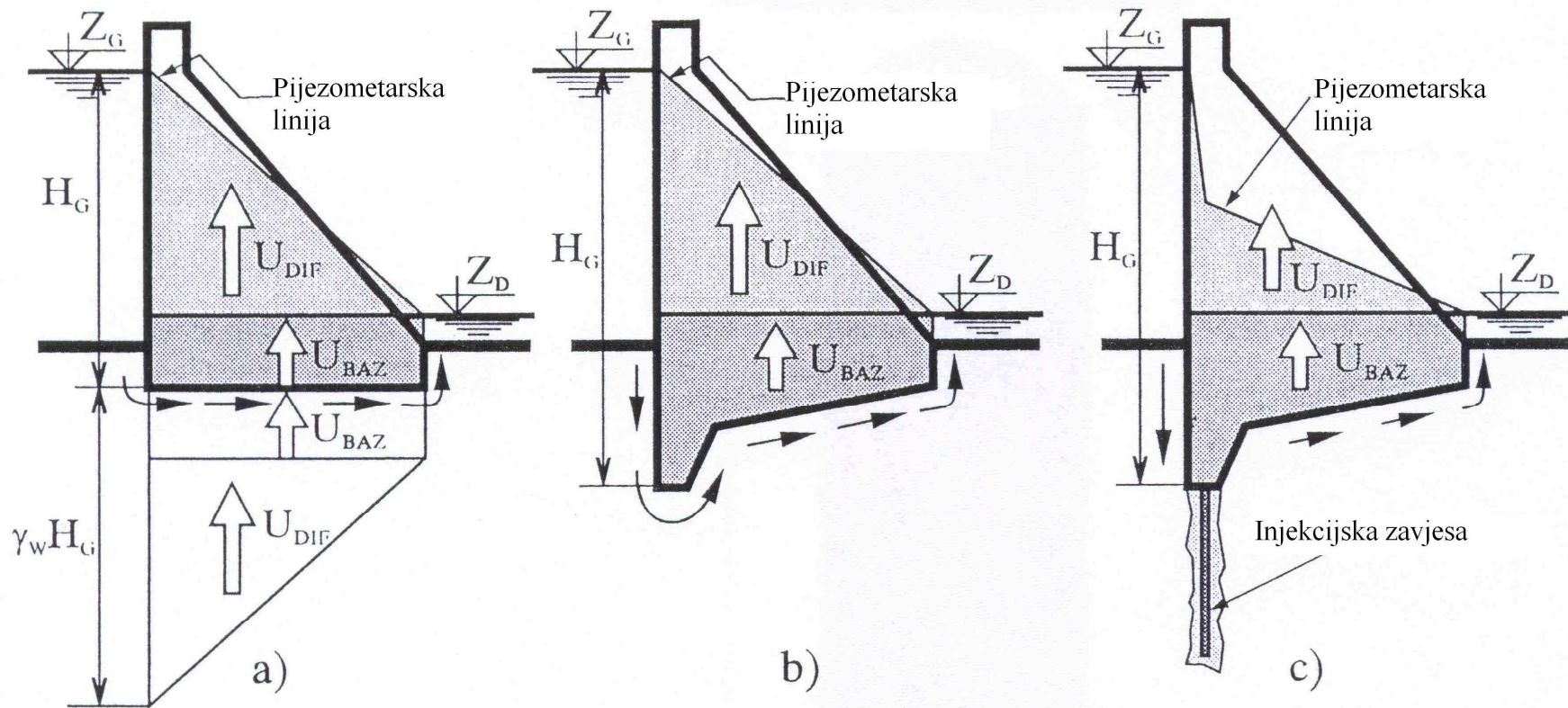
$$U = \gamma_w B H_D + \delta \frac{\gamma_w B}{2} \Delta H$$

-koeficijent δ kvantificira učinak drenaže i zaptivanja na smanjenje diferencijalnog uzgona ($0 < \delta < 1$)

- $\delta = 0$; idealnom slučaju kada su drenaža i injektirani zastor maksimalno učinkoviti

- $\delta = 1$; za slučaj bez drenaže i injektiranja javlja se pun diferencijalni uzgon



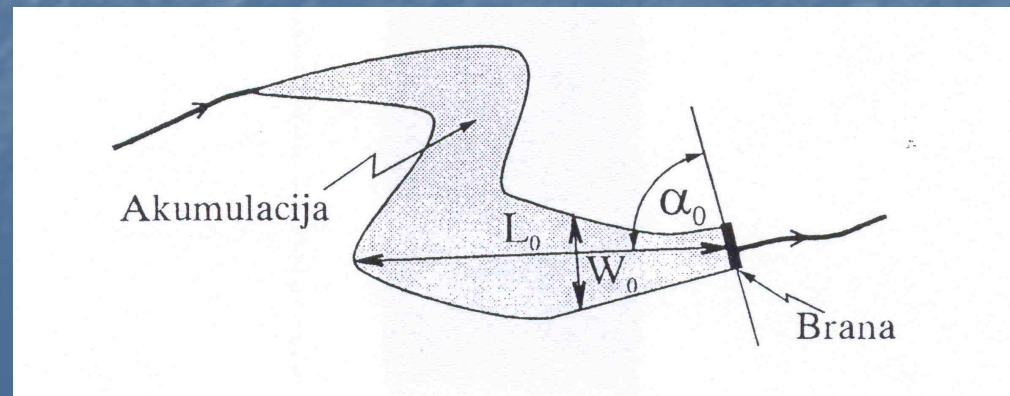


❖ Za složenu liniju dodira uzgon se dobije preko površine između linije dodira i pijezometarske linije.

❖ Uzgon je prikazan s obje strane linije dodira i pijezometarske linije, i s donje strane, kao opterećenje koje potiskuje branu na više .

2.1.3. Dinamički pritisak vode uslijed vjetra i valova

- Valovi izazvani vjetrom značajni su pri dimenzioniranju brane zbog **određivanja kote krune brane**.
- Na kotu maksimalnog uspora treba dodati visinu **mjerodavnog vala** uz obaveznu **rezervu** (tzv. "freeboard") od 0.5 -1.0 m.
- Kao mjerodavna visina uzima se tzv. "**značajna**" visina vala, h_v (Smith 1995). To je visina vala koji je viši od 87% valova koju izaziva vjetar mjerodavne jačine (brzine) i pravca na razmatranoj akumulaciji.
- Visina vala, h_v , razmjerna je brzini vjetra, V_{vj} , i duljini vodene površine u pravcu brzine, L_0 .



(Smith 1995):

$$h_V = 0.00513 V_{Vj}^{1.06} (KL_0)^{0.47}$$

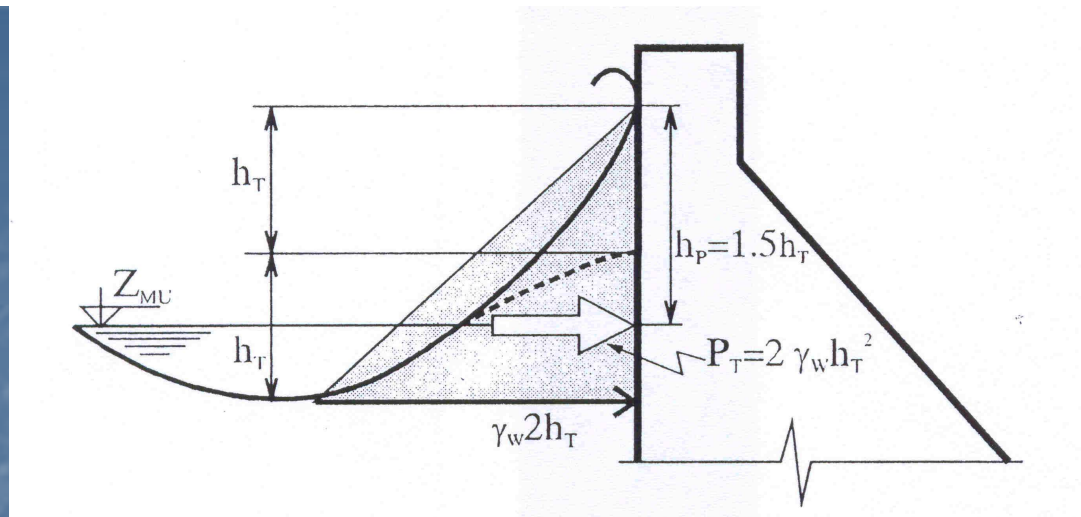
$$L_V = 0.187 V_{Vj}^{0.88} (KL_0)^{0.56}$$

gdje su h_V i L_V izraženi u [m], brzina vjetra V_{Vj} , u [km/h], a duljina pravca, L_0 , u [km]. Koeficijent, K , ovisi o odnosu srednje širine akumulacije i duljine pravca (W_0/L_0):

W_0/L_0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,0	2,0
K	0,00	0,26	0,40	0,51	0,67	0,83	0,90	1,00

Jednadžbe vrijede ako je voda uzvodno od brane dovoljno duboka tj. ako je $H_G > 1/4 L_V$

- ❖ Mjerodavna brzina i pravac vjetra biraju se s ruže vjetrova.
- ❖ Za osnovno opterećenje računa se s vjetrom povratnog perioda od 20 godina, a za izuzetno opterećenje se uzima povratni period od 50-100 godina, a usvaja se pravac koji daje najveću visinu vala.
- ❖ Valove stvara srednja jačina vjetra, a ne izrazito jaki udari, pa u računu treba **koristiti srednju brzinu**, a ne brzinu udara.



Visina vala i sila od vala na gravitacijsku branu

- ❖ Val koji naiđe na prepreku "penje" se iznad visine koju ima u vodi udaljenoj od prepreke (obale).
- ❖ Ukupna visina kojom val udara (pritiska) vertikalnu prepreku:

$$h = 1.5h_v + 0.5 h_v = 2 h_v$$

h_p visina vala iznad nivoa mirne vode pri udaru u vertikalnu prepreku

dno vala ispod nivoa mirne vode

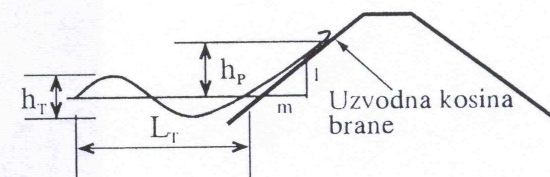
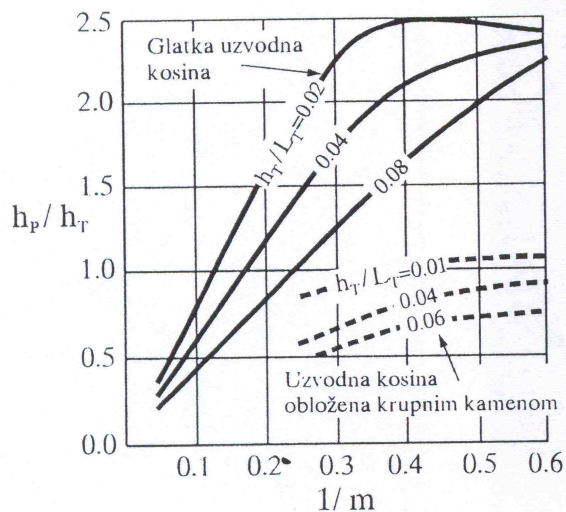
- Ako se usvoji hidrostatski raspored tlakova u valu, može se prihvatiti da je sila od vala, na 1 m duljine brane:

$$P_V = \frac{\gamma_W (2h_V)^2}{2} = 2\gamma_W h_V^2$$

- Obično se uzima da sila djeluje na koti nivoa mirne vode (Smith, 1995)
- Ako pravac vjetra zatvara kut α s pravcem osi brane, sila će biti:

$$P_V = 2\gamma_W h_V^2 \sin \alpha_0$$

- U slučaju **kosog uzvodnog lica** (kod nasipa), penjanje vala uz konturu može biti znatno više nego kod vertikalnog lica. Odnos penjanja, h_p , prema visini vala, h_V , ovisi o nagibu kosine "m", hrapavosti podloge, i odnosa visine vala i valne duljine, h_V/L_V



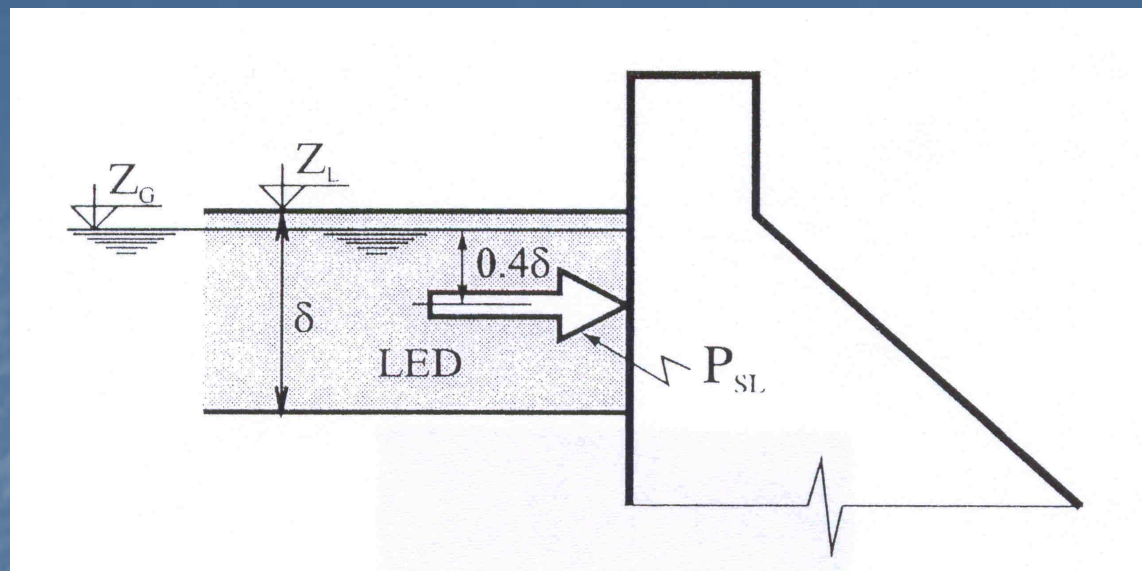
2.1.4. Pritisak leda

Led može djelovati na brane na dva načina:

- a) Pritiskom čvrstog pokrivača – statički pritisak leda i
- b) Silom koju izaziva udar ledene sante – dinamički pritisak leda.

a) Statički pritisak leda

- Nastaje uslijed širenja ledenog pokrivača pri naglom otopljenju.
- Led se pri snižavanju temperature skuplja i stvara pukotine u pokrivaču u koje prodire voda i stvara novi gušći led.
- Ako nastupi naglo otopljenje, led se širi, i ukoliko nema kuda (krute - stjenovite obale akumulacije) počinje pritiskati branu.
- Pritisak od leda se može javiti i zbog spuštanja razine vode ispod već formiranog ledenog pokrivača.
- Pritisak je proporcionalan prirastu temperature i debljini leda.



- U najoštrijim klimatskim uvjetima u našim područjima, debljina ledenog pokrivača ne može preći $\delta = 0.4 - 0.6$ m.
- Maksimalna statička sila leda s kojom bi trebalo računati $P_{SL} \cong 150$ kN/m.
- Statička sila leda ne može djelovati u isto vrijeme kada i sila vala.
- Led nagomilan neposredno iza ustava, razbija se i propušta u donju vodu redovnim podizanjem ustava (za kraći period), što omogućava da se brana rastereti od statičkog opterećenja leda.

b) Dinamička sila leda

- Nastaje uslijed udara santi leda u branu za vrijeme topljenja leda.
- Za proračun dinamičke sile leda koriste se empirijski izrazi.
- Ovdje se navodi obrazac Kuznjecova:

dinamička sila leda brzina kretanja leda (m/s)

$$P_{DL} = K V_L \delta \sqrt{A_L}$$

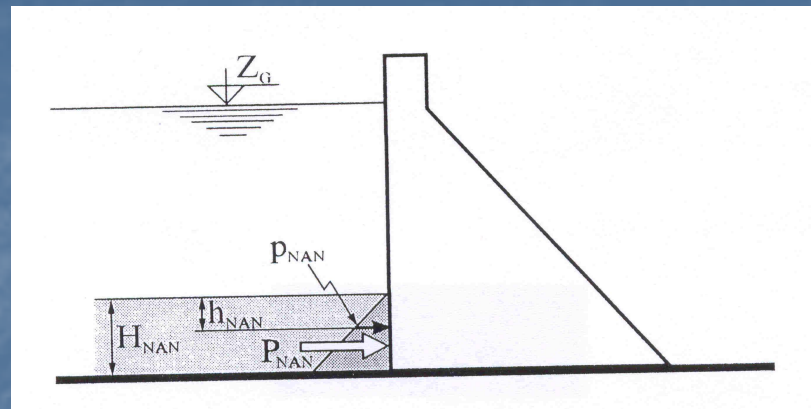
površina osnove karakteristične sante leda (m²)

debljina leda (m)

koeficijent koji ovisi o graničnoj čvrstoći leda pri drobljenju:

Granična čvrstoća leda Na drobljenje (kN/m ²)	300	500	600	700
K(kNs/m ³)	23,6	30	33	43

2.1.5. Pritisak nanosa (mulja)



- ❖ Pritisak nanosa u nekoj točki na dubini, h_{NAN} , od gornjeg ruba sloja računa se kao aktivni pritisak tla (Novak, 1996):

$$P_{NAN} = (\gamma_{NAN} - \gamma_W) h_{NAN} \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$$

- ❖ Horizontalna sila od nanosa po metru dužnom brane dobiva se integriranjem pritiska po cijeloj debljini sloja H_{NAN} :

$$P_{NAN} = \frac{(\gamma_{NAN} - \gamma_W) H_{NAN}^2}{2} \operatorname{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$$

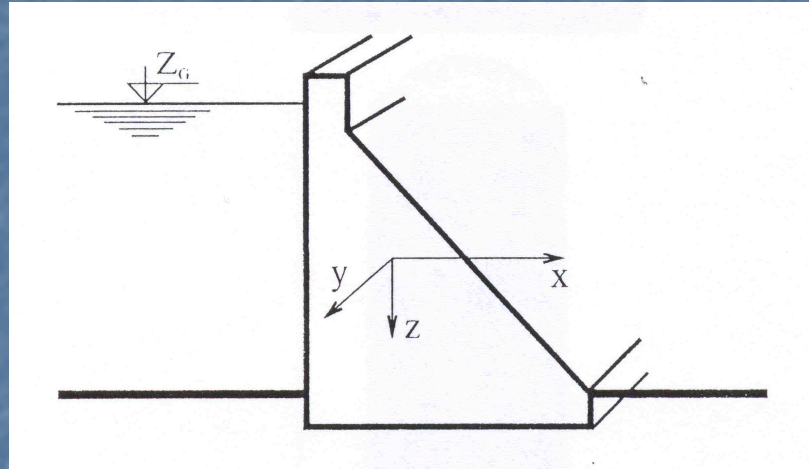
volumna težina nanosa u
zasićenom stanju

kut unutrašnjeg trenja nanosa
pod vodom $0 < \varphi < 30^\circ$
(najčešće je $20^\circ - 30^\circ$)

- Sila od nanosa ne umanjuje vrijednost hidrostatičke sile P_G , obzirom da voda prodire kroz pore u nanosu i "naliježe" na površinu uzvodnog lica brane.
- Prema Smith-u 1995, dio konture brane na koju naliježe nanos je s oko 98% svoje površine u neposrednom dodiru s vodom.
- Kod nakošenog uzvodnog lica, sila od nanosa se rastavlja na horizontalnu i vertikalnu komponentu.
- Vertikalna sila se često ne uzima u obzir, što je na strani sigurnosti.

2.1.6 Sile od zemljotresa – seizmičke sile

- ❖ Predstavlja snažno oscilacijsko **pomjeranje zemljine kore** koje može značajno ugroziti stabilnost brane.



Pomjeranje se preko temelja prenosi na branu.



Brana dobiva ubrzanje, a .



Ubrzanje stvara inercijalnu seizmičku silu, P_S

- ❖ Ako se pretpostavi da svaki djelić brane dobiva isto ubrzanje, seizmička sila se može izraziti kao:

inercijalna seizmička sila ubrzanje masa brane

$$P_s = aM = K_s g M = \alpha G$$

težina brane

ubrzanje zemljine teže

The diagram shows the equation $P_s = aM = K_s g M = \alpha G$ with arrows pointing from labels to specific terms: 'inercijalna seizmička sila' points to P_s , 'ubrzanje' points to a , 'masa brane' points to M , 'težina brane' points to G , and 'ubrzanje zemljine teže' points to g .

$K_s = a/g =$ koeficijent seizmičnosti (ubrzanja)
= odnos ubrzanja od zemljotresa i ubrzanja zemljine teže

- ❖ Tektonski pokret koji stvara potres može imati proizvoljan pravac djelovanja:

Pokret u y – pravcu:

Neće imati mnogo utjecaja na stabilnost gravitacijske brane, obzirom da su bokovi brane poduprti stijenskom masom doline na koju se naslanjaju.

(Za kontraforne brane i druge vrste olakšanih brana, mora se voditi računa i o ovom pravcu djelovanja, jer nema bočnog ukrućenja od sredine).

Pokret u vertikalnom z – pravcu:

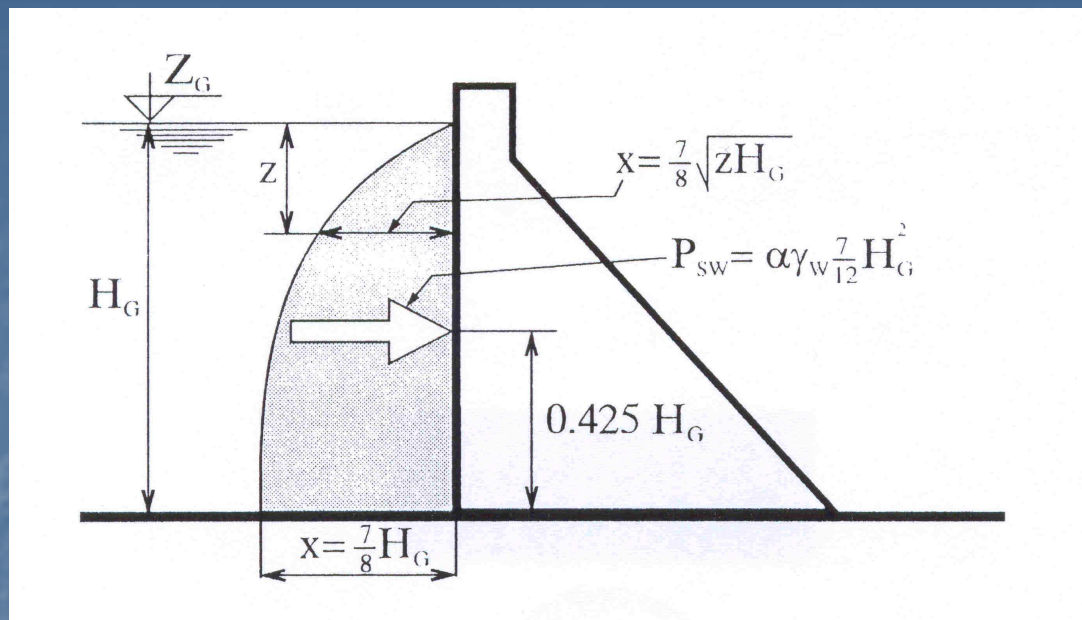
Može izazvati uzlaznu silu koja smanjuje težinu brane, a time i njenu stabilnost.

Ubrzanje u vertikalnom pravcu, a_v , obično je manje od horizontalnog ubrzanja, a ; koeficijent seizmičnosti iznosi $K_{sv} \approx 0.5 - 0.75 K_s$, a vertikalna sila (koja "smanjuje" težinu brane) je:

$$P_{sv} = a_v M = K_{sv} g M = K_{sv} G$$

Pokret u horizontalnom x – pravcu:

Najopasniji je pokret i uvijek se uzima u analizi opterećenja, jer pored inercijalne seizmičke sile od osciliranja same brane, $P_s = K_s G$ nastaje i dodatna inercijalna (dinamička) sila od osciliranja vode u akumulacijskom bazenu uzvodno od brane.



Prema Vestergardu širina vodene mase x koja na dubini z oscilira zajedno s branom može se aproksimirati jednačbom parabole:

$$x(z) = \frac{7}{8} \sqrt{z H_g}$$

Ukupna seizmička sila od vode jednaka površini parabole:

$$P_{sw} = K_s \gamma_w \frac{2}{3} \cdot \frac{7}{8} H_G^2 = K_s \gamma_w \frac{7}{12} H_G^2$$

a djeluje na udaljenosti od $0.425 H_G$ od dna akumulacije.

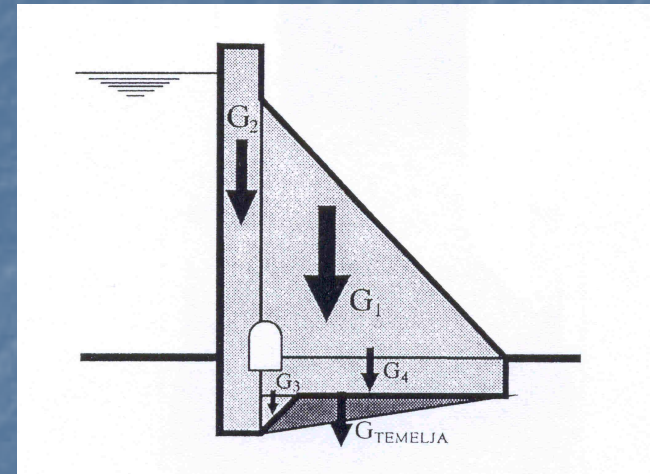
3.1.7. Težina brane i temelja

- Najvažnija je stabilizirajuća sila kod gravitacijskih brana.
- Djeluje u težištu presjeka:

$$\text{Težina brane} \longrightarrow G = \gamma_B A [kN/m]$$

Volumna težina betona

Površina poprečnog presjeka na 1 m dužni



- Težina dijela temelja, G_T , također može biti uzeta u račun pri analizi stabilnosti (npr., pri proračunu sigurnosti protiv klizanja).
- Kod nekih objekta (slapišta, površinskih zahvata, kanala i dr.) česti su primjeri da se vezivanjem ankerima za sredinu temelja postiže željena stabilnost.

2.1.8. Reakcija temelja

- Prema zakonu "akcije i reakcije", svaka sila koja djeluje na objekt inducira reakciju iste jačine i pravca, sa suprotnim smjerom.
- Reakcija se *ne uzima* kao opterećenje, jer se razmatraju utjecaji sredine na objekt, a ne obrnuto.

2.1.9. Kombiniranje opterećenja

- Sva navedena opterećenja ne mogu se istovremeno javiti.
- Nije razumno očekivati da će se kratkotrajna opterećenja male vjerojatnosti pojave (npr. poplavni valovi maksimalno velike vode i katastrofalni potres maksimalne jačine) javiti jednovremeno.
- Postavlja se pitanje izbora kombinacije opterećenja, jer je u interesu za stabilnost objekta obuhvatiti sve realno najnepovoljnije kombinacije opterećenja.

2.2 Stabilnost gravitacijske betonske membrane

- Gravitacijska betonska brana je *stabilna* ako se može oduprijeti klizanju i okretanju.
- Za mnoge hidrotehničke objekte važan uvjet stabilnosti je i otpornost na isplivavanje (što je kod gravitacijskih brana, u pravilu, uvijek ispunjeno).
- Neophodno je da naponi i pomjeranja u brani i temelju budu u dozvoljenim granicama.
- Odsustvo napona zatezanja na uzvodnom licu je često mjerodavan uvjet pri dimenzioniranju.
- Navedeni uvjeti moraju biti zadovoljeni pri svim razmatranim kombinacijama opterećenja, s zahtijevanim koeficijentom sigurnosti.
- Koeficijent sigurnosti razlikuju se ovisno o kombinaciji opterećenja.

- U početnim fazama projektiranja provjerava se samo tzv. "**opća stabilnost**": određivanje stabilnosti na klizanje i okretanje, te proračun napona i slijeganja u temeljnoj spojnici.
- U višim fazama projektiranja potrebno je odrediti naponsko stanje i pomjeranje u konstrukciji i temelju, za što se kod visokih brana primjenjuje **metoda konačnih elemenata**.
- Brana i sredina koja čini temelj se razdjele na elemente odgovarajućeg oblika.
- Zatim se iz uvjeta ravnoteže sila, i veze napona i deformacija, za zadane konturne uvjete određuju pomjeranja i naponi za svaki element brane i temelja.
- Za manje objekte još uvijek se često koristi jednostavna **metoda horizontalnih presjeka** (poznata i kao gravitacijska metoda), koja tretira branu tj. svaku njenu lamelu s pripadajućim temeljom kao konzolni nosač od idealno elastičnog, homogenog i izotropnog materijala.

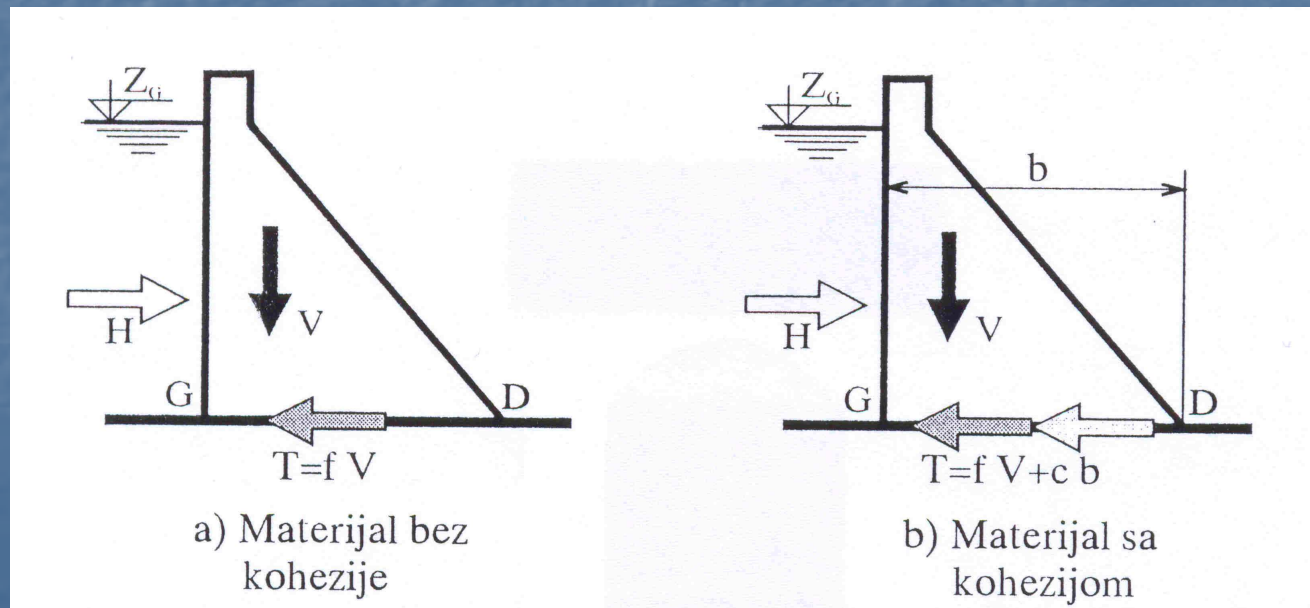
2.2.1 Stabilnost protiv klizanja (smicanja)

Često je **najkritičniji** od prethodno navedenih uvjeta.

Može nastati:

- 1) na kontaktu brane i sredine,
- 2) u sredini-temelju i
- 3) u presjeku tijela brane (najprije na mjestu horizontalnih spojnica).

Uvjeti klizanja se razlikuju kod brana fundiranih na stijeni, i kod brana na nekoherentnom (nevezanom) tlu.



a) **Kod nevezanog tla** nema otpora smicanju zbog kohezije unutar materijala pa se pomjeranju protivi jedino trenje.

