

HIDROTEHNIČNI OBJEKTI –

NASUTE PREGRADE

Nasute pregrade

- Nasute pregrade so konstruirane iz naravnih materialov izkopanih v bližini lokacije. Material iz izkopa uporabimo za vgradnjo v telo pregrade po namenu in glede na njegove karakteristike in uporabnosti.
- Materiale vgrajujemo v telo pregrade praviloma brez dodanih veznih sredstev, razen v posebnih primerih, ko želimo izboljšati lastnosti materialov (vodonepropustnost, trdnost,...). Pri vgradnji materiale utrjujemo z uporabo gradbene mehanizacije.
- Nasute pregrade delimo glede na uporabljeni materiale na:
 - **zemeljske pregrade** (prevladujoč drobnozrnat material)
 - **skalometne** pregrade (prevladujoč grobozrnat material)

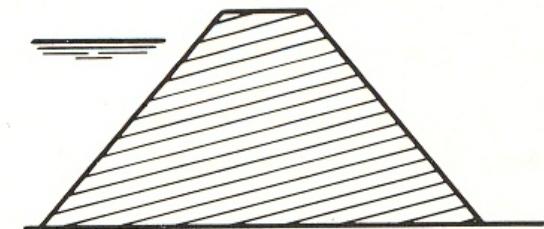
Zemeljske pregrade

- **Zemeljske pregrade** so primerne za vse vrste topografskih razmer, razen za ozke kanjonske profile, kjer je problematična evakuacija visokih voda.
- Zemeljske pregrade običajno gradimo na *slabše nosilnih* temeljnih tleh. Tudi pri bolje nosilnih tleh so pri manjših višinah bolj ekonomične od betonskih pregrad.
- Izbor tipa pregrad in tesnjenja je odvisen od razpoložljivosti materiala na lokaciji. Če je materiala dovolj in je slabo proposten gradimo *homogeno pregrado*, v primeru, da je material proposten pa *slojevito pregrado*, tesnjenje pa je izvedeno s *tesnilnim jedrom*.

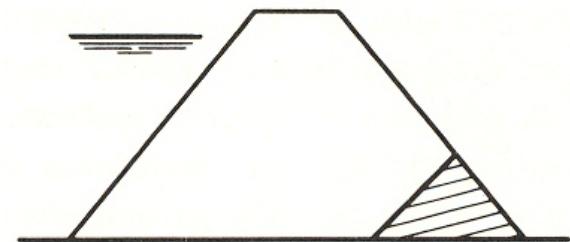
Zemeljske pregrade - tipi

Ločimo naslednje tipe zemeljskih pregrad:

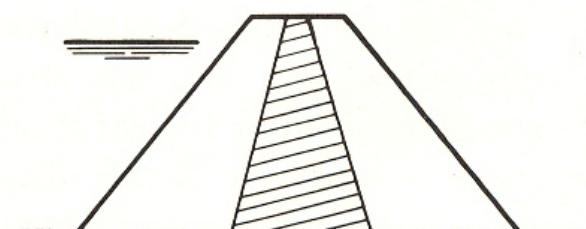
- **homogene** gradimo na *dobri temeljni podlagi*, kjer so pričakovani posedki enakomerni
- **modificirane homogene** z zaščito pete pregrade s skalometrom ali z izvedbo drenaže za kontroliranje precejanja vode
- **slojevite** gradimo na *slabše nosilnih tleh*, kjer so pričakovani diferenčni posedki
 - pri *dobri temeljni podlagi* je lega tesnilnega dela na **gorvodni strani** - jedro je lahko glineno, asfaltno, betonsko ali geomembrana
 - pri *slabše nosilnih tleh* je lega tesnilnega jedra v **centralnem delu** – jedro je lahko glineno, redkeje asfaltno ali betonsko



(a) HOMOGENEOUS



(b) MODIFIED HOMOGENEOUS



(c) ZONED

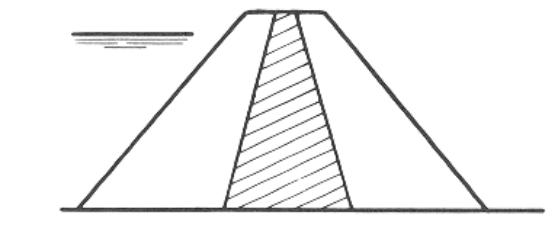
Skalometne pregrade

- Skalometne pregrade so primerne povsod, kjer je na voljo dovolj ustreznega materiala v neposredni bližini lokacije ter še posebej na gorskih področjih kjer je zaradi neugodnih klimatskih pogojev otežkočena gradnja drugih tipov pregrad.
- Skalometne pregrade temeljimo na *kvalitetnejšo podlago*, ki omogoča prevzem deformacij pri posedanju pregrade. Izvedba je možna tudi v slabše nosilnih tleh, vendar le z tesnilno steno do nepropustne podlage, glinena tla niso primerna.

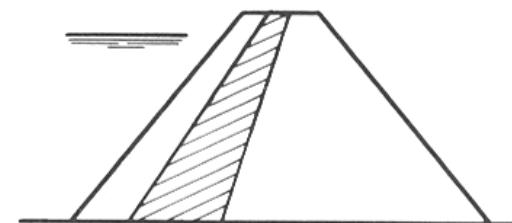
Skalometne pregrade - tesnenje

Glede na postavitev tesnitve pregradnega profila ločimo:

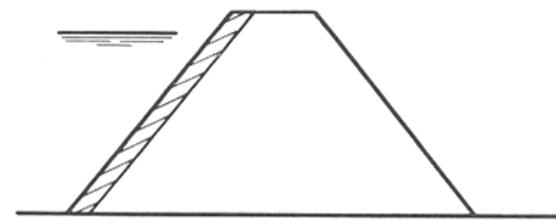
- **centralno jedro** – izvedba je asfaltna, glinena/zemeljska, občutljivo na seizmične sile
- **nagnjeno jedro** – bolj primerno za seizmična področja
- **nepropustna obloga** – je lahko betonska, asfaltna ali geomembrana, statično-stabilitetno je ugodnejša, dovoljuje vzdrževanje in ni omejitev pri obratovanju



(a) CENTRAL CORE



(b) SLOPING CORE



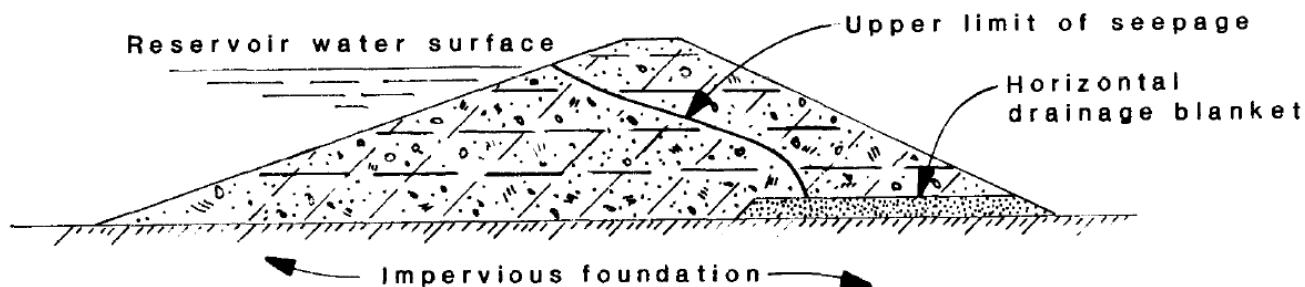
(c) DIAPHRAGM

Nasute pregrade – homogene pregrade

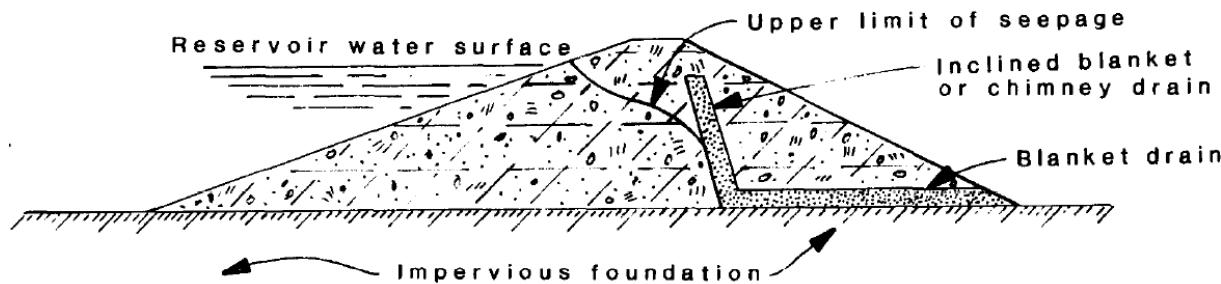
- **Homogene pregrade** so grajene iz enovitega materiala (zemeljskega), ki je dovolj kompaktiran in vodo neproposten, da ne prihaja do precejanja skozi telo pregrade.
- Pri homogenih pregradah je problematična tudi anizotropna propustnost materiala. Zaradi načina gradnje nasutih pregrad v slojih je propustnost v horizontalni smeri večja kot v vertikalni smeri in *horizontalna drenaža* ne zadošča – potrebno je izvesti *vertikalno drenažo*.

Nasute pregrade – homogene pregrade

- **horizontalna drenaža** (**filtrna preproga**) na dolvodni strani pregrade



- **vertikalna drenaža** (**dimnični filter**) v sredini pregrade, ki je spojen s horizontalnim filtrom



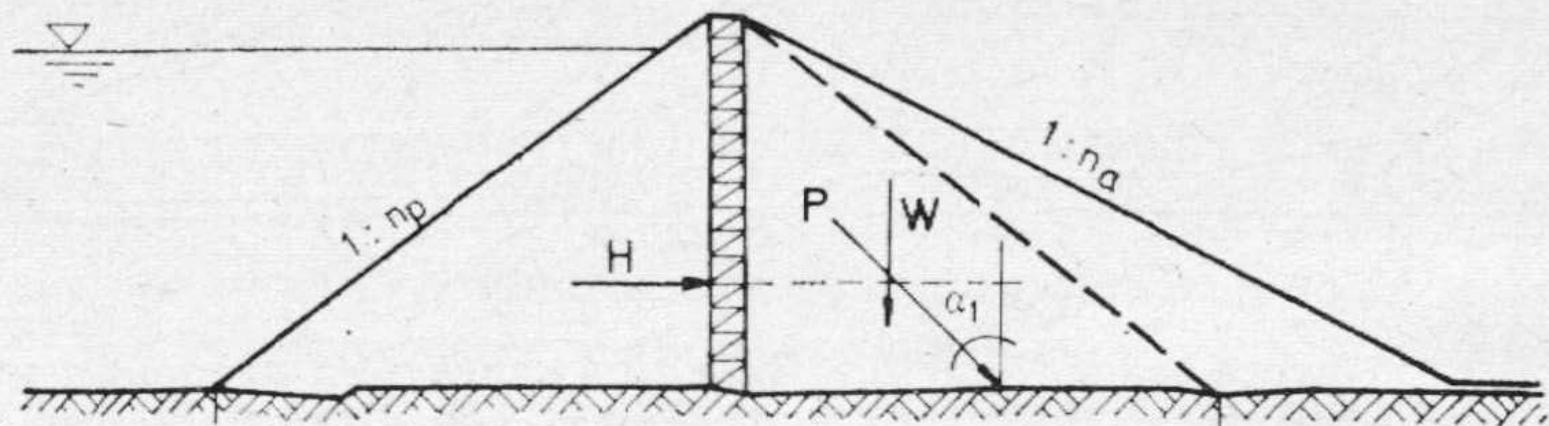
Nasute pregrade – slojevite pregrade

- **Slojevite pregrade** so grajene iz raznovrstnih materialov katerih lastnosti izkoristimo tako, da je objekt najbolj funkcionalen in ekonomičen.
- **Tesnilno jedro** pregrade je sestavljeni iz slabo propustnega materiala, ki preprečuje precejanje skozi pregrado.
- Na dol- in gorvodni strani tesnilnega jedra so **podporni sloji**, ki so iz bolj propustnega materiala:
 - **gorvodna stran** pregrade mora biti iz dovolj **propustnih materialov**, da pri nihanju gladin vode v akumulaciji ne pride do zastojnih tlakov v telesu pregrade
 - **dolvodna stran** je iz bolj propustnih materialov, če je sočasno urejeno dreniranje z drenažnim-filtrnim sistemom, da je preprečeno precejanje vode na površini pregrade

Nasute pregrade – slojevite pregrade

Dimenziije pregrade so zelo odvisne od položaja in debeline tesnilnega jedra:

- *Vertikalno jedro* zahteva največji volumen podpornega dela na dolvodni strani. Dejanski naklon pobočja pregrade na dolvodni strani je položnejši od naravnega naklona

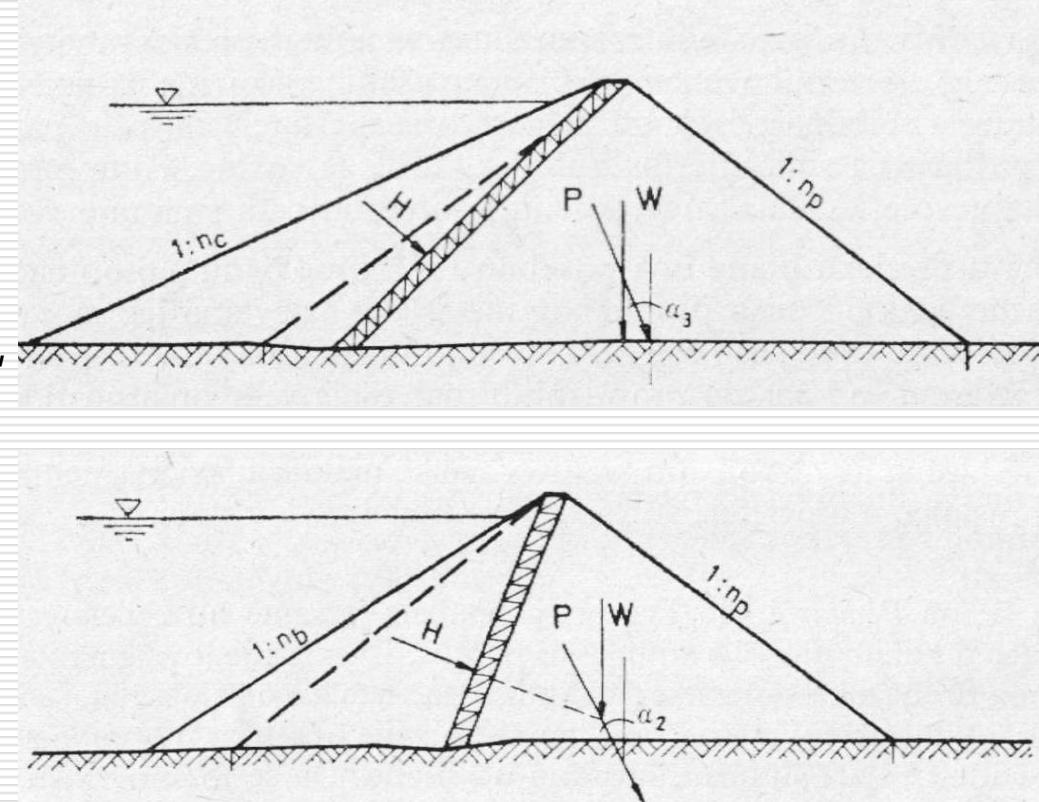


Nasute pregrade – slojevite pregrade

■ Pri *močno nagnjenem jedru* je na dolvodni strani lahko pobočje pregrade v naravnem naklonu, ko pa je na gorvodnem pobočju pregrade potrebno naklon ublažiti, kar pomeni večji volumen pregrade

■ Kompromis pri položaju je *nagnjeno jedro* v telesu pregrade

■ Na meji med posameznimi materiali se spreminjajo gradienti tlaka precedne vode. Da ne pride do spiranja drobnih delcev je treba vgraditi med telo pregrade in jedrom prehodni sloj - *filtrne plasti*.



Nasute pregrade – splošni pogoji

- Telo pregrade in temeljenje mora ohraniti *strukturno stabilnost* v vseh pogojih tekom gradnje in eksploracije.
- Zagotoviti je treba zadovoljivo *varnost pred porušitvijo* pregrade (telo ali temelj)
- V času gradnje je možno, da nastopi situacija, ko so prekoračene dovoljene trdnostne karakteristike materiala ali temeljev, vendar je treba kasneje izvesti ustrezne korektivne ukrepe.
- *Deformacije* telesa pregrade med gradnjo in še posebej tekom obratovanja morajo biti znotraj funkcionalnih meja.

Nasute pregrade – splošni pogoji

- *Precejanje vode* skozi pregrado mora biti v mejah, ko niso prekoračene dopustne trdnosti materiala in da ne pride do pojava notranje erozije. S korektivnimi ukrepi je treba zagotoviti ustrezeno varnost proti pojavu notranje erozije v pregradi ali v temeljnih tleh.
- *Krona pregrade* mora biti dovolj nadvišana, da ni nevarnosti preplavitve pregrade. Preliv mora ustrezati maksimalni poplavni vodi, ne da bi upoštevali še talni izpust (varnostni kriterij, ker je lahko talni izpust blokiran).
- *Evakuacijski objekti* (preliv in talni izpust) morajo biti v kondicijskem stanju pri vseh obratovalnih situacijah.

Nasute pregrade – pogoji za izbor

Pogoji na lokaciji za katere je prednostna izbira nasute pregrade:

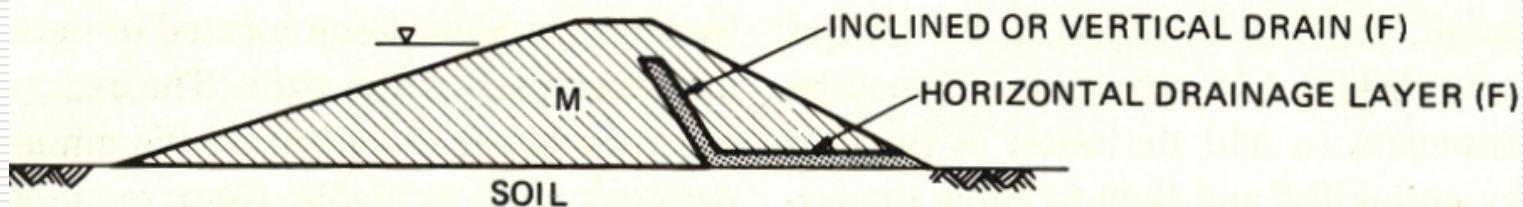
- Zelo debel sloj zemljinske podlage na osnovni hribini.
- Šibka ali slabo nosilna hribina na kateri ni mogoče temeljiti betonske pregrade.
- Brežine doline na bokih pregrade sestavljajo zemljine ali slabo nosilna hribina.
- Razpoložljivost zadosti velikega prostora za izvedbo evakuacijskih objektov.
- Razpoložljivost dovolj velike količine materiala za gradnjo v neposredni bližini lokacije.

Nasute pregrade – izbor lokacije

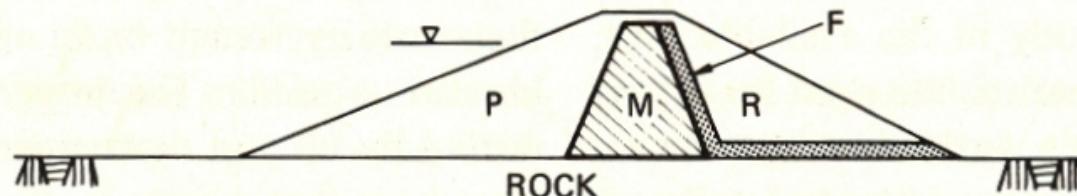
V kolikor je v izboru več lokacij so merodajni naslednji kriteriji:

- **volumen akumulacije** – izvesti je treba presojo kako lokacija vpliva na velikost zaježitve
- **nahajališča materiala** – preučiti je treba dostopnost materiala za gradnjo med lokacijami
- **volumen pregrade** – izdelati je treba analizo stroškov gradnje pri upoštevanju enakih pogojev za gradnjo med lokacijami
- **pogoji temeljenja** so ključni pri določitvi ustreznosti lokacije (priprava temeljne podlage, izboljšanje nosilnosti,...)
- **spremljajoči objekti** – analizirati je treba izvedljivost izvedbe spremljajočih hidrotehničnih objektov (preliv, talni izpust, derivacija, obtočni objekt za čas gradnje,...)
- **organizacija gradnje** – analizirati možnost izvedbe gradbene jame in izvedbe preusmeritve vodotoka
- **organizacija transporta** – za čas gradnje je treba analizirati možne dostopne poti

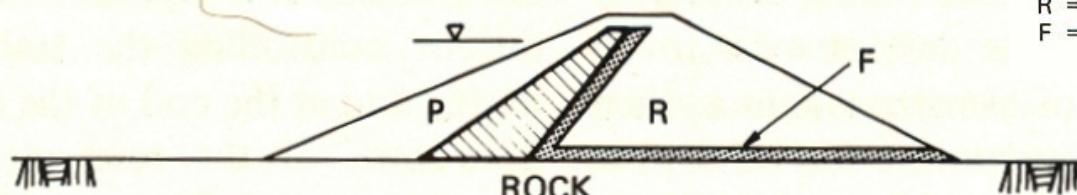
Nepropustna podlaga



a. Homogeneous dam with internal drainage on impervious foundation



b. Central core dam on impervious foundation

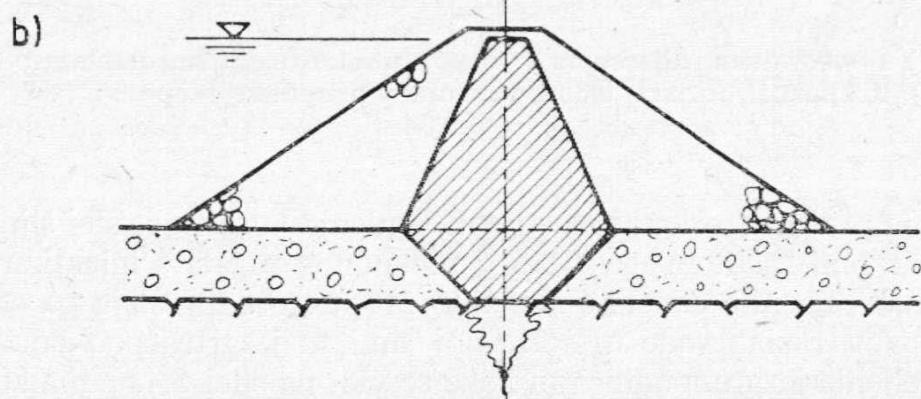
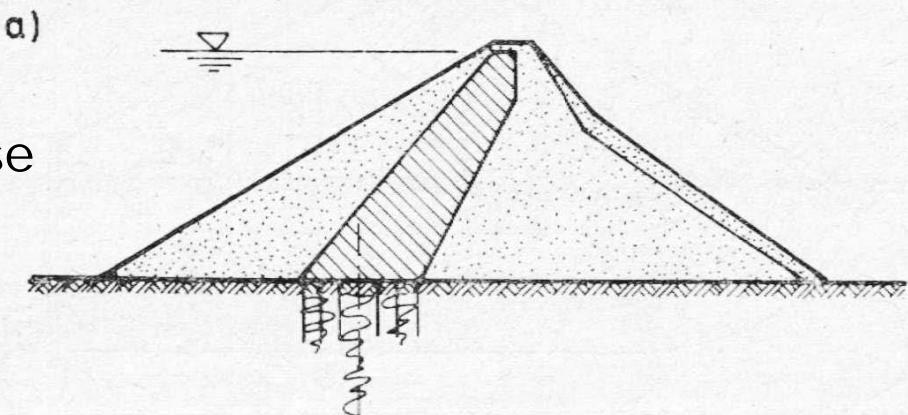


c. Inclined core dam on impervious foundation

LEGEND
M = IMPERVIOUS
P = PERVIOUS
R = RANDOM
F = SELECT PERVIOUS MATERIAL

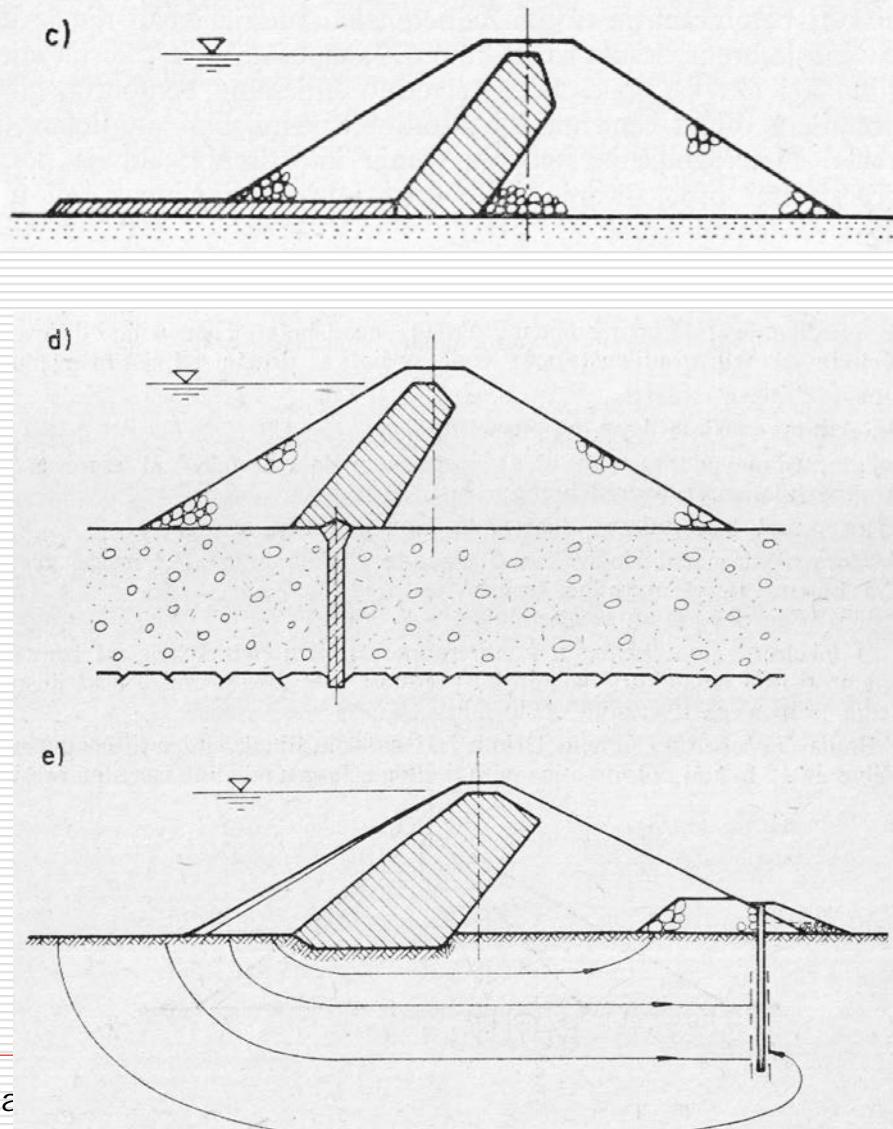
Prepustnost temeljnih tal

- Če je debelina propustnega sloja temeljnih tal majhna, se lahko material izkoplje in nadomesti z manj propustnim materialom
- če je debelina propustnega sloja temeljnih tal večja, pa je treba izvesti posebne ukrepe:
 - izvedba injekcijske zavese skozi propustni sloj
 - podaljšanje jedra do nepropustne podlage



Prepustnost temeljnih tal

- izvedba tesnilne preproge na propustnem sloju na gorvodni strani pregrade
- izvedba nepropustne diafragme ali tesnilne stene skozi propustni sloj do podlage
- izvedba drenažnih vodnjakov ali drenažne preproge pod pregrado



Material za gradnjo

- Za gradnjo je primeren vsak material, ki izpolnjuje minimalne geomehanske zahteve
- prednost je uporabi materiala iz akumulacije (transport, ekonomičnost, okoljske zahteve,...)
- če ekonomika dopušča je smiselna uporaba kvalitetnejšega materiala iz bolj oddaljene lokacije na račun slabšega materiala iz lokacije (s sloji *propustnega* (dražjega) materiala lahko zmanjšamo *porne tlake* v gorvodnem nepropustnem podpornem delu in naredimo gradnjo bolj ekonomično - manj porabljenega materiala)
- pri materialu z velikim razponom granuliranosti je nevarnost segregacije in je priporočljivo separiranje materiala:
 - večje frakcije vgrajujemo v podporni del
 - manjše frakcije pa v nepropustne sloje

Material za gradnjo - uporabnost

- v načelu so za nasute pregrade uporabni vsi materiali, naravnega ali umetnega izvora (žlindra, elektrofilterski pepel,...), tudi z organskimi primesmi – za vse materiale pa je treba zagotoviti, da se po vgradnji ne spremenijo lastnosti, ki bi lahko ogrozila stabilnost pregrade
- priporočljivi so materiali z naslednjimi lastnostmi:
 - velika **strižna odpornost** (posledično večja vodopropustnost)
 - **mala stisljivost** (posledično večja vodopropustnost)
 - **vodonepropustnos**t (tesnilni del pregrade)
 - mala občutljivost na **spremembe vlage** pri vgrajevanju
- za *podporni del* je priporočljiva uporaba propustnega materiala velike odpornosti in material male propustnosti in manjše odpornosti za *tesnilni del*

Material za gradnjo - lastnosti

- razvrščanje materiala po **lastnostih**:
 - *koherentne gline* (mala propustnost $< 10^{-5}$ cm/s, srednja do velika stisljivost, nizke do visoke plastične)
 - *nekoherentne drobnozrnate zemljine* ($> 50\%$ peska – $d < 0,06\text{mm}$; mala stisljivost; srednja propustnost – do 10^{-5} cm/s)
 - *nekoherentne zrnate zemljine* (velika strižna odpornost; mala stisljivost; večja propustnost – do 10^{-3} cm/s)
 - *grobo zrnate zemljine* ($> 50\%$ srednje granulacije, velika strižna odpornost; mala stisljivost; velika propustnost $> 10^{-3}$ cm/s)

Material za gradnjo - vgradljivost

- razvrščanje materiala po glede na **vgradljivost**:
 - *neobčutljiv na vlažnost* (gline nizke do visoko plastične, grobozrnat material)
 - *malo občutljive na vlažnost* grobozrnat material s primesmi melja)
 - *občutljivi materiali* (pesek z meljem in glino), kjer je treba pri vgradnji upoštevati optimalno vlogo

Material za gradnjo - namen

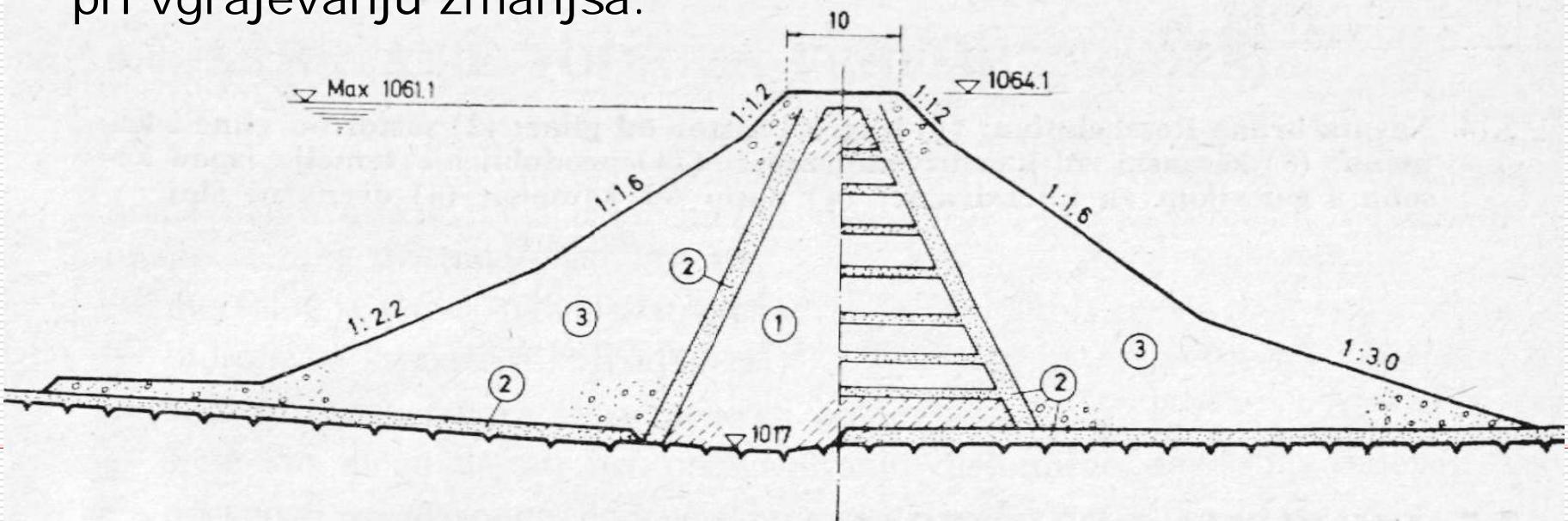
- razvrščanje materiala po **namenu**:
 - *tesnilni material* (koherentni, slabo propustni) – izbira je odvisna od dinamike vodostaja, debelini tesnilnega dela,...
 - *podporno telo* pregrade – primeren je vsak material
 - *filtrni material*
 - *zaščitna obloga* gorvodno mora biti erozijsko odporna
 - *balastni material* za dodatek masi pregrade in povečanju varnosti

Klimatske razmere

- padavine vplivajo pri vgrajevanju občutljivih materialov (koherenčni), manj občutljive so nekoherentni materiali (kamen, pesek, gramoz,...)
- koherenčni materiali z velikim indeksom plastičnosti so manj občutljivi na spremembe vlage – koheziven material pri utrjevanju doseže veliko odpornost in se lahko vgrajuje tudi pri večji vlagi.
- koherenčni materiali z nizkim indeksom plastičnosti pa zahtevajo optimalne pogoje pri vgradnji, ker v nasprotnem ni dosežena zadostna trdnost
- v klimatsko neugodnih razmerah je možno postaviti jedro na gorvodno stran in se prvo vgradi podporno telo, tesnilni del pa, ko so na voljo ustreerne klimatske razmere
- dobro granulirane nekoherentne materiale je možno vgrajevati v vsakem vremenu – stisljivost materiala je majhna in zato tudi ni pornih tlakov

Hitrost gradnje

- Pri hitri gradnji pregrad s širokim centralnim jedrom lahko izzovemo velike porne tlake za čas same gradnje – pobočja pregrade je treba izvesti v blažjem naklonu, kar pomeni več vgrajenega materiala.
- Problem lahko rešujemo z izvedbo horizontalnih propustnih slojev v dolvodnem delu jedra s čimer se prirast pornih tlakov pri vgrajevanju zmanjša.



Vloga zadrževalnika

- Pri suhih zadrževalnikih ali visokovodnih nasipih popolno tesnjenje pregradnega profila ni nujno potrebno izvesti. Zagotoviti je treba učinkovito dreniranje na dolvodnem delu pregrade, da ne pride do hidravličnega loma pete pregrade.
- Pri velikih sezonskih akumulacijah je priporočljivo načrtovanje z bolj konzervativnim pristopom. Pojav nepravilnosti na pregradi pomeni daljši izpad obratovalne pripravljenosti zaradi dolgotrajnosti polnitve ali praznitve akumulacije in nezmožnost hitrega reagiranja v primeru havarij. Pri manjših akumulacijah je reakcijski čas bistveno krajši in je lahko tudi načrtovanje manj konzervativno.
- V kolikor pregrada predstavlja veliko ogroženost za ljudi in poseljena območja dolvodno je treba načrtovati bistveno bolj konzervativno.

Zasnova pregrade – oblikovanje krone

- Pri izboru **širine krone** pregrade je treba upoštevati naslednje parametre, da:
 - omogoča možnost transporta za čas gradnje in kasneje za čas vzdrževanja ali javnega prometa čez pregrado:
 - minimalna širina krone $b_{min}=3m$ dolžina krone 200 do 300m
 - $b_{min}+1,5m$ – dolžina krone od 300 do 500m
 - $b \geq 6m$ – dolžina krone nad 500m
 - minimalna širina po tehničnih zahtevah za prometno infrastrukturo
 - predstavlja varnostno rezervo za povečanje varnosti zaradi erozije, posedanje pregrade ipd. S povečanjem širine krone se poveča tudi širina telesa pregrade na nivoju zaježitve.

