

Prelivi - definicije

- **Prelivi** so objekti v sklopu pregrad, katerih naloga je nadzorovanje odvajanje visokih voda preko pregradnega profila.
- Pri načrtovanju kapacitet preliva upoštevamo statistične pretoke z verjetnostjo pojavljanja pri *betonskih pregradah* 10^{-2} (10^{-3}) in pri *nasutih pregradah* 10^{-3} (10^{-4}) – večja vrednost velja za prevodnost preliva pri pogoju *n-1*, manjša pa v primeru, da obratujejo vsa polja.

Prelivi - sistematika

Prelive po tipu delimo na:

- prelive s **fiksno krono** – prosti preliv
- prelive s **premično krono** – regulacija z zapornico (pomični jez)

Glede na *lokacijo* poznamo:

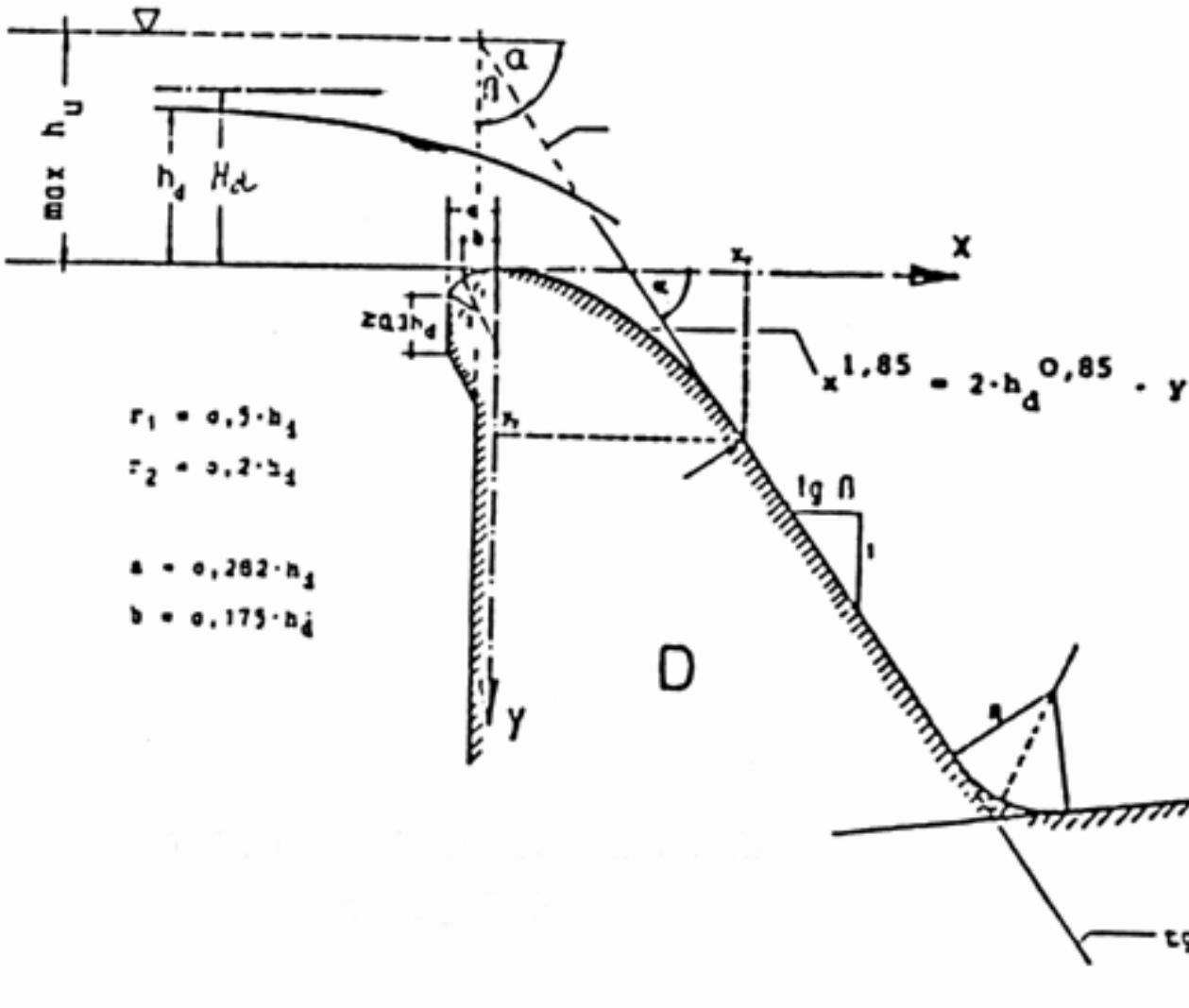
- **preliv na pregradi** – na betonskih pregradah, če je profil zadosti širok
- **preliv izven pregrade** – praviloma za nasute in ostale pregrade, če je pregradni profil preozek