Do klizanja ne dolazi ako je: $T > H$

H – sila klizanja (za horizontalni presjek to je horizontalna komponenta rezultante sila na branu, H)

T – jednaka proizvodu normalne sile (vertikalne komponente rezultante, V , za horizontalni presjek) i koeficijenta trenja, f

* Obično se u uvjet ravnoteže uvodi i koeficijent sigurnost protiv smicanja (klizanja), C_s , koji ovisi o kombinaciji opterećenja ($C_s=1-3$) pa uvjet za nevezano tlo postaje:

$$\frac{fV}{C_s} > H$$

Koeficijent trenja, f , ovisi o kutu unutrašnjeg trenja materijala:

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

gdje je φ =kut unutrašnjeg trenja (kut pri kome je kosina stabilna). Za materijale koji su pogodni za fundiranje gravitacijske brane $\varphi = 20-35^\circ$.

C_s se može izraziti kao odnos: $\frac{f V}{H} > C_s$

b) **U vezanom (koherentnom) materijalu** smicanju se pored trenja suprotstavlja i kohezija (otpor na smicanje uslijed veza između čestica i materijala).

Do klizanja ne dolazi ako je: $T + T_c > H$

$T_c = cb$ - sila kohezije, (po metru dužnom brane)

gdje je c = kohezija materijala.

* Uvede li se koeficijent sigurnosti protiv smicanja, C_s , dobijemo:

$$\frac{f V + c b}{C_s} > H$$

C_s = zahtijevani faktor sigurnosti i iznosi $C_s = 1,3 - 4$, ovisno o kombinaciji opterećenja.

C_s se može izraziti kao odnos: $\frac{f V + c b}{H} > C_s$

Pri provjeri klizanja za koherentni (vezani) materijal uobičajen je slijedeći postupak:

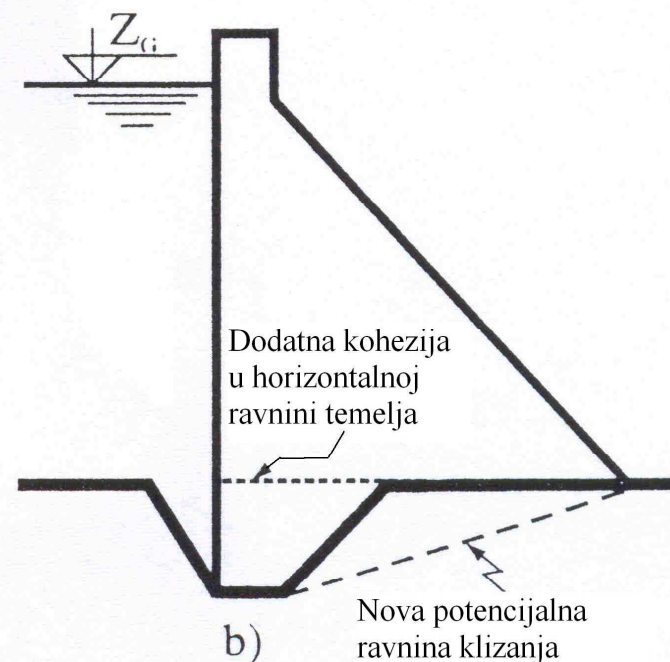
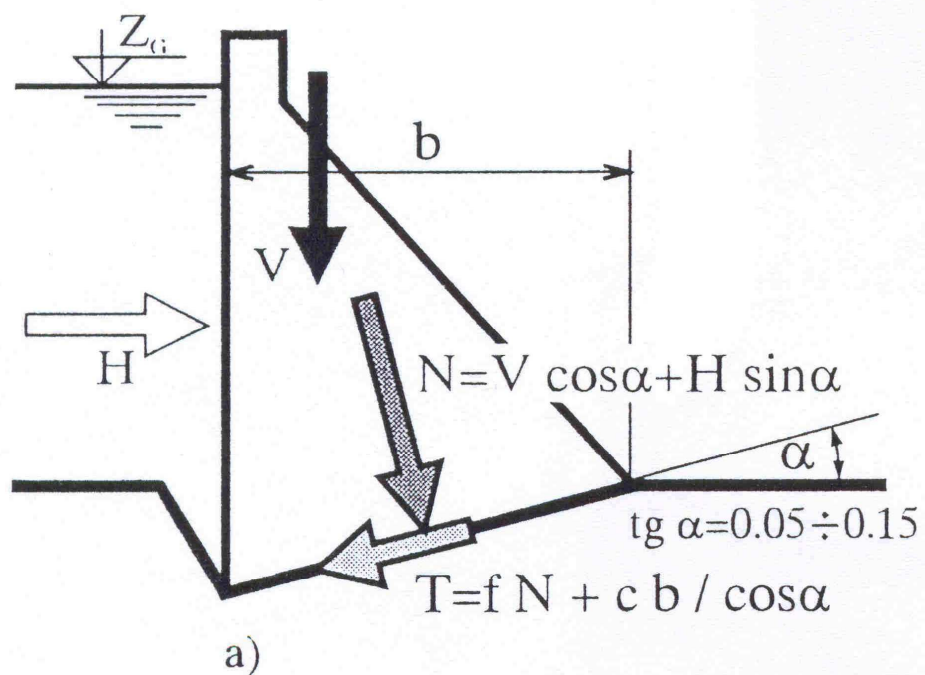
1. Prvo se provjeri stabilnost bez kohezije korištenjem obrasca, s tim što se dozvoljava nizak koeficijent sigurnosti $C_s = 1 - 1,3$. Ako se na ovaj način zadovolji stabilnost, nema potrebe za daljnjim provjeravanjem.
2. Ako uvjet stabilnosti nije postignut, uvodi se u račun i kohezija pa se primjenjuje obrazac (2.26a). Sada se traži da koeficijent sigurnosti bude znatno veći nego za slučaj bez kohezije ($C_s = 4$ Za normalno, do $C_s = 1,3$ za izuzetno opterećenje).
3. Ako ni tada nije postignuta zahtijevana sigurnost na klizanje, mora se povećati širina temeljne spojnice, b , ili se primjenjuje neka druga mjera za povećanje otpora klizanju.

Jedan od načina da se poveća stabilnost na klizanje je i **zakošavanje temeljne spojnice**.

Ovime se povećava sila trenja, a smanjuje se sila smicanja.

Uvjet stabilnosti na smicanje sada glasi:

$$\frac{f(V \cos \alpha + H \sin \alpha) + c b / \cos \alpha}{H \cos \alpha - V \sin \alpha} > CS$$



2.2.2 Stabilnost protiv okretanja

❖ Podrazumijeva da stabilizirajući moment vraćanja, M_V , oko najnižeg nizvodnog ruba brane bude veći od destabilizirajućeg momenta okretanja, M_P , i to s zahtijevanim stupnjem sigurnosti.

$$\frac{M_V}{M_P} > C_P$$

gdje je C_P = koeficijent sigurnosti na okretanje.

Dozvoljene vrijednosti koeficijenata sigurnosti ovise o kombinaciji opterećenja i kreću se od 1,5 za normalno opterećenje do 1,1 za izuzetno.

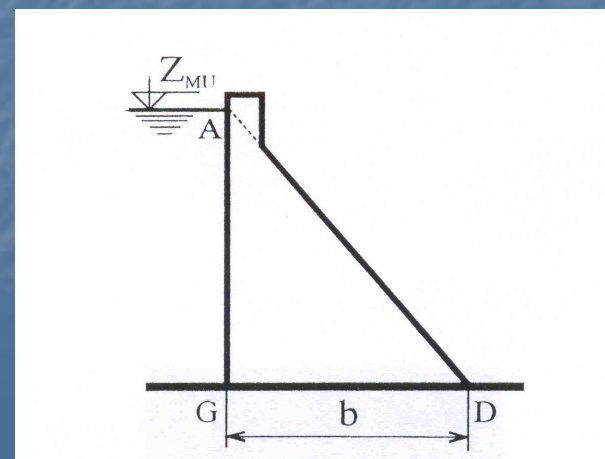
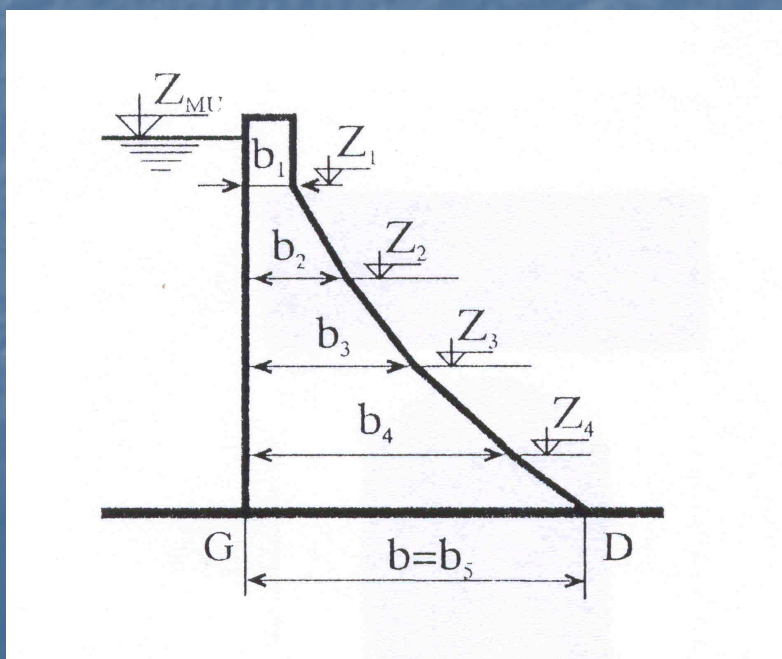
2.3 Postupak pri projektiranju gravitacijske brane

- Za promatrano mjesto pregradnog profila, i promatranu visinu brane analiziraju se moguća opterećenja.
- Zatim se iz uvjeta opće stabilnosti izračunaju i provjere dimenzije poprečnog presjeka barane: nagib uzvodnog i nizvodnog lica, oblik krune brane, veličina i položaj zuba i galerije i sl.
- Na kraju se ovisno o fazi projekta, vrši proračun otpornosti i dimenzioniranja, računaju pomjeranja, određuju uvjeti gradnje, rade crteži, premjer, predračun radova i tehnički izvještaj.

2.3.1 Određivanje nagiba nizvodnog lica brane

Obično se koriste dva načina za određivanje nagiba nizvodnog lica brane:

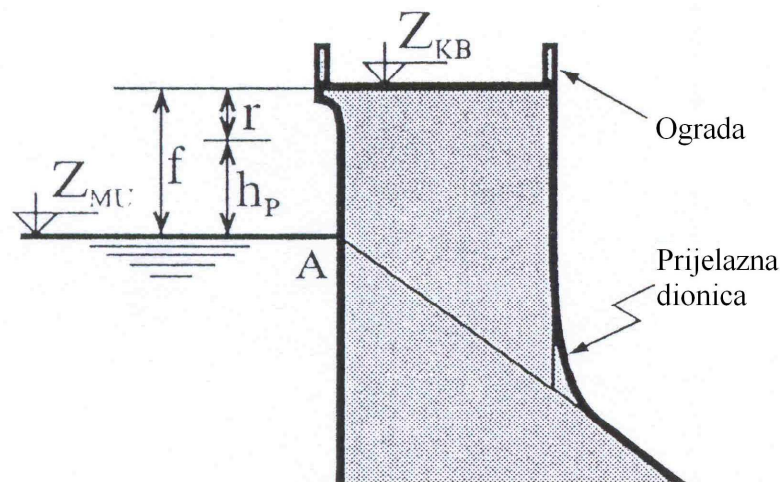
- Postupno dimenzioniranje (Multy – step design), gdje se nagib brane (odnosno širina presjeka) mijenja ovisno o visini presjeka iznad temelja. Idući od krune brane k temelju, iz uvjeta dimenzioniranja računaju se širine presjeka na međusobnoj udaljenosti od $1/3$ do $1/10$ visine brane .
- Izravno dimenzioniranje (Single-step design), gdje se usvaja konstantan nagib nizvodnog lica brane (po cijeloj visini brane).



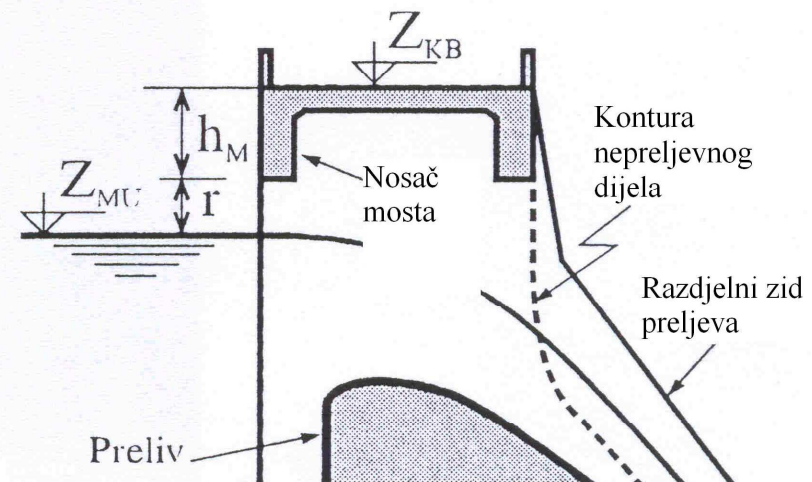
- Širina b može se odrediti iz uvjeta stabilnosti osnovnog trokuta "AGD" pri najnepovoljnijoj kombinaciji opterećenja (najčešće izuzetno opterećenje od vode).
- Traži se nagib za koji su zadovoljeni uvjeti stabilnosti, pri kome nema napona zatezanja, a glavni naponi pritiska su u dozvoljenim granicama.
- Vrh trokuta, "A", obično je u presjeku nizvodnog lica brane i razine vode pri koti maksimalnog uspora, Z_{MU} .
- Zatim se osnovni trokut (AGD) dopuni u kompletan profil brane (doda se kruna, galerije, uzvodni zub i sl.), pa se za mjerodavne kombinacije opterećenja provjeri opća stabilnost, naponsko stanje u izabranim presjecima te se načine ostali proračuni, ovisno o nivou projekta.
- Iako je površina presjeka dobivenog postepenim dimenzioniranjem manja (veća je ušteda u materijalu), prednost izravnog dimenzioniranja je lakše izvođenje konstrukcije, pa se ovaj postupak češće primjenjuje, posebno kod nižih objekata.

2.3.2 Kruna brane

- Pravokutna kruna omogućava promet duž brane.
- Širina krune je obično 0.05-0.20 od visine brane.
- Dodatna širina se može osigurati armirano-betonskim pločama na konzolnim nosačima.
- Pravokutna kruna i trokutno tijelo brane povezuju se kružnom prelaznicom što omogućava povoljnije naponsko stanje na mjestu prelaska, posebno pri utjecaju potresa.



a) nepreljevni dio brane

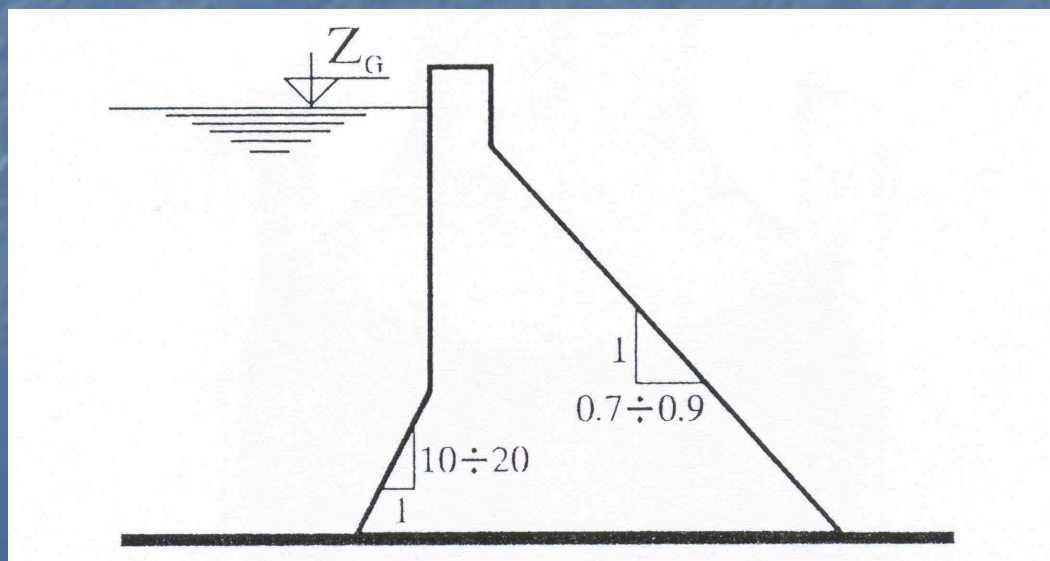


b) Preljevni dio brane

- Kota krune brane, Z_{KB} , podignuta je iznad nivoa maksimalnog uspora, Z_{MU} , za visinu slobodne visine brane (freeboard-a, $f = r + h_p$ gdje je h_p = visina penjanja vala a r = rezerva ($r = 0.5 - 1.0$ m).
- Valobran u vidu zaobljene konzole na kruni služi da skrene val.
- Umjesto da se krana brane nadvisi za pun zazor, $f = r + h_p$, iznad maksimalnog uspora često se pravi armirano-betonski parapetni zid (visine $h_z \approx 1$ m), što omogućava da se krana spusti za visinu zida.
- Ponekad je visina uzdužnog nosača mosta, h_M , na preljevnom dijelu brane veća od visine penjanja vala, h_p , pa je mjerodavan uvjet za visinu krune: $Z_{KB} = Z_{MU} + r + h_M$.

2.3.3 Uzvodna kosina

- U slučaju da se stabilnost ne može efikasno postići zakošenjem nizvodnog lica, pribjegava se blagom zakošenju uzvodnog lica.
- Time se, kao stabilizirajuća sila, uvodi i vertikalna komponenta hidrostatičke sile na uzvodnom licu.
- Uzvodni nagibi su obično mali ($10:1$, $20:1$) i dodaju se u donjoj zoni brane.
- Odgovarajućim uzvodnim zakošenjem izbjegavaju se negativni naponi koji mogu nastati na uzvodnom licu u slučaju prazne akumulacije, a koje stvara moment od sandučastog presjeka krune brane.



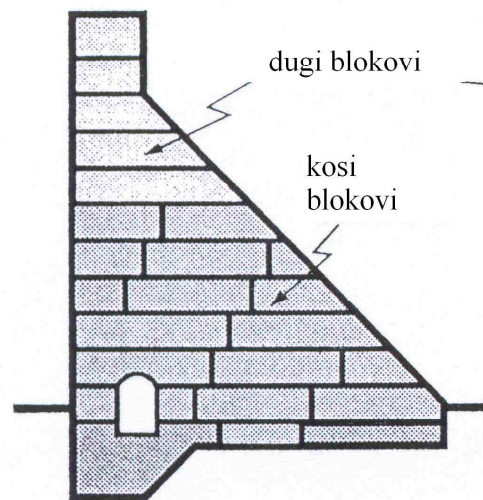
2.4 Pravila konstrukcije

- Određivanje osnovnih dimenzija prvi je korak u projektiranju brane.
- Dalje treba posvetiti pažnju detaljima kako bi se osigurali uvjeti pod kojima je načinjen proračun, a vodeći računa da gradnja bude što jednostavnija.
- Detalji za izvođenje i uvjeti građenja daju se u posebnom dijelu glavnog projekta.
- Pod pojmom pravila konstrukcije podrazumijevaju se postupci pri projektiranju i izvođenju kojima se osiguravaju spomenuti uvjeti, i kojima se otklanjaju ili ublažavaju negativni utjecaji određenih činitelja na branu.
- Za slučaj betonske gravitacijske brane, kao negativni činitelji razmatrat će se:
 - 1) Utjecaj temperature
 - 2) Uzgon u temeljnoj spojnici i u tijelu brane
 - 3) Naponi u temeljnoj spojnici prouzrokovani nejednakim uvjetima slijeganja.

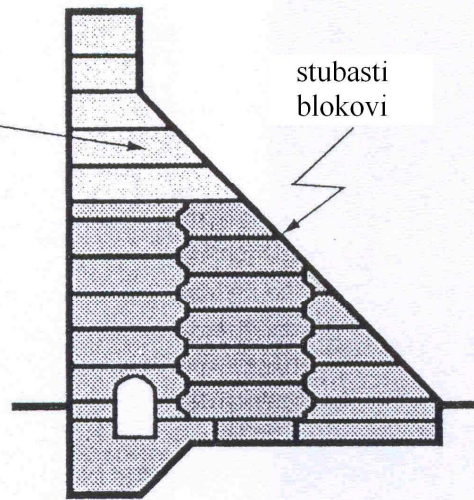
2.4.1 Utjecaj temperature

- Zbog nejednakog širenja/skupljanja betonske mase u brani se javljaju naponi zatezanja koji izazivaju stvaranje pukotina.
- Pukotine se vremenom šire, slabe otpornost brane na smicanje, i omogućavaju procjeđivanje vode i stvaranje uzgona.
- Temperaturni naponi nastaju:
 - a) Uslijed zagrijavanja i hlađenja objekta pri promjeni vanjske temperature (meteorološki čimbenici). Ovi utjecaji se ublažavaju gradnjom u lamelama.
 - b) Uslijed oslobađanja velike količine topline pri vezivanju betona, na što se može utjecati na više načina: →

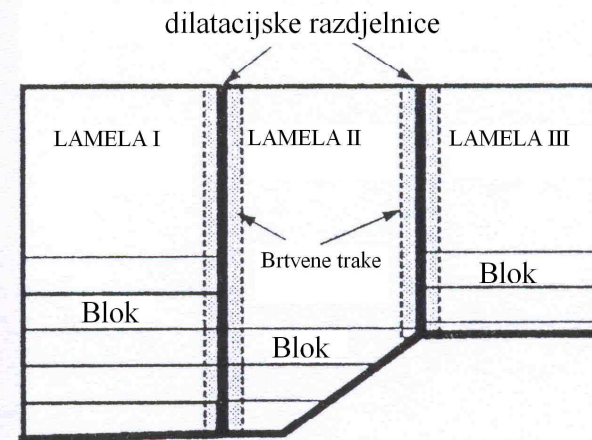
- 1) Treba koristiti sporovezujuće cemente kod kojih se proces vezivanja (i oslobađanja topline) odvija sporije.
- 2) Praviti beton s manjom količinom cementa (a da se ne ugrozi nosivost i vododrživost betona).
- 3) Omogućiti hlađenje betona poslije ugrađivanja i/ili sniziti temperaturu betonske mješavine upotrebom hladne vode za spravljanje betona. Također, agregat za beton ne bi smio biti izložen suncu, a ponekad se hladi dodavanjem leda.
- 4) Betoniranje ne smije biti kontinuirano, jer se u velikoj masi betona vanjski slojevi hlade znatno brže od unutrašnjih, što izaziva zatezanje i puknuća. Moraju se praviti prekidi betoniranja-radne razdjelnice kako bi se svježe betonirani blok prilikom vezivanja ravnomjerno hladio i skupljao, bez većih puknuća. U izvođačkoj praksi koristi se nekoliko načina raspoređivanja blokova unutar lamele: dugi, kosi, stubasti blokovi. Najčešće je dužina bloka jednaka dužini lamele, širina ovisi o načinu betoniranja (obično do 25 m), a visina je između 0.5 i 3 m. Betonirani blok se ostavlja "slobodan" da se hladi najmanje 3 dana.



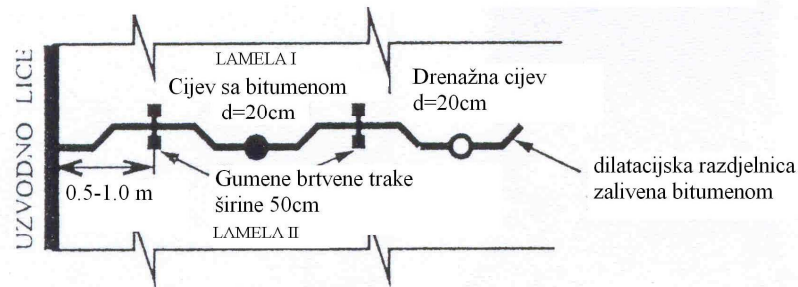
a) Radne razdjelnice-
kosi i dugi blokovi



b) Radne razdjelnice-
stubasti i dugi blokovi



c) Izgled sa uzvodnog lica



d) spoj dvije lamele u osnovi

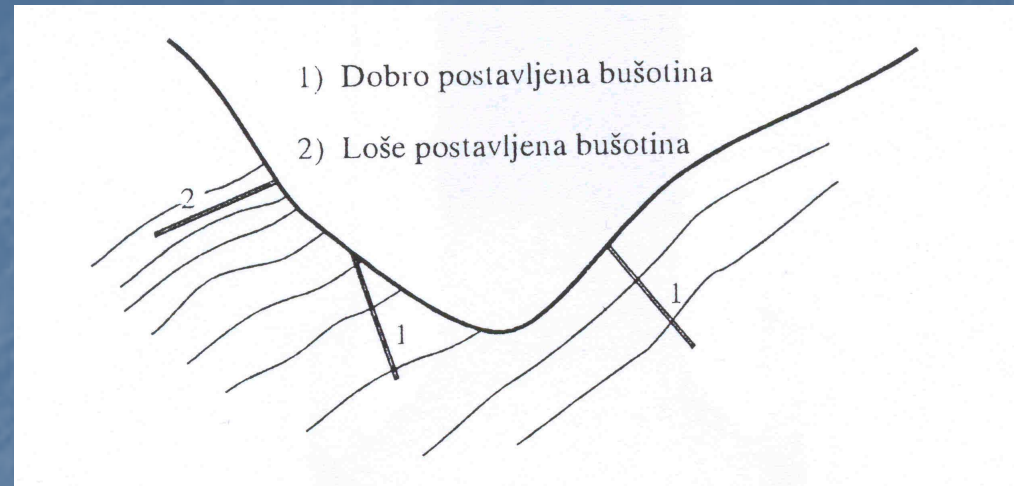
- Obvezno je radne razdjelnice (spojnice) između blokova pripremiti za nanošenje narednog sloja, tako što će se osigurati dobro prijanjanje novog i starog bloka.
- Obično se površina starog bloka "haba" i čisti oštirim pijeskom koji se velikom brzinom izbacuje iz "pištolja" (pjeskarenje), a prije betoniranja se na površinu starog bloka polaže sloj cementnog maltera od oko 2 cm debljine, čime se sprečava segregacija novog betona na mjestu spojnice (tzv. spužvasta mjesta).
- Otvori radnih razdjelnica se injektiraju, za razliku od otvora konstruktivnih-dilatacijskih razdjelnica između lamela, koje trajno ostaju fleksibilne.
- Kod nekih shema betoniranja horizontalne radne razdjelnice ne leže u istoj ravnini, već formiraju izlomljene (zupčaste) površine (stubasti blokovi), čime se postiže veća otpornost na klizanje u slučaju da se pukotina javi u razdjelnici (gdje će se najprije i javiti, jer je to najslabije mjesto u "okolini").
- Gravitacijske brane, kako je već rečeno, grade se u lamelama.

- Lamelle omogućavaju "disanje" betona po širini i po dubini, jer zazor (otvor) između lamela - dilatacijska (konstruktivna) razdjelnica omogućava rasterećenje termičkog napona i sprječavanje nastanka pukotina.
- Izbjegavaju se i puknuća uslijed nejednakog slijeganja, koje može nastati kao rezultat topografskih i /ili geomehaničkih uvjeta.
- Beton za branu mora osigurati dovoljnu čvrstoću, otpornost na mraz i potrebnu vododrživost, a da s druge strane ima nisku toplinu hidratacije i nisku cijenu koštanja.
- Kod većih brana se često koristi zoniranje, pa se na višim kotama, gdje je potrebna čvrstoća betona, stavlja manje cementa, nego u nižim zonama.
- Uzvodno i nizvodno lice se "oblažu" betonom veće čvrstoće, s više cementa i, po potrebi, uz aditive kojima se popravljaju otpornost na mraz, a za preljevne površine i otpornost na udar i habanje.
- Ako je voda agresivna na beton, neophodno je sve površine koje mogu biti izložene dodiru s vodom odgovarajuće zaštititi.

2.4.2 Uzgon i injektiranje temelja

- Uzgon se može smanjiti vertikalnom zavjesom na uzvodnom licu (injekcijskom zavjesom, dijafragmom ili pribojem i drenažom).
- Ponekad se koriste i horizontalne zavjese uzvodno od brane za produžetak puta vode.
- Zavjese osiguravaju i vododrživost akumulacije na profilu brane.
- Dubina injekcijske zavjese i raspored bušotina određuje se na osnovu geoloških istražnih radova (USBR 1987, Creager 1961).
- Ako se ne raspolaže terenskim podacima, može se za najniži nivo projektiranja usvojiti da dubina zavjese bude jednaka visini brane, a da se injekcijsku bušotine postave na rastojanju od 2 do 3 m.
- Injekcijsku zavjesu, po pravilu, treba izvesti i u bokovima profila brane kako bi se smanjilo proviranje vode iz akumulacije.

❖ Treba osigurati da injekcijske bušotine sijeku ispucale slojeve u temelju kako bi im što bolje predale injekcijsku masu, a ne da se masa gubi duž pukotina (Pećinar 1960).



❖ Prema namjeni injektiranje može biti:

- 1) Zaptivno - za zaptivanje i smanjenje proviranja i uzgona.
- 2) Konsolidacijsko - za povećanje nosivosti tla.
- 3) Vezno (kontaktno) – za povezivanje konstrukcije s okolnim (stjenovitim) tlom, i sprečavanje ispiranja materijala na kontaktu brana-tlo.

* Vezano injektiranje treba obvezno primjenjivati kod svih hidrotehničkih objekata koji se vezuju za stijenu (brane, tuneli, podzemni hodnici i sl.)

Stjenoviti materijal:

- Obično se drenira mrežom vertikalnih (ponekad i kosih) bušotina.
- Za prvu procjenu mogu se usvojiti bušotine promjera $d = 10 - 20$ cm, na razmaku od 3 - 5 m, dubine od $1/4 - 1/2$ visine brane (Creager 1961).
- Bušotine se ulijevaju u drenažnu galeriju otkuda se gravitacijom ili pumpanjem filtrirana voda odvodi van tijela brane, najčešće u donju vodu.
- Drenažna galerija može se koristiti i za promatranje (inspekciju).
- Površina poprečnog presjeka galerije mora biti dovoljna da omogući nesmetan pristup, ventilaciju i osvjetljenje (otvor ne bi trebao biti manji od 2 x 1.5 m).

2.4.3 Smanjenje uzgona u tijelu brane

Smanjuje se uzvodnim zaptivanjem i dreniranjem.