Zasnova pregrade – oblikovanje krone

- ugodno vpliva na potresno odpornost objekta. Pomiki so največji na kroni pregrade. S širitvijo krone pregrade se poveča tudi količina materiala in zmanjša prodora vode skozi pregradno telo.
- se s povečano širino povečuje varnost objekta v primerih neugodnih morfološki in geotehničnih pogojih gradnje.
- Pravilo za določitev širine pregrade glede na višino: $b = 1 + A \cdot \sqrt{H}$
 - konstanta **A** = 1,1 do 1,65
 - širina pregrade **b** [m]
 - višina pregrade **H** [m]
- Normalna širina krone pregrade v odvisnosti od višine pregrade:
 - **H > 10m;** **3m < b < 6m**
 - **50m < H < 100m;** **6m < b < 10m**
 - **H > 100m;** **8m < b < 12m**

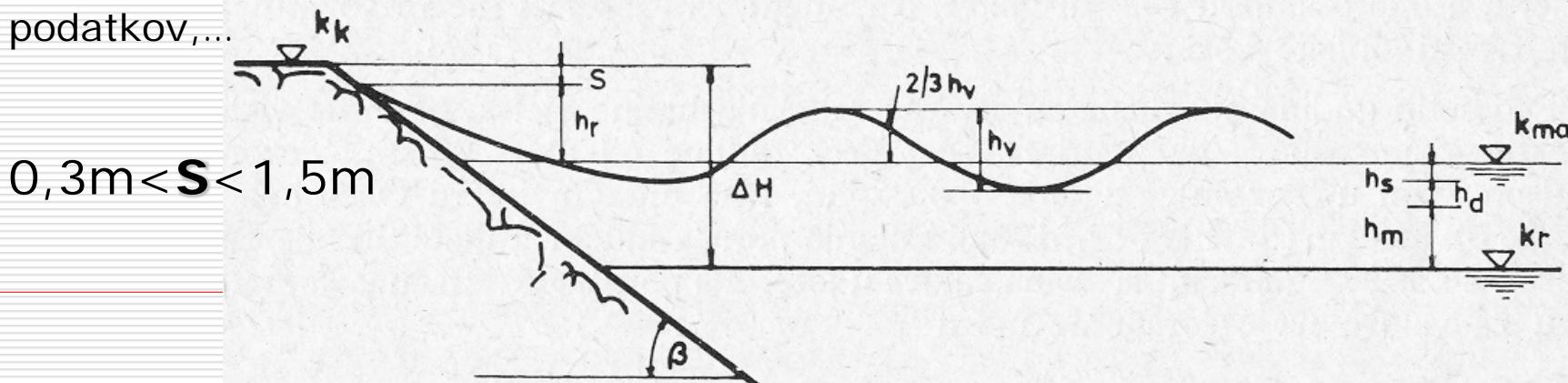
Zasnova pregrade – oblikovanje krone

- Nadvišanje krone je varnostni ukrep s katerim preprečimo preplavitev pregrade. Pri tem upoštevamo najbolj kritično vrednost glede (USBR):
 - **minimalno nadvišanje** pri maksimalni gladini mora biti: (1) vsaj 1m višje od maksimalne gladine oziroma (2) seštevek dviga zaradi valov in vzpenjanja vala po pobočju, ki je posledica pojava statistično povprečnega vetra pri pojavu poplavne vode (pri velikih akumulacijah je treba upoštevati veter z verjetnostjo pojava 0,1)
 - nadvišanje pri pojavu **maksimalni veter** in pri **normalni obratovalni gladini** mora upoštevati seštevek dviga zaradi valov in vzpenjanja vala po pobočju pregrade za maksimalno hitrost vetra (95 do 160 km/h)
 - **povprečno nadvišanje** glede na statistični pojav koncidence visoke vode, vetra in smeri vetra (praviloma z verjetnostjo 10^{-4})

Zasnova pregrade – oblikovanje krone

■ Pri računu nadvišanja upoštevamo naslednje dejavnike:

- globina vode h_m pri evakuaciji visoke vode preko preliva ali zapornice – določimo jo iz pogoja, da evakuacijski objekt prevaja merodajno visoko vodo (praviloma Q_{1000} oz. preveritev na Q_{10000})
- višina valov zaradi vetra h_v in vzpenjanja vala po pobočju h_p pri delovanju najmočnejšega vetra v najneugodnejši smeri
- dvig vode v akumulaciji zaradi plime, povzročene z vетrom h_d
- dvig gladine zaradi oscilacij jezera – seš h_s
- **S** predstavlja varnostni dvig zaradi tveganja, ki ga prelitje krone pregrade predstavlja za dolvodna območja in je odvisen od: **velikosti akumulacije, višine pregrade, površine ogroženih območij, negotovosti hidroloških podatkov,...**

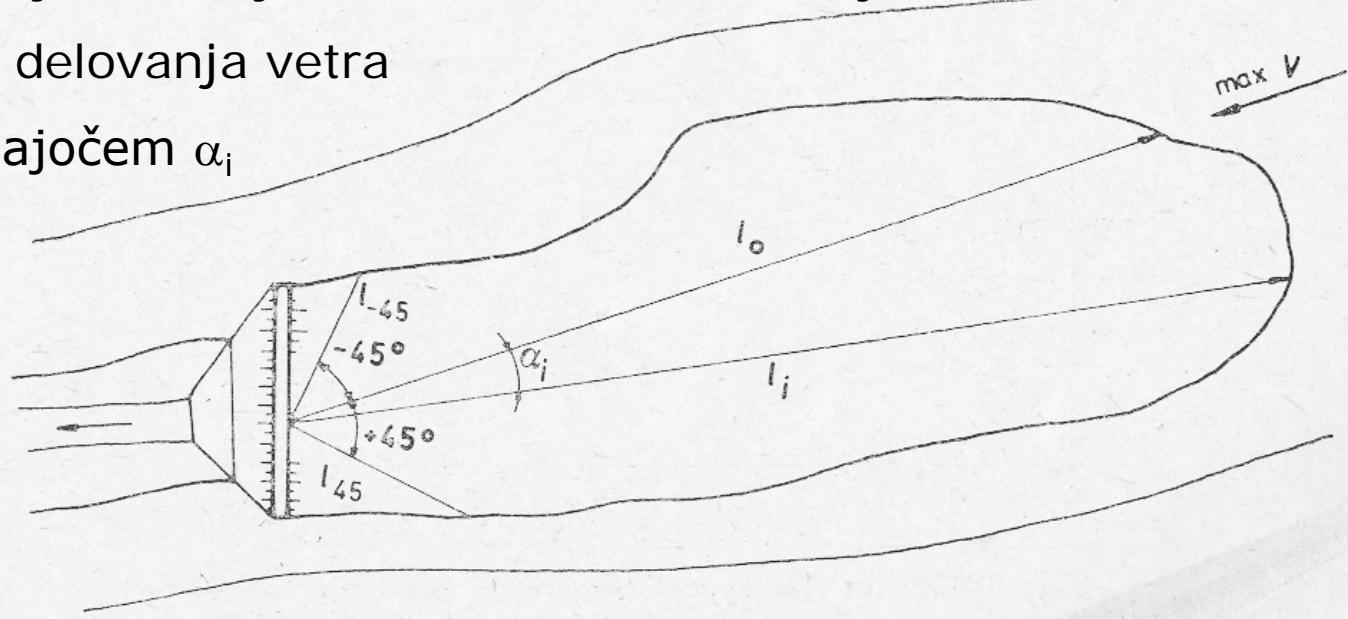


Zasnova pregrade – oblikovanje krone

- za določitev višine valov h_v je pomembna **dolžina razpona vetra**. Pri akumulacijah je omejena širina delovanja in zato računamo efektno dolžino L_e iz izraza:

$$L_e = \frac{\sum L_i \cdot \cos \alpha_i}{\sum \cos \alpha_i}$$

- $\alpha = \pm 45^\circ$ meja območja z odmikom od merodajne smeri vetra
- L_i dolžina delovanja vetra pri pripadajočem α_i



Zasnova pregrade – oblikovanje krone

■ Višina h_{vs} in dolžina l_{vs}

valov na odprtem morju:

$$h_{vs} = 0,005 \cdot v^{1,06} \cdot L_e^{0,47}$$

$$l_{vs} = 0,17 \cdot v^{0,88} \cdot L_e^{0,56}$$

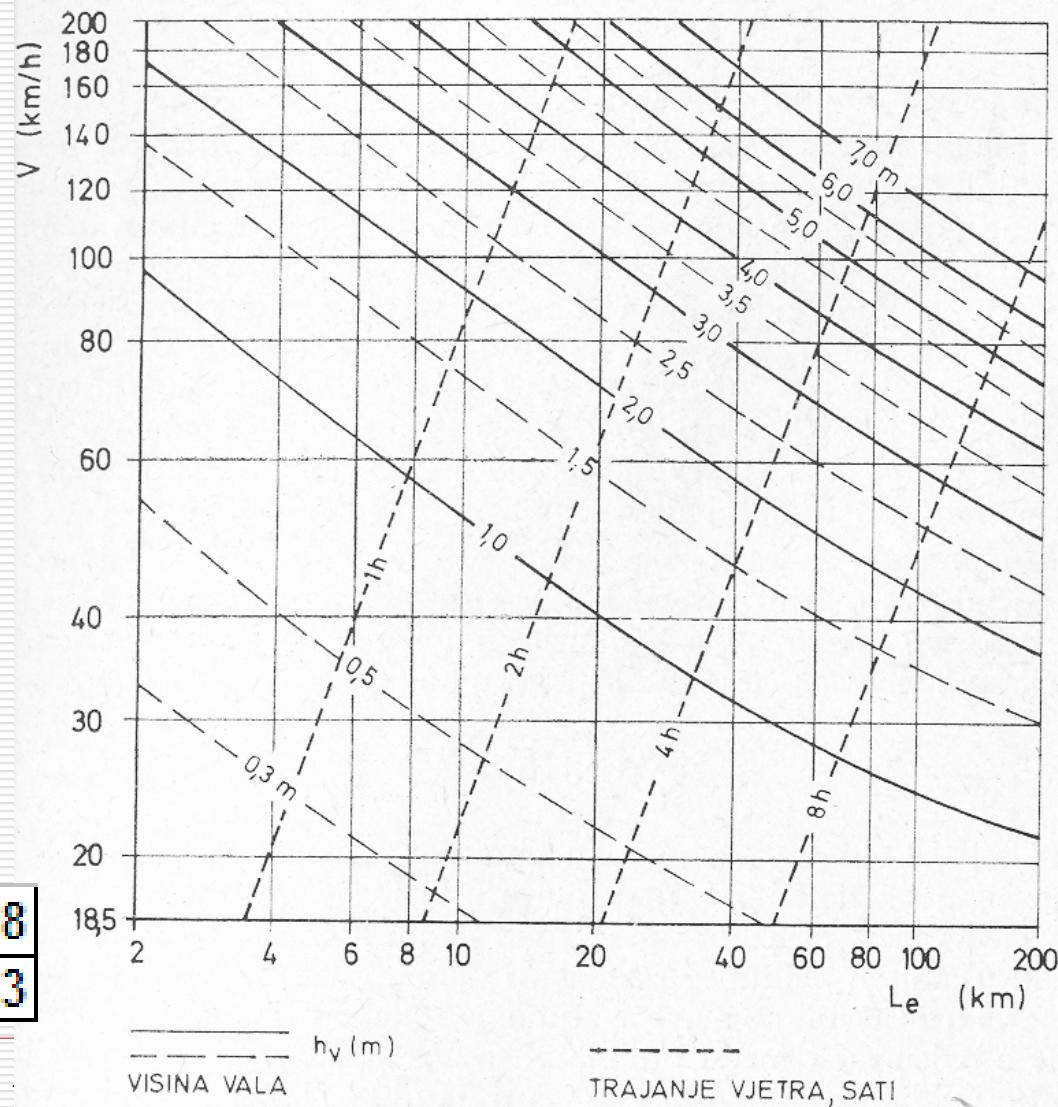
■ v ... hitrost [km/h]

■ L_e ... efektivna dolžina [km]

■ hitrost vetra na kopnem v_0 :

$$v = K \cdot v_0$$

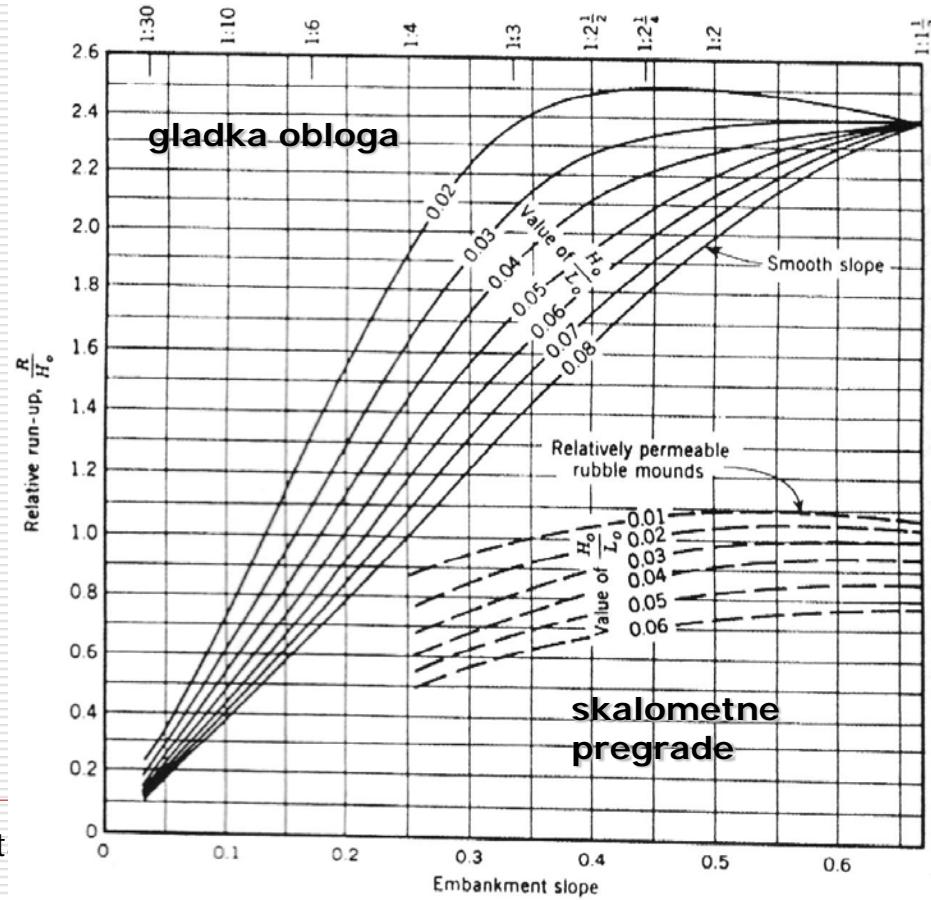
L_e [km]	0,8	1,6	3,2	4,8	6,4	>8
K	1,1	1,1	1,2	1,3	1,3	1,3



Zasnova pregrade – oblikovanje krone

- **Višina vzpenjanja** vala po pobočju h_p pregrade je odvisna od višine vala h_v , naklona pobočja β in valovne dolžine l_v (za zemeljske pregrade s skalometno zaščito):

$$h_p = \frac{h_v}{0,4 + (h_v/l_v)^{0,5} \cdot \cot \beta}$$



Zasnova pregrade – oblikovanje krone

- **Višina plimovanja** je posledica delovanja vetra, ki potiska vodno maso pred seboj. Pojav je posebej izrazit v širokih in plitvih, manj izrazit pa v globokih in ozkih jezerih. V tem primeru je vpliv dviga zaradi plimovanja upoštevan v varnostnem nadvišanju **S**. Višina plimovanja **h_d** je izražena z:

$$h_d = \frac{v^2 \cdot L}{6,3 \cdot D} \cdot 10^{-4} \cdot \cos \alpha$$

- D ... globina jezera [m]
- α ... kot merodajnega vetra na pravokotnico na os pregrade
- L ... merodajna dolžina delovanja vetra [km]
- v ... merodajna hitrost [km/h]

Zasnova pregrade – oblikovanje krone

- **Seš** nastane kot posledica oscilacij barometrskega tlaka, nestacionarnega delovanja vетra, potresa, nestacionarnega obratovanja ipd. V velikih jezerih so lahko nihanja velika (nekaj metrov), pri manjših jezerih pa so nihanja majhna $\sim 0,15\text{m}$. Ker metode izračuna niso natančne se praviloma višina seš **h_s** se praviloma upošteva v okviru varnostnega nadvišanja **S**.
- Varnostna višina nadvišanja znaša:

$$\Delta H = h_m + h_p + h_d + h_s + S > 1,5\text{m}$$

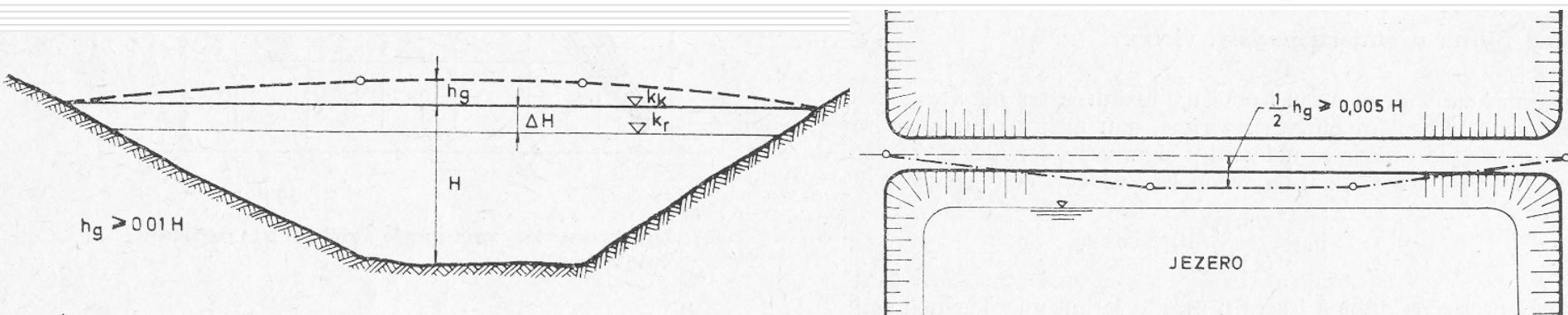
in mora biti najmanj $1,5\text{m}$. Ta višina zadošča tudi za zagotavljanje zaščite pred delovanjem **živali** na pregradi – njihove aktivnosti segajo največ do te globine.

Zasnova pregrade – oblikovanje krone

- **Nadvišanje krone zaradi posedanja** Zaradi konsolidacije se pregrada po zaključku gradnje posede in zato je treba nadvišati v vsaki točki krone za h_g :

$$h_g = \epsilon \cdot H$$

- ϵ ... deformacija v vertikalni smeri zaradi konsolidacije $\epsilon > 0,01$
- H ... višina pregrade v računskem profilu
- ker hidrostatski tlak deformira pregrado v dolvodni smeri je treba os krone pregrade pomakniti na gorvodno stran za velikost izračunanih pomikov oz. vsaj za pogoj: $\frac{1}{2}h_g$

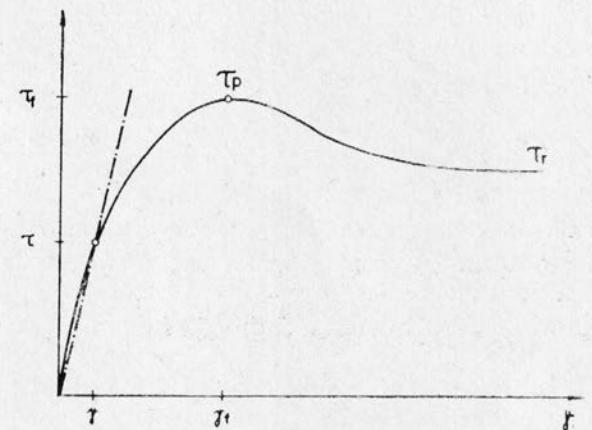


Zasnova pregrade – stabilnost pregrad

- Osnovne dimenzijske pregrade so opredeljene na osnovi pogojev, ki opredeljujejo širino krone, maksimalne kote gladine v akumulaciji in naklon pobočij, ki je odvisen od vgrajenega materiala.
- Naklon pobočij mora zadoščati minimalni varnosti, da ne pride do porušitve, ki se lahko pojavi kot drsina na:
 - pobočju pregrade
 - temeljnih tleh
- Material obravnavamo kot idealno plastičen. Varnost pred porušitvijo je izražena s varnostnim koeficientom F_s :

$$F_s = \frac{\tau_f}{\tau}$$

- τ_f ... **strižna trdnost**
- τ ... **strižna odpornost**



Zasnova pregrade – stabilnost pregrad

- Pregrada prenaša vso delajočo obtežbo, vključno z lastno težo na temeljna tla.
- Pri mehanski analizi pregrade preverjamo:
 - stabilnost **pobočij pregrade**
 - stabilnost **temeljnih tal**
- Porušitev v zemeljskem materialu nastane, ko strižne napetosti presežejo kritično vrednost trdnosti materiala in se pri stalni obremenitvi povečujejo deformacije. Strižna odpornost je dana z izrazom (Coulomb):

$$\tau_{f_u} = c_u + \sigma \cdot \tan \phi_u$$

- τ_{f_u} ... porušna (totalna) strižna napetost
- σ ... totalna normalna napetost
- c_u ... navidezna kohezija
- Φ_u ... navidezni strižni kot

Zasnova pregrade – stabilnost pregrad

- **Porni tlaki** zmanjšujejo efektni tlak zemljine. V kolikor je zemljina zasičena se pod obremenitvijo volumsko deformira le ob pogoju, ko se iz zemljine začne izcejati voda (proces konsolidacije). V tem procesu spremembo napetosti prevzame najprej porni tlak, efektivne napetosti se povečujejo, ko pride do iztisnjenja vode iz por in zmanjšanja volumna zemljine - posledično se z dreniranjem zmanjšujejo porni tlaki.
- Porušna strižna napetost τ_f z upoštevanjem pornih tlakov:

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan \phi'$$

- σ' = (σ - u) ... efektivna normalna napetost
- u ... porni tlak zaradi spremembe napetostnega stanja
- c' ... navidezna kohezija
- Φ' ... efektivni strižni kot

Zasnova pregrade – stabilnost pregrad

- Vrednosti za varnostni koeficient je določena na osnovi probabilističnih opazovanj in vključuje vse negotovosti kar zadeva:
 - raziskave nahajališč in ustreznosti materialov za gradnjo
 - odstopanja rezultatov laboratorijskih preiskav lastnosti materiala
 - odstopanja pri gradnji kot posledica spremenjenih pogojev, rokov, tehnologij gradnje,...
 - pojav dodatnih deformacij tekom obratovanja
- Okvirne vrednosti F_s za velike pregrade:
 - stalna in lastna obtežba $F_s \geq 1,5$
 - občasna obtežba $F_s \geq 1,3$
 - izjemna obtežba $F_s \geq 1,0$

Zasnova pregrade – stabilnost pregrad

- Delajoče stalne obtežbe na pregrado:
 - stalna (nespremenljiva) obtežba – lastna teža **G**

$$G = \iiint_V \gamma \cdot dV$$

$$\gamma = (1 - n) \cdot \gamma_s + n \cdot \gamma_w \cdot S_r$$

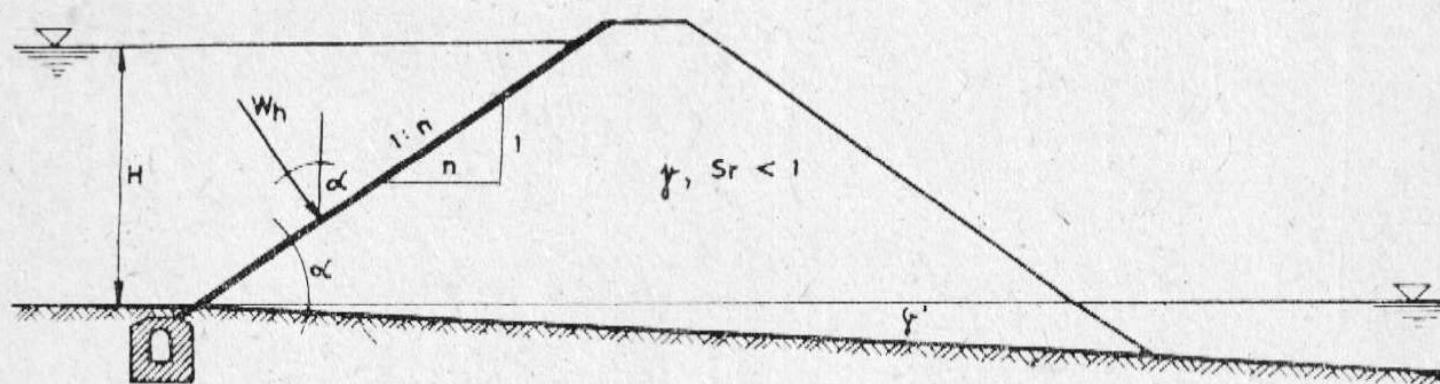
- **V** ... volumen pregrade [m^3]
- **γ** ... specifična teža omočenega telesa pregrade [kN/m^3]
- **γ_s** ... specifična teža materiala [kN/m^3]
- **γ_w** ... specifična teža vode [kN/m^3]
- **n** ... delež por [%]
- **S_r** ... stopnja zasičenosti $0 < S_r < 1$ (0 – suh; 1 – polno zasičen)

Zasnova pregrade – stabilnost pregrad

- rezultanta obtežbe z vodo W_h deluje na gorvodno nepropustno zaporo (jedro, membrana, pobočje):

$$W_h = \frac{H^2 \cdot \gamma_w}{2} \cdot \sqrt{1+n^2}$$

- H ... višina najvišje zajezitve [m]
- n ... naklon nepropustne ploskve na katero deluje vodni tlak
- S_r ... stopnja zasičenosti $0 < S_r < 1$ (0 – suh; 1 – polno zasičen)
- dolvodno od nepropustne zapore obravnavam material kot suh, ali deloma zasičen ($S_r < 1$) nad nivojem spodnje vode.



Zasnova pregrade – stabilnost pregrad

- **vzgon** deluje v vsaki točki telesa pregrade, ki je pod nivojem gladine vode in deluje v nasprotni smeri delovanja težnostnih sil z intenziteto $-\gamma_w$
- **hidrodinamični tlak** se pojavi v polju spremenljivega potenciala in deluje v vsaki točki telesa pregrade skozi katero se preceja voda:

$$\vec{j} = \frac{\partial h}{\partial n} \cdot \gamma_w$$

- h ... funkcija hidrodinamičnega potenciala
- n ... normala na ekvipotencialno linijo

Zasnova pregrade - precejanje vode

- Stacionarno strujanje vode v pregradi (Darcyjev zakon):

$$\vec{v} = k \cdot \vec{i}$$

- k ... koeficient propustnosti v smeri toka

$$\vec{i} = \frac{\partial h}{\partial s}$$

- i ... gradient potenciala v smeri toka
 - h ... piezometrska višina

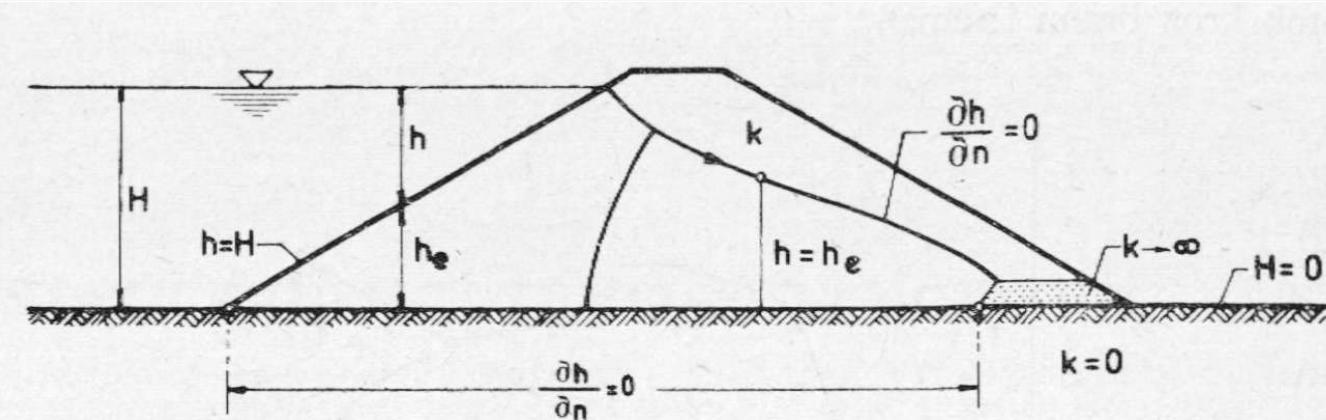
- Funkcija potenciala $h(x,y,z)$ mora zadovoljiti Laplaceovo enačbo ob upoštevanju začetnih in robnih pogojev:

$$k_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + k_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

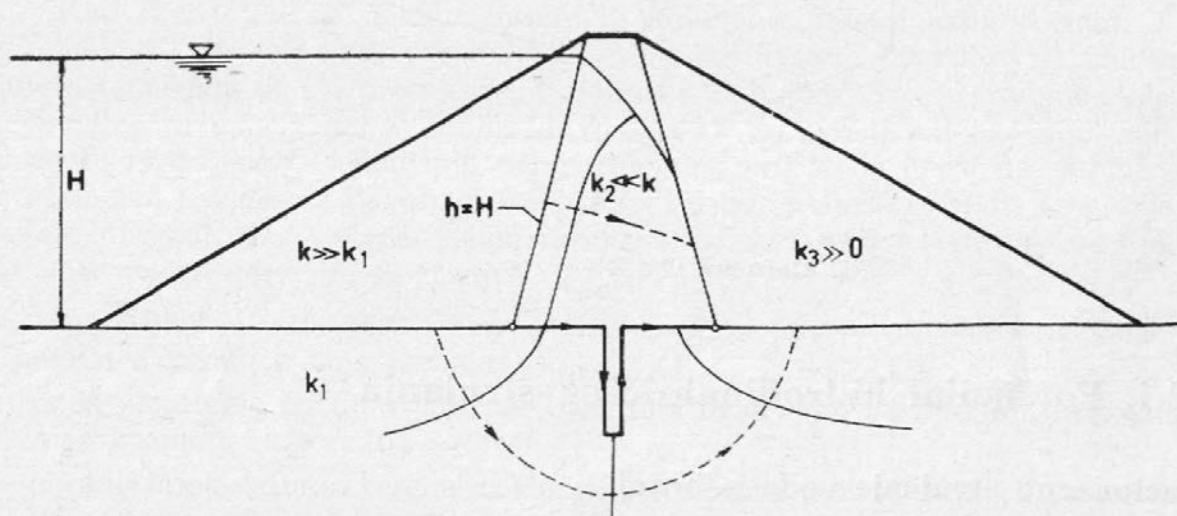
- Reševanje enačbe: **analitično, grafično, numerično**

Zasnova pregrade - precejanje vode

- robni pogoji pri precejanju vode skozi pregrado na nepropustni podlagi



- robni pogoji pri precejanju vode skozi pregrado na propustni podlagi

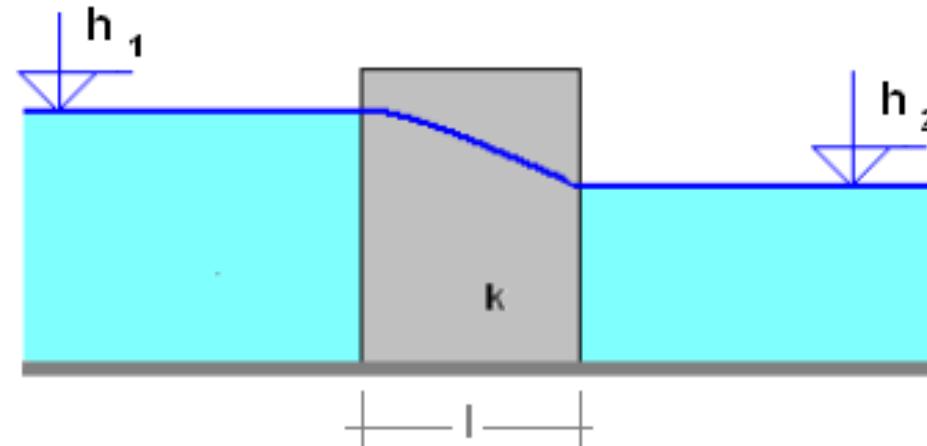


Zasnova pregrade - precejanje vode

■ **Analitične rešitve** so primerne za enostavne primere z upoštevanjem približno horizontalnega toka:

$$q = \frac{k \cdot (h_1^2 - h_2^2)}{2 \cdot l}$$

- q ... specifični pretok [$\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$]
- h_1, h_2 ... piezometrski višini [m]
- l ... dolžina precejanja [m]
- k ... koeficient propustnosti [m/s]



Zasnova pregrade - precejanje vode

- **Grafična rešitev** tokovnice in ekvipotencialne linije omejujejo ekvidimenzijske površine
- pretok med dvema tokovnicama mora biti enak vzdolž tokovnice
- pretok skozi presek se izračuna z integriranjem hitrosti in površine preseka

- hitrost med dvema tokovnicama $v = i \cdot k = \frac{\Delta h}{l_s} \cdot k$

- za anizotropen material velja: $k = k' \quad k' = \sqrt{k_h \cdot k_v}$

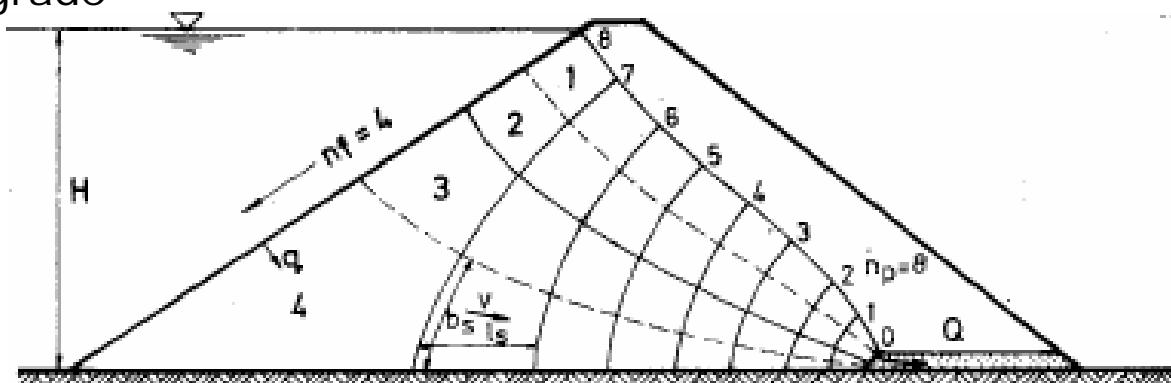
- razlika potenciala med sosednima ekvipotencialnima linijama

$$\Delta h = \frac{H}{n_p}$$

- specifični pretok med dvema tokovnicama $q = v \cdot b_s$

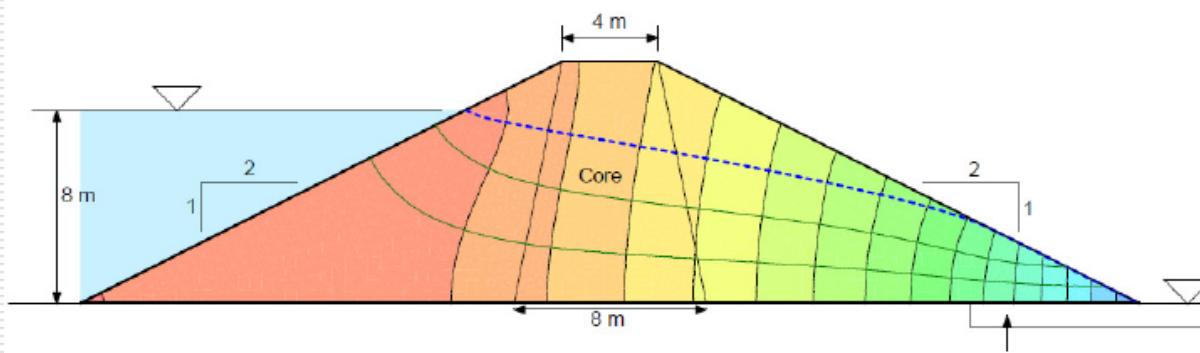
- pretok skozi telo pregrade

$$Q = n_f \cdot q$$

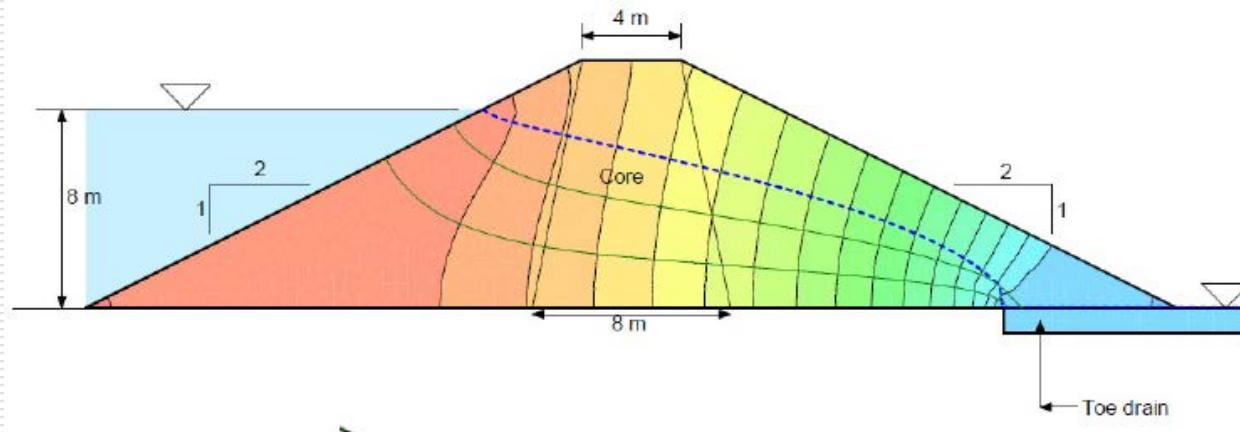


Zasnova pregrade - precejanje vode

- homogena pregrada:

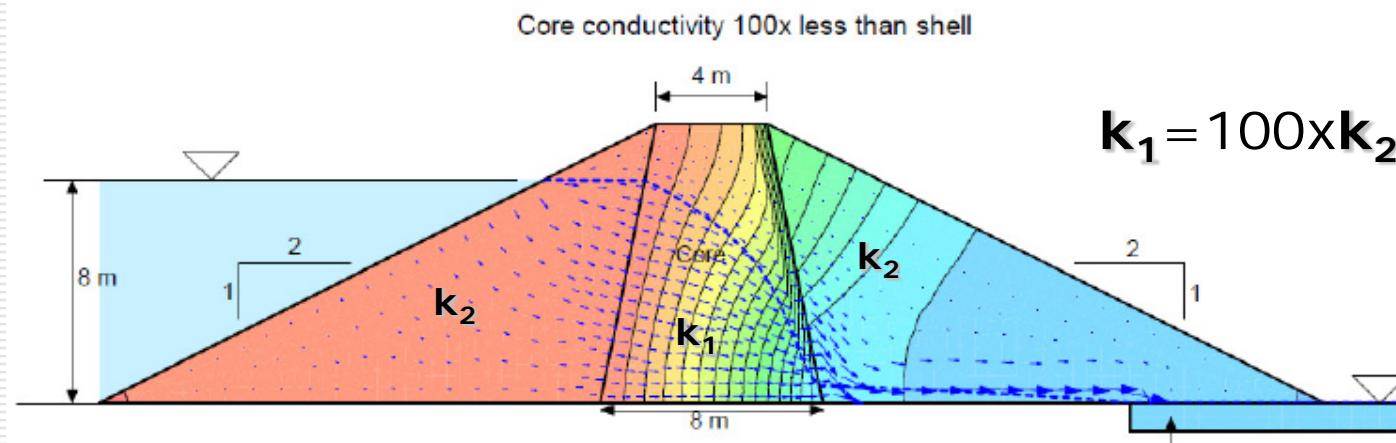
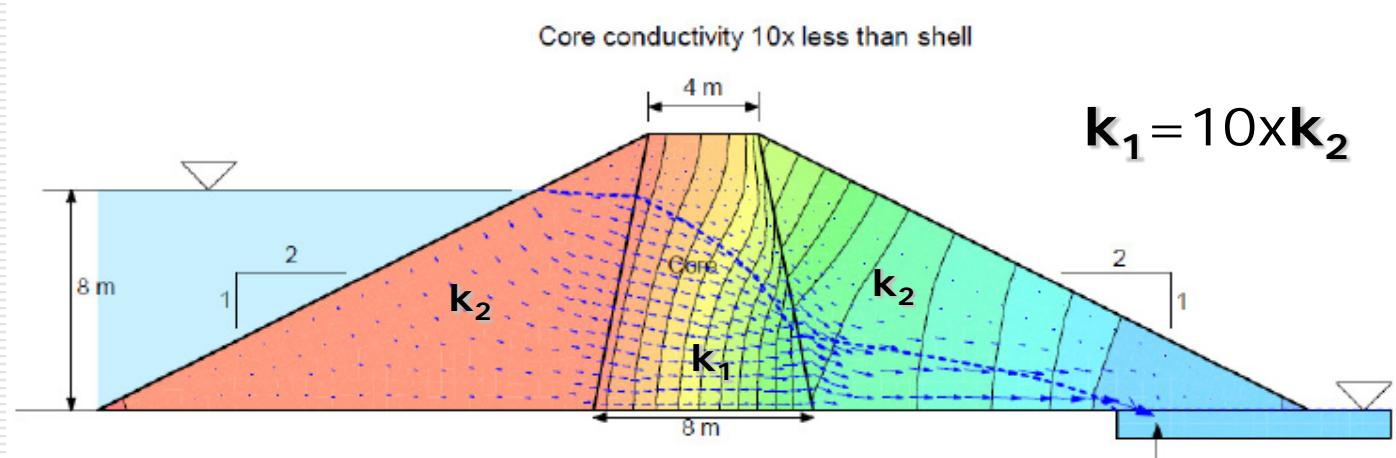


- homogena pregrada z drenažno preprogo:



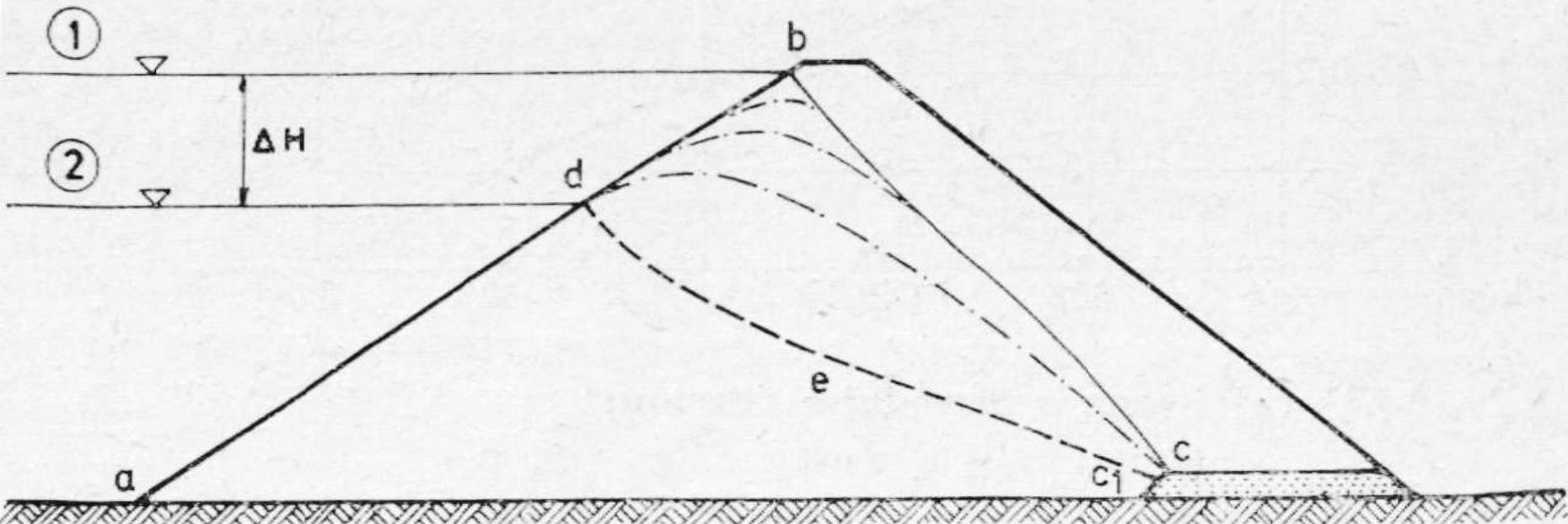
Zasnova pregrade - precejanje vode

- Pregrada s centralnim tesnilnim jedrom:



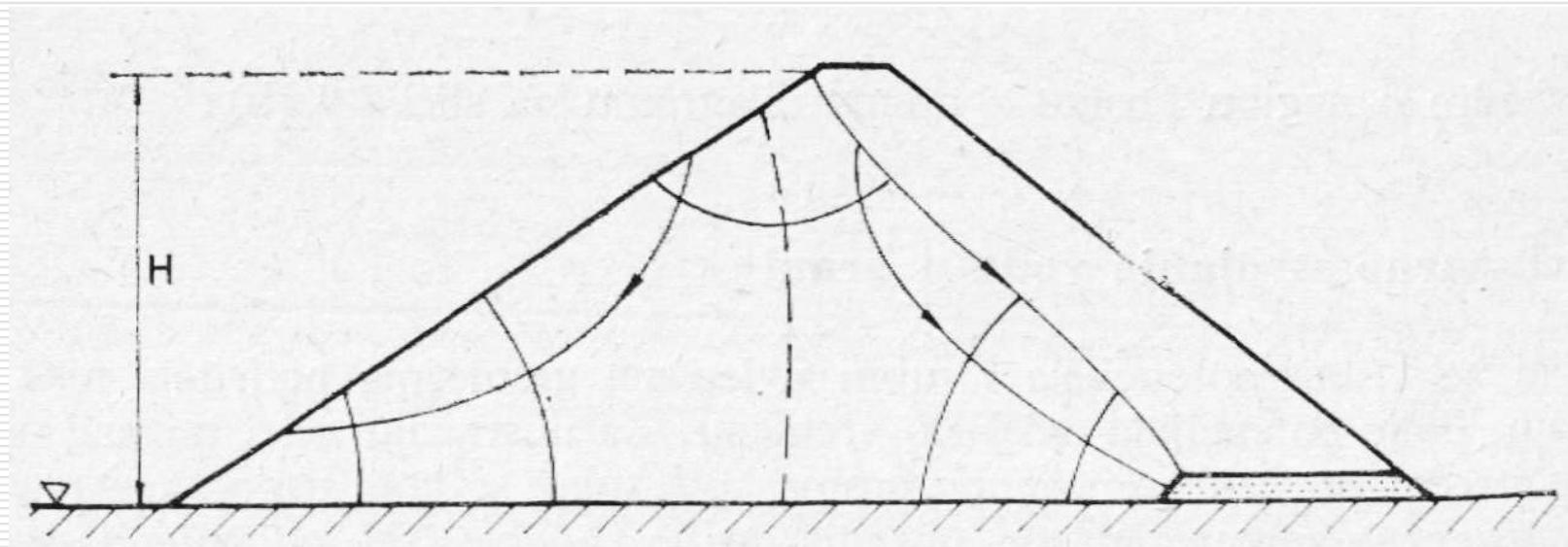
Zasnova pregrade - precejanje vode

■ **Nestacionarno precejanje vode** pa se pojavi, ko se robni pogoji spreminjajo s pretokom in časom.