Prelivi - sistematika

Glede na konstrukcijsko izvedbo poznamo:

- **prepadni preliv** v sklopu telesa pregrade
- preliv v obliki **natege** v sklopu telesa pregrade
- **stranski preliv** izven območja pregrade
- **jaškasti preliv** izven območja pregrade, ki jih je mogoče izdelati s fiksno ali premično krono v vseh možnih variantah.
- **Labirintni preliv**, ki omogoča povečanje pretočnosti
- **Varnostni preliv** s porušnimi zapornicami

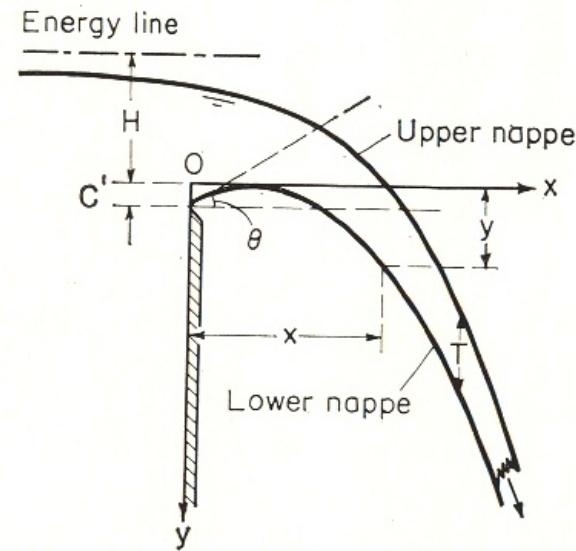
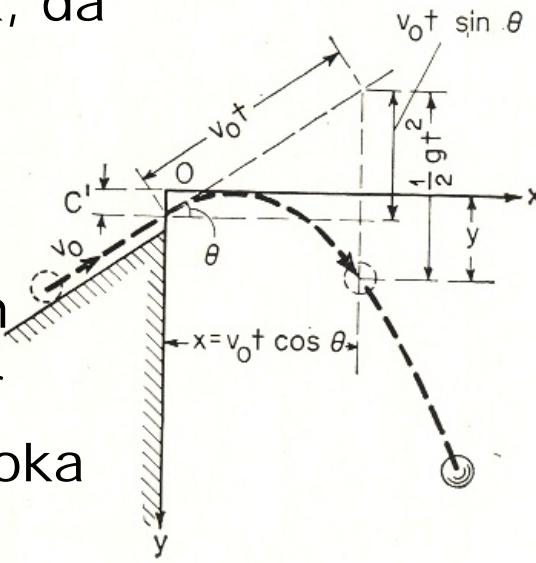
Prepadni preliv - oblikovanje



Prelive visokih pregrad načrtujemo na podlagi fiktivnega trikotno oblikovanega okvirja, imenovanega **osnovni trikotnik**, čigar vrh sega do višine najvišje predvidene zajezitve. Vanj vrišemo hidrodinamično oblikovan **prelivni obris** jezu, ki se tangencialno priključi na njegovo zračno stran.