Zaptivanje se može postići na više načina:

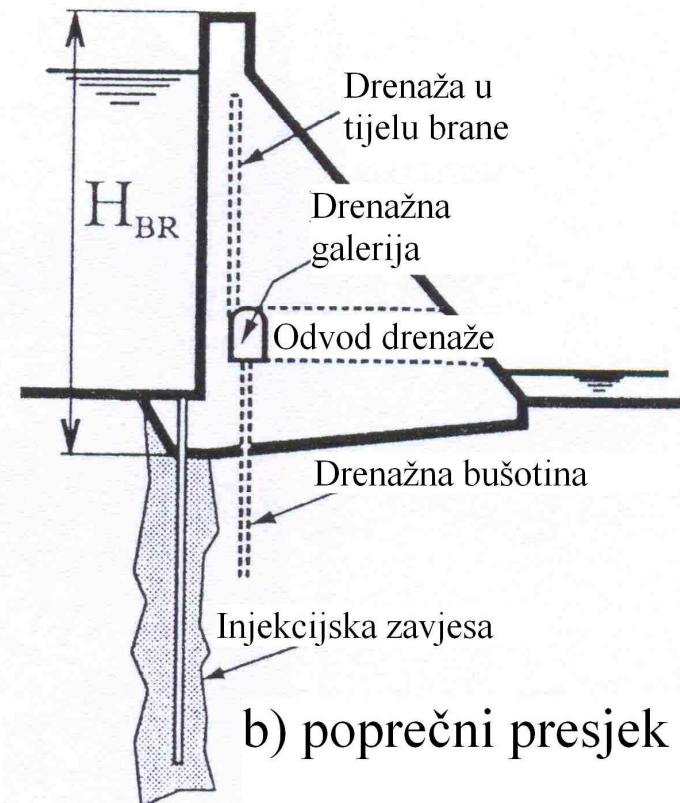
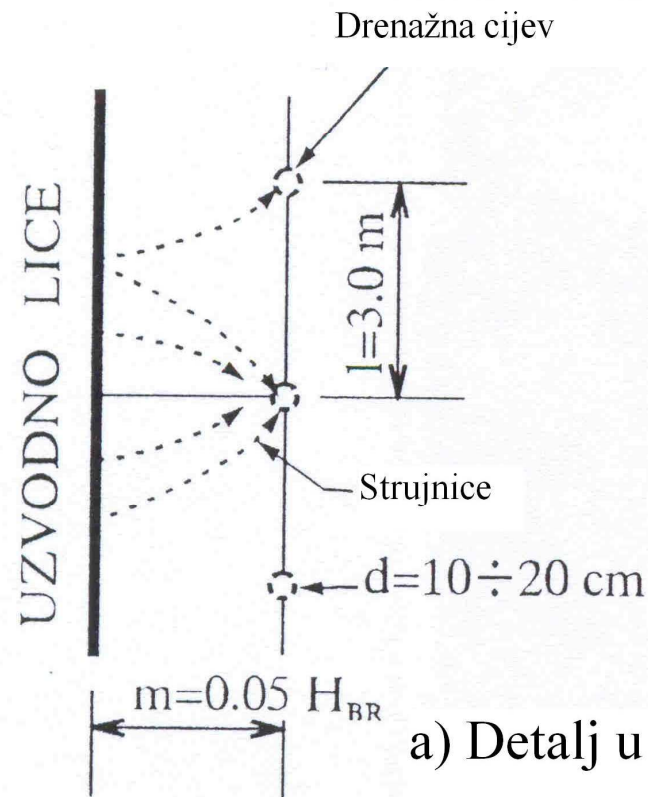
- 1) Ugrađivanjem betona manje vodopropusnosti na uzvodnom dijelu presjeka brane stvara povoljnu sliku uzgona.
- 2) Bitumenski premaz ili postavljanje vodonepropusnih folija na uzvodnom licu daje sličan efekt.
- 3) Odgovarajućom njegom betona sprječava se pojava pukotina kroz koje voda dopijeva u branu i stvara uzgon.
- 4) Zaptivanju pomaže i mutna voda, koja sa sobom donosi čestice lebdećeg nanosa kojim se popunjavaju puknuća u brani.

Zaptivne mjere mogu biti nedovoljne pa se ponekad primjenjuje i dreniranje.

Za drenažu se koriste perforirane betonske cijevi, postavljene u vertikalne otvore u tijelu brane i raspoređene tako da prihvate što više filtracijske vode.

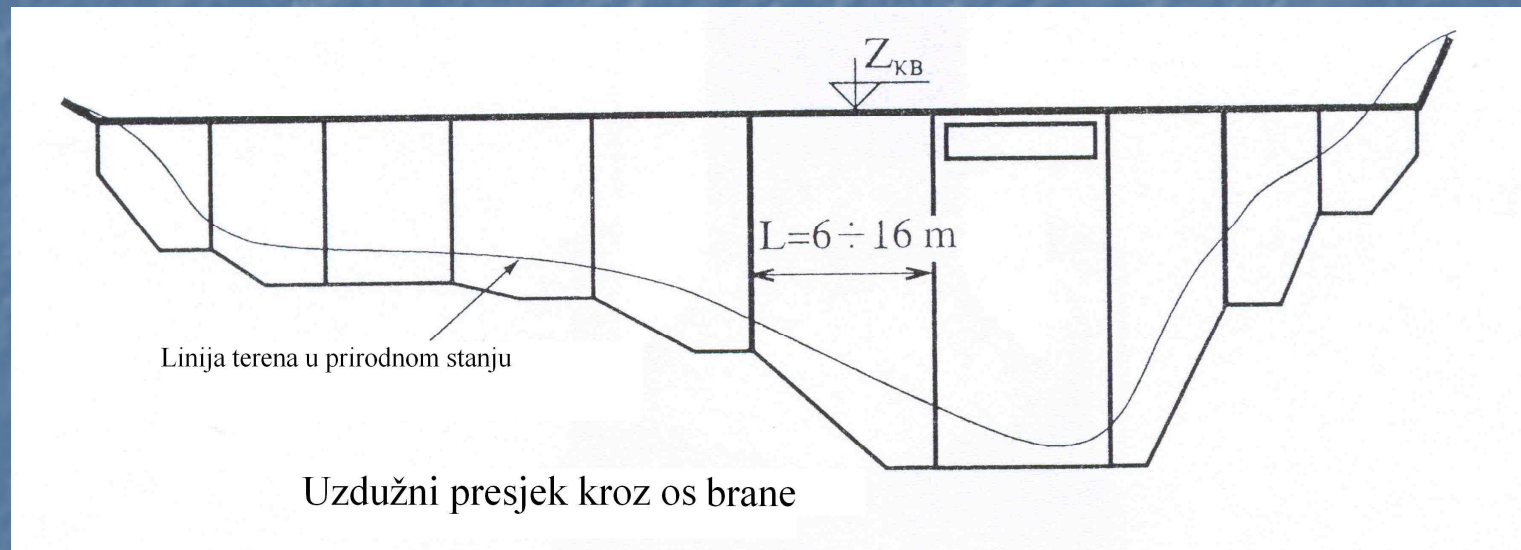
Treba predvidjeti mogućnost zamjene cijevi i pročišćavanja, jer može doći začepljenja uzrokovano kalifikacijom.

Voda se iz cijevi odvodi horizontalnim galerijama u tijelu brane.



2.4.4 Naponi u temeljnim spojnicaama zbog nejednakog slijeganja

- ❖ Vertikalne dilatacijske razdjelnice omogućavaju samostalan rad svake od lamela,
- ❖ Time se omogućava i nejednako slijeganje istih, i eliminiraju naponi i pukotine koje mogu nastati zbog različitih geomehaničkih svojstava stijene, ili naglog diskontinuiteta u topografiji doline



- ❖ Ako se iz nekog razloga razdjelnice moraju injektirati izostaje "sloboda" pomicanja lamela, pa brana radi (i računa se) kao jedinstvena prostorna konstrukcija.

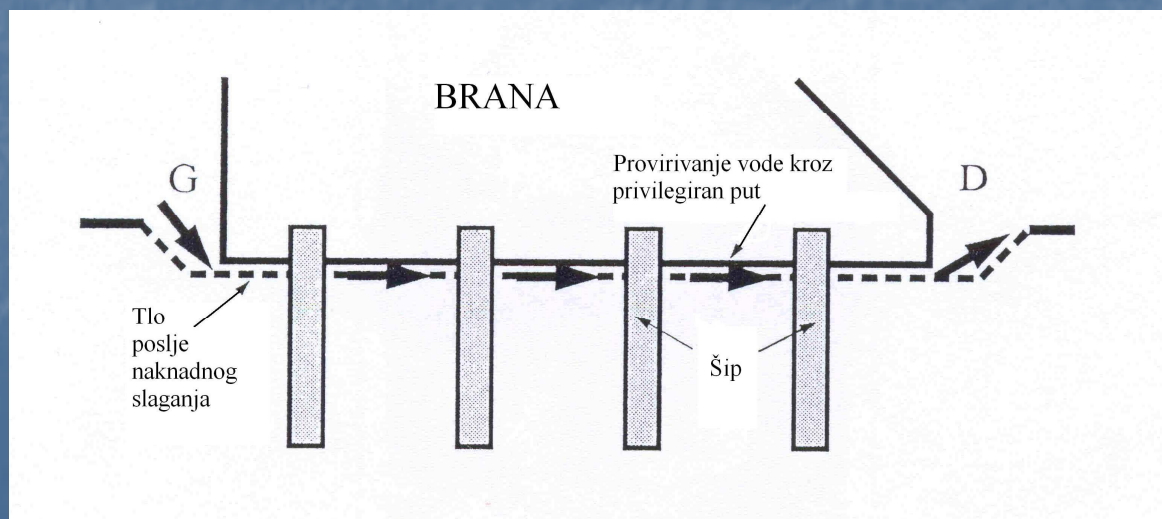
2.4.5 Priprema temelja

Tri najznačajnija uvjeta kod pripreme temelja su:

1. uvjet - osigurati maksimalnu nosivost tla:

a) Na stjenovitom tlu treba ukloniti površinski sloj zemlje i nanosa i drobinu, da bi se brana fundirala na čvrstoj stijeni. Ako je stijena ispucala na većoj dubini, pa se uklanjanje ne isplati, temelj se ojačava konsolidacijskim injektiranjem. Obično su konsolidacijske injekcijske bušotine duboke do 5 m (znatno pliće nego zaptivne).

a) Kod nevezanog tla nosivost se daleko teže popravlja . Opterećenje se može šipovima prenijeti dublje do nosivog sloja (rijetko se primjenjuje, i to samo kod nižih objekata).



Pri radu sa šipovima treba koristiti posebnu tehnologiju jer naknadno slijeganje tla na dodiru s branom može otvoriti put vodi, što dovodi do katastrofe zbog unutrašnje erozije temelja (kontaktnog ispiranja). Obično se na glavu šipa postavlja deformabilna metalna "kapa" čija deformacija prati slijeganje tla, pa brana ostaje u kontaktu s temeljom.

2. uvjet - osigurati maksimalnu otpornost na smicanje – otpornost na smicanje može se postići na više načina:

- 1) Kod stjenovitih temelja površina se ostavi hrapavom i "nazupčanom" poslije miniranja, što povećava koeficijent trenja (miniranjem se skida drobina).
- 2) Izradom uzvodnog zuba, ili dubljim fundiranjem uzvodnog dijela temelja čime se ravnina smicanja pomjera na veću dubinu.
- 3) Smanjenjem uzgona.
- 4) Fundiranjem na šipovima kod nevezanog tla (rijetko se primjenjuje).

3. uvjet - osigurati filtracijsku stabilnost tla

Neophodno je spriječiti unutrašnju eroziju tla temelja (detaljnije u poglavlju o nasutim branama).

2.5 Planiranje i faze izvođenja brane

Najvažnije faze su:

1. Izgradnji prethodi projektiranje s istražnim radovima.
2. U prvoj fazi gradnje potrebno je uraditi pristupni put i pripremiti gradilište.
3. U drugoj fazi se obavljaju radovi na skretanju rijeke, a paralelno se započinju radovi na objektima i dijelovima objekata koji su iznad razine vode u rijeci. Dno buduće akumulacije se čisti od vegetacije, kako bi se izbjegla eutrofikacija jezera.
4. Kada je rijeka skrenuta, pripremaju se temelji i osigurava temeljna jama. Osigurava se sanitarna zaštita akumulacije.
5. Slijedi betoniranje brane i ostalih objekata (preljeva, umirujućeg bazena, zahvata i dr.), izrada injekcijska zavjese i sl..
6. U posljednjoj fazi završava se montaža opreme, i puni akumulacija

3. Nasute brane

- najrasprostranjenije hidrotehničke građevine
- grade se kontroliranim nasipanjem i zbijanjem dostupnog materijala, a vanjskim silama se odupiru vlastitom težinom
- prenose opterećenje na tlo preko znatno veće površine → znatno smanjuju naponi u tlu
- manje osjetljive na slijeganje temelja od betonskih brana
- grade se od lako dostupnih materijala, uz potpuno mehanizirano ugrađivanje → troškovi po jedinici volumena brane značajno niži u odnosu na betonske brane
- volumen nasute brane veći je od volumena alternativne betonske brane: volumen zemljane brane je desetak puta veći, a kamene 4 do 5 puta
- najveća mana → osjetljivost na eroziju vodom

Osnovna podjela nasutih brana je na:

- 1) zemljane brane i
- 2) brane od kamenog nasipa

Nasute brane su se najviše gradile, ali i najčešće rušile.

Tri najčešća uzroka rušenja su:

- 1) prelijevanje, praćeno vanjskom erozijom
- 2) ispiranje materijala nasipa – unutrašnja erozija
- 3) klizanje kosina

Prilikom projektiranja, izgradnje i održavanja nasutih brana moraju se primijeniti sve raspoložive mjere i postupci za otklanjanje navedenih uzroka.

3.1. Prelijevanje i površinska erozija

Nikakve mjere, ni "konstruktivna pravila" ne mogu pomoći u slučaju prelijevanja brane.

Ukoliko je prelijevanje dovoljno dugotrajno, dolazi do erozije i negativne posljedice su neizbježne.

Jedino preostaje mogućnost sprečavanja prelijevanja, a to se može postići:

1) Ispravnom procjenom mjerodavnog vala velike vode – vala od kojeg se objekt brani, i prema kojem se dimenzioniraju evakuacijski organi:

Ako je područje nizvodno od nasute brane:

- ❖ naseljeno → obavezno treba dimenzionirati evakuacijske organe na maksimalnu veliku vodu (MPF = Maximum probable flood).
- ❖ nenaseljeno → obično se za mjerodavan val usvaja 10 000 – godišnja velika voda, ili 1000 – godišnja voda, ako ekonomska analiza to opravdava.

U svakom slučaju dobro je da se zazor između maksimalnog nivoa vode i krune brane ostavi dovoljno širokim i da se na kruni podigne parapetni zid

2) Pravilnim izborom, dimenzioniranjem, izradom i održavanjem evakuacijskih organa

Projektanti uglavnom izbjegavaju preljeve s ustavama kod nasutih brana te se opredjeljuju za slobodne preljeve bez ustava (zbog mogućnosti havarije ustava).

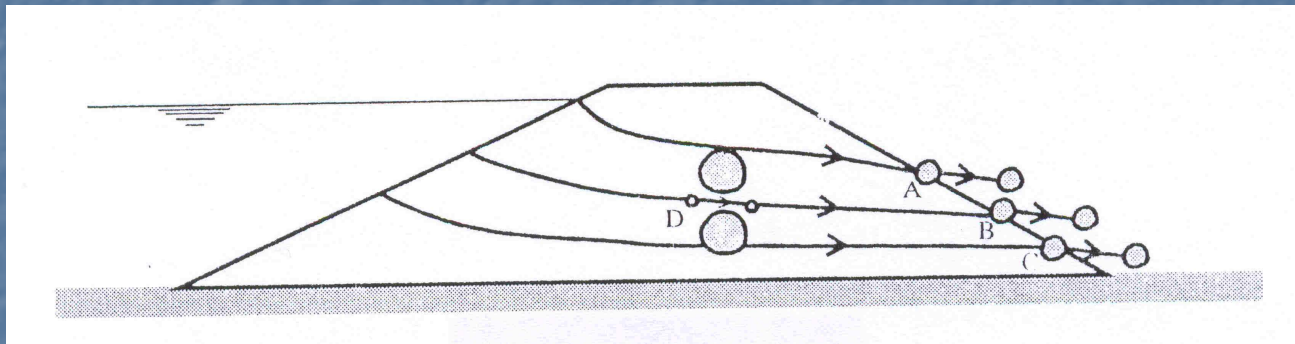
Projektiranje dubinskih ispusta za evakuaciju velikih voda izuzetno je rizično rješenje te se za visoke nasute brane ne preporučuje ni u kojem slučaju.

3.2 Unutrašnja erozija

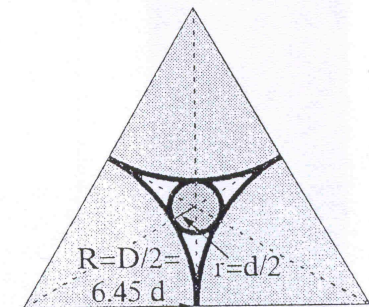
- Osobito je opasna kod zemljanih brana.
- Nastaje odnošenjem čestica nevezanog materijala koje se ne mogu oduprijeti hidrodinamičkoj sili filtracijske vode.
- Kod vezanog materijala ako postoji mogućnost da kohezijske sile oslabe, (zbog nepovoljnih kemijskih reakcija).
- Unutrašnja erozija obično se dijeli na:
 - 1) Ispiranje (sufozija)
 - 2) Podizanje (fluidizacija)

3.2.1 Ispiranje-sufozija

- ❖ Filtracijska voda odnosi čestice koje nemaju oslonac iza sebe, a svojom težinom se ne mogu oduprijeti sili toka.
- ❖ Može biti isprana čestica na nizvodnom licu, iza koje nema čestica da je podupru (čestice A,B, i C), ili čestica iz unutrašnjosti nasipa (čestica D) koja je suviše sitna da bi je okolne krupnije čestice mogle zadržati - može se provući kroz prostor (pore između susjednih čestica).



- ❖ Pretpostavljeno je da su čestice sferičnog oblika, pa sitnija čestica promjera $d=2r$ može se osloniti na susjedne krupnije čestice promjera $D = 2R$ samo ako je $D \leq 6.45 d$. U protivnom će sitnija čestica biti isprana.



- ❖ Sitnije čestice mogu biti isprane bez narušavanja stabilnosti objekta ako preostale čestice nisu ugrožene rezultirajućim povećanjem brzine filtracije vode, i ako čestice naliježu jedne na drugu.
- ❖ Prvobitno mutna filtracijska voda, izbistrit će se kad sve sitne čestice budu isprane.
- ❖ Povećanje mutnoće i filtracijskog protoka, znači da je erozija dobila na intenzitetu pa će, ako se nešto ne poduzme, doći će do potpunog ispiranja tla, i rušenja objekta.
- ❖ Hidrodinamička sila kojom voda djeluje na čestice tla razmjerna je brzini filtracije, u , a ona ovisi o gradijentu filtracije, l i koeficijentu filtracije, K .
- ❖ Gradijent filtracije, l , predstavlja pad pijeziometarske linije duž filtracijskog puta, a u praksi se često aproksimira kao količnik pijeziometarske razlike, $h = -\Delta\Pi$ i duljine filtracijskog puta, $L=l$, na kome se razlika h ostvari:

$$u = Kl = K \left(-\frac{d\Pi}{dl} \right) \approx K \frac{-\Delta\Pi}{\Delta l} = K \frac{h}{L}$$

Opasnost da čestica određene krupnoće bude isprana raste s povećanjem gradijenta, i , i porastom koeficijenta filtracije, K .

Gradijent pri kome dolazi do sufozije promatranog tla naziva se **kritični gradijent filtracije na sufoziju**, i_{KR}^S . Određuje laboratorijski, a orijentacijske vrijednosti (kao i orijentacijske vrijednosti koeficijenta filtracije) prema američkom istraživaču Leinu dane su u tablici.

Materijal	$= h/L$	K (m/s)
1. sitni pijesak	1/8,5	10^{-3} - 10^{-4}
2. srednji pijesak	1/6,0	10^{-2} - 10^{-3}
3. srednji šljunak	1/3,5	10^{-1} - 10^{-2}
4. oblutci	1/2,5	$>10^{-1}$
5. meka glina	1/3,0	10^{-6} - 10^{-8}
6. tvrda glina	1/8,0	$<10^{-8}$

Ukoliko je na nizvodnom dijelu brane predviđen dren s filtarskom zaštitom, navedene vrijednosti kritičnog gradijenta se mogu povećati za oko 20%.

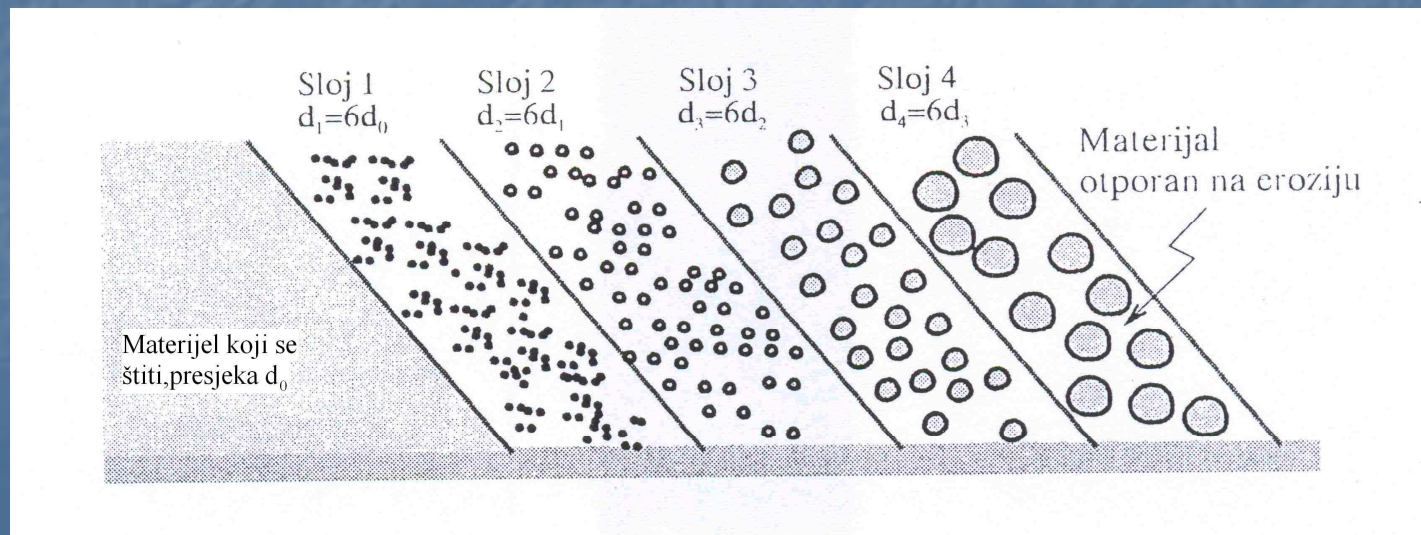
Opasnost od sufozije određenog tla opada povećanjem zbijenosti jer se smanjuju otvori kroz koje se mogu provući sitnije čestice.

Sitniji otvori stvaraju veće gubitke energije, što smanjuje brzinu, a time i hidrodinamičku silu filtracijskog toka.

Zbijanje po pravilu, nije dovoljno, pa se ugroženi materijal redovito štiti filtrima. Filtar onemogućava ispiranje sitnih čestica kroz pore krupnih čestica u susjednoj zoni-sloju (sufozija na kontaktu).

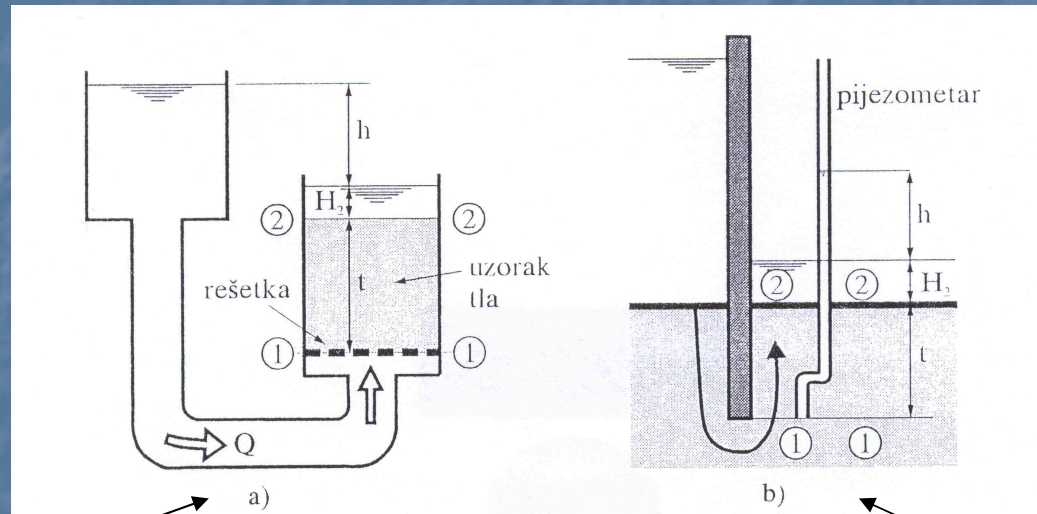
Filtar čine slojevi različite krupnoće zrna. Krupnoća zrna raste idući u smjeru toka vode, tako da materijal iz prethodnog (uzvodnog) sloja ne može biti ispran kroz naredni (nizvodni).

Najuzvodniji sloj filtra (od najsitnijeg zrna) osigurava neposrednu potporu za materijal koji se štiti, slijedeći sloj štiti prethodni, i tako redom do filtracijskog stabilnog sloja, gdje je ugrađen materijal kojem krupnoća osigurava stabilnost (za promatrane uvjete tečenja $l=h/k < I_{KR}^S$).



3.2.2 Fluidizacija – podizanje

Nastaje kada hidrodinamička sila vode koja provire naviše postane veća od težine tla. Tlo u potpunosti gubi nosivost- dolazi do sloma tla.



eksperimentalna aparatura za procjenu kritičnog
gradijenta filtracije na fluidizaciju I_{KR}^F

fluidizacija tla nizvodno od priboja

Debljina uzorka, t , odnosno dubina priboja, predstavlja filtracijski put vode kroz tlo između presjeka "1" i "2". Pijezometarska razlika, h , između presjeka omogućava vodi svladavanje otpora tečenju duž filtracijskog puta, t , a ujedno stvara i hidrodinamičku silu koja će, ako postane dovoljno velika, pokrenuti – podići čestice tla.

- Vrijednost piježometarske razlike pri kojoj počinje fluidizacija je kritična razlika, $h=h_{KR}$, a odgovarajuća vrijednost gradijenta je kritični gradijent na fluidizaciju, I_{KR}^F .
- Određuju se iz uvjeta ravnoteže sila koje djeluju na masu tla i vode uzorka unutar volumena između presjeka "1" i "2" u trenutku podizanja tla ($h=h_{KR}$).
- Kada hidrodinamička sila pokrene čestice tla, ove više neće nalijegati na rešetku na koju je uzorak (bio) oslonjen, pa će izostati i reakcija kojom rešetka djeluje na uzorak.
- Pri fluidizaciji na masu uzorka između presjeka "1" i "2" djelovati će samo sila težine i sila pritiska vode:

$$A\gamma_W H_2 + A\gamma_Z t = A\gamma_W (h_{KR} + H_2 + t)$$

$$(\gamma_Z - \gamma_W)t = \gamma_W h_{KR}$$

gdje je: γ_Z = volumna težina tla u zasićenom stanju, a A =površina poprečnog presjeka kroz koji filtrira voda.

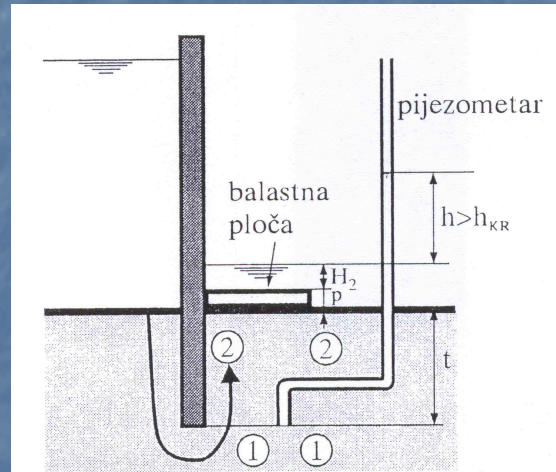
Fluidizacija (podizanje čestica tla) nastaje ako je:

$$h \geq h_{KR} = \frac{\gamma_Z - \gamma_W}{\gamma_W} t$$

odnosno ako je dostignut kritični gradijent na fluidizaciju:

$$I \geq I_{KR}^F = \frac{h_{KR}}{t} = \frac{\gamma_Z - \gamma_W}{\gamma_W}$$

Da bi se podizanje spriječilo, neophodno je ugroženo tlo zaštititi balastom koji će neutralizirati "višak" pijezometarske razlike, $h - h_{KR}$



Minimalna debljina balastne ploče, p dobiva se iz ravnoteže sila:

$$A\gamma_W H_2 + A\gamma_Z t + A\gamma_P p = A\gamma_W (h + H_2 + t + p)$$

$$p = \frac{\gamma_W h - (\gamma_Z - \gamma_W) t}{\gamma_P - \gamma_W}$$

gdje je γ_P = volumna težina ploče.

Obzirom da je $h_{KR} \gamma_W = (\gamma_Z - \gamma_W) t$ dobiva se:

$$p = \frac{\gamma_W (h - h_{KR})}{\gamma_P - \gamma_W}$$

- Balastna ploča mora biti perforirana, inače se pritisak vode ispod ploče (uzgon) dodatno povećava što dovodi do isplivavanja ploče.
- Ispiranje sitnijih čestica tla kroz otvore ploče treba spriječiti odgovarajućom filtarskom zaštitom između ploče i tla koje se štiti.
- Obično se kod nasutih brana, umjesto balastne ploče koristi kameni nabačaj sa filtrom.
- Značajno "nagomilavanje" pritiska nastaje ako se iznad vodopropusnog sloja nalazi slabopropusni "pokrovni" sloj. Slično, kao i kod balastne ploče, i ovdje može doći do podizanja pokrovnog sloja-tzv. izdizanja na kontaktu.
- Kritični gradijent fluidizacije, I_{KR}^F , veći je od kritičnog gradijenta sufozije, I_{KR}^S , jer pri fluidizaciji hidrodinamička sila mora savladati punu težinu čestice (mora podići česticu), dok kod sufozije česticu treba "samo" pogurati.

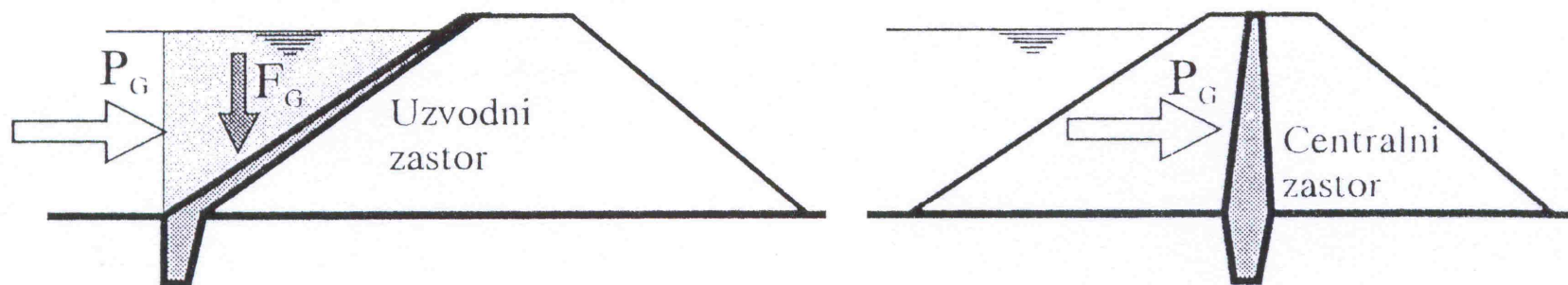
3.3 Analiza vanjskih sila

Bitne razlike u odnosu na betonske brane su:

1) hidrostatički tlak ne djeluje na nekoherentno tijelo brane kao cjelinu.

On djeluje na svaku česticu nasipa pojedinačno, smanjujući joj volumnu težinu (prema Arhimedovom zakonu).

Ako postoji vododrživa zavjesa, onda na njega djeluje sila hidrostatičkog tlaka, kao i na svaku drugu vododrživu površinu.



2) Hidrodinamičke sile ispiranja (sufozije) i podizanja (fluidizacije) bitno utječu na stabilnost brane i temelja.

3) Površinska erozija uslijed udara vala može biti fatalna za nasip, pa se ne smije dozvoliti da valovi prelijevaju krunu brane. Zato se na kruni gradi valobran, a dio površine uzvodne kosine koji može biti ugrožen udarima vala (u rasponu od minimalnog radnog nivoa, Z_{min} , do krune brane) mora se zaštititi pločama ili krupnom kamenom naslagom.

4) Sile potresa su opasne kao dodatni stimulans za klizanje kosina (naročito kod materijala bez kohezije i ujednačenog zrna), jer naglo pokretanje smanjuje trenja (daje početni impuls za savladavanje trenja).

5) Nema statičke sile od leda, jer je brana dovoljno "meka" da amortizira opterećenje od širenja leda, a pošto se sante kreću k preljevnoj građevini (koja je uvijek posebna betonska konstrukcija), izostaje i dinamički utjecaj leda na nasip brane.