Zasnova pregrade - precejanje vode

- S hitrim znižanjem kote gladine v akumulaciji se del toka preusmeri proti gorovdni strani pregrade in del v telo pregrade, dokler ni vzpostavljeno stacionarno stanje na novi obratovalni koti
- Zaostajanje vode v nasipu je odvisno od **hitrosti znižanja gladine, poroznosti materiala in koeficiente propustnosti.**



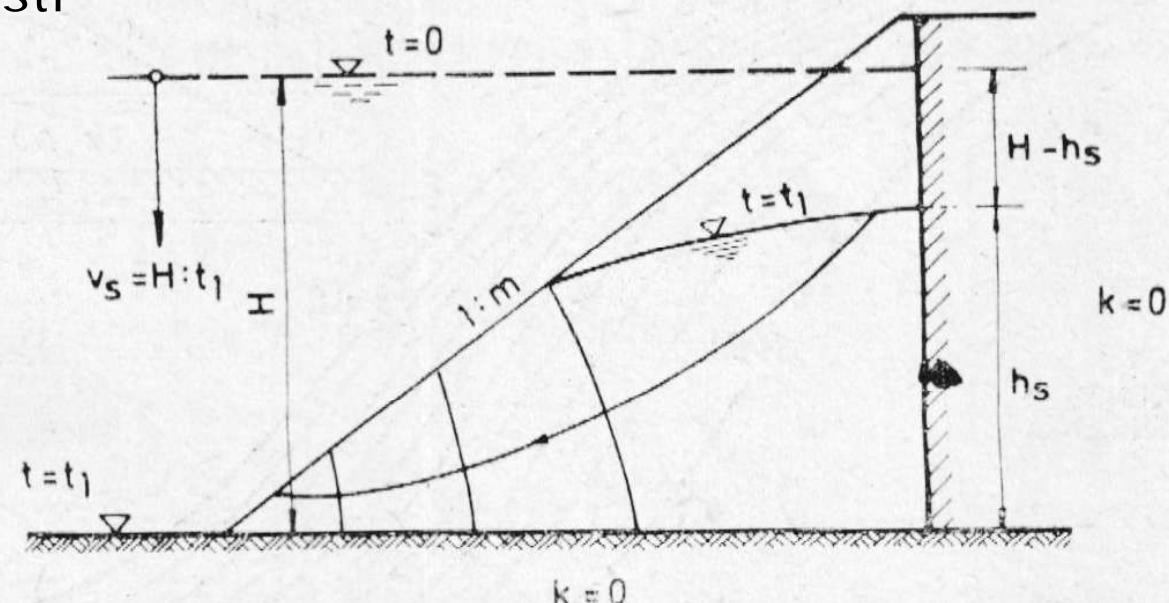
Zasnova pregrade - precejanje vode

- Pri polni praznitvi akumulacije v nekem času t_1 se v pregradi z nepropustnim jedrom vzpostavi gladina na koti h_s , ki je posledica izcejanja vode iz telesa pregrade v času upada gladine v akumulaciji.
- Velikost upada je odvisna od hitrosti praznitve akumulacije v_s , poroznosti materiala v pregradi n , nagibu pobočja m , koeficiente propustnosti k in gradientov tlaka:

$$h_s = (1 - \alpha) \cdot H$$

$$\alpha = f(N)$$

$$N = \frac{k}{n \cdot v_s}$$



Zasnova pregrade - precejanje vode

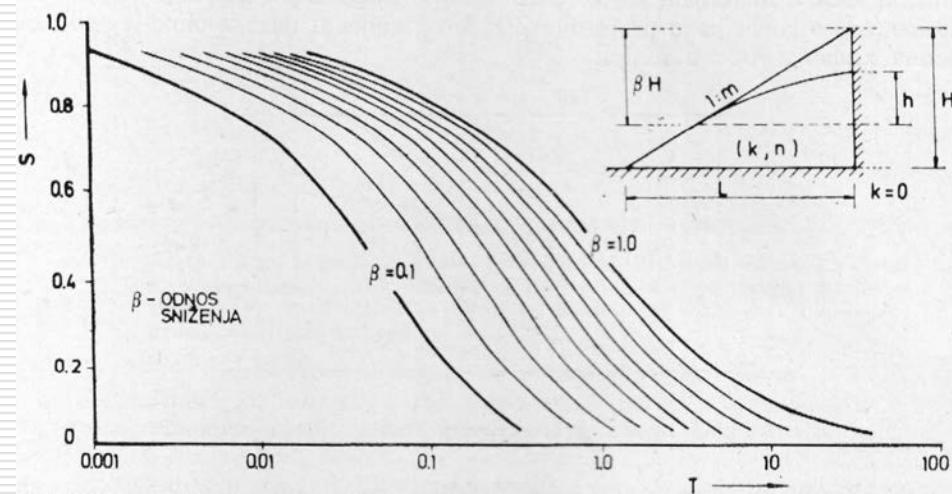
- Za delno praznitev lahko, ob predpostavki, da je hitrost praznjenja akumulacije velika, naklon pobočja znaša $2 < m < 3$, izračunamo gladino upada gladine v pregradi **h** v času **t** in v odvisnosti od parametra **T**:

$$h = s \cdot \beta \cdot H$$

- **β**... faktor znižanja gladine

$$T = \frac{k \cdot H \cdot t}{c \cdot n \cdot L^2}$$

- k ... koeficient propustnosti [cm/s]
- $0,1 < c < 0,7$ (v nomogramu 0,5)
- n ... relativna poroznost
- t ... čas znižanja gladine [s]
- L ... širina podpornega dela na gorvodni strani $L=m \cdot H$



Zasnova pregrade – notranja erozija

- **Notranja erozija** je proces pri katerem zaradi strujnih sil precedne vode pride do premeščanja zrn skozi pore v telesu pregrade ali v temeljnih tleh. Delci se lahko spet usedajo v območju, kjer se hitrost strujanja zmanjša (široke pore) ali pa pri zožitvi por.
- Pojav notranje erozije predstavlja tveganje tako v temeljnih tleh, kot v telesu pregrade. Temeljna tla pod pregrado se zaradi spiranja rahljajo in zaradi stalne obtežbe nastajajo dodatne deformacije; v telesu pregrade pa pride do spiranja delcev na meji med drobnimi in grobimi frakcijami, kar lahko prevede do preboja telesa pregrade.
- Notranja erozija poteka na dva načina:
 - strujne sile premeščajo zrna iz osnovne strukture (tal ali teles pregrade) na površino od koder se proces regresivno širi v notranjost strukture – **erozija**
 - strujne sile premeščajo drobna zrna skozi pore med grobozrnatim delom osnovne strukture - **sufozija**

Zasnova pregrade – notranja erozija

- **Hidravlični lom** nastane, ko je strujni tlak, ki je usmerjen navzgor večji od teže pregrade. Pojav hidravličnega loma je s hidravličnim gradientom i_c :

$$i_c = (1-n) \frac{(\gamma_s - \gamma_w)}{\gamma_w} = \frac{\gamma'_s}{\gamma_w}$$

- γ'_s ... specifična teža nasipa, zmanšanega za vzgon
- γ_w ... specifična teža vode

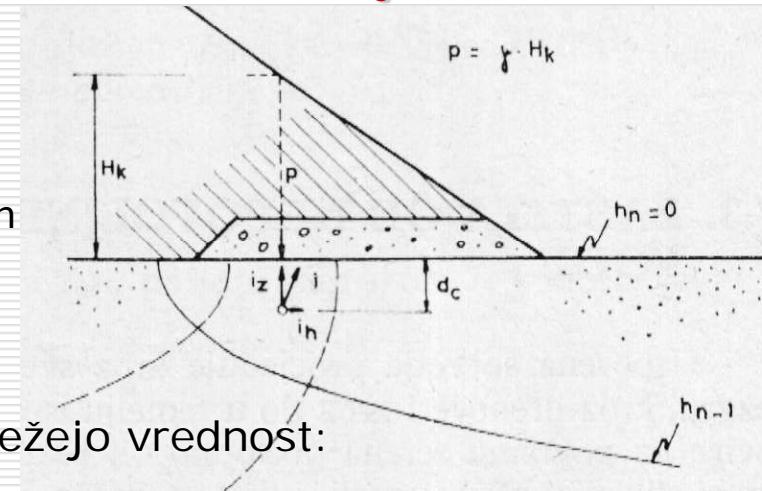
- Hidravlični lom nastane pri pogoju, ko efektivne napetosti na kontaktu pregrada temeljna tla dosežejo vrednost:

$$\gamma'_s - i_c \cdot \gamma_w = 0$$

- Pregrade je treba dimenzionirati z dovolj velikim faktorjem varnosti proti pojavu hidravličnega loma, kjer je dovoljen hidravlični gradient i_a :

$$i_a = \frac{i_c}{F}$$

- **F ... faktor varnosti:** **gramoz 4~5; grobi pesek 5~6; droban pesek 6~7**



Zasnova pregrade – notranja erozija

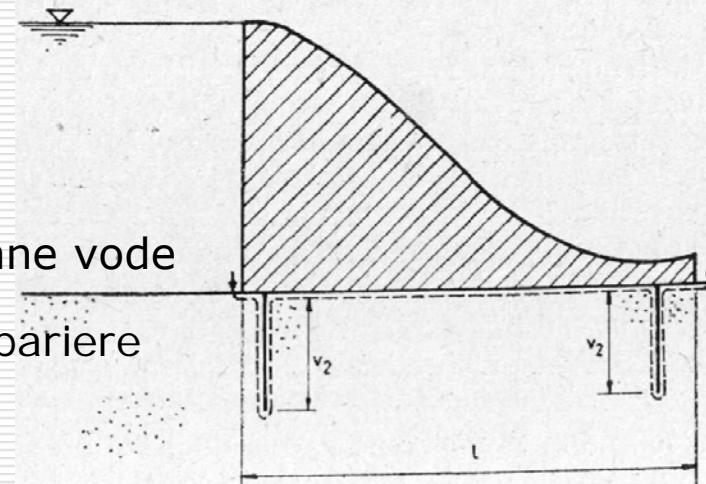
- **Regresivna erozija** je posledica pojava hidravličnega loma, ko pride do napredajočega procesa odnašanja materiala na kontaktu temeljnih tal in telesa pregrade.
- Da bi preprečili nevarnost pojava regresivne erozije se izvede naslednje:
 - **podaljšanje poti precejanja** vode pod pregrado:
 - z izvedbo **tesnilne preproge** na gorvodnem delu pregrade z izvedbo **tesnilne zavese** v centralnem delu pregrade (diafragma, injekcijska zavesa)
 - premestitev iztoka precedne vode z **drenažno preprogo** v območje pod pregrado
 - usmerjanje toka podzemne vode izven območja temeljev pregrade z izgradnjo **drenažnih vodnjakov** pod pregrado

Zasnova pregrade – notranja erozija

- Vertikalna bariera je v primerjavi z tesnilno preprogo na vodni strani bolj učinkovita, ker je običajno propustnost v horizontalni smeri večja kot v vertikalni.
- Dolžina nepropustnega preproge **B**, ali globina tesnilne zavese **D** se določi na osnovi razmerja med ponderirano dolžino precejanja **L** in višino pregrade **H**, pri čemer je:

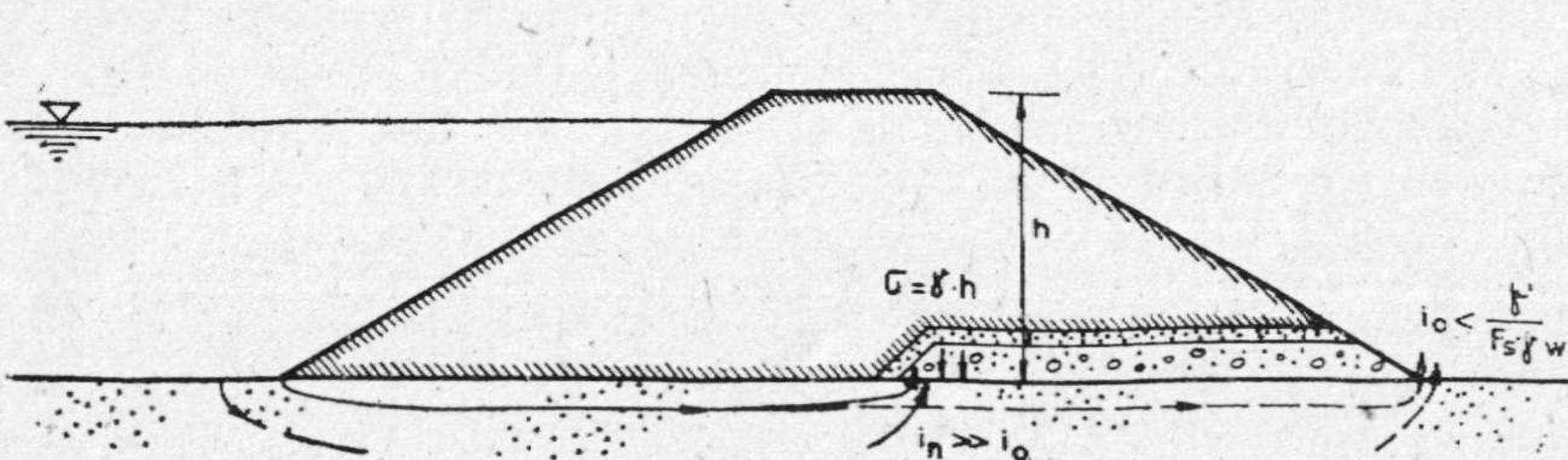
$$L = \frac{1}{3} + \sum 2 \cdot v_i$$

- **I** ... razdalja med točko ponora in izvira podzemne vode
- **v_i** ... dolžina poti precejanja okoli nepropustne bariere v temeljnih tleh
- **L/H** ... trdna glina **1,6~1,8**; mehka glina **2~3**; grušč s samicami **2,5**; gramoz **3~4**; pesek **5~6**; droban pesek/melj **7~8,5**



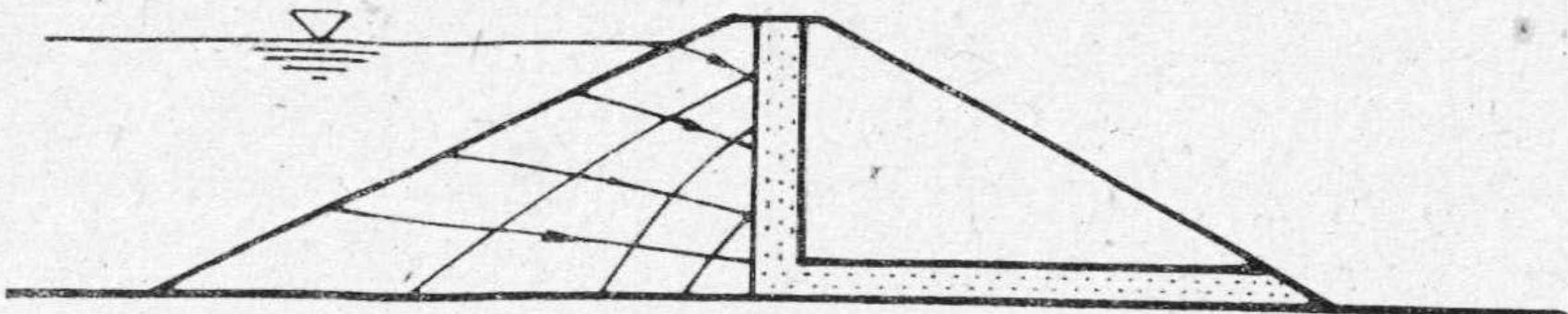
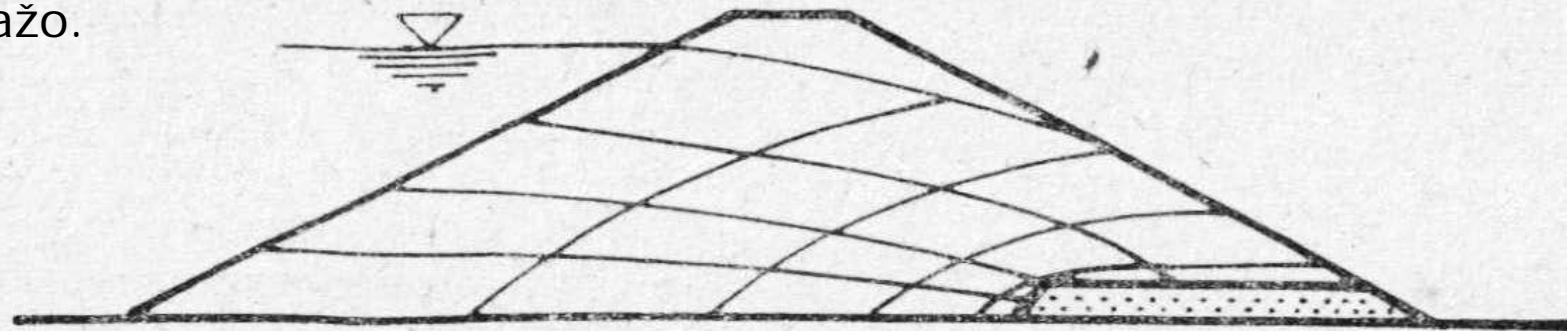
Zasnova pregrade – notranja erozija

- Vodoravna **drenažna preproga** na kontaktu pregrade s temeljnimi tlemi omogoča, da precejšna voda izteka v drenažni sloj z višjim hidravličnim gradientom kot je dopustni i_a , ker je površina obtežena s težo nasipa pregrade. V nožici pregrade pa hidravlični gradient i_c mejne vrednosti ne sme presegati



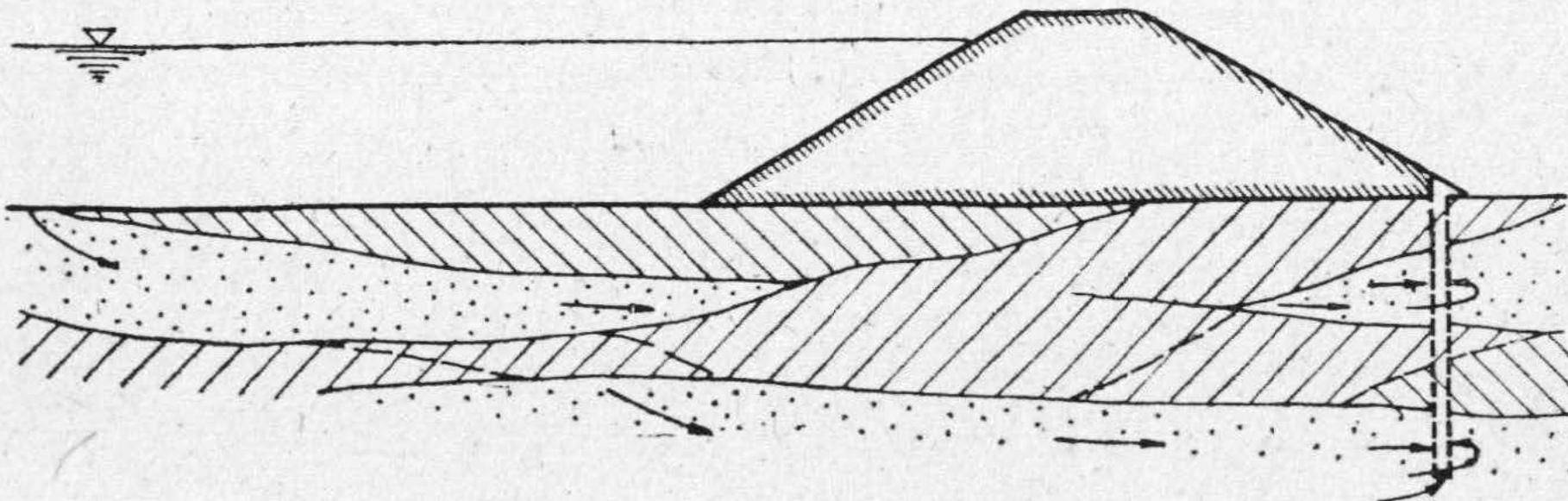
Zasnova pregrade – notranja erozija

- V kolikor gre pri precejanju vode za **anizotropno propustnost materiala**, kjer je propustnost v horizontalni smeri večja kot pri vertikalni smeri izvedba drenažne preproge ni učinkovita in je treba izvesti vertikalno drenažo.



Zasnova pregrade – notranja erozija

■ **Drenažne vodnjake** izvedemo na dolvodni strani pregrade v primeru, ko gre za **slojevitost temeljnih tal** z različno propustnostjo posameznih slojev. S drenažnimi vodnjaki zagotovimo učinkovito usmerjanje toka vode v horizontalni smeri in odvod izven območja pregrade. Vodnjaki morajo biti opremljeni z odgovarjajočimi filteri, da ne pride do erozijskih procesov v temeljnih tleh. Upoštevati pa je treba, da se z vodnjaki poveča pretok pod pregrado



Zasnova pregrade – stabilnost pobočij pregrad

- **Pobočja pregrade** so v ravnovesnem stanju, če je strižna trdnost vgrajenega materiala večja od potrebne strižne napetosti za ohranjanje ravnovesnega stanja na pobočju.
- **Mejno stanje** nastane, če so pobočja prestrma ali pa pri neugodnem obtežnem slučaju, ko so strižne trdnosti materiala prekoračene in pride do porušitve pobočja.
- **Porušitev pobočja** praviloma nastopi v območju materiala manjše trdnosti (zaradi minimalnih odstopanj trdnosti materiala) in se postopoma širi z napredujočo deformacijo.

Zasnova pregrade – stabilnost pobočij pregrad

- **Naklon pobočij** je definiran glede na:
 - vrednosti varnostnega faktorja pri najneugodnejšem obtežnem stanju
 - pričakovane deformacije pregrade, ki ne smejo ogrožati funkcionalnost objekta
- Priporočene vrednosti naklonov pobočij pri **homogenih pregradah**:
 - vodna stran (občasna ojezeritev/stalna ojezeritev)
 - glineni peski/gramoz ~ **2,5** (občasno) ~ **3** (stalno)
 - malo stisljive gline in melji ~ **3** (občasno) ~ **3,5** (stalno)
 - zelo stisljive gline in melji ~ **3,5** (občasno) ~ **4** (stalno)
 - zračna stran (občasna ojezeritev/stalna ojezeritev)
 - glineni peski/gramoz ~ **2** (občasno) ~ **2** (stalno)
 - malo stisljive gline in melji ~ **2,5** (občasno) ~ **2,5** (stalno)
 - zelo stisljive gline in melji ~ **2,5** (občasno) ~ **2,5** (stalno)

Zasnova pregrade – stabilnost pobočij pregrad

- Priporočene vrednosti naklonov pobočij pri **slojevitih pregradah** (skalometne in zemeljske) na sorazmerno dobri temeljni podlagi s tesnilnim jedrom iz:
 - vodna stran (občasna ojezeritev/stalna ojezeritev)
 - glineni peski/gramoz ~ **2÷2,25** (občasno) ~ **2** (stalno)
 - malo stisljive gline in melji ~ **2,5** (občasno) ~ **2,5** (stalno)
 - zelo stisljive gline in melji ~ **3** (občasno) ~ **3,5** (stalno)
 - zračna stran (občasna ojezeritev/stalna ojezeritev)
 - glineni peski/gramoz ~ **2÷2,25** (občasno) ~ **2÷2,25** (stalno)
 - malo stisljive gline in melji ~ **2,5** (občasno) ~ **2,5** (stalno)
 - zelo stisljive gline in melji ~ **3** (občasno) ~ **3** (stalno)
- V primeru slabših pogojev temeljenja je treba priporočene naklone zmanjšati, lahko tudi z vmesnimi bermami.
- Pri **skalometnih pregradah** z gorvodno **tesnilno oblogo** se na vodni strani nakloni lahko povečajo ~ **1,3 ÷ 1,4** (geomembrana, betonska obloga) in ~ **1,6~1,7** (asfaltna obloga); na dolvodni strani pa ~ **1,3~1,4**.

Zasnova pregrade – stabilnost pobočij pregrad

- Pri analizi stabilnosti pobočij pregrade je treba upoštevati tudi stanja v katerem se pregrada nahaja:
 - stanje za čas gradnje pregrade
 - prva polnitev akumulacije do nazivne kote
 - praznjenje/polnjenje akumulacije
 - dinamične obremenitve zaradi potresne obtežbe
- Za stalno obtežbo so merodajni naslednja stanja:
 - Stabilnost pobočij pregrade za **čas gradnje**: Z napredujočo gradnjo se povečujejo napetosti v temeljnih tleh in že vgrajenem nasipu. Z naraščanjem napetosti se povečuje tudi porni tlak (efektivni tlaki sprva počasneje naraščajo) in pri malo propustnih temeljnih tleh ali v primeru hitre gradnje jedra iz slabo propustnega materiala lahko pride do prekoračitve trdnosti materiala in porušitve. Rast pornih tlakov je neposredno povezano s hitrostjo gradnje.

Zasnova pregrade – stabilnost pobočij pregrad

- Stabilnost pobočij pregrade za **čas polnjenja akumulacije**: To je primer glavnega obtežnega slučaja, kjer je treba zadostiti kriteriju dosega maksimalne vrednosti varnostnega faktorja. V kolikor še ni bila dokončana konsolidacija materiala je treba izvesti korekcijo z upoštevanjem pornega tlaka pri precejanju vode skozi telo pregrade. Po končani konsolidaciji materiala upoštevamo samo hidrodinamični tlak z upoštevanjem efektivnih napetosti.
- Stabilnost pobočij pregrade pri **praznjenju akumulacije**: Znižanje gladine povzroči povečanje efektivnih napetosti v jedru in malo propustnem materialu v podpornih gorvodnih slojih zaradi pornih tlakov in spreminjačih hidrodinamičnih tlakov zaradi dreniranja vode iz telesa pregrade.

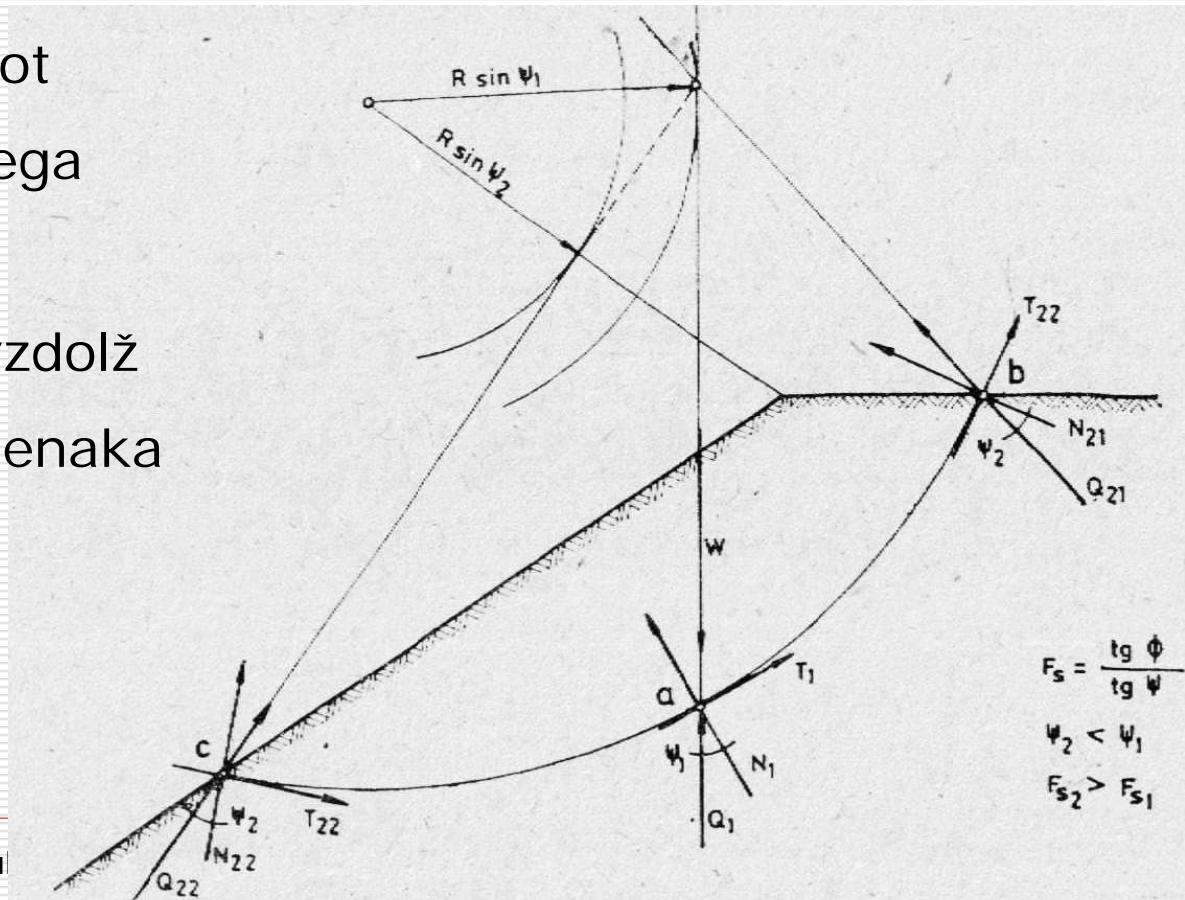
Zasnova pregrade – stabilnost pobočij pregrad

■ **Analiza stabilnosti s potencialnimi porušnicami** Stabilnost pobočij pregrade za različne obtežne primere se preverja z analizo napetostnega stanja vzdolž predpostavljenih potencialnih porušnih ploskev. S poskusi iščemo tisto potencialno porušnico, ki izpolnjuje z najmanjšim varnostnim koeficientom pogoje za ravnovesje zemljinskega dela telesa nad porušnico z odporom zemljine na porušnici τ_f . Postopek izvajamo za gorvodno in dolvodno pobočje z upoštevanjem vseh merodajnih obtežnih primerov. Analizo izvajamo po dveh postopkih:

- **rezultantna metoda stabilnostne analize**
 - **Iamelna metoda analize s potencialnimi porušnicami**
-

Zasnova pregrade – stabilnost pobočij pregrad

■ **Rezultantna metoda stabilnostne analize** Za homogene sestave (homogene pregrade) preiskujemo ravnovesje med površjem pobočja in potencialno porušnico (krožnica ali logaritemska spirala) kot ravnovesje enega samega togega telesa. Pri tem predpostavimo, da je vzdolž porušnice mobilizirana enaka stopnja trdnosti.



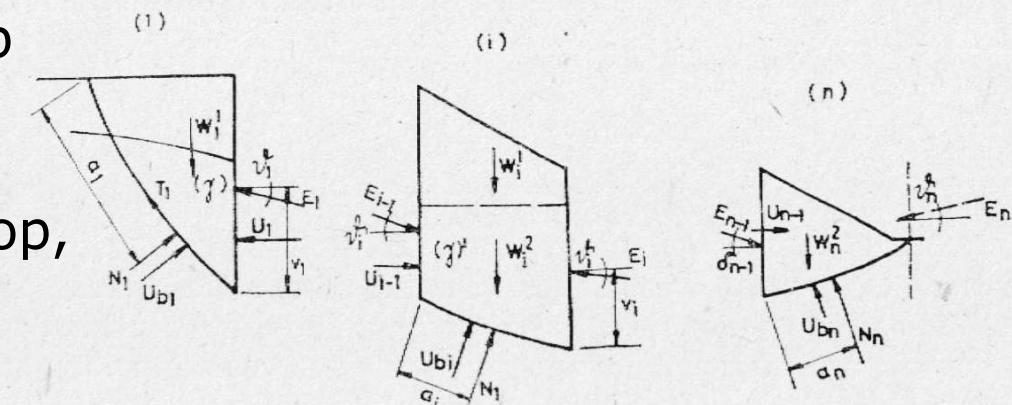
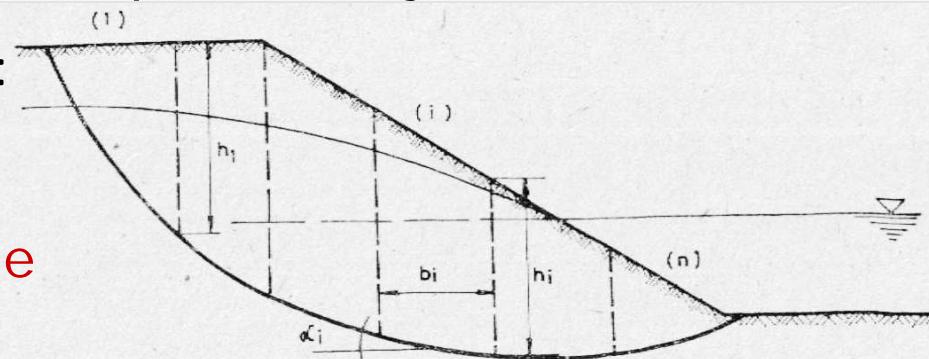
Zasnova pregrade – stabilnost pobočij pregrad

■ **Lamelna metoda analize s potencialnimi porušnicami** Zaradi nehomogene sestave (slojevite pregrade) sestoji potencialno drsno telo iz več togih lamel z navpičnim mejami med lamelami.

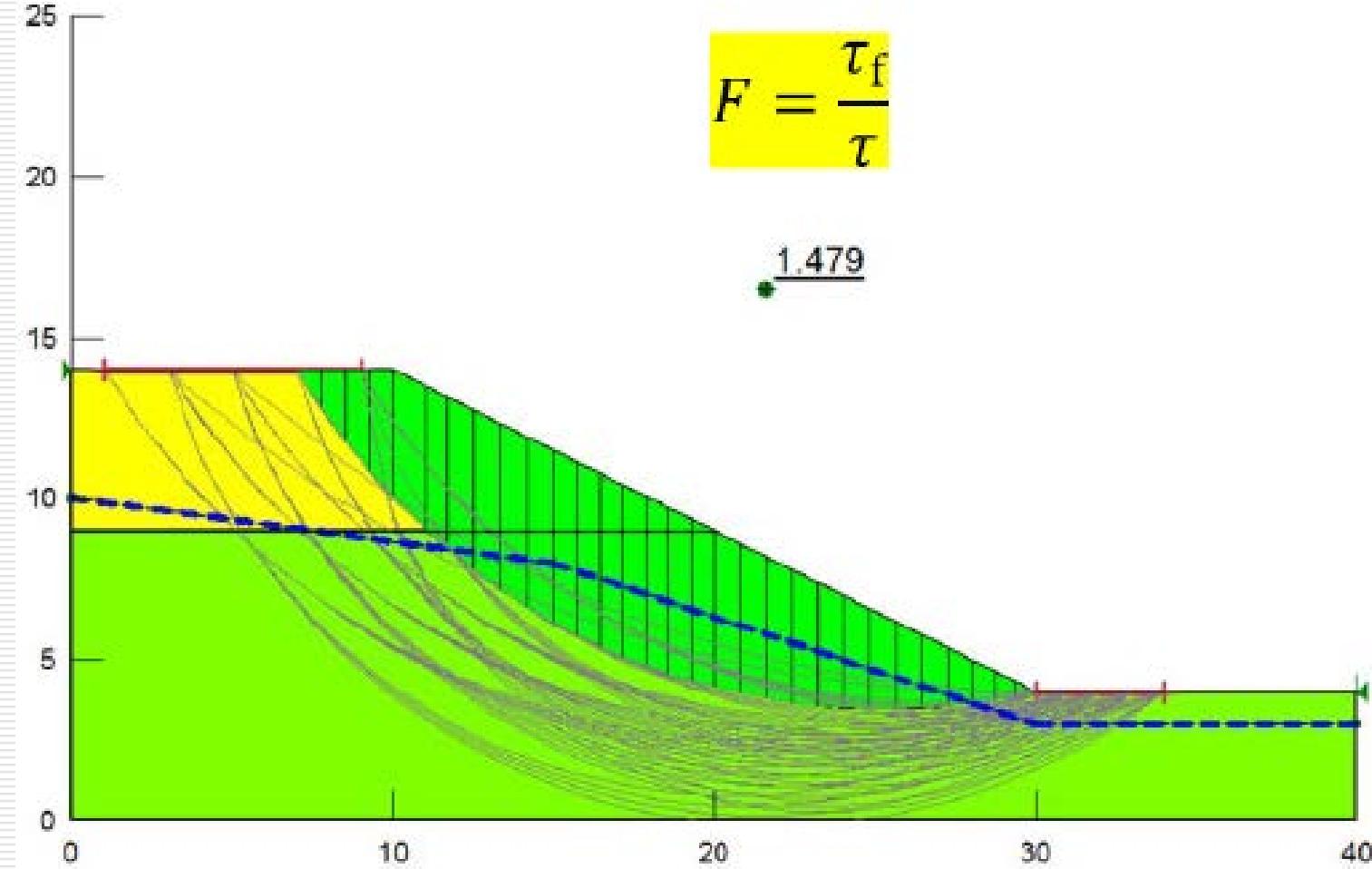
Na vsako lamelo delujejo sile:

lastna teža, hidravlični tlak
precejne vode, vzgon, zunanje
sile in volumske vztrajnostne
sile.

Reševanja sistema enačb
se izvaja numerično glede na
računske predpostavke (Bishop,
Janbu, Morgenstern,...).