Prepadni preliv – obris jezu

Obris jezu naj bo tak, da omogoča čim večjo *pretočno zmogljivost* jezu, preprečuje oblikovanje znatnejših podtlakov na njem ter odlepljanje vodnega toka od njega. Tej zahtevi najbolje ustreza obris jezu, ki je identičen spodnjemu obrisu ozračenega curka, prepadajočega čez ostrorobi preliv



obris preliva: $\frac{y}{H} = A \left(\frac{x}{H} \right)^2 + B \frac{x}{H} + C$

obris curka: $\frac{y}{H} = A \left(\frac{x}{H} \right)^2 + B \frac{x}{H} + C + D$

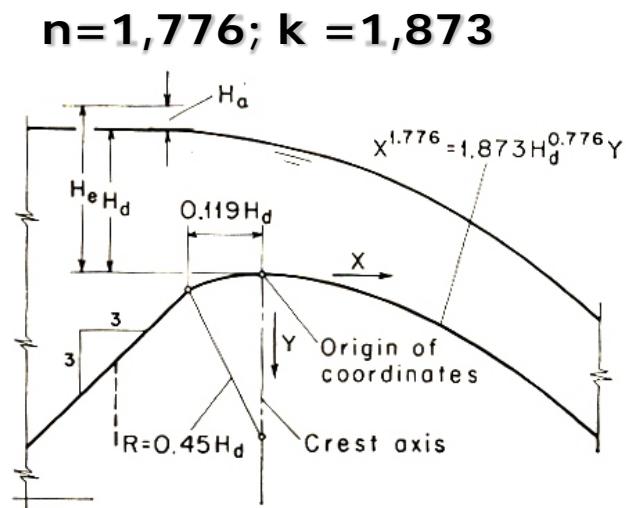
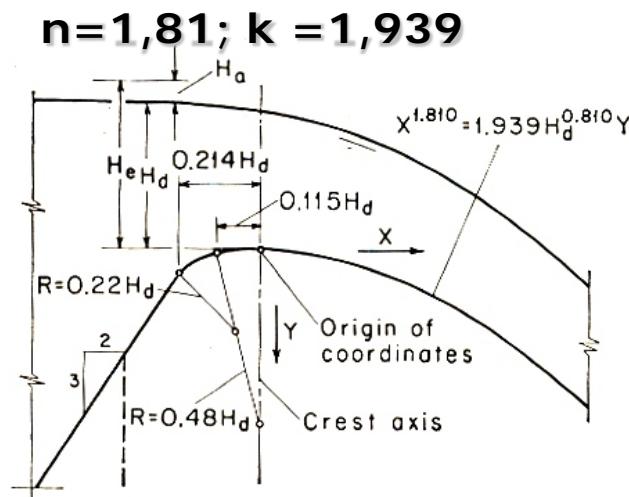
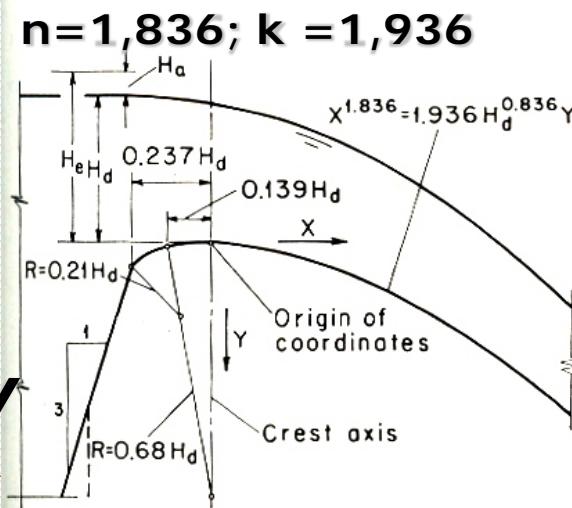
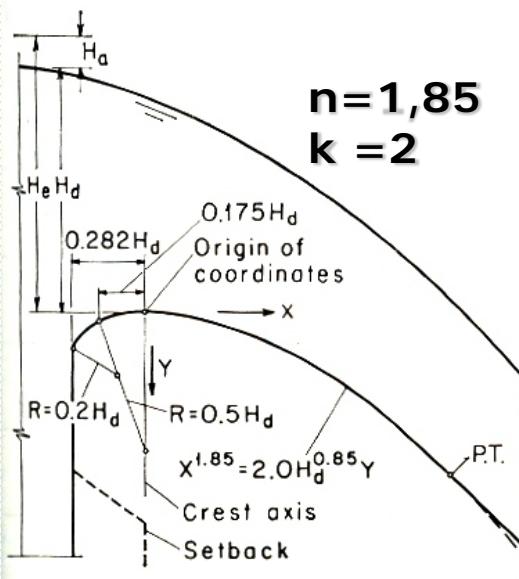
$$A = gH/2v_0^2 \cos^2 \theta, B = -\tan \theta,$$
$$C = C'/H. \quad D = T/H$$