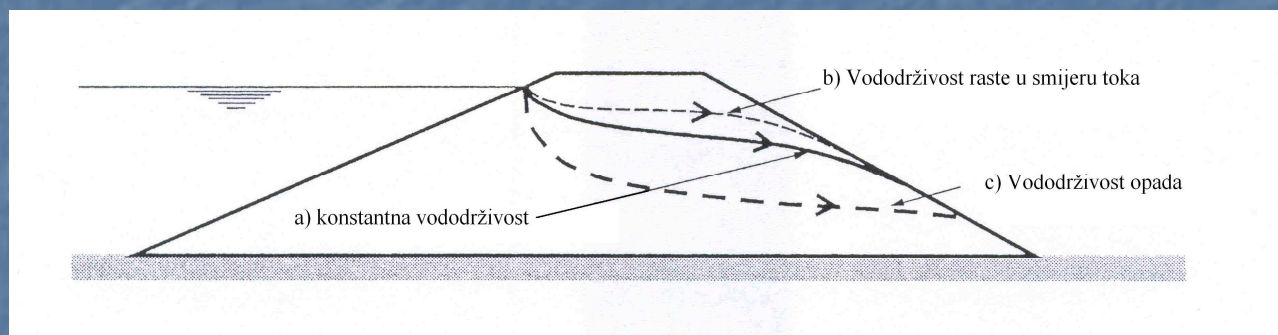
6) Težina daje stabilnost brani, tako što stvara silu trenja i time se odupire klizanju. Prisustvo vode u tijelu brane smanjuje efektivnu težinu i koheziju (kod vezanih) materijala, pa je korisno što više spustiti nivo vode u tijelu brane. Zato je potrebno procijeniti gdje se voda nalazi - treba procijeniti položaj filtracijske linije.

3.4 Filtriranje kroz branu i filtracijska linija

Filtracijska linija (freatička linija) predstavlja liniju slobodne površine vode u nasipu. Poznavanje položaja filtracijske linije omogućava:

- 1) Određivanje težine i kohezija svih dijelova brane.
 - 2) Određivanje mjesta za drenažu i filtre.
 - 3) Procjenu filtracijskog protoka, i sl.
- Položaj filtracijske linije dobiva se rješavanjem jednadžbi filtracije, koje se u proizvoljnom slučaju ne mogu analitički riješiti.
 - Za poznate parametre tla i granične uvjete rješenje se može dobiti numeričkim modelom, ili elektronskim zapisom (Pinder 1977).
 - Za niže faze projekta koriste se približni postupci, gdje se, uz određena pojednostavljenja zadatka, primjenjuju modificirana analitička rješenja jednostavnih problema.
 - Modifikacije analitičkih rješenja često omogućavaju računanje utjecaja anizotropije i heterogenosti materijala.

- Heterogenost nasipa određuje položaj filtracijske linije isto kao što heterogenost temelja određuje položaj piježometarske linije ispod temelja gravitacijske brane.
- Slučaj homogene i izotropne brane na vododrživom temelju prikazan je filtracijskom linijom "a".



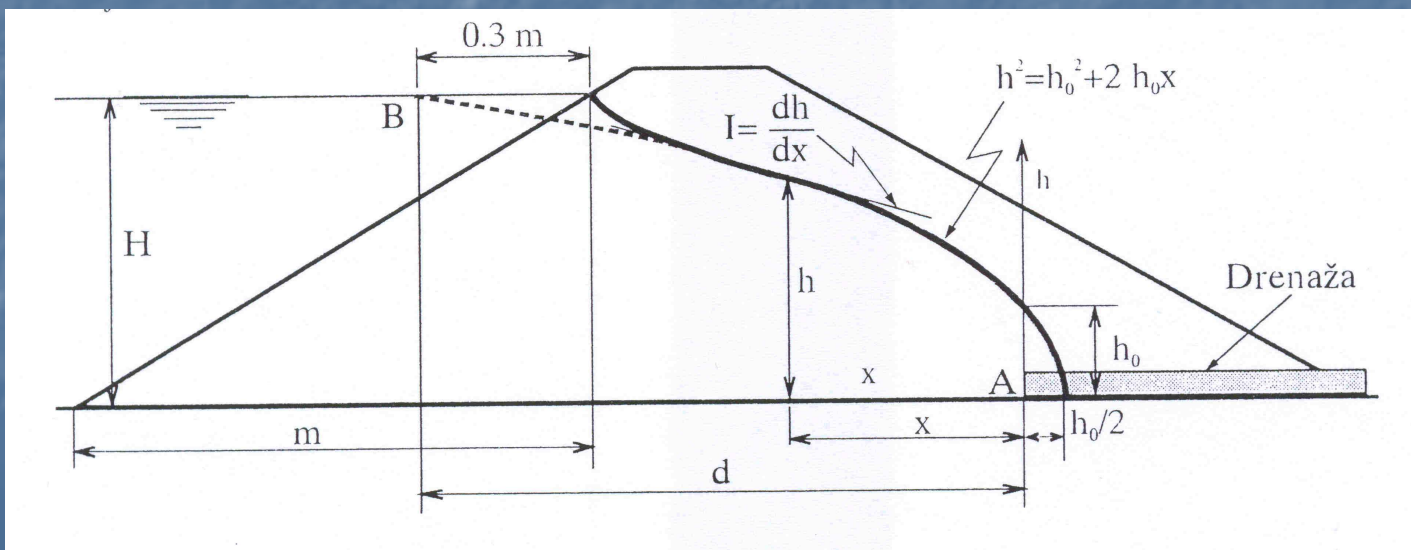
- Filtracijska linija se "podigne" ako vododrživost materijala raste u pravcu toka (linija "b"), jer su najveći gubici energije na nizvodnom dijelu nasipa, gdje je najveća brzina.
- Ako vododrživost opada u smjeru toka linija filtracije se "spušta" (linija "c"), jer su gubici energije dominantni na uzvodnom dijelu nasipa, gdje su brzine veće.

3.4.1 Kasagrandeov postupak za određivanje filtracijske linije na osnovi Kozenijevog rješenja

Zasniva se na Kozenijevom analitičkom rješenju, s filtracijskom linijom u obliku kvadratne parabole (osim najuzvodnijeg dijela gdje je krivulja prilagođena граниčnom uvjetu).

Kozenijevo analitičko rješenje

Na slici je prikazano Kozenijevo analitičko rješenje položaja filtracijske linije za homogenu branu (branu od homogenog materijala) fundiranu na vododrživom temelju s horizontalnim drenom na nizvodnom kraju.



➤ Pretpostavlja se ravninski zadatak, pa je strujanje istovjetno u svakoj presječnoj ravnini duž brane.

➤ Filtracijska linija određena je koordinatama x , i h :

x = horizontalna udaljenost mjerena od uzvodnog ruba drena u smjeru prema uzvodnom rubu brane

h = visina filtracijske linije (formalno piježometarska razlika točke na filtracijskoj liniji i točke u drenu nizvodno od filtracijske linije).

➤ Kozeni je pokazao da je linija filtracije kvadratna parabola s tjemenom u točki "A" na uzvodnom rubu drena:

$$x = \frac{h^2 - h_0^2}{2h_0^2}$$

➤ Parabola siječe liniju slobodne površine jezera u točki "B", udaljenoj 0.3 m od presjeka slobodne površine s uzvodnom kosinom brane.

➤ Zamjenom $x = d$, i $h = H$ za točku presjeka parabole i razine u jezeru dobiva se:

$$h_0 = \sqrt{H^2 + d^2} - d$$

od jednadžbe parabole odstupa jedino najuzvodniji dio filtracijske linije.

Može se procijeniti filtracijski protok po metru dužnom nasipa, q . Prema Darcy-evoj jednažbi je:

$$q = hKI = Kh \frac{dh}{dx}$$

$$h = \sqrt{2xh_0 + h_0^2}$$

što diferenciranjem po x daje:

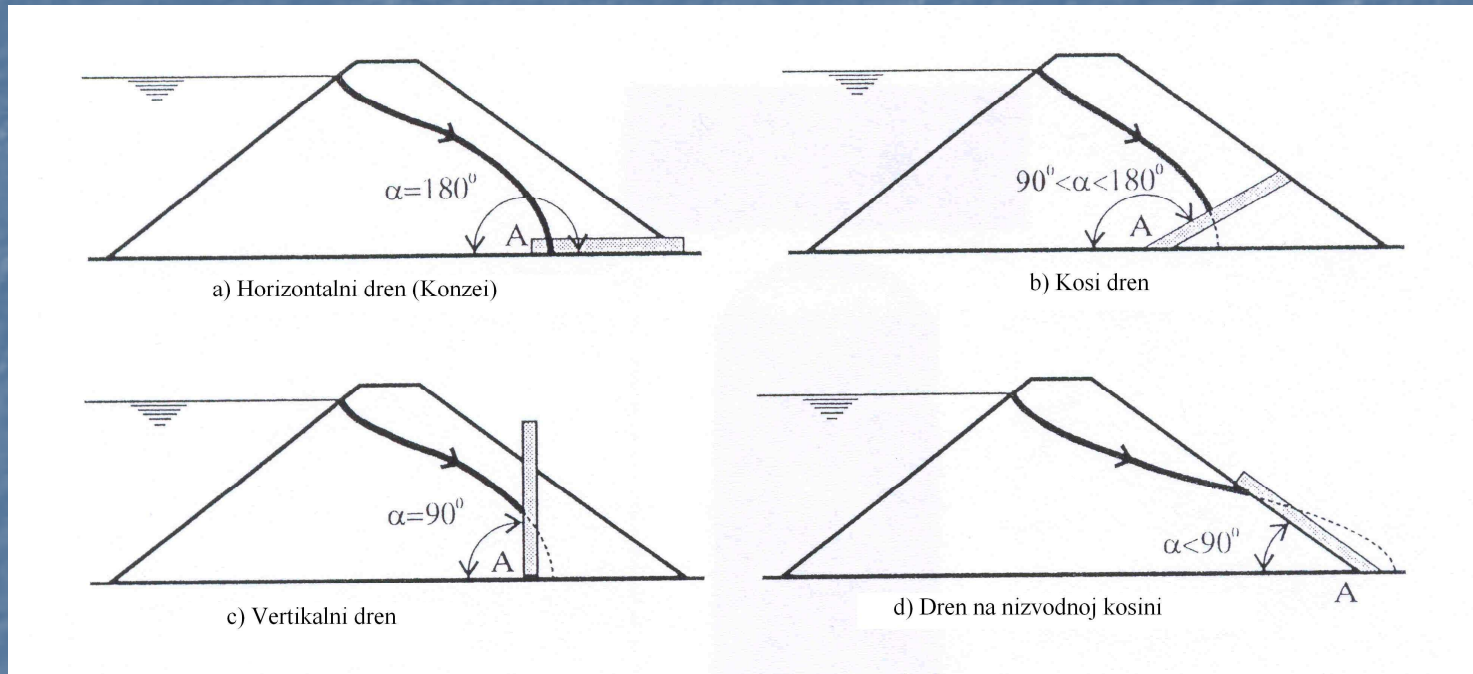
$$\frac{dh}{dx} = \frac{h_0}{\sqrt{2xh_0 + h_0^2}} = \frac{h_0}{h}$$

pa je protok jednak:

$$q = Kh_0 = K(\sqrt{H^2 + d^2} - d)$$

- Filtracijska linija se spušta pomicanjem drenaže uzvodno \Rightarrow povećava se stabilnost brane na klizanje, jer je povećan nepotopljeni dio nasipa (koji nije olakšan).
- Istovremeno se povećava i filtracijski protok, proporcionalno povećanju gradijenta dh/dx , odnosno povećanju visine h_0 , koja raste pomicanjem drenaže uzvodno.
- Ako $d \rightarrow 0$ onda $h_0 \rightarrow H$, ako $d \rightarrow \infty$ onda $h_0 \rightarrow 0$.
- Da bi se smanjio filtracijski protok drenažu treba pomaknuti nizvodno.

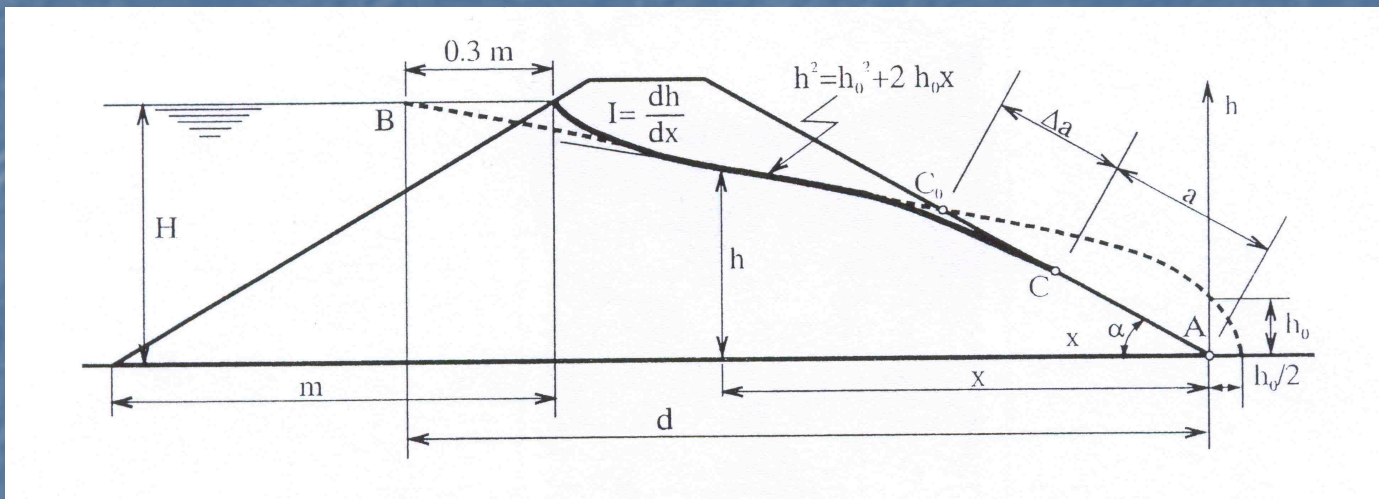
Kasagrande je proširio Kozenijevo rješenje za proračun filtracijske linije (s horizontalnim drenom) na slučajeve s "proizvoljnim" položajem drena. Dren se rotira oko točke "A" za kut α .



Slučaj d) na slici, gdje je zamišljena drenaža zarotirana na nizvodno lice, predstavlja filtriranje kroz nasip bez drena.

Na slici se uočava razlika u odnosu na Kozenijevo rješenje.

Točka "C", gdje linija filtracije izlazi na nizvodnu kosinu nasipa spuštenu je u odnosu na točku "C₀", u kojoj Kozenijeva parabola siječe nizvodnu kosinu.

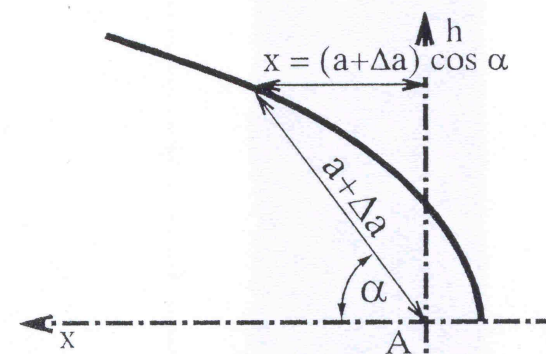


Položaj točke C₀ se određuje iz presjeka jednadžbe parabole i pravca koji prolazi kroz koordinatni početak "A" pod kutom α :

$$a + \Delta a = \sqrt{x^2 + h^2} = \sqrt{x^2 + h_0^2 + 2h_0x} =$$

$$= x + h_0 = (a + \Delta a) \cos \alpha + h_0$$

$$\Rightarrow a + \Delta a = h_0 / (1 - \cos \alpha)$$



Položaj točke "C", odnosno udaljenost $a = \overline{AC}$, ovisi o kutu α , i dobiva se preko iskustvenog dijagrama iz tablice (Creager 1961), ili se aproksimira formulom (Linsley et al., 1979):

$\Delta a / (a + \Delta a)$	30	60	90	120	180
α	0,36	0,32	0,25	0,17	0,00

$$\Delta a / (a + \Delta a) = (180 - \alpha) / 400$$

gdje je kut α , u stupnjevima

Za filtracijski protok vrijedi ista formula kao i kod Kozenijevog rješenja:

$$q = Kh_0 = K(\sqrt{H^2 + d^2} - d)$$

Opisani postupak vrijedi samo ako su temelji vododrživi. U protivnom mora se uključiti i protok kroz temelj.

Anizotropna sredina $K_x \neq K_y$

- Obično je vodopropusnost (koeficijent filtracije, K) značajno veća u horizontalnom (K_x) nego u vertikalnom pravcu (K_y) pogotovo kod konsolidiranih materijala.
- Za proračun filtracijske linije u uvjetima anizotropne vodopropusnosti primjenjuje se transformacija dužina u horizontalnom smjeru:
 - ⇒ strujanje u anizotropnoj sredini transformira se u strujanje u izotropnoj sredini, na koje se mogu primijeniti prethodno pokazana rješenja.
- Problem je ravninski.

- Jednadžba održanja mase za elementarni volumen jedinične duljine pri ustaljenoj filtraciji prema Darcy-evim pretpostavkama, a pri orijentaciji osi i brzina glasi:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

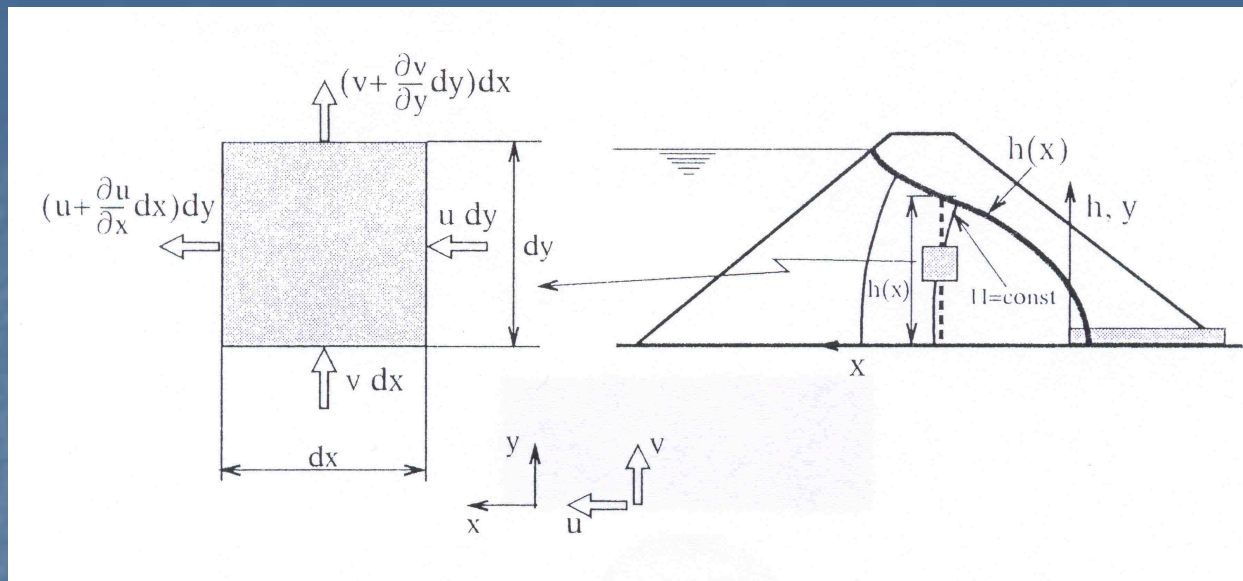
gdje su:

$$u = K_x \frac{\partial \Pi}{\partial x}$$

$$v = K_y \frac{\partial \Pi}{\partial y}$$

} komponente "Darcy-eve" filtracijske brzine za pravce "x" i "y":

Π = pijeziometarska kota – potencijal filtriranja



Uvođenjem Darcy-evih brzina, u , i v , u jednačbu održanja mase dobiva se:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial \Pi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial \Pi}{\partial y} \right) = 0$$

što za homogenu sredinu ($K_x = \text{const.}$, i $K_y = \text{const}$) daje:

$$K_x \frac{\partial^2 \Pi}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 \Pi}{\partial y^2} = 0$$

Ako je sredina izotropna ($K_x = K_y$) dobiva se Laplasova jednačba po pijezometarskoj koti, Π :

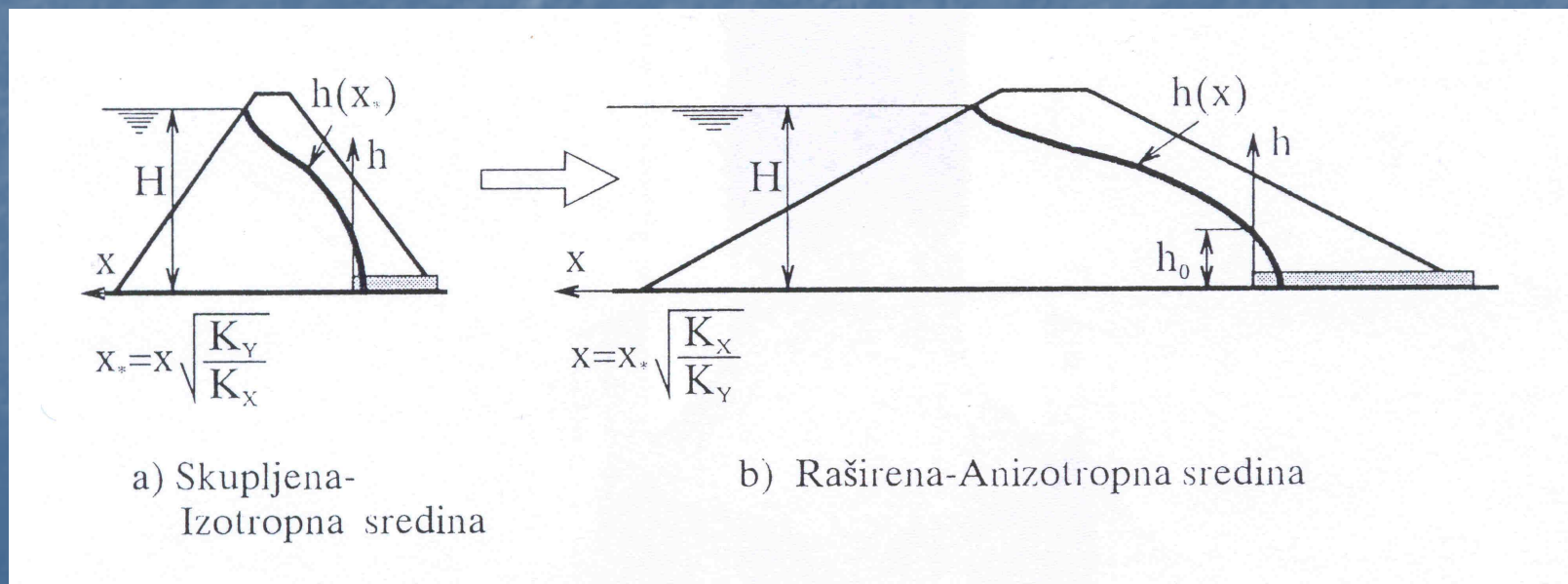
$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Pi}{\partial y^2} = 0 \quad \text{za koju vrijedi Kasagrandeovo rješenje}$$

Za anizotropnu sredinu može se pisati:

$$\frac{\partial^2 \Pi}{K_y \partial x^2} + \frac{\partial^2 \Pi}{\partial y^2} = 0 \quad \text{odnosno:}$$

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial x_*^2} + \frac{\partial^2 \Pi}{\partial y^2} = 0$$

Što predstavlja jednadžbu za izotropnu sredinu samo s novom neovisno promjenjivom (s novom duljinom) u horizontalnom pravcu, $x_* = x \sqrt{\frac{K_y}{K_x}}$, umjesto prvobitne promjenjive, x .



Linija filtracije $h(x_*) = h \left(x \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} \right)$ računa se po već opisanom Kozenijevom rješenju:

$$h = \sqrt{2x_* h_0 + h_0^2} = \sqrt{2x \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} h_0 + h_0^2}$$

$$h_0 = \sqrt{\frac{K_y}{K_x} d^2 + H^2} - \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} d$$

Filtracijski protok, q , procjenjuje se kao i u prethodnom razmatranju:

$$q = h K_x l = K_x h \frac{dh}{dx}$$

gdje se izvod dh/dx računa iz transformirane Kozenijeve parabole:

$$\frac{dh}{dx} = \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} \frac{h_0}{\sqrt{2x \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} h_0 + h_0^2}}$$

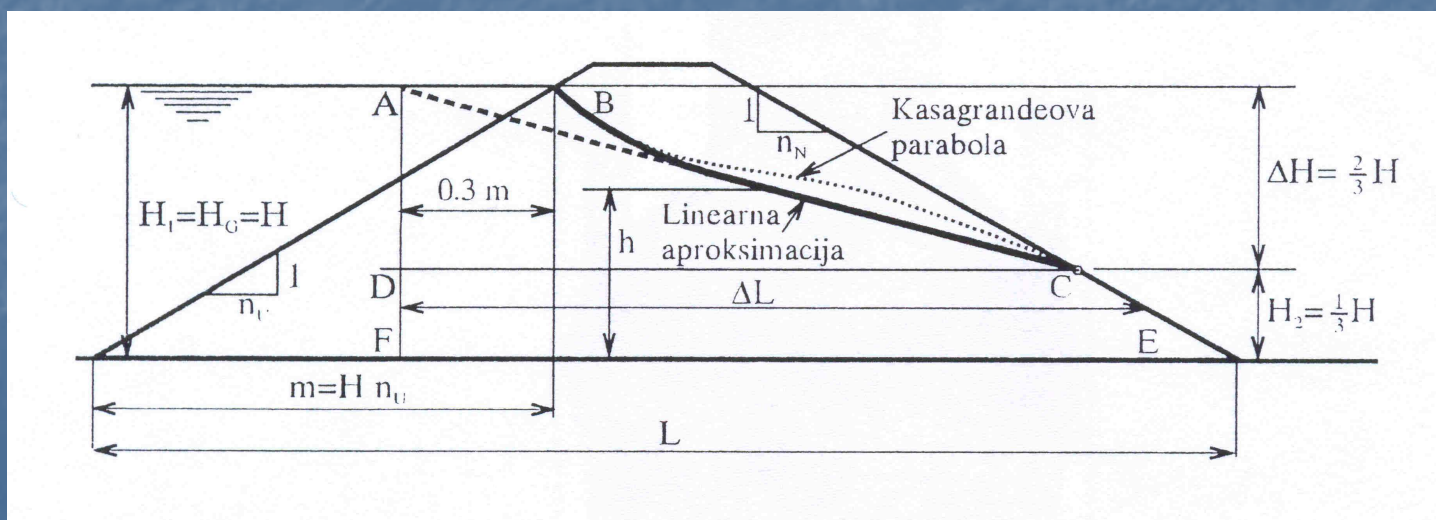
pa je protok jednak:

$$q = K_x \sqrt{\frac{K_y}{K_x}} h_0 = \sqrt{K_y K_x} h_0 = K' h_0$$

gdje je $K' = \sqrt{K_y K_x}$.

3.4.2 Linearna aproksimacija

- Često se u praksi filtracijska linija kroz nasip bez drena aproksimira ravnom linijom umjesto parabolom.
- Greška koja se pritom čini obično nije značajna, pa je u dosta slučajeva sasvim opravdano koristiti ovu jednostavnu metodu (Creager et al.1961).
- Razmatra se filtracija kroz homogenu izotropnu nasutu branu na vododrživoj podlozi.
- Treba procijeniti položaj filtracijske linije i filtracijski protok (po metru dužnom brane).



➤ Iskustvo s velikog broja objekata pokazuje:

1) Da filtracijska linija presijeca nizvodnu kosinu (u točki C) na rastojanju $H/3$ od temelja,

2) Da se filtracijska linija (većim djelom dužine) može aproksimirati ravnom linijom koja spaja točku C s točkom A, udaljenom za razmak 0,3 m od presjeka razine gornje vode i uzvodne kosine brane.

➤ Protok, q , određuje se iz Darcy -eve jednađžbe: $q = hKl = hK \frac{\Delta H}{\Delta L}$

➤ Očigledno je da piježometarska razlika iznosi: $\Delta H = 2/3 H$

➤ Visina protočnog presjeka, h (površina po jedinici širine) uzima se kao srednja visina filtracijske linije:

$$h = \frac{H_1 + H_2}{2} = \frac{1}{2} \left(H + \frac{H}{3} \right) = \frac{2}{3} H$$

➤ Duljina filtracije, ΔL , uzima se kao središnja linija trapeza DCEF:

$$\Delta L = L - \left(0.7n_U + \frac{n_N}{6} \right) H$$

$$\Rightarrow q = K \frac{2}{3} H \frac{\frac{2}{3} H}{\Delta L} = K \frac{4}{9} \frac{H^2}{\Delta L}$$

- Ako su u anizotropnoj sredini s koeficijentima vodopropusnosti K_x i K_y , jednako značajne obje komponente filtracijske brzine (u i v), za koeficijent K predlaže se:

$$K = \sqrt{K_x K_y}$$

- Napominje se da je ovakvo osrednjavanje besmisleno i pogrešno ako je dominantan pravac strujanja horizontalan, kada je mnogo bolja procjena $K \approx K_x$
- Slično, ako je dominantno strujanje u vertikalnom pravcu, treba računati s $K \approx K_y$

3.5 Filtracija u temeljima

- Nasute brane se često fundiraju na vodopropusnom tlu (aluviju – riječnom nanosu) pa je potrebno procijeniti protok filtracije kroz temelj, i gradijente filtracije na mjestu gdje voda napušta tlo (ili se smjenjuju slojevi različite krupnoće).
- Isto vrijedi i za temelje betonskih objekata, fundiranih na aluviju, gdje još treba odrediti i silu uzgona.
- Za složenije slučajeve (izrazita heterogenost, nepravilne konture) koriste se numerički modeli ili elektronski zapisi.
- Dosta praktičnih zadataka može se uspješno aproksimirati modificiranim analitičkim rješenjima, bez primjene numeričkih metoda.
- Kroz nekoliko primjera pokazati će se kako se dolazi do približnog rješenja kod jednostavnih problema filtracije u temeljima.
- Treba imati na umu da je gotovo svaki hidrotehnički objekt specifičan, pa nije preporučljivo slijepo preslikavati rješenja sa, po nečemu "sličnih" objekata.

3.5.1 Filtracija ispod betonske brane u homogenom tlu ograničene dubine

a) Horizontalna temeljna ploča bez priboja

- Prvo će se razmotriti filtracija u temelju betonske brane, s obzirom da nema filtracije kroz samu branu pa su granice filtracijske sredine jasno određene.
- Pretpostavlja se da je tlo izotropno $K_x=K_y$, i da je temeljna ploča horizontalna.
- Na ovakvo strujanje može se lako primijeniti potencijalna teorija i stvoriti strujna mreža međusobno okomitih strujnica i ekvipotencijalnih linija:
- Strujnice su linije koje imaju pravac brzine - pri ustaljenom tečenju voda se kreće duž strujnica.
- Ekvipotencijalne linije su linije istih piježometarskih kota (linije istih potencijala).
- Strujnice su okomite na ekvipotencijalne linije jer se strujanje obavlja po liniji gradijenta - najvećeg pada.
- Najveći pad između dvije ekvipotencijalne linije je uzduž njihove najkraće udaljenosti, a najkraća udaljenost je po normalni.

