

HIDROTEHNIČNI OBJEKTI –

MASIVNE BETONSKE PREGRADE

Masivne težnostne pregrade

- Masivne težnostne pregrade delimo v dve glavni skupini, glede na vgrajene materiale:
 - **masivne betonske pregrade**
 - **masivne zidane pregrade**
- **Masivne betonske pregrade** delimo glede tehnologije gradnje:
 - pregrade iz betona (masivnega in kiklopskega)
 - pregrade iz valjanega betona (RCC ali RCD)
 - pregrade iz stabilizirane zemljine - CSG
- Zidane masivne pregrade delimo na:
 - zidane pregrade iz kamna
 - zidane pregrade iz prefabriciranih elementov

Betonske težnostne pregrade - osnove

- **Betonska težnostna pregrada** je konstrukcija, ki se deluječim silam zoperstavlja zgolj s lastno težo, ne da bi upoštevali prenos obtežb na boke pregrad (ločni efekt).
- **Osnovni profil** je trikotnik kot najbolj racionalna oblika, ki je bil opredeljen na osnovi upoštevanja naslednji izhodišč (Saxilly, Delorce, 1855):
 - stabilnost pred **prevrnitvijo** okoli dolvodne pete pregrade
 - **trapezni zakon** pri poteku normalnih napetosti
 - stabilnost pred **zdrsom** ne temeljni podlagi, kot tudi v katerikoli vzdolžnem profilu v telesu pregrade

Betonске težnostne pregrade - osnove

- Rankine (1881) je predlagal princip po katerem v pregradi ni dovoljen pojav **nateznih normalnih napetosti** in rezultanta delajočih sil mora biti znotraj jedra prereza (notranja tretjina profila). Ugotovil je tudi, da je smer **glavnih napetosti** vzporedna z lici pregrade.
- Po porušitvi pregrade Bouzey v Franciji (1895) je bil kot vzrok naveden pojav **vzgonskih tlakov** v telesu pregrade. Posledica te ugotovitve je bilo priporočilo (Levy), da se na gorvodni strani pregrade izvede sistem **vertikalnih drenaž** in **horizontalnih galerij**, ki zmanjšuje pojav vzgonskih tlakov. V kolikor pregrade niso zavarovane z drenažnim sistemom je treba v vsakem profilu zadostiti pogoju, da so **normalne tlačne napetosti** večje od hidrostatičnega tlaka v tej točki.

Betonske težnostne pregrade - osnove

- Do tridesetih let prejšnjega stoletja so bile več ali manj razvite vse osnove za varno načrtovanje in izvedbo objektov in sicer:
 - preveritev **vodo tesnosti** akumulacijskega prostora
 - preveritev **precejanja vode pod pregrado** in obtekanje pregrade v bokih
 - izdelava **statično-stabilitetnih analiz** z upoštevanjem vzgona in strižne trdnosti temeljne podlage
- Z razvojem računalnikov so bile izpopolnjene numerične metode (MKE), ki omogočajo tri dimenzionalne analize stabilnosti betonske pregrade z upoštevanjem temeljnih tal z vsemi geološko-geomehanskimi značilnostmi in interakcijo z akumulirano vodo.

Betonske težnostne pregrade - zasnova

- Betonske težnostne pregrade so primerne za široke doline z razmerjem **dolžina** pregrade proti **višini** je večje od **5:1**.
- Betonske težnostne pregrade so v zasnovi trikotne oblike.
Dolvodno lice pregrade je običajno v enakomerinem **naklonu**;
gorvodno lice je praviloma **vertikalno** oziroma zaradi povečanja protipotresne odpornosti (pojava negativnih normalnih napetosti) v blagem proti naklonu proti akumulaciji.
- Ravnini lic pregrade se praviloma sekata v točki, ki predstavlja **gladino najvišje zajezitve**.
- V kolikor gre za normalne geolološko-geomehanske razmere lahko privzamemo, da je **naklon** dolvodnega lica **0,7~0,8** (**horizontalno**) : **1** (**vertikalno**)

Betonске težnostne pregrade - zasnova

- V gornjem delu je pregrada odebujena glede na pogoj prevoznosti **krone pregrade** in da je v katerikoli prerezu zadoščen kriterij stabilnosti zaradi obtežb na pregrado (hidrostatični tlak, plavje, led, valovi,...). Debelino **b** določimo glede na višino pregrade **H**:

$$b = 1,65 \cdot (H + 1,5)^{1/3}$$

- Debelina krone pregrade je glede na ekonomičnost 6 do 10m, brez upoštevanja seizmičnih sil – v splošnem pa lahko privzamemo:

$$b = \sqrt{H}$$

- Na dolvodni strani je lice pregrade v odebujenem delu vertikalno do sečišča z nagnjenim dolvodnim licem.

Betonске težnostne pregrade - zasnova

- Varnostno **nadvišanje pregrade** je odvisno od hidravličnih, obratovalnih in klimatoloških razmer. Običajno lahko privzamemo nadvišanje **ΔH** kot delež višine pregrade **H**: **$\Delta H = (4\% \div 5\%)H$**
- V spodnjem delu pregrade je zaradi boljših stabilnostnih karakteristik gorvodno lice izvedeno z manjšim naklonom, s čimer povečamo prerez v **temelju pregrade**, kar je nujno pri velikih pregradah. Mejna velikost za veliko pregrado **H** je odvisna od tlačne trdnosti **f_c**, specifične gostote betona **S_c** ter specifične teže vode **γ_w** in je definirana z:

$$H = \frac{f_c}{\gamma_w (S_c + 1)}$$

- Spremembra naklona lica pregrade pa lahko lokalno povzroči spremembe napetostnega stanja, kar je treba preveriti z dodatnimi analizami. V tem smislu je treba preveriti lokalno stabilnostno stanje v vsaki točki, kjer pride do spremembe naklona lica pregrade.

Betonske težnostne pregrade - zasnova

- Če je v pregradi integriran **preliv** s prelivno drčo mora biti prelivni profil enak neprelivnem delu.
- **Oblikovanje krivočrtnega preliva** je odvisno od hidravličnih karakteristik (pretoka, globine preliva, širine prelivnega dela,...). Krivulja preliva se stika tangencialno z dolvodnim licem pregrade oziroma poteka vzporedno, kjer poteka drča preliva v telesu pregrade.
- Najvišja gladina zajezitve ne sme preseči vrha neprelivnega dela pregrade. **Nadvišanje** mora biti dovolj veliko, da je preprečeno prelitje pregrade. Za dodatno varnost je na kroni pregrade izveden **parapetni zid** (ograja), ki ima dodatno varnostno funkcijo nadvišanja zaradi prelitja pregrade.

Betonske težnostne pregrade - zasnova

- Betonske težnostne pregrade morajo biti zasnovane tako, da je zagotovljena: **varnost, ekonomičnost, funkcionalnost, trajnost in enostavnost** pri vzdrževanju.
 - Pregrade dimenzioniramo na obtežne kombinacije katere pojavnost je **statistično verjetna**, ker je le na ta način lahko zagotovljeno, da je zasnova **ekonomična**. Iz tega razloga naj tudi varnostni kriteriji ostajajo znotraj predpisanih okvirov.
 - Podatki naj bodo **ažurni** in naj temeljijo na **terenskih raziskavah, laboratorijskih preskusih** in razpoložljivih podatkih na podobnih objektih.
 - **Kvaliteta** je odvisna tako od dobre zasnove, kvalitetnih materialov, kot tudi od strokovnosti izvajalcev pri izvedbi.
-

Betonске težnostne pregrade - zasnova

- Tehnološke zahteve pri projektiranju betona:
 - beton kot konstrukcijski material mora imeti lastnosti, ki ustrezano obratovalnim pogojem in specifice konstrukcije
 - beton mora biti obstojen tekom celotne življenjske dobe konstrukcije
 - pri vgrajevanju je potrebno doseči ustrezne lastnosti (fluidnost, kohezivnost, stabilnost,...) v vseh tehnoloških fazah procesa (priprava, transport, vgradnja, nega,...)
 - strjen beton mora biti odporen na vse dejavne obtežbe, ne sme bistveno spremenjati fizikalnih lastnosti (volumske spremembe, razpoke) in biti odporen na klimatske razmere

Betonske težnostne pregrade - zasnova

- **Cement** je najpomembnejša sestavina betonske zmesi. V hidrotehničnih konstrukcijah uporabljamo različne vrste cementa glede na zahtevane lastnosti.
- V običajnem (Portland) cementu obstajajo štirje glavni minerali:
(1) trikalcijev silikat – **alit** (C_3S), (2) dikalcijev silikat – **belit** (C_2S), (3) tetrakalcijev aluminat **ferit** (C_4AF) in (4) trikalcijev aluminat (C_3A).
- Najpomembnejši minerali v cementu so **silikati**, saj največ prispevajo k trdnosti.
- **Aluminati** sicer prispevajo k začetnemu naraščanju trdnosti, ni pa zaželen mineral, ker zmanjšuje vgradljivost in lahko v večjih količinah negativno vpliva na mehanske in obstojnostne lastnosti cementnega kamna.

Betonске težnostne pregrade - zasnova

- Pri **masivnem betonu** je problem odvajanja odvečne toplote pri procesu hidratacije cementa. Načini, da se zmanjša temperatura v betonskih blokih pri vgrajevanju je uporaba:
 - nizko hidratacijskega cementa z manjšim deležem aluminatnih mineralov v sestavi
 - cement z dodatkom **žlindre** (do 20%), ki znižuje temperature pri hidrataciji in hkrati zmanjšuje delež mineralov kalcijevega hidroksida v cementnem kamnu ter posledično povečano stabilnost in odpornost betonov
 - hlajenje sestavin betona pri pripravi in mešanju ter vgradnji

Betonске težnostne pregrade - zasnova

- Kjer so zahtevane še posebne zahteve uporabljamо naslednje cemente:
 - za doseganje hitrega prirasta trdnosti in odpornosti na kemično agresijo (prelivи, podslapje,...) je primeren cement z visokim deležem **aluminatnih mineralov**
 - za kompenzacijo krčenja je primeren **ekspanzivni cement**, ki povečuje volumen pri strjevanju – primeren je za zapolnjevanje kontaktov med betonskimi bloki, na kontaktu s temeljno hribino,...
 - mineralni dodatek **elektrofilterski pepel** (silicijski ali kalcijski) ima pucolanske lastnosti in prispeva k povečani odpornosti na obrabo in kemijski agresiji

Betonske težnostne pregrade - zasnova

- **Agregat** predstavlja 75 do 80% deleža volumna betonske pregrade. Glede na delež, ki ga predstavlja agregat je prednost uporabe materiala, ki je ekonomsko izkoristljiv in hkrati ustreza pogojem za vgradnjo na pregradah (obstojnost na preperevanje, obrabo in kemijsko agresijo).
- Uporaben material mora imeti naslednje lastnosti:
 - **mehanske lastnosti**:
trdnost (tlačna, natezna, upogibna); trdota; obstojnost (atmosferilije, kemijska agresija,...); žilavost (lomna, udarna,...); elastičnost

Betoniske težnostne pregrade - zasnova

■ **fizikalne kemijske lastnosti:**

gostota; vodo-vpojnost (površinska vlaga, vpijanje vode); heterogenost; mineralna sestava; kemična reaktivnost (aluminati, silikati,...)

■ **stanje materiala:**

vrsta (eruptiven, sediment, metamorfen); oblika zrn (kubična, ploščata, podolgovata); lomnost (kubična, školjkasta, cepljiva); hrapavost površine (gladka, hrapava); izgled (zrnast, luskast, peskovit, zbit,...); uporabnost (omejitve, dostopnost, cena,...); vsebnost primesi (organske primesi, glina, soli, inkrustacije, ...)

Betonске težnostne pregrade - zasnova

■ **Granulacija agregata** je odvisna od tipa konstrukcije in namena:

- velikost maksimalnega zrna je pogojeni s pogoji priprave in vgradnje materiala – praksa je pokazala, da je največje zrno do **150mm** (predstavlja ~20% najožje širine pri opažu), ki še omogoča obvladljive pogoje pri vgradnji **masivnega betona**
- kjer so pa zahtevane posebne lastnosti (npr. abrazijska odpornost), ali pa posebni pogoji vgradnje (npr. črpanje) pa je priporočeno maksimalno zrno manjše do **32mm** (črpanje) oziroma **16 (8) mm** pri abrazijski odpornosti
- pomembno je to, da je granulacijska krivulja vsebuje vse zahtevane frakcije (ustrezen delež finih zrn) glede na maksimalno frakcijo, da ne pride do segregacije pri vgrajevanju.

Betonske težnostne pregrade - zasnova

■ **Kemijski dodatki** so namenjeni izboljšati karakteristike betona:

- **dodatki za obdelavnost** (plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji):
 - zmanjšujejo potrebo po vodi ob nespremenjeni obdelavnosti svežega betona
 - izboljšajo trdnostne karakteristike in obstojnost betona
 - omogočajo daljše obdelavne čase
 - omogočajo vgradnjo brez zbivanja betona
- **dodatki za obstojnost** (aeranti, mineralni dodatki, vodonepropustnost ...):
 - povečujejo odpornost na zmrzovanje
 - povečujejo obdelavnost sveže betonske mešanice
 - zagotavljajo vodotesnost
 - povečujejo trdnostne karakteristike strjenega betona
- **dodatki za regulacijo časa vezanja** (pospeševalci, zavlačevalci,...):
 - omogočajo zakasnitev pričetka vezanja (masivni betoni)
 - pospešujejo čas vezanja
- **dodatki za volumske deformacije** omogočajo nabrekanje cementne malte – primerno za kontaktna injektiranja, geotehnična sidra,...

Betonske težnostne pregrade: obtežbe na pregrado – stalna obtežba

Stalne obtežbe so prisotne vse skozi obratovalno obdobje objekta in se praviloma v času bistveno ne spreminjajo. Stalne obtežbe, ki jih običajno upoštevamo pri analizi betonskih pregrad so:

- **lastna teža** pregrade in objektov na pregradi
- obtežba zaradi **hidrostatičnega tlaka** akumulirane vode na gorvodni strani in dolvodni strani
- **vzgonski tlaki** na temeljno podlago, na delovnih stikih in porni tlaki
- **zemeljski pritiski** in **pritiski sedimentov**

Betonske težnostne pregrade: obtežbe na pregrado – občasna obtežba

Občasne obtežbe se v obratovalnem obdobju pojavljajo občasno in imajo lahko **sezonski značaj** (valovanje, plavje,...), odvisno od frekventnosti pojavljanja ali pa se pojavljajo **izjemoma**, v odvisnosti od verjetnostjo nastopa (potres, poplave). Občasne obtežbe, ki jih običajno upoštevamo pri analizi betonskih pregrad so:

- izjemna obtežba zaradi **potresnih sil** (**statična** in **dinamična metoda**)
- obtežba zaradi **nihanja gladine** v akumulaciji (**veter**, obratovanje, plima,...)
- obtežba zaradi **ledu** in plavja

Betonske težnostne pregrade: obtežbe na pregrado – dodatna obtežba

Dodatne obtežbe, ki jih upoštevamo pri detajlnejših analizah betonskih pregrad niso običajne, posledice pojava pa lahko dolgoročno vplivajo na strukturno varnost objekta:

- obtežbe zaradi **temperaturnih obremenitev** tekom gradnje (hidratacija) in obratovanja (klimatske razmere)
- obtežbe izvvane zaradi **deformacij** objekta in temeljne podlage tekom gradnje in obratovanja
- **dinamične obremenitve** zaradi obratovanja objekta (preliv, talni izpust,...)
- izjemne obtežbe izvvane zaradi **eksplozij**

Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza – obtežni primeri

Pri stabilnostni analizi upoštevamo naslednje možne kombinacije obtežb:

- **običajni obtežni primer** – upoštevamo vse stalne obtežbe (lastna teža, sedimenti, zemeljski pritisk, vodni pritiski pri normalnih obratovalnih pogojih, vzgonske sile z upoštevanjem dreniranja), občasne obtežbe (led, veter, temperatura, dinamične obremenitve) z upoštevanjem obratovanja objekta v vseh pogojih (zimsko in letno obdobje)
- **neobičajni obtežni primer** (nefunkcionalnost drenaže) – upoštevamo iste obtežbe kot v primeru običajnega obtežnega primera, z izjemo, da dreniranje objekta ni polno funkcionalno

Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza – obtežni primeri

- **neobičajni obtežni primer** (po potresna analiza) – upoštevamo iste obtežbe kot za običajni obtežni primer in z upoštevanjem povečane razpokanosti temeljne hribine oziroma na kontaktu s temeljem pregrade, kot posledica potresa. Namen te analize je dokazati ali je konstrukcija po potresu še varna za običajni obtežni primer.
- **izjemni obtežni primer** (poplavna voda) – upoštevamo iste obtežbe kot za običajni obtežni primer, razen za obtežbo z vodo in vzugonske tlake, kjer upoštevamo maksimalne obratovalne gladine za pojav maksimalne projektne poplavne vode.
- **ekstremni obtežni primer** (potres) – upoštevamo iste obtežbe kot za običajni obtežni primer sočasno z upoštevanjem potresnih sil zaradi odziva pregrade in akumulirane vode za primer projektnega potresa.

Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza

Stabilnostno analizo pregrade je treba izvesti z upoštevanjem sledečih izhodišč:

- pregrada mora biti zasnovana tako, da je zagotovljena ustrezena **varnost pred zdrsom**, tako na konstrukcijskih stikih v pregradi, kot v temelju pregrade ter katerikoli plasti v temeljni podlagi
- maksimalne napetosti v pregradi in v temeljnih tleh ne smejo preseči dopustnih trdnosti betona ali temeljne podlage
- **rezultanta delujočih sil** (statičnih in dinamičnih) mora ležati znotraj jedra prereza v vseh profilih pregrade, kar preprečuje pojav nateznih napetosti ali nevarnost prevrnitve pregrade

Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza z uporabo MKE

- Metoda končnih elementov (MKE) se v stabilnostnih analizah uporablja vse od 70 let dalje, sprva kot 2D analiza z upoštevanjem linearno elastičnega materiala, kar podaja dobre rezultate glede obnašanja pregrade pri statičnih obremenitvah, manj pa v primeru dinamičnega obremenjevanja.
- Z razvojem zmogljivosti strojne opreme v 90 letih je postalo mogoče 3D modeliranje in upoštevanjem razpok v pregradi in temeljnih tleh. Z uporabo kompleksnejših računskih elementov je mogoče analizirati zahtevnejše računske primere – omejitve so zgolj razpoložljivost strojne opreme in stroški izvedbe.

Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza z uporabo MKE

- Pri analizi pregrad se srečujemo z naslednji problemi:
 - **interakcija pregrada-voda:** problem je najbolj enostavno rešljiv z "dodano maso", ki jo predstavlja obtežba z vodo na osnovni element lica pregrade. Tak pristop je lahko problematičen pri potresni obtežbi, zato se priporoča, da se akumulacija vključi neposredno v MKE analizo
 - **vključitev temeljne podlage:** običajno v modelu privzamemo, da je temeljna podlaga na dolžini višine pregrade nepomično podprta. V statičnih analizah ne upoštevamo izkopov in relaksacije temeljnih tal, ne mase temeljnih tal. Ta način pristopa ni primeren za modeliranje primerov, kjer kritična porušitev poteka po podlagi, kjer je pa treba v MKE analizo vključiti tudi podlago

Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza z uporabo MKE

- **vključitev vpliva vodnega tlaka in pornih tlakov:** problem je najbolj enostavno rešljiv z upoštevanjem vzgonskih tlakov kot dodane obtežbe ali upoštevanje pornih tlakov kot dodatek izračunanim vrednostim. Tak pristop ne poda točnih rezultatov. Zato je treba posebej izračunati porne tlake zaradi precejanja z uporabo modula za račun prenašanja temperature/vode skozi beton. Podobno izvajamo tudi za analizo temeljnih tal, kjer pa je treba upoštevati izhodiščno stanje podtalnice.
- **pogoji strižne trdnosti:** pomik na kontaktu pregrada-hribina se zgodi, ko je vzdolž celotne kontaktne ploskve v vseh elementih presežena strižna trdnost kontakta. Zaradi kompleksnosti problema se običajno privzame v računu rezidualna strižna trdnost, kar pa pomeni, da so strižni pomiki precenjeni.

Masivne betonske pregrade – masivne betonske



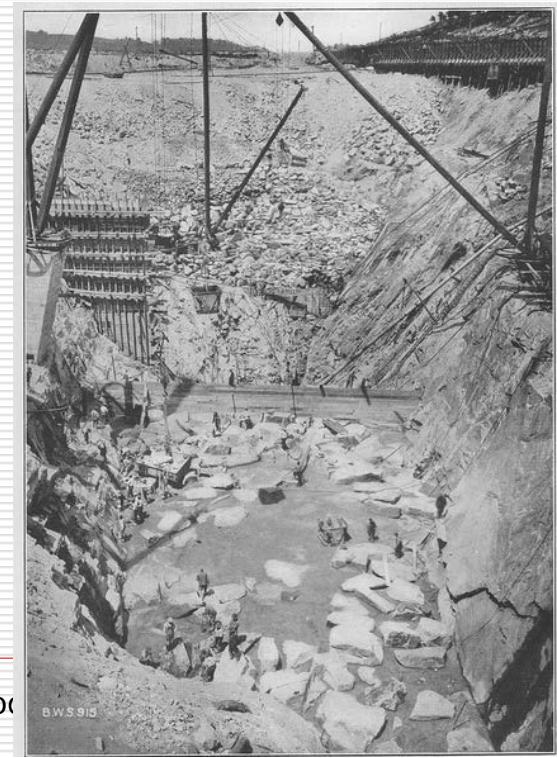
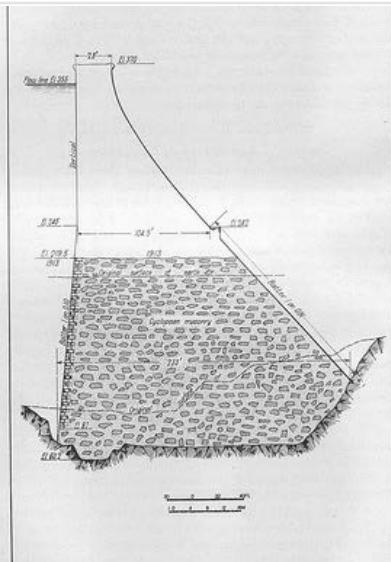
- vgrajevanje betonskih blokov na pregradi Hoover
- vgrajevanje masivnega betona na pregradi Blanca

masivne betonske pregrade so izgrajene iz masivnega betona (običajno z dodatki za zmanjšanje temperature pri hidrataciji), vgrajenega z običajno betonsko mehanizacijo in opremo na licu mesta v količinah in velikosti, ki še omogoča kontrolo pri sproščanju hidratacijske toplote in volumskih deformacij (krčenja betona)



Masivne betonske pregrade – masivne iz kiklopskega betona

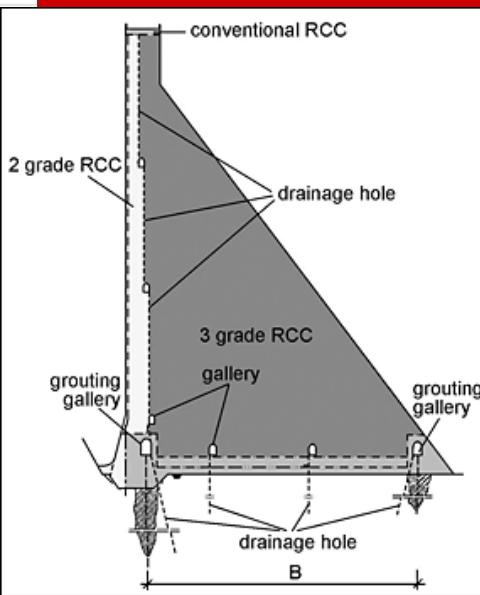
- betonske pregrade iz **kiklopskega betona** so grajene podobno kot iz masivnega betona le z razliko, da so v masivni beton vgrajeni veliki kamni, s čimer se zmanjša količina uporabljenega betona in posledično manjše sproščanje hidratacijske toplote in volumskih deformacij
- zaradi zagotavljanja vodotesnosti in zaščite masivnega betona so lica obložena s kameno oblogo.