Prepadni preliv – obris jezu

Prelivni obris

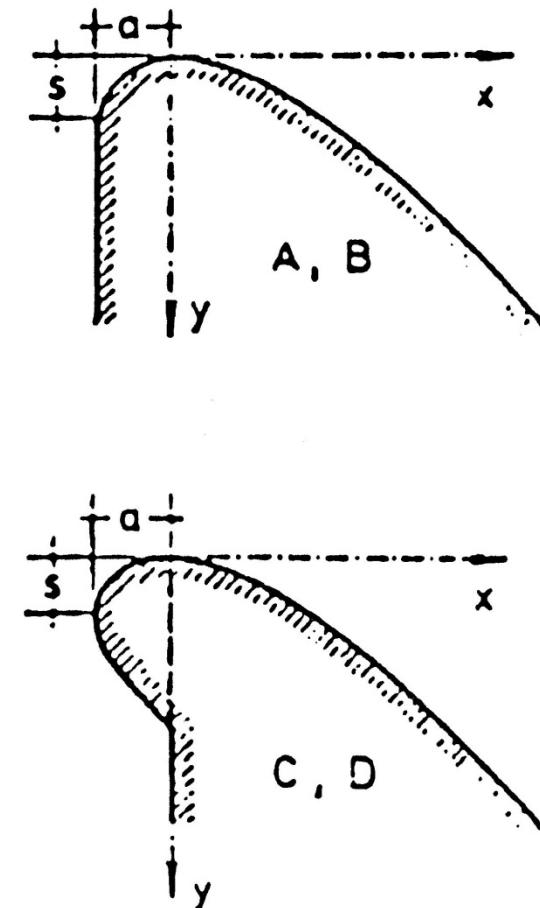
fiksнega jezu za praktične potrebe najustrezneje oblikujemo na podlagi enačbe Corps of Engineers Waterways Experiment Station (WES-profil):

$$x^n = k H_d^{n-1} y$$



Prepadni preliv – obris jezu

	A	B	C	D
a/h_d	0,315	0,300	0,315	0,282
s/h_d	0,126	0,250	0,190	0,136
y/h_d	0,112	0,250	0,106	--
x/h_d	0,046	0,055	0,028	0,043
y/h_d	-0,2	-0,1	0,012	0,010
x/h_d	0	0	0	0
y/h_d	0,012	0,010	0,004	0,010
x/h_d	0	0	0	0
y/h_d	0,007	0,006	0,008	0,007
x/h_d	0,063	0,050	0,060	0,054
y/h_d	0,1	0,130	0,140	0,139
x/h_d	0,153	0,130	0,140	0,139
y/h_d	0,267	0,250	0,255	0,258
x/h_d	0,410	0,400	0,395	0,411
y/h_d	0,410	0,400	0,395	0,411
x/h_d	1,1	0,590	0,600	0,596
y/h_d	1,4	0,920	0,970	0,932
x/h_d	1,7	1,310	1,373	1,270
h_u/h_d = 1 → μ_d	0,733	0,737	0,740	0,751