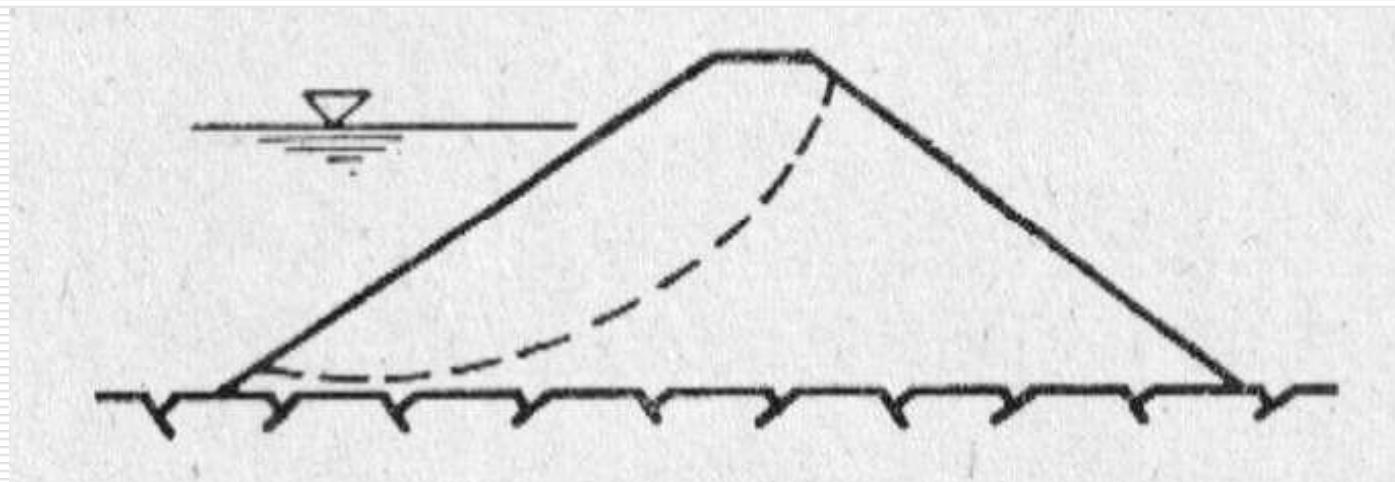


Zasnova pregrade – stabilnost pobočij pregrad



Zasnova pregrade – stabilnost pobočij pregrad

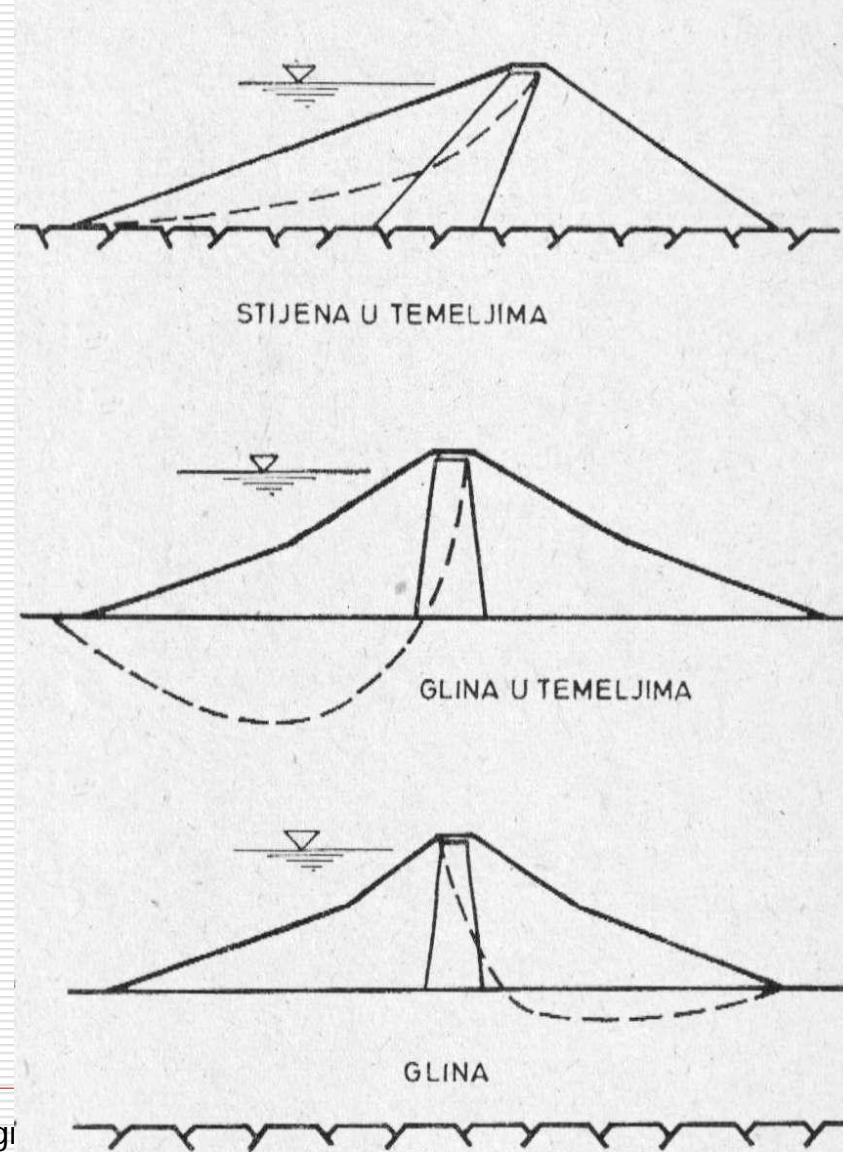
- V primeru slojevitih pregrad, kjer je vgrajen material različnih lastnosti (npr.: kamen – glina) je možno, da se porušnica formira v obliki diskontinuirane linije:
 - **krožna porušnica** je pričakovana zgolj pri homogenih pregradah na dobri temeljni podlagi



Zasnova pregrade – stabilnost pobočij pregrad

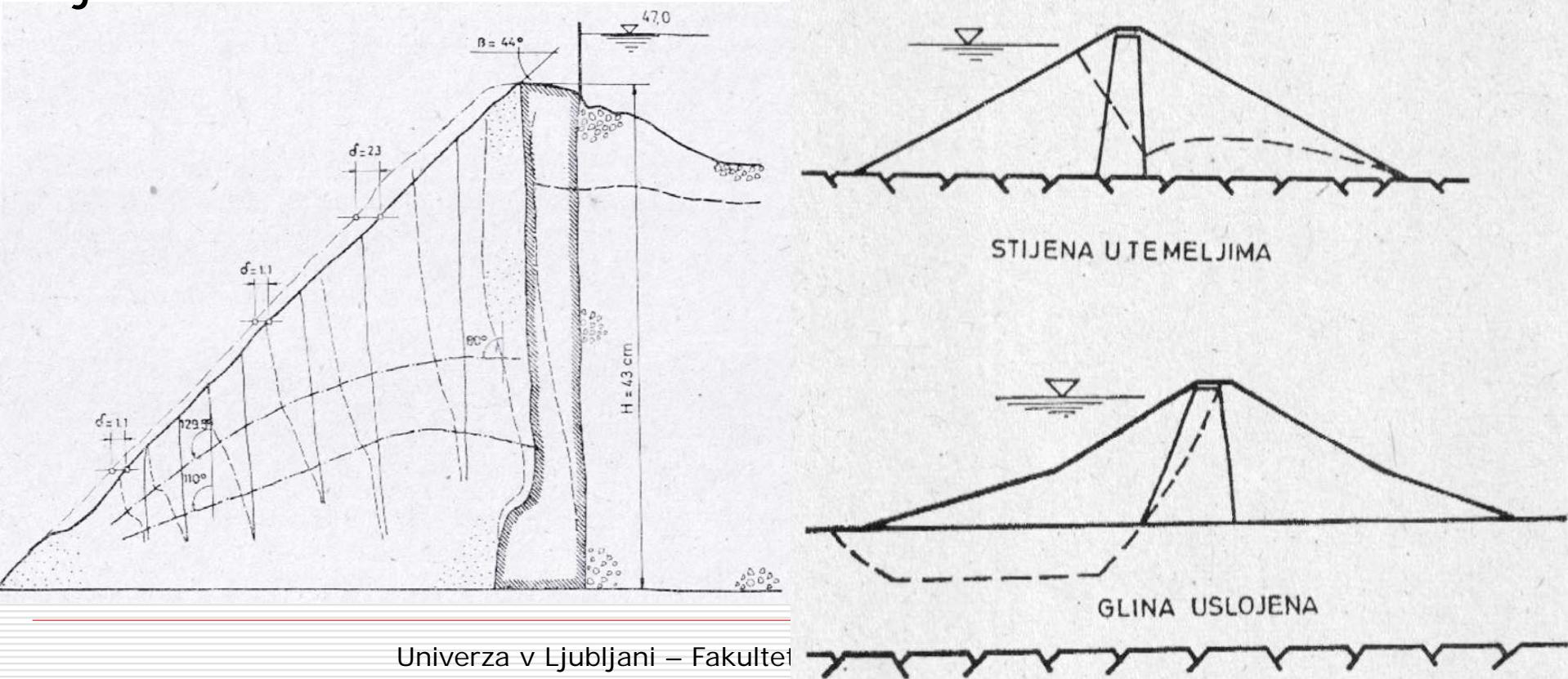
■ neenolično zakrivljena

porušnica se pojavi v
primerih slabše temeljne
podlage ali tankega jedra



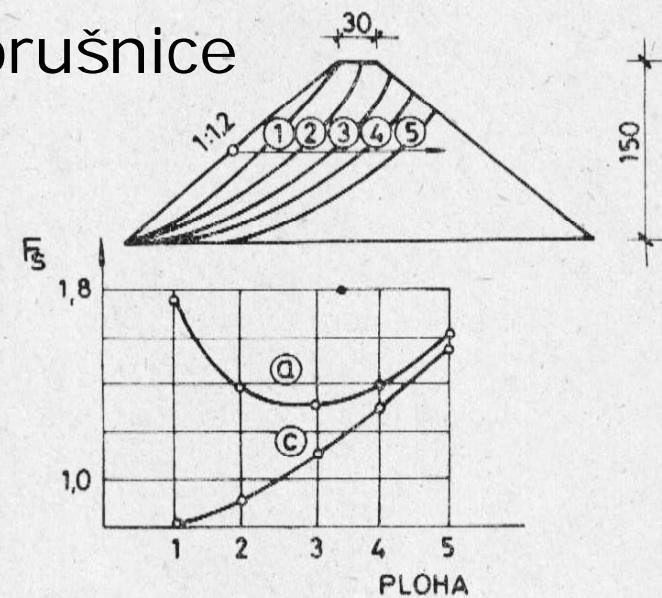
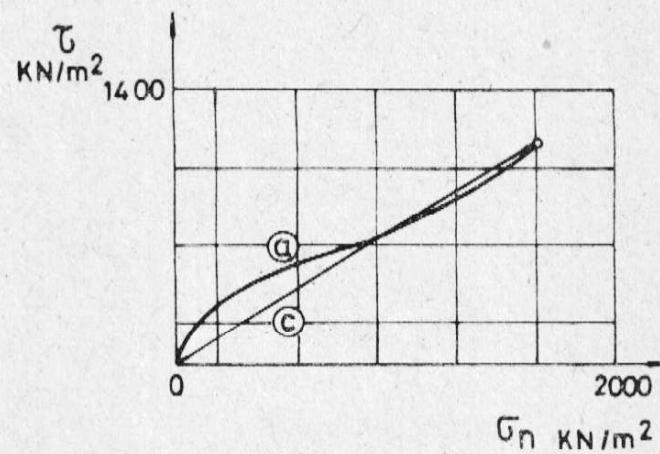
Zasnova pregrade – stabilnost pobočij pregrad

- **diskontinuirna porušnica** se pojavi v primeru nehomogenosti v temeljnih tleh ali tankega glinenega jedra



Zasnova pregrade – stabilnost pobočij pregrad

- Za pregrade, višje kot 100m se pojavijo normalne napetosti, ki so višje od Mohr-Coulombovega kriterija. V tem primeru je treba upoštevati **nelinearno porušitveno mejnico tal**. Varnostni koeficient je z upoštevanjem nelinearne mejne linije bistveno večji, posebej na površini in za plitke porušnice



Zasnova pregrade – dinamična stabilnost

- **Potres** povzroča inercialne sile v podlagi pregrade, ki se propagirajo v vertikalni in horizontalni smeri skozi telo pregrade, pri tem ciklično menjajo intenziteto in smer. Posledica pojava je, da se v telesu pregrade pojavijo napetosti, ki lahko prekoračijo dopustne trdnosti in povzročijo nepovratne deformacije.
- Nasute pregrade izkazujejo relativno dobro potresno odpornost:
 - v zadnjem obdobju tudi pri pojavu močnejših potresov ni prišlo do porušitve
 - dobro grajene pregrade iz zaglinjenih materialov na glineni ali skalnati temeljni podlagi so zdržale pospeške tudi do $0,8g$
 - največ porušitev je bilo registriranih pri pregradah iz peskovitih materialov, ali temeljenih na peskovitih tleh, kjer je vzrok za porušitev pojav **likvefakcije**. Podobno slabo se obnašajo tudi jalovinske pregrade in naplavljene pregrade.
 - vzrok za porušitev pregrad ni bil neposredno pojav potresa, temveč posledica procesa notranje erozije zaradi poškodb pregrade

Zasnova pregrade – dinamična stabilnost

- Predvsem zaradi nevarnosti **likvefakcije** USBR kategorizira zemeljske pregrade v dve kategoriji glede na občutljivost ali neobčutljivost na pojav likvefakcije.
- Za prvo kategorijo predлага izdelavo **anализе деформациј**, za drugo pa **post анализе** pojava likvefakcije.
- Post stabilitetne analize je treba izvesti tudi za pregrade, kjer se pričakuje razpokanost in posledično pojav notranje erozije.
- osnovne metode računa stabilitete so:
 - **psevdo statična metoda**
 - simplificirane **metode анализе деформациј**
 - **numeričне методе** z upoštevanjem totalnih ali efektnih napetosti

Zasnova pregrade – dinamična stabilnost

- Pseudostatična analiza je bila do 70 let običajna metoda izdelave stabilitetne analize na potresne obtežbe. Metoda temelji na opredelitvi ravnovesja delujočih sil na pregrado, pri čemer potresne sile obravnava kot statične kot produkt **koeficiente seizmičnosti** z lastno težo pregrade, ki delujejo v horizontalni smeri.
- Koeficient seizmičnosti je bil opredeljen glede na pričakovane potresne aktivnosti v območju lokacije – praviloma ni presegal vrednosti **0,2**. Varnostni koeficient pri teh predpostavkah mora dosegati $F_s > 1,0$.
- Pomanjkljivosti metode so v tem, da ne upošteva cikličnosti delovanja koeficiente seizmičnosti.

Zasnova pregrade – dinamična stabilnost

- Računska metoda zahteva minimalno vrednost varnostnega koeficienta, kar pa v praksi ni nujni pogoj za stabilnost. Pri dinamičnih obremenitvah lahko vrednost F_s pade pod 1, ker je tako stanje začasno in s spremembo smeri se vrednost dvigne nad 1. Spremembe so tako hitre, da se drsine niti ne morejo aktivirati. Po drugi stani pa pride lahko do porušitev tudi pri vrednostih večjih od 1.
- USCE priporoča uporabo prevdostatične metode za pregrade, kjer **ni nevarnosti nastopa likvefakcije**. Seizmični koeficient naj dosega **polovico maksimalnega pospeška** temeljnih tal z upoštevanjem nedreniranega stanja za koherentne zemljine oz. dreniranega stanja za nekoherentne zemljine ter upoštevanje **80% trdnosti materiala**. Varnostni faktor mora imeti vrednost večjo od 1.

Zasnova pregrade – dinamična stabilnost

- **Simplificirane metode analize deformacij** so uporabne za primere, kjer se ne pojavi likvefakcija in ne pride do utrujanja materiala zaradi cikličnega obremenjevanja. Poznano je več tovrstnih metod:
 - **empirične metode**, ki temeljijo na opazovanih deformacijah, geometriji pregrade in potresnih obremenitvah na osnovi katerih presojajo pojav razpok na konstrukciji
 - **integriranje premikov mas**, ki so posledica delovanja potresnih sil z oceno deformacije telesa pregrade zaradi potresne obremenitve
 - **modificirane metode premikov mas** pri potresu z upoštevanjem dinamičnega odziva pregrade

Zasnova pregrade – dinamična stabilnost

- **Numerične metode** z uporabo MKE so bile pri dinamični analizi nasutih pregrad prvič uporabljene v letu 1966 (Chopra).
Dinamične analize, ki jih izvajamo z numeričnimi metodami lahko razvrstimo v dve skupini:
- Metode z upoštevanjem **totalnih napetosti** v analizi ne upoštevajo pornih tlakov in jih uporabljamo za primere, kjer so inducirani porni tlaki zaradi potresnih sil zanemarljivi:
 - **linearna analiza** aproksimacija nelinearnega obnašanja zemljin zaradi cikličnega obremenjevanja
 - **nelinearne analize** upoštevajo dejansko nelinearno obnašanje zemljin zaradi potresne obtežbe in omogočajo bolj realno analizo, še posebej pri močnih potresih

Zasnova pregrade – dinamična stabilnost

- Metode z upoštevanjem **efektivnih napetosti** so uporabne v primeru modeliranja pornih tlakov in disipacije pri v materialih, ki so občutljivi na likvefakcijo. Material je obravnavan kot dvofazen, ki sestoji iz trdne in tekoče faze. Porni tlaki so obravnavani kot prehodnega tipa, ki so povezani z elastičnimi (povratnimi) deformacijami ali kot rezidualni s plastičnimi (nepovratnimi) deformacijami. Prehodni porni tlaki so ciklični in v okviru cikla je njihov efekt ničen, medtem ko pa so rezidualni porni tlaki kumulativni in imajo največji vpliv na trdnost in togost trdne konstrukcije.
- Za **praktično uporabo** zadoščajo simplificirane metode analize deformacij. Bolj kompleksne numerične metode z upoštevanjem dvofaznosti materiala pridejo v poštev v primerih, kjer so posledice porušitve objektov znatne.

Zasnova pregrade – dinamična stabilnost

■ Pravila protipotresnega načrtovanja:

- zagotoviti ustrezeno nadvišanje pregrade, ki vključuje tudi posedanje krone pregrade
- izvesti pravilno stopnjevan filtrni sloj na dolvodni strani tesnilnega sloja do krone pregrade, kar prispeva k učinkovitosti delovanja pri posedanju pregrade
- predvideti zadostno kapacitivnost drenažnih slojev (vertikalni-horizontali drenažni sloji) za zagotovitev prevajanja količin vode pri pojavu eventualnih razpok v tesnilnem jedru
- v temeljih je treba odstraniti potencialno občutljive materiale na likvefakcijo, izvesti stabilizacijo temeljnih tal (komprimacija, peščeni piloti, vibro flotacija) in drenažne preproge

Zasnova pregrade – dinamična stabilnost

- izogibati se je treba temeljenju na **glinenih zemljah** ali **razpokani hribini**, ker so občutljive na ciklično obremenjevanje. Posebej je potrebno preveriti nosilnost tal po potresu z upoštevanjem rezidualne trdnosti
- v osi pregrade oziroma tesnilnega jedra je treba zvezno oblikovati nivo temeljne ploskve, da se **preprečijo ostre spremembe profila**, kjer se lahko pojavijo diferenčni pomiki (tudi že pri glavni obtežbi) in posledično razpoke v jedru
- dobro stopnjevan **filterni sloj** je treba izvesti tudi na **vodni strani jedra** iz katerega drobni material zapolni eventualne razpoke v jedru

Zasnova pregrade – dinamična stabilnost

- **krono** je treba oblikovati tako, da je čim bolj zavarovana pred prelitjem (valobran na kroni, razširitev krone, stabilizacija krovne zemljine,...)
- na kontaktu z brežinami je treba **jedro razširiti**, da se poveča vodna pot v primeru pojava razpok
- izvesti **stabilizacijo brežin v zadrževalniku**, da ne pride do zdrsa v akumulacijo
- za temeljenje je v potresnih območjih primernejša **hribinska podlaga**
- za **jedro** je priporočljiva uporaba dobro stopnjevanih gramoznih ali peščenih glinenih materialov (možna dobra kompaktacija) ali pa visoko plastične gline – vgradnja nizko plastičnih glin ni priporočljiva

Konstrukcija pregrade - jedro

- Širina tesnilnega dela (jedra) je odvisna od količine razpoložljivega materiala pri gradnji. Jedro mora biti dovolj široko, da:
 - je preprečen pojav prevelikega gradijenta tlakov znotraj jedra
 - je preprečen ločni efekt s katerim se bolj deformabilna podpora sloja podpreta na jedru in s tem pojav razpok v jedru
- Na dnu mora biti jedro široko najmanj za **eno četrtino razlike višin med najvišjo zajezbo in spodnjo vodo**; na vrhu pa širina jedra naj ne bo manjša od **3 do 3,5m**.
- Zaradi težavnosti izvedbe slojev na vrhu pregrade je priporočljivo, da:
 - se jedro zaključi na nivoju najvišje zajezbe (maksimalni preliv)
 - se vrhnji del pregrade izvede z nepropustnim zemeljskim materialom – kar je tudi ugodno, če je preko pregrade speljana cesta.

Konstrukcija pregrade – podporni del

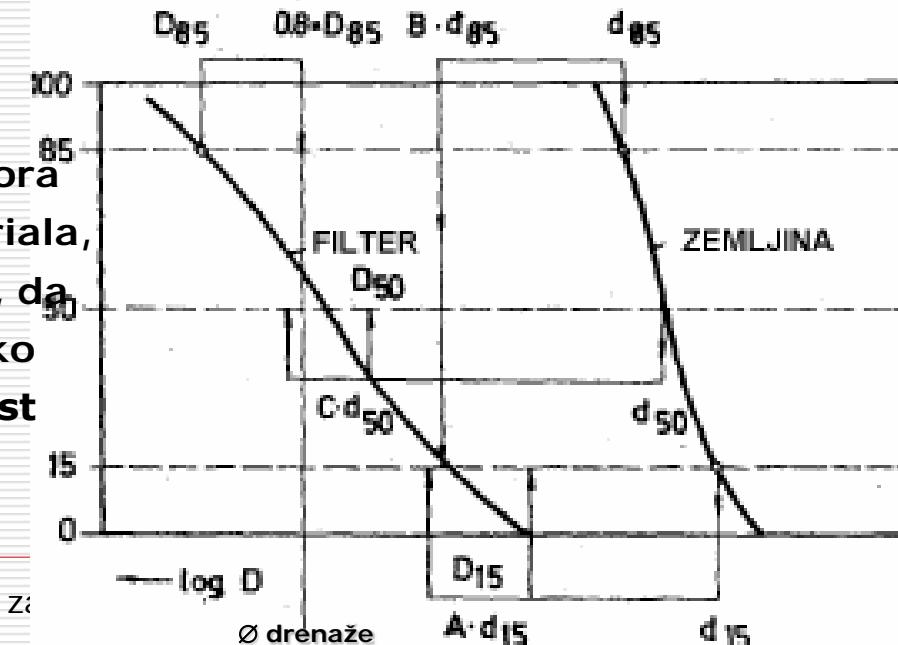
- Za podporni del na **dolvodni strani** uporabimo vsak zemeljski material iz lokalnih nahajališč, ki pa je svojih lastnosti lahko popolnoma različen – od nepropustnega do propustnega.
- Za podporni del na **gorvodni strani** praviloma uporabimo bolj propustni material, da zmanjšamo zastojne tlake v pregradi pri hitrih denivelacijah gladine v akumulaciji.
- Zemeljski material vgrajujemo direktno iz izkopa, le z upoštevanjem ustrezne vlažnosti pri vgrajevanju.
- Kjer uporabljam zemeljski material je priporočljivo, da se izvede **prehodni sloj** (filtrna cona), ki preprečuje spiranje drobnih delcev. Bolj propustne materiale vgrajujemo na **zunanji strani** podpornega dela in bolj **nepropustne v notranjem delu**. Pomembno je tudi, da proti površini vgrajujemo bolj propustne zemljine, ki omogočajo infiltracijo vode in s tem preprečimo zastajanje vode na pregradi.

Konstrukcija pregrade – prehodni del

- **Precejanje vode** skozi telo pregrade je preprečeno z nepropustnim slojem (jedrom). Eventualne precedne vode so zajete z dolvodno postavljenim vodo propustnim **drenažnim slojem** s **filtrom** z odvodom dolvodno.
- Kapaciteta drenažnega sloja mora biti dovolj velika glede na pričakovane količine precedne vode pri minimalnih hidravličnih izgubah. To je povezano z debelino sloja in propustnostjo materiala.
- Posebnih **drenažnih cevi** v drenažni sloj na nasutih pregradah **ni dovoljeno vgrajevati**, ker predstavljajo potencialno nevarnost za vzpostavitev privilegiranih poti in pojava notranje erozije pregrade.
- Drenažne cevi so dovoljene na dolvodnem delu, ob peti pregrade, kjer se drenažne vode zberejo z zbirnim kolektorjem in odvedejo izven območja pregrade. Kolektorska cev mora biti na zgornji strani zatesnjena. Omogočiti je treba tudi stalni dostop za vzdrževanje drenažnih cevi.

Konstrukcija pregrade – prehodni del

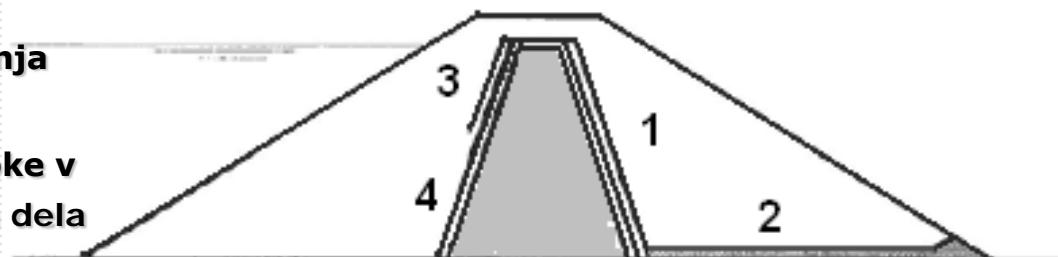
- Prehodni sloj mora biti zasnovan tako, da je preprečeno spiranje finih delcev v drenažni sistem in za nastanek **sufozije**. Prehodni del mora biti oblikovan po filtrnem principu:
 - razmerje premera D_{15} v filtru proti d_{15} v zemeljskem materialu $A > 5$, kar zagotavlja ustrezeno **prepustnost filtrnega dela**
 - razmerje premera D_{15} v filtru proti d_{85} v zemeljskem materialu mora biti $B < 5$, kar preprečuje **spiranje finih delcev** iz podpornega v filterni sloj (sufozija)
 - razmerje premera D_{50} v filtru proti d_{50} v zemeljskem materialu mora biti $C < 5$, kar zagotavlja ustrezeno **zrnavostno sestavo**
 - premer drenažne cevi mora biti vsaj za 20% manjši od D_{85}
 - granulacijska krivulja filternega sloja mora biti paralelna krivulji zemeljskega materiala, ki ga ščitimo – pri tem pa je treba paziti, da ni prevelika razlika gradacije, kar bi lahko pomenilo preveč nepropustno filtrno plast (**premajhna gradacija**) ali pa povzročilo segregacijo pri vgrajevanju (**prevelika gradacija**)



Konstrukcija pregrade – prehodni del

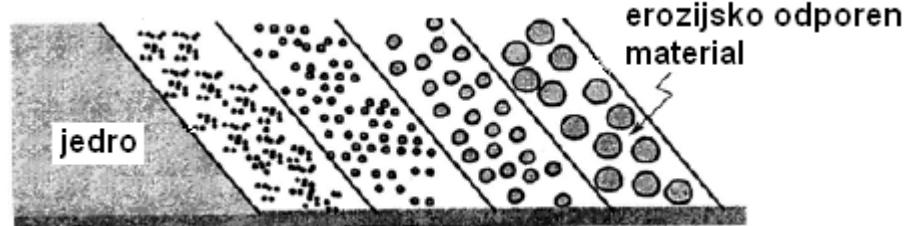
- Prehodne (filtrske) sloje je v načelu potrebno vgraditi na vseh kontaktnih površinah med materiali z različno granulacijo, neobhodno pa tam, kjer so pričakovani hidravlični gradienti veliki.
- Filtrske sloje načeloma na vodni strani jedra ni potreben, ker prehajanje grobih zrn v drobnozrnato območje ni pričakovano. Filtre vgrajujemo na vodni strani jedra pri skalometnih pregradah, ki pri pojavu razpok jedra (ločni efekt pri posedanju) omogočajo ponovno zapolnitev razpok v jedru s finim materialom iz prehodnega dela.

1. prehodni del dolvodni strani jedra
2. območje, kjer je pričakovana notranja erozija na kontaktu
3. območje, kjer so pričakovane razpoke v jedru zaradi posedanja podpornega dela
4. prehodni del na gorvodni strani jedra



Konstrukcija pregrade – prehodni del

- **Filter** mora izpolniti naslednje pogoje:
 - stabilnost pri pojavu notranje erozije
 - ustreznega granulacije, da ne pride do spiranja delcev med sloji
 - propustnost mora naraščati od drobnega k grobemu sloju – razmerje propustnosti vsaj 1:10
 - ustreznega granulometrijske sestave, da ne pride do segregacije pri vgrajevanju
- Nevarnost spiranja delcev je manjša, kolikor je širši sloj iz bolj grobega materiala. Minimalna debelina horizontalnih slojev je $d_{min}=0,5\text{m}$, širina (vodoravno) slojev pa najmanj med 1,5 do 2,0m oziroma odgovarja delovni širini pri vgrajevanju.



Konstrukcija pregrade – prehodni del

- Namesto filtrskih slojev se uporablja velikokrat tudi **geotekstil**, kjer pa je treba zadostiti naslednjim kriterijem:
 - povprečna velikost odprtine pri tkanju pri 90% presevku **O_{90}**
 - propustnost v prečni in vzdolžni smeri
 - stisljivost pri obremenitvi – zmanjšanje propustnosti pod obremenitvijo
- Kriterij za učinkovitost delovanja geotekstila za material, ki se varuje: $O_{90}=5d_{50}$
- Z geotekstilom lahko nadomestimo filtrni sloj v primerih, ko ni na voljo ustreznega materiala. Praviloma pa se uporabi geotekstila izogibamo kolikor je le mogoče zaradi vprašljive trajnosti materiala.

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

- Poglavitni vzrok za erozijske procese pobočja na gorvodni strani je posledica valovanja. Merodajni faktorji na podlagi katerih ovrednotimo učinkovanje valov na pregrado so: *dinamika valovanja, hrapavost pobočja, naklona pobočja, kot udara vala* ob pobočje.
- valovi, ki prihajajo v pod kotom glede na os pregrade pridobivajo na višini vzdolž pregrade in so bolj neugodni za stabilnost oblage za razliko od valovanja pravokotno na os pregrade
- dinamika valovanja neugodno deluje pri naletu vala na pobočje, kot pri umiku vala po brežini – pri pojavu ekstremnega valovanja in z upoštevanjem inercije vala je lahko ogrožena tudi krona pregrade zaradi preplavitve
- Zaščita pobočja je lahko izvedena z:
 - **nepropustno gladko oblogo** (asfaltna obloga, betonska, sintetična, stabilizirana zemljina,...)
 - **zaščito iz odpornega materiala** (hrapave oblage: skalomet, kamnomet, kamena zložba,...)

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

- Gladke obloge so manj občutljive na **dinamične obremenitve** kot hrapave obloge, ki so zelo obremenjene zaradi dinamike valovanja.
- **Višina vzpenjanja vala** po brežini je pri hrapavih oblogah manjša, ker se velik delež energije valovanja zmanjša zaradi disipacije pri pretakanju vode skozi rege v oblogi
- **Trajnost oblog** je odvisna od odpornosti materiala na klimatske razmere (atmosferilije, termičnimi vplivi zaradi osončenja,...) in na hidrodinamične obremenitve pri valovanju (pulzacije tlakov, kavitacija,...)
- **Posedanje telesa pregrade** neugodno vpliva na bolj toge obloge (beton, asfalt,...), manj pa vpliva na kamene obloge, ki so bolj deformabilne
- Odločitev o izbiri ustreznega tipa zaščite je odvisna od možnosti dobave materiala in ekonomike – prednostni tip je izvedba zaščite iz kamenega materiala

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

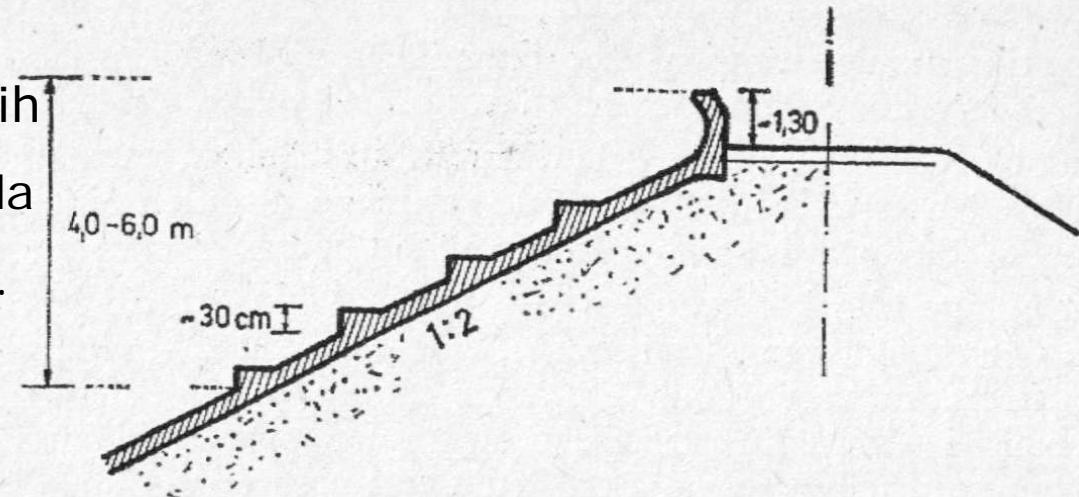
- **Obloga iz asfalta** se vgrajuje na dobro utrjeno podlago. Primerna je za vse tipe nasutih pregrad. Pri zemeljskih pregradah je tak način tesnitve običajen pri zagotavljanju tesnosti nasipov kanalov ali bazenov. Pri skalometnih pregradah pa se največkrat uporabi v izvedbi tesnilne oblage na celotnem gorvodnem pobočju pregrade.
- Obloga mora biti *nepropustna za vodo* – za zagotovitev zaščite pred atmosferilijami in staranjem je na površini izvedena zaščita s premazom iz mastika, ki zagotavlja vodo neprepustnost površine in temperaturno obstojnost.
- Gornji rob oblage mora segati nad nivo točke vzpenjanja valov – priporočljivo je, da se obloga zaključi na kroni pregrade oziroma izvede kontakt z valobranom na vrhu pregrade.

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

- Obloga iz asfalt betona mora zadoščati naslednjim pogojem:
 - **vodotesnost** - optimalna količina bitumenskega veziva znaša 8,5% utežni delež mase agregata – vrhni sloj je običajno izveden z mastik asfaltom, ki zagotavlja vodotesnost in temperaturno obstojnost
 - **stabilnost** na nagnjenem pobočju – asfaltne obloge so primerne do naklona 1:1,5 (1,7 kot minimalni tehnični pogoj pri vgrajevanju)
 - odpornost na **temperaturne** obremenitve – obloga mora biti stabilna tudi pri temperaturah, ki presegajo 60°C
 - ustrezna **debelina** obloge
 - ustrezen **vodotesni kontakt** v peti pregrade

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

- **Betonske obloge** se vgrajuje na dobro utrjeno podlago. Pri nasutih pregradah je najprimernejša je izvedba monolitne armirano-betonske oblage v coni vpliva nihanja gladin v akumulaciji, debeline 20 do 30cm. Betonske obloge iz nearmiranih prefabriciranih plošč se slabše obnesejo.
- Za zmanjšanje vzpenjanja vala po pobočju je betonska obloga lahko izvedeno stopničasto, kar pa je problematično pri vetrovnih razmerah, ker razpršena voda lahko prelije korno pregrade.



Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

- Za zavarovanje pred prelitjem krone pregrade je na vrhu oblage izveden **parapetni zid**, valobran, ki je oblikovan konkavno, da eventualni val preusmeri nazaj v akumulacijo. Parapetni zid predstavlja tudi učinkovito alternativo nadvišanju pregrade.
- **Debelina betonskih oblog** je odvisna od položaja, merjeno od krone pregrade:

$$d = 0,3 + 0,002 \cdot h$$

- d debelina betonske oblage [m]
- h globina položaja od krone pregrade [m]

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

- **Kamnite obloge** iz lomljencja so eden od najbolj učinkovitih načinov zaščite pobočja pregrade pred erozijo valov.

Trdnost oblage na učinkovanje valov je odvisna od **debeline oblage, načina gradnje (nasip, zlaganje)** in **granulometrije** vgrajenega materiala.

- Podatki iz tabele so veljavni za nagibe pobočij do 1:2, za blažje naklone se povprečni premer lomljenega kamna lahko zmanjša.
- Za blage naklone 1:5 pa je dovolj obloga v debelini 30cm s kamni debeline do 15cm.

največja višina vala [m]	d_{50} [cm]	debelina sloja [cm]
0 do 0,3	20	30
0,3 do 0,6	25	55
0,6 do 1,2	30	75
1,2 do 1,8	45	90
1,8 do 2,4	55	110

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

■ Masa kamnite obloge iz lomljenga W_0 [kg] je odvisna od višine vala h_v [m], gostote vgrajenega materiala ρ_s [kg/m³], specifični gostoti materiala, izraženi z enoto gostote G_s , nagibu brežine (β) in načinu vgrajevanja (nasutje ali zložba) ter debelini obloge (K).

$$W_0 = \frac{\rho_s h_v^2}{K(G_s - 1)^3 \cot \beta}$$

oblika lomljenga	način vgradnje	število slojev	koeficient stabilnosti - K
zaobljen, gladek, ozko granuliran	nasutje	2	2,4
	nasutje	3	3,2
	zložba	1	2,9
grob, oglat, ozko granuliran	nasutje	2	4,0
	nasutje	3	4,5
	zložba	2	5,5
dobro granuliran, oglat	nasutje	1	2,5

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

- Primerjava oblog z lomljencem z nasipanjem ali zlaganjem je pokazala, da so po debelini sloja in dimenzijah vgrajenega materiala nasute oblage *bolj odporne* na učinkovanje valovanja kot kamena zložba ($h_v < 1,5m$)
Vzrok temu je v dejstvu, da pri eventualni poškodbi oblage pomik enega kamna povzroči postopno rušenje okoliških kamnov – pri nasutih oblogah pa se kamni prerazporedijo.
- Pri oblogah s zlaganjem je priporočljivo, da se dimenzije vgrajenega materiala poveča za okoli 30%.
- Vgradnja oblage z zlaganjem je zato praviloma dražja (večje dimenzije oblage, materiala in načina gradnje) in je zato priporočljivo, da se ta tip oblage izvede tam, kjer ima izgled površine posebno vrednost (bližina naselij, rekreacija,)

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

- **Geomembrana** je površinski način zaščite pobočja pregrade z nepropustno ali polpropustno ponjavo, ki je lahko sintetična ali naravnega izvora. Uporabne so za novogradnje, kot tudi za sanacijo obstoječih pregrad. Prevladujoč tip geomembran je iz **sintetičnih polimerov** (okoli 92%), dal pa na **bitumenski osnovi** (okoli 8%).
- Načini izvedbe polimernih geomembran so naslednji:
 - **homogena geomembrana**, brez ojačitev
 - **večslojna geomembrana** (npr. vrhni sloj odporen na UV sevanje in spodnji, nosilni sloj)
 - **geomembrana z ojačitvami** (steklena ali polimerna vlakna, tkanina,...), ki povečujejo trdnost materiala
 - **kompozitna struktura** polimerni in geotekstilni sloj (povečana strižna odpornost, vloga drenažnega sloja, povečanje trdnosti,...)
- Debelina sloja znaša 1 do 4mm, teža 0,9 do 4,5kg/m² odvisno od tipa membrane.

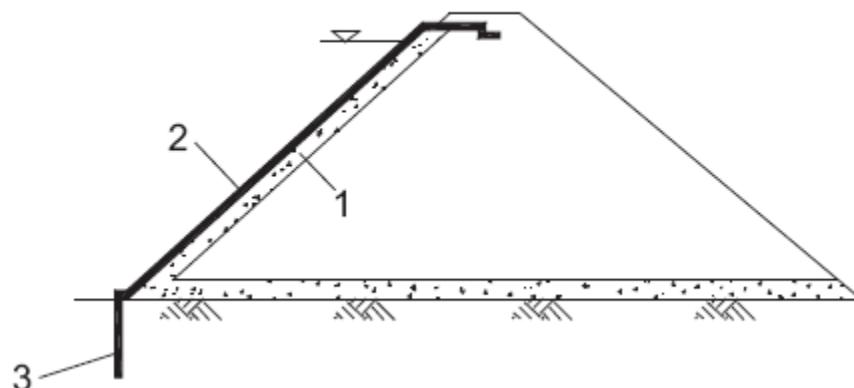
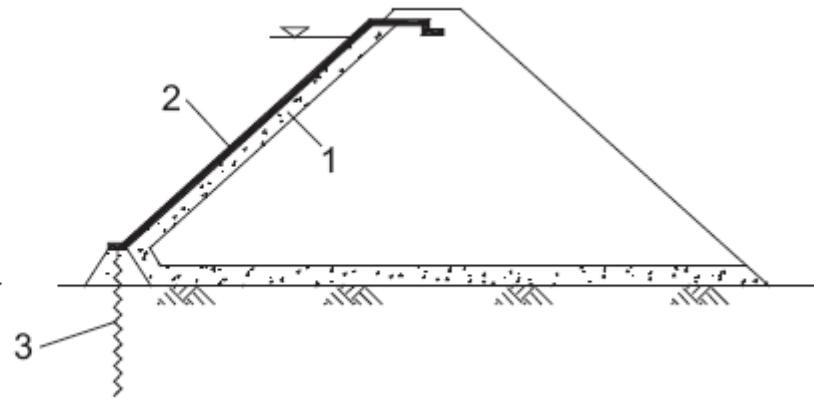
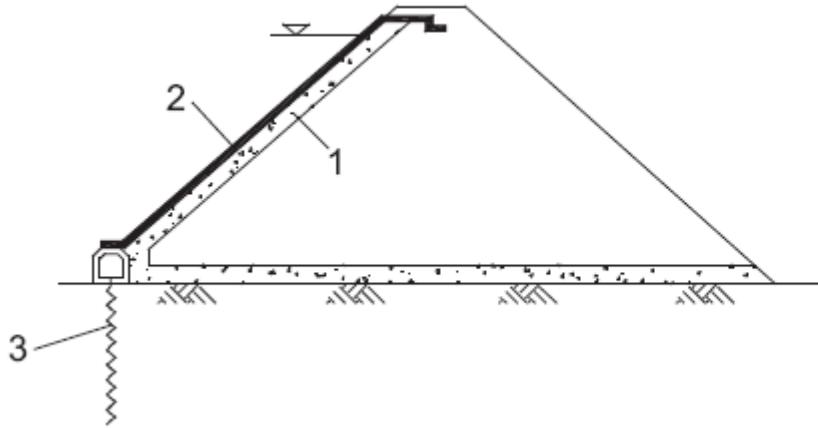
Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

- **Bituminizirane geomembrane** so sestavljene kot kompozitni material iz geotekstilne osnove na katero je nalit bitumenski material, ki je lahko:
 - oksidiran bitumen
 - s polimeri modificiran bitumen
- Bitumizirane geomembrane na pregradah imajo običajno še sekundarno ojačitev s steklenimi vlakni. Na spodnji strani so prevlečene s posebnim premazom, ki preprečuje koreninam prediranje membrane; na gornji strani pa je izvedena zaščitni sloj s posipom z drobnim peskom.
- Debelina sloja znaša 3 do 6mm, teža 5 do 8kg/m² odvisno od tipa membrane.