Kvadratna strujna mreža: razmak između dvije susjedne ekvipotencijalne linije = razmaku dvije susjedne strujnice: $\Delta L = \Delta T$

⇒ lako se određuju pritisci na temeljnu ploču (odakle se dobiva sila uzgona), gradijenti pritiska, a može se brzo procijeniti i filtracijski protok, kao:

$$q = \sum_{n=1}^{n=N} q_i$$

N – indeks koji označava broj "strujnih kanala" (protočnih površina između dvije strujnice)

q_i - protok (po jedinici dužine) između dvije strujnice:

$$q_i = K \frac{\Delta h}{\Delta L} \Delta T = K \Delta h$$

$\Delta h = \Delta H / M$ - pijeometarska razlika dvije susjedne ekvipotencijalne linije
($M+1$) - broj ekvipotencijalnih linija

Ukupni filtracijski protok kroz temelj je: $q = N K \Delta h = \frac{N}{M} K \Delta h$

- Strujanje nije uvijek jednostavno: sredina je često heterogena i anizotropna, a konture složene, pa konstrukcija strujne mreže postaje, u najboljem slučaju, zahtjevan i kompliciran posao.
- Pojednostavljanje se ponekad može postići linearizacijom piježometarske linije u temelju (kao kod brana na stjenovitom tlu).
- Time se ne utječe mnogo na točnost procjene uzgona, ali se značajno podcjenjuje izlazni gradijent filtracije što treba nadoknaditi odgovarajućim koeficijentom sigurnosti pri provjeri filtracijske stabilnosti temelja (na sufoziju i fluidizaciju).
- Filtracijski protok za linearnu aproksimaciju se računa kao:

$$q \approx KT \frac{\Delta H}{L}$$

- Ovako se dobiva nešto veći protok nego primjenom potencijalne teorije jer je potencijalni gradijent $(-dh/dx)_{50}$ na sredini temeljne ploče (gdje je protočni presjek, T, isti za obje metode), manji od prosječnog gradijenta.

b) Horizontalna temeljna ploča s pribojem

- Radi smanjena uzgona, filtracijskog protoka, i izlaznog gradijenta, često se u temelj pobijaju vertikalne zavjese –priboji \Rightarrow produžava filtracijski put vode.
- Filtracijska dužina, L , može se računati kao zbroj svih dodirnih "površina" (dužina) između objekta i tla:

$$L_{(o)} = 2p + L_{BR}$$

dubina priboja (zastora) širina temelja

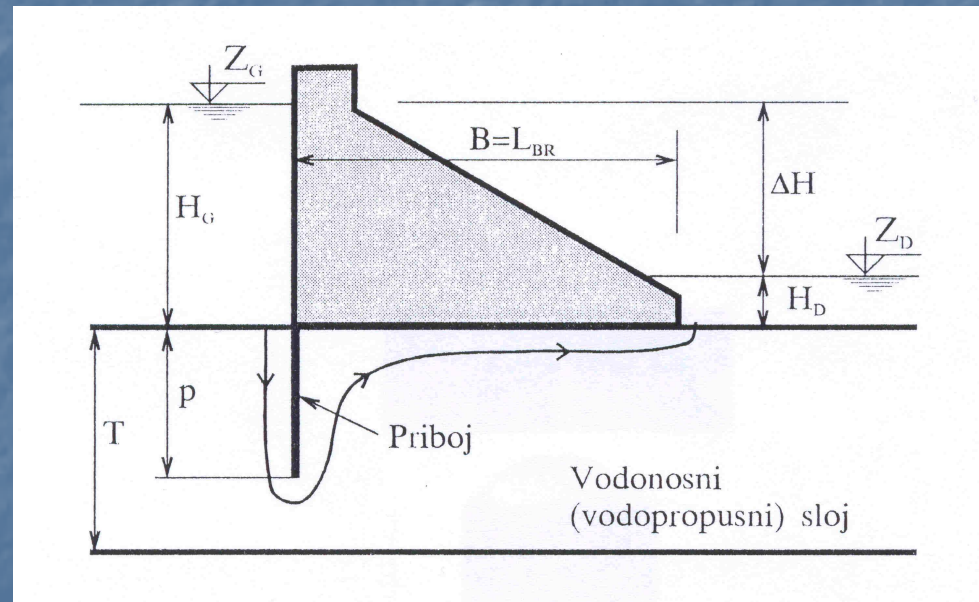
- Uzimajući u obzir anizotropnost koeficijenta filtracije ($K_x \gg K_y$), i mogućnost lokalnih slijeganja duž horizontalnog dijela temeljne spojnice, američki inženjer Lein predložio je da se dužina filtracije u temeljima reducira i računa kao zbroj:

1) *Punih (nereduciranih)* dužina po svim vertikalnim kontaktima objekta i temelja, i svim kosim kontaktima s nagibom strmijim od 45° i

2) Dužina reduciranih na jednu trećinu stvarne dužine za horizontalne kontakte i kose kontakte s nagibom blažim od 45° .

Ovako dobiven zbroj dužina (punih i reduciranih) uspoređuje se s dvostrukom širinom temelja, $2 \times LBR$, (ili dvostrukim rastojanjem nizvodnog i uzvodnog priboja, ako postoji nizvodni priboj), pa se za filtracijsku dužinu, $L(L)$, uzima manja od te dvije vrijednosti.

a) Za proračun gradijenta filtracije (s ciljem procjene opasnosti od sufozije i fluidizacije tla) treba koristiti Leinovu reduciranu dužinu filtracije $L(L)$, jer je kraća, pa daje veći gradijent.

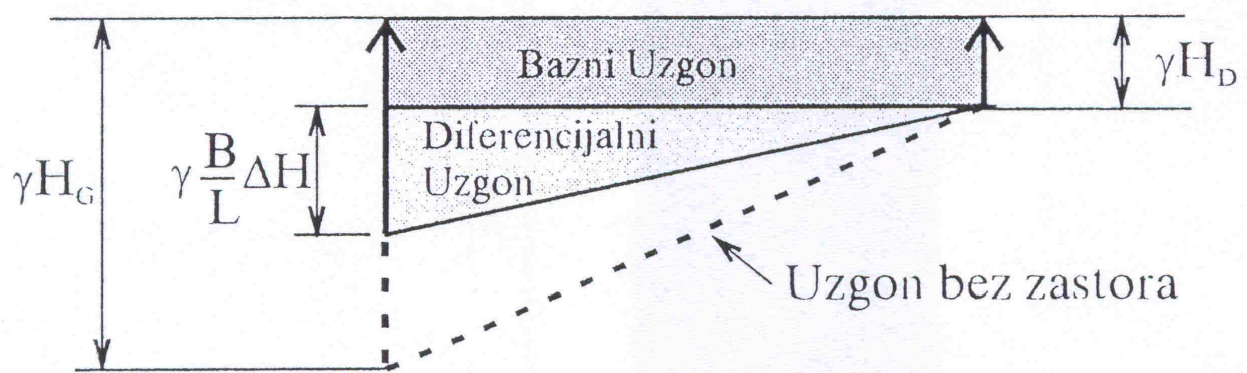
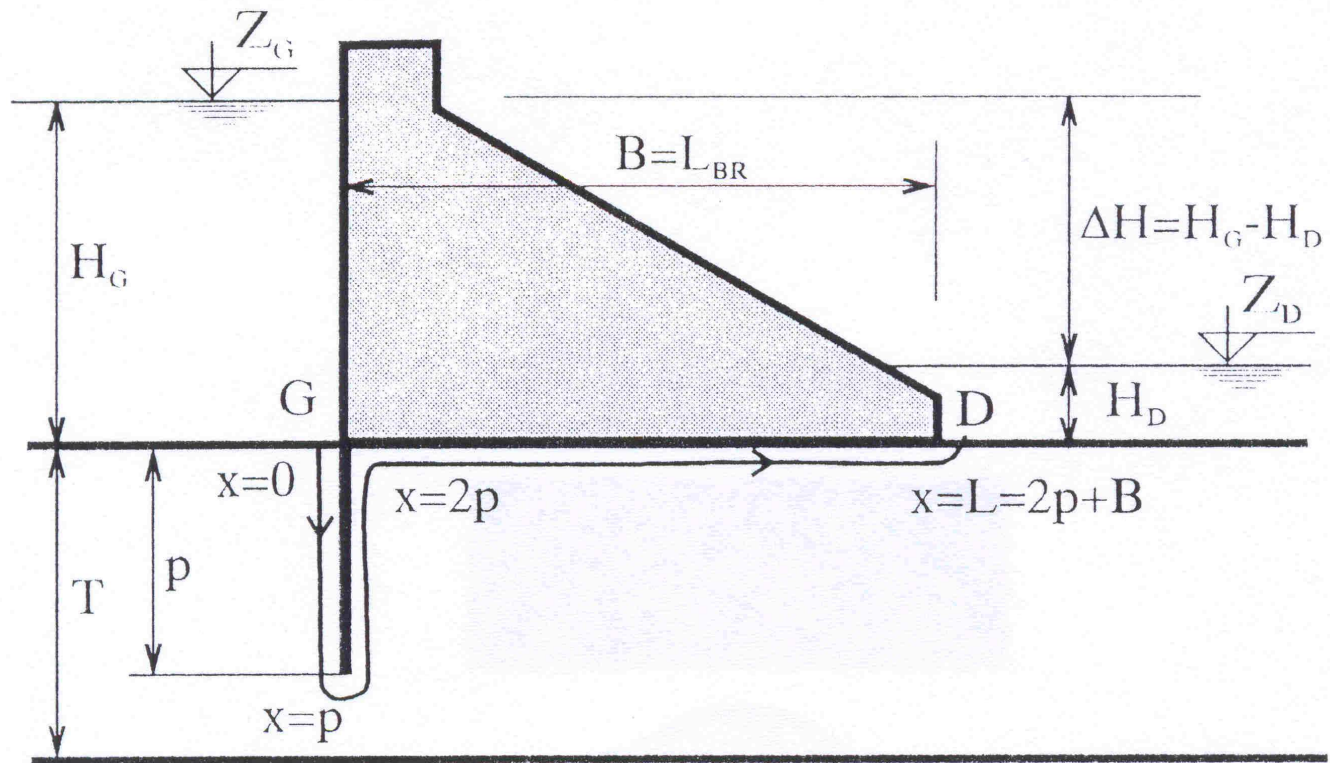


b) Za proračun uzgona treba koristiti "običnu" dužinu filtracije s nereduciranim horizontalnim dužinama jer se tako dobiva veći uzgon. (Ovaj postupak se naziva "Blajova" metoda).

- Uzgon je vertikalna komponenta hidrostatičke sile koja djeluje na dodiru objekta i tla (ili u pukotinama unutar samog objekta).
- Kod ravninskog zadatka uzgon se računa kao površina (volumen po jedinici dužine) između linije dodira i projekcije linije dodira na pijeziometrijsku liniju (koja vlada duž linije dodira), pomnožena sa specifičnom težinom vode.
- Položaj pijeziometrijske linije, $h(x)$, može se aproksimirati tako što se denivelacija gornje i donje vode, $\Delta H = H_G - H_D$, linearno rasporedi duž linije dodira.
- Ako se rastojanje duž linije dodira, mjereno od najuzvodnije točke "G", označi s 'x', a ukupna dužina linije dodira (filtracijska dužina) s, $x_D=L$, linearnom interpolacijom se dobiva:

$$h(x) = H_D + \frac{L-x}{L} \Delta H$$

- Filtracijski protok u temelju, q , ne može se dobiti direktno iz Darcy - eve jednačine.
- Priboj se, hidraulički gledano, ponaša kao zatvarač na sredini cijevi-stvara gubitke, ali ne određuje kontrolni presjek (za razliku od zatvarača na slobodnom kraju cijevi, Creager 1961).



U tablici je dana iskustvena ovisnost, bezdimenzionalnog filtracijskog protoka $\varphi_q = q/q_0$ (q_0 je protok bez priboja), od odnosa dubine priboja i debljine vodonosnog sloja, p/T .

p/T	1.00	0.95	0.85	0.80	0.60	0.20	0.00
φ_q	0.00	0.25	0.42	0.48	0.66	0.90	1.00

$$\varphi_q = \left(1 - \frac{p}{T}\right)^{0.45}$$

Filtracijski protok, q , se odatle računa kao:

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

Za točnija razmatranja može se koristiti strujna mreža (mreža strujnica i ekvipotencijalnih linija), numerički model, ili elektronski zapis.

3.6 Metode kritičnih kliznih krugova

- Iskustvo je pokazalo da će kosina brane najprije skliznuti po površini kružnog (ili približno kružnog) oblika.
- Metode kritičnih kliznih krugova uspoređuju okretni moment smicanja sa stabilizirajućim momentom oko centra kliznog kruga, čiji je isječak AB potencijalna površina smicanja kosine.
- Smicanje izaziva tangencijalna komponenta težine – sila T_i dok stabilnost daju normalna komponenta težine, N_i , i kohezija $L_i c_i$.
- Obzirom da sve razmatrane sile imaju isti krak (radijus kliznog kruga, r) odnos stabilizirajućeg i klizajućeg momenta će biti:

broj elemenata u razmatranom kružnom odsječku

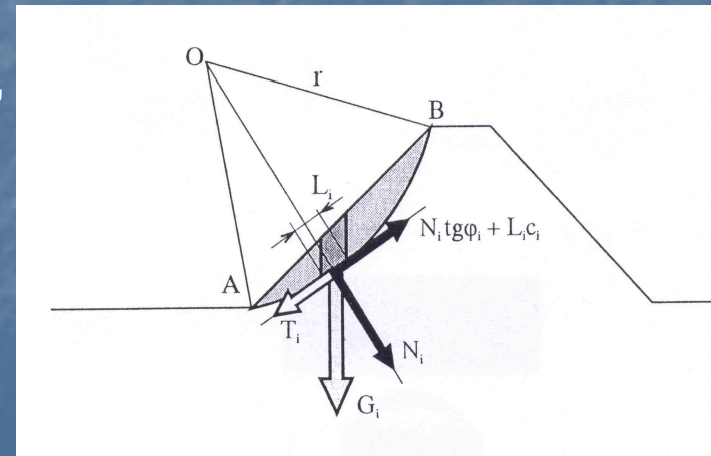
Dužina elementa "i"

Kohezija elementa "i"

$$\frac{\sum_{i=1}^N (N_i \operatorname{tg} \varphi_i + L_i c_i)}{\sum_{i=1}^N T_i} > C_s$$

Kut unutarnjeg trenja elementa "i"

Zahtjevani koeficijent sigurnosti



3.7 Rezime o osnovnim pravilima za projektiranje nasutih brana

Najvažnija pravila za stabilnost nasutih brana (Creager 1961) su:

- 1) Ne smije se dozvoliti prelijevanje preko nasipa brane
- 2) Ne smije se dozvoliti nekontrolirana filtracija vode kroz branu.
- 3) Filtracijska linija mora se uvijek presjeći filtarskim drenom (horizontalnim, kosim ili na nizvodnoj kosini).
- 4) Brzina (gradijent pritiska) vode koja izlazi iz tijela i temelja brane, ne smije izazvati pokretanje čestica brane i/ili tla.
- 5) Nagibi uzvodne i nizvodne kosine moraju biti stabilni, s dovoljnim koeficijentom sigurnosti, za sve promatrane slučajeve opterećenja (uključujući i seizmička). (Uzvodna kosina mora biti stabilna na naglo spuštanje razine u akumulaciji). Analiza stabilnosti mora obuhvatiti i temelje ako su od materijala podložnog klizanju.
- 6) Uzvodno lice brane mora se zaštititi od razornog djelovanja valova, a nizvodno od ispiranja kišom.

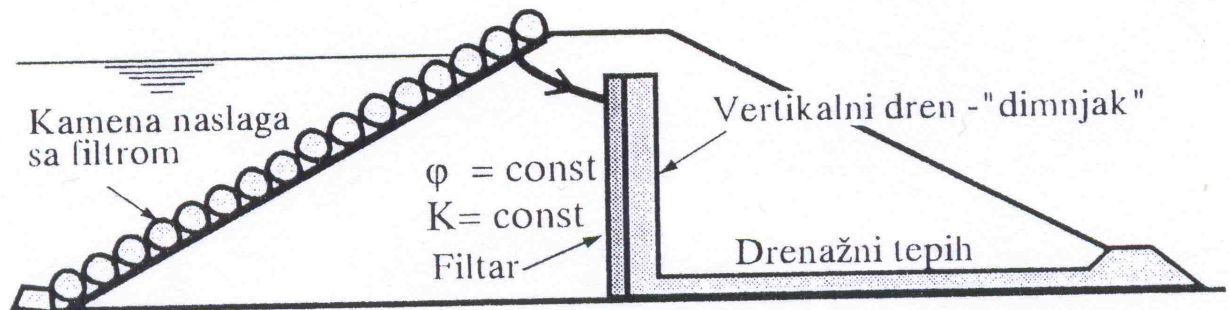
3.8 Tipovi nasutih brana

Osnovna podjela nasutih brana je na:

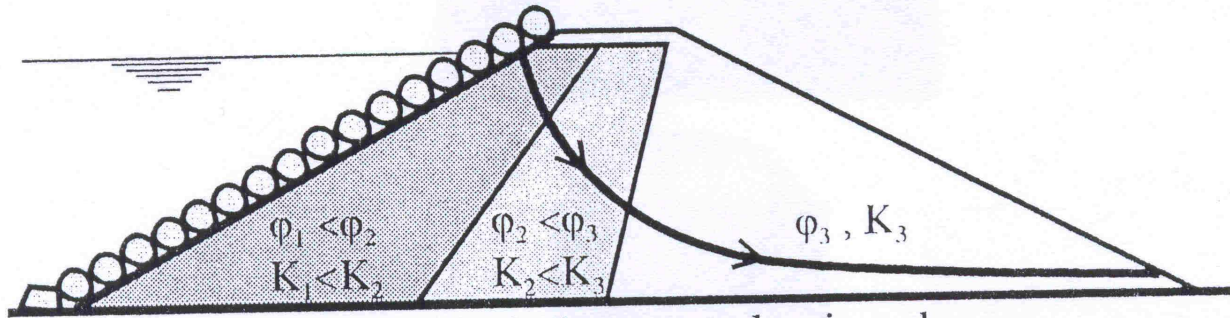
1. Zemljane brane i
2. Brane od kamenog nabačaja.

3.8.1 Zemljane brane

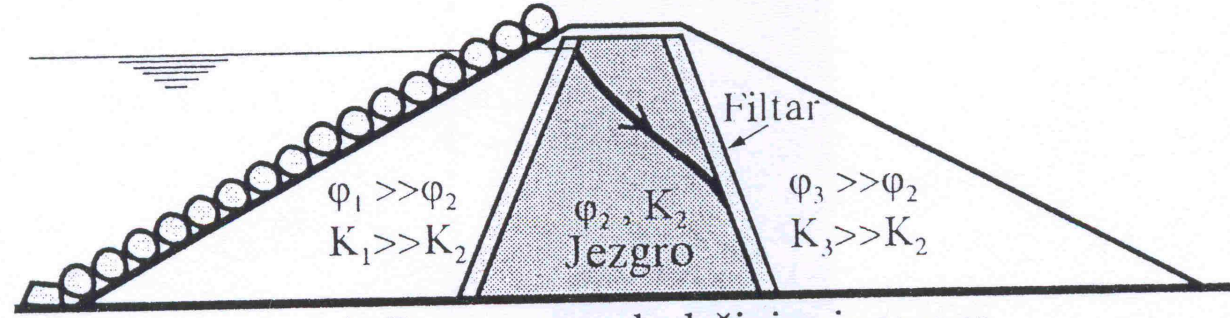
- Grade se od materijala manje krupnoće (glina, pijeska, sitnog šljunka).
- Brane od sasvim homogenog materijala su rijetkost (raspoloživi materijali su manje ili više heterogeni te se ne isplati iz " smjese " koristiti samo jednu frakciju).
- Ako je cijeli nasip približno homogenog sastava, smatra se da je brana homogena.
- Homogena brana se štiti od sufozije (ispiranja) nizvodnom drenažom.
- Obično se vertikalni ili kosi dren – tzv. " dimnjak " ("chimney") povezuje horizontalnim drenažnim tepihom s nizvodnom nožicom.
- Ovime se osigurava efikasno spuštanje filtracijske linije, naročito kod izrazito anizotropnih materijala.



a) Homogena brana



b) Vododrživost opada nizvodno

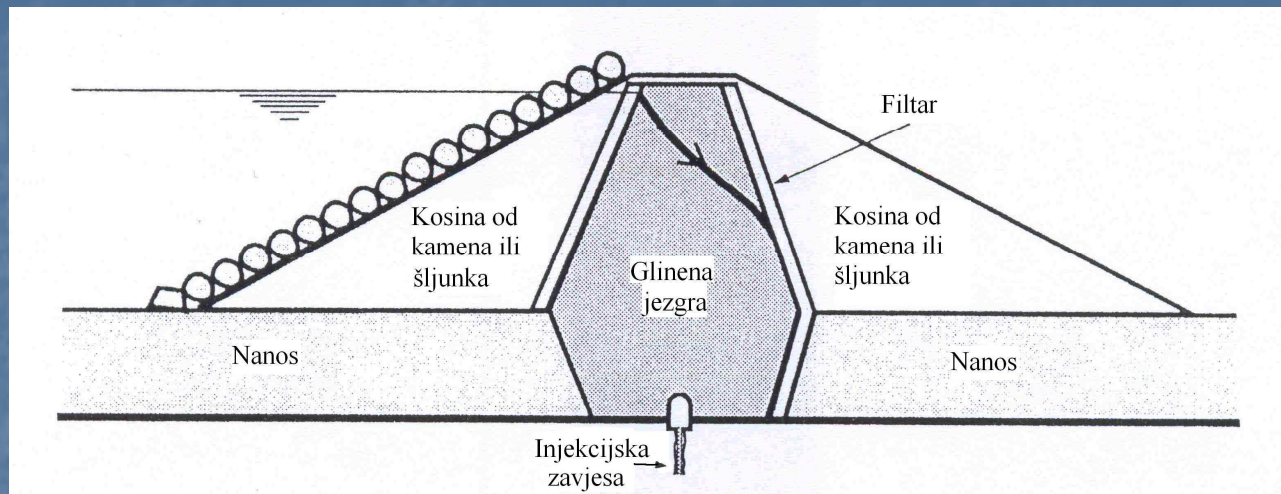


c) Brana sa vododrživim jezgrom

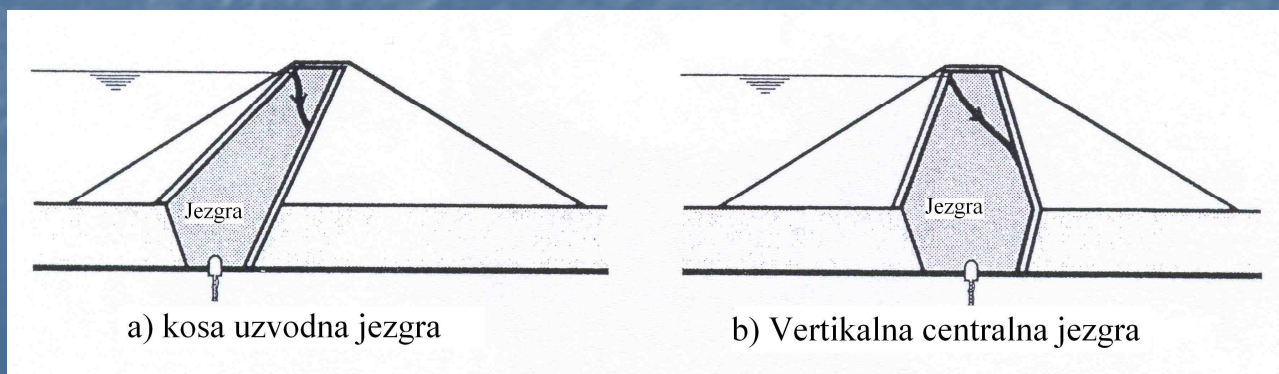
- Homogene brane se grade od materijala znatne vododrživosti, kako bi se smanjio gubitak vode.
- Ovakav materijal je slabije nosivosti, što zahtjeva relativno blag nagib kosina i veliki volumen nasipa.
- Krupniji materijali (pijesak i šljunak) imaju veliki kut unutrašnjeg trenja, čime se postižu strmije kosine, a time i manji volumen nasipa, ali su zbog velikih pora slabo vododrživi. Ovo nameće ideju o zoniranju presjeka brane.
- Obično se vododrživi (a slabije nosiv) materijal ugrađuje na uzvodnom dijelu presjeka, a prema nizvodnom kraju se nižu slojevi slabije vododrživosti i veće nosivosti → postiže se značajno obaranje filtracijske linije pa je veći dio nasipa oslobođen punog pritiska.
- S druge strane, uzvodni dio nasipa je slabije nosiv, što zahtjeva blažu kosinu.

- U suvremenoj praksi najčešće su zonirane zemljane brane s vododrživom glinenom jezgrom.
- Kosine (" potporne zone") se grade od stabilnog krupnozrnog materijala, koji štiti slabije nosiv, ali vododrživi materijal u jezgri. Ovako se postiže stabilnost sa strmijim kosinama (manjim volumenom nasipa) nego za slučaj b).
- Za jezgru je bitno da pored dobre vododrživosti ima i visoku plastičnost, što smanjuje rizik od nastanka pukotina pri eventualnim deformacijama.
- Obzirom da razlika u krupnoći materijala omogućava ispiranje čestica jezgre kroz pore čestica kosina, na kontaktu jezgre i kosina mora se postaviti filtarska zaštita i to i nizvodno i uzvodno od jezgre (zbog povratnog tečenja pri pražnjenju akumulacije).
- Debljina jezgre u odnosu na kosine određuje se ovisno o osobinama i raspoloživosti materijala.

Po položaju jezgra može biti kosa-uzvodna, ili vertikalna-centralna.



Prednost kose uzvodne jezgre u odnosu na centralnu vertikalnu je efikasnije obaranje filtracijske linije, što omogućava da znatno veći dio brane bude oslobođen uzgona, čime se popravljiva stabilnost brane.



3.8.2 Brane od kamenog nabačaja

- Grade se nasipanjem i zbijanjem lomljenog kamena.
- Obzirom na veliku vodopropusnost kamenog nabačaja uvijek se grade s vododrživom zavjesom.

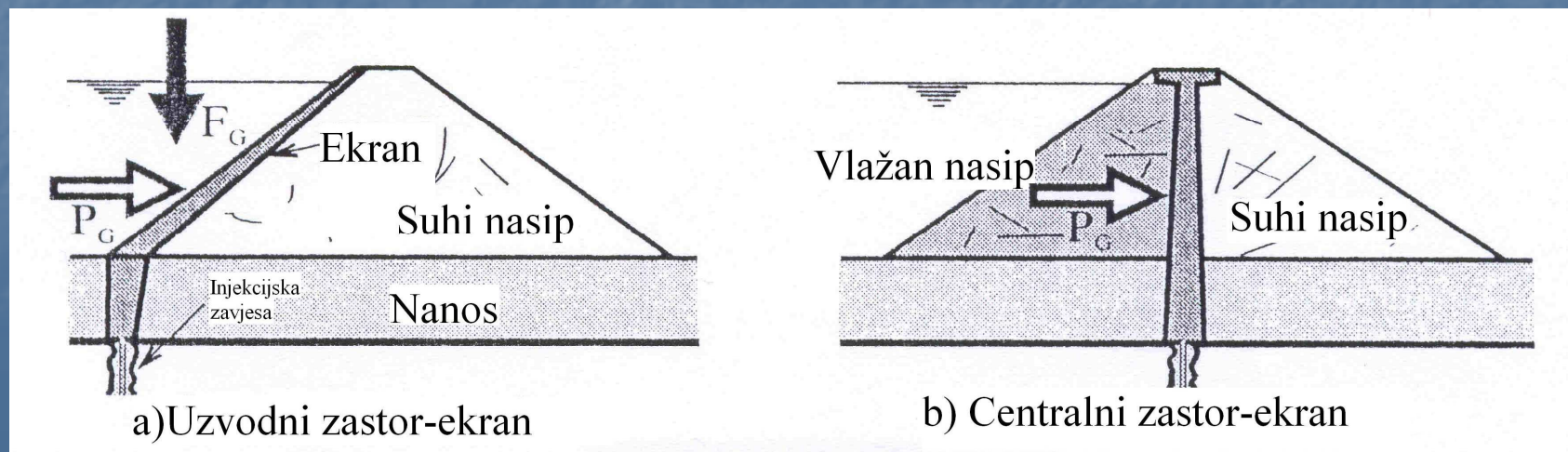
To može biti:

a) glinena jezgra

b) kruta zavjesa, obično armirano – betonski ili asfalt – betonski ekran

- Drenaža u tijelu brane je suvišna, obzirom na poroznost materijala.
- Filtarska zaštita između glinene jezgre i kamenog nabačaja je neophodna.
- Grade se u područjima s lako dostupnim - jeftinim kamenom za nasip, ako je materijal za zemljanu branu nedostupan ili skup.
- U prednosti su u vlažnim i hladnim klimatskim uvjetima, gdje bi građevinska sezona za nasipanje zemljane brane bila nedopustivo kratka.
- Otpornije su na eroziju od zemljanih, a zbog velikog kuta unutrašnjeg trenja dozvoljavaju i strmije nagibe kosina.

- S druge strane, zahtjevnije su u pogledu fundiranja u odnosu na zemljane brane (ali su u tom pogledu znatno povoljnije od betonskih).
- Potrebna je veća nosivost tla jer je manja površina temeljne stope i neophodno je ograničiti slijeganje temelja zbog opasnosti od pucanja zavjese.
- To ne predstavlja problem kod fundiranja na zdravoj stijeni, ali zahtjeva dobro zbijanje šljunkovitog ili pjeskovitog temelja.
- Krute zavjese, kao i glinena jezgra, mogu biti kose uzvodne, ili centralne vertikalne.
- Zavjesa se ukopava do stjenovitog materijala u temelju gdje se vezuje s injekcijskom zavjesom, a filtarska zaštita u tijelu brane mu nije potrebna.



- Uzvodni ekran je zastor na samom uzvodnom licu brane.
- Najčešće se radi od armiranog betona ili asfalt – betona.
- Prednosti:
 - S gledišta stabilnosti, povoljniji je od vertikalnog, jer je cijela brana na "suhom", a klizanju se suprotstavlja i vertikalna komponenta hidrostatičke sile što omogućava strmije nagibe kosina.
 - Pristupačnost za održavanje, što je praktički nemoguće kod rješenja s vertikalnom ekranom.
 - Osigurava zaštitu od valova i omogućava jednostavnije nadvišenje brane, ako se za to ukaže potreba tijekom eksploatacije.
- Nedostatak:
 - Velika osjetljivost na slijeganje nabačaja ispod ekrana, zbog čega može doći do deformacija ekrana i pucanja.
- Prednost vertikalnog ekrana je što se uz njega (s uzvodne strane) može postaviti vododrživi glineni sloj koji sprečava filtraciju u slučaju pojave pukotina u betonu.

3.9 Konstrukcijska pravila i okvirne dimenzije

3.9.1 Zemljane brane

Zemljane brane se grade:

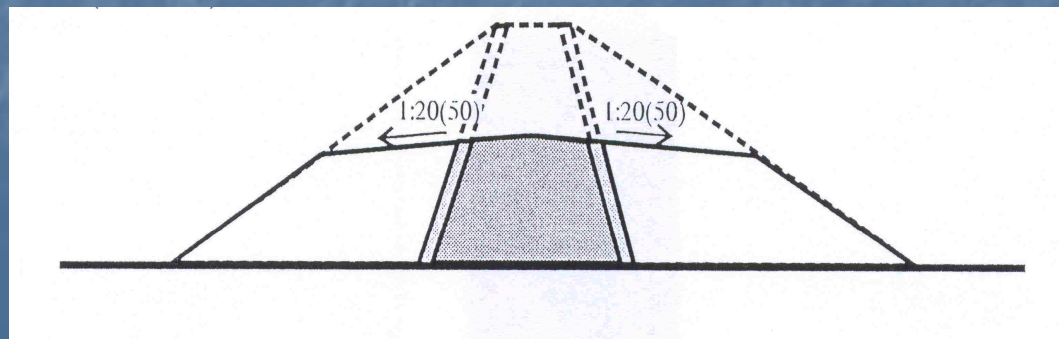
- 1) Mehaničkim nasipanjem i nabijanjem, ili
- 2) Hidrauličkim nasipanjem.

1) Mehaničko nasipanje i nabijanje

- Materijal za nasipanje se uzima s pozajmišta, gdje mu se otkopavanjem značajno povećava volumen pa se pri ugrađivanju mora zbijati, kako bi se smanjilo naknadno slijeganje ili bubrenje.
- Zbijanjem se povećava vododrživost materijala, jer se smanjuje veličina pora prilikom "pakiranja" zrna, a raste i otpornost na smicanje.
- Zbijanje ne treba zamijeniti s konsolidacijom: pri zbijanju iz pora se istiskuje zrak i to je brz proces, a konsolidacija je dugotrajan proces koji podrazumijeva smanjenje volumena na račun postepenog istiskivanja vode djelovanjem opterećenja, obično od težine samog objekta.