Primerjava obrisov prelivov:
Creager - **A**, Grzywienski – **B**, **C**; WES-D

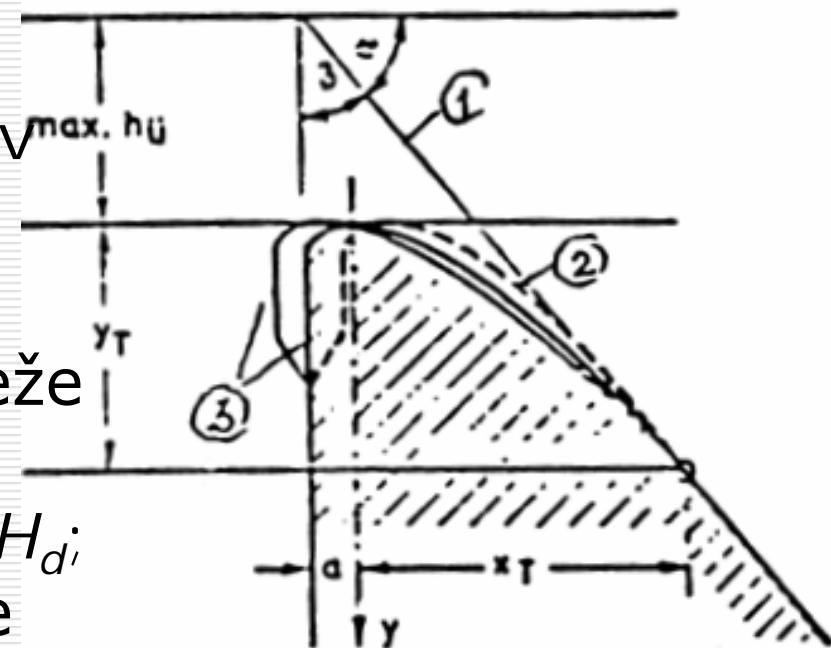
Prepadni preliv – obris jezu

- Koordinate dotikalnišča krivuljnega obpisa z osnovnim trikotnikom:

$$X_T/H_d = 1,0961 \operatorname{tg} \alpha^{1,1765} = 1,0961 \operatorname{tg} \beta^{-1,1765}$$

$$Y_T/H_d = 0,5925 \operatorname{tg} \alpha^{2,1765} = 0,5925 \operatorname{tg} \beta^{-2,1765}$$

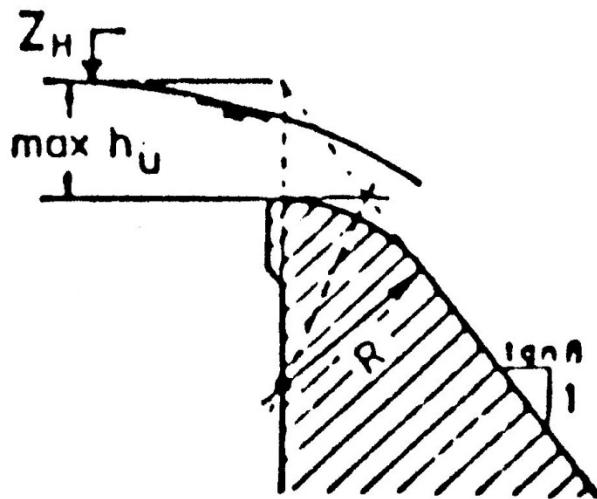
- Stik premočrtnega prelivnega hrbta s podslapjem je speljan v loku, čigar polmer naj ne bo premajhen.
- Če čelo prelivne krone ne doseže vodne strani osnovnega trikotnika je potrebno zvečati H_d ; čelo naj se bodisi dotika vodne strani osnovnega trikotnika ali jo presega.