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

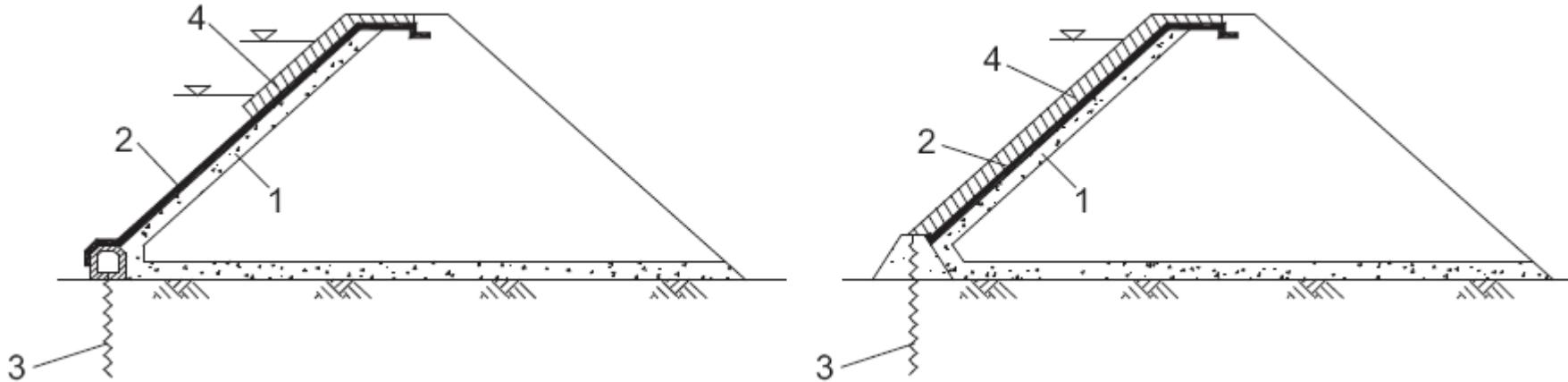
- **Geomembrane** so proizvedene v trakovih, širine 2 do 6 (11)m (polimerne) oziroma 2 do 5,5m (bitumenske) in dolžine, ki ustreza razviti dolžini pobočja (lica) pregrade, ki jo varujemo.
- Geomembrane polagamo v razviti dolžini po pobočju (licu) pregrade in jih stikujemo vzdolž robov (vertikalno horizontalno).
Stikovanje se izvaja s preklopom (do 20cm) na naslednje načine:
 - termično spajanje (za vse tipe)
 - lepljenje s polimernimi trakovi (PP in PE membrane)
 - lepljenje stikov (vse, razen PP in PE membran)
 - kemijsko spajanje (PVC in polietilenske membrane)

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo



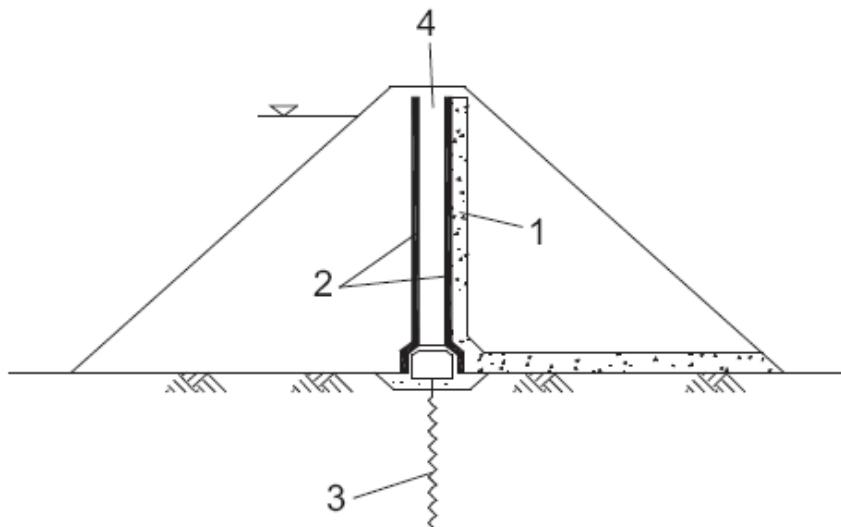
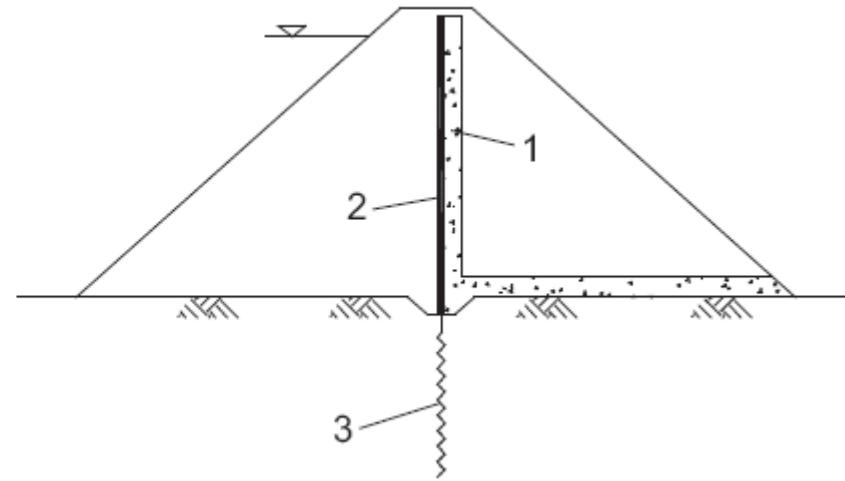
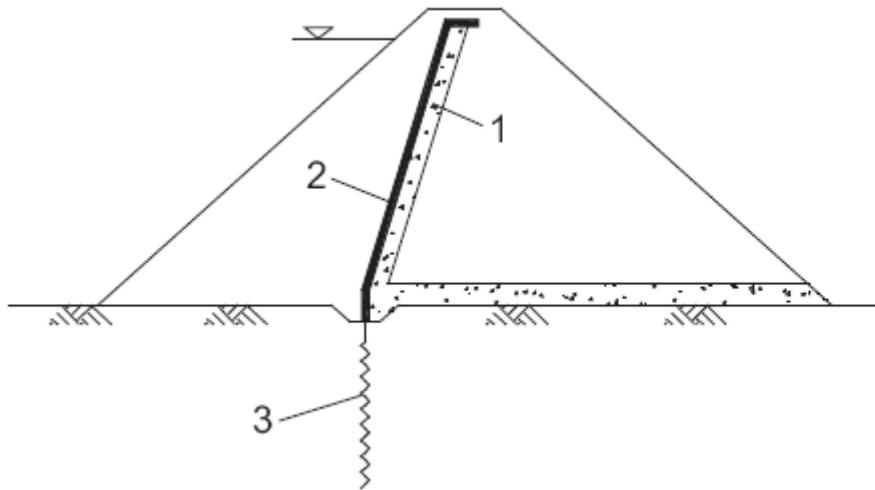
- Geomembrana je postavljena na gorvodno pobočje – brez zaščite
- na gornji strani je sidrana z balastnim slojem
- na spodnji strani je izveden kontakt z galerijo, tesnilno zaveso ali diafragmo

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo



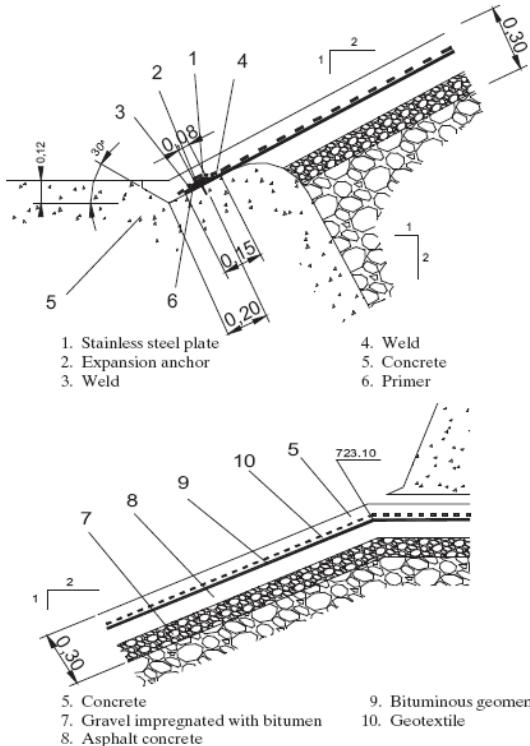
- Geomembrana je postavljena na gorvodno pobočje in je:
 - delno zaščitena z betonsko oblogo v območju nihanja
 - polno zaščitena z betonsko oblogo
- na gornji strani je sidrana z balastnim slojem
- na spodnji strani je izveden kontakt z galerijo, tesnilno zaveso ali diafragmo

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo



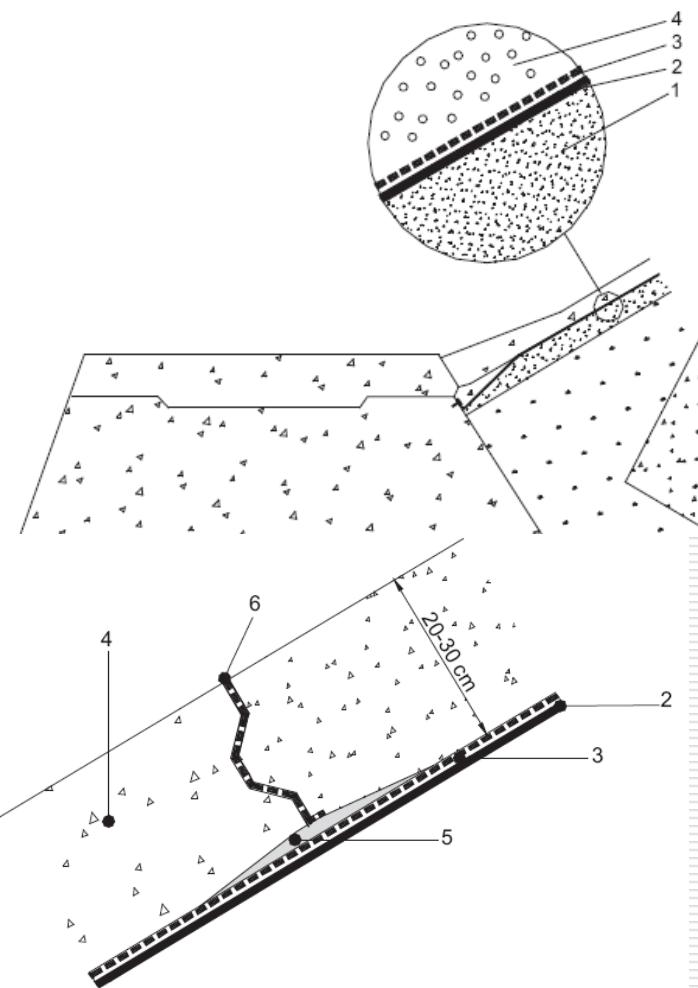
- Geomembrana je postavljena v centralni del v primeru slabo propustnih materialov:
 - enojna izvedba
 - dvojna membrana z vmesnim slojem, ki ga je možno zatesniti

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo



■ zaščita z bitumensko geomembrano pri novogradnji (z zaščito)

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo



Section at joints between slabs

- 2. PVC geocomposite
- 3. Geotextile
- 4. Unreinforced concrete slab
- 5. Polystyrene wedge
- 6. Open draining joint with geotextile

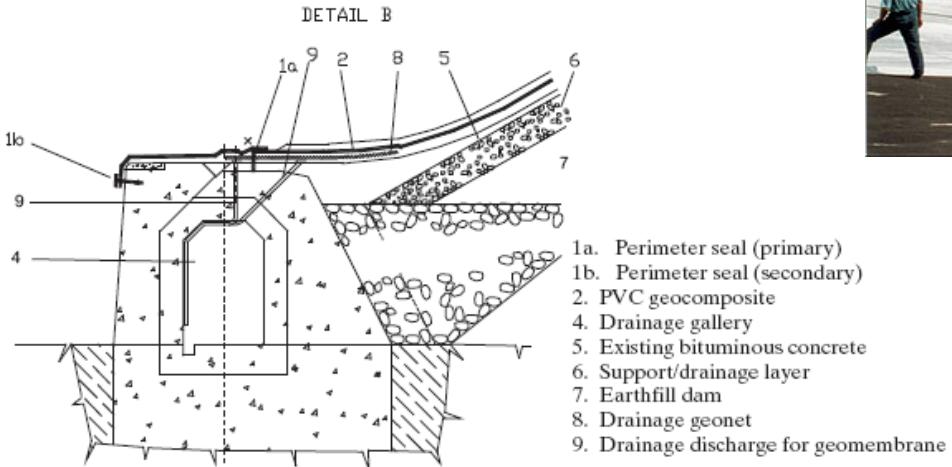
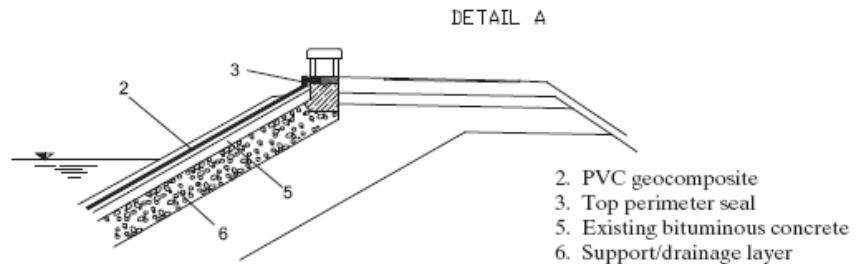
1. Stabilized gravel
2. PVC geocomposite (3 mm PVC geomembrane + 700 g/m² geotextile)
3. Geotextile
4. Unreinforced concrete slab



jub

■ zaščita z PVC geomembrano pri novogradnji
(z zaščito z betonsko oblogo)

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo



■ sanacija obstoječe pregrade z asfalt-betonsko oblogo s PVC geomembrano (brez zaščite)

Konstrukcija pregrade – zaščita dolvodnega pobočja

- Zaščita pobočja na dolvodni strani pregrade je neposredno odvisna od klimatskih razmer in pojava erozijskih procesov zaradi:
 - odtekanja površinske vode po pobočju pri intenzivnih padavinah
 - vetra in odnašanja materiala s površine pregrade v času dolgotrajnih sušnih obdobijh
 - zmrzovanja in tajanja v zimskih razmerah
- Za zaščito sta primerni:
 - **obloga iz vegetacije**
 - **kamena obloga.**

Konstrukcija pregrade – zaščita dolvodnega pobočja

- **Vegetacijski sloj** predstavlja dobro rešitev za zaščito pobočij zemeljskih pregrad praktično v vseh klimatskih razmerah.
- Najprimernejša je vegetacija, ki uspeva na lokaciji. Kot najučinkovitejša je travna ruša.
- Zagotoviti je treba osnovne pogoje za rastlinsko rast:
 - dovolj vlage
 - humusni sloj za razvoj koreninskega sistema
 - dovolj debel krovni sloj manj propustnega materiala za zadrževanje vlage
 - uporaba travne ruše je omejena na pobočja z naklonom do 1:2,5, kar predstavlja omejitev za mehanizirano košnjo

Konstrukcija pregrade – zaščita dolvodnega pobočja

- Olesenele rastlinje (drevesa, grmovnice) na pobočjih niso dovoljene ker predstavljajo:
 - fizično oviro pri rednem vzdrževanju (košnji)
 - vizuelno oviro pri tehničnem opazovanju
 - nudijo skrivališča za naselitev živali na pregradi in posledično degradacijske procese na površini in telesu pregrade
 - s koreninskim sistemom potencialno grožnjo za vzpostavitev privilegiranih poti za precejanje vode skozi pregrado
- Travno rušo je treba stalno kositi, da se ojača koreninski sistem in ohranja zadostna zaraslost površine, ki preprečuje erozijske procese. Poležana travna ruša je manjša ovira površinski vodi po pobočju in posledično potencialna nevarnost za pojav erozije.

Konstrukcija pregrade – zaščita dolvodnega pobočja

- Berme na dolvodni strani lahko predstavljajo potencialno nevarnost za napredajoče erozijske procese, če niso pravilno oblikovane:
 - nagib berm mora biti v rahlem padcu proti pregradi z ustrezno izvedenim jarkom za površinske vode
 - zbirni jarki odvajajo vodo od sredine s padcem v vzdolžni smeri proti bokom pregrade, kjer so izvedeni bočni jarki z odvodom vode izven območja pregrade
 - izvedba zbiralnih jarkov z betonskimi kanaletami predstavlja potencialno nevarnost za poškodbe, če niso pravilno položene in redno vzdrževane
- Praviloma berme ne prispevajo k učinkovitosti odvodnje površinskih voda in je ta učinkovita tudi pri pobočjih pregrad brez berm.

Konstrukcija pregrade – zaščita dolvodnega pobočja

- Zaščita pobočja zemeljske pregrade na dolvodni strani s **kameno oblogo** pride v poštev v primeru, ko ležijo v suhih klimatskih okoljih, kjer vegetacija ne bi mogla trajno uspevati in v območju vpliva nihanja spodnje vode. Debelina kamene oblage znaša najmanj 15 do 30 cm.
- Če je telo pregrade iz *koherentnega*, malo propustnega materiala je treba zagotoviti, da površinske vode odtečejo skozi propustni sloj oblage. Za zagotovitev propustnosti je maksimalno zrno 80mm, enolično (ozko) granulirane sestave.
- Če je telo pregrade iz *nekoherentnega* ali bolj propustnega materiala (skalometna pregrada) posebni zaščitni sloj na dolvodni strani ni potreben – zadostuje, da je površina pobočja poravnana v mejah tehničnih zmožnosti pri gradnji pregrade.

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra in temelja

- Na kontaktu jedra in temeljev se pojavijo največji hidrostatski tlaki in gradient tlakov – na tej točki je nevarnost preboja največja.
- Pri hribinski podlagi je največja nevarnost spiranje drobnih delcev iz jedra in filternih slojev na kontaktu s hribino zaradi pronicanja vode skozi razpoke v hribini pod jedrom. Zaradi spiranja se povečujejo privilegirane poti pronicajoče vode in progresivni erozijski procesi.
- Nevarnost predstavljajo tudi gnezda slabo zbite gline v vdolbinah v temeljni podlagi, kjer lahko pride do procesa notranje erozije.
- Pojav notranje erozije je eden od pomembnejših vzrokov, ki lahko pripelje tudi do porušitve pregrade.

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra in temelja

- Problem notranje erozije lahko rešimo na sledeče načine:
 - v hribinski podlagi je treba odstraniti ves zdrobljen material, večje diskontinuitete razkopati in jih zapolniti z betonskimi plombami ali izvesti utrditev temeljne podlage s kontaktnim injektiranjem
 - če je obseg diskontinuitete v podlagi preobširen je smiselno, da se preko celotne površine izvede betonska obloga, debeline okoli 20cm
 - v prvi sloj jedra se vgradi visoko plastični material z vlogo za 5% višjo od optimalne, ki omogoča plastično deformiranje pri povečani obtežbi in zatesnitve stika s temeljno hribino. Pred vgradnjo gline se vgradi sloj plastificirane cementne malte v debelini 10 do 15cm, ki se dobro vtrsi v neravnine v podlagi in nato še na sloj sveže malte vgradi prvi sloj gline – tako je dosežen neproposten stik.

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra in temelja

- Na poševnih površinah na bokih pregrade je treba odstraniti vse previse – če ni možno je treba izvesti zidne konstrukcije, ki pa ne smejo biti pod večjim naklonom od 5:1.
- Na kontaktu se v prvi sloj vgradi visoko plastični material, minimalne debeline 0,5m pravokotno na podlago oziroma 1,5m do 2m v horizontalni smeri. Drugi sloj je treba vgraditi neposredno po prvem slojem, da se ohrani vlažnost materiala.
- Izkop za jedro je treba izvesti konveksno v smeri dolvodno, kar zagotavlja, da pomik, ki je posledica posedanja pregrade pri obtežbi z vodo usmerjen v stiskanje jedra in povečanja kontaktnih napetosti s temeljnimi tlemi.

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra in temelja

- Jedro se zaradi obtežbe hidrostatskega tlaka deformira v smeri dolvodno. Na stiku jedra s temeljnimi tlemi se zaradi tega povečajo kontaktne napetosti:
- Pri **konkavno oblikovanem stiku** (kontaktna ploskev je usmerjena v naklonu dolvodno) se vzdolž stika deformacije jedra povečujejo in posledično zmanjšujejo kontaktne napetosti – jedro je razrahljano. Posledično pride lahko do hidravličnega loma, če so kontaktne napetosti manjše od hidrostatičnega tlaka.

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra in temelja

- Pri **konveksno oblikovanem stiku** (kontaktna ploskev je obrnjena v protinaklonu dolvodno) se vzdolž stika deformacije jedra zmanjšujejo in posledično povečujejo kontaktne napetosti – jedro je kompaktirano in ni nevarnosti hidravličnega loma.
- Za preprečitev spiranja disperzivnega materiala iz jedra je smiselno, da se stabilizira površina temeljne hribine z betonsko oblogo in prvi sloj izvede v sorazmerno večji debelini iz kemijsko stabilizirane gline (hidratirano apno $\sim 2\%$ volumskega deleža). Priporočljivo je, da se v kontaktni coni debelina filtra poveča.

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra s togo konstrukcijo

- Kontakti jedra oziroma nasutega dela s togimi konstrukcijami se pri nasutih pregradah izvedejo v:
 - *Vodoravni smeri*, kjer jedro nalega na horizontalne betonske površine (betonske plošče, izpusti, galerije, ...). Detajl rešitve je podoben kot v primeru kontakta s temeljno hribino – zagotoviti je treba čim bolj ravno betonsko površino, da je kontakt glinenega jedra čim kvalitetnejša.
 - *Vertikalni smeri*, kjer se na kontaktu s togo betonsko konstrukcijo zaradi posedanja nasipa pojavijo velike deformacije. Detajl kontakta je treba oblikovati konveksno v smeri pomika – tako v vertikalni, kot v prečni smeri.

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra s togo konstrukcijo

- Če kontakt med glinenim jedrom in togo konstrukcijo ni gladek oziroma se lokalno pojavljajo nepravilnosti (vdolbine, izbočenosti, ipd) se v teh območjih normalne napetosti zmanjšajo in lahko pride zaradi hidrostatskega tlaka do prodora vode v medprostor in pojava erozije jedra in širjenja razpok v območjih z zmanjšanjem normalnih napetosti.
- Podobni kontaktni problemi se pojavijo tudi pri izvedbi nazobčanega kontakta, ki se izvede z namenom podaljšanja vodne poti in zmanjšanja nevarnosti pronicanja vode v kontaktnem sloju. Problem, ki nastane je naslednji:

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra s togo konstrukcijo

1. Zadostna zbitost gline v kontaktnem sloju v bližini betonske površine je težko dosegljiva in zato je sloj jedra ob betonski površini bolj proposten in manj odporen na erozijo
 2. Vodoravni pomik jedra zaradi hidrostatskega tlaka povzroči, da je glina na kontaktu gorvodne površine zoba zbita, na dolvodni pa razrahljana, kar poveča nevarnost precejanja vode v kontaktnem sloju
- Uspešno podaljšanje vodne poti dosežemo z:
 - Razširitevjo filtrnega sloja na kontaktu
 - vgradnjo prečnega betonskega peresa z lici v naklonu, kar omogoča boljšo zbitost gline na kontaktu

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra s togo konstrukcijo

- Prodotorov derivacijskih objektov (talni izpust, derivacija, ...) skozi telo in jedro pregrade se pri nasutih pregradah načeloma izogibamo. Če je le mogoče jih izvedemo vkopane v temeljno hribino ob bokih pregrade.
- Če gre za doline z aluvialnim nanosom je izvedba derivacijskih objektov po dolini vprašljiva, ker se podlaga zaradi teže pregrade posede in posledično lahko pride do poškodb na derivacijskih objektih, ker so v primerjavi s pregrado bistveno bolj toge konstrukcije.
- Diferenčni posedki pomenijo tudi nevarnost obtekanja vzdolž trase evakuacijskih objektov in ustvarjanja privilegiranih poti za precedne vode.

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra s togo konstrukcijo

- V primeru, ko je derivacija speljana skozi jedro pregrade je treba [detajl](#) izvesti na sledeč način:
 - na območju jedra so cevi obbetonirane z masivnim betonskim blokom
 - gornja ploskev je ravna in v proti naklonu proti dolvodni strani (~5%), stranski lici bloka sta oblikovani konveksno z naklonom ~5:1 – teža pregrade in posedanje jedra povečujeta kontaktne napetosti
 - betonski blok je na gorvodni strani ožji in se dolvodno razsiri
 - na gorvodni in dolvodni strani jedra je treba zgraditi dovolj široke filtrne sloje z namenom preprečitve spiranja delcev iz jedra
- S ciljem podaljšanja vodne poti skozi pregrado se v območju jedra lahko izvedejo [betonske manšete](#), pri katerih obstajajo iste dileme kot v primeru nazobčanega kontakta.

Konstrukcija pregrade – prelivni objekt v sklopu pregrade

- Izvedbi preliva na nasutem delu pregrade se praviloma izogibamo zaradi nevarnosti obtekanja utrjenega preliva in erozijskih procesov. Pri nasutih pregradah so evakuacijski objekti praviloma izvedeni v raščeni hribini pod pregrado (tunel) ali kot prosti preliv po raščeni brežini.
- Rešitev je pogojno upravičena na manjših pregradah (pomožne pregrade, preusmeritvene pregrade,...), predvsem pri skalometnih pregradah, ki so manj občutljive na prelivanje od zemeljskih pregrad in še to kjer so pričakovani pretoki manjšega obsega.
- Utrditve preliva in krilnih zidov je treba ustreznost zavarovati in preprečiti pojav prodiranja vode pod utrditvijo preliva in erozijske procese v telesu pregrade.

Gradnja nasute zemeljske pregrade

- Koherentne materiale vgrajujemo in razstremo v slojih, manjše debeline, ki pa mora biti vseskozi enaka, da dosegamo povsod enako gostoto zbitega materiala.
- Pri vgrajevanju kontroliramo vedno tudi vлагo, ki mora biti v okviru dovoljenih toleranc. Dodatno lahko vlažimo material z razprševanjem.
- za dosego dobre zbitosti uporabljamo ustrezeno mehanizacijo:
 - za vgrajevanje koherentnih glinenih materialov so najbolj primerni **valjarji z ježi**, ki omogočajo dobro homogenizacijo in preprečujejo laminacijo med sloji
 - **vibracijski valjarji z ježi** se uporabljajo pri gradnji nekoherentnih materialov in so primerni tudi za zaglinjene peske in gramoze. Z njimi dosegamo tudi najhitrejšo zbitost.

Gradnja nasute zemeljske pregrade

- **Gumeni valjarji** so primerni za zbijanje debelejših slojev in hitrejšo dosego zbitosti zaradi večje mase valjarja in je tudi primeren za zbijanje materiala, ki vsebuje samice. Z gumenimi valjarji ne dosegamo tako dobre horizontalne povezanosti med sloji kot z ježi, so pa primerni za zbijanje tal ob betonskih zgradbah in na bokih pregrade.
- **Gladki valjarji** se uporabljam samo za zaglavjevanje površine koherentnih materialov, ko se pričakuje daljši zastoj pred nadaljevanjem gradnje.
Površino je treba zaščititi:
 - izvesti enostranski ali dvostranski nagib za odvodnavanje
 - pokrivanje površine s nepropustnimi folijami
 - pokrivanje površine s krovnim slojem za zaščito pred zmrzaljo, ki se ga po nadaljevanju gradnje odstrani
 - če površine ne zaščitimo moramo pred nadaljevanjem krovni sloj odstraniti do globine ustrezne zbitosti

Gradnja nasute zemeljske pregrade

- Pri vgrajevanju **prehodnih** in **podpornih slojev** kontrola vlage ni tako pomembna kot pri vgrajevanju jedra, ker za te sloje praviloma vgrajujemo bolj propustne materiale in ne pride do porasta pornih tlakov.
- Za zbijanje so primerni vsi tipi valjarjev. Primernost pa je odvisna od vgrajenega materiala in deleža drobnih frakcij, ki se izvaja neposredno na licu mesta z izvedbo poskusnih polj.

Gradnja nasute skalometne pregrade

- Pri vgrajevanju skalometnih pregrad je treba upoštevati:
 - **granulacijo** (stopnjevanje) **materiala**
 - **način vgrajevanja**
- Dobro stopnjevan material ima bistveno boljše trdnostne karakteristike in manjšo stisljivost kot enolično stopnjevan material, ki je bil v preteklosti običajen pri vgrajevanju skalometnih pregrad, da bi s tem preprečili nevarnost segregacije pri vgrajevanju. Stopnja gradacije je odvisna tudi od načina in omejitve predelave v drobilnici.
- V propustnem delu podpornih slojev na gorvodni strani vgrajujemo bolj propustne materiale z manjšim deležem drobnih frakcij in na spodnji strani z večjim deležem drobnih frakcij (manj proposten material). Delež drobnih frakcij je povezan z zahtevo po propustnosti materiala

Gradnja nasute skalometne pregrade

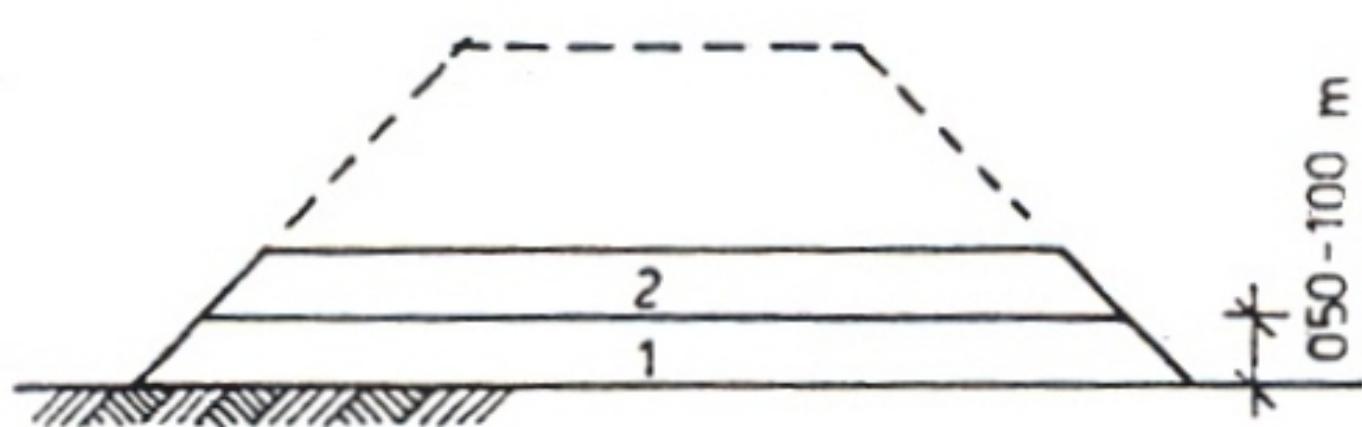
- Prvotno so bili material v skalometne pregrade vgrajevani z nasipanjem in praviloma brez dodatnega kompaktiranja v debelih slojih (tudi več 10 m) in tudi celotni nasip v enem sloju. Posledica takega načina gradnje je bilo nekontrolirano posedanje telesa pregrade, ki se je z močenjem še intenziviralo.
- Naslednji korak je bil vgrajevanje materiala v slojih debeline do 15 m in intenzivnim močenjem pri vgrajevanju, kar ima naslednje učinke:
 - voda izpira drobne frakcije, ki zapolnjujejo medprostor med kamni
 - z vlaženjem se zmanjšuje trdnost materiala in s tem lom večjih kosov, kar prispeva k hitrejši stabilizaciji posedanja telesa pregrade

Gradnja nasute skalometne pregrade

- Z razvojem komprimacijskih sredstev je možno vgrajevati tudi skalometne pregrade z vibracijskim komprimiranjem v slojih debeline 1~2m – tanjši, ko je sloj manjša je nevarnost segregacije in posedanja po zaključku gradnje.
- Na površini sloja se po komprimiranju ustvari vrhnja plast, ki je manj propustna od povprečne propustnosti vgrajenega sloja. Propustnost je v vertikalni smeri manjša od horizontalne, kar je treba upoštevati pri stabilitetnih analizah. Če pojav vpliva na stabilnost brežin je treba:
 - zmanjšati naklon pobočja na vodni strani z vmesnimi bermami
 - povečati debelino slojev vgrajevanja
 - razrahljati vrhnjo plast pred vgrajevanjem naslednjega sloja
 - izpiranje vrhnje plasti pred vgrajevanjem naslednjega sloja

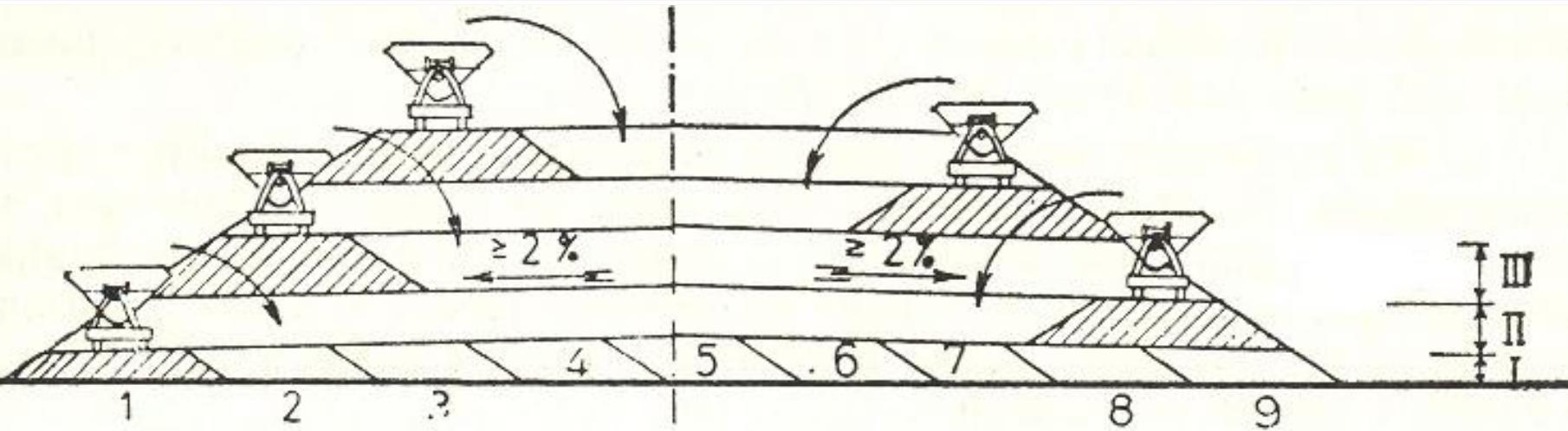
Gradnja nasute pregrade po slojih

- Način vgrajevanja po celotni širini pregrade je primeren za homogene pregrade ali pomožne pregrade (zagatni nasip, preusmerjevalne pregrade, ipd.), kjer po celotni širini vgrajujemo enak material.
- Material nasipavamo in komprimiramo po vsej širini pregrade po slojih. Material dovažamo po svežem nasutju, da se s tem še dodatno komprimira.
- Sloje izvajamo v padcu 2 ~ 3% (eno- ali dvostranskim).



Gradnja nasute pregrade po slojih

- Način vgradnje slojev s stranskim nasipavanjem pride v poštev pri vgrajevanju širokih homogenih in pri slojevitih pregradah, kjer vgrajujemo po vertikali različne tipe materialov.
- Postopek izvedbe s stranskim nasipavanjem poteka vedno od zunanjih brežin pregrade proti notranjosti: lahko enostransko pri homogenih pregradah, ali oboje stransko pri slojevitih prgeradah, kjer se istočasno vgrajuje material iste vrste
- Debelina slojev je odvisna od nasipnega materiala in znaša do **0,5m** (koherenzen) do **1m** (nekoherenzen).



Monitoring nasute pregrade

- Namen **tehničnega opazovanja (*monitoring*)** je izvajanje meritev in pridobivanje podatkov tekom gradnje in eksploatacije iz katerih je mogoče izdelati oceno stanja objektov napovedovati trende obnašanja objektov.
- Namen **nadzorstva nad stanjem pregrade (*surveillance*)** je stalno preverjanje kondicijskega stanja objekta z upoštevanjem rezultatov monitoringa, podatkov rednega vzdrževanja in obratovanja objektov, s ciljem, ugotoviti trende, ki vplivajo na varnost objektov.
- Obseg opazovanja objektov, ki vključuje tehnično opazovanje in nadzorstvo je odvisen od nevarnosti, ki ga objekt pri porušitvi predstavlja za okolico.
- V Sloveniji se izvaja izključno tehnično opazovanje, nadzorstvo je omejeno na posamične primere (Moste, Vogršček, Drtijščica).

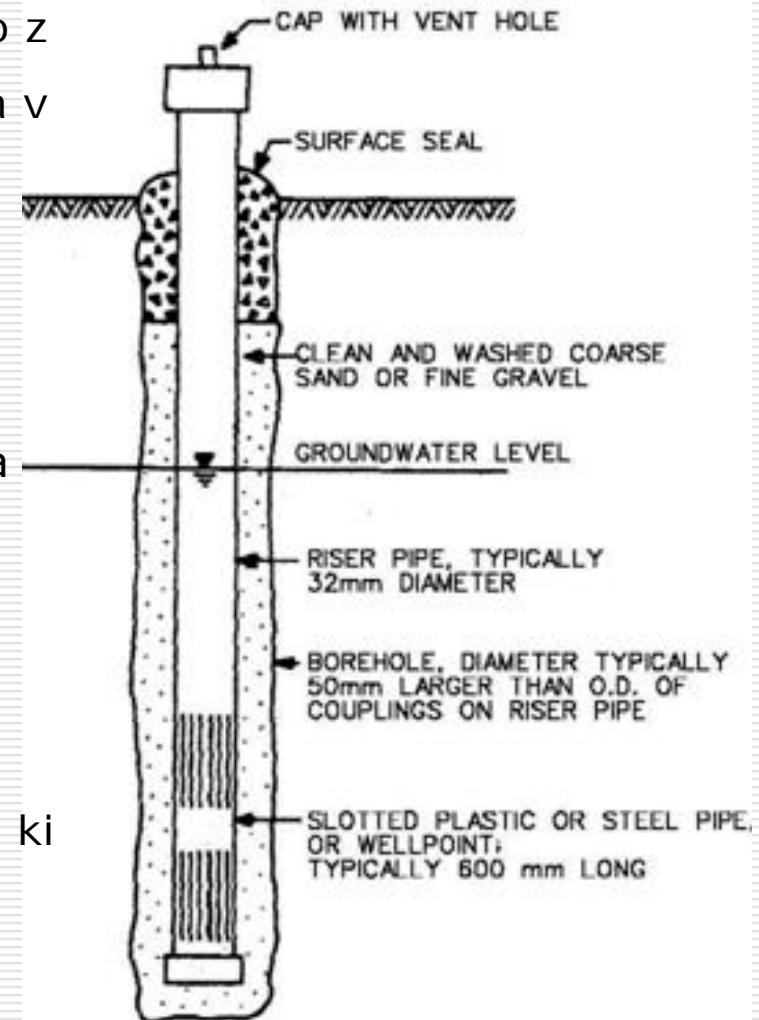
Monitoring nasute pregrade

- Namen monitoringa je spremljanje stanja pregrade tekom gradnje in eksploatacije z kontrolo naslednjih parametrov:
 - napetosti in porni tlak v telesu pregrade in v temeljih
 - deformacije pregrade in temeljev
 - precejanje vode čez telo pregrade in pod temelji
 - pomik repernih točk na pobočju in kroni pregrade
 - seizmična aktivnost

Monitoring nasute pregrade – piezometrski tlak

■ **Piezometrski nivo** v homogenih slojih merimo z opazovalnimi vodnjaki, ki je izveden tako, da v vrtino vložimo jekleno cev, ki je v dovolj homogenem sloju na dnu perforirana do določene višine. Med prostor med cevjo in ostenjem vrtine je zasut s slabo granuliranim materialom, ki preprečuje porušitev ostenja. Na vrhu je vrtina začpljena, da ne pride do vdora površinske vode in cev zaprta s pokrovom.

■ Z opazovalnimi vodnjaki merimo nivo proste piezometrske gladine podzemne vode. Gladino merimo s spuščanjem sonde na graduirani vrvi, ki je lahko mehanska priprava, ki z zvočnim signalom opozori na kontakt z vodo ali pa električni indikator, ki registrira stik z vodo.



Monitoring nasute pregrade – piezometrski tlak

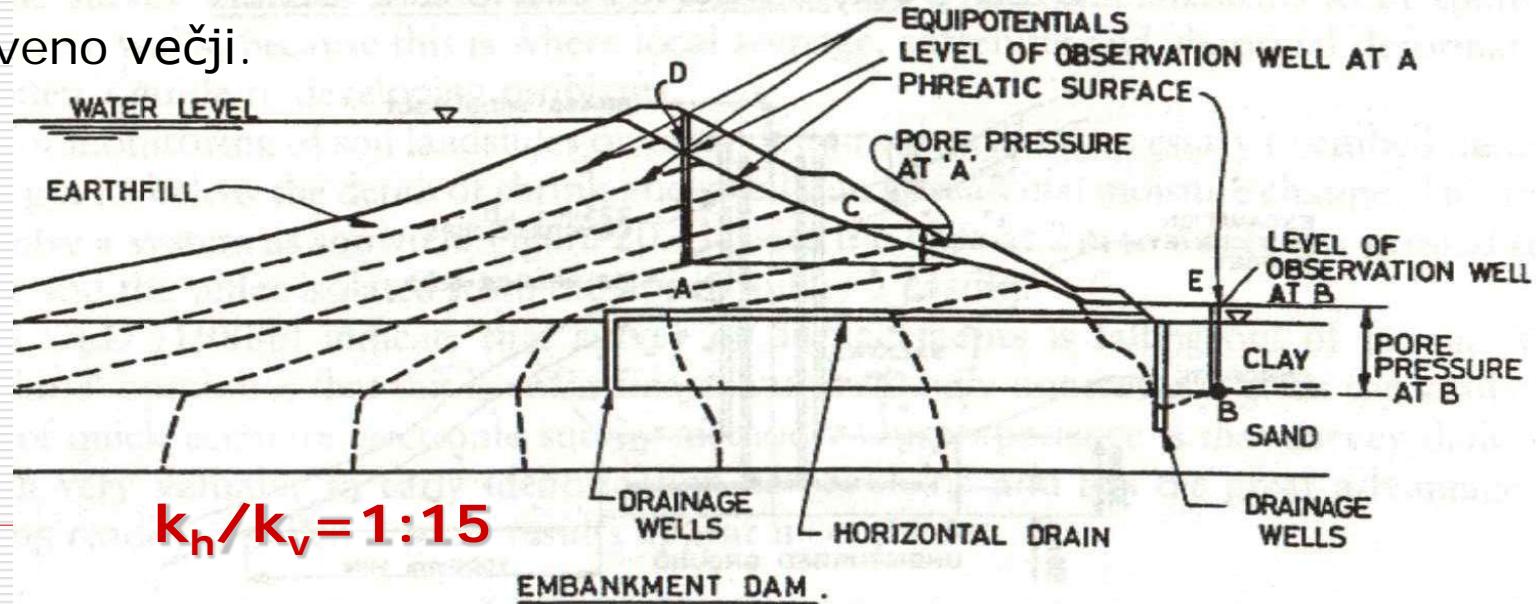
- **Piezometrski nivo** v nehomogenih slojih merimo lahko na več nivojih. Odprt piezometer ne pride v poštev, ker bi se nivoji gladine izenačili in s tem izmerimo zgolj potencial v okolini piezometra.
- Gladino vode v več nivojih merimo z **zaprtimi piezometri** (casagrandejev tip), ki omogoča meritve v izoliranem delu vrtine, ki je zatesnjena do nivoja podtalne vode. V eni vrtini je lahko nivojsko postavljenih več neodvisnih merskih mest.
- Dolžina perforiranega dela je odvisna od prepustnosti in hitrosti sprememb gladine – pri malo propustnih skladih je dolžina večja in premer cevi manjši in obratno.
- Z **zaprtimi piezometri** merimo nivo piezometrske gladine na posameznih nivojih. Gladino merimo s spuščanjem sonde na graduirani vrvi, ki je lahko mehanska priprava, ki z zvočnim signalom opozori na kontakt z vodo ali pa kontinuirno z vstavljenimi **merskimi sondami**.

Monitoring nasute pregrade - precejanje

- Spremljanje količin in kvalitete ozziroma pojav precedne vode pod pregrado je eden od ključnih indikatorjev o stanju pregrade.
- Zaželeno je, da se precedne vode zajame čim bližje nepropustnemu sloju in, da se v celoti izključi vpliv propustnih slojev pod tesnilnim jedrom. Za praktično uporabo pa je bolj učinkovito, če se zbirni kolektorji in merilna mesta postavijo pod nožico pregrade na dolvodni strani.
- Meritve spremeljanja pronicanja vode se izvaja:
 - meritve pretokov na oblikovanih prelivih (Thomsonov, Parshalov,...) z možnostjo stalnega zajemanja podatkov
 - občasne meritve z meritvami na iztokih, vodnjakih,...
 - vizualni pregledi pojava omočenih mest, kjer se pronicanje pojavlja občasno

Monitoring nasute pregrade - precejanje

- Za stabilnost pregrade (pobočij) je kritični porni tlak in ne piezometrski:
 - v vrtini AD je nivo piezometrske gladine na nivoju D; porni tlak v točki A pa znaša višino AC, kar je nižje kot piezometrska gladina zaradi hidravličnih izgub pri precejanju vode skozi pregrado
 - če bi bilo razmerje k_h/k_v manjše, bi bile ekvipotencialne linije bistveno bolj strme in porni tlaki (pri enaki piezometrski višini) bistveno večji.