Masivne betonske pregrade – masivne iz valjanega betona

- Pregrade iz **valjanega betona** so grajene iz betona, ki ga vgrajujemo in zgoščujemo na enak način kot nasute pregrade.
- Valjani beton je po sestavinah podoben masivnemu betonu, vendar z nižjim deležem veziva, pri katerem se delež cementa zmanjšuje na račun pucolanskih veziv (elektrofilterski pepel, žlindra).
- Poznane sta dve tehnologiji gradnje valjanega betona:
 - z vgrajevanjem tanjših slojev in sprotnim zgoščevanjem vsakega sloja posebej – RCC (Roller Compact Concrete)
 - z vgrajevanjem tanjših plasti in hkratnim zgoščevanjem slojev iz več plasti – RCD (Roller Compact Dam)

Masivne betonske pregrade – masivne iz valjanega RCC betona



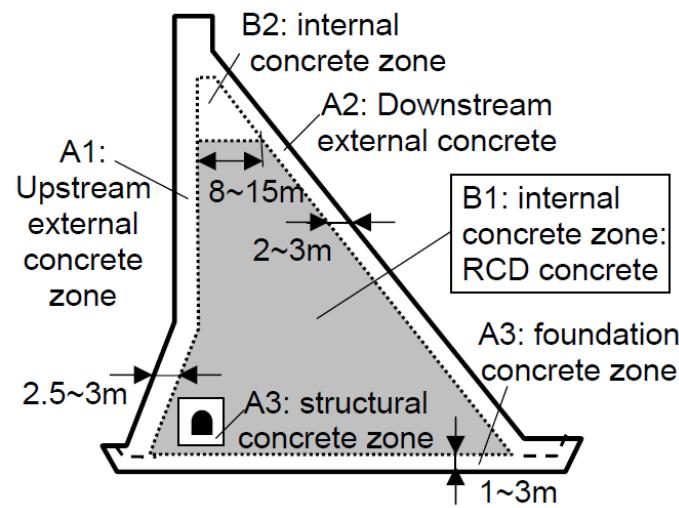
- Prečni prerez pregrade iz valjanega – RCC betona



- pregrada Wolwedans (SA)

- vgrajevanje posameznega sloja (~30cm) valjanega betona z zemeljsko mehanizacijo

Masivne betonske pregrade – masivne iz valjanega RCD betona



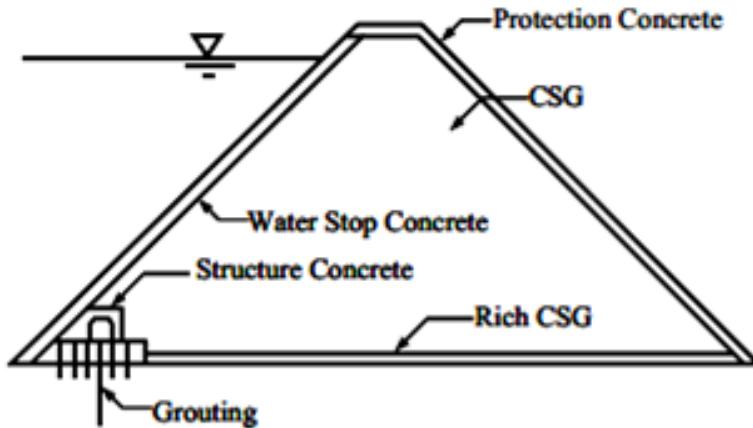
- Prečni rez pregrade iz valjanega – RCD betona



- pregrada Shimajigawa (JP)
- vgrajevanje posameznih slojev iz več plasti (~4 plasti po ~30cm) valjanega betona RCD z zemeljsko mehanizacijo

Masivne betonske pregrade – masivne iz stabilizirane zemljine

- Betonske pregrade iz **stabilizirane zemljine** (**CSG** - Cement Sand Gravel) so tehnološko grajene podobno kot pregrade z valjanega betona, le z razliko, da je predstavlja delež veziva približno 50% deleža v običajni RCC/RCD pregradi. Stabilizirana zemljina sestavlja neseperarirana zemljina, ki ji dodajamo zgolj cementno vezivo in vodo. Zaradi zagotavljanja vodotesnosti in zaščite telesa pregrade so lica obložena z betonsko oblogo.
- Prečni prerez pregrade iz stabilizirane



- pregrada Nagashima (JPN)



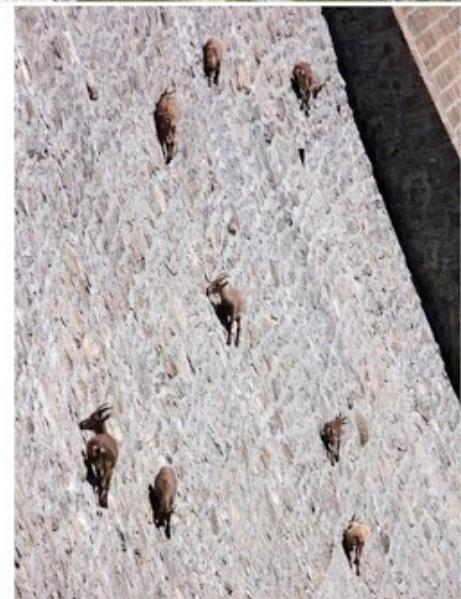
Masivne težnostne pregrade – zidane pregrade

- Zidana pregrada je zgrajena pretežno iz **kamna** (obdelan ali neobdelan) ali **obdelanih blokov** (betonskih prefabrikatov ali kamnitih blokov), vezanih z malto.
- Pri zidanih pregradah je problematično zagotavljanje vodo tesnosti pregradnega profila, ki so ga dosegali: z dozidavo gorvodnega lica pregrade, z izvedbo posebnih nepropustnih slojev v telesu pregrade ali z uporabo večkrat žgane gline.
- Zidane pregrade so prevladovale v 19 in začetku 20 stoletja. V sedanjem času je večina pregrad izgrajena iz betona

Masivne težnostne pregrade – zidane pregrade



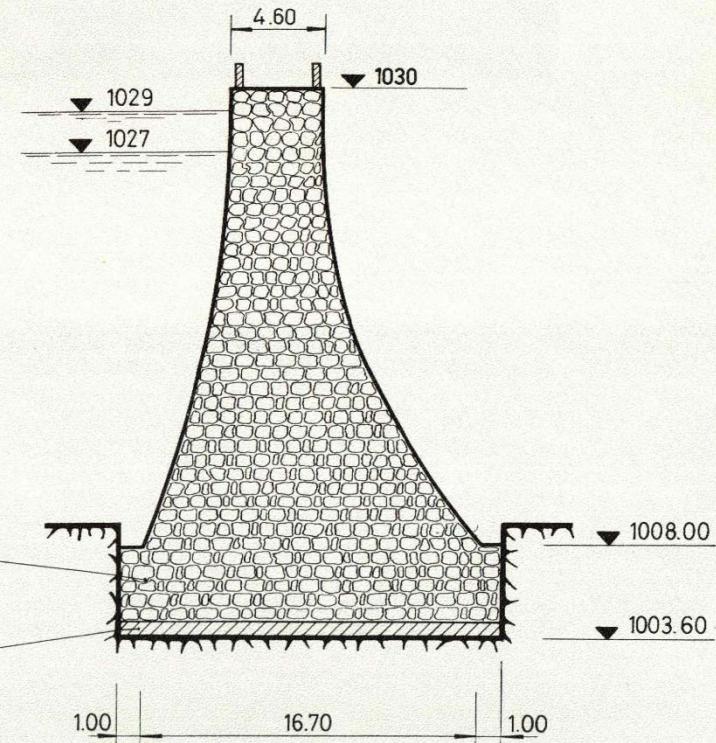
zidana pregrada iz obdelanih
kamnitih blokov



Masivne težnostne pregrade – zidane pregrade

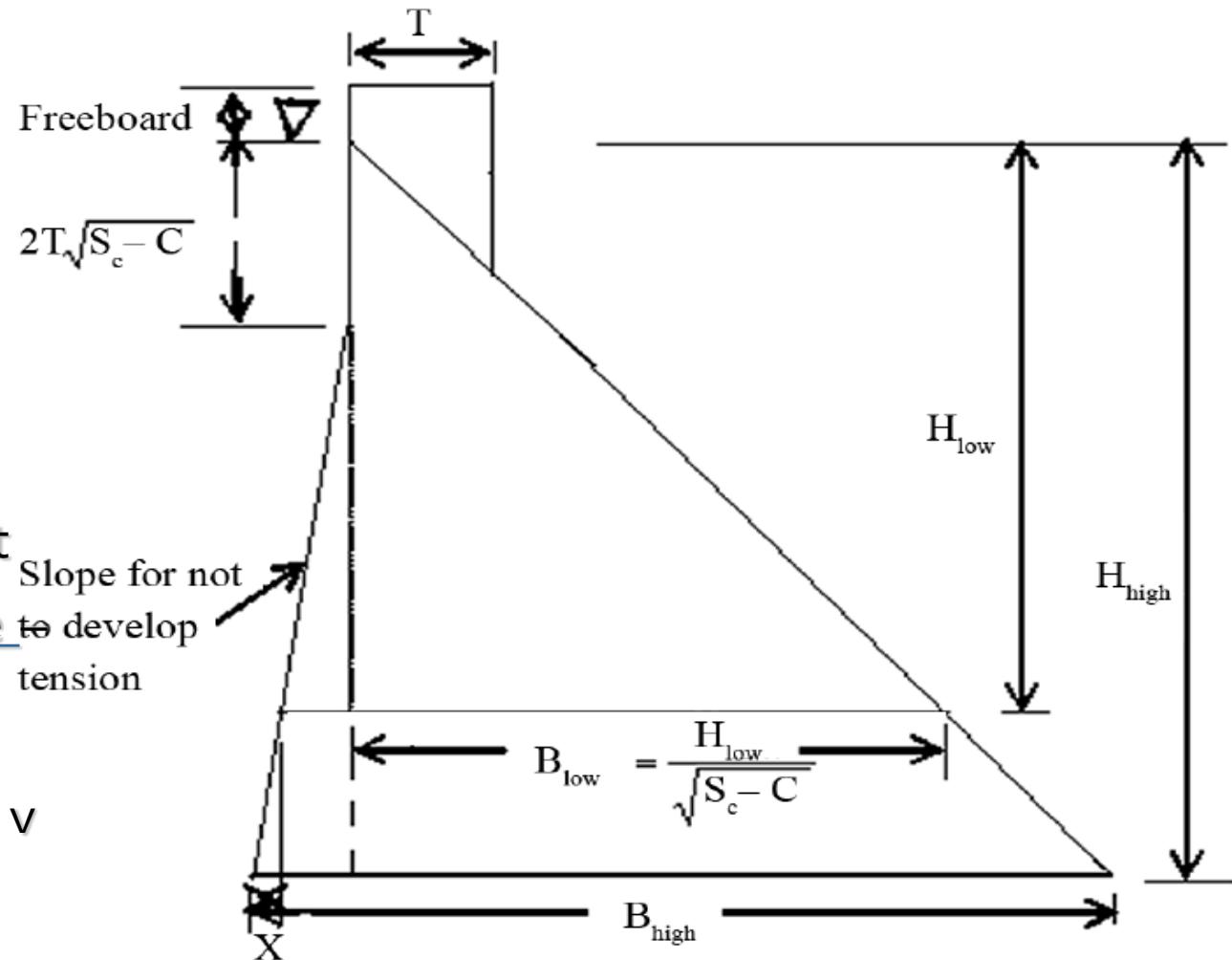


zidana pregrada iz pol obdelanih kamnov



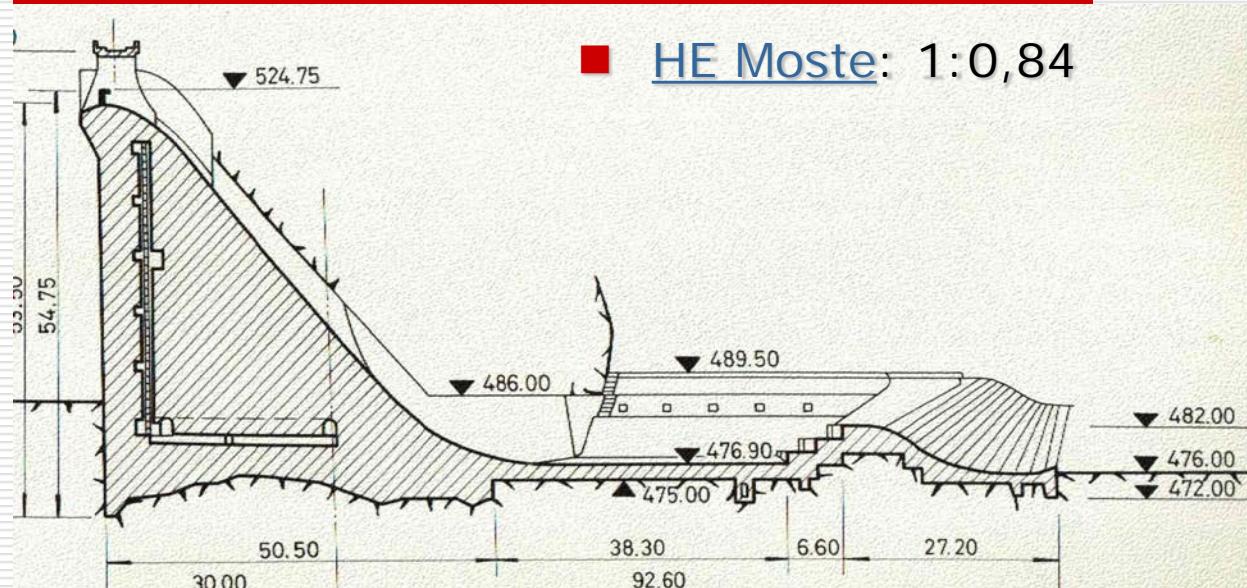
Betonске težnostne pregrade - zasnova

- zasnova: trikotna oblika
- protinaklon gorvodnega lica
- sečišče linij lic je v točki maksimalne gladine
- krona pregrade omogoča prevoznost
- nadvišanje pregrade ekonomičnost in stabiliteta
- odebelitev pregrade v temeljih

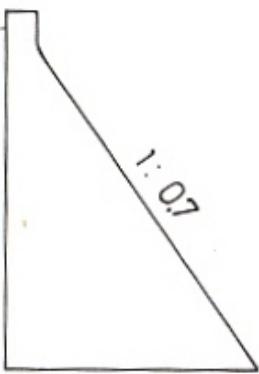


Betonske težnostne pregrade – naklon lic pregrade

■ HE Moste: 1:0,84

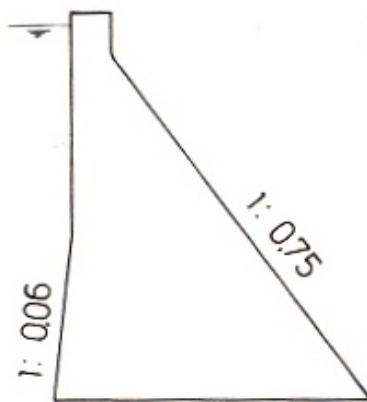


a)



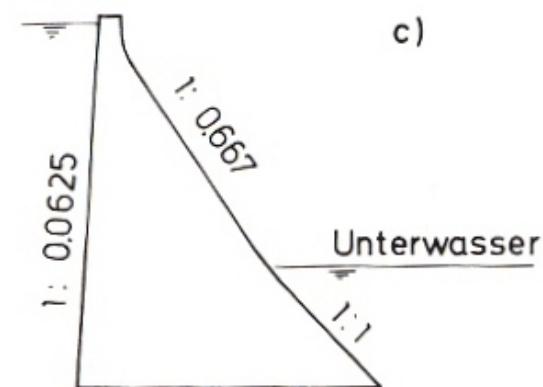
a) Kortes Dam, USA
Höhe: 72 m

b)



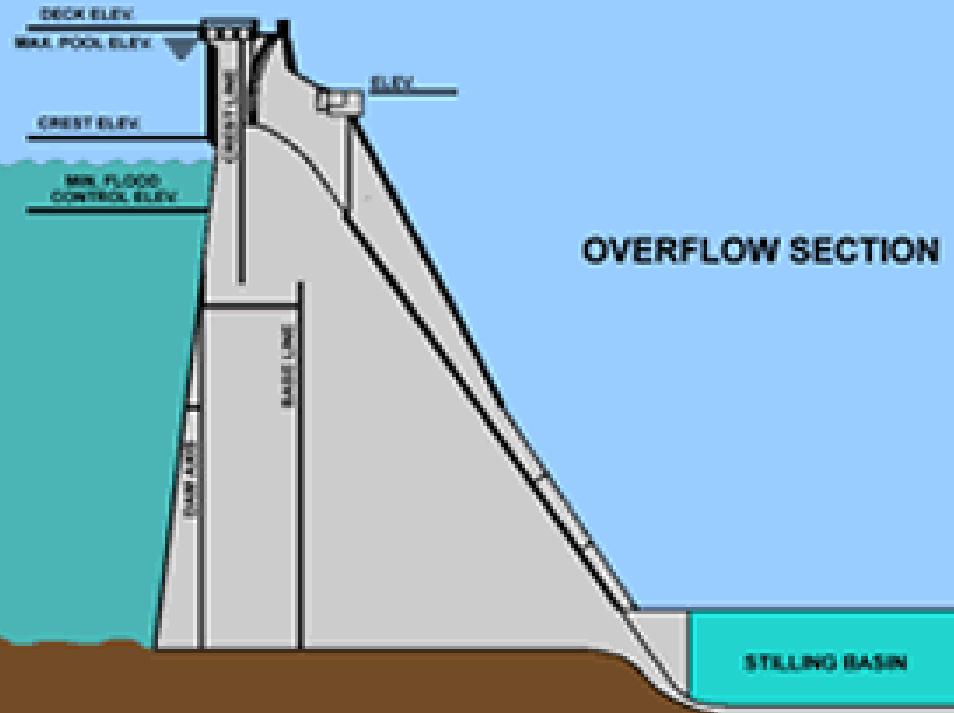
b) Marshall Ford Dam, USA
Höhe: 80 m

c)



c) Elephant Butte Dam, USA
Höhe: 88 m

Betonске težnostne pregrade - zasnova

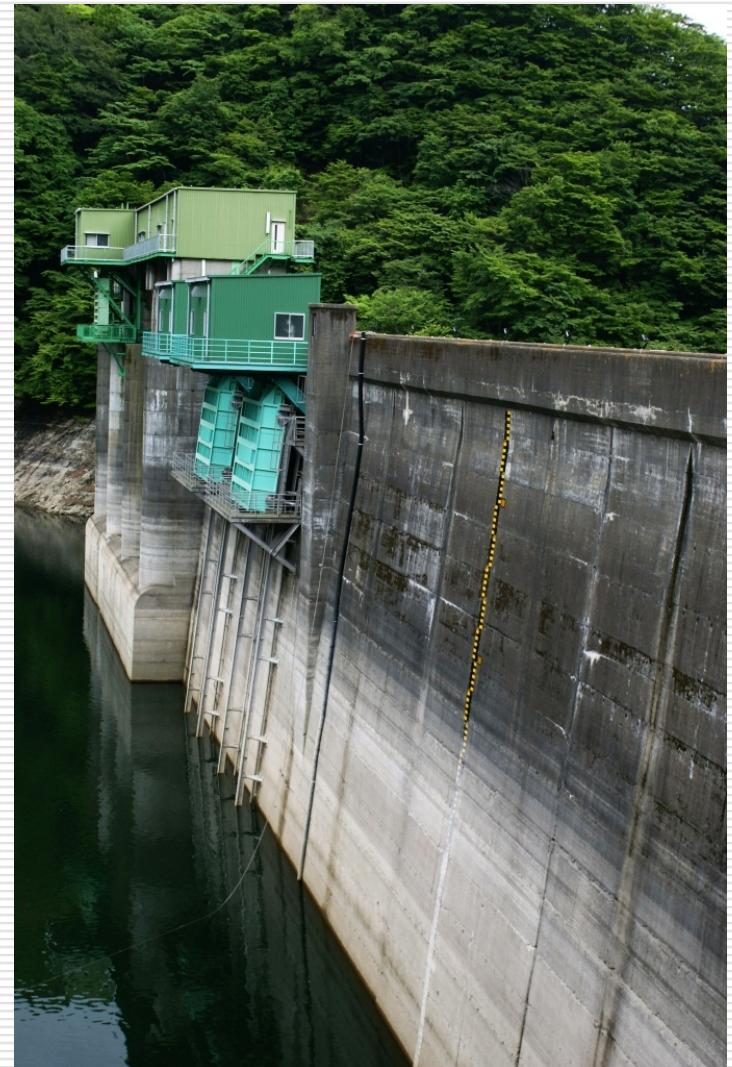


■ prelivni del pregrade



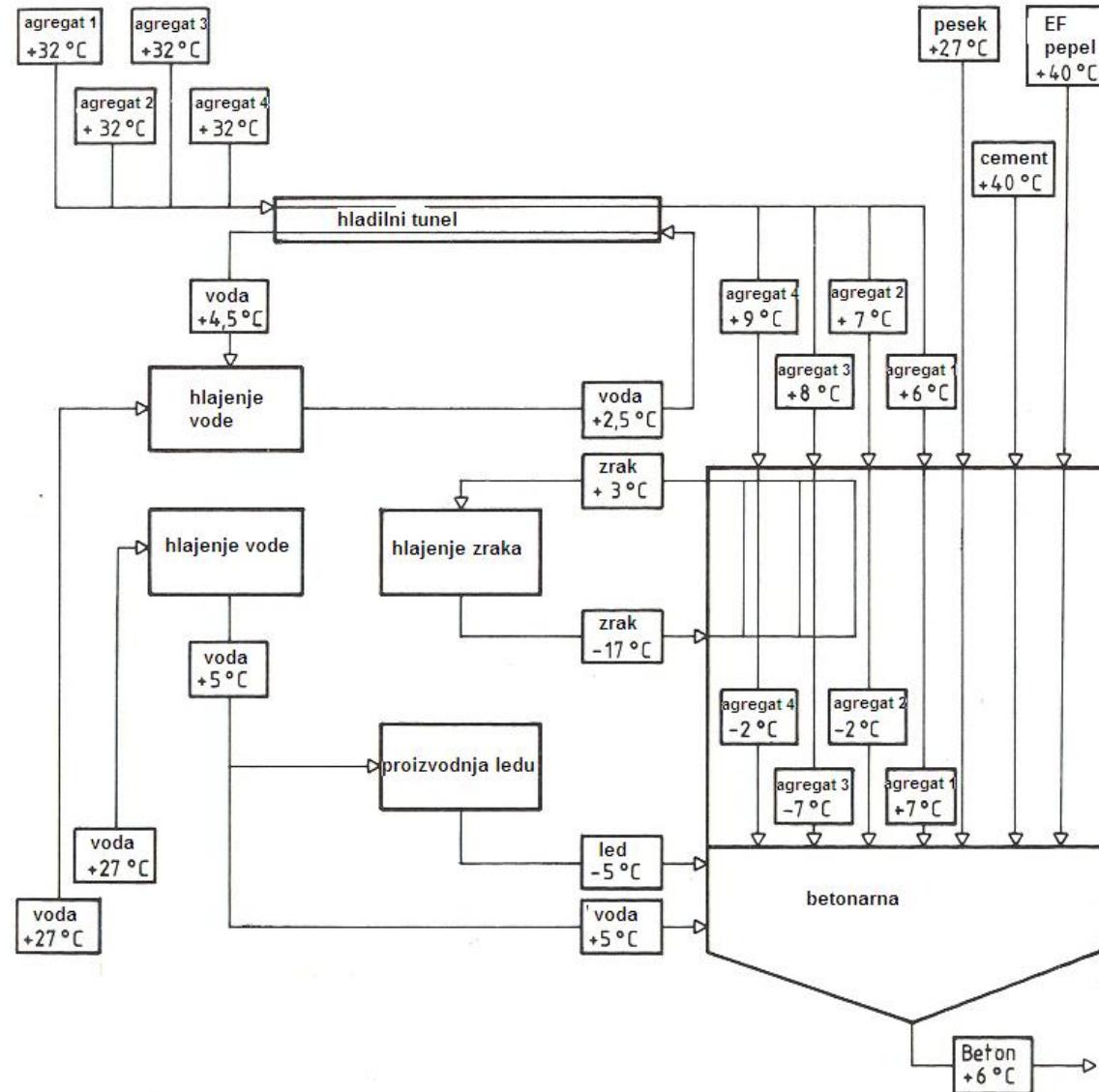
■ neprelivni del pregrade

Betonске težnostne pregrade - zasnova



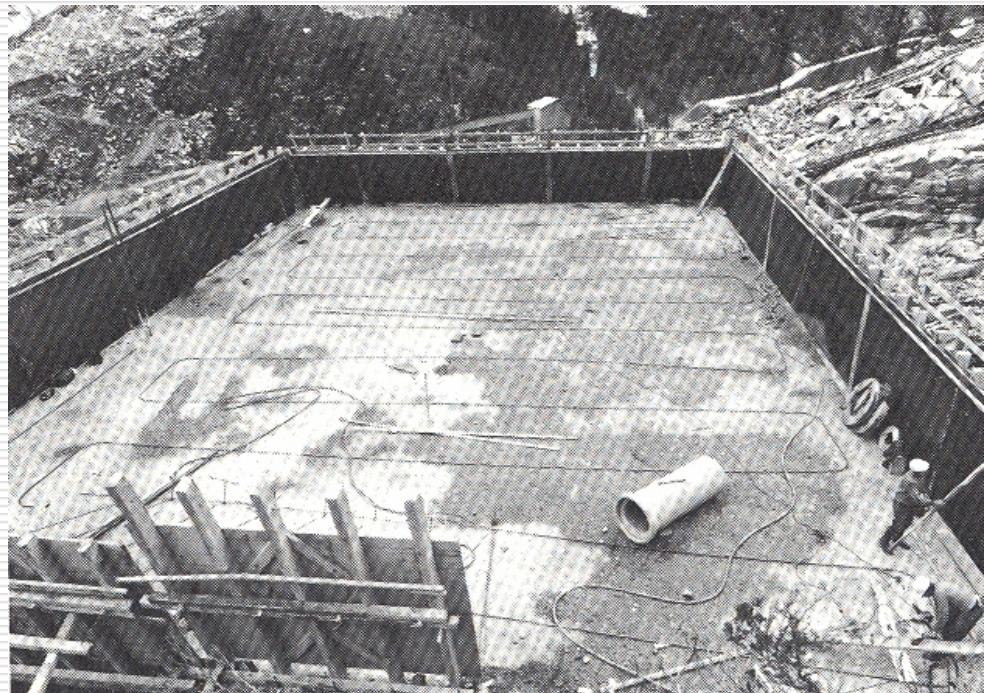
- izvedba parapetnega zidu (ograje) na kroni pregrade

Betonske težnostne pregrade – hlajenje sestavin masivnega betona



Betonske težnostne pregrade – hlajenje vgrajenega masivnega betona

- Po vgradnji so možni naslednji načini hlajenja betona: (1) s polivanjem s **hladno vodo**, (2) s **hlajenjem opaža**, (3) s hlajenjem betona s **hladilnim sistemom**
- Cevi za hlajenje so običajno jeklene (\varnothing 18-25mm), aluminijaste, redko pa plastične zaradi slabe toplotne prevodnosti.
- Cevi so položene so na horizontalnih konstrukcijskih stikih (1 do 2 m razstojja po višini) in med seboj povezane v sistem, ki omogoča nadzor hlajenja.
- Dinamika hlajenja je približno 1°C na dan



Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – lastna teža

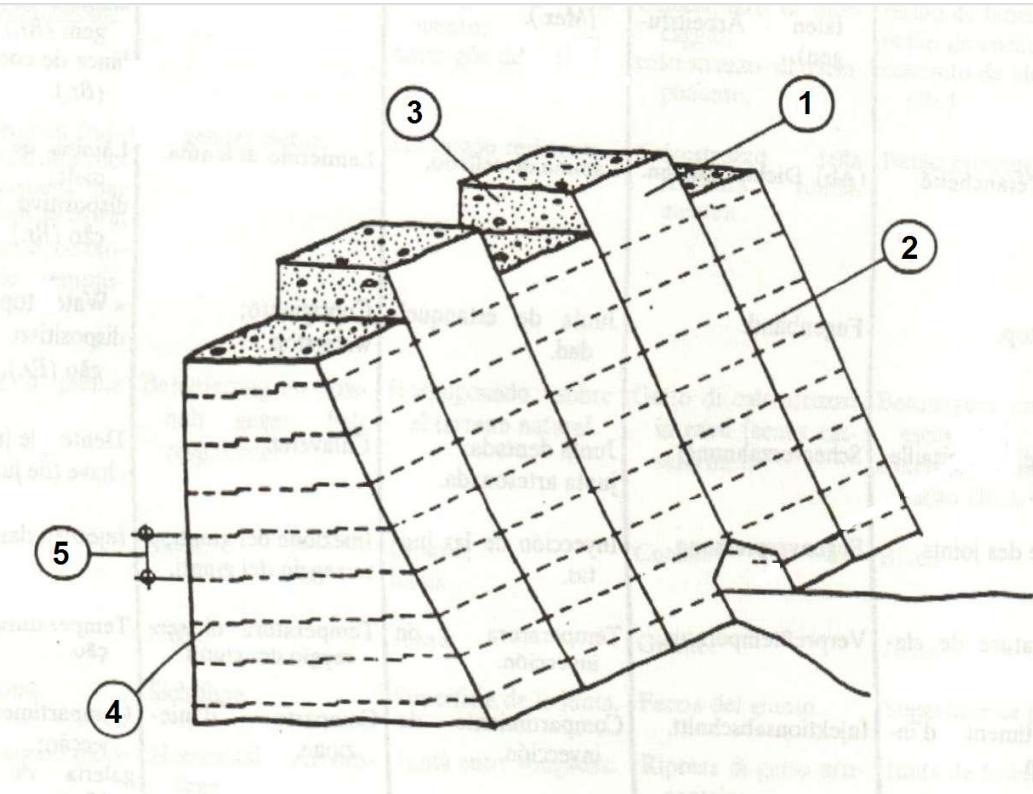
- **Lastna teža** vključuje težo masivnega dela pregrade (betona) in vključno z vsemi objekti na pregradi (hidromehanska oprema, premostitve, ...).
- Za preliminarni izračun za specifično težo masivnega betona γ privzamemo vrednost **24 kN/m³**.
- Zaradi ekonomike izvedbe je smiselno, da se specifična teža masivnega betona določi na osnovi laboratorijskih preiskav in v stabilitetnem računu zaradi varnosti privzamemo vrednost, ki je le malenkostno manjša od vrednosti, določene v laboratoriju.
- Specifična teža betona je odvisna tudi dodatkov betona, ki lahko vplivajo na gostoto masivnega betona (aeratorji za zmrzlinsko obstojnost)

Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba– lastna teža masivni beton

- Pri stabilitetni analizi normalno upoštevamo, da je masivna pregrada izgrajena kot **monolitni blok**, brez konstrukcijskih stikov, ki je direktno postavljen na temeljno podlago.
- Dejansko pa je pregrada **grajena postopoma** s **horizontalnimi** in **vertikalnimi** delovnimi stiki, kar je treba upoštevati tudi pri detajlnih stabilitetnih analizah. Tekom gradnje, ko delovni stiki še niso zatesnjeni se formira drugačno napetostno stanje, kot po opravljeni monolitizaciji objekta.
- Tekom gradnje je treba tudi stalno spremljati fizikalne in mehanske parametre **masivnega betona** in, v kolikor prihaja do odstopanj od privzetih vrednosti po potrebi korigirati preliminarne račune.