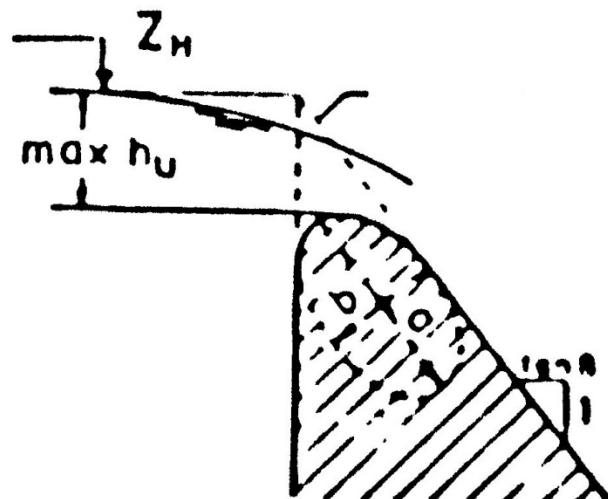
Prepadni preliv – obris jezu

V praksi se pogosto uporabljajo tudi drugi prelivni obrisi jezov:

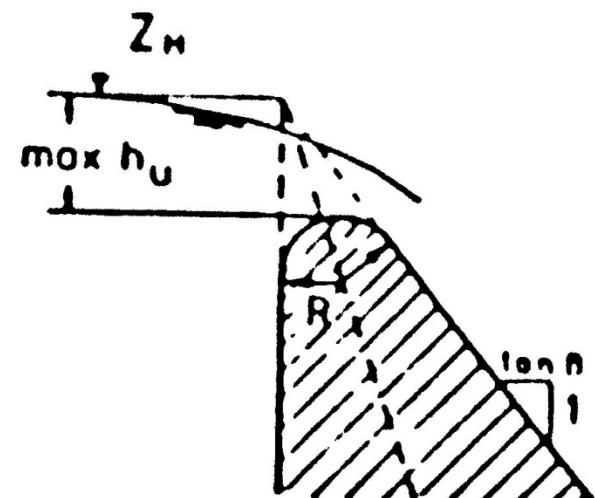
sestavljeni



eliptični



krožni

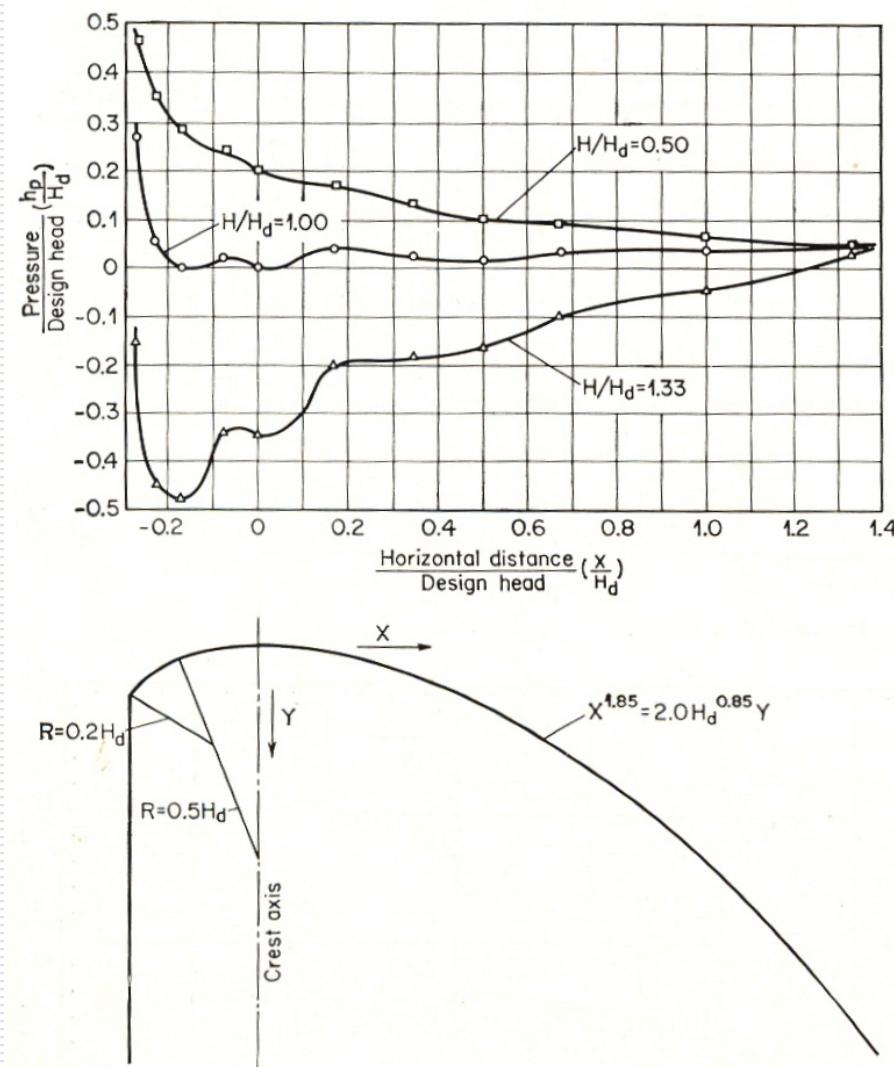


Prepadni preliv – obris jezu

- H_d je prelivna višina glede na katero načrtujemo prelivni obris jezu. Pri tej prelivni višini je hidrodinamični tlak na prelivni kroni jezu približno enak zračnemu tlaku.
- Pri naraščanju prelivne višine $H > H_d$ se oblikujejo podtlaki - vodni tok se kljub podtlakom ne odlepi od jezu, če prelivna višina ne presega $\max H \sim 1,65 H_d$. Zaradi varnosti je priporočljivo upoštevati $\max H \leq 1,25 H_d$.