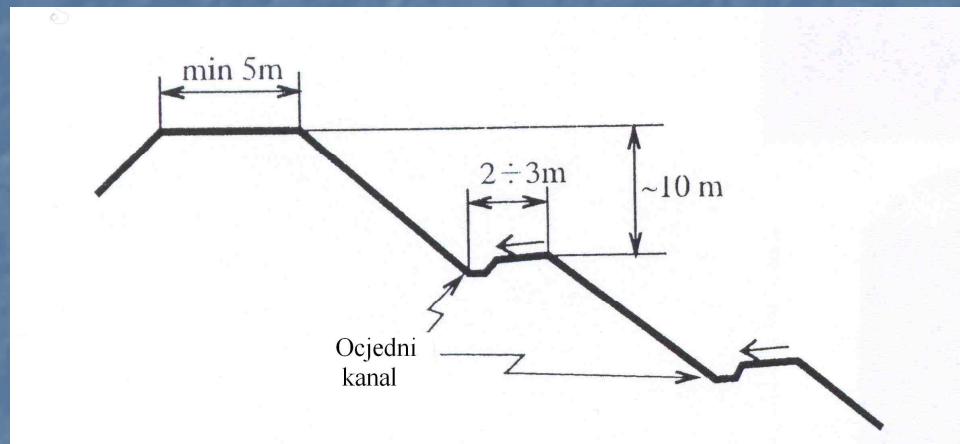
- Zbijanje gline se vrši teškim valjcima i ježevima u slojevima debljine od 20 – 30 cm.
- Najučinkovitije je pri optimalnoj vlažnosti – obično prirodna vlažnost materijala, ili vlažnost nešto manja od prirodne.
- Previše vlažan materijal se zbog prisustva vode ne može zbiti do zadovoljavajućeg stupnja.
- Zato se glina ne smije ugrađivati po kiši pa je vremenski period (u toku godine) pogodan za gradnju zemljanih brana kraći nego kod betonskih.
- Meteorološki uvjeti na gradilištu su vrlo bitni za procjenu trajanja radova.
- Ugradnja nasutog materijala koji nije glinovit (pijesak, šljunak) također zahtjeva zbijanje, a dinamičko nabijanje daje bolje rezultate od statičkog.
- Ovakvom materijalu pogoduje veća vlažnost pri zbijanju. Što je materijal krupniji, to se prilikom zbijanja dodaje više vode.
- Filtarski materijal se nabija u slojevima od ~ 30 cm debljine.
- Prije početka nasipanja temelj se čisti od organskog materijala da nakon truljenja ne bi ostale šupljine u zemljanoj masi, što može izazvati slijeganje brane (u nasipu brane dozvoljeno je najviše 5-6 % organskog materijala).

- Priboje je potrebno učiniti prije početka nasipanja, dok se injektiranje može uraditi i kasnije kroz injekcijsku galeriju.
- Injekcijska zavjesa mora biti izvedena kao nastavak vododržive jezgre ili betonskog ekrana.
- Potrebno je osigurati dobru vezu između susjednih slojeva nasipa, posebno između temelja i prvog sloja, kako bi se izbjeglo klizanje po ravnini spoja, kao i stvaranje privilegiranog puta filtracijske vode između slojeva.
- Ovo se postiže ohrapavljenjem donjeg (starog) sloja ježevima neposredno prije početka nasipanja novog sloja.
- Kada se rad na nasipanju privremeno prekida (kiša, mraz) potrebno je zbijanje gline završiti glatkim valjcima kako bi se dobila glatka, ocjedna površina s koje kiša otječe prije nego što se upije u nasip.
- Iz istog razloga slojeve treba raditi s uzdužnim padom (1:20 – 1:50) od jezgre prema kosinama



- Visinski položaj krune nasipa određuje se slično kao kod betonskih brana. Postoji i jedna važna razlika. I pored svih mjera za smanjenje slijeganja kod nasutih brana treba se računati s 1 – 6% slijeganja, pa prema tome i izvoditi nasip (osigurati odgovarajuće "nadvišenje" nasipa).
- Neuzimanje u obzir slijeganja nasipa može biti kobno, jer se preljev fundiran na stijeni, daleko manje sliježe od nasipa brane, pa će nasip ostati snižen u odnosu na preljev.
- Ovo znači da se na preljevu može javiti nivo vode viši od krune nasipa, pa će nasip biti preliven s katastrofalnim posljedicama.
- Da bi se to izbjeglo na uzvodnom rubu krune gradi se valobran, a na nizvodnom ograda.
- Uzvodna kosina mora biti zaštićena od valova, što se postiže: oblogom od betonskih ploča, oblogom od rukom položenog kamena (kamenom naslagom), slojem kamenog nabačaja ili povećanjem otpornosti površine nasipa cementom.
- Ova zaštita mora biti postavljena od krune brane do najnižeg radnog nivoa vode u akumulaciji.
- Između nasipa i zaštitnog sloja ugrađuje se filter, čime se onemogućava ispiranje materijala nasipa prilikom pražnjenja akumulacije.

- Nizvodna kosina se mora zaštititi od erozivnog djelovanja kiše:
- kamenim nabačajem ili oblogom
- zatravljivanjem nizvodne kosine pogodnim gusto rastućim travama
- Ukoliko nema opasnosti od procjeđivanja kroz nizvodnu kosinu, otpada i potreba za filtarskom zaštitom ispod kamene obloge.



- Kod brana visokih preko 15-20 m rade se proširenja – **berme** na svakih 10-ak m visine, u cilju smanjenja erozivne energije kiše.

Široke su 2 – 3 m, s poprečnim padom prema nožici ("prema unutra"), i s uzdužnim ocjednim kanalima kojima se voda odvodi, obično do kolektora na bokovima, a odatle kontrolirano do donje vode.

Posebnu pažnju treba obratiti na mjesta spoja nasutog materijala s dijelovima betonske konstrukcije i bokovima dolina:

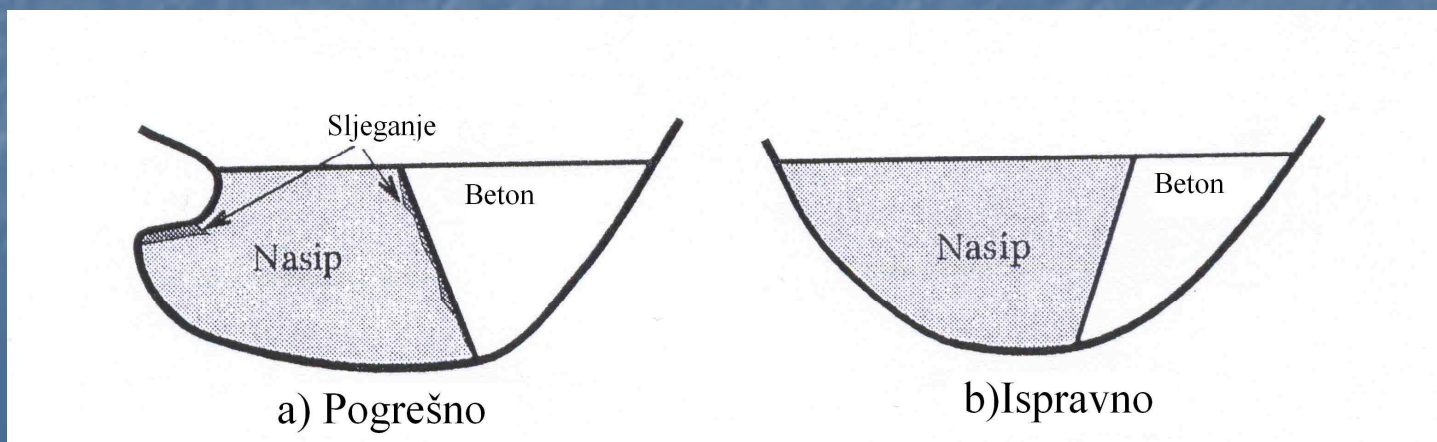
→ tu najlakše dolazi do stvaranja pukotina i nekontroliranog procjeđivanja.

1. Ne smije se dozvoliti da betonska konstrukcija ili dio boka doline budu iznad zbijenog materijala jer to dovodi do pojave šupljina na mjestu dodira zbog naknadnog slijeganja.

Granični zidovi trebaju biti nagnuti od nasipa, a nikako prema nasipu (materijal nasipa treba nalijegati na zidove).

2. Zidove kojima se nasip veže za konstrukciju treba porebriti čime se produžava put procjeđivanja vode na spoju.

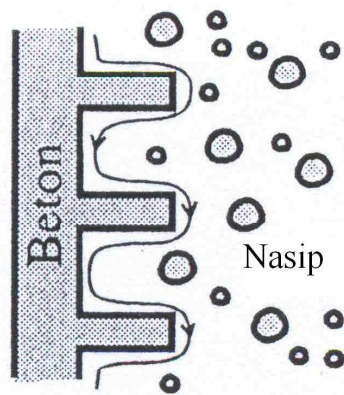
Dijelovi nasipa oko betonskog objekta nisu pristupačni za velike strojeve pa se zbijanje mora vršiti specijalnim nabijačima.



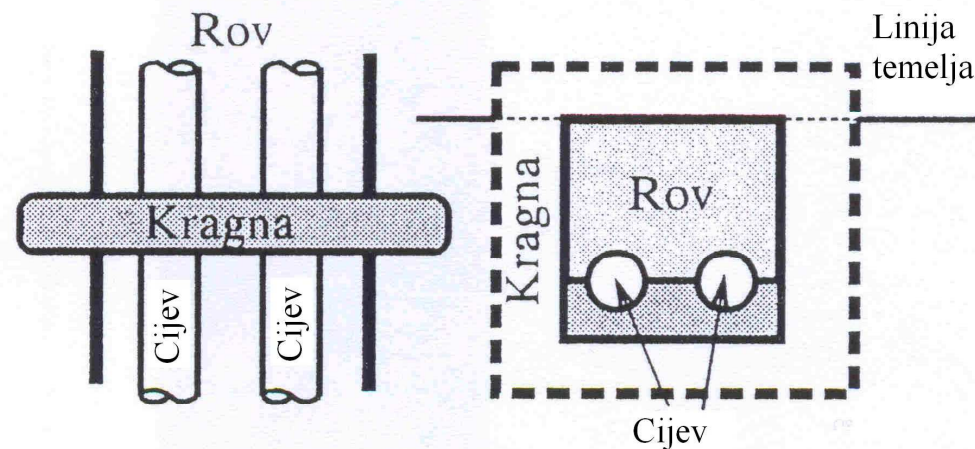
3. Cijevi se ne postavljaju kroz nasip brane, niti kroz erodibilne temelje (treba ih postaviti kroz bokove doline u stjenovitom materijalu).

Ako je neophodno da cijevi prođu kroz branu, onda se mogu postaviti jedino u rovove u temelju, i to samo ako je temelj dovoljno nosiv, kako ne bi došlo do neravnomjernog slijeganja i pucanja cijevi.

Rovovi se presijecaju "kragnama" za produženje puta filtracijske vode, a neophodno je osigurati zatvaračnicu i na uzvodnom kraju cijevi kako bi se omogućio pristup u slučaju havarije.



a) Porebreni zid



b) Cijevi u rovu sa kragnom

2) Hidrauličko nasipanje

Rjeđe je primjenjivana metoda za izradu brana, obzirom da se obično isplati samo za izuzetno velike količine nasipanja. Zemljani materijal se razmuti u vodi pa se specijalnim crpkama transportira i deponira na mjesto nasipanja.

3) Okvirne dimenzije

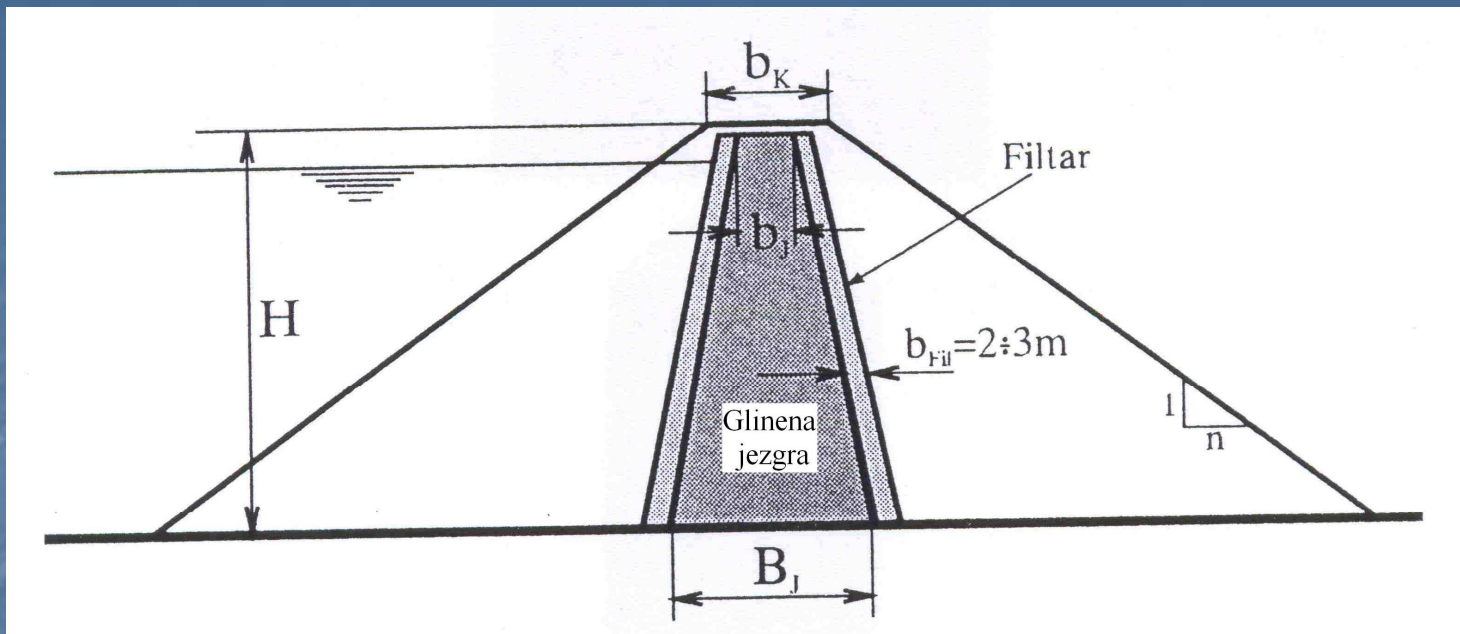
U početnim fazama projektiranja neke od dimenzija nasutih brana (širina krune, širina jezgre, nagibi kosina) se procjenjuju iskustvom. Širina nasipa brane u kruni, b_K , može se računati kao:

$$b_K = 1 + A\sqrt{H}$$

gdje je $A = 1.1 - 1.65$, s tim da je $b_K > 4\text{m}$.

Širina glinene jezgre u kruni, b_J , obično nije manja od 3 m (mada postoje brane s $b_J = 1\text{m}$), dok se za širinu u osnovi, B_J , može pretpostaviti

$$B_J = \frac{1}{2} \text{ do } \frac{1}{4} H$$

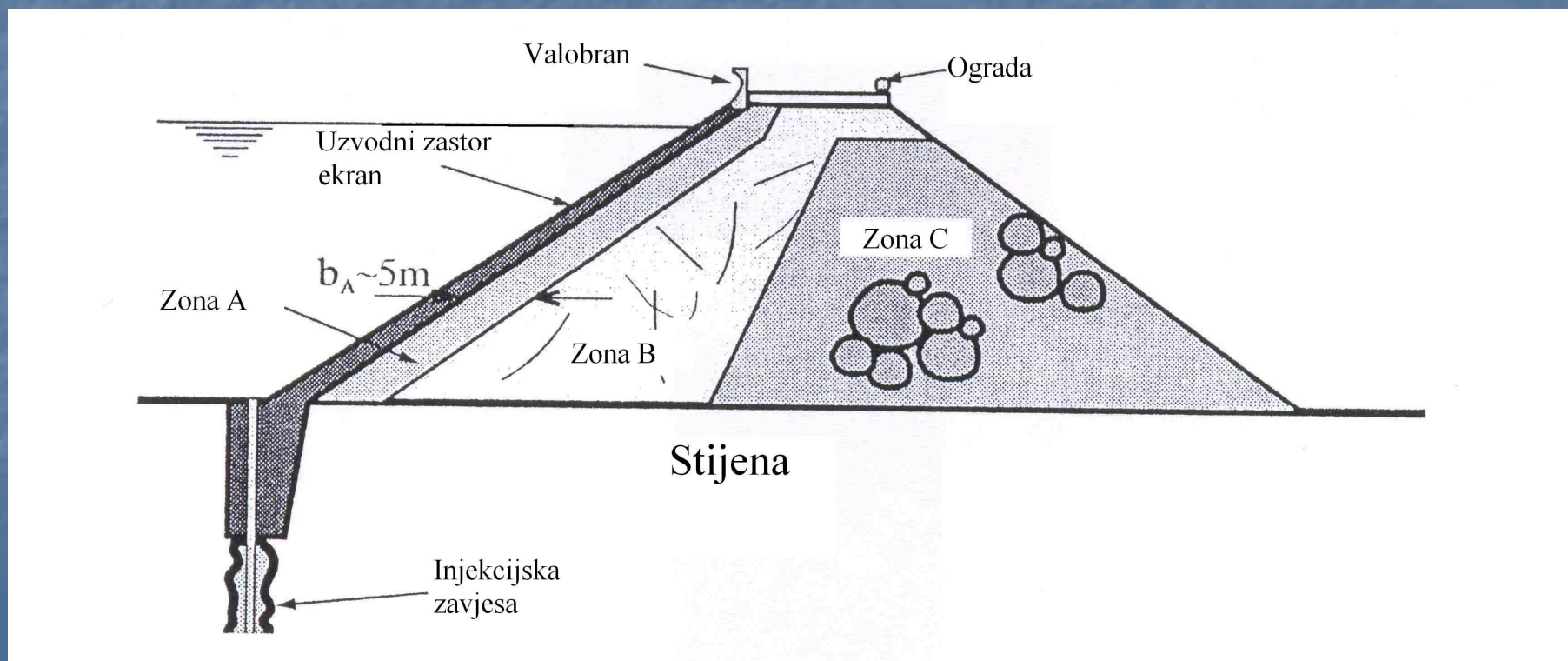


- Nagibi kosina ovise o materijalu nasipa i uvjetima fundiranja. Na zdravom stjenovitom obično se uzima nagib od 1:2,5 do 1:3,5 za glinaste i prašinate materijale i 1:2 do 1:3 za pijesak i šljunak.
- Za teže uvijete fundiranja povećava se i nagib i kosina. Nizvodna kosina je obično s većim nagibom od uzvodne.

3.9.2 Brane od kamenog nabačaja

- Kamen se zbija u vlažnom stanju upotrebom vibrovaljaka (ponekad uz pomoć mlazova pod pritiskom).
- Slojevi nabačaja su debljine od 0,3 do 2,0 m (najčešće ~ 1m), ovisno o tipu brane i mjestu ugrađivanja
- Kod brane s glinenom jezgrom slojevi su tanji, naročito u blizini jezgre.
- Ugradnja kamenog nabačaja obavlja se po svim vremenskim uvjetima, što je velika prednost ovog tipa brana.
- Najveća mana brana s uzvodnim armirano – betonskim ekranom je deformiranje i pucanje ekrana zbog nejednakog slijeganja materijala ispod ekrana pa se ekran postavlja nakon što je završeno zbijanje materijala u nasipu.
- Obično se brane od kamenog nabačaja rade zonirano.

- Nizvodna zona, koja daje stabilnost – potporu, je od najboljeg i najkrupnijeg kamena (zona C).
- Uzvodna zona (A) je od dobro zbijenog šljunka i sitnijeg tucanika što osigurava stabilnu osnovu za ekran koji se preko nje polaže.
- Središnja zona (B) obično je od kamena slabije kvalitete i čini popunu između zona (A) i (C).



- Utjecaj neravnomjernog slijeganja ekrana se smanjuje korištenjem ploča manjih veličina (rijetko se koriste ploče veće od 10 x10 m), a spojnice se rade od elastičnog veziva – obično bakrenog lima.
- Armatura ekrana štiti ploče od prskana uslijed neravnomjernog slijeganja.
- Pukotine u betonu će radi povezujućeg djelovanja armature biti znatno uže nego kod nearmiranih ploča, čime se postiže bolja vododrživost ekrana

Okvirne dimenzije

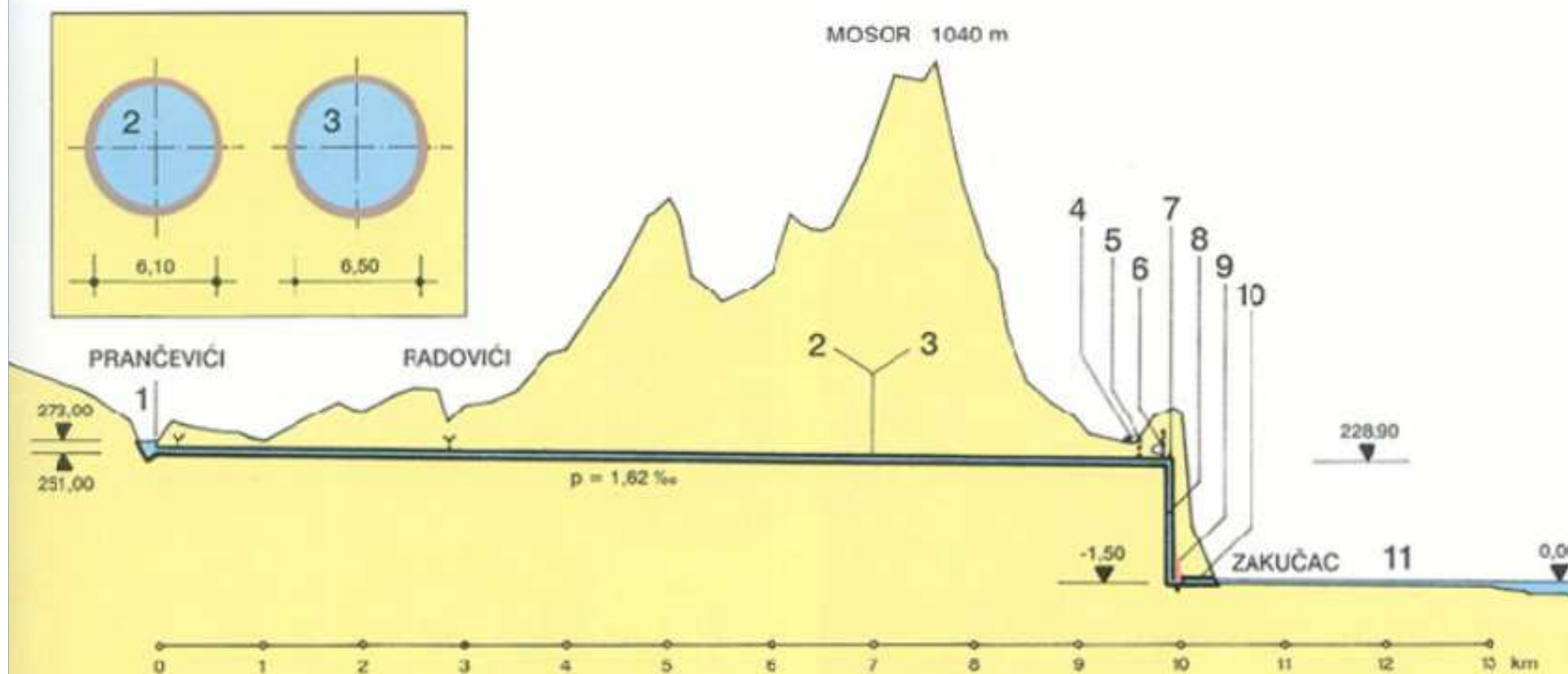
- Nagib kosina nabačaja pri fundiranju na stjenovitom temelju kreće se od 1:1,5 do 1:1,3 (i strmije).
- Za prvu procjenu može se uzeti da je debljina zavjesa u kruni oko 30 cm, i da idući niz kosinu raste za 1 cm na svaki metar dubine vode

4. Prateći objekti

- Uz branu, koja predstavlja prepreku kojom se povećava potencijalna energija vode, hidroenergetsko postrojenje je sačinjeno od niza pratećih objekata
- Ovisno o vrsti HE postrojenja, potrebno je dimenzionirati i izgraditi objekte koji će osigurati evakuaciju i transport vode, iskorištenje i pretvorbu kinetičke energije toka i potencijalne energije položaja u električnu energiju, osigurati cirkulaciju akvatične flore i faune uzduž toka ili na mjestima pregrade
- U režimu rada HE postrojenja, kao i za vrijeme izgradnje nužna je izgradnja i funkcija pratećih objekata kako bi se osigurali uvjeti u kojima postrojenje može služiti predviđenoj namjeni
- Svako hidroenergetsko postrojenje sačinjeno je od niza objekata koji funkcioniraju kao cjelina u fazi proizvodnje
- Kod derivacijskih i pribranskih sustava nužno je osigurati funkcionalnost svakog od objekata, jer ispad iz pogona pojedinog objekta uzrokuje obustavu proizvodnje električne energije, što je konačan proizvod ovakvog objekta u cjelini
- U nastavku je prikazan derivacijski tip hidroenergetskog postrojenja sa karakterističnim objektima na primjeru HE Zakučac na rijeci Cetini

- 1 UVODNA GRAĐEVINA DOVODNOG TUNELA
- 2 DESNI DOVODNI TUNEL
- 3 LIJEVI DOVODNI TUNEL
- 4 PRELJEVNI BAZEN GATA
- 5 VODNA KOMORA 1
- 6 VODNA KOMORA 2

- 7 ZASUNSKA KOMORA
- 8 TLAČNI CJEVOVOD
- 9 STROJARNICA
- 10 ODVODNI TUNEL
- 11 ODVODNI KANAL
- 12 RIJEKA CETINA



HE Zakučac je derivacijska hidroelektrana s podzemnom strojarnicom u masivu Mosora, na ušću rijeke Cetine, u blizini Omiša. HE Zakučac je najveće postrojenje na slivu rijeke Cetine na koje otpada oko 69% ukupne godišnje proizvodnje sliva. Po instaliranoj snazi i po mogućoj proizvodnji električne energije, HE Zakučac je najveća hidroelektrana u Hrvatskoj.

Desni dovodni tunel, izrađen u prvoj etapi, dug je 9876 m, širok je 6,1 m u promjeru, te ima propusnu moć 100 m³/s. Lijevi tunel, izgrađen u drugoj etapi, udaljen je 45 m od desnog tunela. Dug je 9849 m, širok je 6,5 m, te ima propusnu moć 120 m³/s. Dovodni tuneli imaju pad oko 40 m te se nastavljaju tlačnim cjevovodima. Na mjestu spoja postavljena je vodna komora. Iz oba dovodna tunela izlaze po dva tlačna cjevovoda koja se vertikalno spuštaju 213,4 m do strojarnice, gdje se nalaze četiri Francis turbine. Tlačni cjevovodi udaljeni su 15 m, te imaju promjer od 3.5 m do 3.3 m.

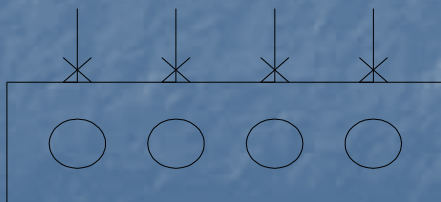
Instalirana snaga HE Zakučac iznosi 486 MW (2x108 + 2x135), a prosječna godišnja proizvodnja 1640 GWh.

Ovaj HE zahvaća vodu iz akumulacije Prančevići. Riječ je o umjetnoj akumulaciji stvorenoj izgradnjom istoimene brane. Dvama dovodnim tunelima se voda transportira do vodnih komore gdje se nalazi prijelaz u tlačne cjevovode. Tlačni cjevovodi omogućavaju transport do turbina u strojarnici HE Zakučac.

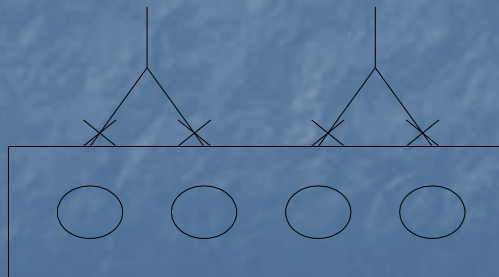
4.1 Tlačni cjevovodi (čelični)

- Imaju veliku primjenu jer se mogu oduprijeti vrlo visokom tlaku i naglim njegovim promjenama u vremenu od nekoliko sekundi. Izgrađuju se od zakovanih i zavarenih čeličnih ploča. Ploče se savijaju u hladnom ili vrućem stanju ovisno o dijametru cjevovoda i debljini čeličnog lima. Najvažniji su uzdužni varovi budući da su izloženi vlačnim silama unutarnjeg hidrostatičkog i hidrodinamičkog pritiska. Poprečni varovi izloženi su samo djelovanju uzdužnih osovinskih sila.
- Prema dovodu vode do turbina tlačni cjevovodi mogu biti predviđeni za *odvojeno*, *grupno* i *skupno* „napajanje“.

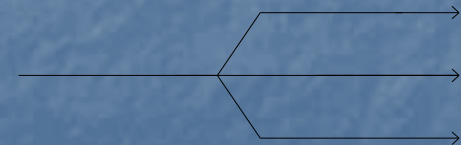
Odvojeno napajanje



Grupno napajanje

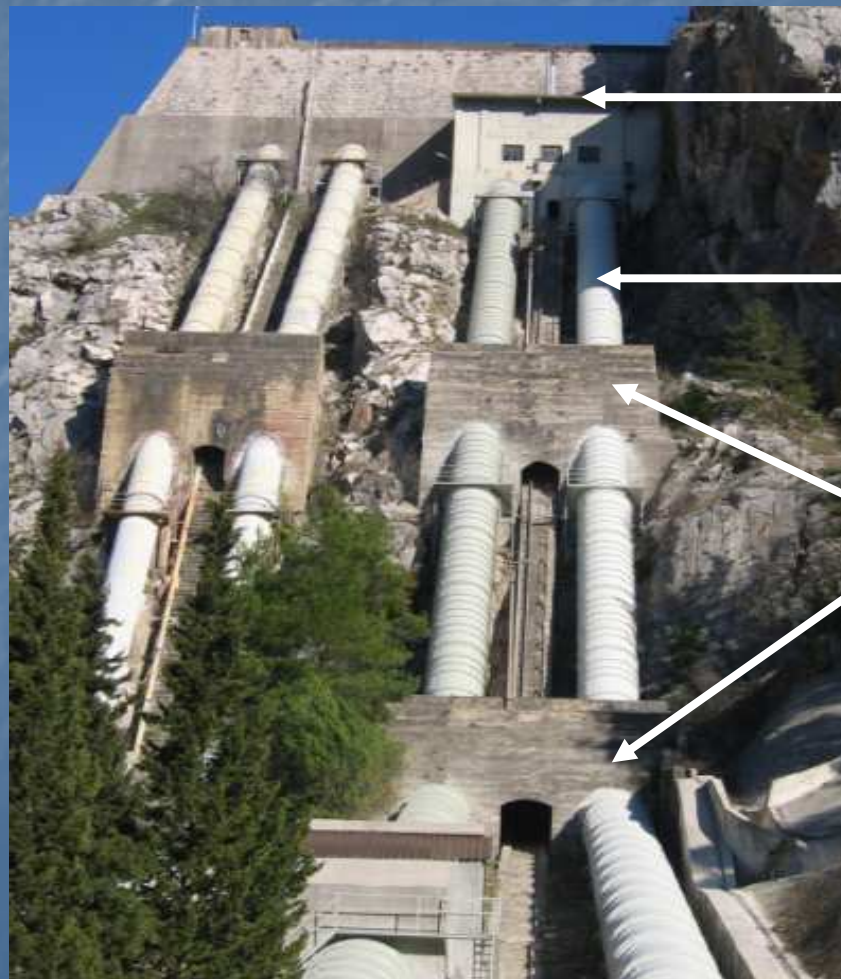


Skupno napajanje



➤ Račva dijeli glavni cjevovod u dvije ili više „grana“ odnosno u cjevovode manjeg profila, koji u pravilu opskrbljuju vodom turbine istih hidrauličkih i pogonskih karakteristika. Račve mogu biti simetrične i asimetrične. Prema položaju čelični tlačni cjevovodi mogu biti: nadzemni, podzemni, na nizvodnom licu brane ili u brani.