Monitoring nasute pregrade - geodezija

- **Pomik reperjev** na površini pregradi in na bokih doline merimo z geodetskimi metodami. Geodetsko mrežo sestavlajo:
 - točke **osnovne geodetske mreže**, ki ležijo na geološko stabilnih tleh in omogočajo opazovanje vseh kontrolnih točk na pregradi
 - **kontrolne** (reperne) **točke** na pregradi s podstavkom za postavitev instrumentov za določitev smeri in višine merske točke
- Geodetske točke morajo biti postavljene tako, da niso pod vplivom klimatskih razmer (zmrzovanje, sušenje, vlaženje,...) – globina temelja je na 1m.

Monitoring nasute pregrade - geodezija

- Točke osnovne geodetske mreže in referenčne višinske točke morajo biti izven vpliva pregrade in akumulacije (posedanje terena v vplivnem območju).
- Višinski pomiki se izvajajo z **nivelmanom**, horizontalni pomiki pa s **triangulacijo**. Stopnja natančnosti, ki jo izvajamo z mersko opremo je pod $\pm 1\text{mm}$.
- Za kontrolo varnosti je minimalni pogoj (pregrada na kvalitetni temeljni podlagi), da se spreminja pomike v 4 do 6 reperjih na kroni pregrade in vsaj 3 reperjev v posameznem prečnem profilu na dolvodni in gorvodni strani.

Monitoring nasute pregrade - seizmičnost

- Po pravilniku o seizmičnem monitoringu je predpisano, da se opazuje naslednje:
 - **inducirana seizmičnost** kot posledica spremenjene potresne dejavnosti zaradi ojezeritve
 - **dinamični odziv pregrade**, temeljev in površja okoli nje na potres
- Inducirano seizmičnost spremljajo s **seizmografi**, ki zapisujejo **vektorje hitrosti gibanja** v vseh smereh. Instalacija seizmografov je obvezna za vse pregrade, ki so višje od 40m (vsaj en seismograf) oziroma višje od 100m (vsaj trije seismografi) na prostem površju do 5 km od obale zadrževalnika.

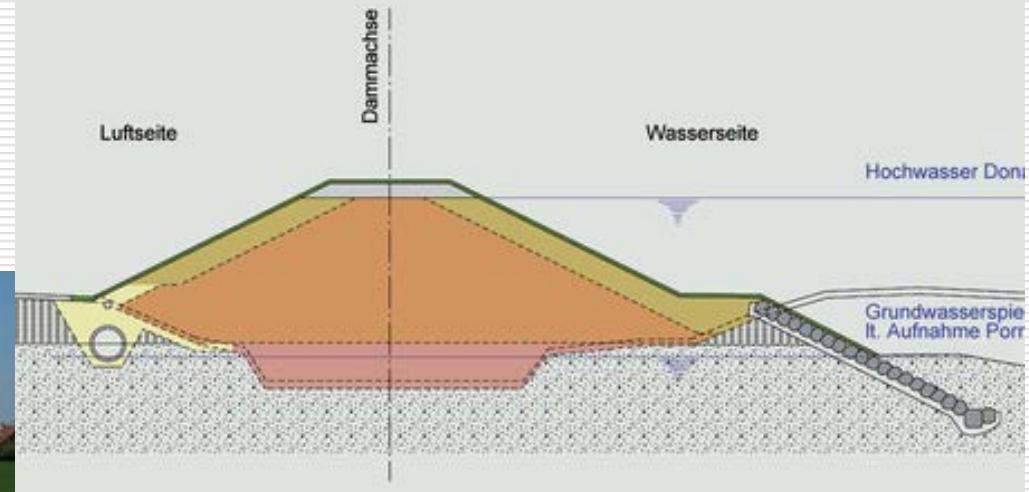
Monitoring nasute pregrade - seizmičnost

- Dinamični odziv pregrade spremljamo z **akcelografi**, ki zapisujejo **vektorje pospeškov gibanja** podlage (temeljna tla, telo pregrade, prosto površje) v vseh smereh. Instalacija akcelografov je odvisna od višine pregrade:
 - višina $>60m$ - postavljeni morajo biti vsaj 4 akcelografi, od katerih sta po eden v temelju in na prostem površju ter dva v telesu pregrade
 - $30 > \text{višina} > 60m$ - postavljeni morajo biti vsaj 3 akcelografi, v temelju, telesu pregrade in na prostem površju
 - višina $<30m$ - postavljena morata biti vsaj 2 akcelografa, v temelju in na prostem površju

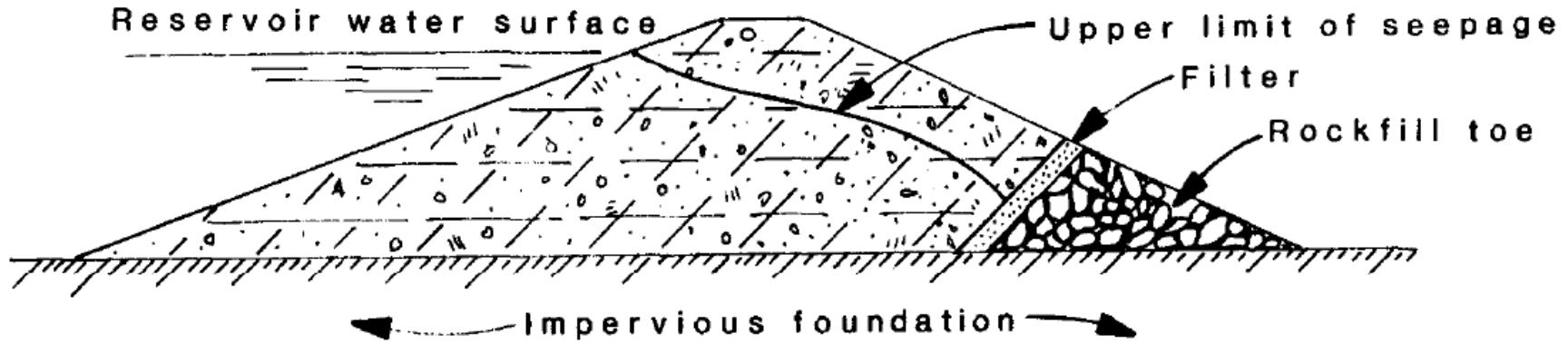
Zemeljska pregrada - homogena



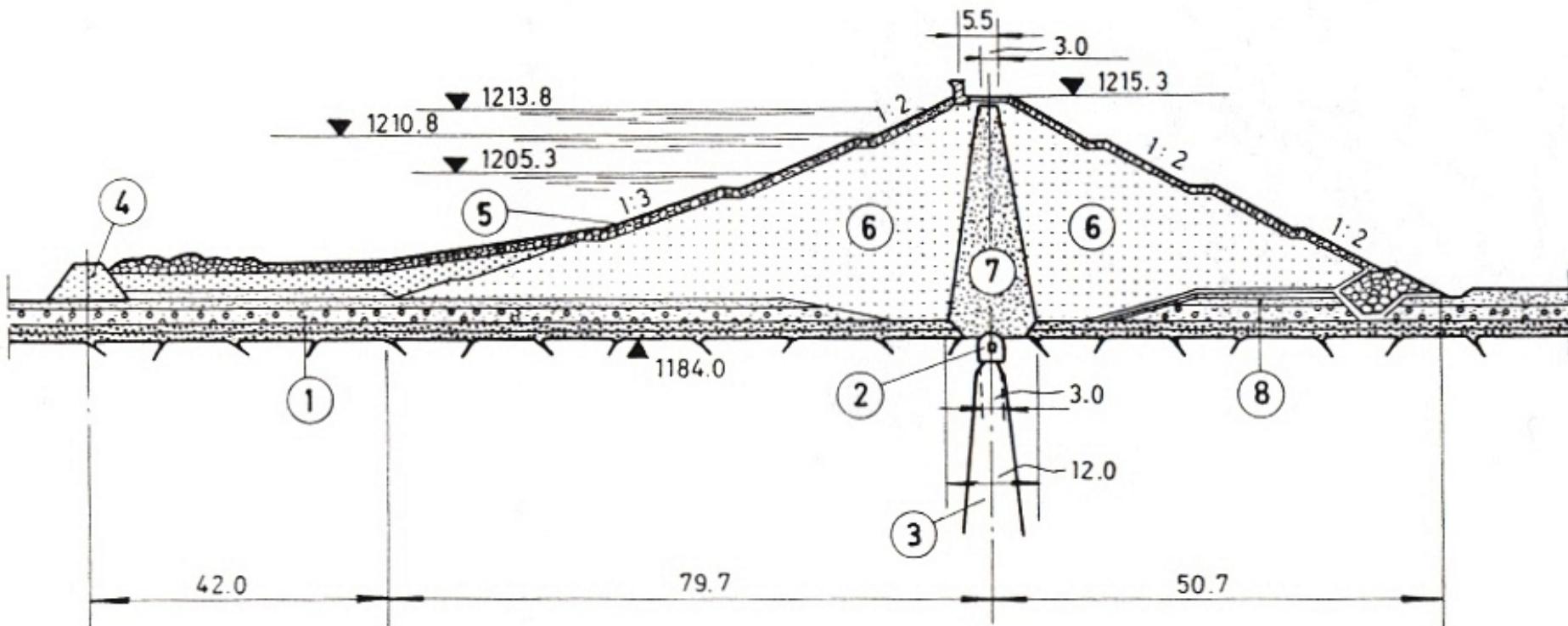
Regelquerschnitt Baulos 3
Ausführungsprojekt - Naarn



Zemeljska pregrada – modificirana homogena



Zemeljska pregrada - slojevita

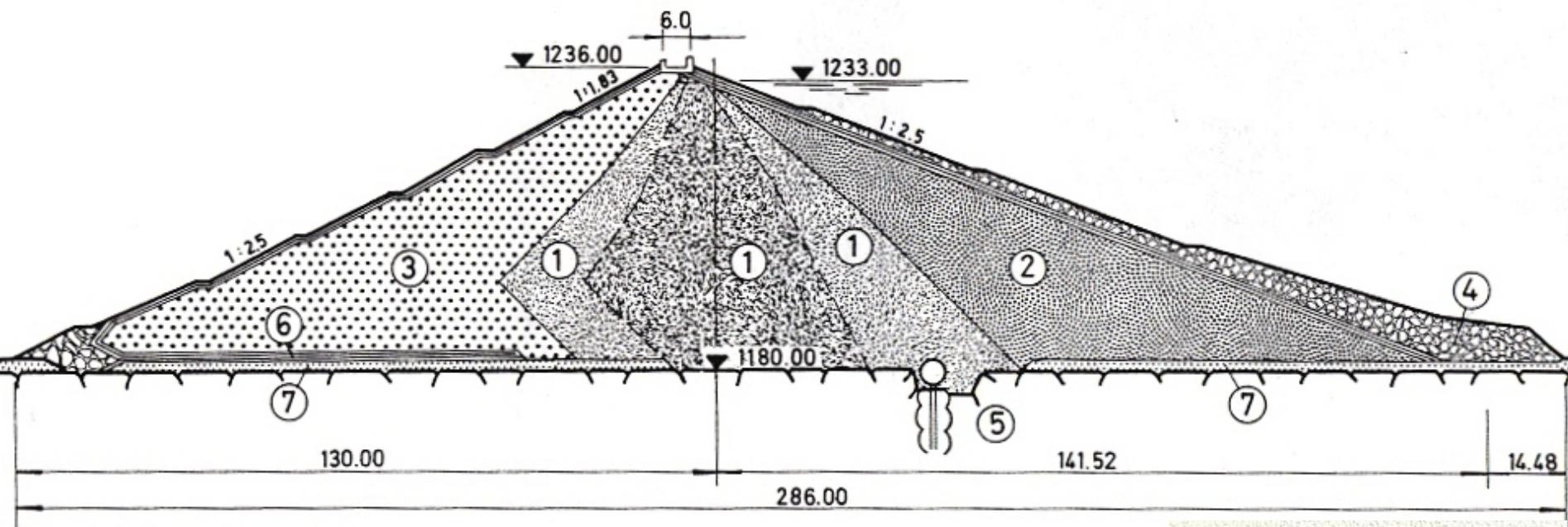


- 1. aluvij (glina, pesek, gramoz)
- 2. galerija
- 3. injekcijska zavesa

- 4. pomožna pregrada
- 5. kamena zložba
- 6. preperel skrilavec

- 7. glineno jedro
- 8. drenažni tepih

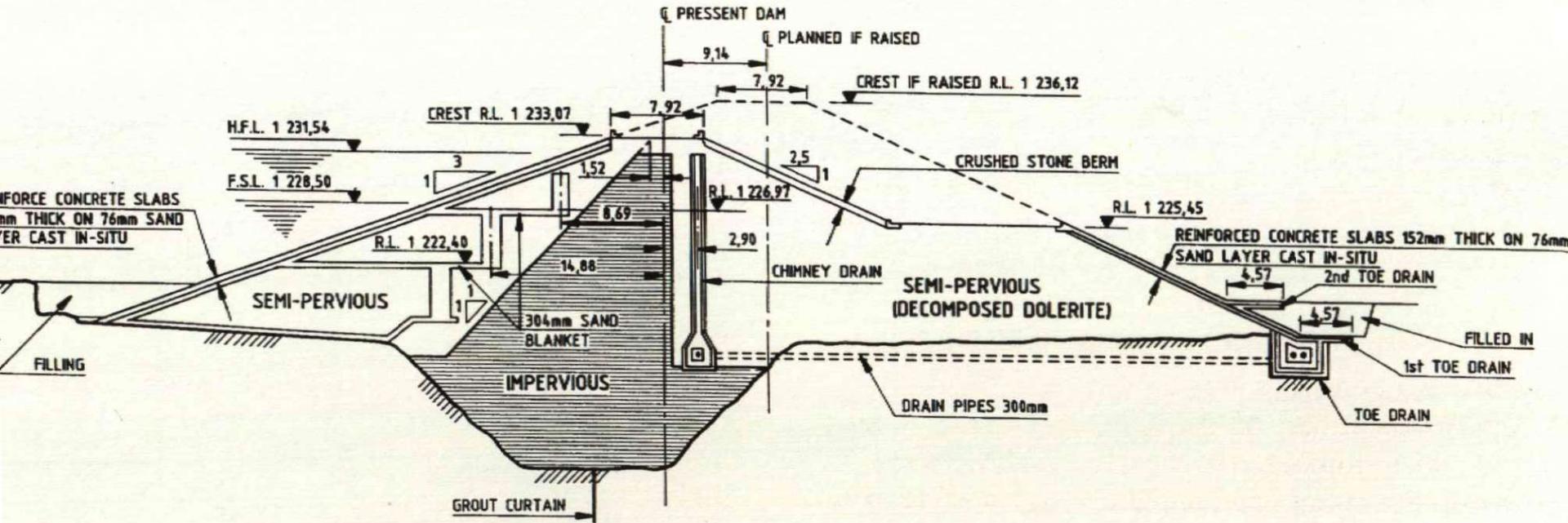
Zemeljska pregrada - slojevita



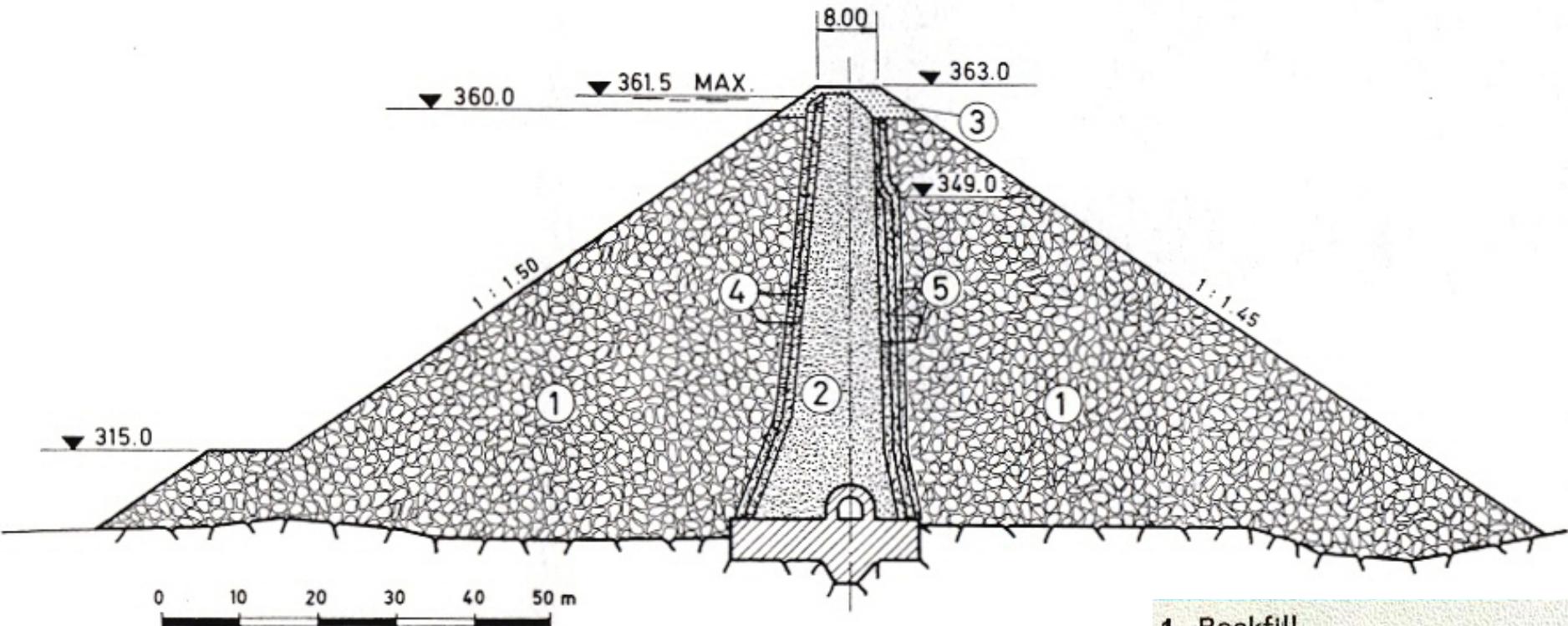
- 1. Clay core
- 2. Earth material
- 3. Coarse material
- 4. Rockfill protection
- 5. Grout curtain
- 6. Drainage blanket
- 7. Alluvial deposits

Zemeljska pregrada – slojevita

■ Slojevita zemeljska pregrada s tesnilno oblogo

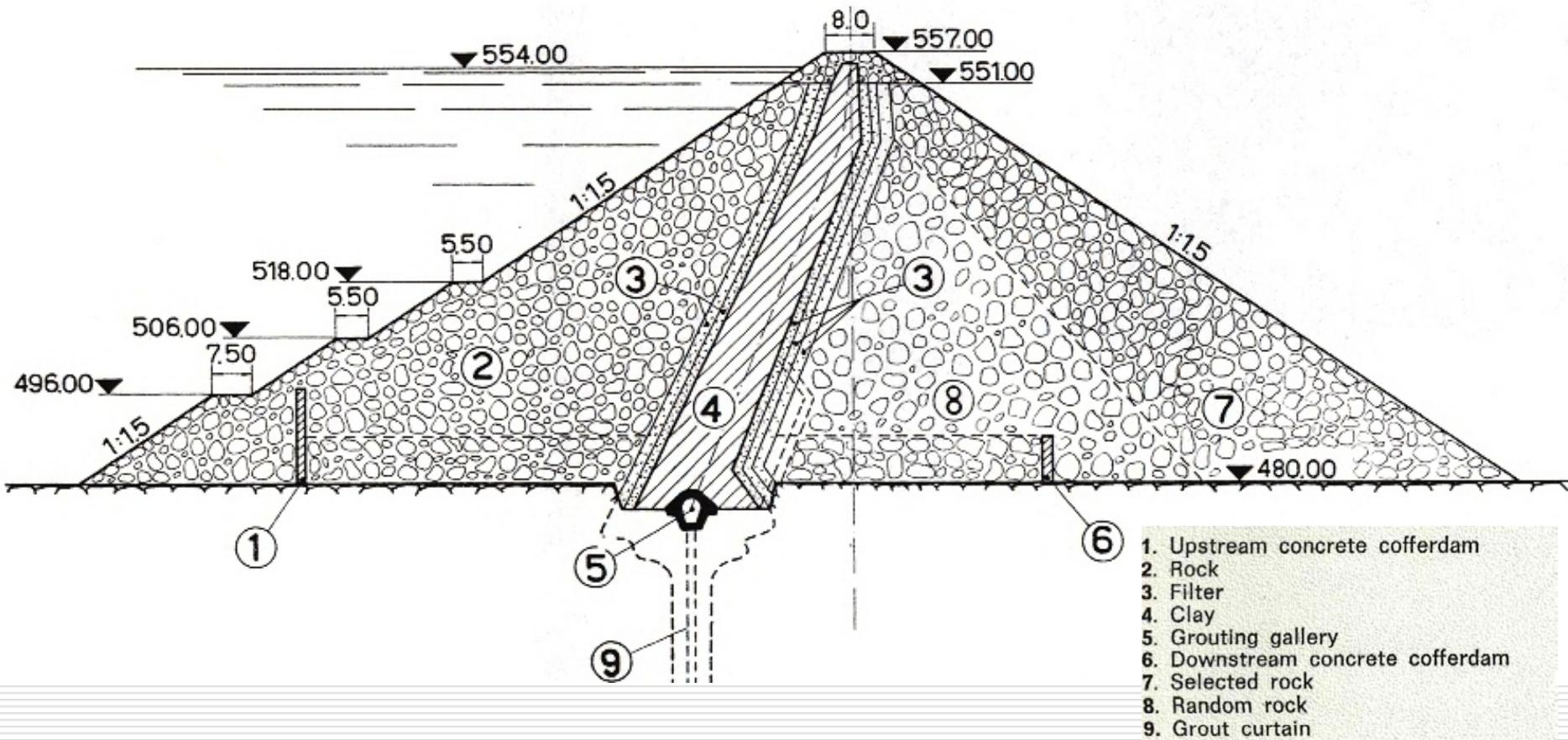


Skalometna pregrada – centralno jedro

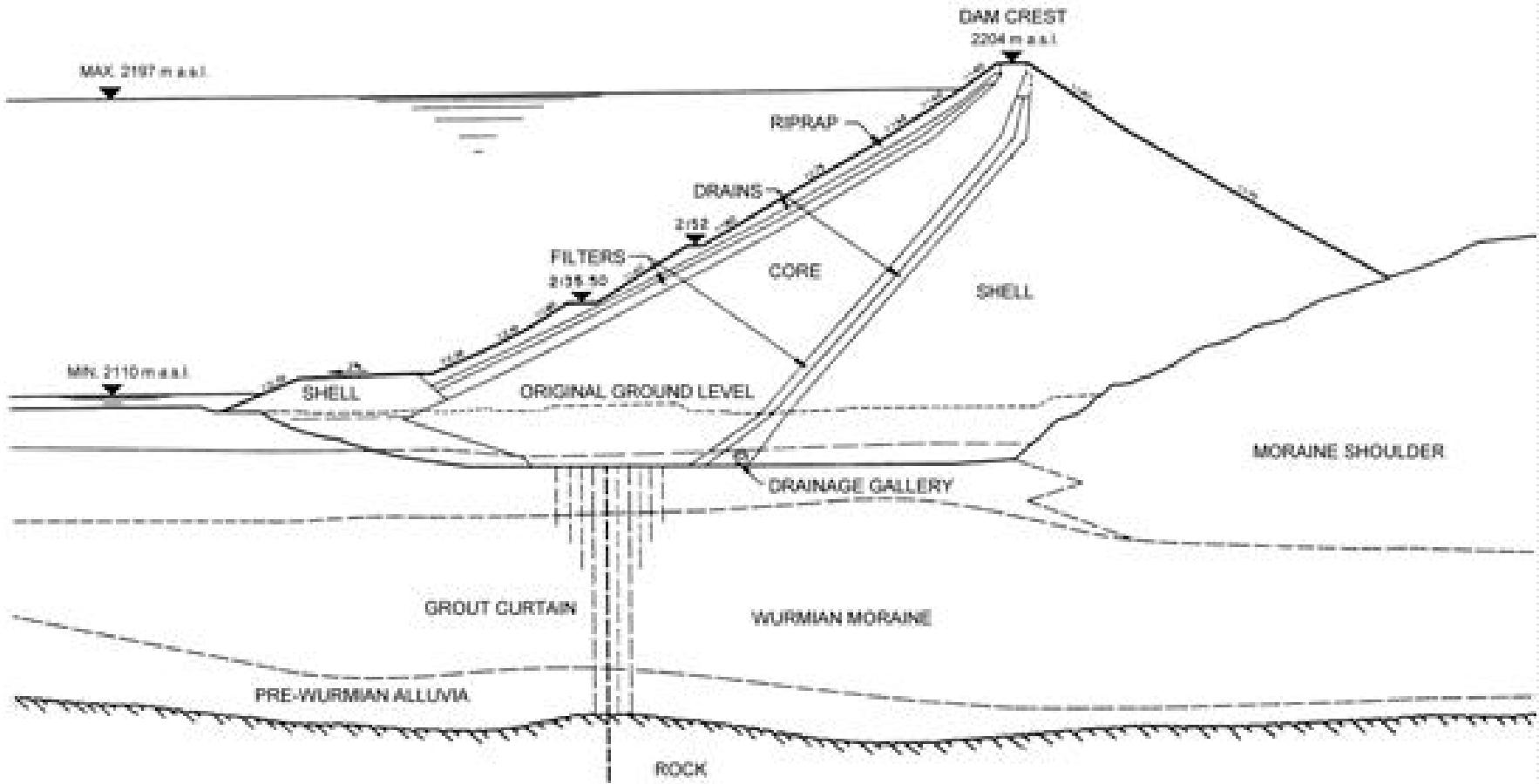


- 1. Rockfill
- 2. Clay core
- 3. Crushed rocks and clay
- 4. Filter-two layers
- 5. Filter-three layers

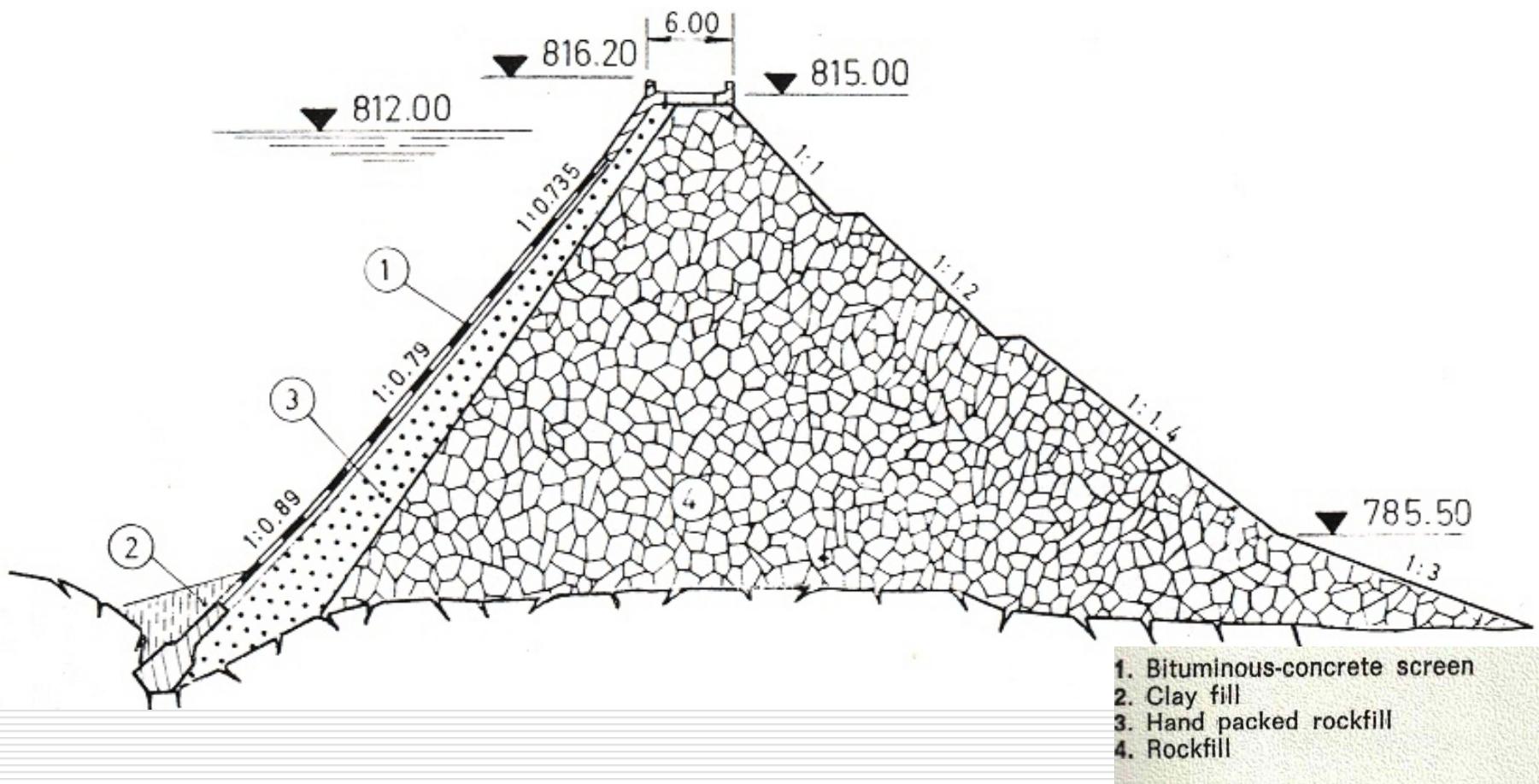
Skalometna pregrada – nagnjeno jedro



Skalometna pregrada – slojevita – nagnjeno jedro

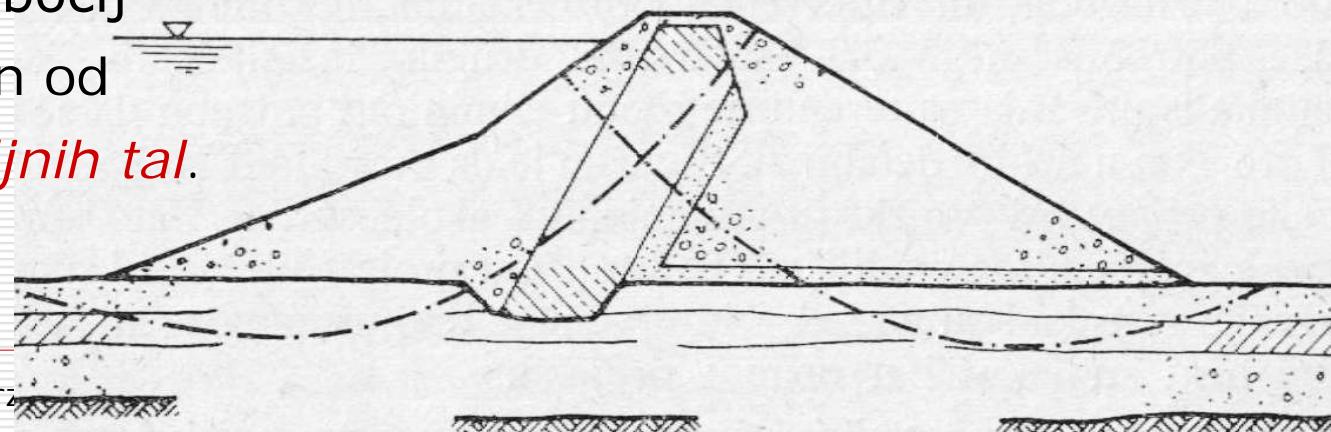
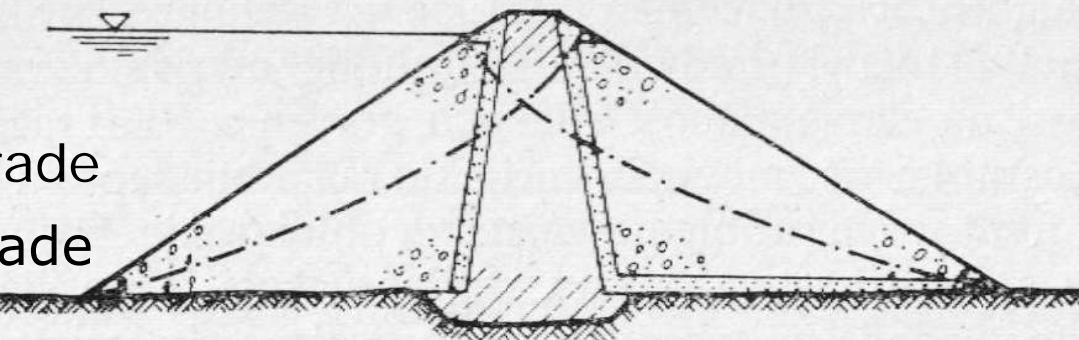


Skalometna pregrada – nepropustna obloga

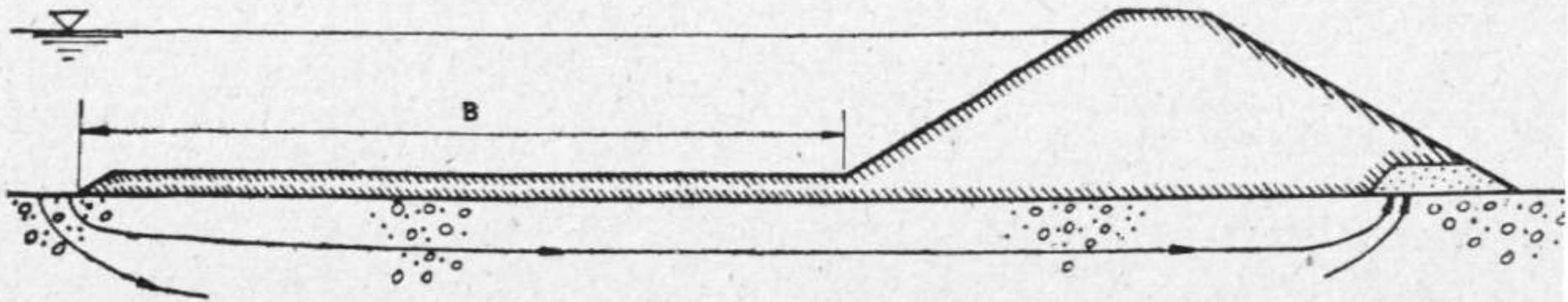


Zasnova pregrade - nosilnost temeljnih tal

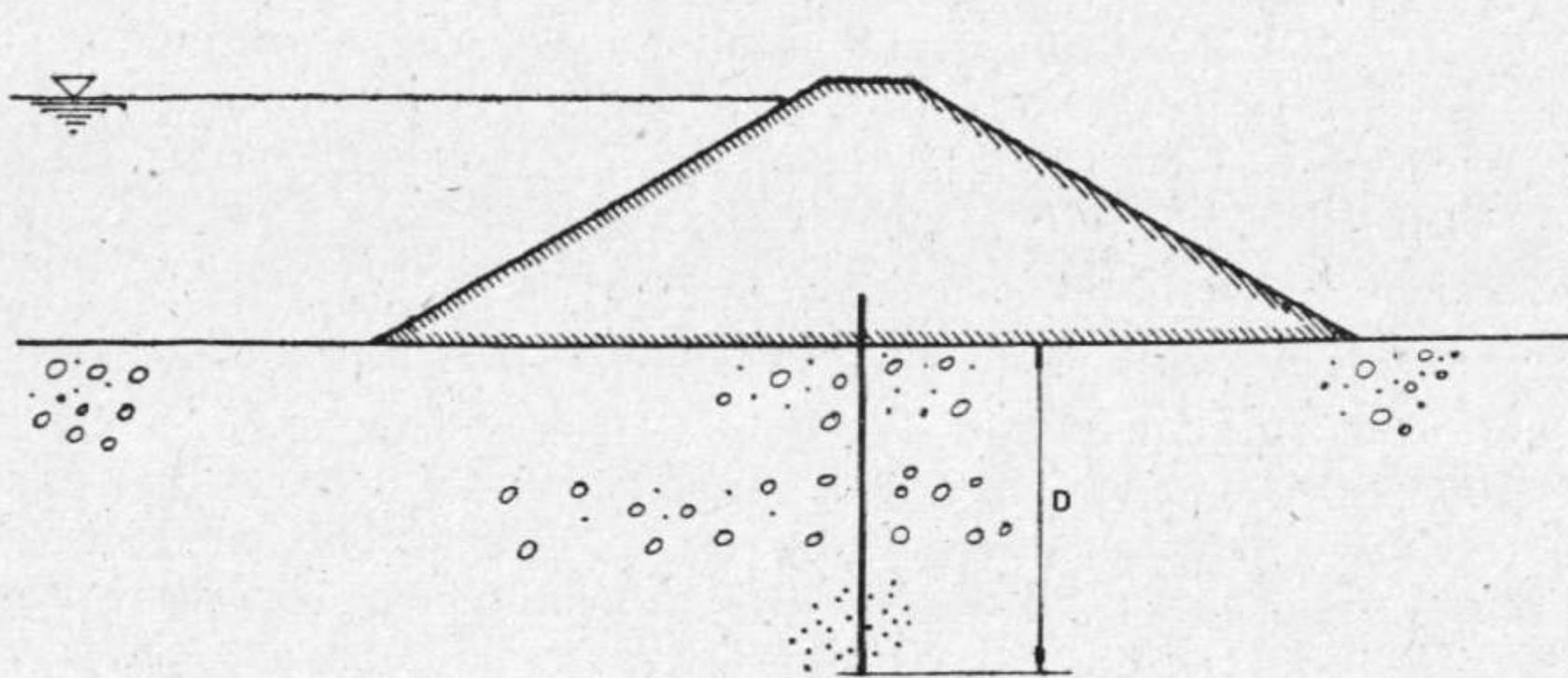
- Na **zadosti trdnih tleh** je mogoče izkoristiti nosilnost podlage s postavitvijo pregrade z bolj strmimi pobočji pregrade (skalometna pregrada) – nagib pobočij pregrade je odvisen od karakteristik *vgrajenega materiala*.
- Na **slabše nosilnih tleh** pa morajo biti pobočja pregrade bolj položna – nagib pobočij pregrade je odvisen od karakteristik *temeljnih tal*.