Betonske težnostne pregrade: masivni beton – postopna gradnja

- 1. masivni betonski blok**
- 2. vertikalni (prečni) delovni stik**
- 3. stična površina**
- 4. vodoravni delovni stik**
- 5. višina sloja betoniranja**



Betonske težnostne pregrade: masivni beton – horizontalni delovni stik

■ **Horizontalni delovni stiki** v pregradi so stične ploskve med dvema zaporednima slojema betona s katerimi zagotavljamo povezanost posameznih betonskih blokov v monolitno strukturo z naslednjim:

- pred betoniranjem novega sloja površino starega sloja speremo z vodnim curkom, da odstranimo ves nevezan material in strjeno cementno mleko s površine
 - površino dodobra presušimo s stisnjениm zrakom in prebrizgamo s posebno malto (polimerni beton), ki zagotavlja oprijemljivost svežega betona s strjenim betonom
 - po nanosu veznega sloja nadaljujemo z betoniranjem naslednjega sloja betona
- Če stik pred nadaljnjo betonažo posebej ne obdelamo ustvarimo t.i. **hladni stik**, kjer med njima ni povezave

Betonske težnostne pregrade: masivni beton – horizontalni delovni stik



Priprava površine predhodnega sloja:

- čiščenje s stisnjениm zrakom
- nanašanje vezne malte

- Betonaža betonskega bloka s kibelnim betonom in s kompaktiranjem z vibrirnimi iglami



Betonske težnostne pregrade: masivni beton – vertikalni delovni stik

- **Vertikalni delovni stiki** v pregradi so namenjeni za preprečitev nastanka razpok v masivnem betonu zaradi krčenja betona.
- Razpoke so neugodne predvsem zaradi povečanja vodo propustnosti materiala, nastanka koncentracij napetosti in diskontinuitet v masivnem betoni, ki so lahko vzrok za zmanjšanje nosilnosti konstrukcije.
- Delovni stiki praviloma potekajo po celotni višini in širini pregrade, odvisno od njene velikosti. Poznamo dva načina izvedbe vertikalnih delovnih stikov:
 - **prečni delovni stiki** – normalno na os pregrade
 - **vzdolžni delovni stiki** – vzporedno na os pregrade

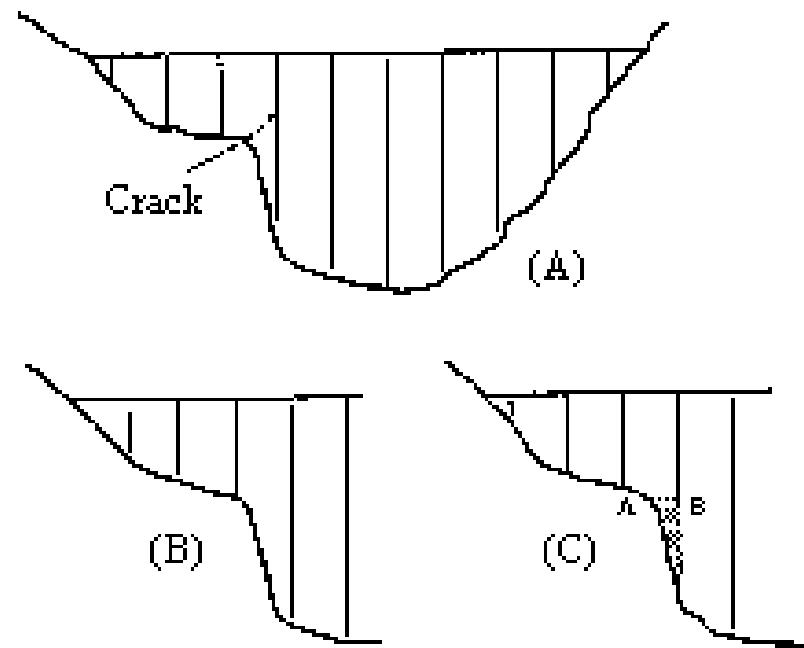
Betonske težnostne pregrade: masivni beton – delovni stik v prečni smeri

- **Delovni stiki v prečni smeri** zmanjšujejo nevarnost nastanka razpok zaradi krčenja betona in potekajo v smeri normalno na os pregrade.
- S prečnimi delovnimi stiki tudi preprečujemo razpoke v konstrukciji, ki bi nastale zaradi diskontinuitet v podlagi: območja slabše nosilnosti, prelomi, stopnice,...)
- Delovni stiki v prečni smeri potekajo vertikalno po celotni višini pregrade in delijo telo pregrade na posamezne betonske bloke. Širina posameznega bloka oz razstoj stikov je odvisen od same lokacije – praviloma so stiki na razstoju od 15 do 20m.
- Čeprav je v zasnovi vsak betonski blok sam po sebi stabilen, je potrebno po dokončanem procesu hidratacije praviloma (ni pa vedno nujno) izvesti monolitizacijo z zapolnitvijo delovnih stikov z injektiranjem.

Betonske težnostne pregrade: masivni beton – delovni stik v prečni smeri

Primer izvedbe delovnih stikov ob diskontinuiteti na boku pregrade:

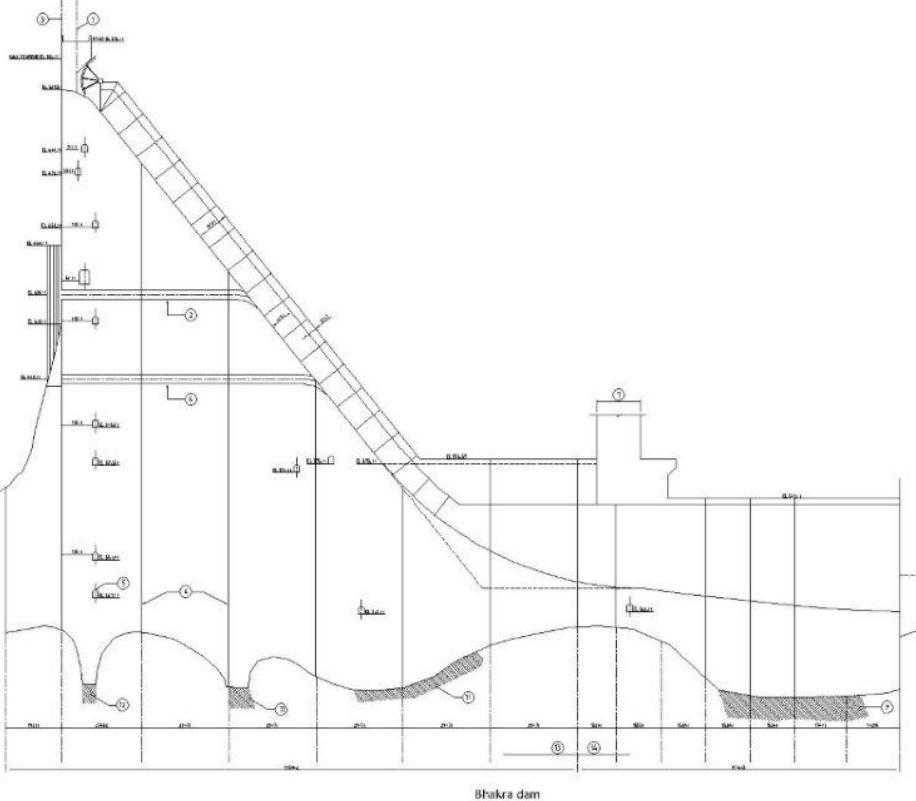
- a. izvedba stika na brežini bo povzročila razpoke v betonu
- b. delovne stike izvedemo v območju bolj položne brežine
- c. stabilizacija temeljev z izdelave betonske zalivke do nivoja brežine (A-B) – betonaža bloka sledi, ko je beton v temeljih v celoti strjen



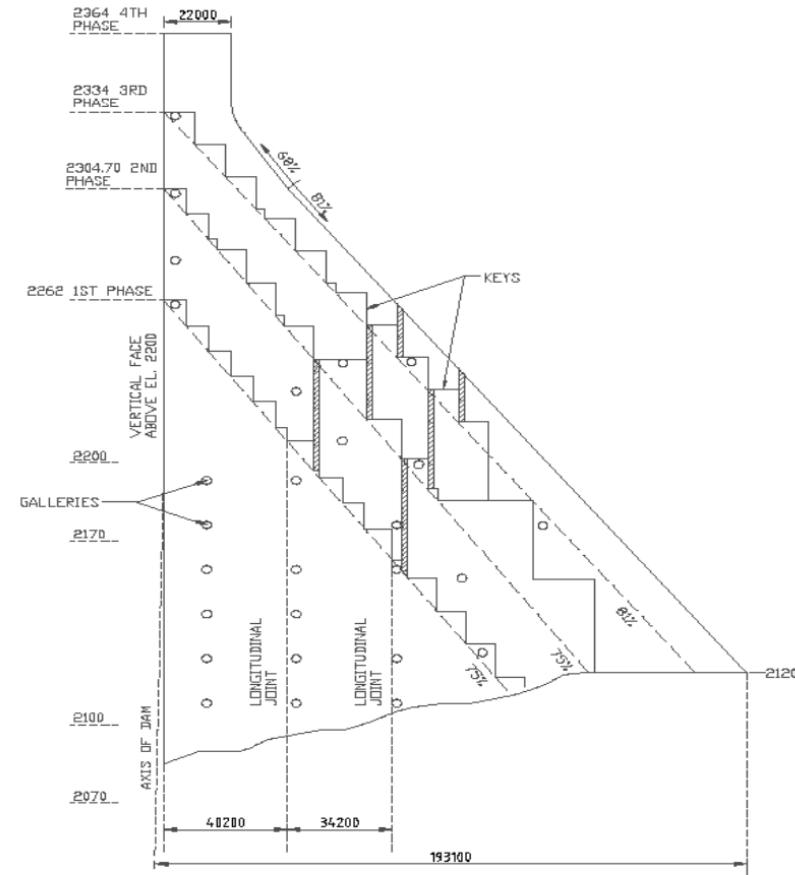
Betonske težnostne pregrade: masivni beton – delovni stik v vzdolžni smeri

- **Delovni stiki v vzdolžni smeri** so namenjeni za preprečitev razpok zaradi krčenja v vzdolžni smeri, kar je posebej problematično pri visokih pregradah, kjer se z višino povečuje tudi debelina pregrade.
- Ti stiki so običajno cikcakasto zamaknjeni (za okoli 8m) in praviloma potekajo po celotni višini pregrade, razen na dolvodni strani, kjer pa se lahko preusmerijo vzporedno z naklonom lica pregrade.
- Razstoj med stiki mora biti dovolj širok, da so preprečene razpoke v vzdolžni smeri (od 15(20) m do 30m).
- Za razliko od prečnih delovnih stikov je treba pri delovnih stikih v vzdolžni smeri **vedno izvesti monolitizacijo** z zapolnitvijo delovnih stikov z injektiranjem, ki se izvede pred prvo polnitvijo akumulacije.

Betonske težnostne pregrade: masivni beton – delovni stik v vzdolžni smeri



■ pregrada Bakhra (IND)



■ delovni stiki pri postopni
gradnji – Grand Dixence (CH)

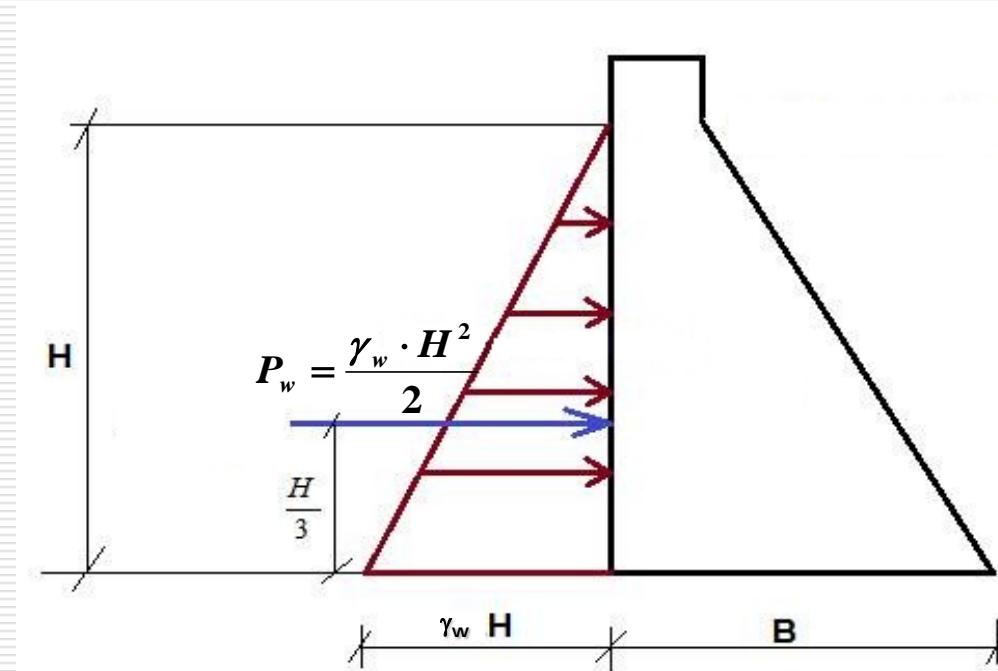
Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – obtežba z vodo

- **Obtežbo z vodo** na pregrado računamo za primer maksimalne gladine vode v akumulaciji z upoštevanjem pojava maksimalne poplavne vode. Če je pregrada prelivna upoštevamo, da je pri evakuaciji poplavnih voda eno prelivno polje blokirano.
- Kot ekstremni primer lahko privzamemo slučaj, ko je gladina vode v akumulaciji na nivoju krone pregrade (maksimalna gladina in upoštevanje valovanja).
- Obtežbo z vodo na pregrado računamo kot hidrostatični tlak, ki je odvisen od globine **h** in specifične teže vode **γ_w** (**10kN/m³**):

$$p = \gamma_w \cdot h$$

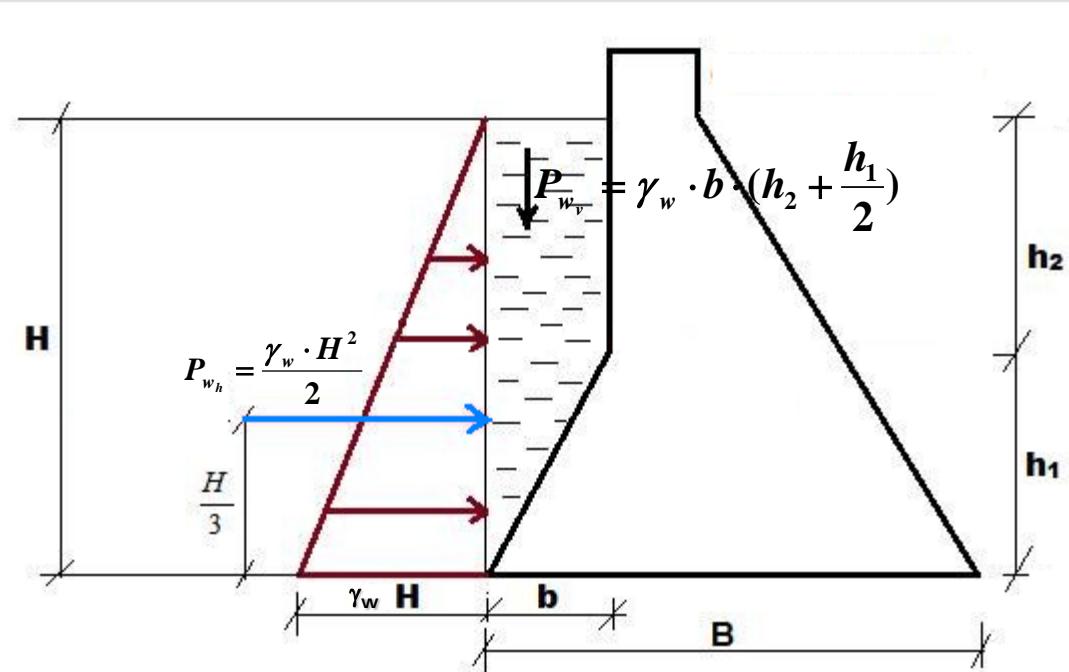
Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – obtežba z vodo

- Pri pregradah z **vertikalnim gorvodnim licem** upoštevamo zgolj hidrostatični tlak vode na akumulacijo
- Rezultanta obtežbe z vodo deluje v horizontalni smeri, pravokotno na lice pregrade



Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – obtežba z vodo

- Pri pregradah z **nagnjenim gorvodnim licem** upoštevamo tako hidrostatični tlak vode na akumulacijo, kot lastno težo vodnega stolpca, ki deluje na konkavno oblikovani del pregrade
- Horizontalna komponenta obtežbe z vodo predstavlja hidrostatični tlak na pregrado in vertikalna komponenta težo vodnega stolpca



Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba– obtežba z vodo

- Pri prelivanju vode čez pregrado upoštevamo lastno težo vode, ki je odvisna od hidravlike preliva in specifične teže vode γ_w (praviloma upoštevamo **10kN/m³**; za vodo z rinjenimi plavinami pa **12kN/m³**). Vertikalno komponento teže prelivajoče vode redkokdaj upoštevamo v analizah, ker se na prelivu pojavljajo negativni tlaki in zatorej lahko ta vpliv zanemarimo.
- V kolikor pa se na drči pojavljajo izraziti podtlaki, ki so posledica nepravilne zasnove ali nezmožnosti aeracije vodnega curka jih upoštevamo kot pozitivno obtežbo, ki je usmerjena dolvodno.
- Obtežbe zaradi spodnje vode praviloma ne upoštevamo, razen v primeru, ko imamo prazno akumulacijo, kjer pa moramo upoštevati hidrostatični tlak na dolvodno lice pregrade.

Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – vzgonski tlaki

- **Vzgonski tlaki** se pojavijo kot posledica precejanje vode čez pregradni profil:
 - precejanje vode skozi temelje pregrade vpliva na pojav vzgonskih hidrostatičnih tlakov na temeljno ploskev pregrade
 - zaradi precejanja vode skozi telo pregrade se pojavijo **vzgonski tlaki** na delovnih stikih in porni tlaki v masivnem betonu in
- Negativne vplive precejanja vode čez pregradni profil zmanjšamo s konstrukcijskimi posegi: (1) tesnitev gorvodnega lica pregrade; (2) tesnitve v pregradnem profilu – injektiranje; (3) zmanjšanje vzgonskih tlakov z drenažnimi vrtinami
- Običajno se za povečanje učinkovitosti izvede kombinacija navedenih načinov tesnitve.

Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – vzgonski tlaki

- **Vzgonski tlak** na temeljno ploskev je posledica precejanja vode skozi temeljno podlago – učinek pa je odvisen od poroznosti temeljnih tal in intenzitete strujnih tlakov.
- Učinek vzgonskih tlakov na temeljno ploskev je neodvisen od kvalitete izvedbe. Na osnovi teoretičnih in praktičnih raziskav je treba upoštevati, da je 92% do 96% površine temeljne ploskve pod vplivom vzgonskega tlaka. Zaradi varnosti praviloma upoštevamo, da deluje vzgonski tlak na celotni površini temeljne ploskve.
- Učinkovitost tesnjenja pregradnega profila zgolj s tesnilno zaveso ni največja. Vzgonske tlake zmanjšamo najučinkoviteje z izvedbo dodatne **drenaž**, ki segajo v temeljno podlago (drenažni vodnjaki po dolžini pregrade) in po celotni višini pregrade.

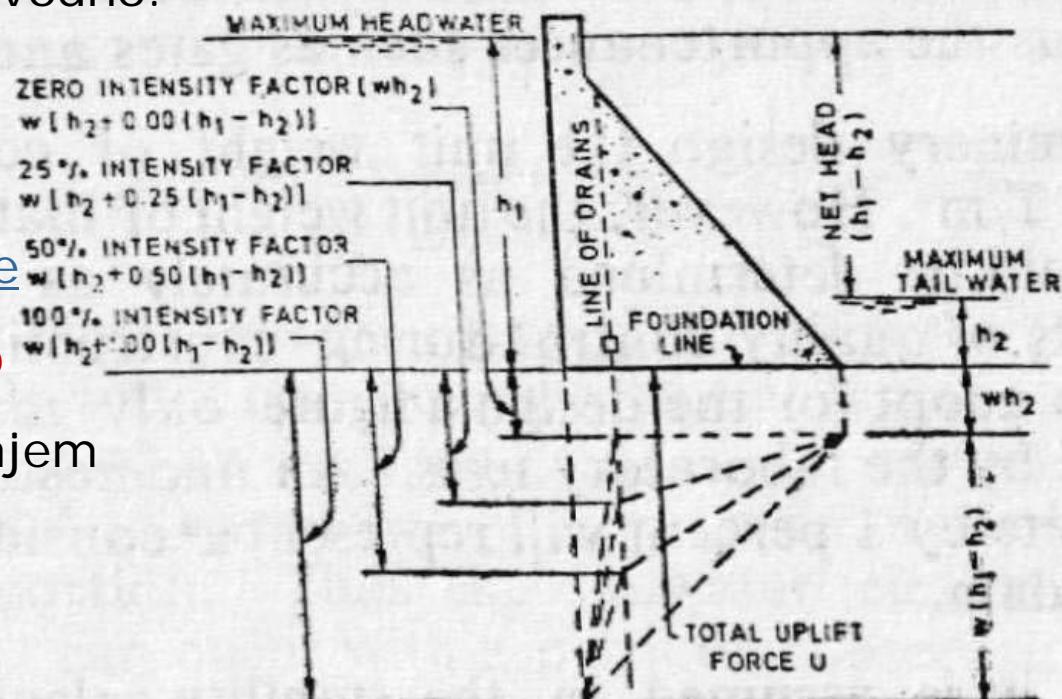
Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – vzgonski tlaki

- Porni tlaki v temeljnih tleh so odvisni od velikosti drenaž, globine izvedbe, poroznosti temeljne hribine, razpok, prelomov, in učinkovitosti tesnilne zavese.
- V preliminarni oceni upoštevamo, da so v liniji drenažne/tesnilne zavese vzgonski tlaki na temeljno ploskev zmanjšani za določen delež razlike hidrostaticih tlakov gor- in dolvodno:

■ USBR – $K = 0,33$

■ USCE – $K = 0,25 \sim 0,50$

■ V primeru izvedbe zgolj tesnilne zavese pa upoštevamo linearno porazdelitev tlakov z upoštevanjem višjih vrednosti $K = 0,6 \sim 0,85$



Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba– vzgonski tlaki

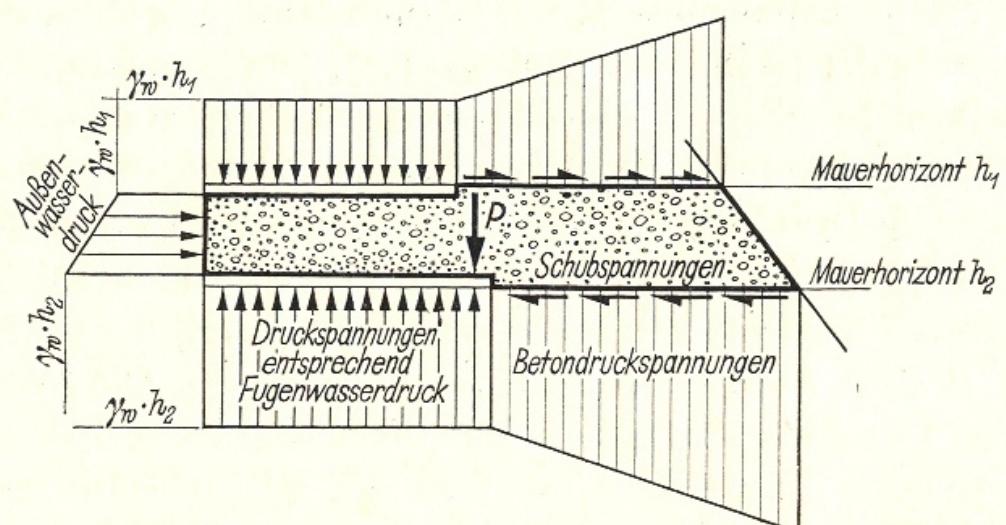
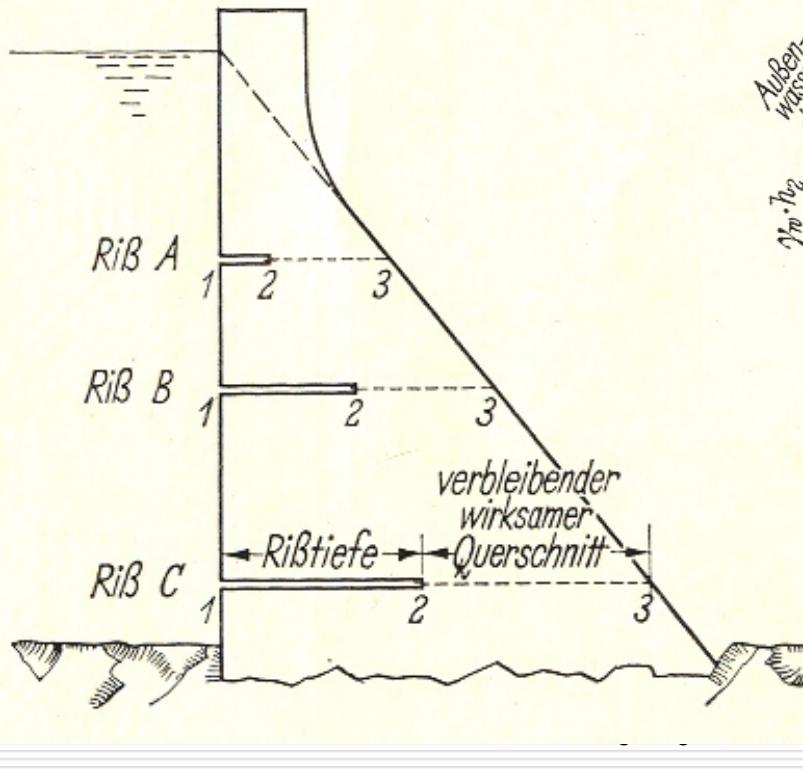
- Raziskave so pokazale, da zgolj enoredna tesnilna zavesa, kar je običajna praksa pri izvedbi ni dovolj učinkovita in je potrebno izvesti še dodatno drenažno zaveso ali pa več redno tesnilno zaveso.
- Vzrok je v tem, da pri enoredni zavesi ni mogoče zatesniti drobnih razpok dokler niso zapolnjene širše razpoke in to, da je zavesa sorazmerno tanka in že manjše odprtine omogočajo precejanje vode skozi zaveso.
- Linearna porazdelitev vzgonskih tlakov z upoštevanjem višje vrednosti koeficiente K je s stališča varnosti boljša, ker se sčasoma učinkovitost drenaž zmanjša in vzgonski tlaki povečajo.

Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – vzgonski tlaki v telesu pregrade

- Vzgonski tlaki se pojavljajo tudi v telesu pregrade, kot posledica slabo izvedenih **konstrukcijskih stikov, razpokanosti betona, neučinkovitosti drenažne zavese ipd.**
- Pri postopni gradnji pregrade so med posameznimi bloki masivnega betona konstrukcijski stiki, ki se štejejo, da so bolj propustni kot masivni beton. V telesu pregrade (masivni beton, stiki) se lahko formira teoretična razpoka, katere dolžina je praviloma omejena, lahko pa se pojavi teoretična razpoka (konstrukcijski stiki), ki se razteza vzdolž celotne debeline pregrade.

Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – vzgonski tlaki v telesu pregrade

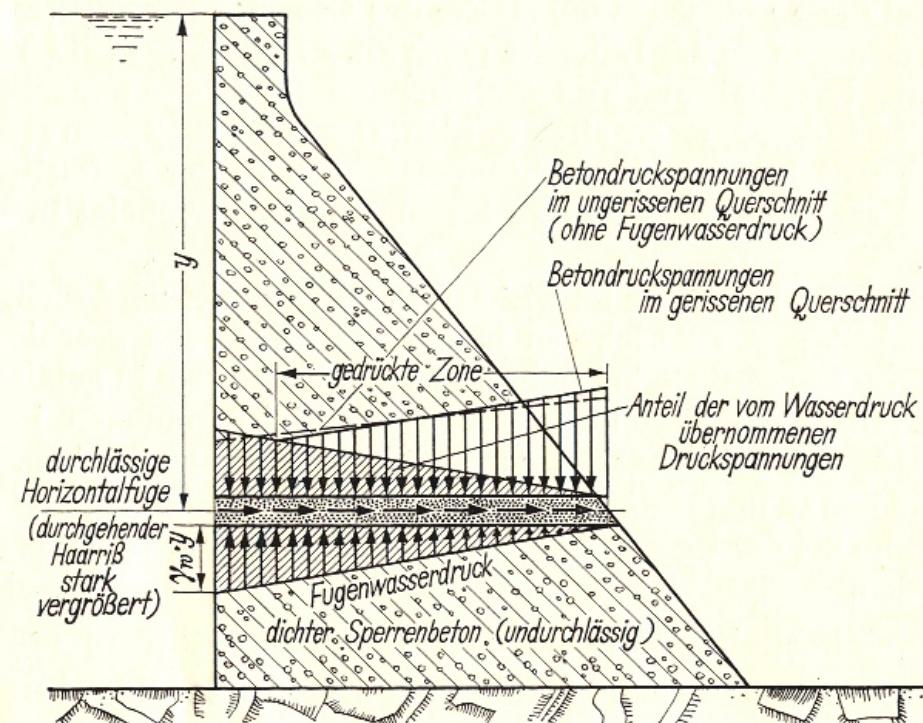
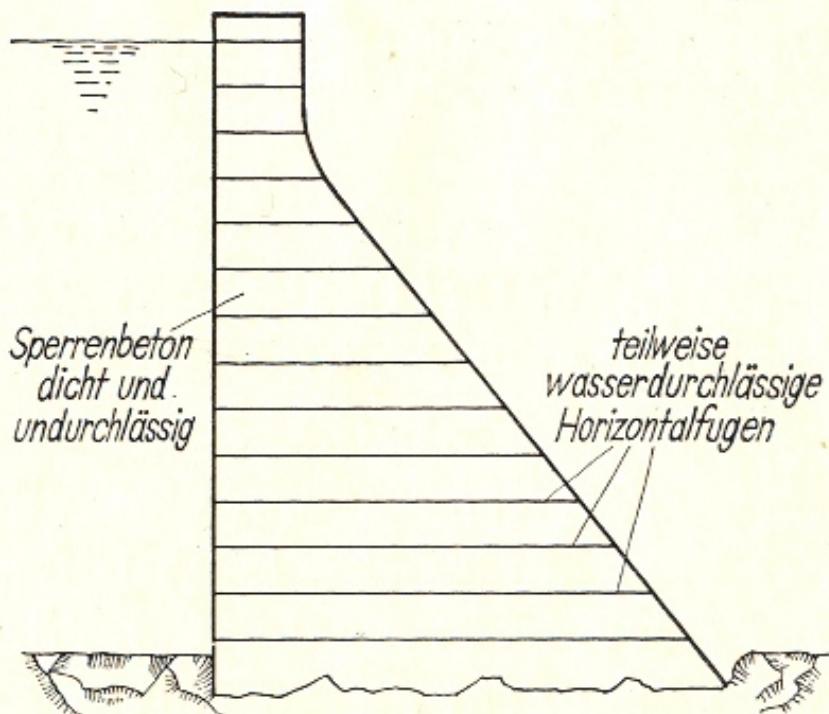
- Razpoka, ki se formira v **delu prereza pregrade** (primer razpoke v masivnem betonu) v masivnem betonu, ki se smatra kot vodo neproposten in v kateri je porni tlak po vsej dolžini enak zunanjem hidrostatičnem tlaku.



- hidrostatičen tlak v razpoki z gornje strani zmanjšuje vpliv hidrostatičnega tlaka v spodnji razpoki – najbolj neugoden primer je, ko nad opazovano razpoko ni več razpok

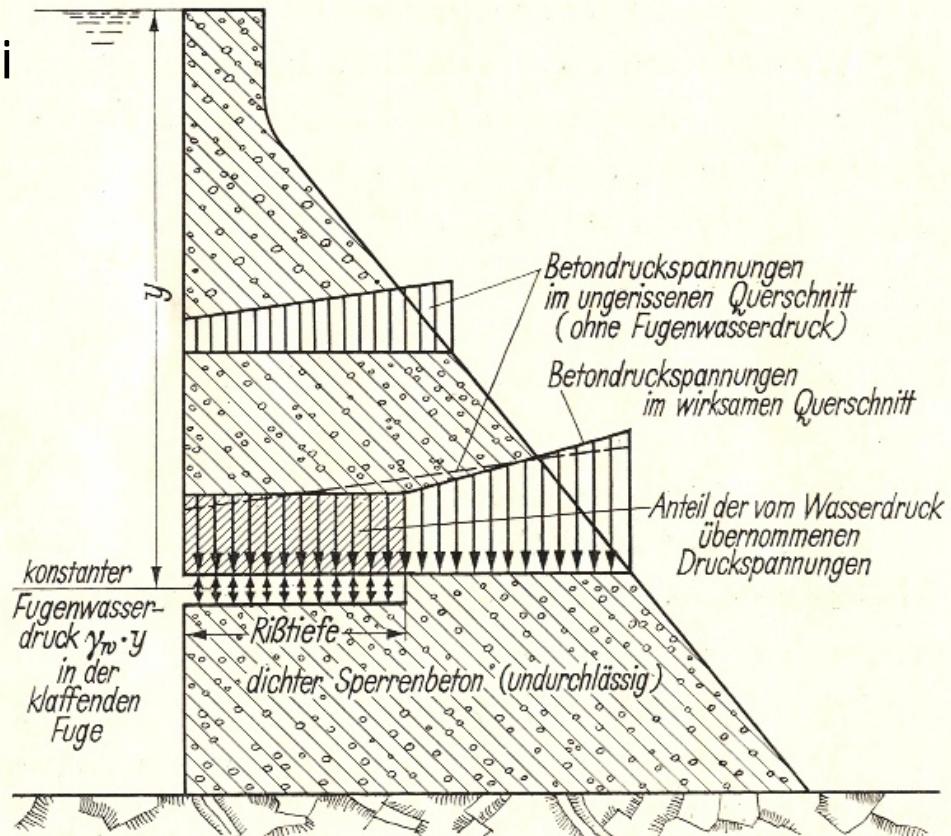
Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – vzgonski tlaki v telesu pregrade

- Razpoka, ki se razteza čez celotni presek pregrade (primer delovnega stika): Privzamemo, da se voda preceja vzdolž razpoke in zaradi hidravličnih izgub je porazdelitev tlakov vzdolž razpoke linear, na vodni strani je enak hidrostatičnem tlaku v globini kjer se nahaja razpoka, na zračni strani pa je tlak enak 0.



Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – vzgonski tlaki v telesu pregrade

- najneugodnejši primer samostojne razpoke, da nad prerezem ni nobene odprte razpoke več
- upoštevamo, da se vzdolž celotne odprte razpoke pojavi hidrostatičen tlak, ki je enak zunanjemu tlaku
- v odprtem delu prereza poni tlaki prevzamejo normalne napetosti zaradi obtežb, ki delujejo na gornjem delu pregrade
- z izključitvijo razpokanega prereza se robne normalne napetosti v betonskem prerezu povečajo



Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – porni tlaki

- **Porni tlaki** so posledica precejanja vode skozi telo pregrade
- Beton na splošno obravnavamo kot homogen malo proposten material. Tesnjenje telesa pregrade je odvisno od kakovosti izvedbe, predvsem od uporabljenega materiala in kakovosti izvedbe vodnega lica pregrade.
- Porazdelitev tlakov v telesu pregrade privzamemo, da je linearen – na vodni strani je polni hidrostaticni tlak, ki pada proti dolvodni strani, kjer je nič.
- Z drenažnim sistemom na gorvodni strani zmanjšamo vpliv notranjih tlakov na enak način, kakor v temeljni podlagi.
- Precejanje vode skozi telo pregrade učinkovito zmanjšamo z izvedbo gorvodnega lica pregrade z vodotesnim betonom ali pa z geomembrano.

Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – porni tlaki

- V kolikor upoštevamo, da je beton porozen, deluje na gorvodno lice le del hidrostatičnega tlaka p_w :

$$p_w = (1 - n_w) \cdot \gamma_w \cdot H$$

- preostanek tlaka p_b pa se prenese v notranjost pregrade:

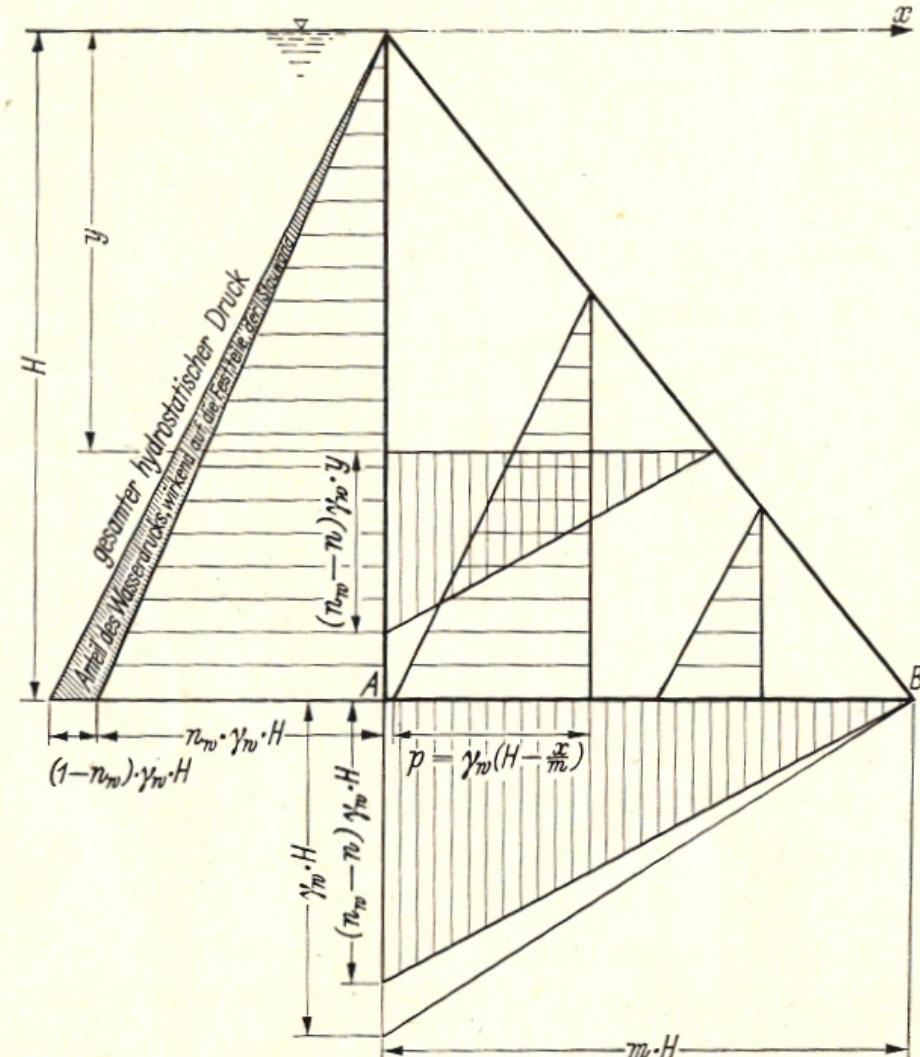
$$p_b = n_w \cdot \gamma_w \cdot H$$

- n_w ... delajoča površinska poroznost (0 – neproposten beton, 1 – popolno prepusten beton – privzeto $n_w=0,91$)

- z upoštevanjem dejanske poroznosti betona n znaša delajoči tlak na vodni strani:

$$p_{b_{dej}} = (n_w - n) \cdot \gamma_w \cdot H$$

- vrednost vzugonskega koeficienta (n_w-n) znaša ~0,85



Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlaki - tesnitev gorvodnega lica



- masivna pregrada iz kiklopskega betona z zidano oblogo iz betonskih blokov Gnioure v Franciji (1950) – višina 72m
- pregrada je na gorvodni strani tesnjena z geomembrano (dvoslojna – tesnilni in drenažni sloj)

Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlak – injektiranje

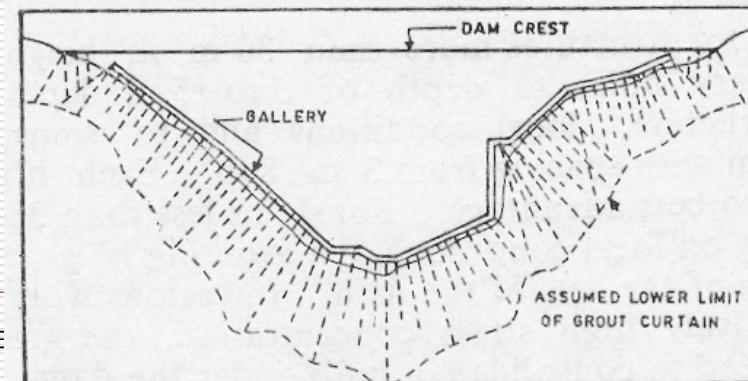
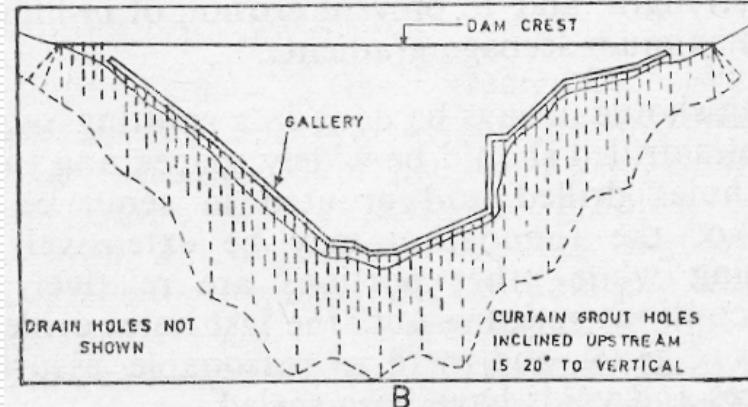
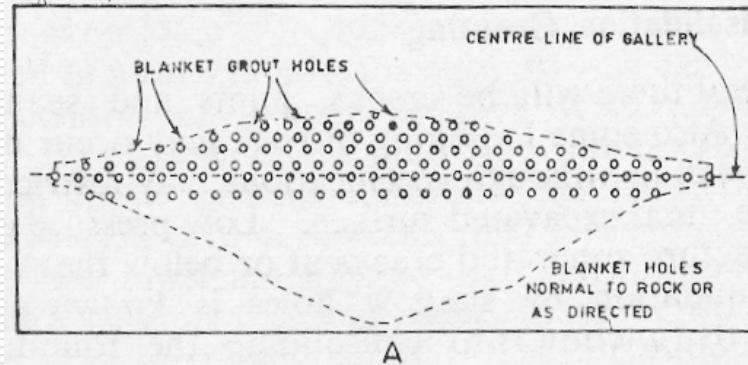
- Namen **injektiranja** je izboljšati trdnostne karakteristike temeljne hribine in z zapolnitvijo por v hribini z **injekcijsko maso** preprečiti precejanje vode pod temelji pregrade.
- Injektiranje se lahko izvaja: (1) neposredno s površine, ob izkopu temeljev; (2) z gorvodne strani pregrade; (3) iz galerij v pregradi; (4) skozi telo pregrade.
- Poznamo naslednje načine injektiranja v pregradnem profilu:
 - **plitvo injektiranje** - konsolidacijsko injektiranje, kontaktno injektiranje pod temelji (**B** – vrtine)
 - **globoko injektiranje** – izvedba injekcijske zavese (**A** – vrtine)
 - posebno injektiranje za primer izboljšanja trdnosti podlage (**C** – vrtine)

Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlaki – injektiranje

- **Injekcijska masa** je zmes cementa in vode v razmerju **1:1÷5** tudi do 10, če gre za uporabo v malo propustnih hribinah. Običajno se na začetku injicira malo redkejša suspenzija in se postopoma razmerje zmanjšuje, dokler ni dosežena zatesnjenost.
- Cementni suspenziji dodajamo **bentonit** v velikosti **2 do 5%** utežnega dela cementa. Bentonit preprečuje segregacijo cementa v suspenziji in ohranja homogeno zmes tekom celotnega časa vgradnje. Dodatkov za povečanje obdelavnosti (plastifikatorji) ne smemo dodajati, ker povečujejo segregacijo cementnih zrn.
- Da je omogočena penetracija suspenzije v drobne razpoke (mejna vrednost je 0,25mm) je priporočena uporaba cementa ustrezne finosti in z minimalno vsebnostjo zrn (0,5%), ki so večja od 0,06mm.

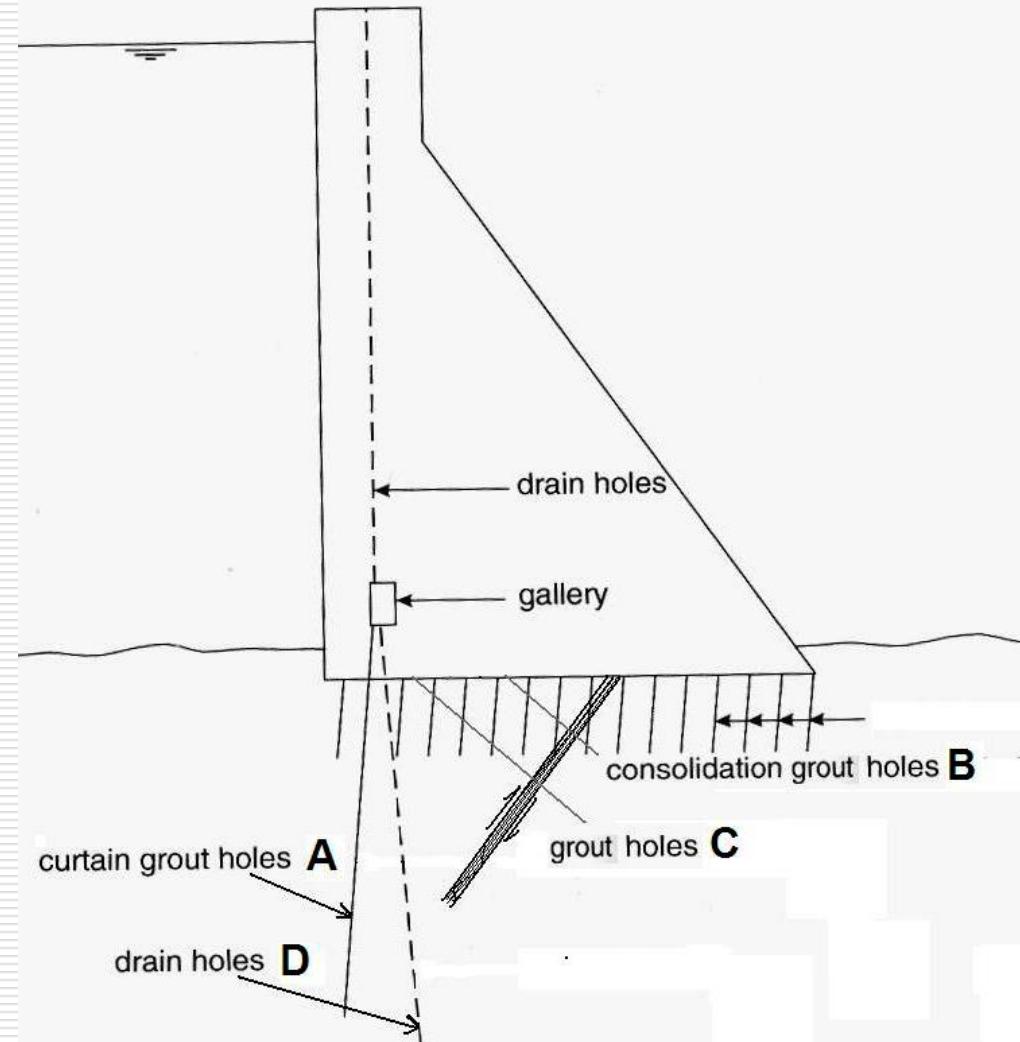
Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlaki – injektiranje

- izvedba preproge konsolidacijskih vrtin pod temelji pregrade
- izvedba injekcijske tesnilne zavese pod pregrado iz spodnje galerije z vertikalno usmerjenimi vrtinami
- pahljačasta izvedba tesnilne zavese pod pregrado iz galerije z namenom zatesnitve prelomnih con – učinkovitost zavese z globino je slabša



Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlaki –vrtine za injektiranje

- globoke vrtine –
injekcijska zavesa **A**
- plitve vrtine –
konsolidacijske vrtine
(kontaktno injektiranje) **B**
- vrtine za zapolnitev
območja prelomov **C**
- drenažne vrtine **D**



Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlaki – konsolidacijsko injektiranje

- Namen **konsolidacijskega injektiranja** je zapolnitev razpok in prelomov v temeljni hribini z **nizko tlačnim injektiranjem** za doseg večje nosilnosti temeljne hribine. Razpokanost temeljne hribine je lahko naravnega izvora ali pa posledica izkopa temeljev (miniranje, kopanje,...).
- Vrtine se izvajajo sekvenčno: **primarne vrtine** se izvajajo na večjem razmaku in na to sledijo vmesne (**sekundarne**) vrtine po odsekih z zgoščevanjem razmaka glede na to, koliko injekcijske mase sprejme vrtina.
- Injektiranje se šteje za učinkovito, ko je sprejem injekcijske mase majhen, ko je zadosti verjetno, da so vse razpoke zapolnjene.

Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlaki – konsolidacijsko injektiranje

- Pri višjih pregradah (več od 30m) sežejo primarne vrtine običajno med 6 in 15 m in na razmaku med 3 do 8m – odvisno od velikosti pregrade, lastnosti temeljnih tal in orientaciji vrtine.
- Pri nižjih pregradah, pa so vrtine skoncentrirane pretežno na območju gorvodne pete pregrade. Vrtine ob peti pregrade preprečujejo tudi pronicanje injekcijske malte pri izvedbi tesnilne zavese.
- Konsolidacijske vrtine so običajno izvedene normalno na podlago, razen v primerih, ko želimo zatesniti prelomne cone, strižne cone ali območja večje razpoklinske poroznosti pod pregrado.
- Izvedba konsolidacijskih vrtin je praviloma iz površine – nivoja temeljev, razen v bokih pregrade, ko se lahko izvede tudi skozi telo pregrade.

Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlaki – injekcijska zavesa

- **Injekcijska zavesa** je namenjena preprečitvi obtekanja vode v temeljnih tleh pod pregrado. Praviloma se nahaja na gorvodni strani pregrade in sega do globine, ki je odvisna od hidro-geoloških karakteristik tal in hidravličnega tlaka. Injekcijska zavesa sega tudi v boke v liniji osi pregrade.
- Injekcijska zavesa se izvede, ko je pregrada že izgotovljena in so se temeljna tla že deloma konsolidirala, kar omogoča večje delovne tlake in zagotovitev maksimalne učinkovitosti injektiranja.
- Prvo se izvrta in injektira primarne vrtine na razmaku od 6 do 12m; sledijo **sekundarne vrtine** na polovični razdalji in nato po potrebi nadaljnje vrtine (terciarne, kvartarne,...) na polovici medsebojne razdalje – dokler vrtina še sprejema injekcijsko maso.

Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlaki – injekcijska zavesa

- **Propustnost** se z globino spreminja: običajno je največja na površini in se zmanjšuje z globino. Temu ustrezeno s povečuje tudi **delovni tlak** z globino in s tem širina zavese, obratno pa se hidrostatičen tlak na zaveso z globino manjša.
- Na površini mora biti zavesa najširša. Zaradi manjšega delovnega tlaka je vplivni radij injektiranja pod površino manjši in je treba vrtine zgostiti.
- Na dnu pa je vplivni radij zaradi večjega delovnega tlaka večji in so lahko vrtine na večjem razmaku – to pomeni, da izmenično izvajamo plitve in **globoke vrtine**, ki se prilagajo razmeram po globini.
- Običajna globina **injekcijske zavese** sega v temeljna tla za dobro hribinsko podlago od 20 do 40% višine zajezebe v akumulaciji, za slabo hribinsko podlago pa so vrtine globlje, okoli 70% višine zajezebe v akumulaciji.

Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlaki – propustnost hribine

- **Propustnost temeljne hribine**, merjena v **Lugeonih** [LU] je opredeljena kot pretok vode **Q** [l] v časovni enoti **t** [min], na odseku **l** [1 m] pri efektivnem tlaku **p** [1 MPa]:

$$1LU = \frac{Q}{t \cdot l \cdot p \cdot 10^{-6}}$$

Lugeon	velikost	stanje
< 1	nizka	ni razpokanosti
1 - 5	nizka-srednja	mala razpokanost
5 - 50	srednja-visoka	srednja razpokanost
> 50	visoka	velika razpokanost

- 1LU ustreza približno koeficientu prepustnosti $K = 10^{-5}$ cm/s

Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlaki – injektiranje

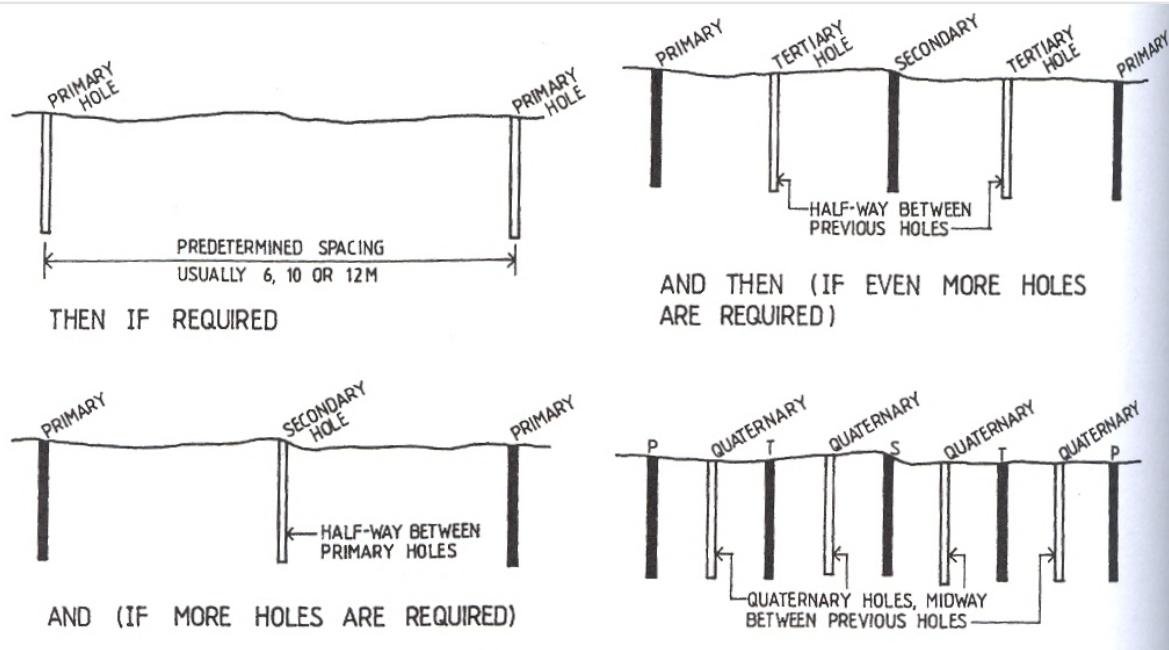
- Delovni tlak pri injektiraju mora biti dovolj visok, da masa penetrira v vse razpoke in dovolj nizek, da ne pride do hidravličnega loma v hribini. Delovni tlak je odvisen od tipa hribine α in globine injektiranja h :

$$P = \alpha \cdot h \quad [kPa]$$

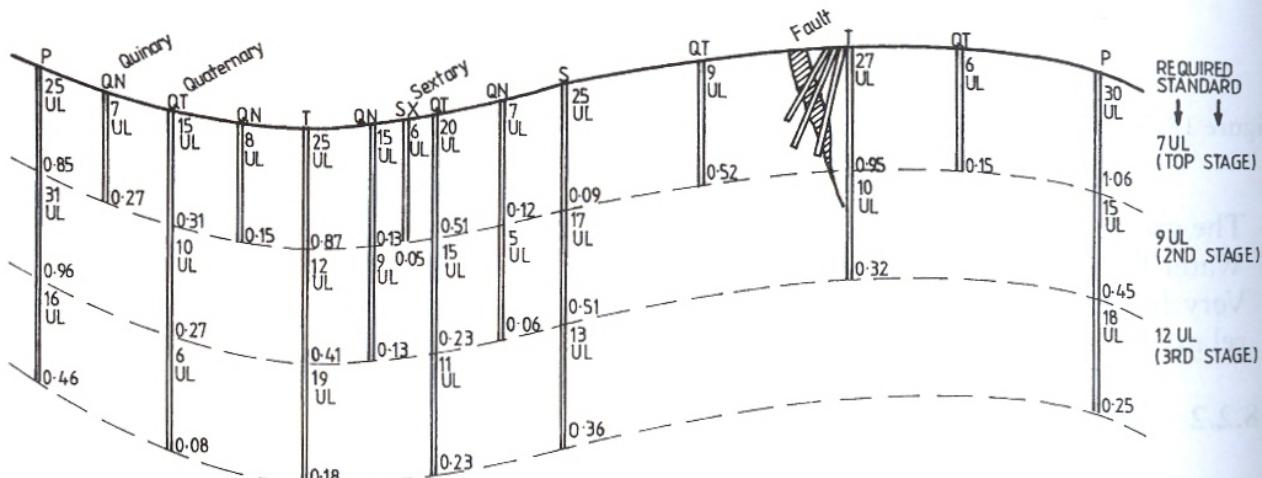
- α : ~70 trdna hribina; ~50 srednje trdna hribina; ~25 do 35 slaba hribina
- V praksi se uporablja delovni tlak od 100 kPa do 6.000 kPa, tudi do 10.000 kPa, odvisno od globine injektiranja, razpokanosti in trdnosti temeljne hribine.
- Injektiranje poteka najprej z nižjim tlakom in se z odporom prodiranja mase (po zapolnjevanju razpok) povečuje. Injektiranje se ustavi, ko je dosežena minimalna poraba mase pri predpisanim tlaku ali, ko je dosežena maksimalna poraba mase in ni mogoče doseči predpisanega tlaka.

Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlaki – injekcijska zavesa

- razpored vrtin
v enoredni
zavesi



- razpored
izvedbe vrtin v
več nivojih



Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlaki – injekcijska zavesa

- Če eno redna zavesa ne zadošča, je treba izvesti več linij vrtin, ki so postavljene dol ali gor-vodno od primarne linije zavese. Za vzpostavitev enakomernosti je smiselno, da se izvede neparno število linij.
- Najprej se injektirata zunanji liniji (primarne, sekundarne vrtine) in nato še notranja linija (terciarne vrtine). Na ta način je zagotovljeno, da injekcijska masa v centralni liniji ne prehaja izven zunanjih linij, kvečjemu zapoljuje razpoke, ker v centralnem delu injektiramo z večjim tlakom.

1. vrsta vrtin

P

S

P

S

P

2. vrsta vrtin

T

T

T

T

3. vrsta vrtin

P

S

P

S

P

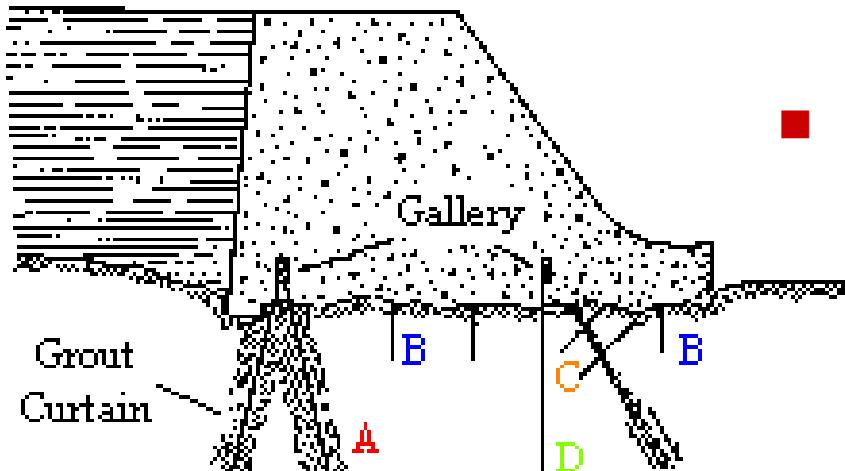
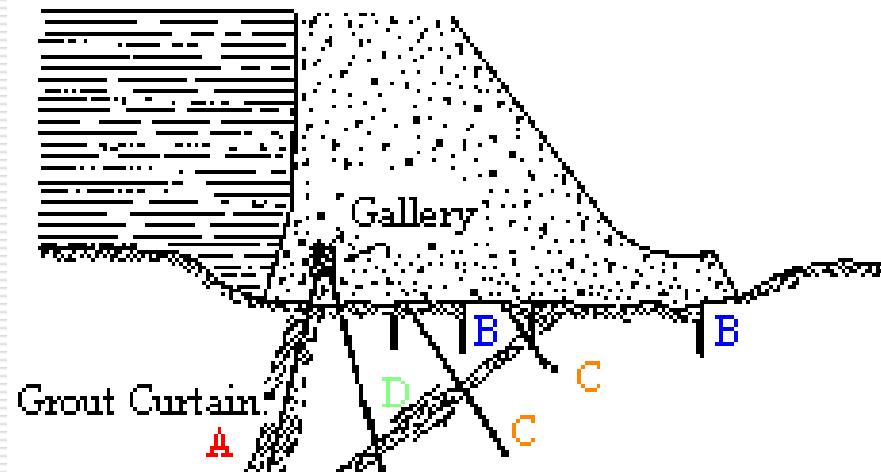
Betonske težnostne pregrade: vzgonski tlak – drenažne vrtine

■ **Drenažne vrtine** izvedemo na dolvodni strani tesnilne zavese z namenom, da prestrežemo eventualno precedno vodo zaradi netesnosti tesnilne zavese. Hkrati pa drenažne vrtine služijo za zmanjšanje vzgona na pregrado. Učinkovitost drenažnih vrtin je odvisna od:

- **položaja vrtin**, ki se nahajajo neposredno za tesnilno zaveso, 4~5m od gorvodnega lica pregrade (~5% višine zajezbe) z **razmikom** okoli 3m med vrtinami
- **globine vrtin**, ki segajo v globino za okoli 20÷40% višine zajezbe oziroma 35÷75% globine tesnilne zavese
- **premera vrtin**, ki znaša okoli 75mm

Betonske težnostne pregrade: vzgontski tlaki – konstrukcijski detajli

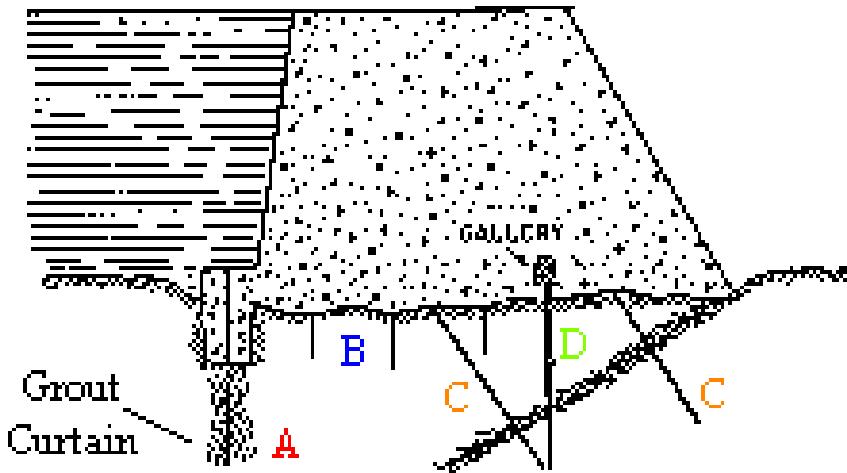
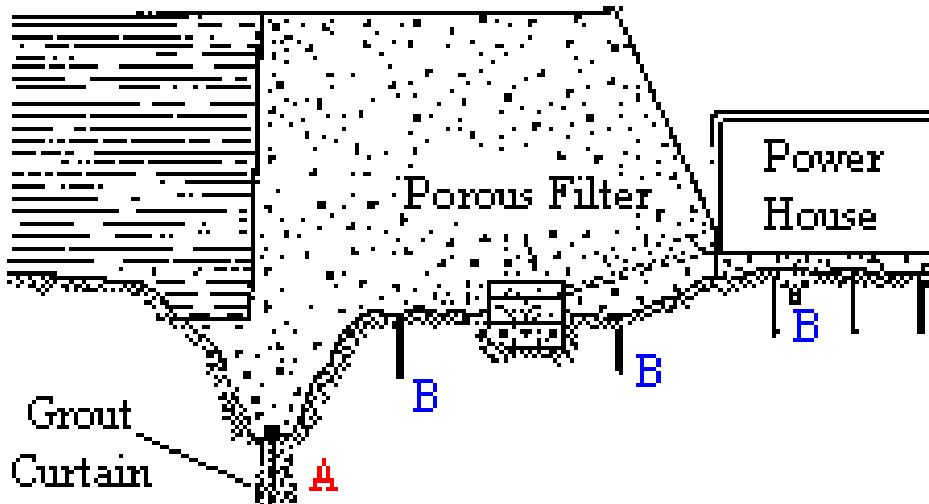
- Izvedba kombinacije tesnilne zavese **A**, drenažne zavese **D**, konsolidacijskih vrtin **B** pod temelji pregrade in poševnih vrtin **C** za tesnitev prelomne cone



- Izvedba dvoredne tesnilne zavese **A**, drenažne zavese **D** v propustni coni, konsolidacijskih vrtin **B** pod temelji pregrade in poševnih vrtin **C** za tesnitev preloma v propustni coni

Betonske težnostne pregrade: vzgontski tlaki – konstrukcijski detajli

- Izvedba tesnilne zavese **A**, konsolidacijskih vrtin **B** pod temelji pregrade, drenažne zavese **D** v propustni coni preloma in poševnih vrtin **C** za tesnitev preloma v propustni coni



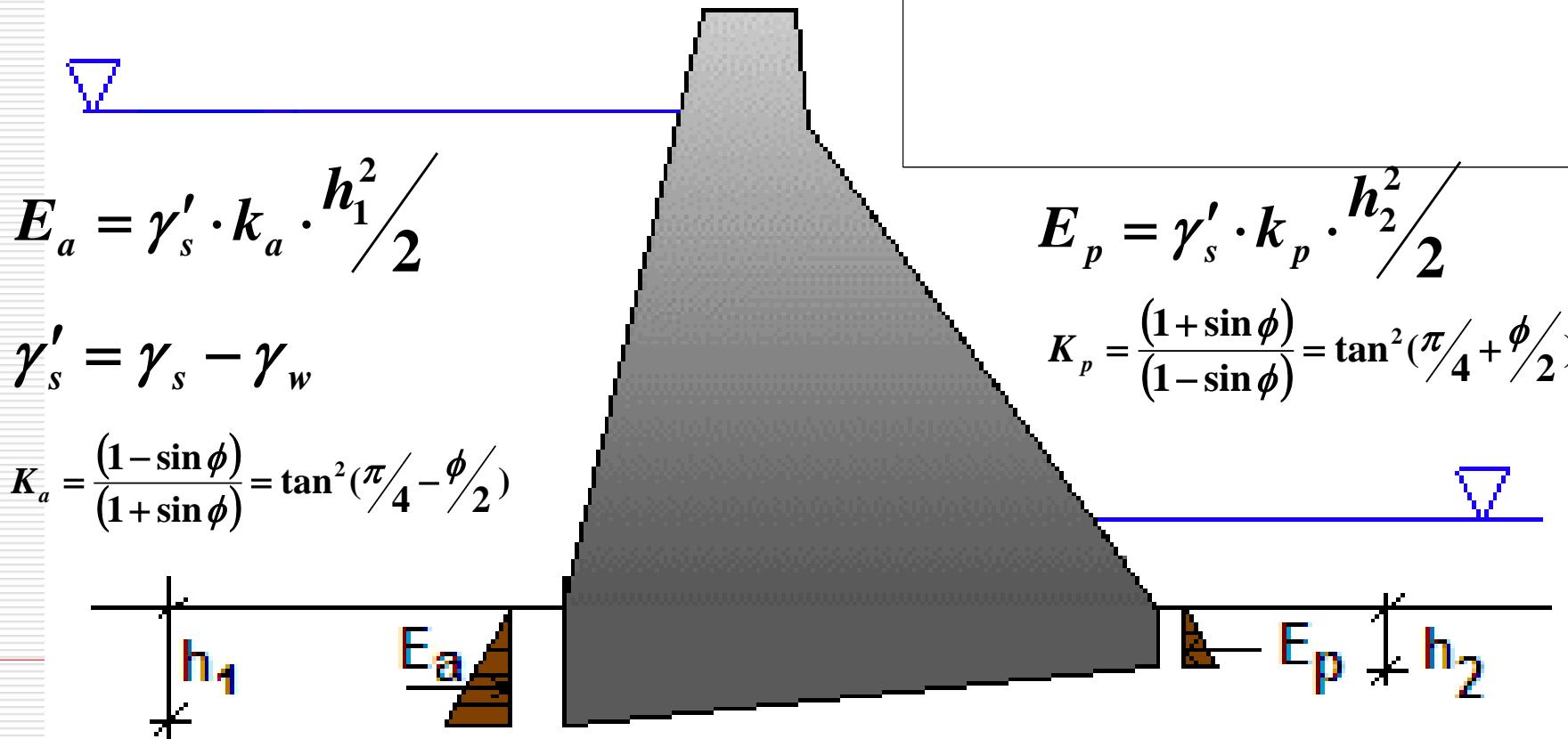
- Izvedba tesnilne zavese **A** in konsolidacijskih vrtin **B** pod temelji pregrade ter drenažne preproge za odvajanje pronicajoče vode pod pregrado

Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba– zemeljski pritisk

- Zemeljski pritisk na pregrado upoštevamo kot obtežbo z zasipom izkopov za temelje pri izvedbi pregrade na gorvodni strani (aktivni pritisk) in na dolvodni strani (pasivni pritisk)
- Zemeljski pritisk na gorvodni strani zaradi izkopa temeljev običajno zanemarimo, ker na globalno stabilnost nima značilnega vpliva. Upoštevamo ga lokalno, pri računu stabilnosti na bokih pregrade.
- Na dolvodni strani pa praviloma zemeljski pritisk (pasivni) zaradi varnosti ne upoštevamo.

Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – zemeljski pritisk

- Zemeljski pritisk na pregrado E_a upoštevamo kot obtežbo s polno zasičeno nekoherentno zemljino γ'_s po Rankinovem ravovesnim stanjem z upoštevanjem, da se materialna vrednost strižnega kota φ zaradi potopljenosti ni spremenila



Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – pritisk sedimentov

- Pritisk sedimentov na pregrado računamo na dva načina:
 - pritisk sedimentov na pregrado obravnavamo enako kot zemeljski pritisk v primerih, ko gladina v akumulaciji stalno niha in so plasti sedimentov tudi v suhem ali pa je zadrževalnik le občasno ojezeren (suhi zadrževalniki)
 - sedimenti se obnašajo kot fluid (pri stalno potopljenosti ali pri potresu) in pritisk sedimentov na pregrado upoštevamo kot povečanje specifične teže vode pri računu z obtežbo z vodo na pregrado
- Specifična teža vode in sedimentov pri horizontalni obtežbi znaša **13,6 kN/m³**, pri vertikalni obtežbi pa upoštevamo **19 kN/m³**

Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba–pritisk sedimentov

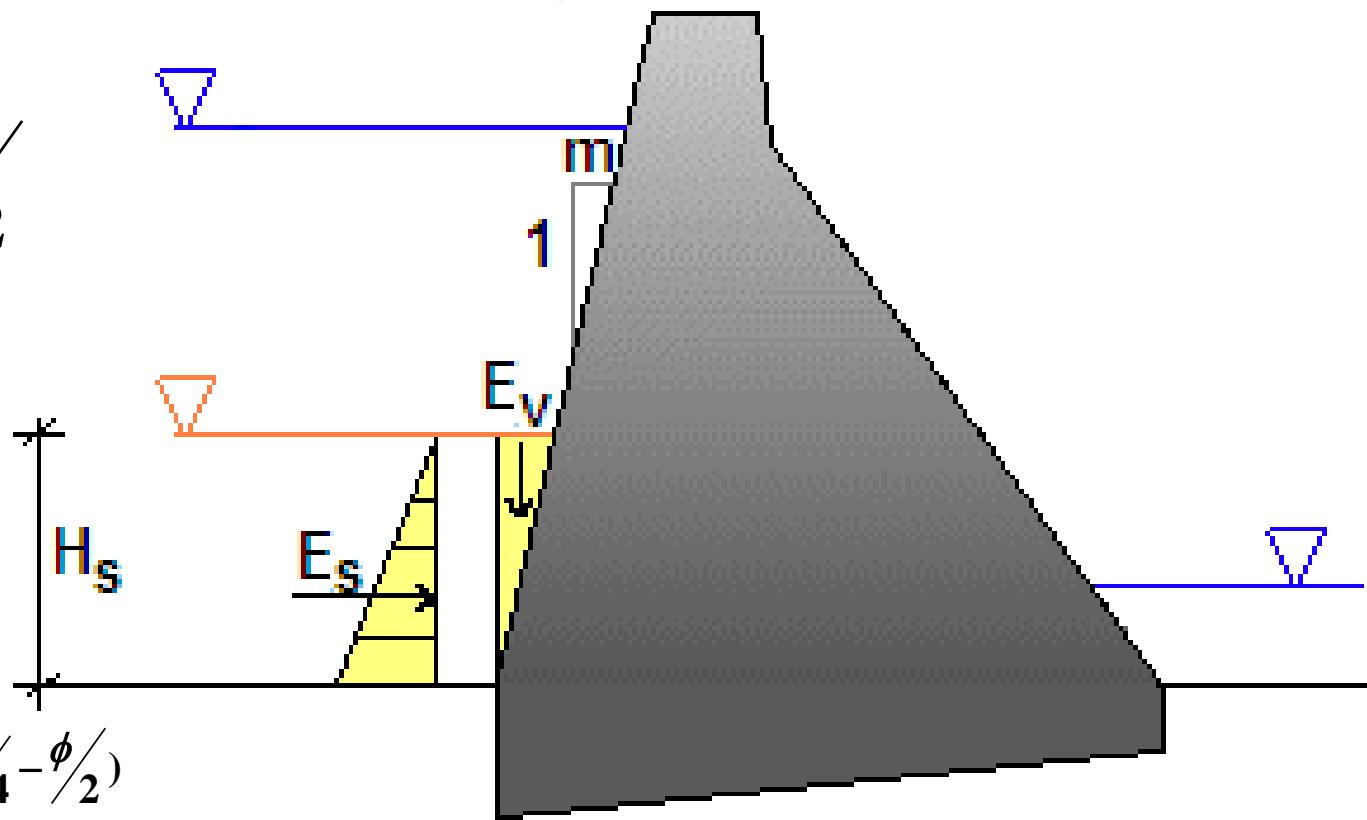
■ Pritisk sedimentov na pregrado v horizontalni smeri E_s in v vertikalni smeri E_v upoštevamo kot obtežbo s polno zasičeno, delno konsolidirano zemljino γ'_s po Rankinovem ravnovesnim stanjem ter z upoštevanjem, da se materialna vrednost strižnega kota ϕ zaradi potopljenosti ni spremenila

$$E_s = \gamma'_s \cdot k_a \cdot \frac{H_s^2}{2}$$

$$E_v = \gamma'_s \cdot \frac{m \cdot H_s^2}{2}$$

$$\gamma'_s = \gamma_s - \gamma_w$$

$$K_a = \frac{(1 - \sin \phi)}{(1 + \sin \phi)} = \tan^2(\pi/4 - \phi/2)$$



Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba–pritisk sedimentov

- Specifična teža sedimentov γ_s v akumulaciji se s časom spreminja glede na:
 - način obratovanja akumulacije
 - tekture in gradacije sedimentov
 - obseg kompaktacije oz. konsolidacije
- Največji vpliv na zgoščevanje ima obratovanje akumulacije: sedimenti, ki so večinoma ali vseskozi potopljeni imajo manjšo gostoto kot sedimenti, ki so zaradi nihanja gladine vode v zadrževalniku občasno izpostavljeni atmosferskim pojavom
- Specifična teža sedimentov v akumulaciji, glede na teksturo in gradacijo variira med **2,9** do **19** kN/m³ v suhem stanju

Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – pritisk sedimentov

- Specifična teža sedimentov v akumulaciji se s časom povečuje zaradi konsolidacije sedimentov, ki je posledica povečevanja debeline plasti zaradi usedanja materiala v zadrževalniku
- V času t se začetna specifična teža γ_1 poveča v odvisnosti od koeficiente k , ki je opredeljen z načinom obratovanja in tipa sedimenta ter načinom računa:
 - specifična teža prvega sloja sedimentov po t letih:

$$\gamma = \gamma_1 + k \cdot \log t$$

- povprečna specifična teža vseh slojev sedimentov s kontinuirnim usedanjem po t letih:

$$\gamma = \gamma_1 + 0,454 \cdot k \cdot \left(\frac{t}{t-1} \ln t - 1 \right)$$

Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – pritisk sedimentov

- specifična teža sedimentov z upoštevanjem konsolidacije 1 sloja po t letih:

konsolidacija enega sloja						
način obratovanja akumulacije	pesek		melj		glina	
	γ_1	k	γ_1	k	γ_1	k
sediment vedno potopljen	14,88	0	10,40	0,91	4,80	2,51
sediment v območju nihanja	14,88	0	11,84	0,43	7,36	1,71
sediment v območju občutnega nihanja	14,88	0	12,64	0,16	9,60	0,96
suhi zadrževalnik	14,88	0	13,12	0	12,48	0

- povprečna specifična teža sedimentov po t letih s kontinuirnim usedanjem:

konsolidacija vseh slojev z upoštevanjem kontinuirnega usedanja slojev						
način obratovanja akumulacije	pesek		melj		glina	
	γ_1	k	γ_1	k	γ_1	k
sediment vedno potopljen	14,08	0	10,72	0,91	2,08	2,56
sediment v območju nihanja	14,08	0	12,16	0,43	–	1,71
sediment v območju občutnega nihanja	14,08	0	12,96	0,09	–	0,96
suhi zadrževalnik	14,08	0	13,44	0	–	0

Betonske težnostne pregrade: stalna obtežba – pritisk sedimentov

- Pritisk sedimentov na pregrado: (1) v horizontalni smeri upoštevamo kot dodatno povečanje hidrostatičnega tlaka γ'_w , (2) v vertikalni smeri pa je teža vode povečana za težo nasičene zemljine ($\gamma_w + \gamma'_s$)

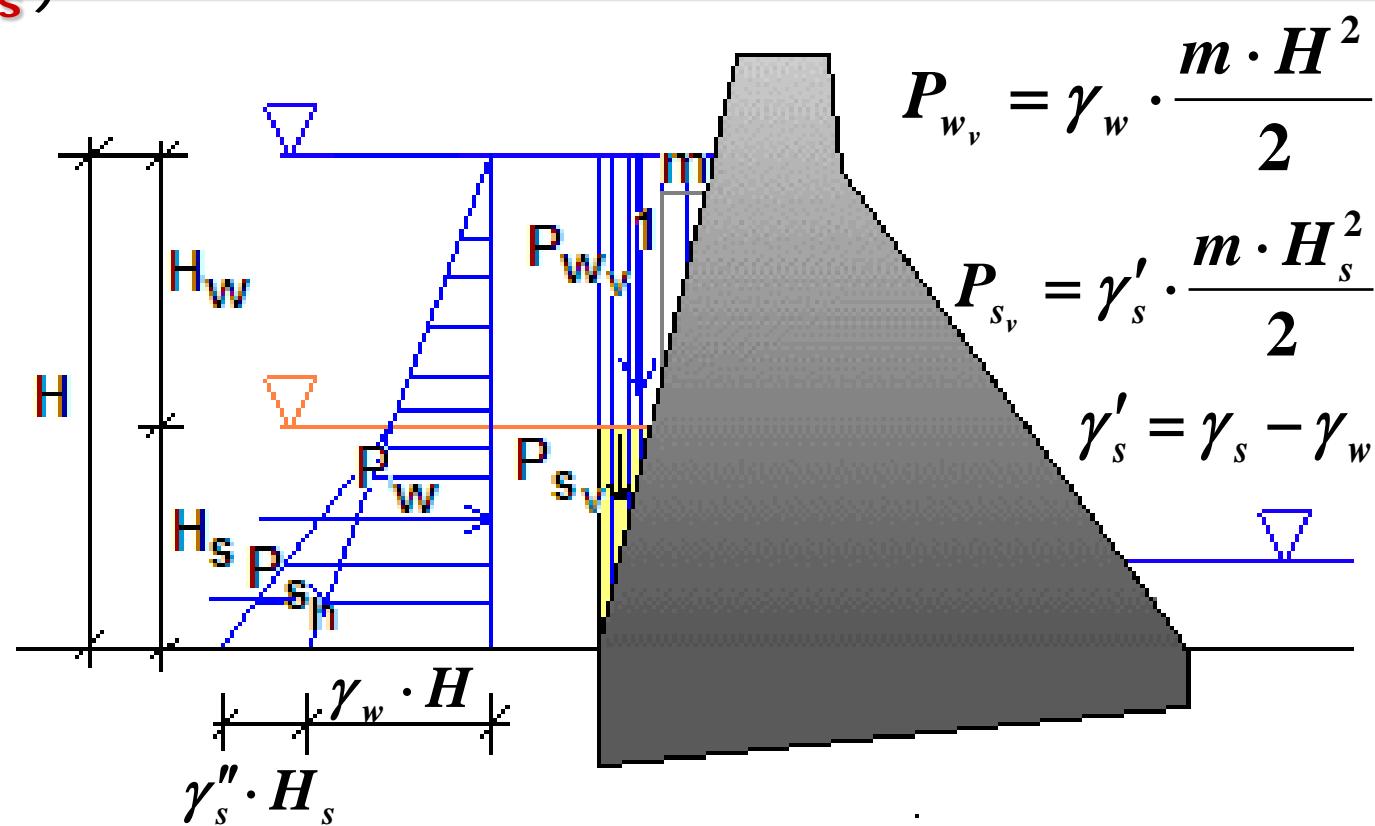
$$P_w = \gamma_w \frac{H^2}{2}$$

$$P_{s_h} = \gamma''_s \frac{m \cdot H_s^2}{2}$$

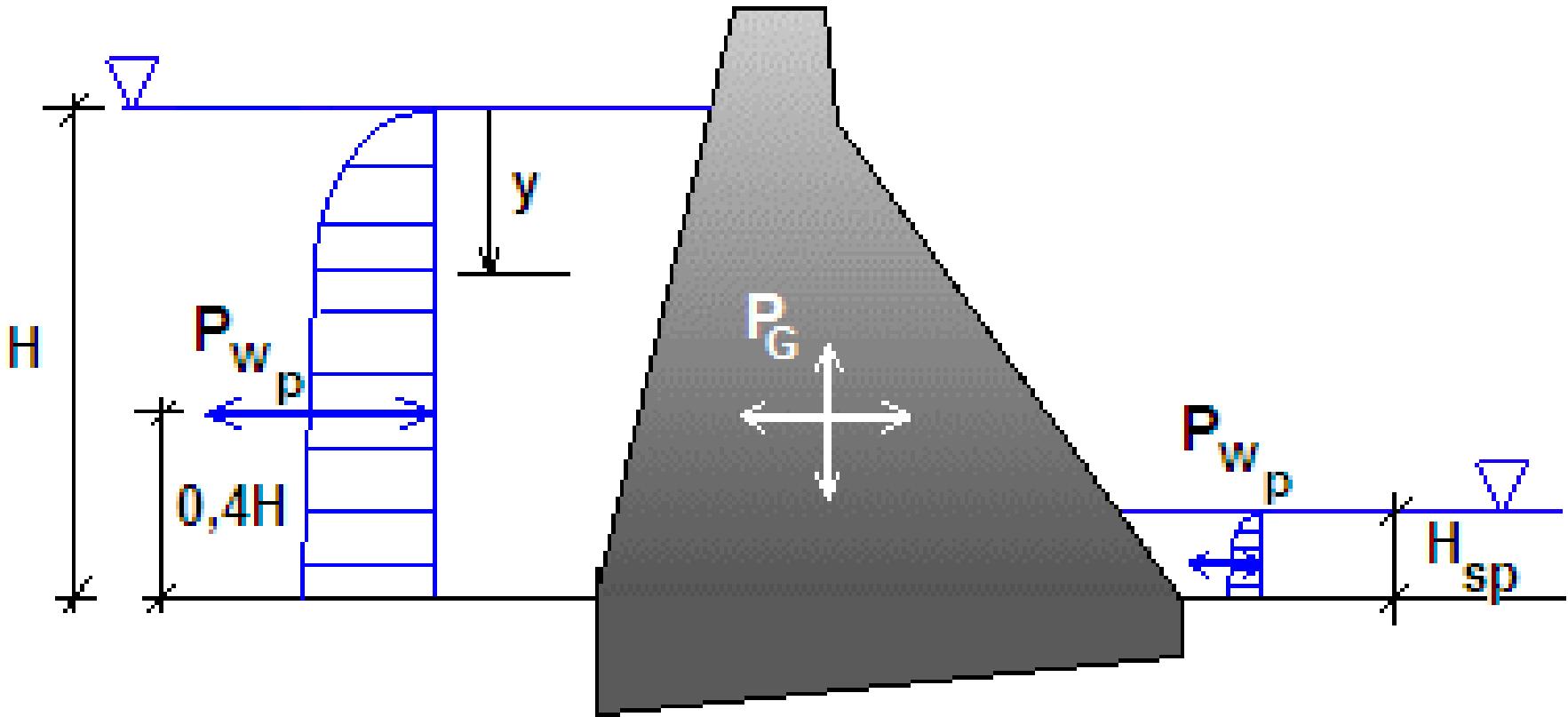
$$\gamma'_w = \gamma''_s + \gamma_w$$

$$\gamma''_s \sim 3,5 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma'_s \sim 9 \text{ kN/m}^3$$