Prepadni preliv – obris jezu

- Pri prelivni višini $\max H = 1,33 H_d$ znaša maksimalna višina podtlaka na temenu jezu – $p/(\rho \cdot g) \sim 0,5 H_d$ in naj ne presega **6 m** vodnega stebra.

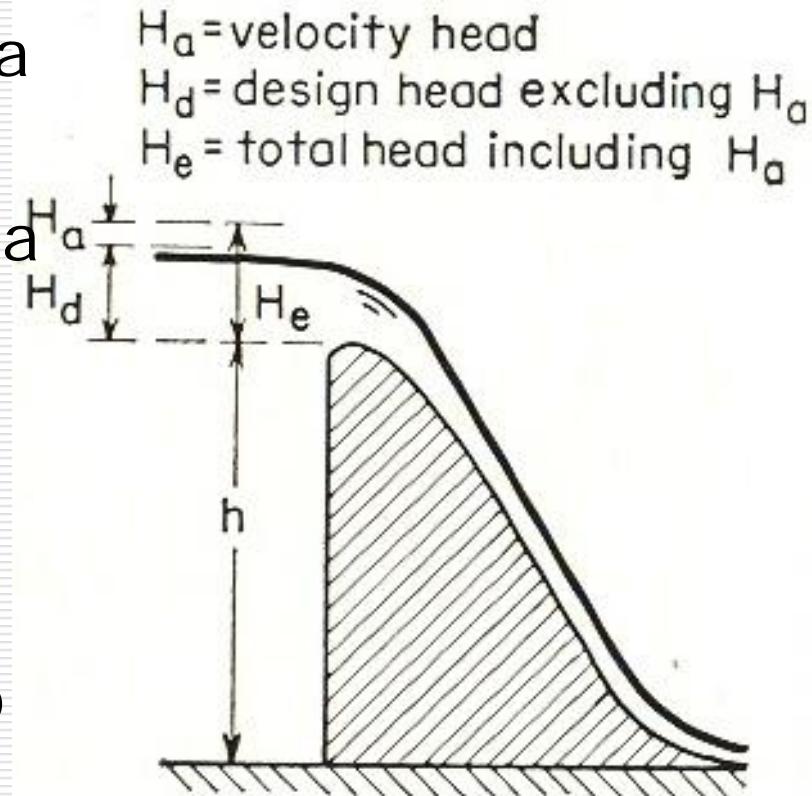


Prepadni preliv – prevodnost

Pretočno zmogljivost jezu ocenimo na podlagi enačbe:

$$Q = 2/3 \mu (2g)^{1/2} B H_d^{3/2}$$

Modelne raziskave so pokazale, da je vpliv hitrostne višine $v^2/2g$ zanemarljiv v primeru, da je višina pregrade (pragu) h večja od $1,33 \times H_d$, pri čemer je H_d višina prelivajoče vode. Če je višina pragu h manjša od $1,33 \times H_d$, je treba upoštevati energijsko višino H_e namesto prelivne višine H_d .