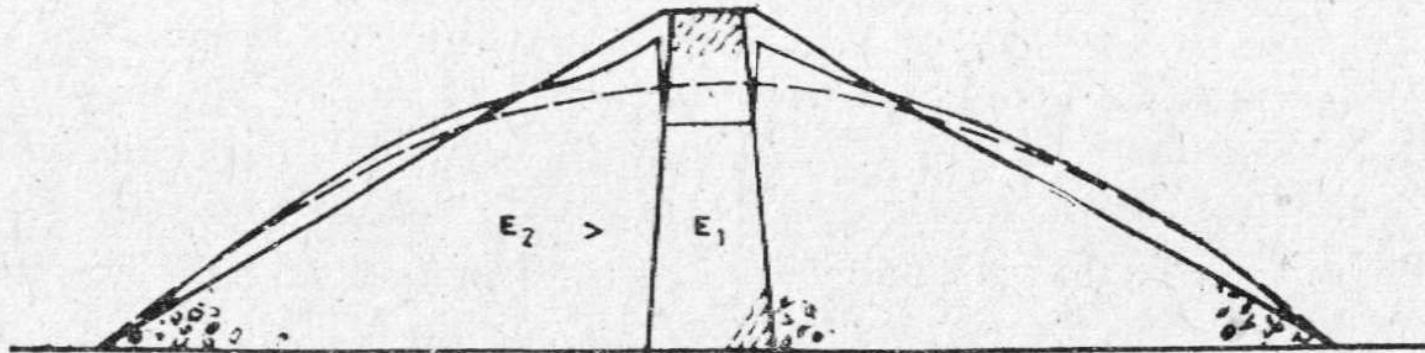
Zasnova pregrade – tesnilna preproga



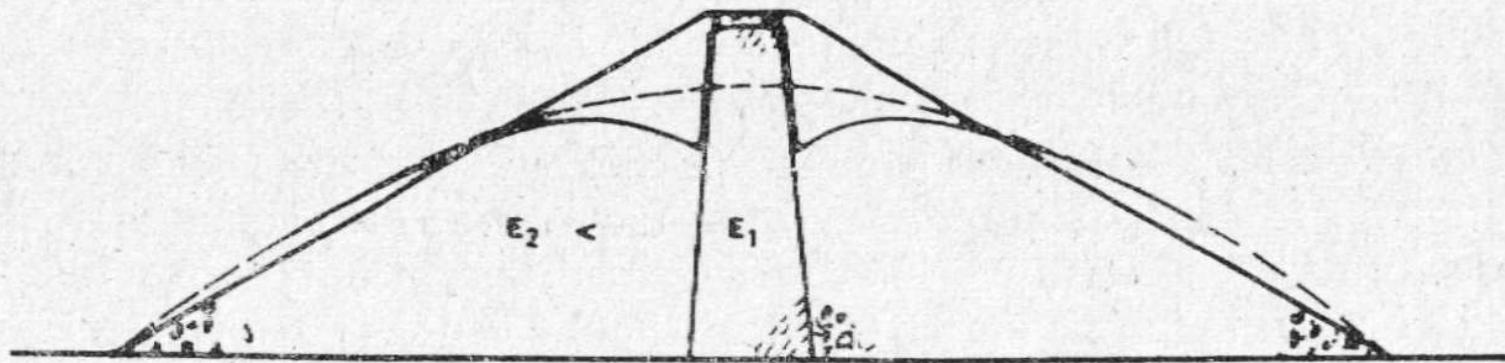
Zasnova pregrade – tesnilna zavesa



Konstrukcija pregrade – prerazporeditev normalnih napetosti



- jedro je bolj stisljivo od podpornih slojev



- jedro je manj stisljivo od podpornih slojev

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo in tesnitev



- pregrada **Homestake dam** (76m), ZDA
- skalometna pregrada z gorvodno oblogo iz asfalt betona (8% veziva)
- debelina obloge na brežini 18 cm (na vrhu) do 36cm (na dnu) v 2 do 4 slojih po 9 cm na 30cm tamponskega sloja

- pregrada **Yashio** (90m), Japonska
- skalometna pregrada z gorvodno nepropustno oblogo iz asfalt betona (8,5% asfaltnega veziva in 0,8% jeklenih vlaken – povečana seizmična odpornost oblage)
- debelina oblage 37cm v 7 slojih s površinsko zaščito z mastikom



Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo in tesnitev

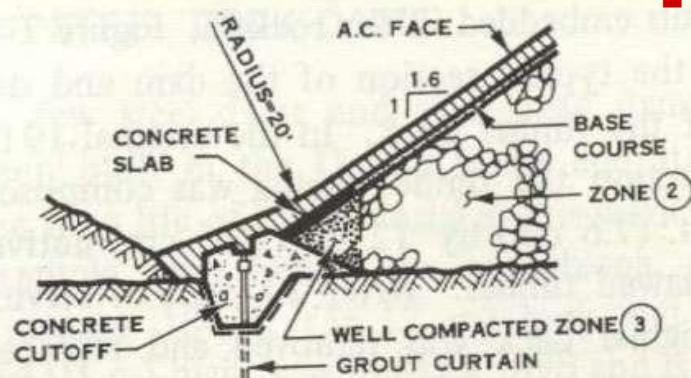


- zemeljski pregradi **Kolarjev vrh** 1 in 2 (23 in 17m) – čHE Avče
- debelina obloge na brežini 16 cm v 2 slojih po 8 cm na 30cm tamponskega sloja s površinsko zaščito z mastikom

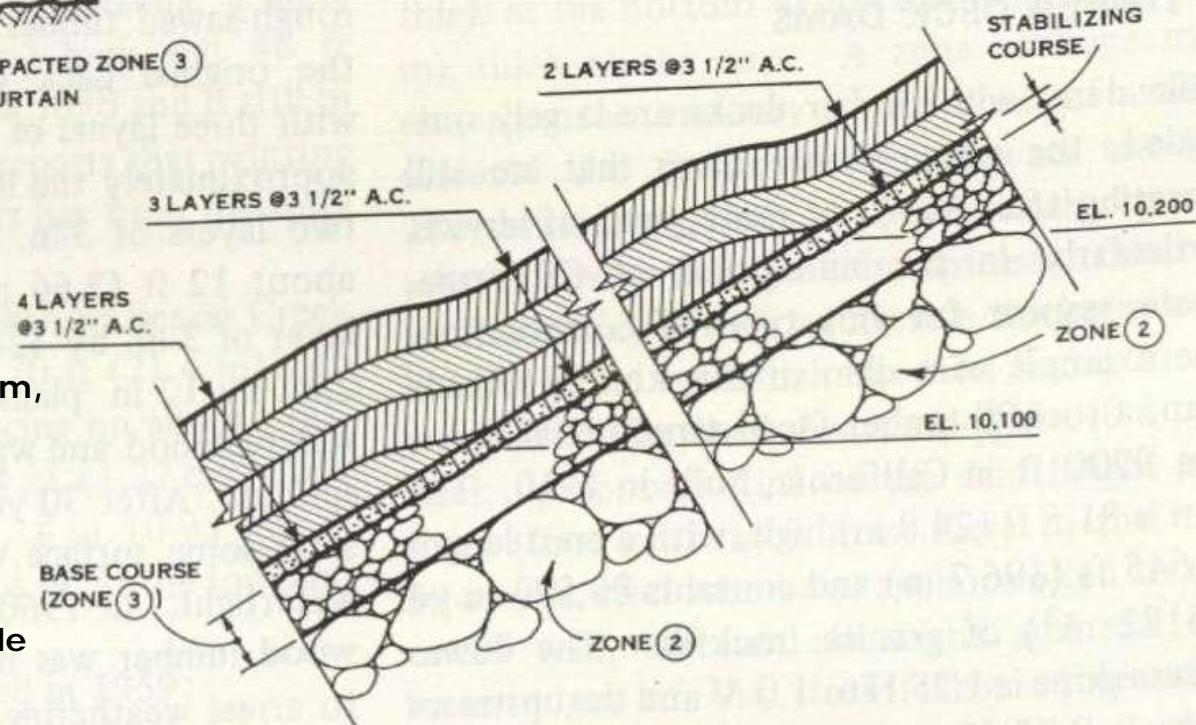
- dovodni nasip **HE Formin**
- zemeljski nasip z nepropustno oblogo iz asfalt betona
- debelina oblage 10 cm z zaščitnim betonskim valobranom na vrhu nasipa



Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo in tesnitev



■ detalj priključka oblage v peti pregrade



- 2 do 4 sloji asfalt betona (0-4mm, 8% veziva)
- stabilizacijski sloj z bitumnom
- tamponski sloj (4-80mm, 30cm debeline)
- kompaktiran sloj telesa pregrade (5-45cm)

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

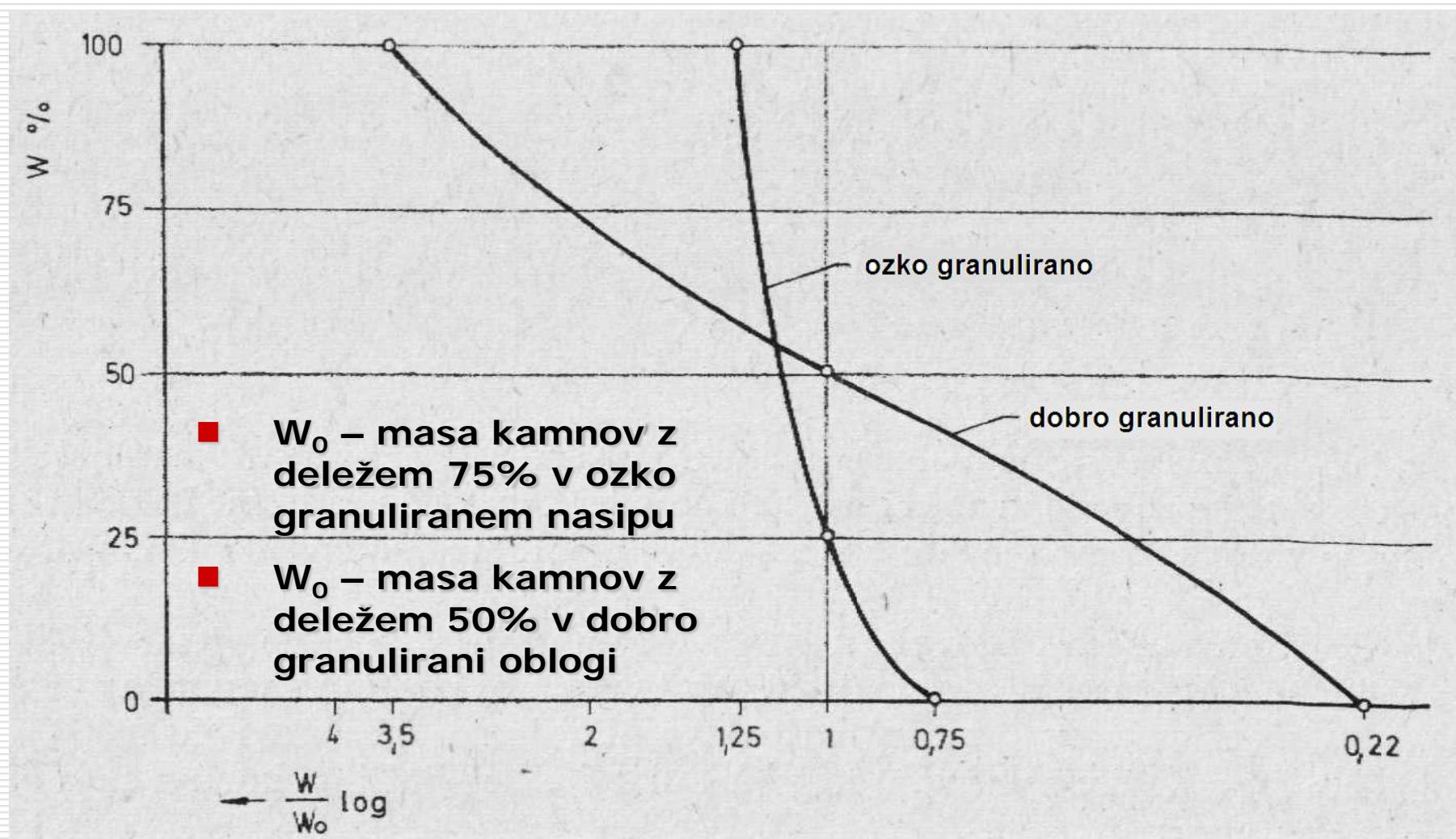


- gorvodno pobočje pregrade
Vanganel
- nasut kamnomet

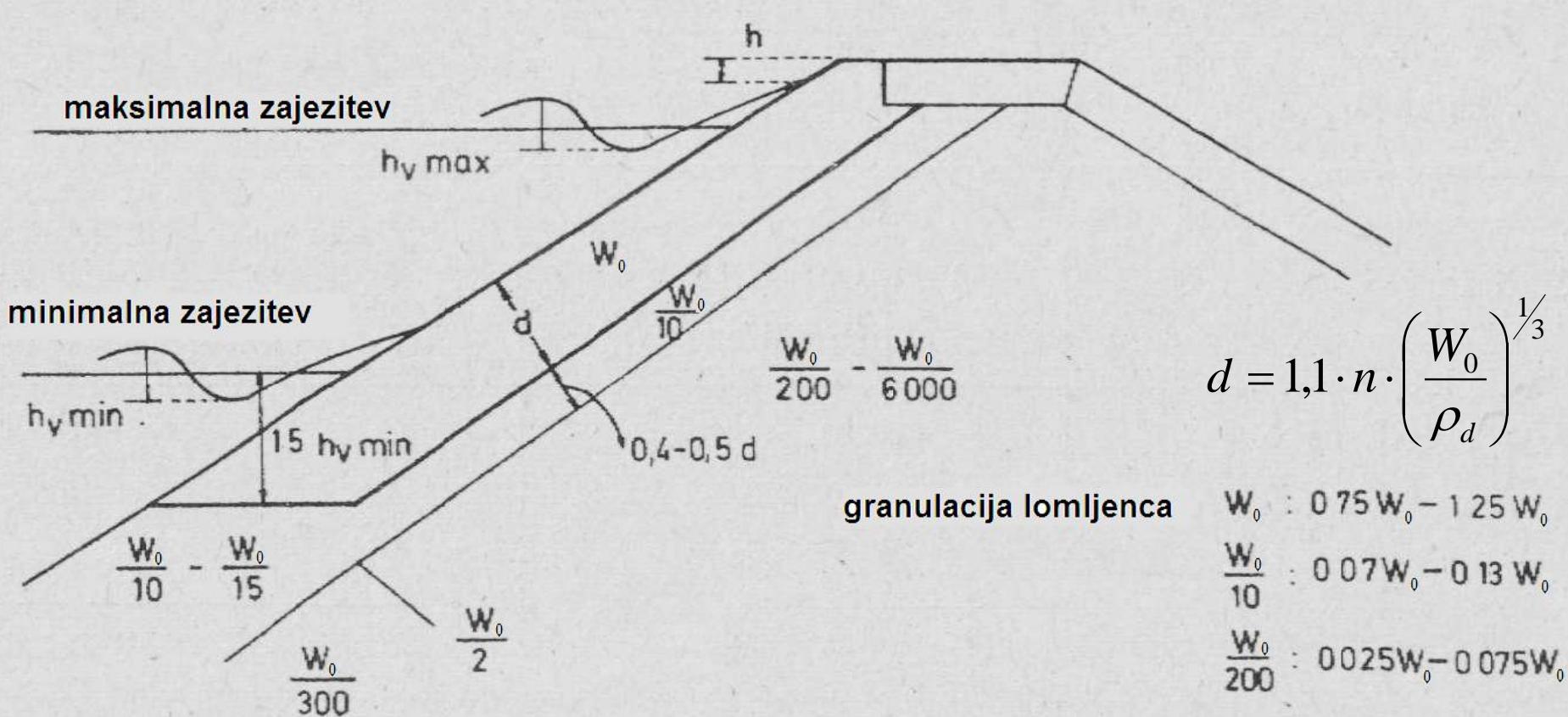


- gorvodno pobočje pregrade
Klivnik
- nasut skalomet

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo granulacijska krivulja



Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo: oblikovanje zaščite



Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

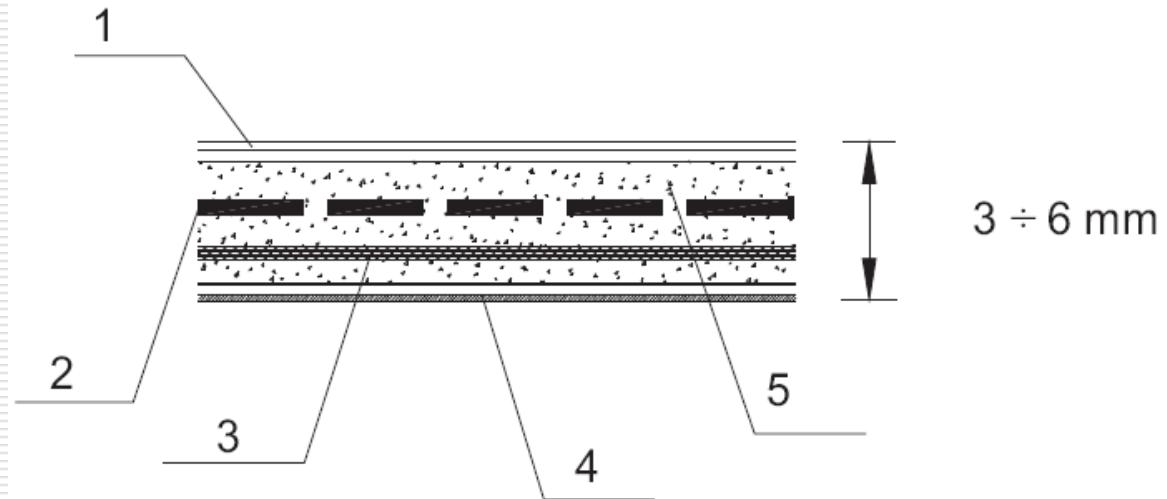


- gorvodno pobočje pregrade **Mola**
- kamena zložba

- gorvodno pobočje pregrade
Vogršček
- poravnani skalomet



Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo



1. zaščitni peščeni sloj
2. geotekstil, prepojen z bitumnom
3. ojačitev s steklenimi vlakni
4. proti koreninski premaz
5. bitumni material

Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

a) Extrusion seams - *Soudage par extrusion*



b) Thermal fusion seams - *Soudage par fusion thermique*

Hot air - *Air chaud*

Dual - Double



Single - Simple



Hot wedge - *Lame chaude*

Dual - Double



Single - Simple



c) Chemical seams - *Soudage chimique*

Chemical fusion - *Fusion chimique*



Bodied chemical fusion - *Fusion chimique base matière-mère*



d) Adhesive seams - *Soudage par adhésif*

Chemical adhesive - *Adhésif chimique*



Contact adhesive - *Adhésif par contact*



Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo



- dolvodno pobočje pregrade **Klivnik**
- zaščita s travno rušo

- gorvodno pobočje pregrade **Drtijščica**
- poravnani sklaomet v območju stalne ojezeritve
- zaščita pobočja s travno rušo nad nivojem stalne ojezeritve



Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo



- pojav olesenelih rastlin na pobočju, kot primer večletne nedejavnosti pri vzdrževanju travne ruše

■ poležana travna ruša ne nudi dovolj protierozijske zaščite pobočja – pojavljajo se lokalne erozijske zajede na površini



Konstrukcija pregrade – zaščita brežin pred erozijo

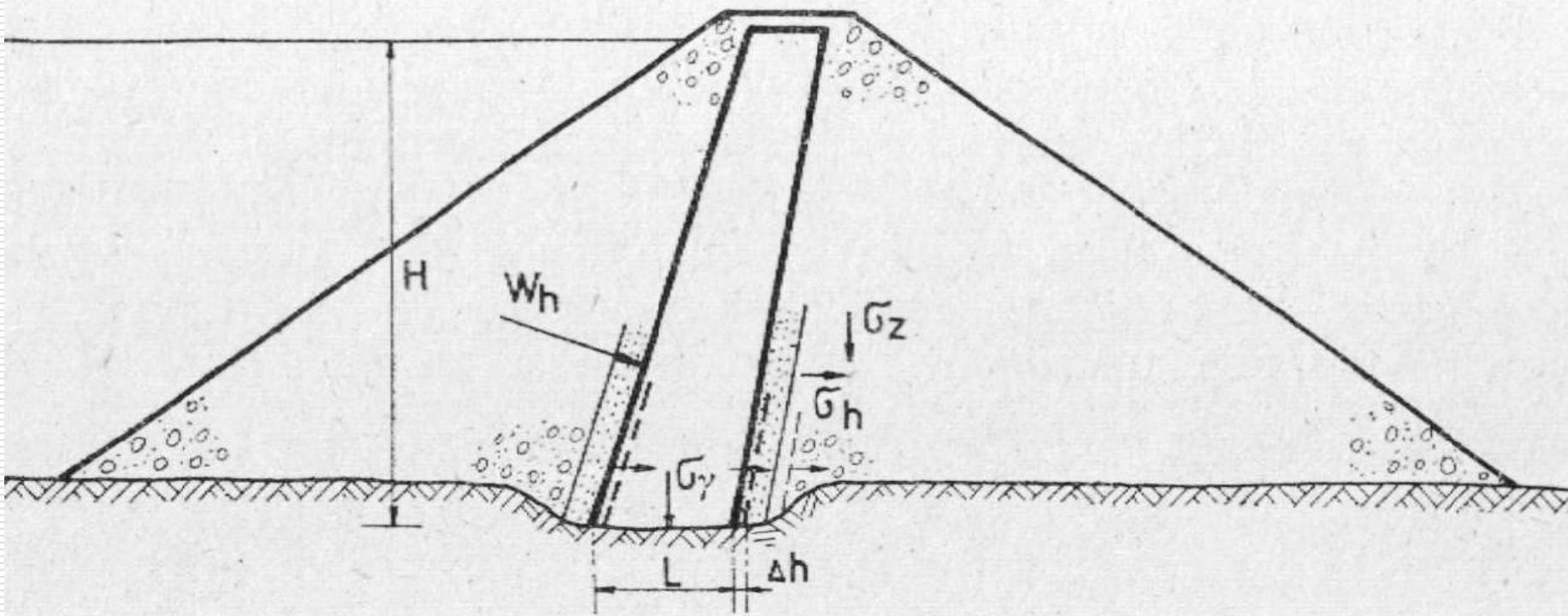


- neustrezna izvedba kanalet za odvajanje površinskih voda na bermi

- zamik trase zbirnega kanala in zastajanje površinske vode na bermi

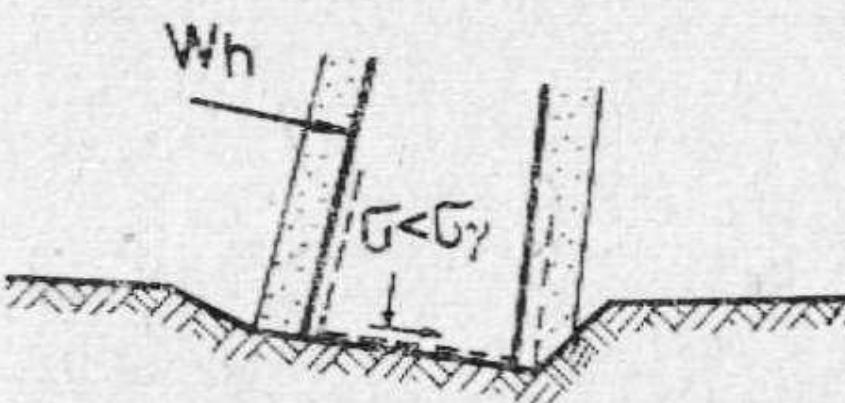
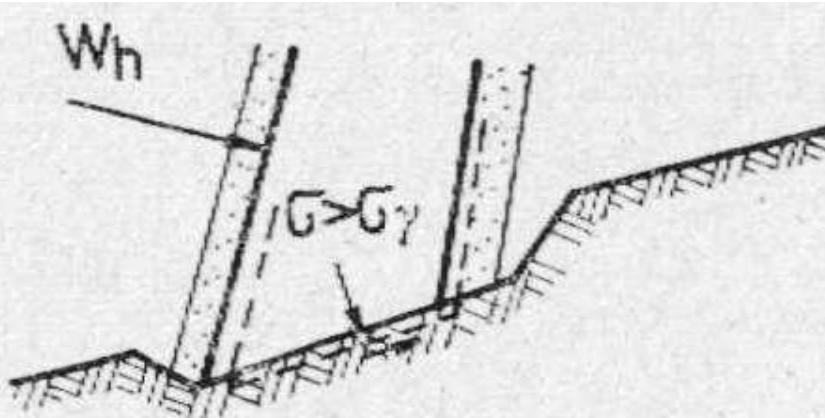


Konstrukcija pregrade – kontakt jedra in temeljne podlage

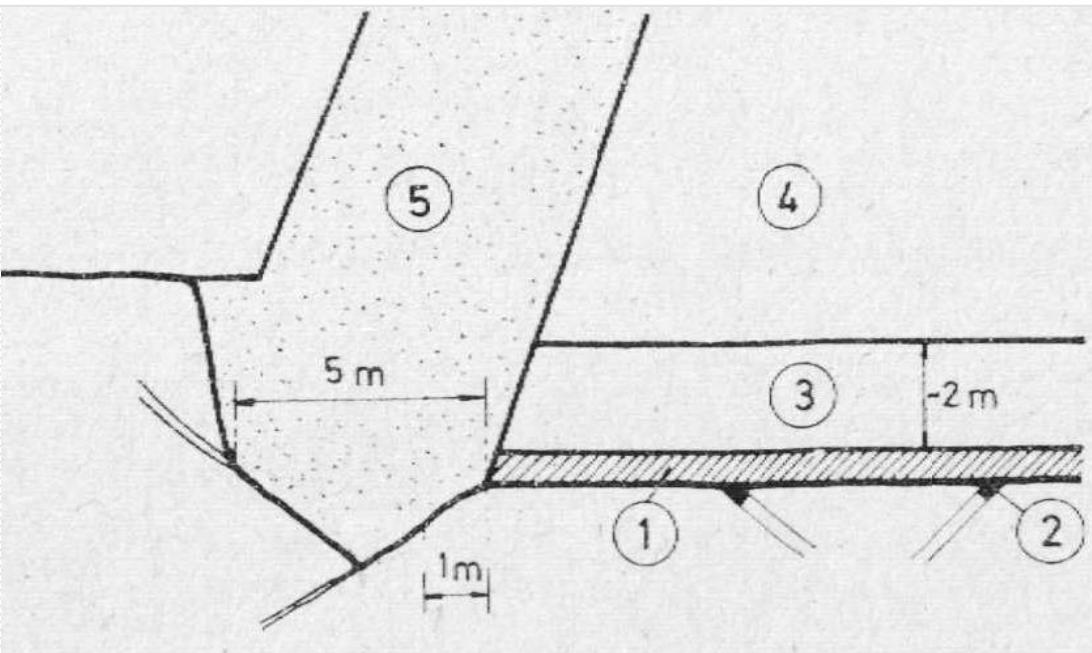


- jedro se zaradi hidrostatskega tlaka W_h premakne za Δh dolvodno in dodatno stisne – povečajo se kontaktne napetosti v temelju jedra $>\sigma_y$

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra in temeljne podlage

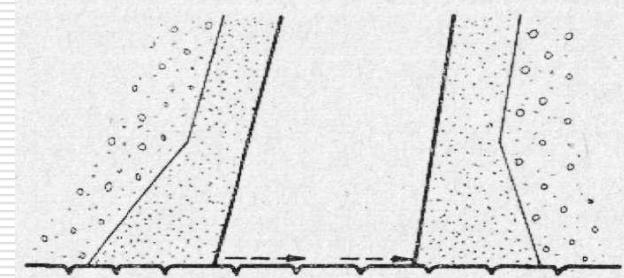
- 
- Diagram illustrating a concave contact ($G < G_\gamma$) between a dam core (represented by vertical hatching) and the foundation (represented by horizontal hatching). The water head is labeled W_h . The core is shown to be lighter than the surrounding soil.
- konkavni kontakt jedra s podlago
- 
- Diagram illustrating a convex contact ($G > G_\gamma$) between a dam core (vertical hatching) and the foundation (horizontal hatching). The core is shown to be heavier than the surrounding soil. The diagram also shows a slope on the right side.
- konveksni kontakt jedra s podlago

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra in temeljne podlage

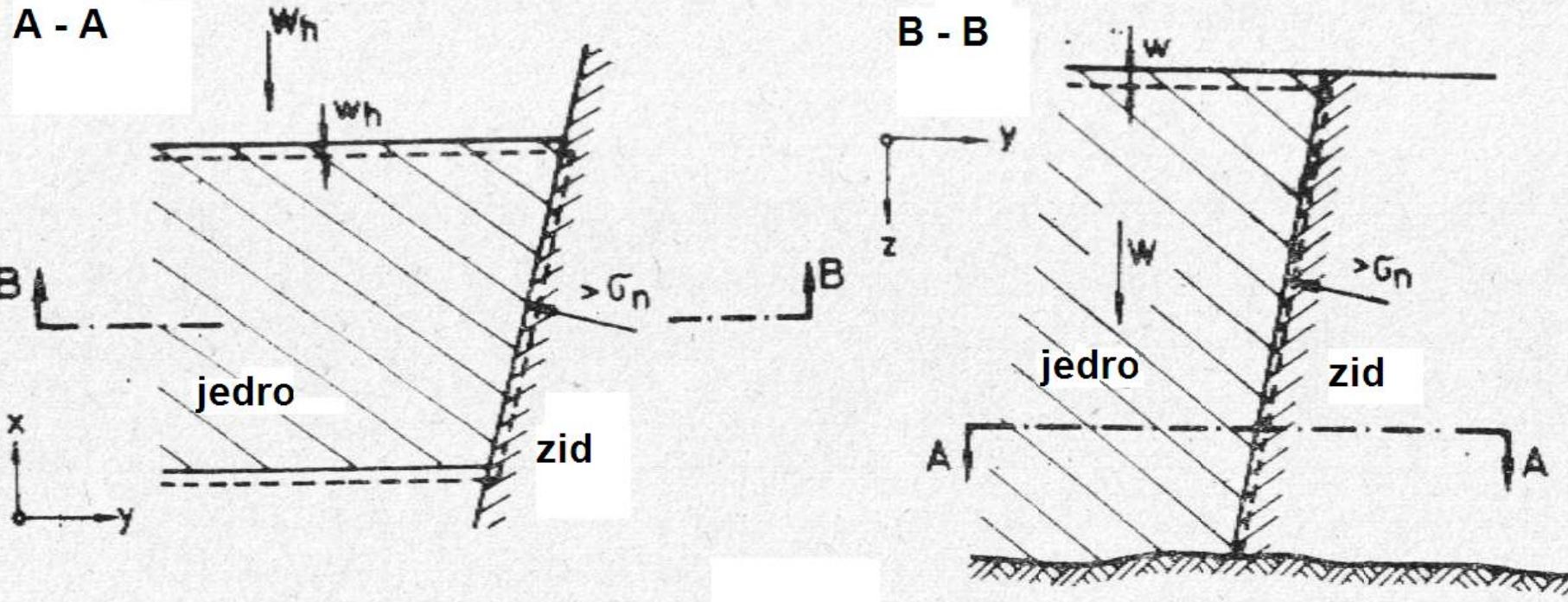


1. betonska obloga
2. zapolnitev razpok s cementno malto
3. sloj stabilizirane gline
4. jedro
5. razširjena peta filtra z usekom v hribino na obeh straneh jedra

■ razširitev filternega sloja na kontaktu jedra s podago



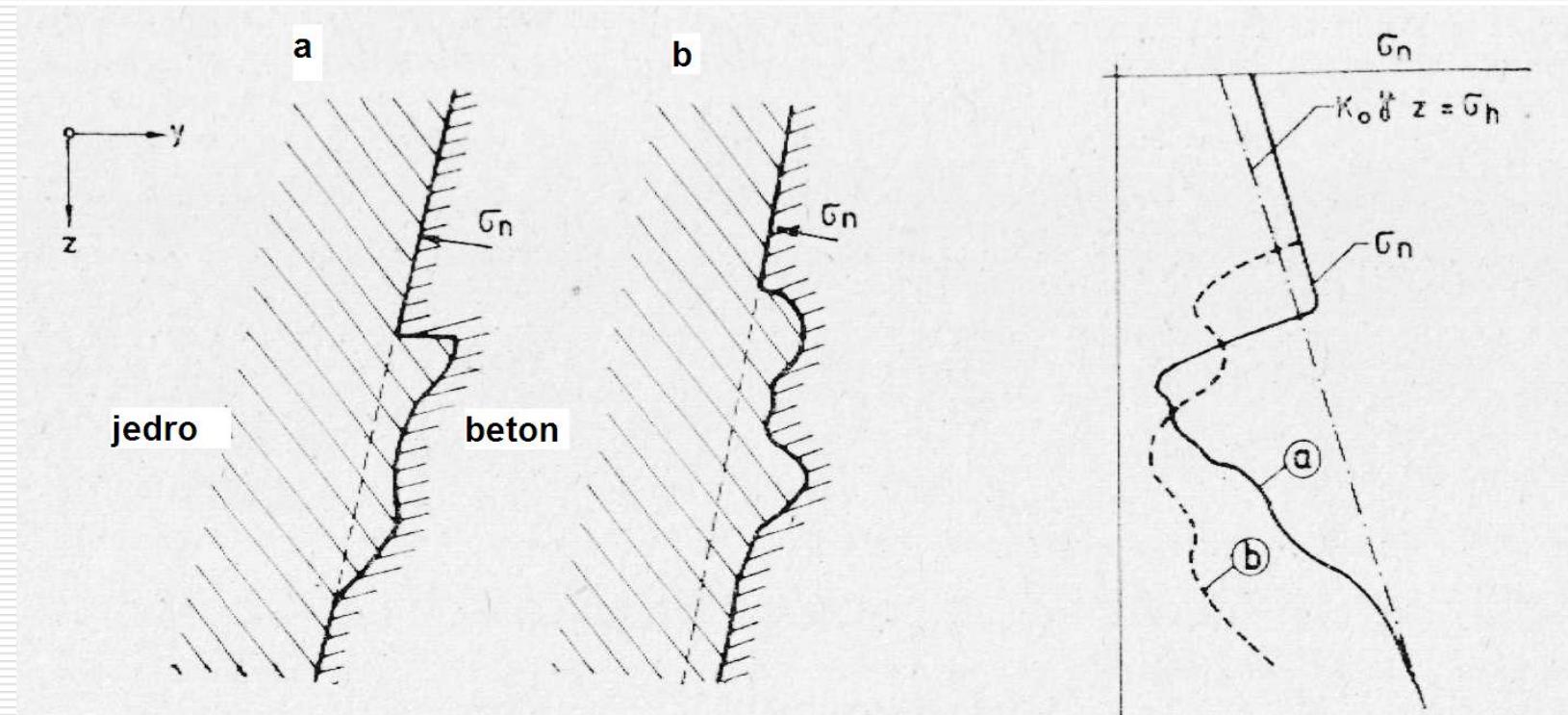
Konstrukcija pregrade – kontakt jedra s togo konstrukcijo



- konveksno oblikovan stik jedra s togo konstrukcijo v dolvodni smeri

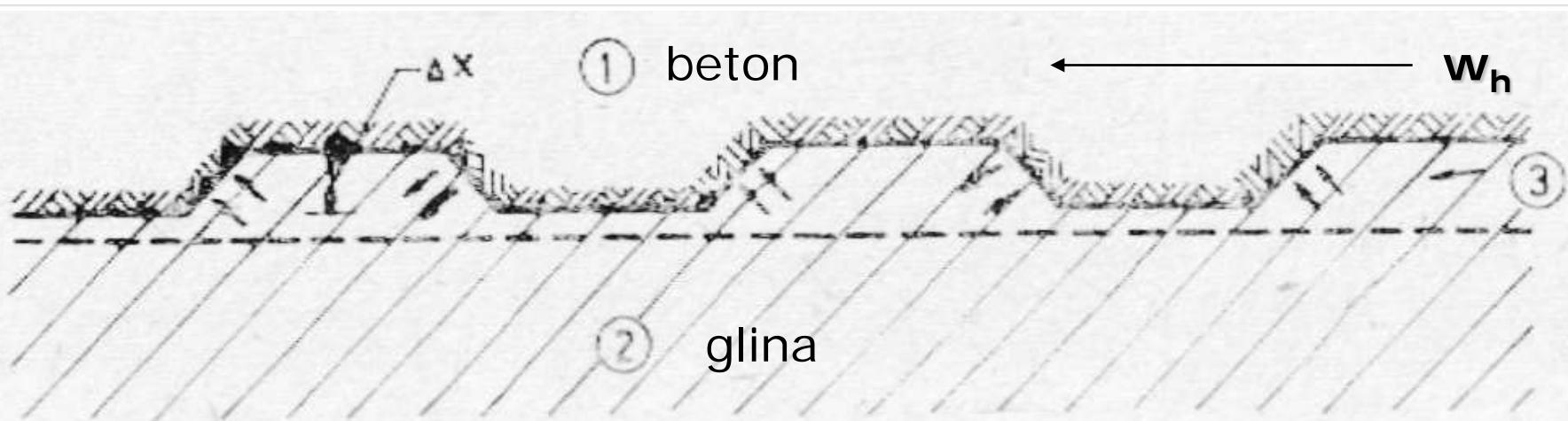
- konveksno oblikovan stik jedra s togo konstrukcijo v prečni smeri

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra s togo konstrukcijo



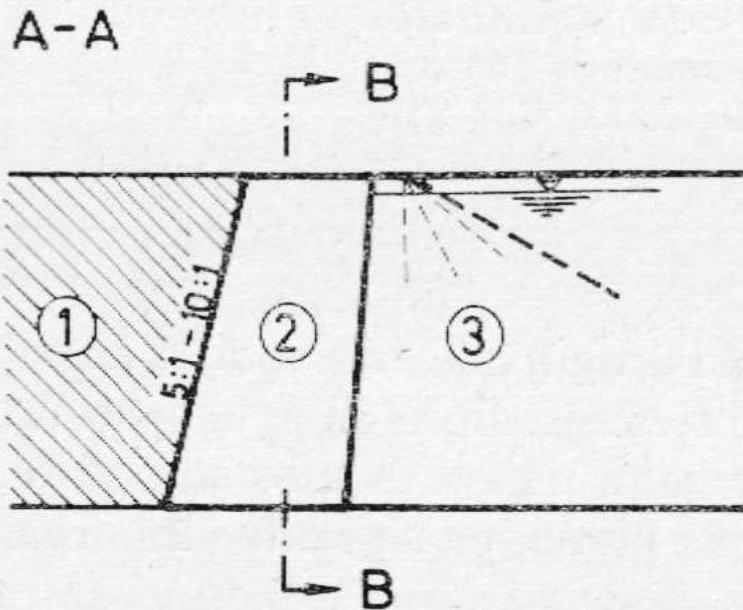
- a) lokalne neravnine na betonski površini
- b) nepravilnost pri izvedbi betonske površine
- potek diagrama napetosti zaradi lokalnih nepravilnosti na kontaktu

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra s togo konstrukcijo

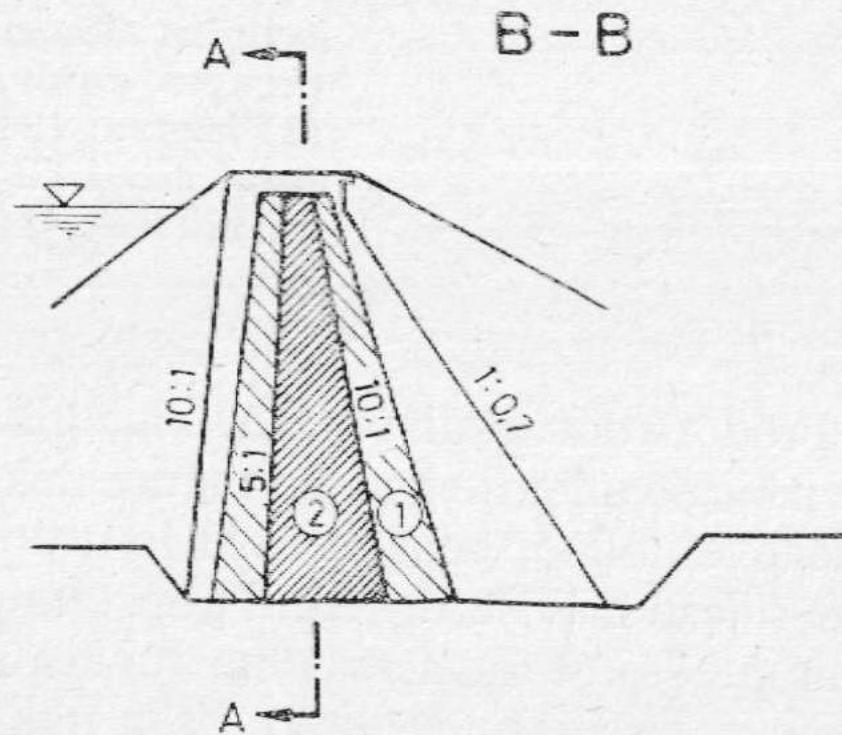


- na kontaktu je površina betona nazobčana ali ožlebljena za višino zoba **ΔX**
- v sloju **2** je možno doseči dobro zbitost, v kontaktnem sloju **3** pa je dosežena zbitost gline slabša
- zaradi hidrostatskega tlaka je boljša zbitost na konveksni strani in slabša na konkavni strani zoba ozioroma žleba

Konstrukcija pregrade – kontakt jedra s togo konstrukcijo

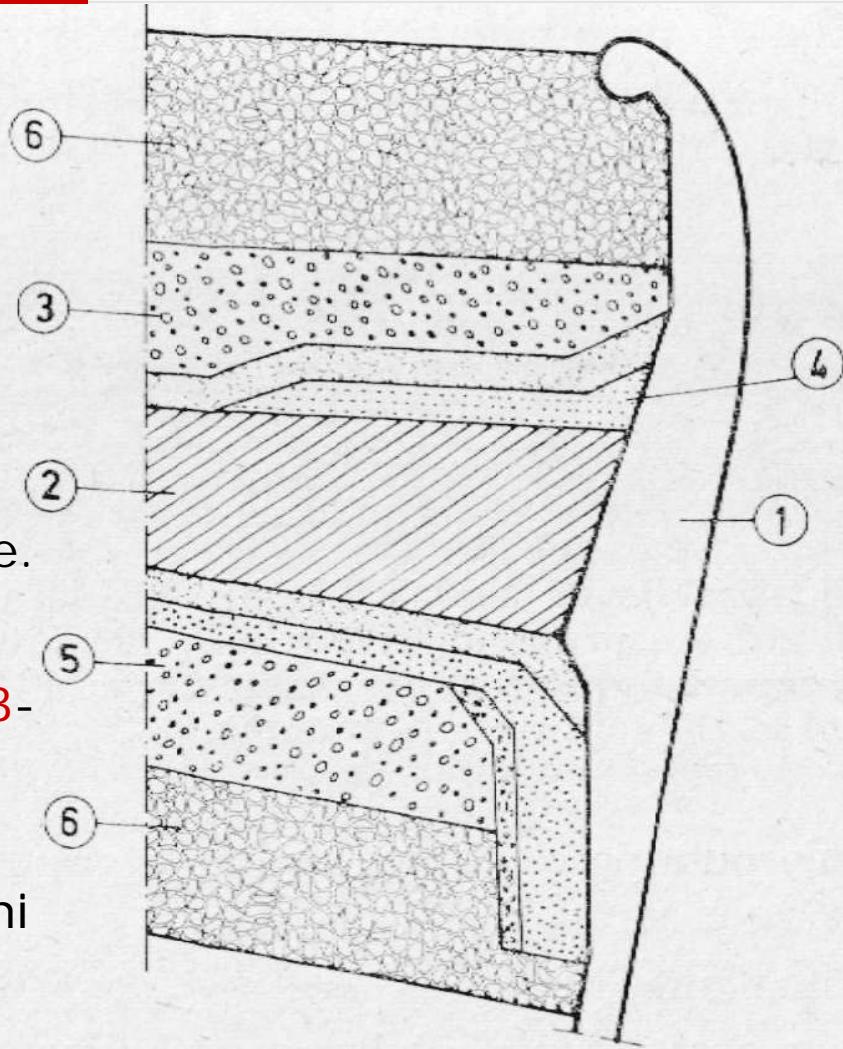


1. glineno jedro
2. AB pero
3. betonski del pregrade

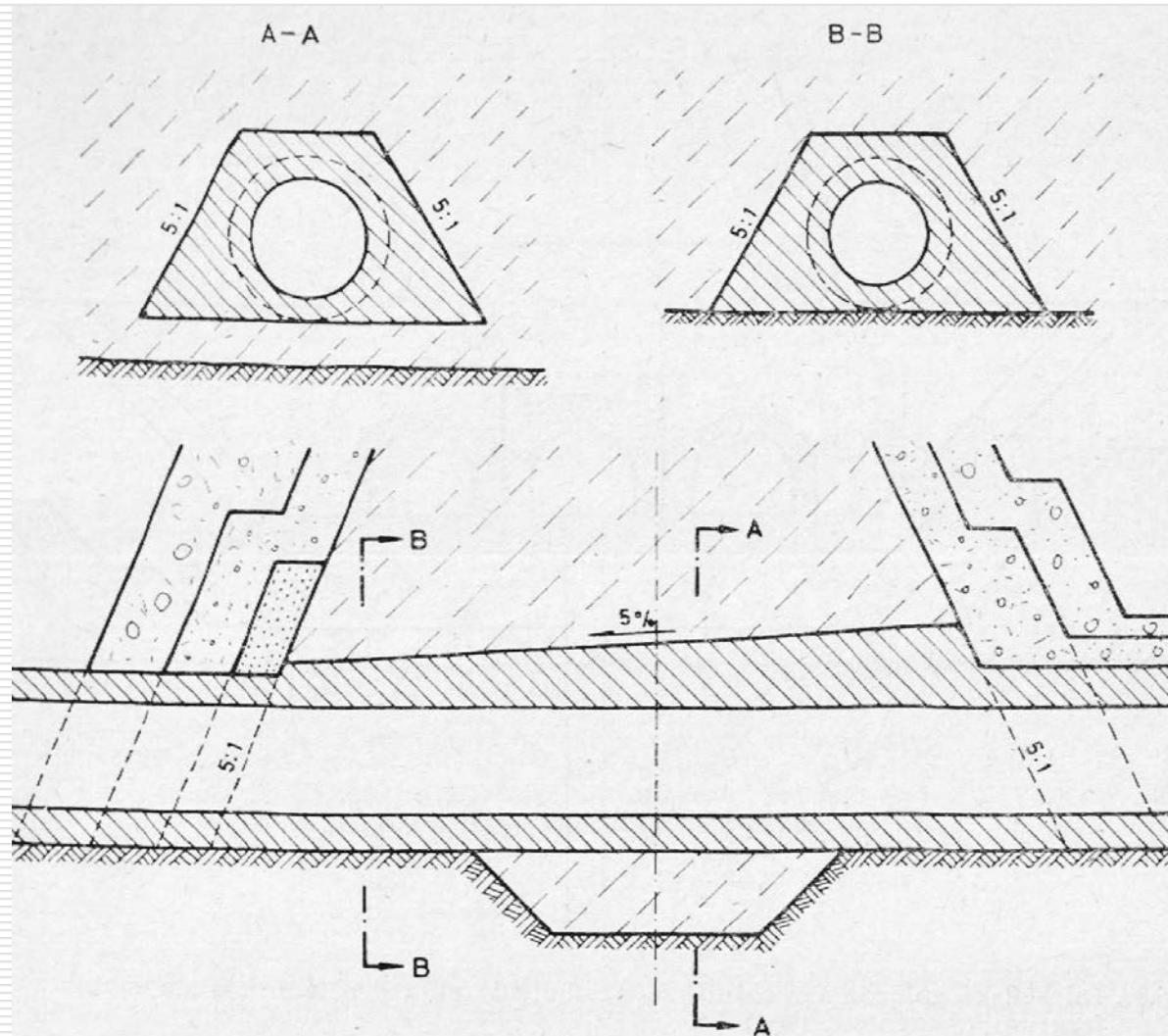


Konstrukcija pregrade – kontakt jedra s togo konstrukcijo

- Za zagotovitev večje varnosti v kontaktnem sloju je smiselno, da se v kontaktni coni filtrni sloji razširijo ter izvede drenažni sloj dolvodno od jedra. V primeru preboja se material zadrži v dolvodnem filtru in na tak način blokira pretok, kar zadrži tudi erozijske procese.
- Detajl priključka nasute pregrade na krilni zid: 1-krilni zid, 2-glineno jedro, 3-filtrni sloj gorvodno, 4-dodaten filter (drobne granulacije) na robu glinenega jedra, 5-troslojni filter na dolvodni strani z razširitvijo v dolvodni smeri, 6-nasip pregrade