Betonske težnostne pregrade: izjemna obtežba – potresne sile



Betonske težnostne pregrade: izjemna obtežba – potres statična metoda

■ **Psevdostatična metoda** računa delovanja potresnih sil na pregrado z upoštevanjem naslednjih predpostavk:

- pregrada je upoštevana kot **toga konstrukcija**
- porazdelitev potresnih pospeškov je po višini pregrade **uniformna** glede na velikost pospeška temeljnih tal
- potresne sile so obravnavane kot **statične sile**
- potresne sile so določene na osnovi pričakovanih horizontalnih in vertikalnih pospeškov na lokaciji, glede na geološke značilnosti, prelome in historične zapise o pojavu potresov
- v računu upoštevamo odziv pregrade na premik tal in hidrodinamični vpliv akumulirane vode

Betonske težnostne pregrade: izjemna obtežba – potresne sile

Potresne sile zaradi inercije telesa pregrade:

- potresne sile delujejo v smeri delovanja pospeška tal (v horizontalni in vertikalni smeri) na pregrado in so izražene kot produkt lastne teže **G** s **seizmičnim koeficientom α** , ki je konstanten po vsej višini pregrade in je odvisen od potresne cone v kateri se nahaja objekt:

$$P_G = \alpha \cdot G$$

- seizmični koeficient je opredeljen kot delež težnostnega pospeška na osnovi **projektnega pospeška tal**, ki je za Slovenijo določen na osnovi karte potresne nevarnosti s povratno dobo 475 let
- v vertikalni smeri upoštevamo 70% vrednosti seizmičnega koeficiente v horizontalni smeri
- pri določitvi pospeška tal ločimo naslednje potresne dogodke: (1) projektni potres, (2) obratovalni potres, (3) maksimalni potres

Betonske težnostne pregrade: izjemna obtežba – potresne sile

Potresne sile zaradi vpliva akumulirane vode:

- zaradi cikličnega delovanja potresnega pospeška pregrada niha in sistem na kontaktu gorvodnega lica z akumulacijo povzroča ciklično nihanje hidrodinamičnega tlaka (podtlak-nadtlak) v vodnem telesu
- vpliv akumulirane vode upoštevamo kot dodatno obtežbo hidrodinamičnega tlaka na pregrado
- hidrodinamični tlak računamo za kritični primer, ko sta smeri inercijskih sil in hidrodinamičnega tlaka na pregrado enaki in je odvisen od seizmičnega koeficiente α , specifične teže vode γ_w , globine akumulacije H in koeficiente C :

$$P_{w_p} = C \cdot \alpha \cdot \gamma_w \cdot H$$

- brez dimenzijski koeficient C podaja porazdelitev in velikost hidrodinamičnega tlaka po višini pregrade y in v odvisnosti od naklona gorvodnega lica pregrade

Betonske težnostne pregrade: potresni dogodki projektni potres

- **Projektni potres (DBE)** je potres, ki povzroči maksimalno gibanje tal za katero je pregrada projektirana in analizirana. Zahtevano je, da pregrada ohrani svojo funkcionalnost tudi po pojavu take obremenitve.
- V Sloveniji je projektni potres opredeljen z 10% verjetnostjo pojava v 50 letih, kar pomeni, da je povratna doba projektnega potresa **475let**.
- Glede na prakso v sosedstvini je pri nas prag postavljen relativno nizko. V Italiji je za velike pregrade privzet projektni potres z bistveno višjo povratno dobo (5000 in 10000 let)
- Na pregradi in pripadajočih objektih ter opremi po potresnem dogodku takega obsega lahko nastanejo poškodbe, vendar morajo še vedno ohranjati funkcionalnost, škoda na pregradi mora biti popravljiva.

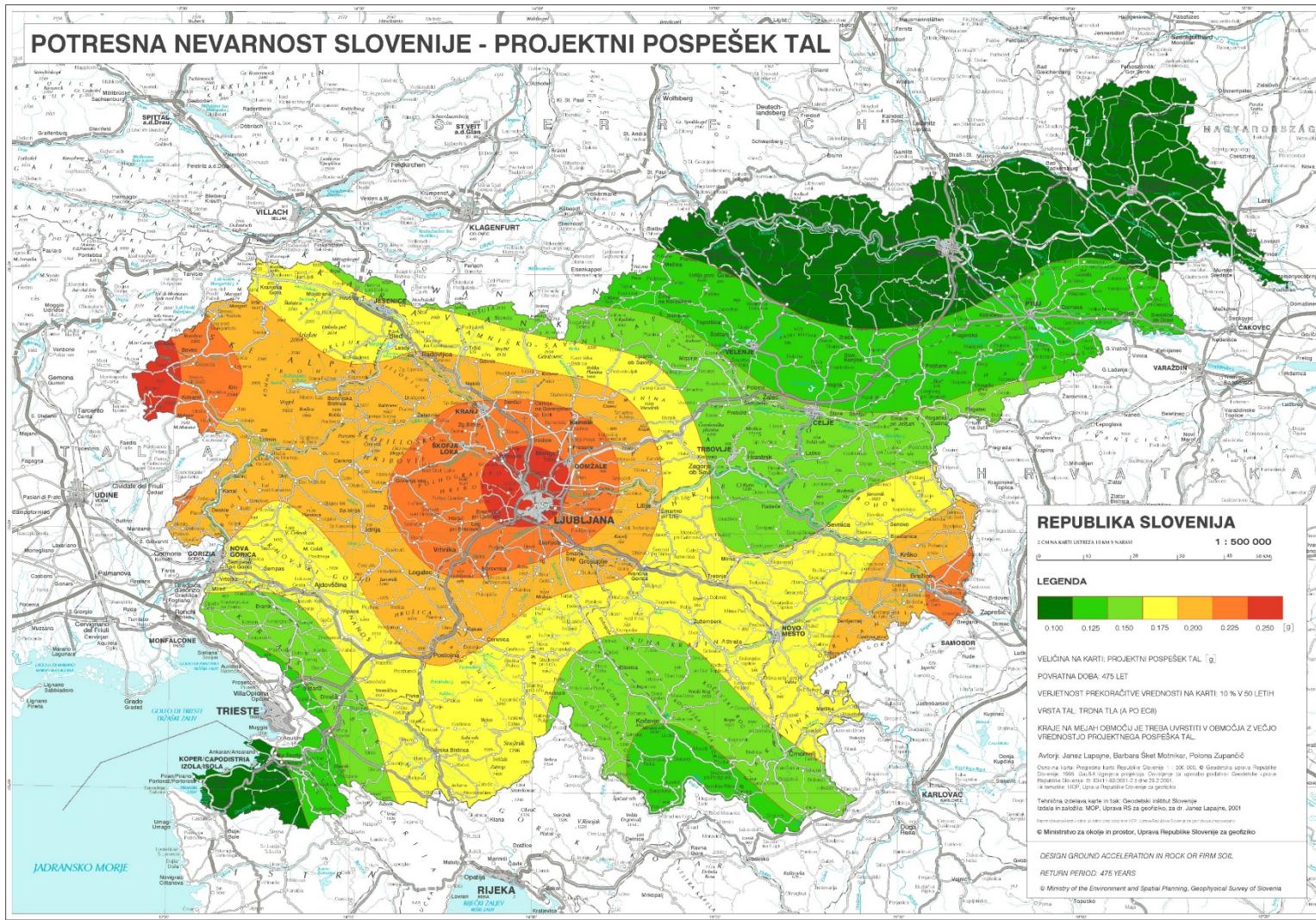
Betonske težnostne pregrade: potresni dogodki obratovalni potres

- **Obratovalni potres (OBE)** je potres, ki predstavlja maksimalni nivo gibanja tal na lokaciji pregrade, pri katerem je sprejemljiva le manjša škoda in obstaja velika gotovost, da se bo v življenjskem dobi pregrade zgodil.
- V Sloveniji za pregradne objekte lahko privzamemo za OBE potres s povratno dobo **100 let**, kar pomeni **60% vrednosti** projektnega pospeška.
- Pregrada in pripadajoči objekti ter oprema morajo po potresnem dogodku takega obsega ostati **polno funkcionalni** in škoda na pregradi pa lahko popravljiva.

Betonske težnostne pregrade: potresni dogodki - maksimalni potres

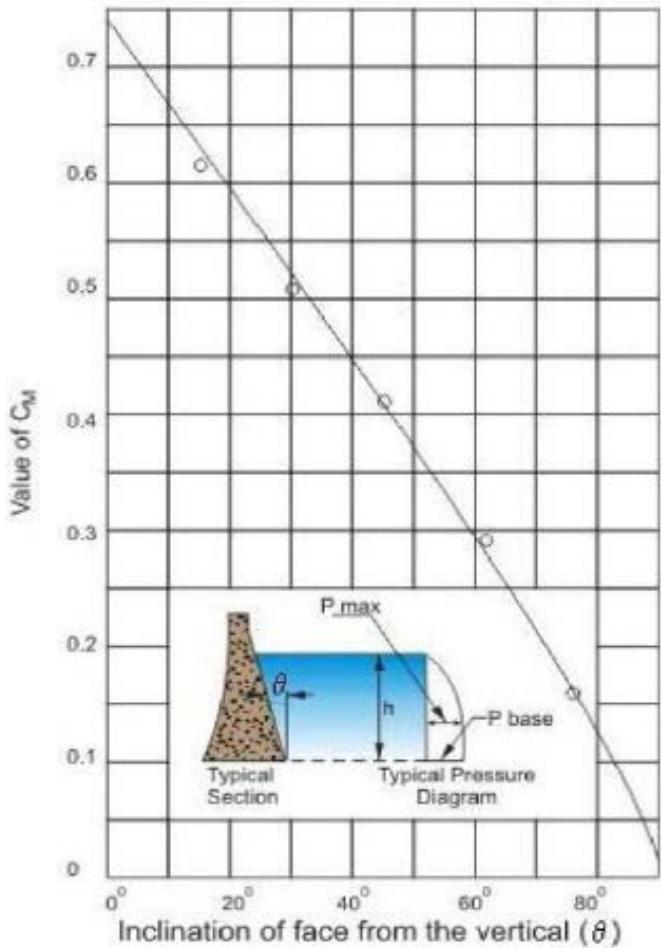
- **Maksimalni verjetni potres (MCE)** je najmočnejši potres, ki se lahko po pričakovanjih pojavi na lokaciji in je običajno definiran z zgornjo mejo pričakovane potresne intenzitete ali magnitude.
- V Sloveniji lahko za pregradne objekte privzamemo za MCE potres s povratno dobo **1000 let**, kar pomeni za **30%** povečanje vrednosti projektnega pospeška.
- Pri pojavu maksimalnega verjetnega potresa se na pregradi pojavijo poškodbe večjega obsega, vendar mora pregrada ohraniti konstrukcijsko stabilnost in se ne sme porušiti, škoda pa mora biti v večjem obsegu še vedno popravljiva.

Betonske težnostne pregrade: potres – projektni pospešek tall

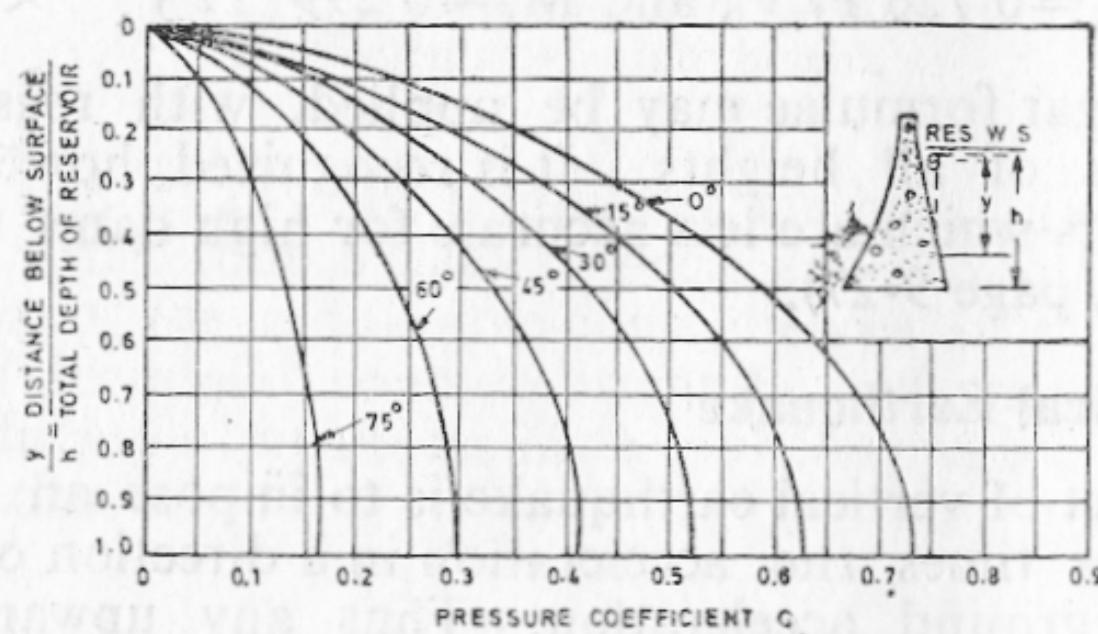


Univerza v Ljubljani – Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Betonske težnostne pregrade: potres – koeficient C



$$C = \frac{C_m}{2} \left[\frac{y}{H} \left(2 - \frac{y}{H} \right) + \sqrt{\frac{y}{H} \left(2 - \frac{y}{H} \right)} \right]$$



Betonske težnostne pregrade: izjemna obtežba – potres dinamična metoda

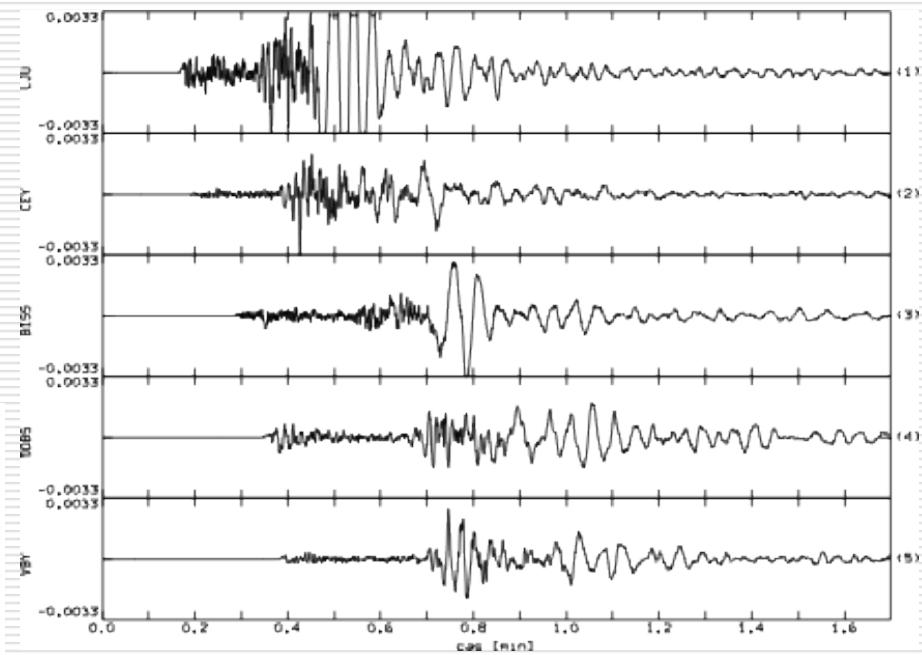
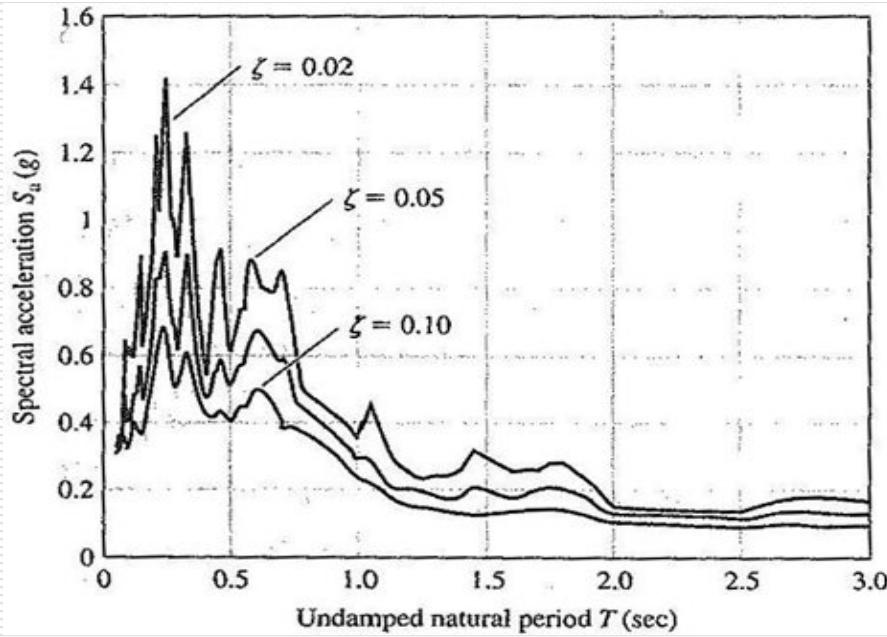
- **Dinamična metoda** upošteva, da je odziv pregrade pri pojavu potresa odvisen od pospeška temeljnih tal, lastne frekvence nihanja objekta, dušenja in interakcije voda-pregrada.
- Zaradi dinamičnega odziva pregrade porazdelitev koeficienta pospeška po višini ni linear na kot pri statični metodi, temveč se po višini spreminja. To pomeni, da se lahko na konstrukciji pojavijo natezne napetosti, kjer jih po statični analizi ne bi pričakovali.
- Poškodbe na pregradi Koyna (1967) kažejo, da dimenzioniranje po statični metodi povečuje dovzetnost za pojav poškodb.

Betonske težnostne pregrade: izjemna obtežba potres - pospešek temeljnih tal

- Pospeške temeljnih tal registriramo z akcelerometri, ki so običajno nameščeni v bližini temeljev pregrade. Rezultat je **akcelerogram**, zapis amplitude pospeškov temeljnih tal v odvisnosti od časa trajanja.
- Velikost maksimalnega pospeška, ki se običajno navaja ni vedno signifikantni faktor iz vidika odziva konstrukcije. Odziv je odvisen tako od amplitude kot tudi od trajanja potresnega sunka (hitrosti premika temeljnih tal).
- Za dimenzioniranje konstrukcij uporabljamо **spekter odziva**, ki predstavlja maksimalni odziv objekta (pospešek, hitrost, pomik) na premik temeljnih tal v odvisnosti od nihanja konstrukcije in dušenja.
- Za pomembnejše objekte je bolj priporočljivo, da se uporabi akcelerogram kot spekter odziva.

Betonske težnostne pregrade: izjemna obtežba potres - pospešek temeljnih tal

■ spekter odziva



■ akcelerogram
posoškega potresa

Betonske težnostne pregrade: izjemna obtežba – potres hidrodinamični vpliv

- Po statični analizi je hidrodinamični vpliv upoštevan kot povečanje hidrostatičnega tlaka na pregrado, pri čemer ni upoštevana fleksibilnost pregrade in interakcije delovanja voda-pregrada. Pri nižjih vrednostih seizmičnega koeficiente (okoli 0,1) je ta vpliv največji pri dnu (+10%) in se po višini zmanjšuje.
- V kolikor pa upoštevamo stisljivost vode, interakcijo voda-pregrada, ki izhaja iz deformiranega stanja pregrade pri vsiljenem nihanju pa je hidrodinamični učinek na pregrado bistveno večji.
- Na podlagi opazovanj je bilo ugotovljeno, da se normalne natezne napetosti v telesu pregrade povečajo tudi za 50%, v kolikor je v računu upoštevan dinamični odziv pregrade.

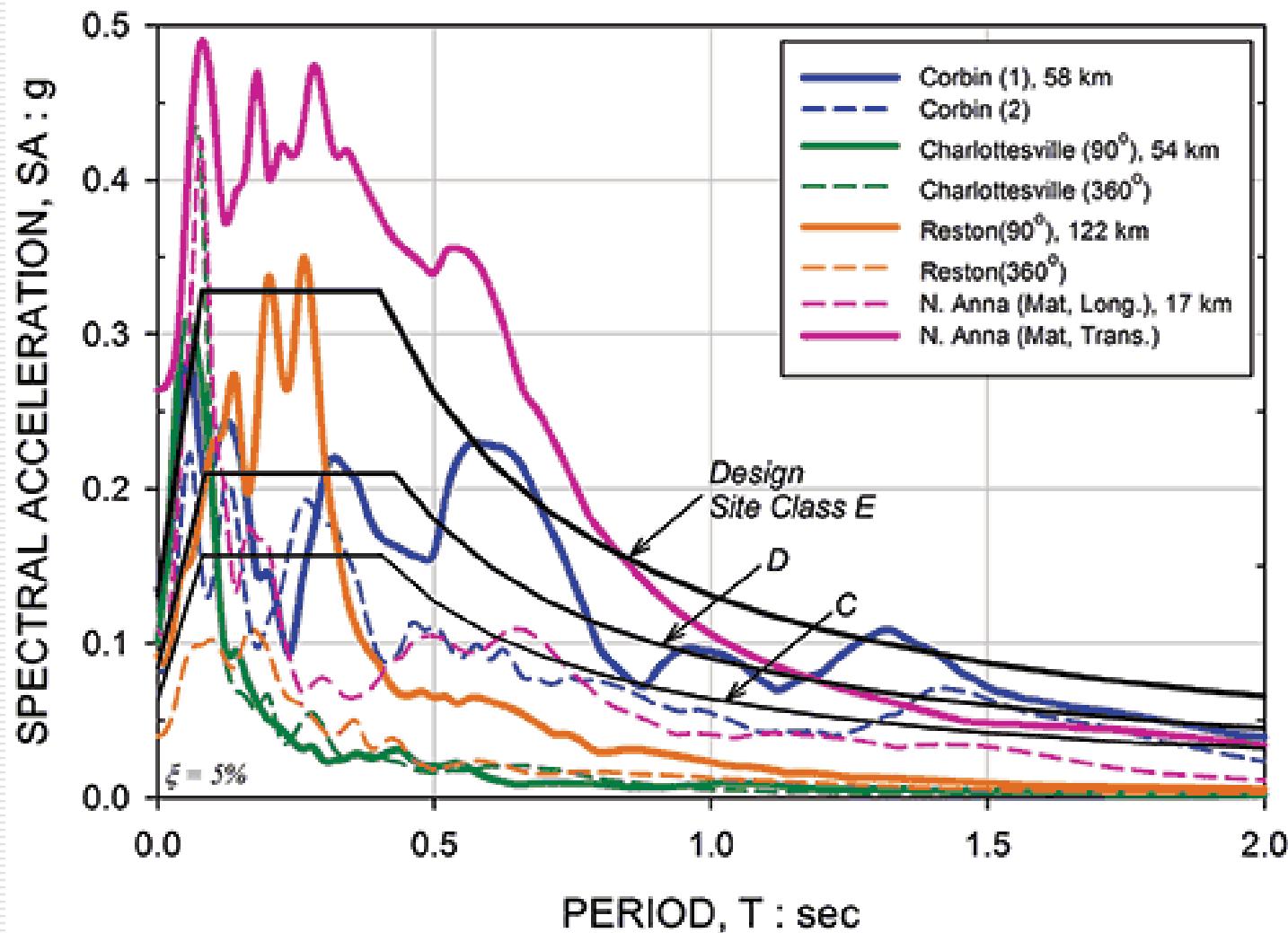
Betonske težnostne pregrade: izjemna obtežba – dinamični odziv pregrade

- Velikost potresnih sil je odvisna od odziva pregrade, ki je funkcija velikosti pospeška temeljnih tal, frekvence potresnega nihanja in lastnega nihajnega časa konstrukcije.
- Pri določitvi potresnih pospeškov je treba določiti lokacije od vseh pomembnejših **zgodovinskih potresov**, aktivnosti bližnjih **prelomov** in **geološko-geomehanske lastnosti** temeljnih tal na lokaciji.
- V naslednjem koraku je treba izvesti spekter odziva za izbrano lokacijo (site response spectrum - SRS).