4.2.1 Nadzemni tlačni cjevovod



← Vodna komora HE Kraljevac

← Tlačni cjevovodi (nadzemni čelični)

← Temeljni blokovi tlačnog cjevovoda

- U pravilu su to otvoreno položeni cjevovodi, čija trasa i osovina prati površinu terena, s manjim ili većim korekcijama površine terena. Mogu biti izvedeni kao obješeni, u obliku lučnih konstrukcija, kao čelični akvadukti i oslonjeni na masne konstrukcije.
- Zbog djelovanja unutarnjih i vanjskih sila cjevovod mora biti položen na sedla (potporne točke) koja su raspoređena između sidrišnih oslonaca (fiksne točke) kod većih dužina cjevovoda.



➤ Na površini moraju biti opremljeni dilatacijskim – ekspanzijskim spojnicaama zbog savladavanja uzdužnih sila izazvanih temperaturnim promjenama. Dilatacija tlačnog cjevovoda na površini obično se postavlja ispod fiksne točke, odnosno nizvodno od sidrenog bloka. Kod lociranja dilatacije treba paziti da konzolni dio bude siguran protiv savijanja.

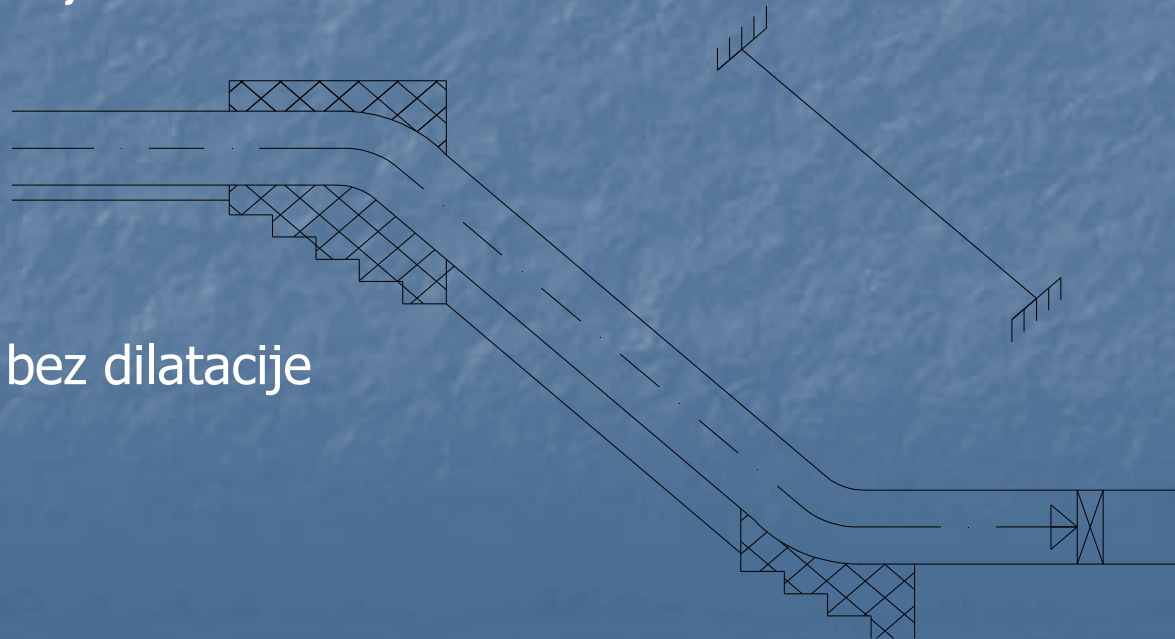
➤ Tlačni cjevovod sastoji se od većeg broja individualnih cijevi. Cijevi promjera do 3 m rade se tvornički (samo radijalni varovi se izvode), a cijevi većeg promjera isporučuju se na gradilište u polutkama (strojno se izvode samo uzdužni varovi te se polutke spajaju u cijev).



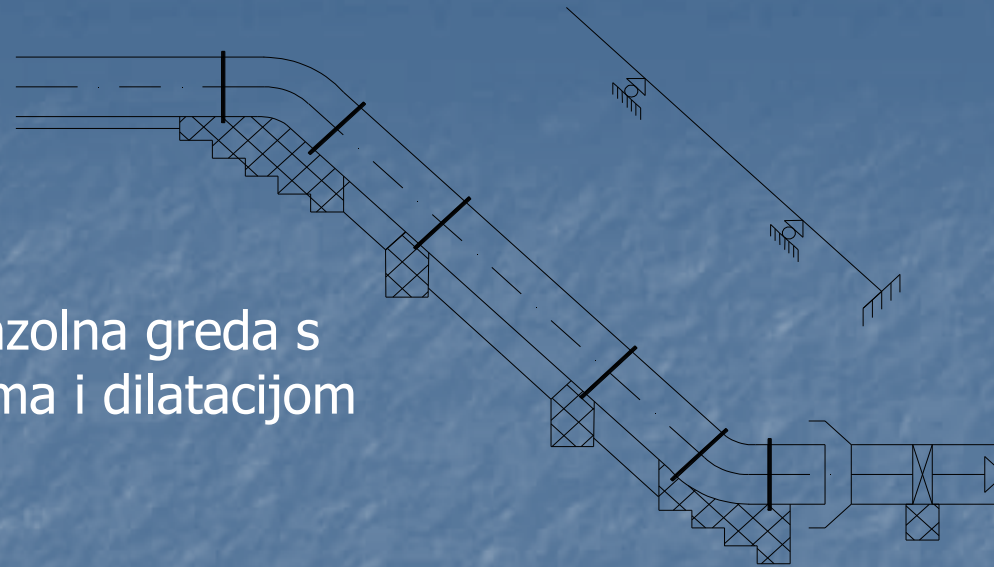
➤ Dugo u praksi je bilo prisutno stajalište da se slobodno položeni cjevovodi samo manjih dužina i manjeg dijametra mogu izvesti bez dilatacijskih spojeva. U tom slučaju trebamo računati s izvijanjem cjevovoda, koje je najveće kad je cjevovod prazan. Sidreni blokovi preuzimaju i dodatne sile izazvane izvijanjem cjevovoda.

➤ U konstruktivnom smislu tlačni cjevovod na površini, ako ga promatramo kao cilindričnu gredu, je statički neodređen sustav. S obzirom na veliki moment otpora cilindričnog presjeka, problem oslanjanja cijevi kao „grede“, u većini slučajeva, nije kritičan za dimenzioniranje cjevovoda. S druge strane, pogodnim razmještanjem vanjskih prstena za ukrućenje i potpornih točaka – sedla provjeravaju se debljine stijenki uzduž cjevovoda i njegove geometrijske karakteristike, koje su odabrane na osnovi hidrostatičkih i hidrodinamičkih pritisaka.

upeta greda bez dilatacije



kontinuirana konzolna greda s
pokretnim ležajima i dilatacijom



kontinuirana upeta greda s
pokretnim ležajima bez dilatacije



➤ Vanjski – otvoreni cjevovodi izloženi su kompleksnim utjecajima . Temperaturni utjecaji okoline i padaline imaju veliku ulogu na ponašanje cjevovoda. Vanjski cjevovodi se štite: pjeskarenjem, dvostrukim temeljnim premazom i pokrivnim – zaštitnim premazom; unutarnji dio cijevi štiti se pjeskarenjem i dvostrukim temeljnim premazom.

➤ U područjima sa ekstremnim temperaturnim razlikama površinski cjevovodi često su smješteni u galerije. Na taj način su zaštićeni od negativnog utjecaja niskih temperatura i stvaranja ledene kore uz unutarnju omočenu površinu čeličnog cjevovoda. Da bi se izbjeglo stvaranje ledene kore u cjevovodu se mora održavati protjecaj s minimalnom brzinom vode.

Pri zaštiti od smrzavanja treba poštovati sljedeće propise:

Vanjska temperatura:	-5 °C	-10 °C	-15 °C	-20 °C
Protjecaj u l/s na 10 m ² omočene površine:	0,25	0,6	1,0	2,0

➤ Cjevovod je uzduž trase položen na potporne točke: oslonce ili sedla, i mjestimično čvrsto povezan sa temeljnim tлом preko sidrišnih oslonaca, odnosno sidrišnih blokova. Sedla omogućuju aksijalno pomicanje cjevovoda pri temperaturnim i drugim utjecajima i prenose na tlo normalne sile koje se javljaju uzduž cjevovoda. Sidrišni blokovi preuzimaju složen sustav sila koje djeluju kod praznog cjevovoda u pogonu. Sedla se razmještaju između sidrenih blokova na jednakoj udaljenosti. Cjevovod može biti bez ili s oslonačkim prstenima na sedlima , ovisno o promjeru cijevi. Ležaji oslonačkih prstena mogu biti klizni, kotrljajući ili njihajući.

4.1.2 Podzemni tlačni cjevovod

- Kod podzemnih cjevovoda razlikuju se dva tipa: cjevovod položen u rovu i ubetoniran u stijenskoj masi.
- Cjevovod mora biti stabilan i zaštićen od klizanja pomoću sidrenih fiksnih točaka, i uz to oslonjen na potporne točke, tzv. sedla, slično kao i kod nadzemnog tipa tlačnog cjevovoda.
- Za razliku od nadzemnog cjevovoda, ovaj tip zaštićen je od direktnog utjecaja atmosfere i znatno su manja temperaturna opterećenja.
- Postavljanje podzemnih cjevovoda je kompliciranije nego kod nadzemnog tipa. Za ugradnju su nužne kose tračne staze i vozilo, tzv. uspinjača, koja vrši transport dijelova cijevovoda duž trase postavljanja.
- Ugradnja cijevi vrši se redoslijedom od višeg položaja prema nižem, a uzduž cjevovoda je nužno izgraditi stepenište da bi se u fazi ugradnje mogle obavljati kontrole, a u fazi eksploatacije održavanje cjevovoda.
- Podzemni ubetonirani tlačni cjevovodi karakteristični su za visikotlačne hidroelektrane jer pružaju najveći stupanj zaštite od vanjskih utjecaja i oštećenja. Kako utjecaj temperaturnih promjena nije izražen, ugradnja dilatacija se može izostaviti. U preuzimanju hidrostatičkih i hidrodinamičkih opterećenja može se računati da će dio opterećenja preuzeti sama stijenska masa u koju je cjevovod položen

4.1.3 Sile koje djeluju na tlačni cjevovod

➤ Ovisi od načina polaganja cjevovoda i oslanjanja na sedla, i sidrenja. Dijelimo ih na sile koje djeluju uzduž i poprečno na os cijevi. Sile koje djeluju uzduž osi slobodno položenih cjevovoda primaju sidreni blokovi, a poprečne sile i sile trenja preuzimaju sedla. Osnovne sile potječu od unutarnjeg tlaka, težine vode i cijevi te temperature. Razlikujemo sile koje stalno djeluju, privremeno djeluju te izuzetne sile.

Sile koje stalno djeluju:

- unutarnji tlak vode
- tlačni udari u pogonskim manevrima
- težina vode

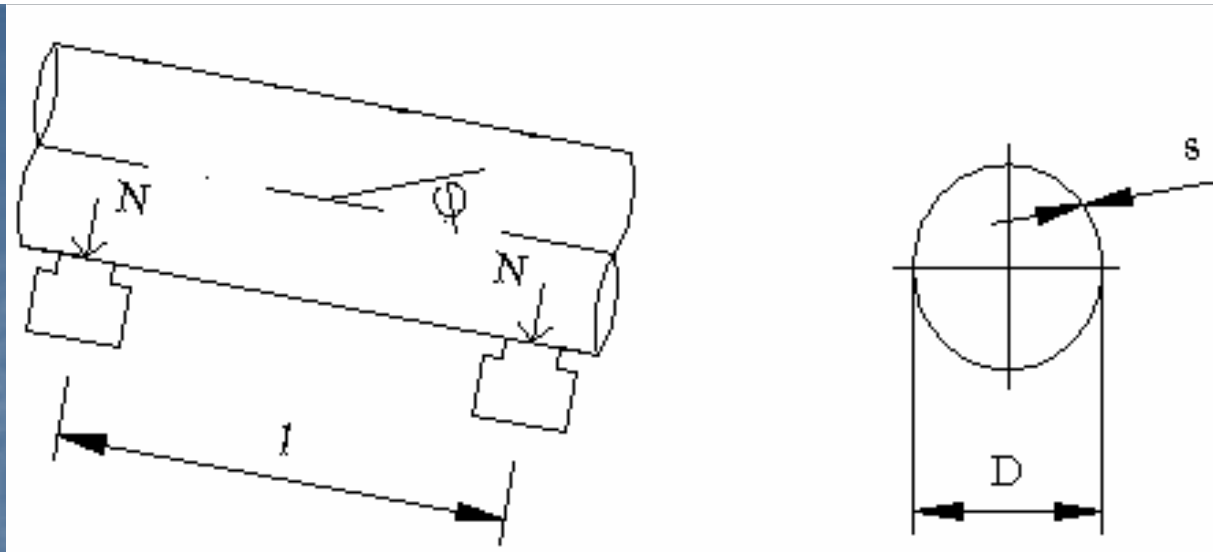
$$N_1 = \rho_v \cdot g \cdot l \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \cos \varphi \quad N_1 - \text{normalna sila}$$

-težina cijevi:

$$N_2 = \rho_s \cdot g \cdot l \cdot (\pi \cdot D \cdot s) \cdot \cos \varphi \quad N_2 - \text{normalna sila}$$

s- debljina stijenke

D- promjer cijevi



- temperaturne promjene:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \alpha \cdot \Delta t$$

$$\sigma_t = \alpha \cdot \Delta t \cdot E_z \quad \alpha\text{-koeficijent linearnog širenja}$$

- trenje na osloncima:

$$A_t = \mu \cdot (N_1 + N_2)$$

A_t – aksijalna sila

μ – koeficijent trenja



-trenje na dilatacijama:

$$A_v = \mu \cdot \rho_z \cdot g \cdot H \cdot \pi \cdot D_v \cdot b$$

D_v – vanjski promjer cijevi

$$D_v = D + 2 \cdot s$$

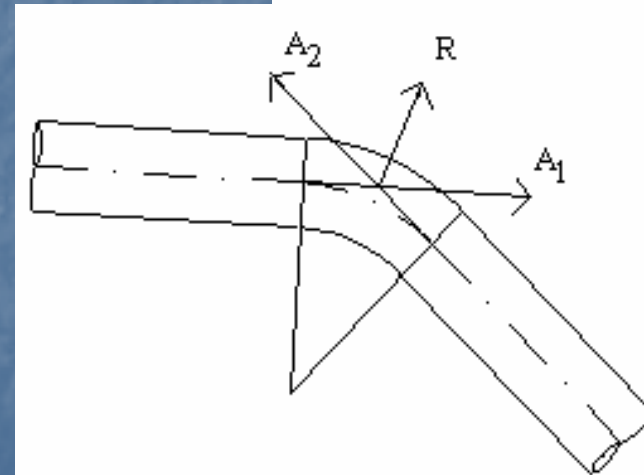
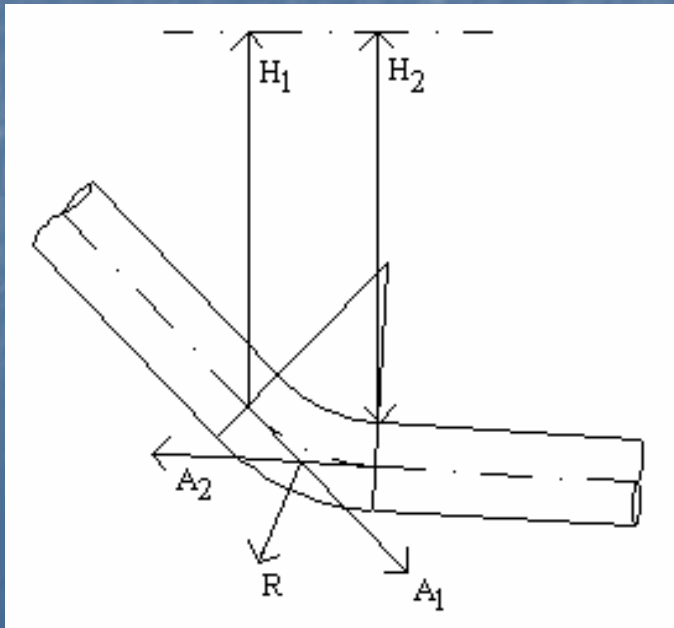
b – dužina zaptivnog dijela cijevi

$\mu=0.2-0.3$, koeficijent trenja

- tlak vode u koljenima prilikom promjene pravca:
-konkavno i konveksno koljeno

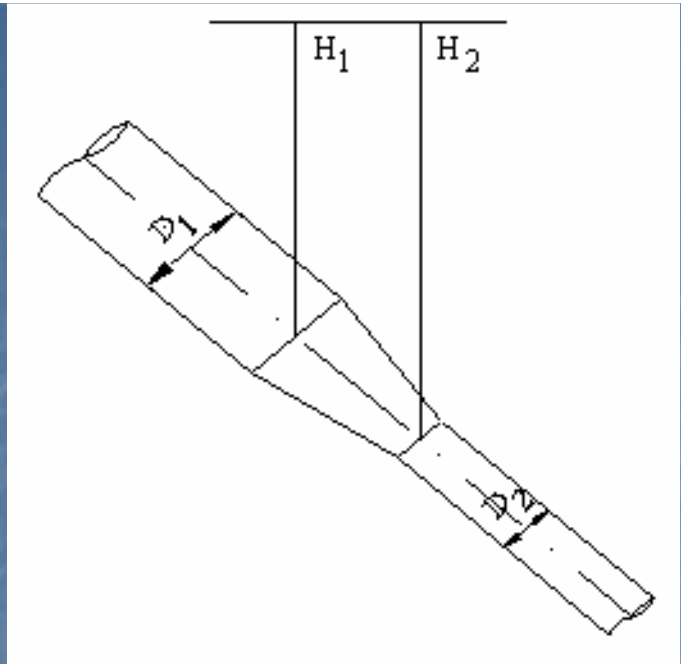
$$A_1 = \rho_v \cdot g \cdot H_1 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

$$A_2 = \rho_v \cdot g \cdot H_2 \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$



- tlak vode na konusnim prijelazima i dilatacijama:

$$A_k = \rho_v \cdot g \cdot H \cdot \frac{\pi \cdot (D_1^2 - D_2^2)}{4} \quad H = \frac{H_1 + H_2}{2}$$



Povremene sile:

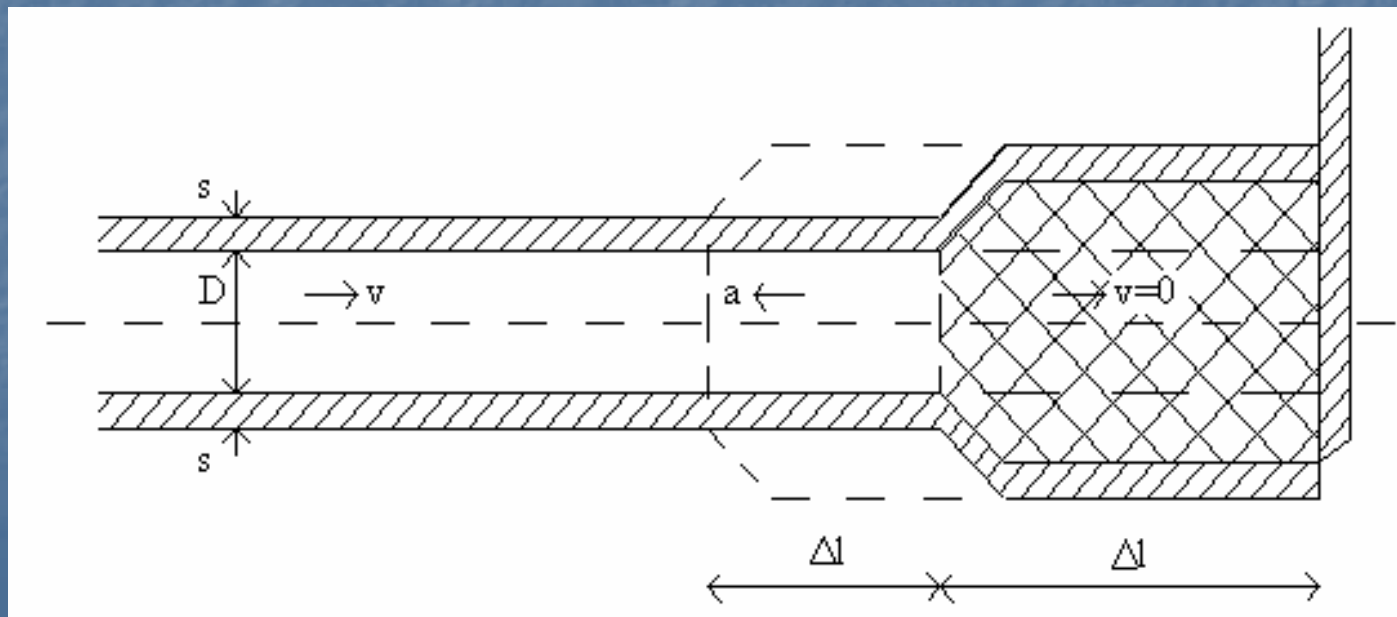
punjenje i pražnjenje cjevovoda
podtlak kod manevara u pogonu
potresi
vjetar i opterećenje snijegom

Izuzetne sile:

tlačne probe
vibracije
odroni i lavine
smrzavanje vanjskih cjevovoda

4.1.4 Vodni udar u tlačnim cjevovodima

- U tlačnom cjevovodu pojavljuju se razlike u odnosima brzina promjene strujanja i dužine cjevovoda. Ove odnose tumačimo potrebnim vremenom da se prouzrokovani poremećaj, npr. s jednog kraja cijevi prenese na drugi, o čemu ovisi i veličina tlaka na bilo kojem mjestu u cijevi.
- Na slici je prikazan slučaj naglog zaustavljanja toka vode na kraju cjevovoda. Smatramo da je zatvaranje zatvarača trenutno, tako da se neposredno iza trenutka zatvaranja, nakon isteka kratkog vremena Δt , tok vode zaustavio na dužini Δl .



➤ Kako je voda stišljiva i cjevovod elastičan u trenutku Δt voda uspori samo na dužini Δl . Nakon zaustavljanja vode u profilu zatvarača, uzvodna masa vode po inerciji produžava gibanje, te zbija vodu na ograničenom prostoru onoliko koliko se voda može zbiti i elastični cjevovod rastegnuti. Unutar malog volumena zbijanje se ne može odvijati u nedogled, jer to ne dozvoljavaju povećani tlakovi, pa u sljedećem trenutku Δt , područje zaustavnog toka se povećava pomičući front poremećaja za novo Δl , brzinom:

$$c = \frac{dl}{dt}$$

Potrebno vrijeme zaustavljanja vode u cjevovodu dužine L bit će:

$$T_L = \frac{L}{c}$$

➤ Stvarno zaustavljanje vode u profilu zatvarača ne može biti trenutno. Svaki poremećaj protoka u profilu zatvarača širit će se brzinom c . Ako je brzina širenja poremećaja a znatno veća od brzine zatvaranja zatvarača, vrijeme rasprostiranja poremećaja bit će kratko. U suprotnom imamo bitnije razlike tlakova uzduž cjevovoda. Svako zatvaranje ili otvaranje regulacijskih organa protoka prouzrokuje nestacionarne efekte uzduž cjevovoda, bilo u pogledu promjene protoka ili u pogledu raspodjele tlakova. Ove efekte naglih promjena tlakova nazivamo vodnim udarom.

Za nestacionarno tečenje vrijedi Bernoullijeva jednačba:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \Delta H + \frac{1}{g} \cdot \int_1^2 \frac{\partial v}{\partial t} \cdot dl$$

Jednačbu kontinuiteta dobijemo iz zakona održanja mase:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_1^2 \rho \cdot A \cdot dl + (\rho \cdot A \cdot v_2) - (\rho \cdot A \cdot v_1) = 0$$

gdje:

prvi član znači ukupnu promjenu mase u jedinici vremena

drugi član znači istjecanje mase iz presjeka 2

treći član znači dotok mase u presjeku 1

Ako je tekućina nestišljiva ($\rho = \text{const.}$) i cijevovod krut ($A = f(l)$) prvi član je jednak nula. U elementarnom razmatranju možemo pretpostaviti da su brzinske visine $v^2 / 2g$ zanemarivo male u odnosu na veličine ostalih članova, te da su članovi trenja mali. Tada za element cijevi možemo postaviti dinamičku jednačbu:

$$h_1 = h_2 + \frac{1}{g} \cdot \frac{\Delta v}{\Delta t} \cdot \Delta l$$

$$\Delta v = v_2 - v_1$$

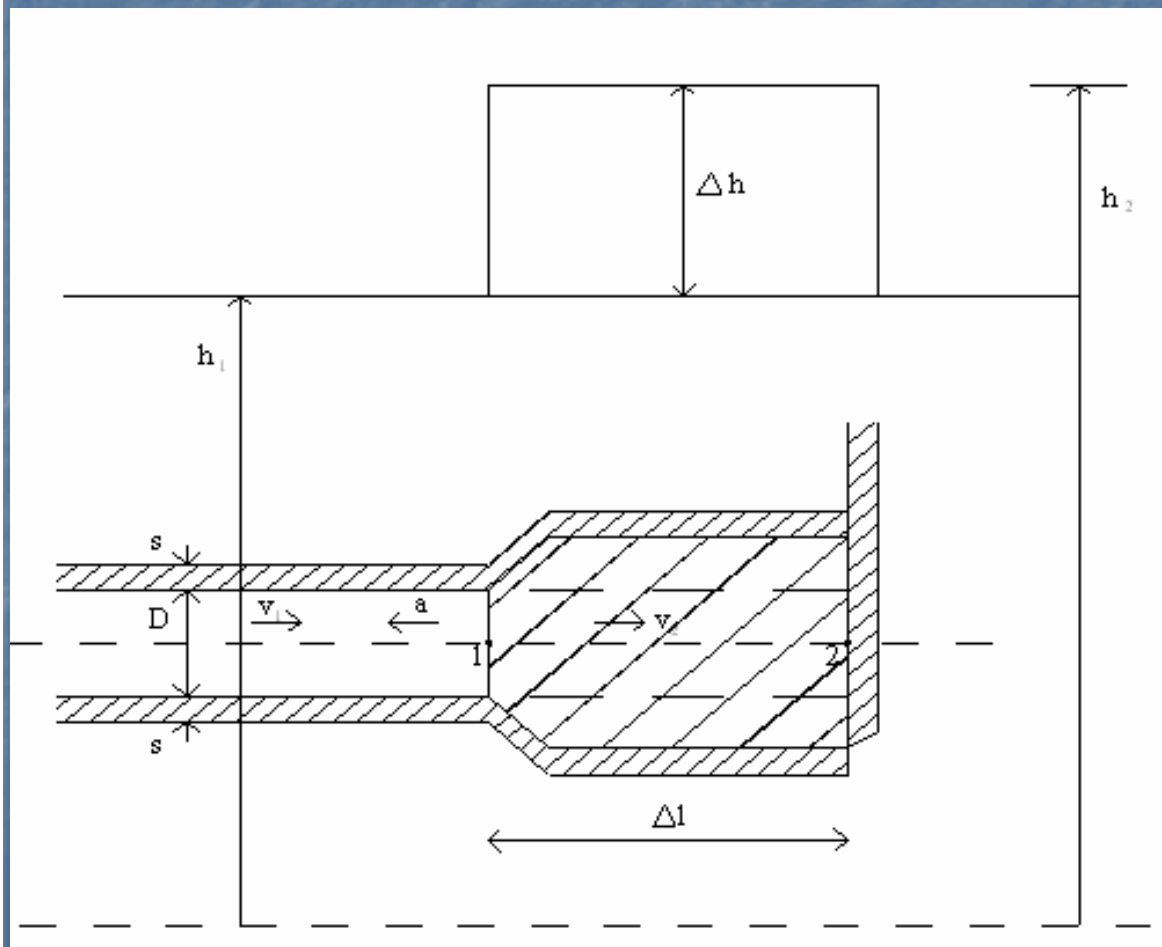
gdje je :

h_1 – piezometarska visina prije promjene brzine

h_2 – piezometarska visina nakon promjene brzine

v_1 – brzina prije promjene

v_2 – brzina nakon promjene



Presjeci 1 i 2 su vrlo bliski, jer se u malom vremenskom intervalu Δt poremećaj može rasprostirati samo na malom Δl .