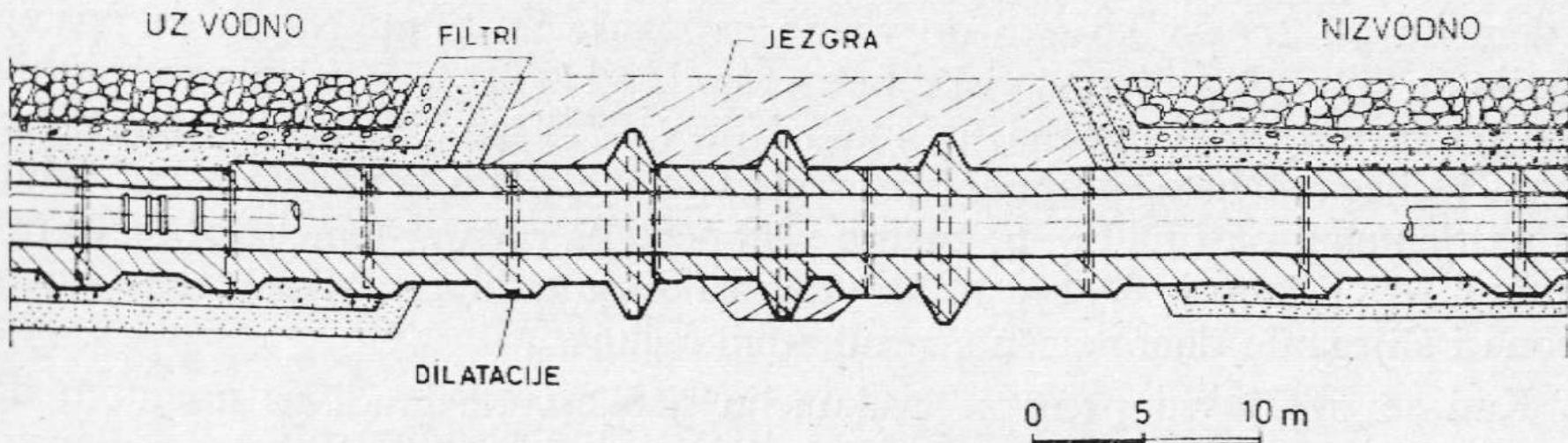
Konstrukcija pregrade – kontakt jedra s togo konstrukcijo



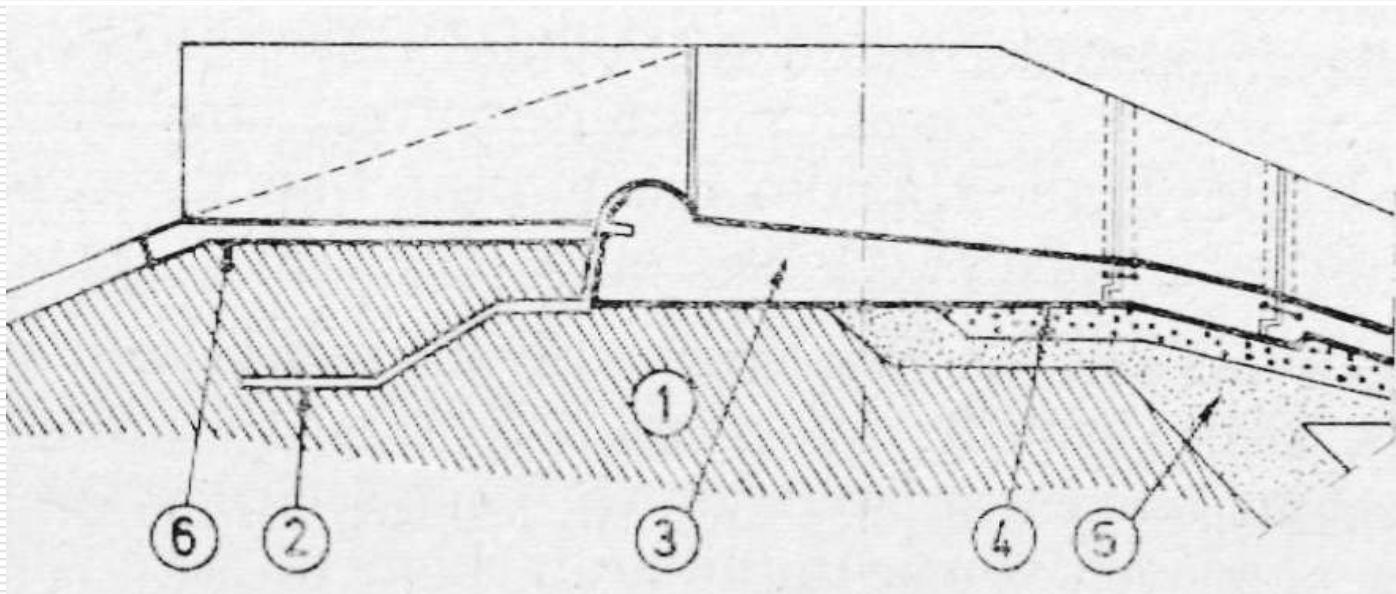
Konstrukcija pregrade – kontakt jedra s tigo konstrukcijo



- vzdolžni profil talnega izpusta na pregradi Vogrsek
- detajl izvedbe prehoda cevovoda skozi jedro z manšetami

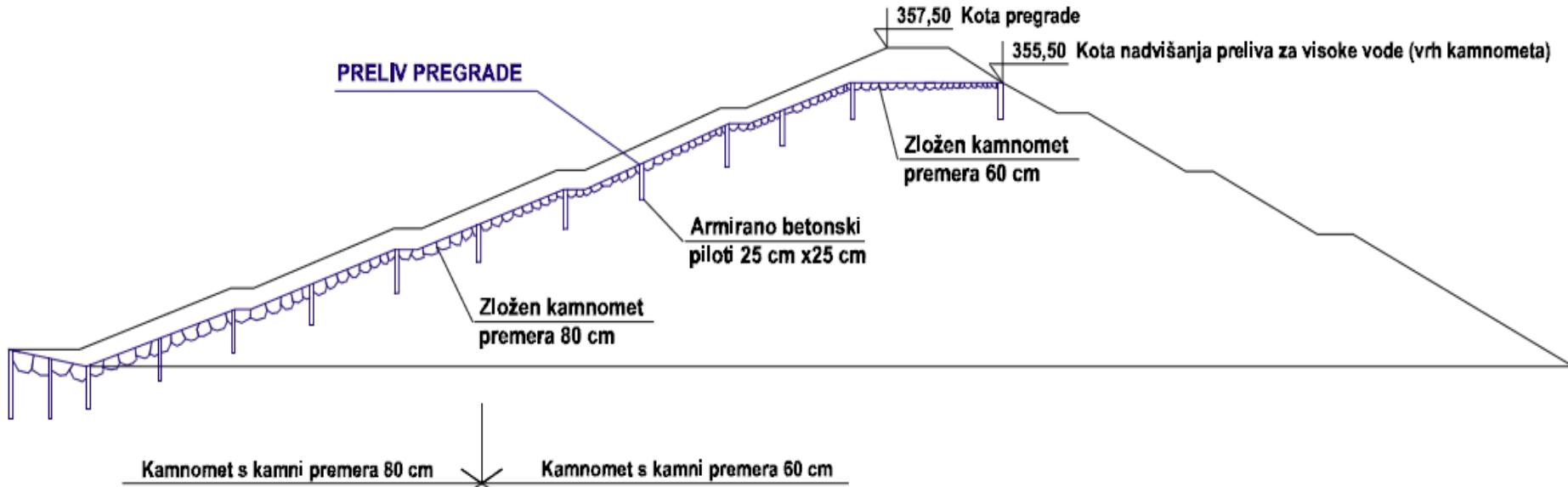


Konstrukcija pregrade – prelivni objekt v sklopu pregrade



- 1. nasip iz slabo propustnega materiala**
- 2. vodotesna membrana**
- 3. betonski preliv**
- 4. drenažni sloj**
- 5. filtrni sloj**
- 6. zavarovanje natočnega dela z betonsko oblogo**

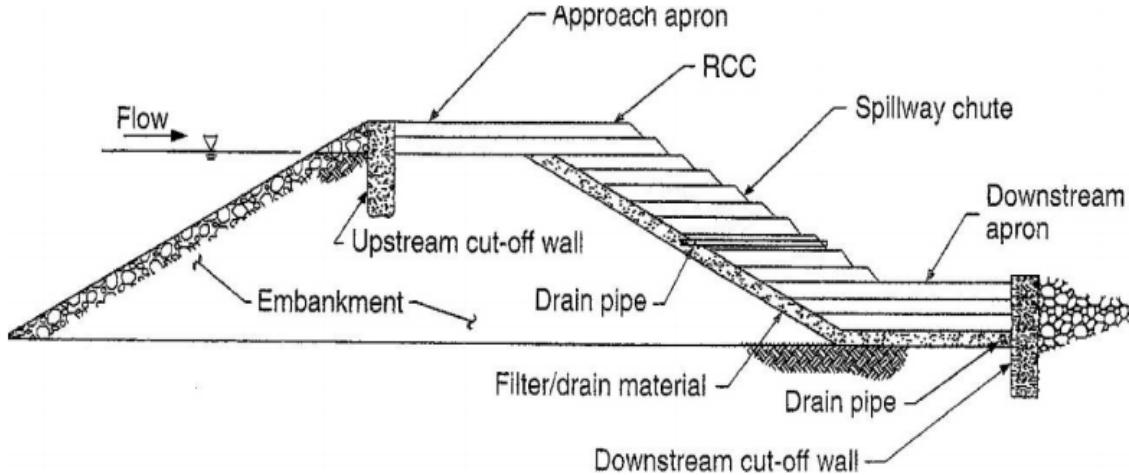
Konstrukcija pregrade – prelivni objekt v sklopu pregrade



- varnostni preliv na pregradi je izveden na centralnem delu v kameni zložbi, ki je stabilizirana z betonskimi mikropiloti
- problem erozijske stabilnosti drže preliva
- na gorvodni strani prelivni preg ni zatesnjen in ostaja problem zatekanja vode pod pregrado



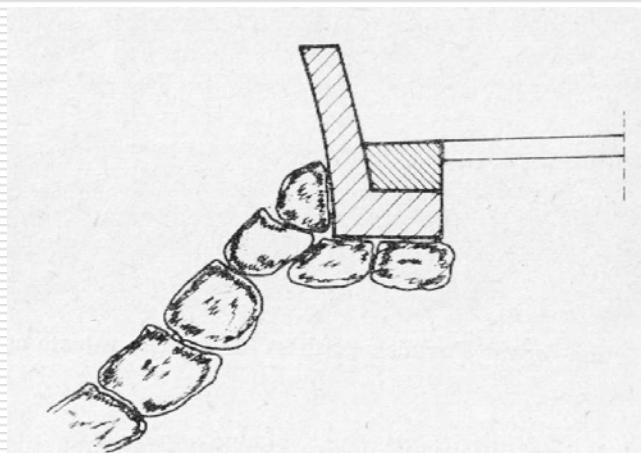
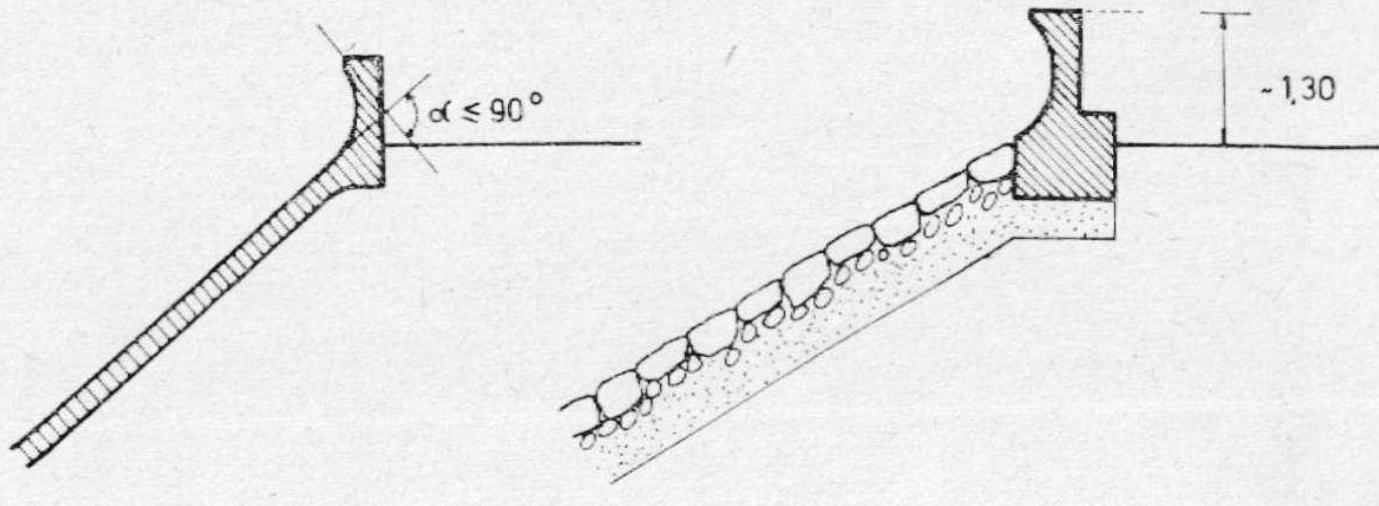
Konstrukcija pregrade – prelivni objekt v sklopu pregrade



- izvedba preliva preko nasutega dela pregrade z valjanim betonom
- prelivna drča je stabilizirana z betonsko oblogo in zavarovana z betonskim zidom



Konstrukcija pregrade – zaščita krone z valobranom



■ montažni element

Gradnja nasute pregrade – valjarji z ježi

■ enojni vibracijski valjar z ježem

■ statični valjar z ježem



Gradnja nasute pregrade – gumeni valjarji

■ kombinirani valjar

■ statični dvoredni gumeni valjar



Gradnja nasute pregrade – gladki valjarji

■ tandemski vibracijski valjar



■ tandemski zglobni valjar

Gradnja nasute pregrade – izvedba



- vgrajevanje slojev iz skalometnega materiala

■ vgrajevanje slojev iz zemeljskega materiala



Gradnja nasute pregrade – izvedba



- vgrajevanje peščeno-glinenega jedra

- zgoščevanje glinenega jedra z valjarjem z ježi



Gradnja nasute pregrade – izvedba



■ **izvedba peščenega filtra**

■ **glineno jedro z dimničnim filtrom**



Gradnja nasute pregrade – izvedba



■ izvedba asfalt-betonske tesnilne diafragme

■ izvedba cementne-bentonitne tesnilne diafragme

■ izkop v telesu pregrade za izvedbo diafragme



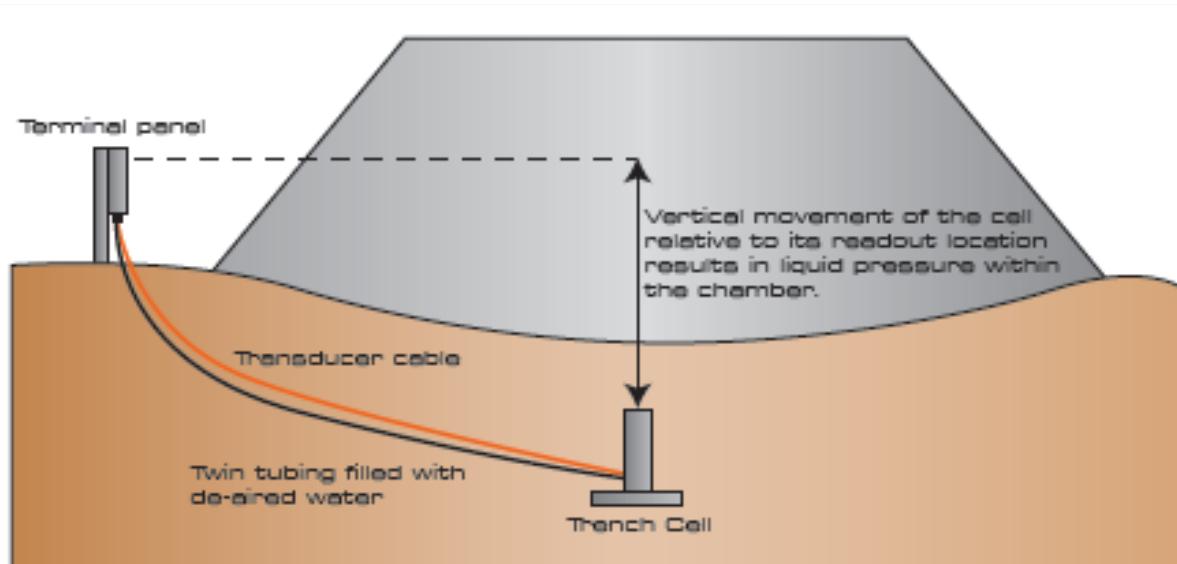
Monitoring nasute pregrade – totalni tlaki

- Meritve **totalnih tlakov** se izvajajo z hidravličnimi tlačnimi blazinami, ki jih vgradimo v telo pregrade, na kontakt v temelje ali pa v temeljno podlago.
- Tlačna blazina je napolnjena z oljem, preko katerega se prenašajo tlaki na membrano, na katero je pripeta nihajoča žica. Spremembo frekvenca nihanja pretvori v električni signal, ki ga registriramo kot totalni tlak, ki deluje na napravo.



Monitoring nasute pregrade – posedanje pregrade

- Sonda namenjena za registracijo posedkov telesa pregrade meri deformacije pregrade po principu spremembe hidrostatičnega tlaka
- sonda sestoji iz cilindra, ki je napolnjen z vodo in s tlačnimi cevmi povezan z registratorjem, ki meri vertikalne pomike relativno glede na spremembo tlaka v posodi
- sprememba tlaka vode povzroči napetosti vibracijske žice v merskem senzorju, ki ga na registratorju odčitamo v metrih vodnega stolpca



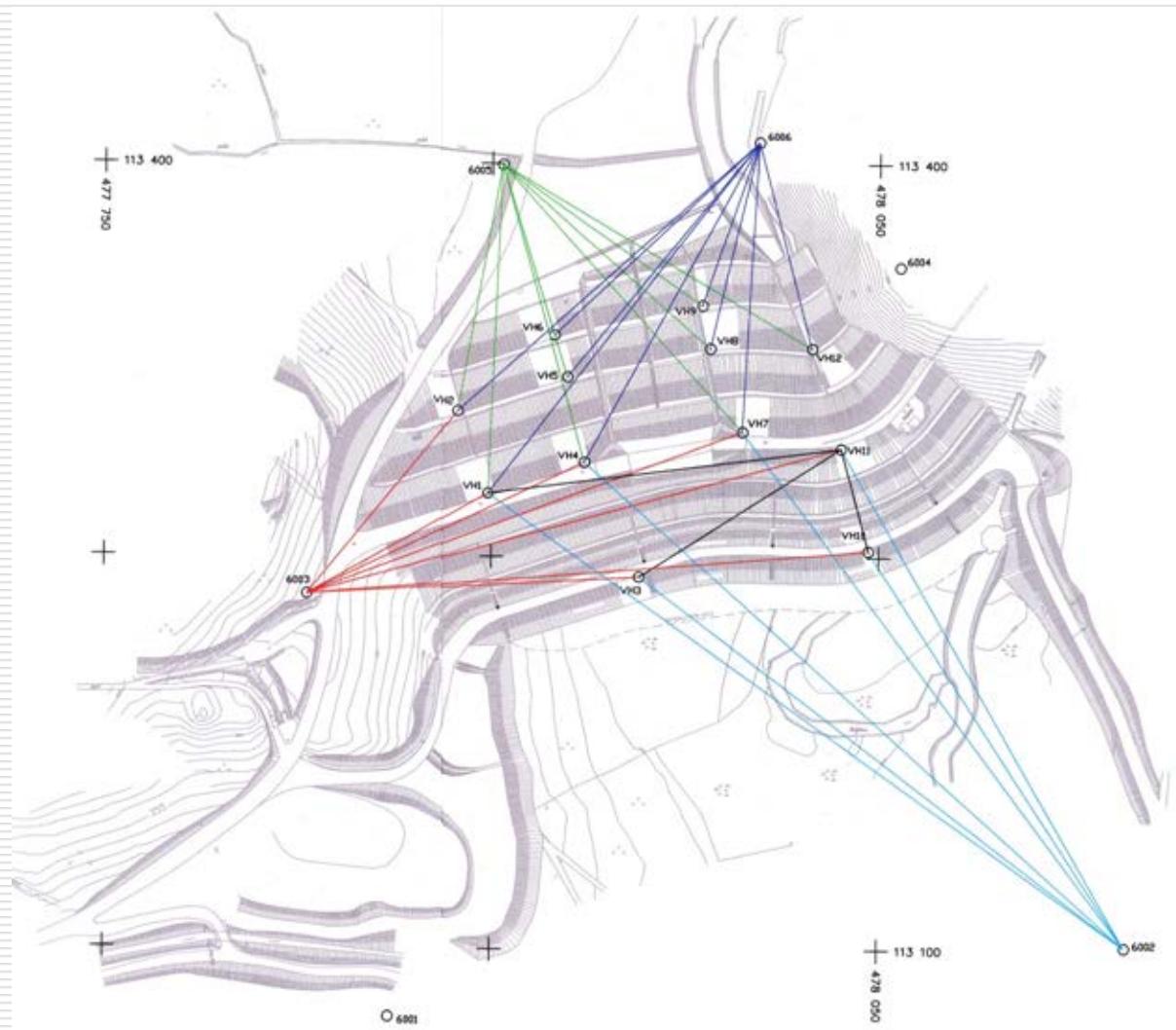
Monitoring nasute pregrade - preliv



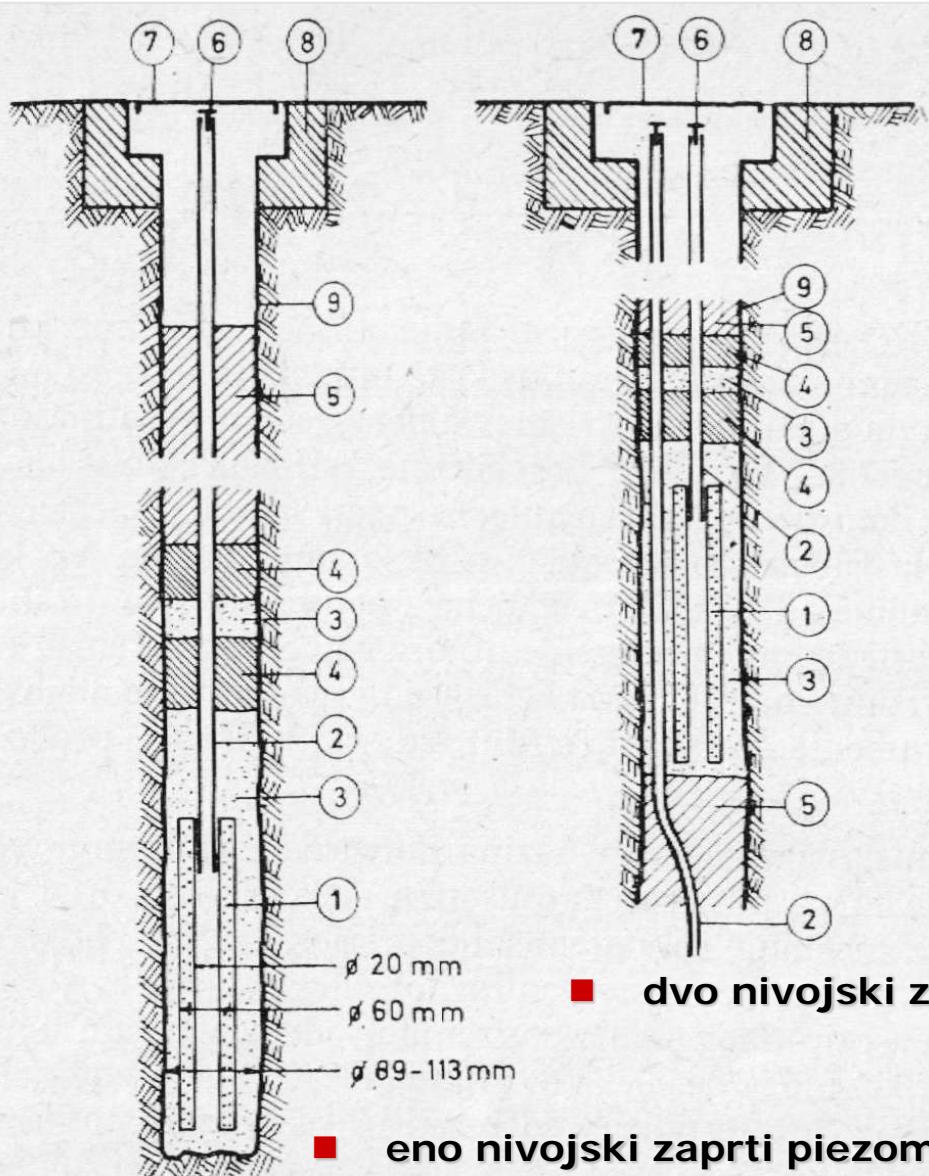
Monitoring nasute pregrade - piezometri



Monitoring nasute pregrade – geodetske točke



Monitoring nasute pregrade – zaprti piezometri



1. perforirana cev
2. piezometrska cev
3. zasip
4. bentonitni čep
5. betonski čep
6. kapa cevi
7. pokrov
8. betonski blok
9. jeklena cev

Monitoring nasute pregrade – zaprti piezometri

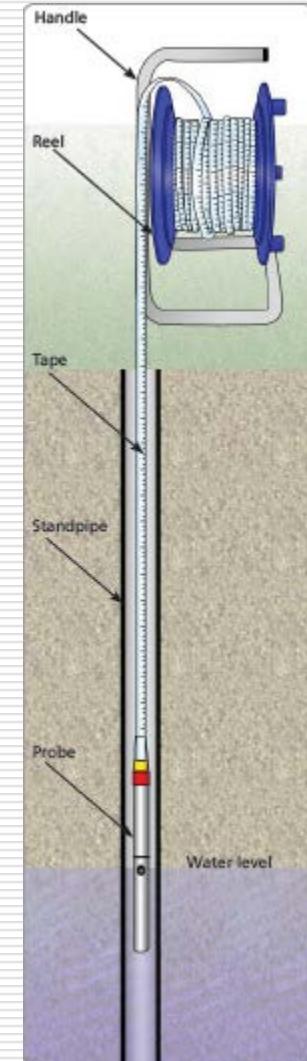
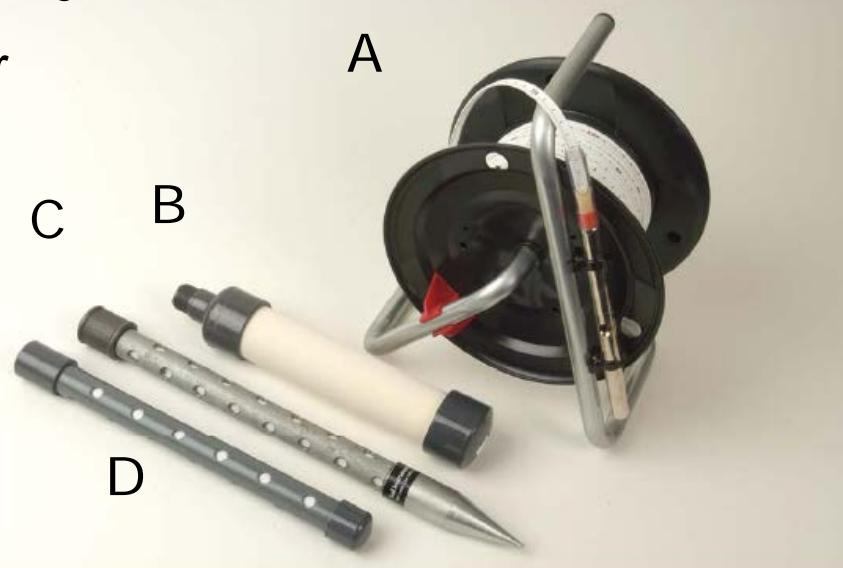
A. prenosni senzorski merilec nivoja gladine

Senzorji za merjenje tlakov v vrtini, ki se vgrajujejo skupaj z vložno cevjo:

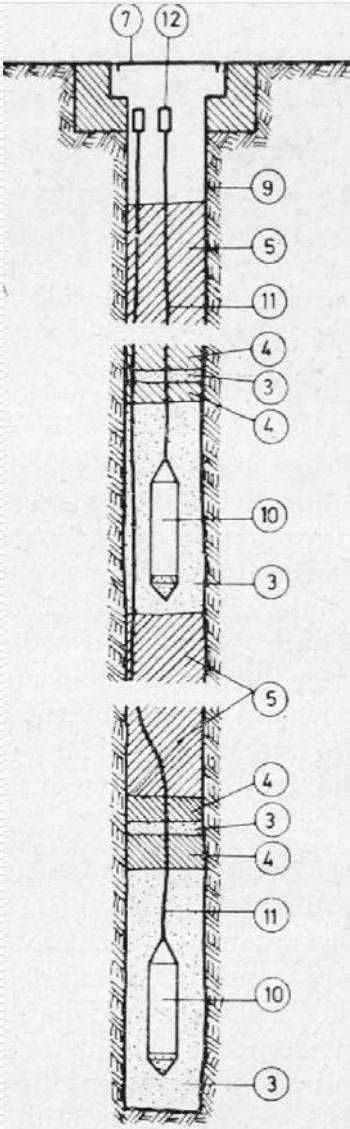
B. keramični piezometer

C. plastični piezometer, primeren za zemljine z vgradnjo z vtiskovanjem

D. plastični piezometer



Monitoring nasute pregrade – zaprti piezometri



- **3.zasip**
- **4.bentonitni čep**
- **5.betonski čep**
- **7.pokrov**
- **8.betonski blok**
- **9.jeklena cev**
- **10.merska sonda**
- **11.kabel**
- **12.procesna enota**

- **dvo nivojski
zaprti piezometer
z merskimi
sondami**



■ **hidravlična piezometerska
sonda za merjenje pornih tlakov**



■ **piezometerska sonda z vibracijsko
žico za merjenje pornih tlakov**

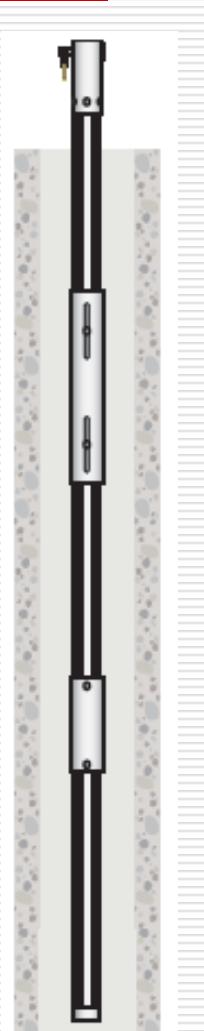
Monitoring nasute pregrade – inklinometer

- inklinometer uporabljamo za meritve horizontalnih pomikov v temeljnih tleh ali telesu pregrade
- na osnovi meritev opredelimo globino, smer, velikost in obseg premikov



kulteta z

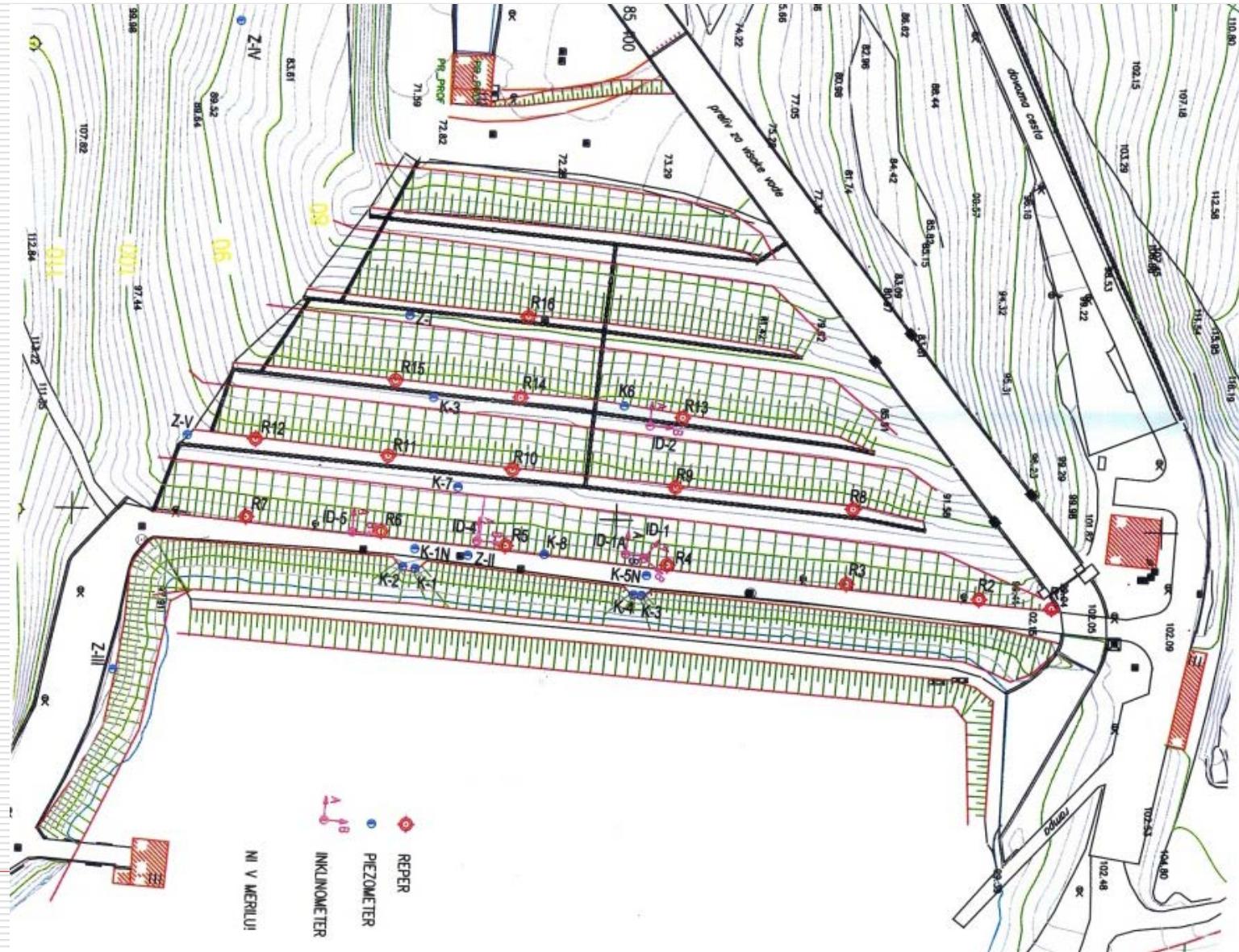
- inklinacijska cev ($\varnothing 70\text{-}85\text{mm}$)



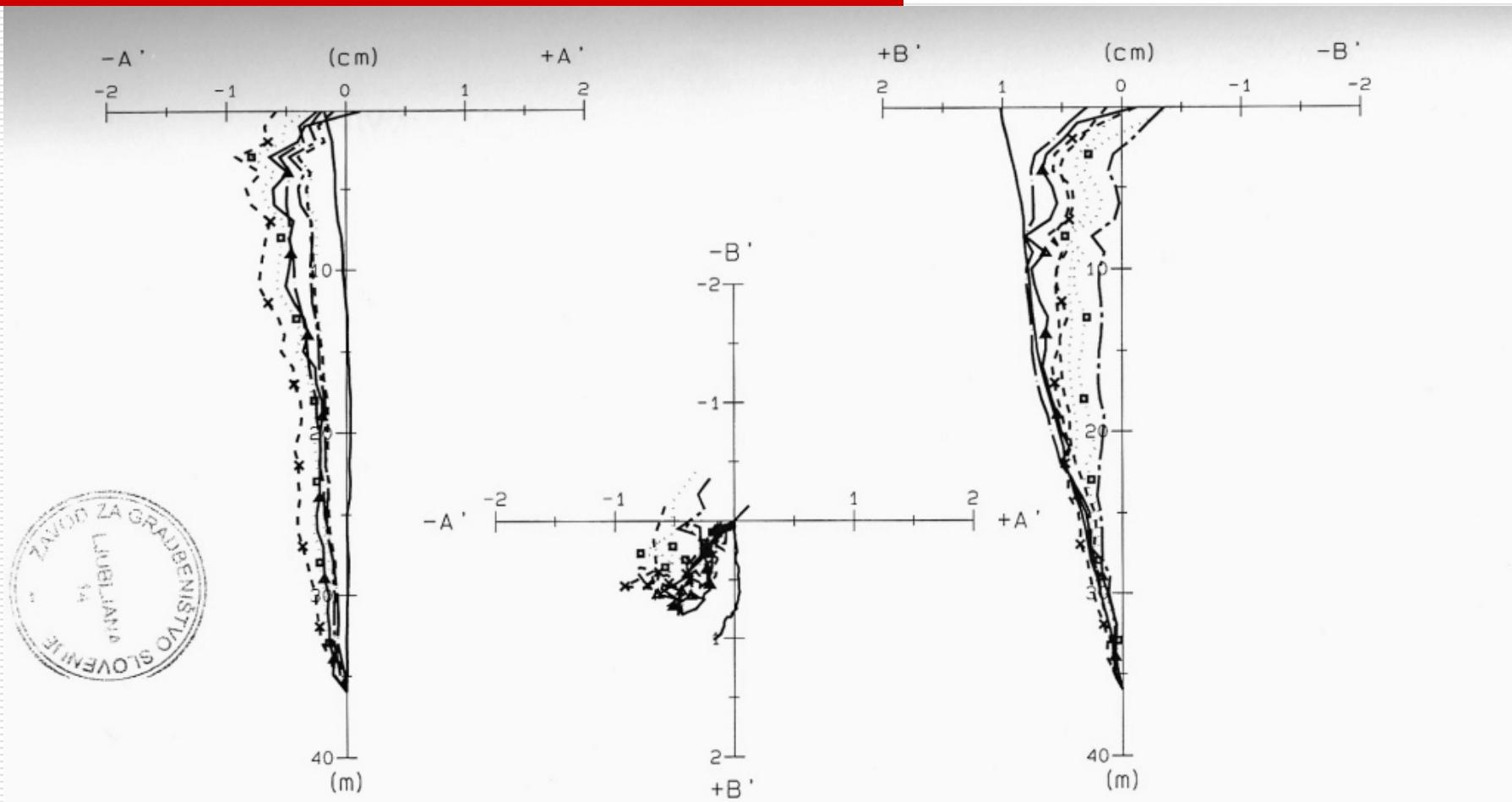
- vgradna merska sonda



Monitoring nasute pregrade – inklinometer



Monitoring nasute pregrade – inklinometer



GLÖTZL NP9.20.00 1/96

CURVE	MP	Commiss	SR	DATE	DIFF DAYS	DEPTH (m)	SL (m)	CURVE	MP	Commiss	SR	DATE	DIFF DAYS	DEPTH (m)	SL (m)	DEFORMATION A' - B'	
																VOD	ANNEX:
—	40	ID4-VOG40	00-01	17.08.06-19.09.06	0	36	1	—	40	ID4-VOG40	00-06	17.08.06-15.09.09	0	36	1	ZAG Ljubljana	
—	40	ID4-VOG40	00-02	17.08.06-13.11.07	0	36	1	—	40	ID4-VOG40	00-07	17.08.06-29.10.10	0	36	1	National Building and	
—	40	ID4-VOG40	00-03	17.08.06-23.05.08	0	36	1	—	40	ID4-VOG40	00-08	17.08.06-10.10.11	0	36	1	Civil Engineering Inst.	
—	40	ID4-VOG40	00-04	17.08.06-14.11.08	0	36	1									Dimiceva 12	
—	40	ID4-VOG40	00-05	17.08.06-15.12.08	0	36	1									SI 1109 Ljubljana	11.10.11