Betonske težnostne pregrade: izjemna obtežba – dinamični odziv pregrade

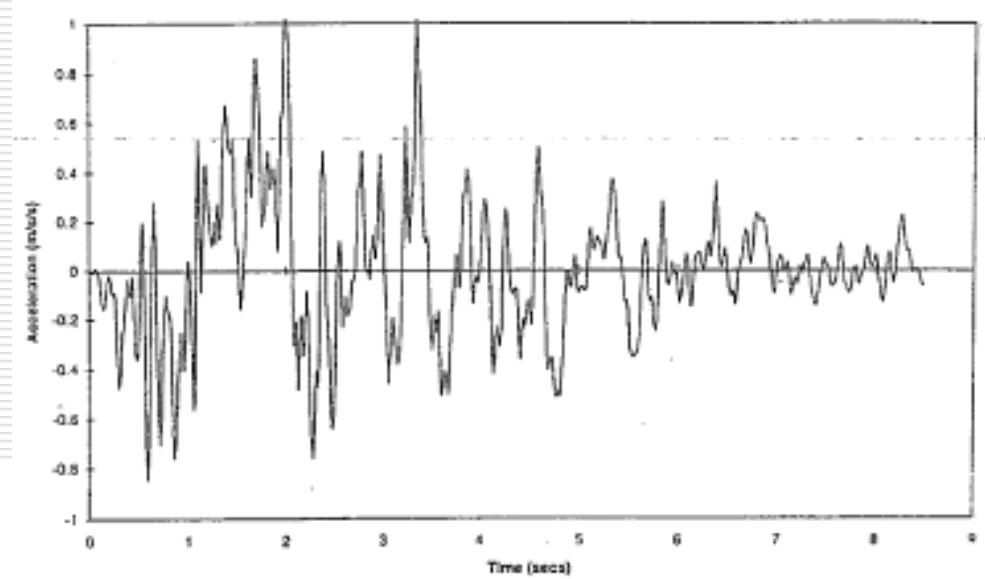
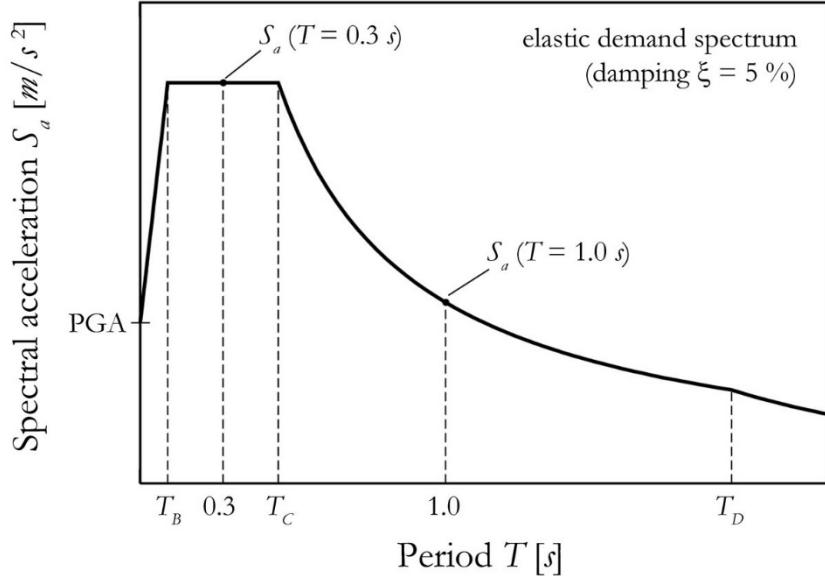
- Spektri odziva so različni, glede na oddaljenost epicentra in magnitudo. Ker je pomembna razlika v območju krajših nihajnih časov v katerem se nahaja tudi lastna frekvenca nihanja pregrade je treba izbrati pravilno kombinacijo spektrov odziva, ki najbolj reprezentirajo lokacijo pregrade.
- V realnosti je zapisov močnih potresov omejeno in je zato težko pridobiti akcelerograme z ustreznim spektralnimi značilnostmi za izbrano lokacijo. Zato se uporabljajo sintetizirani akcelerogrami, ki bazirajo na stohastičnih ali determinističnih metodah in odgovarjajo razmeram na lokaciji pregrade. Na osnovi akcelerograma se izdela projektni spekter odziva.

Betonske težnostne pregrade: izjemna obtežba – spekter odziva za lokacijo



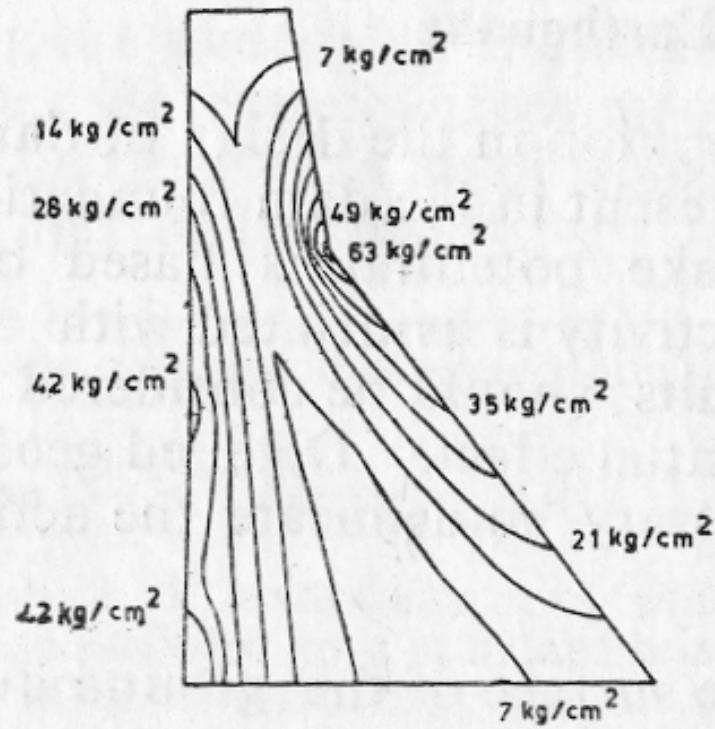
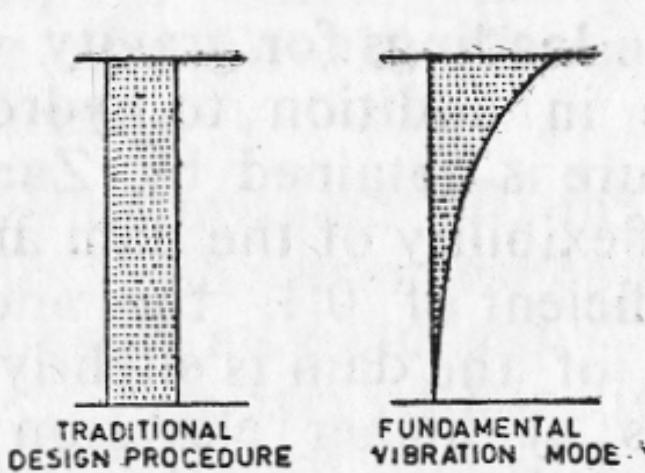
Betonske težnostne pregrade: izjemna obtežba – sintetiziran spekter odziva

■ elastični spekter pospeška



■ sintetiziran akcelerogram

Betonske težnostne pregrade: izjemna obtežba – potres dinamična metoda



- porazdelitev seizmičnega koeficiente po višini pregrade z upoštevanjem dinamičnega odziva pregrade (1. nihajna oblika)

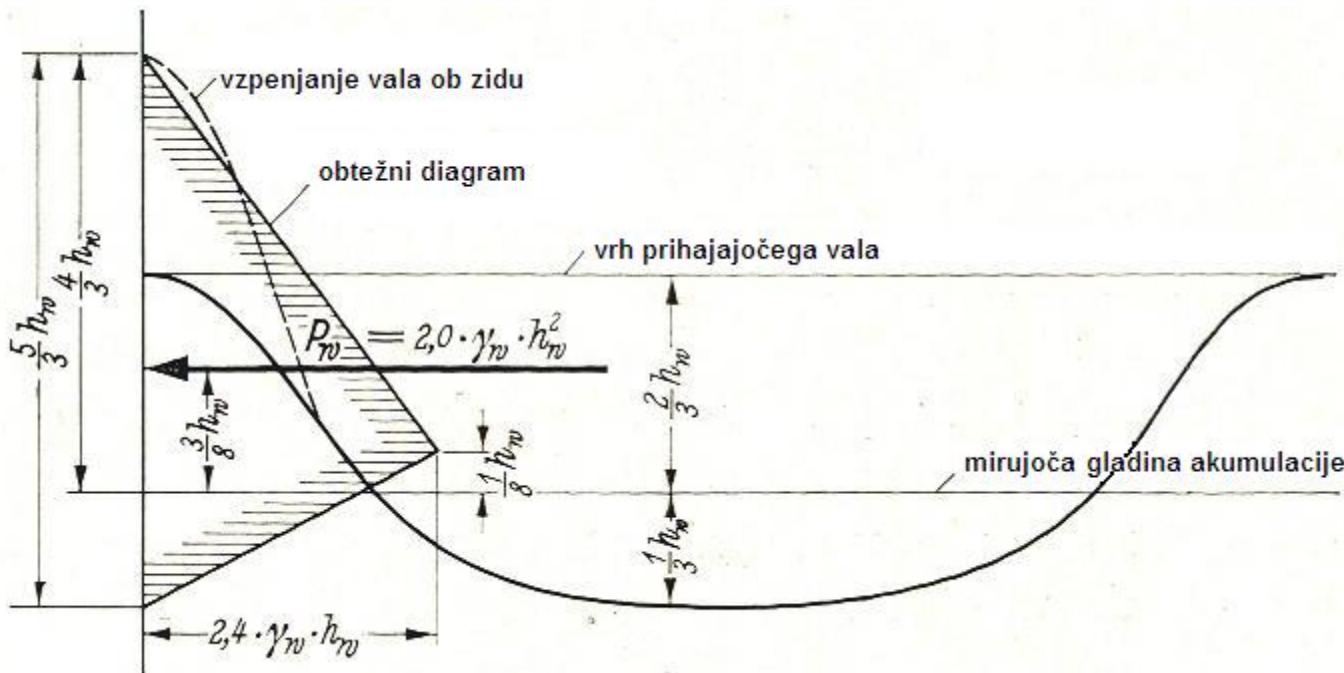
- prikaz ovojnice maksimalnih negativnih glavnih napetosti pri potresu na pregradi Koyna

Betonske težnostne pregrade: občasna obtežba – nadvišanje in obtežba z valovi

- Pri računu nadvišanja krone pregrade upoštevamo naslednje dejavnike:
 - **globina vode** pri evakuaciji visoke vode preko preliva ali zapornice – določimo jo iz pogoja, da evakuacijski objekt prevaja merodajno visoko vodo (praviloma Q_{100} oz. preveritev na Q_{1000})
 - **višina valov** zaradi vetra in dvig vala pri odboju od stene pregrade pri delovanju najmočnejšega vetra v najneugodnejši smeri
 - dvig vode v akumulaciji zaradi **plime**, povzročene z vetrom
 - dvig gladine zaradi oscilacij jezera – **seš**
- Priporočilo za varnostno nadvišanje krone je **1,5 kratnik** maksimalne višine vala glede na maksimalno gladino vode v akumulaciji – minimalno 1,5m

Betonske težnostne pregrade: občasna obtežba– obtežba z valovi

- Zaradi dinamike valovanja pri odboju valov od lica pregrade se pojavi še dodatna obtežba P_w' , ki pa ima na stabiliteto pregrade zanemarljiv vpliv, v primerjavi z obtežbo z vodo
- Maksimalni dvig pri odboju pa povzroči višji hidrostatični tlak, ki ga moramo upoštevati kot merodajno vrednost



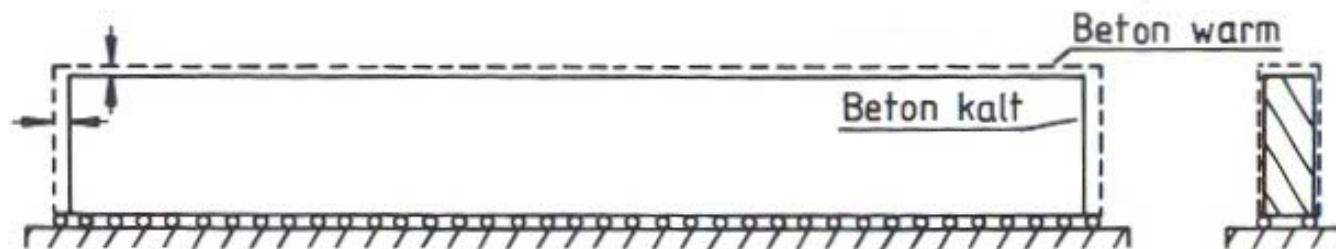
Betonske težnostne pregrade: občasna obtežba– pritisk ledu

- Nastanek ledu v akumulaciji je odvisen od lokalnih topografskih značilnosti in klimatskih razmer in se pojavlja le izjemoma, kjer ni nihanj gladine v akumulaciji.
- Obtežbo z ledom je treba upoštevati vzdolž celotne dolžine pregrade na nivoju gladine v akumulaciji in je odvisna od debeline ledu.
- V analizah upoštevamo vpliv ledu kot površinsko obtežbo v velikosti od 240 kN/m^2 do 1.440 kN/m^2 – povprečno lahko privzamemo v računu 500 kN/m^2 .

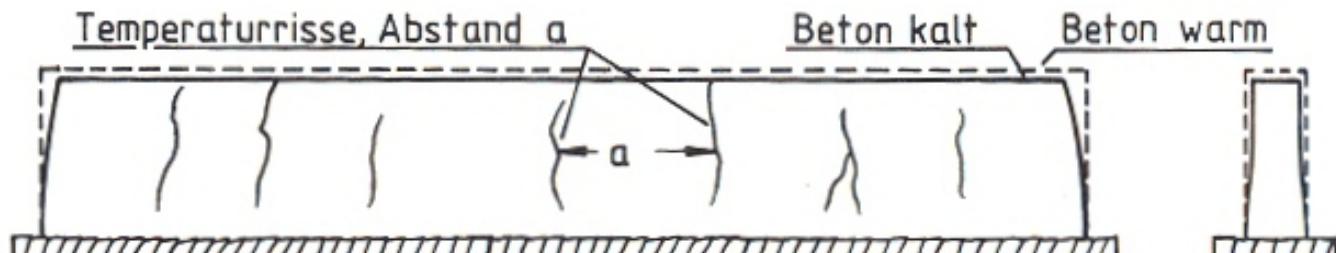
Betonske težnostne pregrade: dodatna obtežba – temperaturne obremenitve

S spremembo temperature se beton volumsko spreminja:

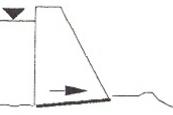
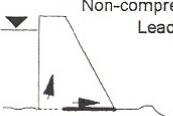
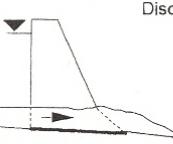
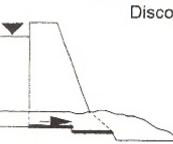
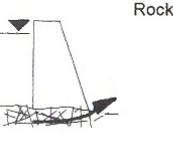
- v primeru, ko konstrukcijski stiki med bloki niso zainjektirani volumske deformacije bloka niso ovirane in ni prenosa obtežb na kontaktih med bloki

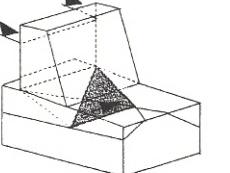


- v primeru, ko pa so konstrukcijski stiki povezani, pa so volumske deformacije zaradi temperaturnih sprememb na stiku ovirane, kar privede do pojava nateznih napetosti v bloku in razpok



Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza – načini porušitve pri zdrsu

MODE	CONDITION	COMMENTS
1. Shear Along Concrete-rock Contact 	- shear along weak discontinuity at or near concrete-rock contact.	- possible if weak foundation or poor excavation and/or foundation treatment. - infrequent mode. Check for condition, particularly in old dams.
2. Development of Non-compression Zone Leading to Shear 	- development of non-compression zone (a computed crack) leading to shear along the concrete-rock contact.	- can occur even in good foundations.
3. Shear Along Planar Discontinuity 	- shear along planar or near planar discontinuity in rock foundation.	- frequent mode.
4. Shear Along Stepped Discontinuities 	- shear along stepped discontinuities or along surfaces stepping down between parallel discontinuities in rock foundations.	- if step(s) not large then failure surface may be approximated by an inclined plane. - large steps may require higher level of analysis.
5. Shear Through Jointed Rock Mass 	- shear through highly jointed rock mass (both natural or blast induced) or through weak rock mass.	- infrequent mode - may be used in moderately jointed rock masses (with an adjustment to assigned Hoek-Brown rock mass strength) - failure surface usually approximated as being planar.

MODE	CONDITION	COMMENTS
6. Shear along Combined Discontinuities 	- shear along a combination of two or more discontinuities.	- occasional; usually assume planar mode (3) during initial assessment. - limit equilibrium analysis can be used for more detailed analysis.
7. Toppling 	- loads at toe of dam causing toppling of bedded rock formation.	- infrequent but should be evaluated in bedded or highly jointed (parallel) rocks - if dam heel lifts block may continue movement by shearing through toe (mode 2).
8. Wedge (3 dim.) 	- wedge formed beneath block by combinations of major faults, shears and/or joint sets.	- infrequent but should be evaluated where major features such as faults/shears cross foundation and combine with jointing. - rigid body, 3-dimensional analysis.

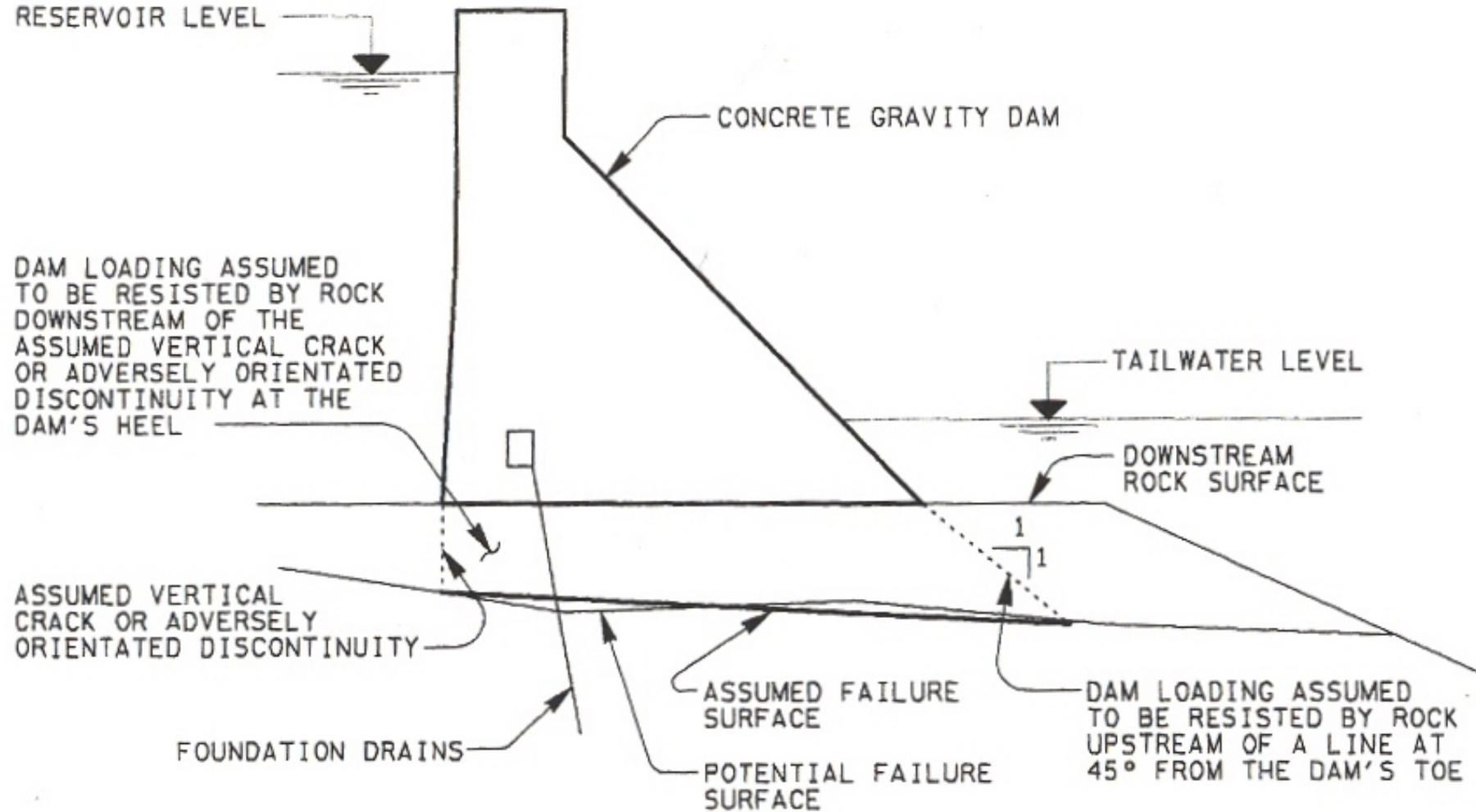
■ analizirati moramo tudi možnost zdrsa v samem telesu pregrade na horizontalnih konstrukcijskih stikih, razpok zaradi volumskih deformacij ali pa na mestih diskontinuitete v geometriji pregrade

Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza – varnost na zdrs

Pri večini objektov je dovolj, če izvedemo statično-stabilitetno analizo z upoštevanjem pregrade kot togega telesa. Analizo izvedemo za primer porušitve telesa pregrade, na kontaktu s temeljno hribino in na porušnici, ki se formira v temeljnih tleh z upoštevanjem naslednjih predpostavk:

- Na dolvodnem licu pregrade računamo, da se formira razpoka v naklonu 1:1 od pete pregrade do porušne ploskve - odpora v temeljni hribini (pasivni zemeljski pritisk) na dolvodni strani ne upoštevamo
- Hidrostatični tlak na gorvodni strani upoštevamo vzdolž celotnega lica pregrade ter porušne linije do potencialne porušne ploskve v temeljni hribini – na dolvodni strani pa upoštevamo hidrostatični tlak do porušne ploskve v točki stika z namišljeno razpoko
- Na porušno ploskev delujejo vzgonski tlaki, ki so reducirani glede na zaščitne ukrepe (drenažna zavesa, tesnilna zavesa,...)
- V računu ne upoštevamo nateznih napetosti.

Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza – varnost na zdrs



Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza – varnost na zdrs

Pri analizi stabilnosti porušitve po porušnici upoštevamo naslednje:

- vse delajoče sile na pregrado, vključno z lastno težo in vzgonskimi silami superponiramo glede na porušnico paralelno in normalno na porušno ravnino
- račun normalnih napetosti na porušni ravnini s predpostavko linearrega poteka napetosti
- v primeru prekoračitve nateznih trdnosti in pojava razpoke je treba preveriti stabilnost za primer računa z razpoko
- stabilnostno analizo preverjamo s faktorjem zdrsa (sliding factor SF), ki je definiran:

$$SF = \frac{\text{razpoložljiva strižna odpornost}}{\text{delajoče sile}}$$

Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza – strižni faktor zdrsa

- Z upoštevanjem strižne trdnosti je opredeljen **strižni faktor zdrsa** z naslednjim (slide-shear-factor SSF) izrazom:

$$SSF = \frac{\left(\sum N - \sum V \right) \cdot \tan \varphi + C \cdot A}{\sum H}$$

- ΣN ... normalna komponenta rezultante delajočih sil na porušnico
- ΣH ... horizontalna komponenta rezultante delajočih sil na porušnico
- ΣV ... vzgonske sile, ki delujejo normalno na porušnico
- φ ... efektivni kot notranjega trenja
- C ... efektivna kohezija
- A ... površina tlačenega prereza

- Stabilnost na zdrs preverjamo z upoštevanjem strižnih karakteristik betona in temeljne podlage za dve stanji:

- pri **maksimalni strižni odpornosti**
- pri **rezidualni strižni odpornosti** (vrednost C je največ **100 kPa**, praviloma pa privzamemo, da je **0** – strižna odpornost je odvisna le od trenja)

Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza – vrednosti faktor zdrsa

faktor zdrsa		obtežni primeri			
		običajni obtežni primer	neobičajni obtežni primer	izjemni obtežni primer	ekstremni obtežni primer
za beton in kontakt s temeljno hribino	maksimalna strižna trdnost	ni na voljo posebni detaljnih analiz	3	2	2
		vse analize materialov so narejene	2	1,5	1,5
	rezidualna strižna trdnost	1,5	1,1	1,3	1
za temeljno hribino		1,5 do 2,0	1,2 do 1,4	1,3 do 1,5	1,1 do 1,3

Betonske težnostne pregrade: analiza napetosti v pregradi

- Analizo napetostnega stanja v pregradi izvajamo z gravitacijsko metodo računa, ki temelji na naslednjih postavkah:
 - **beton** v pregradi smatramo kot homogen, izotropen in linearno elastičen material
 - v območju akumulacije ni **diferenčnih posedkov** dna in brežin doline
 - porazdelitev **normalnih napetosti** je predpostavljena kot linearne vzdolž prereza pregrade
 - porazdelitev **strižne napetosti** v horizontalni smeri je parabolične oblike vzdolž prereza pregrade
- Z gravitacijsko metodo izvajamo račun normalnih napetosti s predpostavko, da je pregrada obravnavana kot konzolna stena (konstrukcijski stiki so odprtih), enotne širine, pravokotnega prereza.
- Predpostavke veljajo v kolikor ne upoštevamo podajnost temeljne podlage, kjer se pa porazdelitev napetosti ni več linearne – pri nižjih pregradah je ta predpostavka manj problematična kot pri višjih, kjer je treba upoštevati deformacije temeljev.