Član $\Delta l/\Delta t$ je jednak brzini širenja udara c pa je:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = -\frac{c}{g} \cdot \Delta v$$

Kod totalnog zatvaranja, tj. $v_2 = 0$, $\Delta v = v_1$ dobivamo maksimalno povećanje piezometarskog tlaka

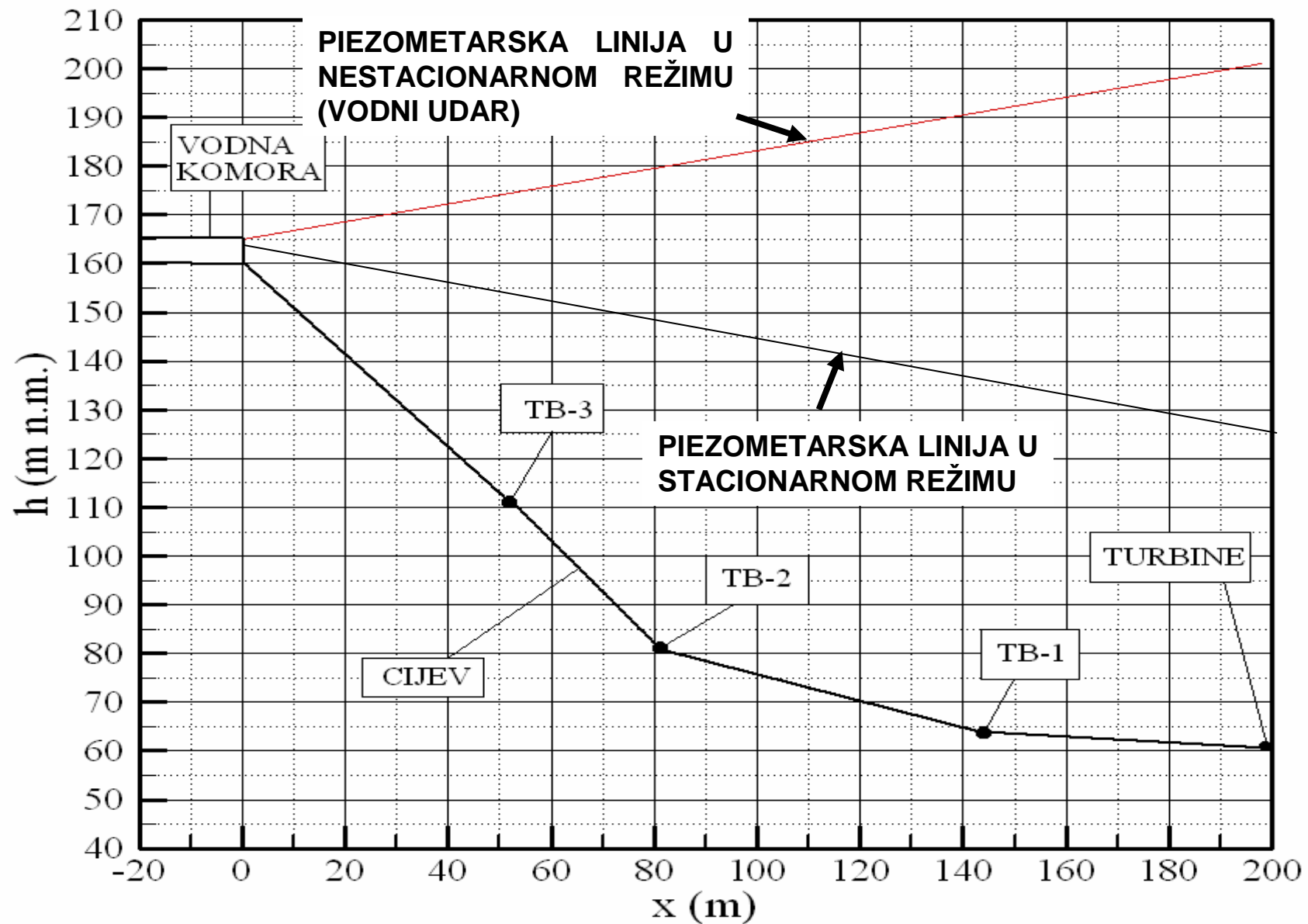
$$\Delta h = \frac{c}{g} \cdot v_1$$

Brzina širenja vodnog udara dana je izrazom:

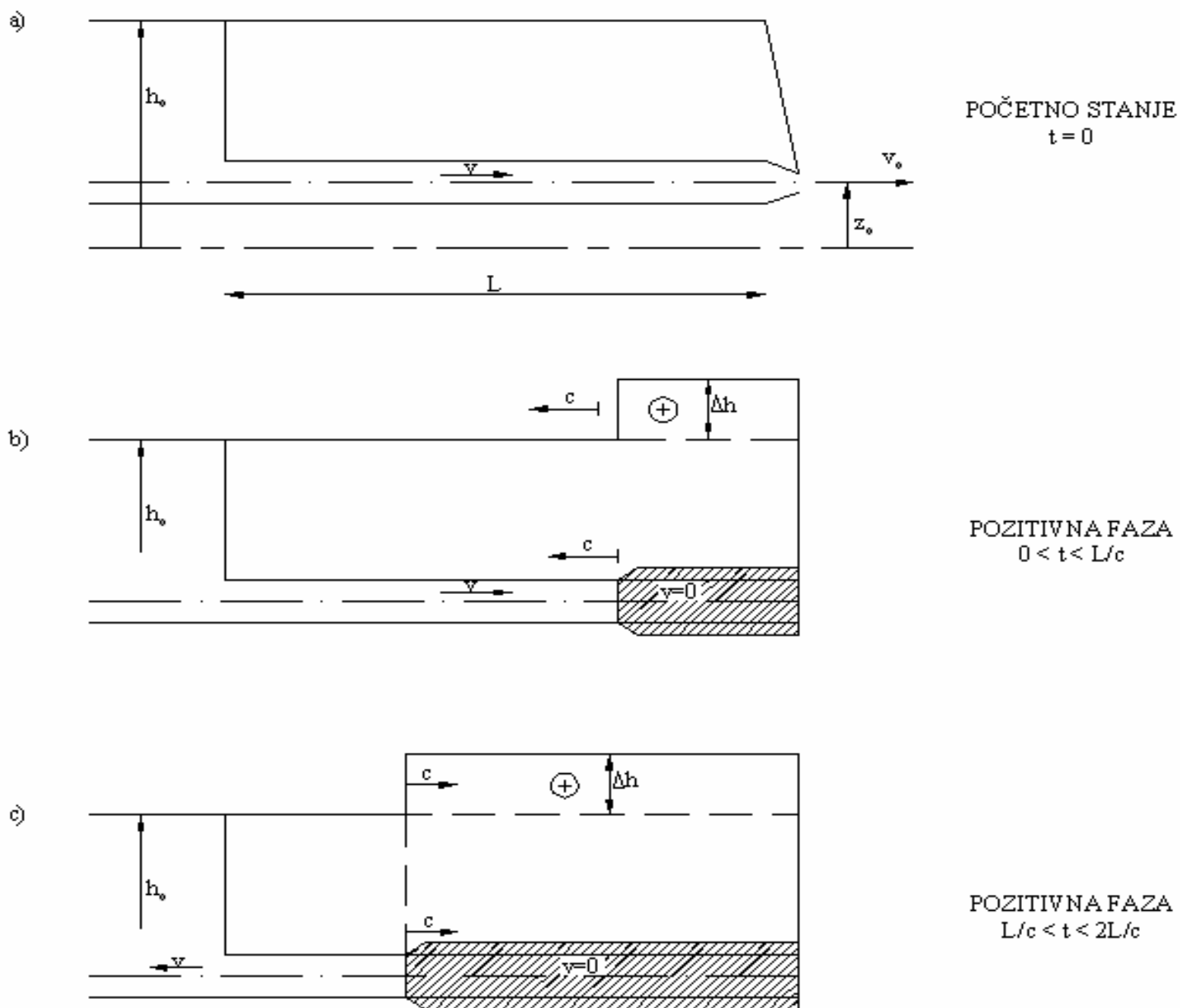
E_V - modul elastičnosti vode
 E_C – modul elastičnosti cijevi
 ρ - gustoća vode
 D – promjer cijevi
 s – debljina stijenke cijevi

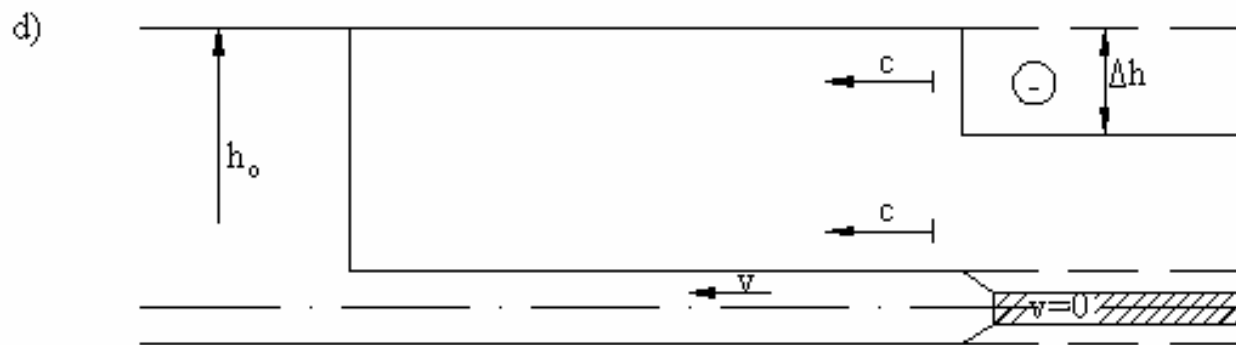
$$c = \frac{\sqrt{\frac{E_V}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{E_V}{E_C} \cdot \frac{D}{s}}}$$

Primjer piezometarskog stanja u tlačnom cjevovodu HE Kraljevac za slučaj linearnog smanjenja snage na turbini:

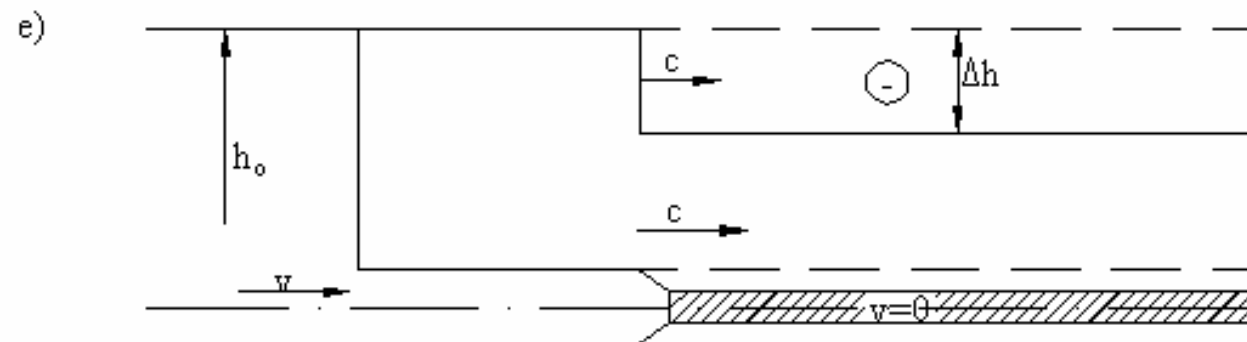


4.1.4.1 Faze vodnog udara u tlačnim cjevovodima

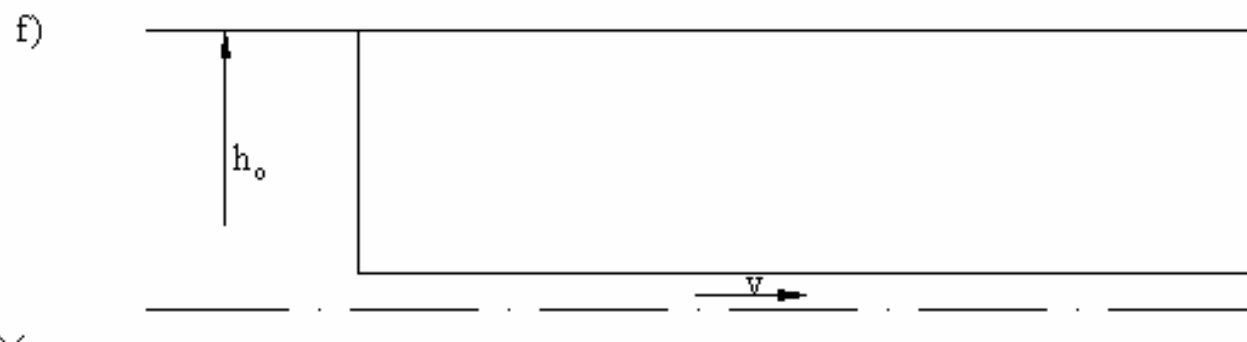




NEGATIVNA FAZA
 $2L/c < t < 3L/c$



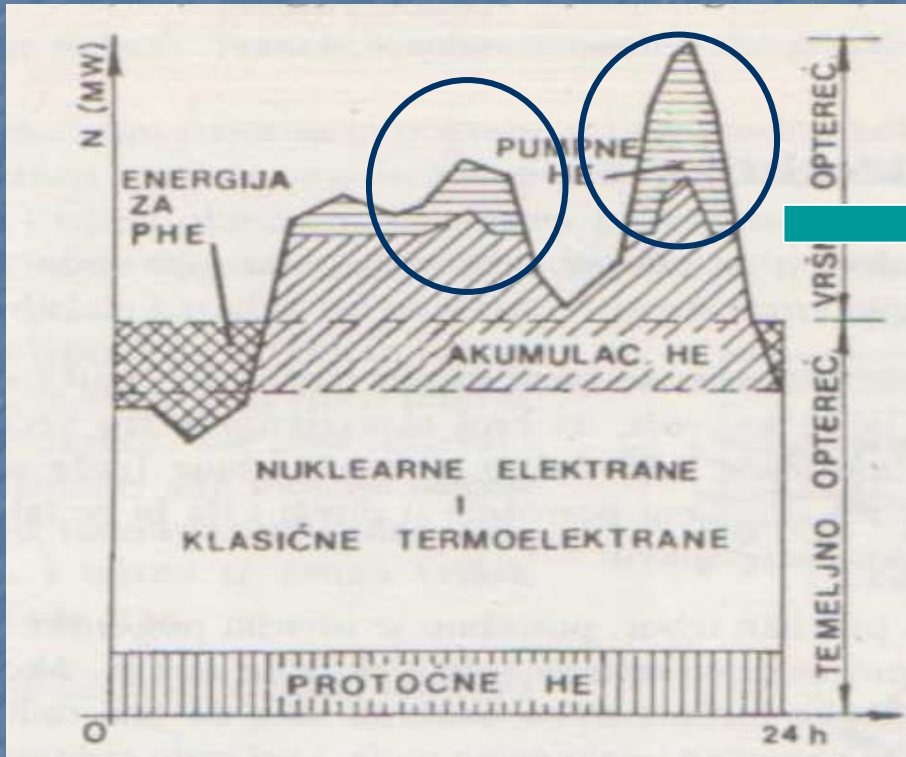
NEGATIVNA FAZA
 $3L/c < t < 4L/c$



POVRATAK NA
 POČETNO STANJE
 $t = 4L/c$

4.2 Vodna komora

➤ Kod derivacijskog hidroenergetskog postrojenja, dovodni tunel i tlačni cjevovod rade u tlačnom režimu - tečenje vode je pod tlakom. Kako su takvi sustavi predviđeni za rad u trenutcima vršne potrošnje, trebaju biti osigurani uvjeti za ulazak u pogon i ispadanje iz pogona istih.



Razdoblja vršne potrošnje u kojima HE derivacijskog tipa radi.

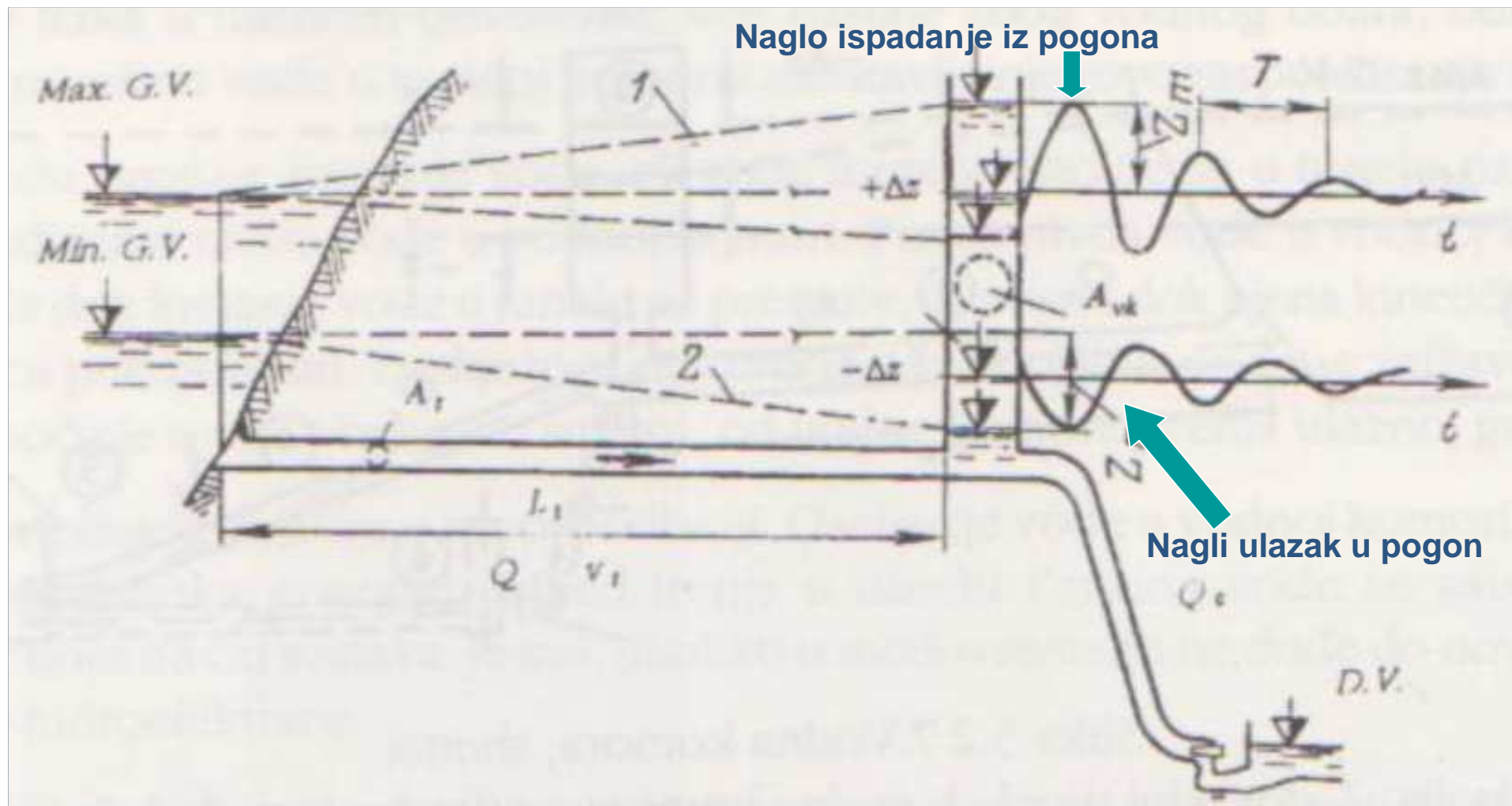
Van tog razdoblja postrojenje nije u pogonu.

➤ U cijevnim sustavima HE postrojenja, koje vrše transport vode do turbina, uslijed promjene pogonskih uvjeta, smanjenja ili povećanja proizvodnje električne energije, ili otvaranja i zatvaranja predturbinskih zatvarača dolazi do premećaja režima tečenja. Svaka promjena režima tečenja uzrok je promjene piezometarskog stanja duž cjevovoda.

➤ Kod postrojenja pod tlakom, na kraju dovodnog objekta, a prije prelaza na tlačni cjevovod potrebno je postaviti poseban hidrotehnički objekt – vodnu komoru.

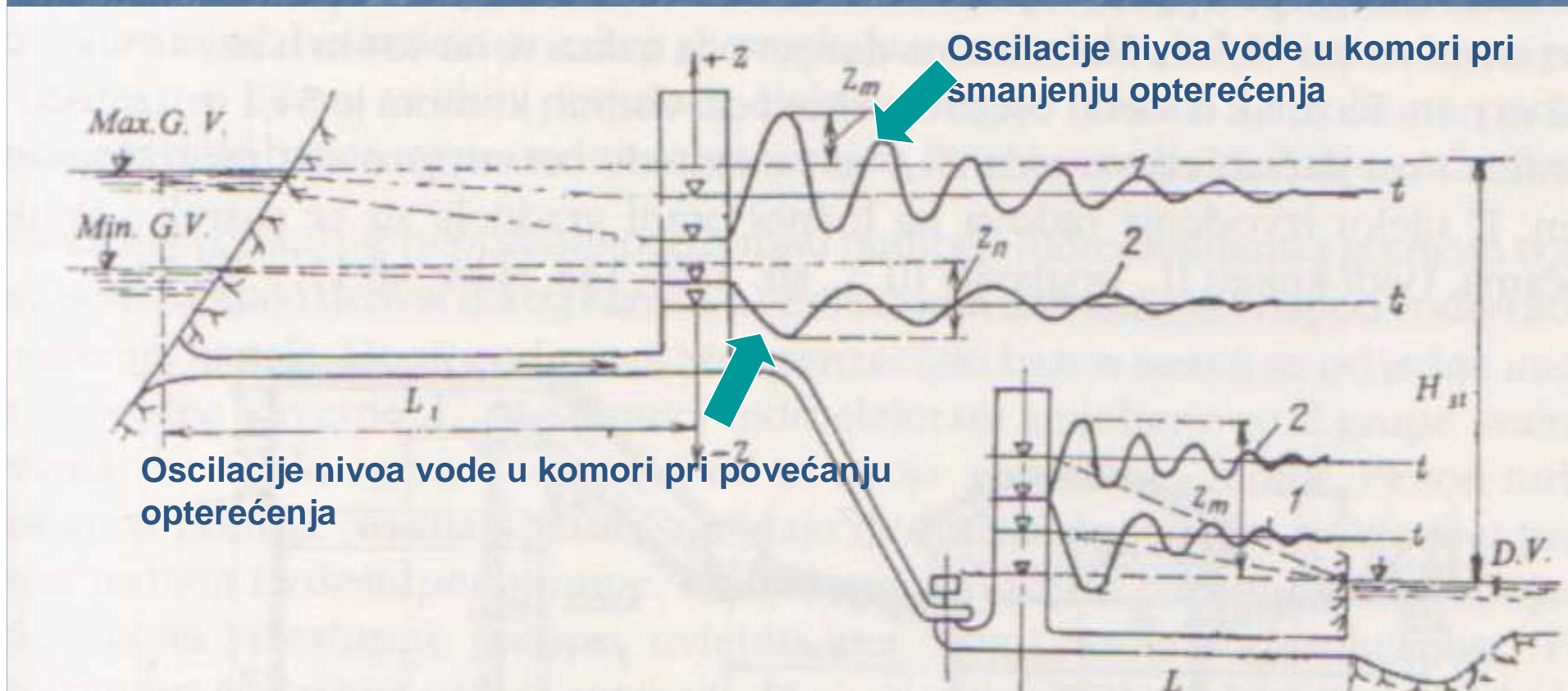
➤ Kod navedenih promjena režima rada, nastaju smanjenja ili povećanja tlaka, a duž cjevovoda se propagira vodni udar. Neophodno je smanjiti utjecaj povećanja tlaka u tlačnom cjevovodu i spriječiti da se povećanje tlaka uslijed vodnog udara prenese na dovodni tunel, koji nije dimenzioniran na veća tlačna opterećenja, čime se dovodi u pitanje statička stabilnost istog. U tu svrhu, na kraju dovodnog tunela, na mjestu spoja s tlačnim cjevovodom postavlja se vodna komora. Povećanje tlaka u tlačnom cjevovodu prigušuje se u vodnoj komori i zaustavlja njegovo rasprostiranje u dovodni dio sustava.

➤ U tlačnom cjevovodu dolazi, zbog zatvaranja predturbinskih zatvarača, do prekida tečenja, ali zbog inercije ono se u tunelu nastavlja, što izaziva učestalo osciliranje vodnog lica u komori. Porast nivoa vode u komori prisutan je sve dok kretanje vode u tunelu ne prestane. Poslije toga nivo u komori se snižava i tečenje se odvija u suprotnom smjeru, od komore prema akumulaciji. Maksimalna amplituda promjene vodnog lica u komori događa se u prvoj oscilaciji, a s vremenom se oscilacije smiruju, zbog disipacije energije u sustavu.



- Kod naglog povećanja opterećenja ili uključivanja sustava u pogon nastupa suprotna pojava. Količina vode potrebna turbini se povećava, razina vodnog lica u komori se počinje spuštati, a brzina tečenja u dovodnom dijelu sustava raste. Najveće spuštanje razine vodnog lica događa se u prvoj oscilaciji, a ta kota određuje položaj tjemena na kraju tunela i na početku tlačnog cjevovoda da bi se spriječilo uvlačenje zraka u sustav.

- Maksimalno sniženje vodnog lica u komori mora se proračunati kod minimalnog nivoa vode u akumulaciji i potpunog otvaranja predturbinskog zatvarača. Oscilacije će potrajati sve dok se ne uspostavi novo stacionarno stanje.
- Ako režim rada nije uvjetovanjem otvaranjem ili zatvaranjem predturbinskog zatvarača već zahtijevanom snagom postrojenja, u tom se slučaju, također zbog promjene snage turbine, uzduž cjevovoda širi poremećaj koji će uzrokovati manje promjene razine vodnog lica u komori nego kod potpunog zatvaranja ili otvaranja.



4.2.1 Proračun oscilacija protoka i vodnog lica

Problem proračuna oscilacija vodnog lica opisan je:

JEDNADŽBOM KONTINUITETA :

$$Q_{DOVOD} - Q_{TL} = A_K \frac{dh}{dt}$$

Protok u dovodnom tunelu

Protok u tlačnom cjevovodu

Promjena razine vodnog lica u vremenu

Površina poprečnog presjeka vodne komore

DINAMIČKOM JEDNADŽBOM :

$$h_{AKUMULACIJA} = h_{KOMORA} \pm \beta \cdot V^2 + \frac{L}{g} \frac{dV}{dt}$$

Razina vode u akumulaciji

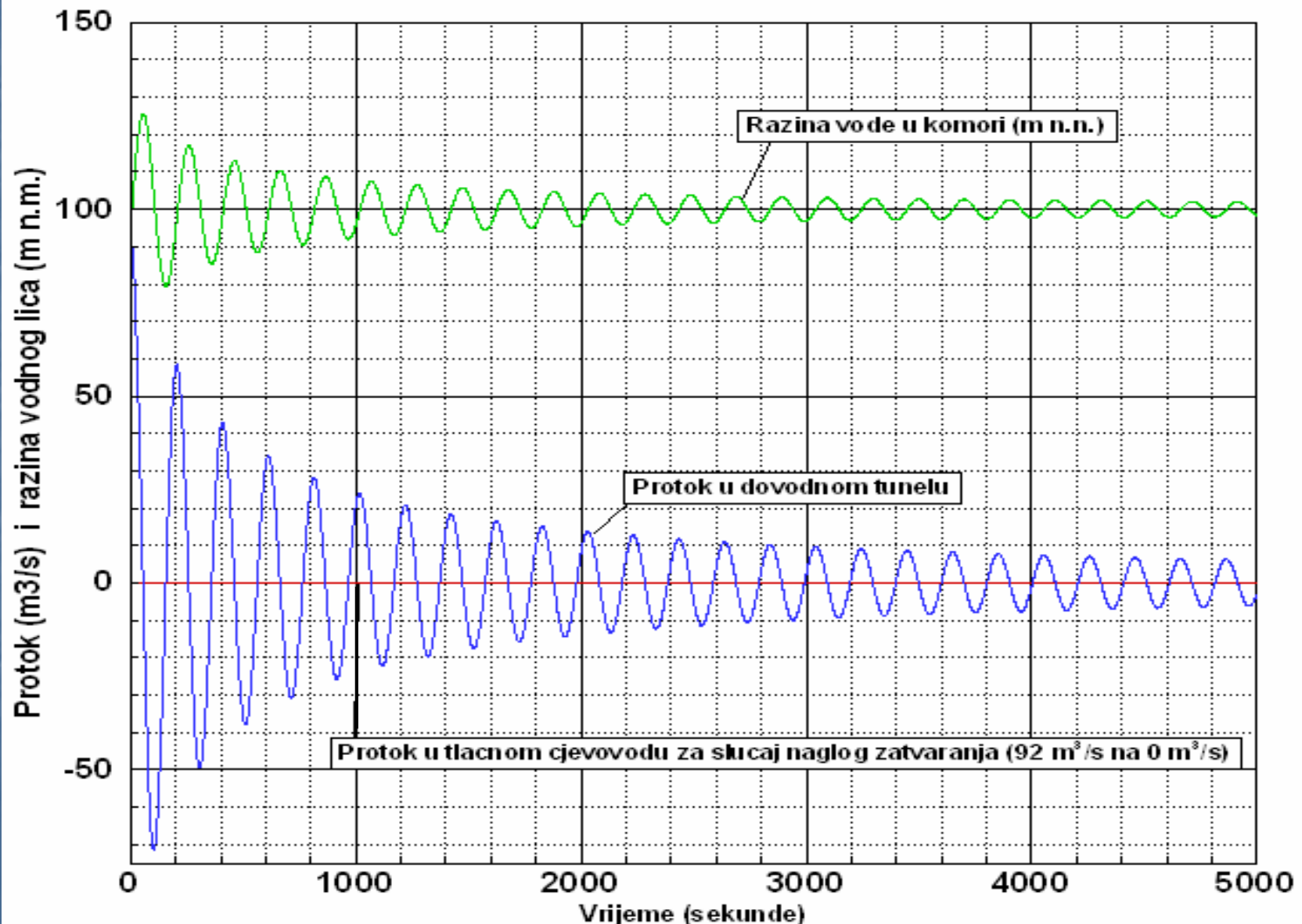
Razina vode u komori

Član promjene brzine u vremenu

Lokalni i linijski gubici

+ ako je tečenje u smjeru komore
- Ako je tečenje u smjeru akumulacije

➤ Primjer naglog zatvaranja predturbinskog zatvarača – Iz jednadžbe kontinuiteta dobije se razina u komori u vremenskom koraku, dobivena vrijednost se uvrsti u dinamičku jednadžbu i dobije se protok u dovodnom tunelu za isti vremenski korak.



4.2.2 Geometrijski oblici vodnih komora

- Oblik vodne komore uvjetovan je hidrauličkom i pogonskom stabilnošću uz minimiziranje troška izvedbe. Primarna uloga je da zadovolji uvjete minimalne i maksimalne oscilacije vodnog lica bez prekida rada sustava. Sukladno tome razlikuje se više tipova vodnih komora:
- Cilindrična vodna komora predstavlja najjednostavniji tip vodne komore u obliku vertikalnog cilindričnog tornja koji u potpunosti može biti ispod razine tla, ali konstruktivna rješenja mogu biti takava da isti izlazi preko kote terena u vidu tornja. Često je ova vrsta komore najneekonomičnija jer ima najveći hod oscilacija. Zato su potrebni veliki poprečni presjeci što znatno poskupljuje investiciju i ograničava primjenu.

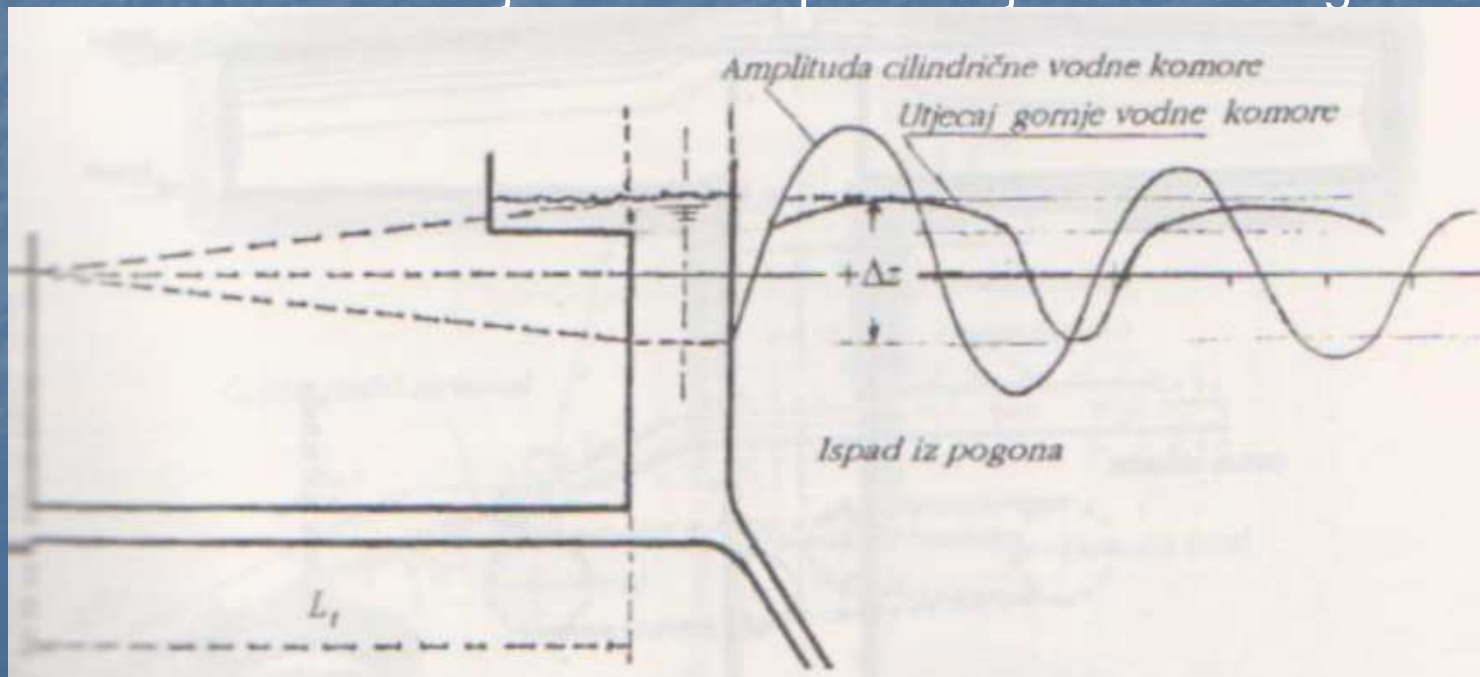


➤ Cilindrična vodna komora s prigušenjem

Smanjenje amplituda oscilacija u slučaju zatvaranja predturbinskih zatvarača može se postići kod ovog tipa komore. Pri padu opterećenja u strojarnici HE postrojenja, voda u vodnu komoru prolazi kroz “prigušivač” koji povećava gubitak energije toka i smanjuje amplitudu maksimalne oscilacije u vodnoj komori.

➤ Vodna komora s zračnim prigušenjem zasniva se na činjenici da sabijeni zrak pri podizanju razine vodnog lica usporava podizanje razine vode. Podizanje vodnog lica, dolazi do povećanja tlaka u komori, što ujedno smanjuje daljnji intenzitet povećanja razine vodnog lica.

➤ Vodna komora s gornjim proširenjem smanjuje maksimalno podizanje vodnog lica u komori što rezultira manjim tlačnim opterećenjima dovodnog tunela.



➤ Raščlanjena vodna komora smanjuje maksimalne i minimalne vodostaje čime se štedi prostor vodne komore, smanjuje maksimalni vodostaj i osigurava od uvlačenja zraka u tlačni dio sustava. Ovo je ujedno najčešći tip vodne komore.