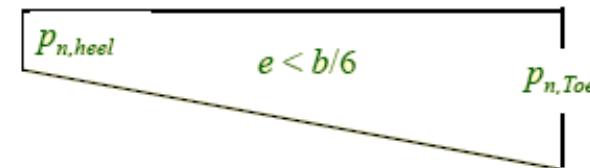
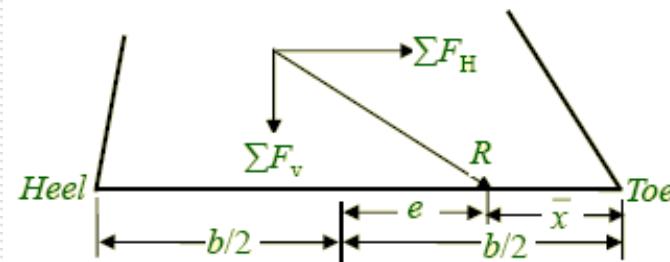
Betonske težnostne pregrade: analiza napetosti v pregradi

- za računski prerez v temelju ($l=1\text{m}$) pregrade so normalne napetosti podane z izrazom:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sum F_v}{b} \cdot \left(1 \pm \frac{6 \cdot e}{b} \right)$$

- v kolikor se rezultanta sil nahaja znotraj jedra ($e < b/6$) prereza so normalne napetosti vzdolž prereza tlačne
- v primeru, da rezultanta pade izven jedra prereza ($e > b/6$) pa računamo, da se formira razpoka in beton v natezni coni prereza ne sodeluje pri prenosu obtežbe
- z izključitvijo natezne cone se I_c normalne robne napetosti v tlačenem delu prereza povečajo – pri tem je treba paziti, da ne pride do prekoračitve dopustnih trdnosti materiala.

$$\bar{x} = (\sum M_R - \sum M_o) / \sum F_V \quad e = \frac{b}{2} - \bar{x}$$



Betonske težnostne pregrade: analiza napetosti v pregradi – pojav razpok

■ območje I - do 30% trdnosti

betona: mikrorazpoke v stičnem območju so stabilne;

■ območje II - 30% do 50% trdnosti

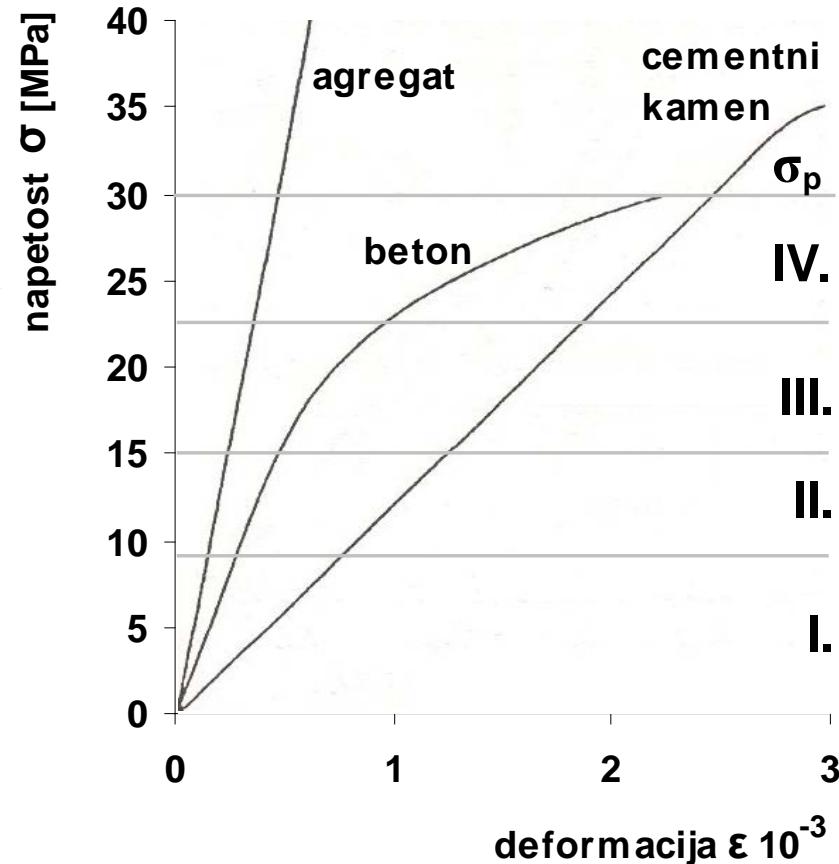
betona: pričetek rasti mikrorazpok v stičnem območju;

■ območje III - 50% do 75% trdnosti

betona: nestabilnost razpok v stičnem območju in širitev razpok v cementnem kamnu;

■ območje IV - nad 75% trdnosti

betona: pospešena rast razpok v stičnem območju in cementnem kamnu.



Betonske težnostne pregrade: analiza napetosti v pregradi – koeficient tlačne trdnosti

- maksimalne **tlačne napetosti** morajo biti v mejah, da ne pride do pojava razpokanosti v betonu ali temeljni hribini
- maksimalne tlačne napetosti σ_{\max} v betonu ali temeljni hribini ne smejo preseči vrednosti tlačne trdnosti f_c materiala reducirane za **koeficient tlačne trdnosti** ([CSF](#)) glede na posamezni obtežni primer:

$$\sigma_{\max} = \frac{f_c}{CSF}$$

- faktor varnosti za temeljno hribino so glede na beton za 33% večji in vključujejo nejasnosti pri določitvi parametrov temeljne hribine

koeficient tlačne trdnosti	obtežni primeri			
	običajni obtežni primer	neobičajni obtežni primer	izjemni obtežni primer	ekstremni obtežni primer
pozicija rezultante sil	v jedru prereza		izven jedra prereza	
za beton	3	1,5	2	1,1
za temeljno hribino	4	2	2,7	1,3

Betonske težnostne pregrade: analiza napetosti v pregradi – natezne napetosti

- v kolikor želimo izpolniti pogoj, da so na gorvodni strani pregrade eventualne **natezne napetosti** v okviru dovoljenih vrednosti je treba doseči pogoj, da znašajo minimalne tlačne napetosti σ_{\min} v betonu:

$$\sigma_{\min} = \lambda \cdot \gamma_w \cdot h - \frac{f_t}{CSF}$$

- pri čemer je
 - λ ... redukcijski faktor učinkovitosti delovanja tesnilne/drenažne zavese (1 ... brez dreniranja, 0,4 z dreniranjem)
 - **CSF** ... koeficient tlačne/natezne trdnosti
 - f_t ... natezna trdnost betona
 - globina pod nivojem akumulacije

Betonske težnostne pregrade: analiza napetosti v pregradi – natezne napetosti

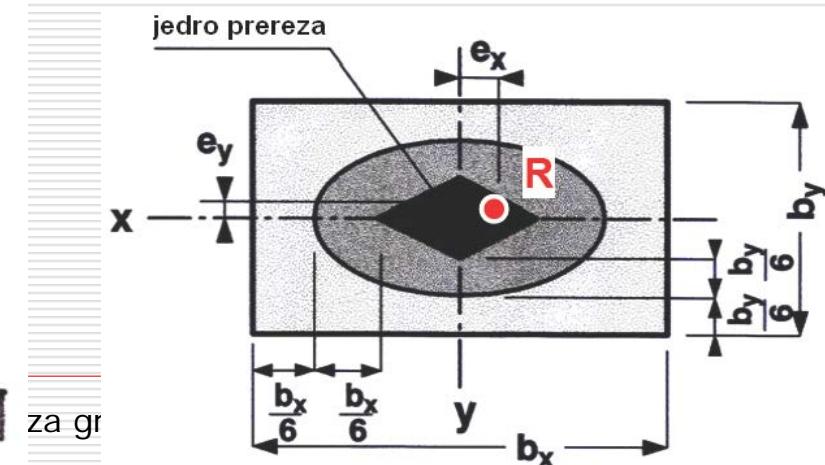
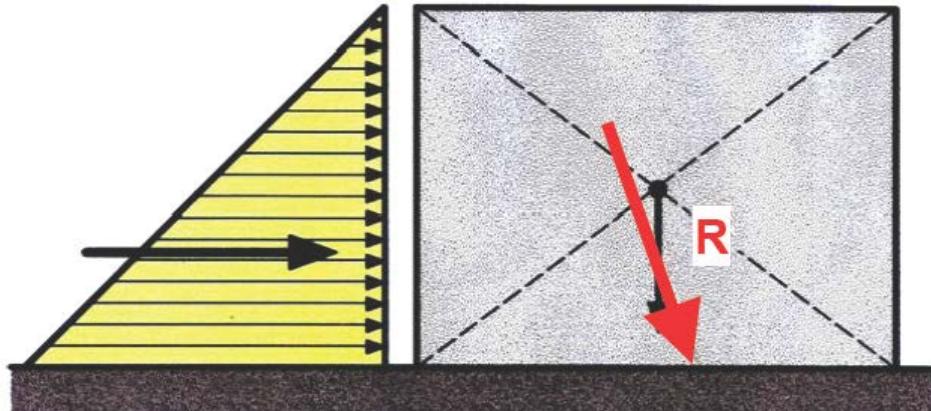
- pogoj za minimalne tlačne napetosti zagotavlja, da pri pojavu vzgonskih tlakov pregradi niso prekoračene dopustne natezne trdnosti betona
- za običajni obtežni primer natezne napetosti niso dovoljene, pri ekstremnem obtežnem primeru (potres) se dopušča pojav razpok v pregradi, pri tem pa je treba preveriti, da robne tlačne napetosti, zaradi izključitve natezne cone, pri tem niso prekoračene – če je temu pogoju zadoščeno ni nevarnosti porušitve pregrade
- minimalne tlačne napetosti izračunamo brez upoštevanja vzgonskih tlakov

Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza - varnost pred prevrnitvijo

Varnost na prevrnitev preverjamo na kontaktu med podlago in jezovno zgradbo.

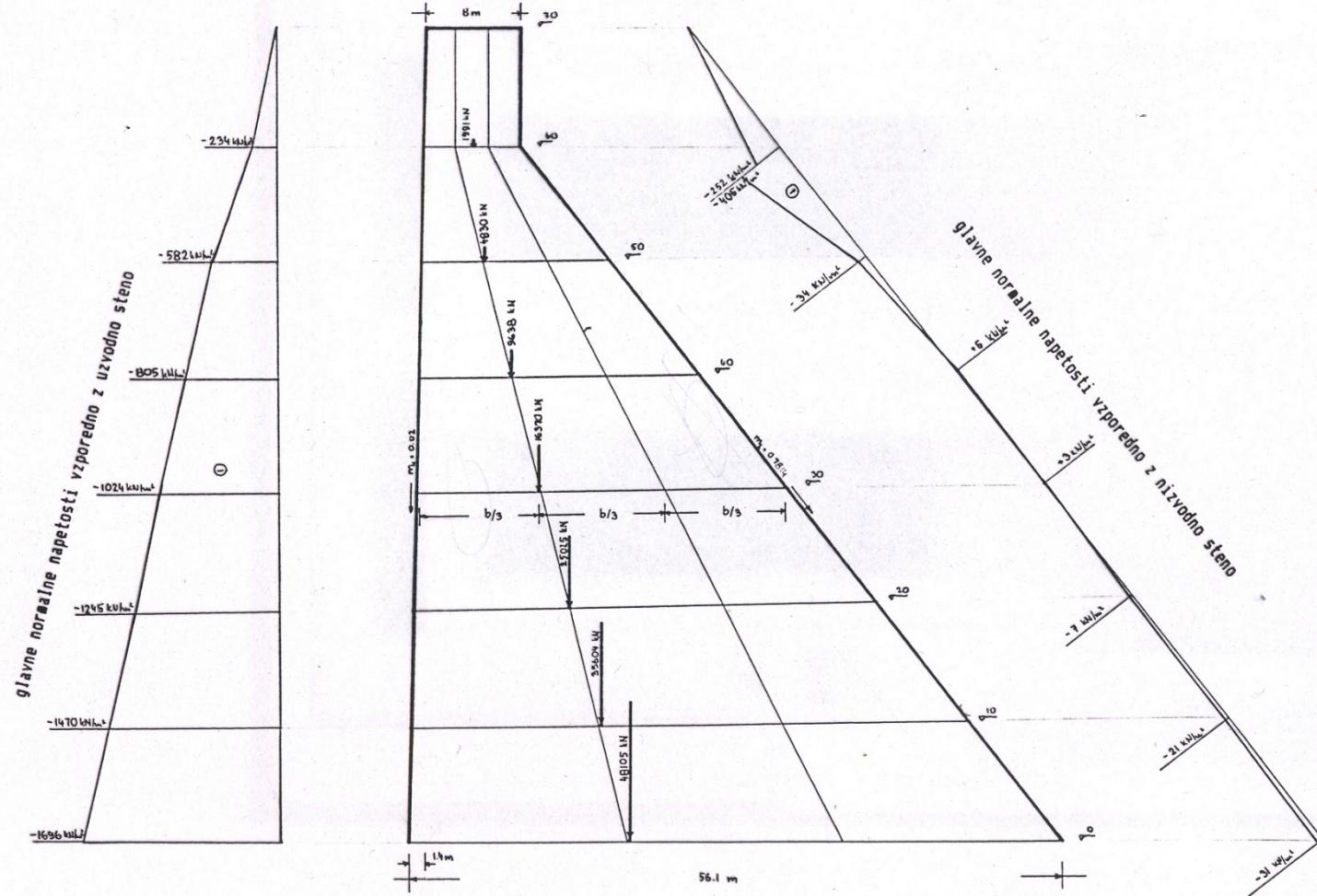
Kriteriju je zadoščeno:

- če se rezultanta delujočih sil pri običajnim obtežnim slučaju (stalna obtežba) nahaja vedno v **jedru prereza**, kar zagotavlja varnost pred prevrnitvijo več kot **2**.
- pri izjemni ali ekstremni obtežbi pa je pogojno dovoljujejo da rezultanta delujočih sil pade izven jedra prereza, vendar znotraj **2/3 širine prereza**
- v primeru, da rezultanta pade izven zunanje širine prereza pa je bolj verjetna porušitev zaradi **prekoračitve trdnosti materiala** kot prevrnitev, ker podvojitev prevrnitvenega momenta ni realna – zato tudi kriterij varnosti prevrnitve nima take pomembnosti kot ostali [kriteriji](#)



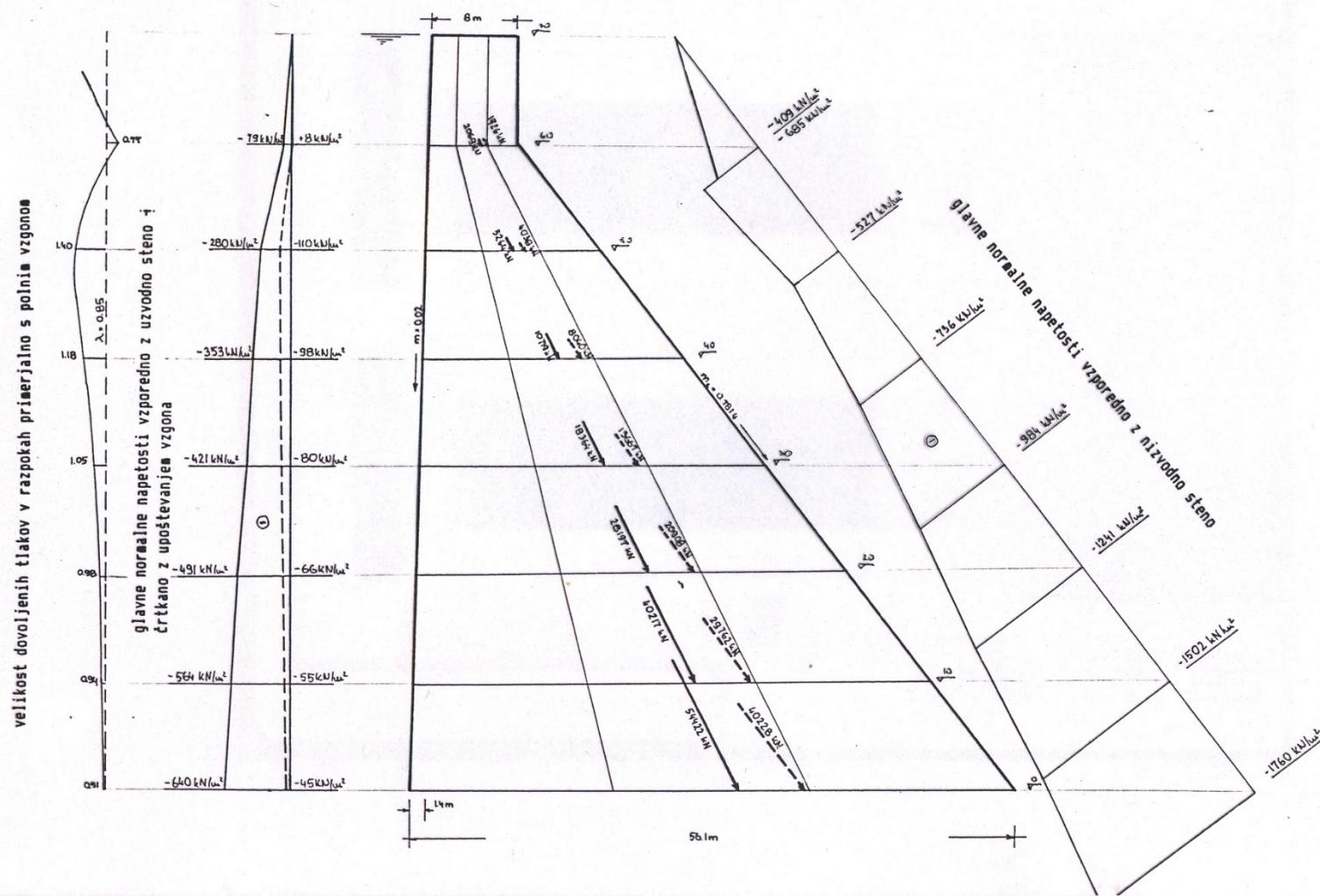
Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza – prazen bazen

TEŽNOSTNA PREGRAĐA → obtežni primer: prazen bazu



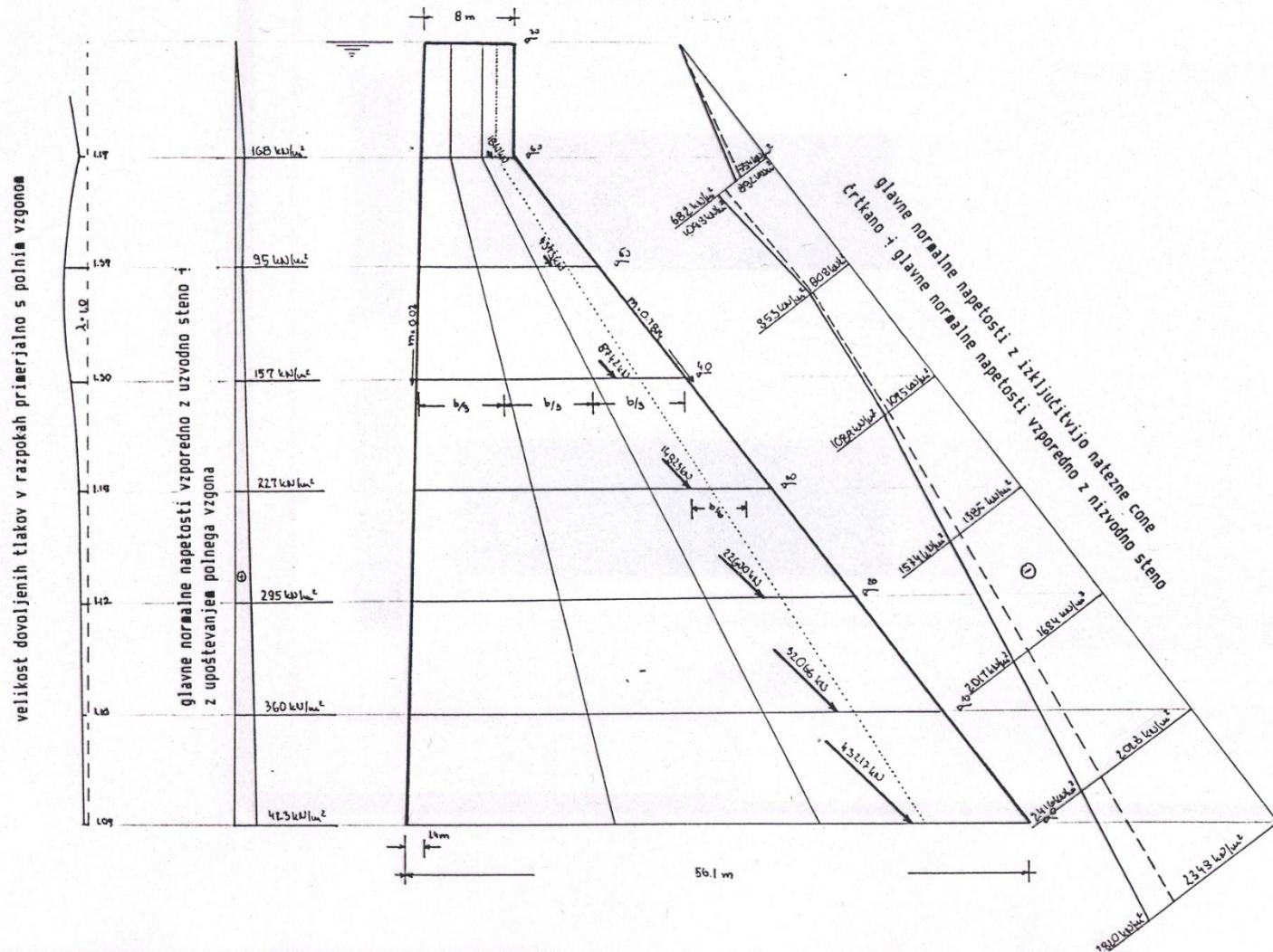
Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza – poln bazen

TEŽNOSTNA PREGRADA i obtežni primer : polna akumulacija



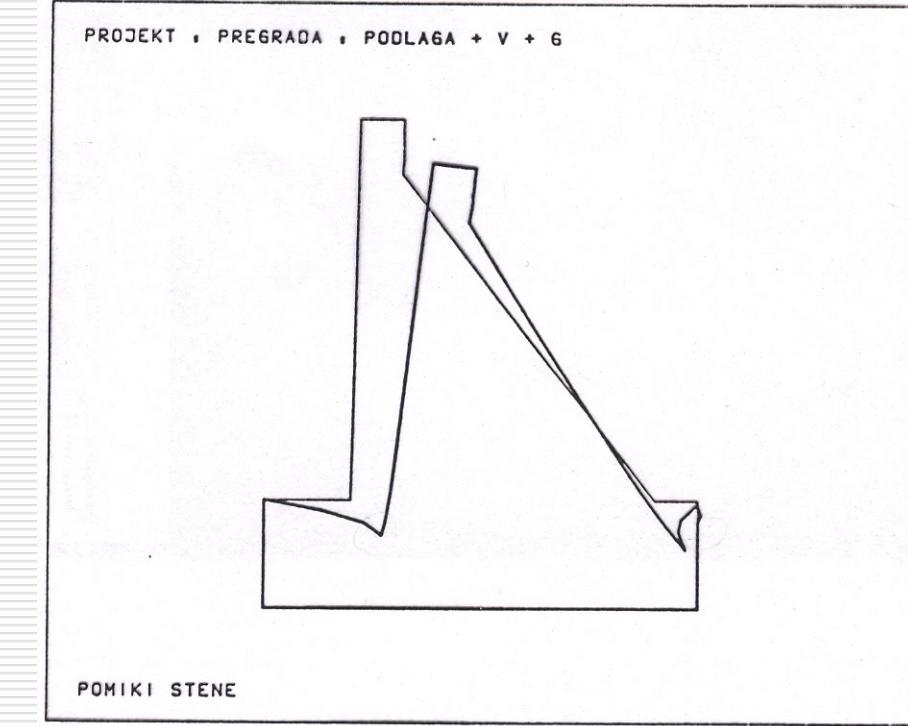
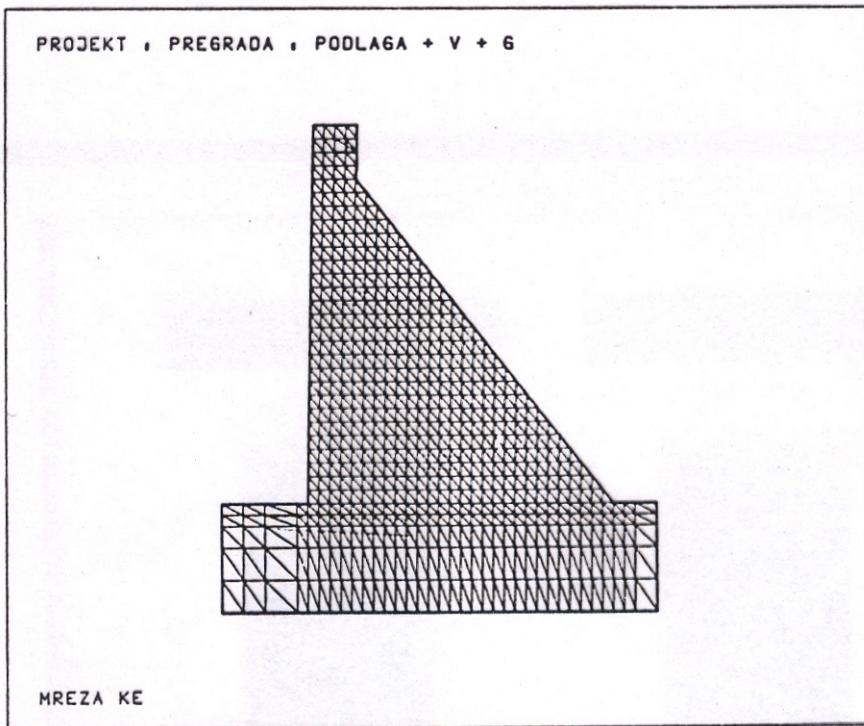
Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza - potres

TEŽNOSTNA PREGRADA + obtežni primer : polna akumulacija in potres



Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza – račun po MKE

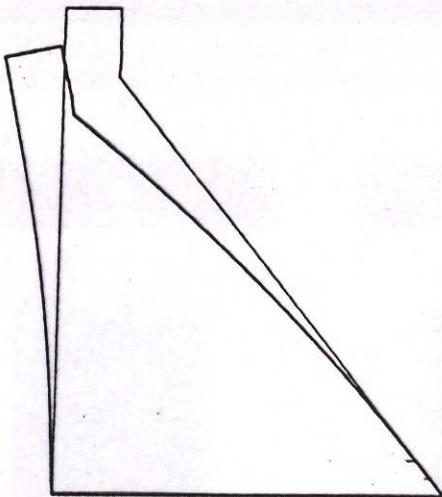
Račun deformacije pregrade z upoštevanjem podlage



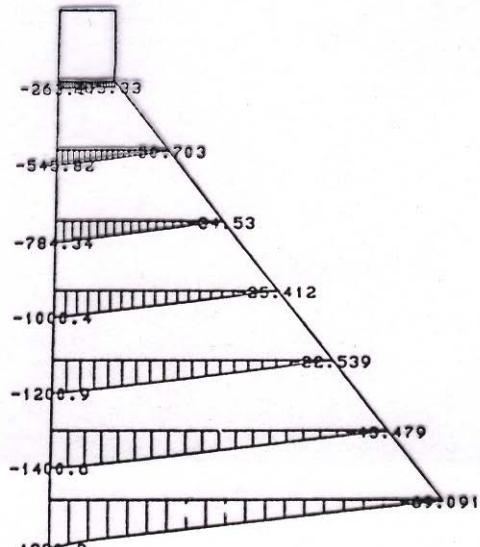
Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza – račun po MKE

račun deformacij pregrade pri upoštevanju lastne teže na nepodajni podlagi

PROJEKT : PREGRADA - LASTNA TEZA



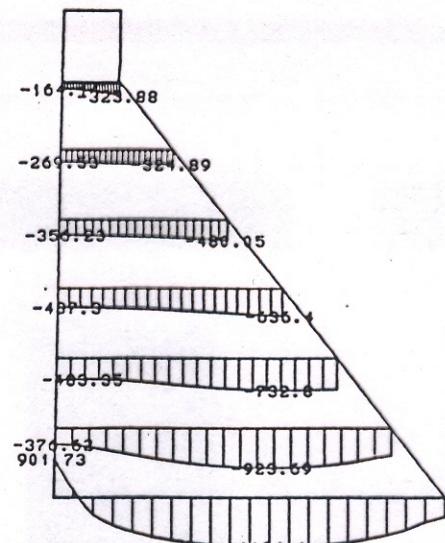
PROJEKT : PREGRADA - LASTNA TEZA



Betonske težnostne pregrade: stabilnostna analiza – račun po MKE

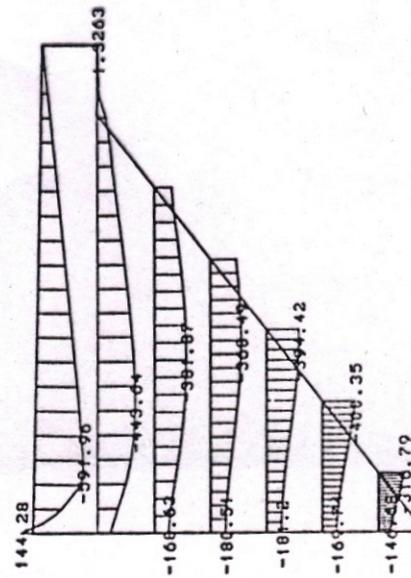
Račun normalnih napetosti z upoštevanjem podajnosti podlage

PROJEKT : PREGRADA V+6



NAPETOST σ_{yy}

PROJEKT : PREGRADA V+6



NAPETOST σ_{xx}