H_a = velocity head

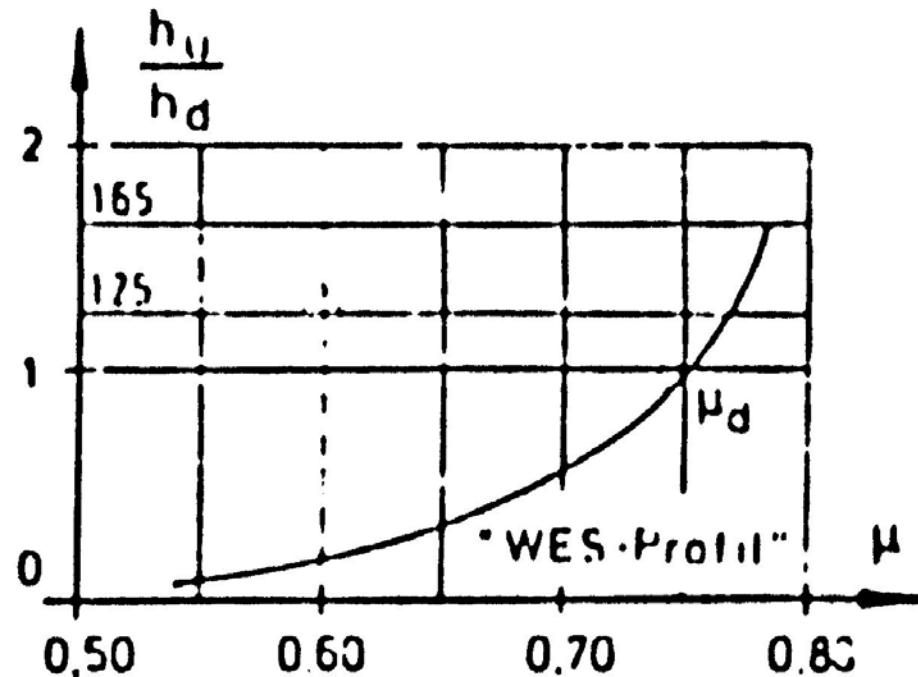
H_d = design head excluding H_a

H_e = total head including H_a

Prepadni preliv – pretočni koeficient

Pretočni koeficient μ je odvisen od tipa prelivnih obrisa in razmerju dejanske prelivne višine H s projektno višino H_d . Za profil WES velja za H/H_d :

- 1,0 - $\mu=0,750$
- 1,65 - $\mu=0,785$



Prepadni preliv – širina stebrov

Stebri ločujejo prelivna polja ter prenašajo vse obremenitve (zapornice, lastna teža, vodni pritisk) na temeljna tla. Minimalna *širina stebrov* **B** v odvisnosti od *širine prelivnega polja* **B_p** znaša za:

- tablaste zapornice: **B ~ (0,25 ÷ 0,30) B_p**
- tlačno obremenjene segmentne zapornice:
B ~ (0,20 ÷ 0,25) B_p
- natezno obremenjene segmentne zapornice:
B ~ (0,15 ÷ 0,20) B_p

Dejanska debelina stebrov je večja zaradi hodnikov, kanalov, itd., speljanih v stebrih.

Prepadni preliv – širina preliva

Aproksimativna širina prelivnih polj B_p v odvisnosti od globine pri katastrofalno visokem pretoku H_{Kvv} :

- **tablaste** zapornice: $B_p \sim (2 \div 5) H_{Kvv}$
- **segmentne** zapornice: $B_p \sim (1 \div 4) H_{Kvv}$

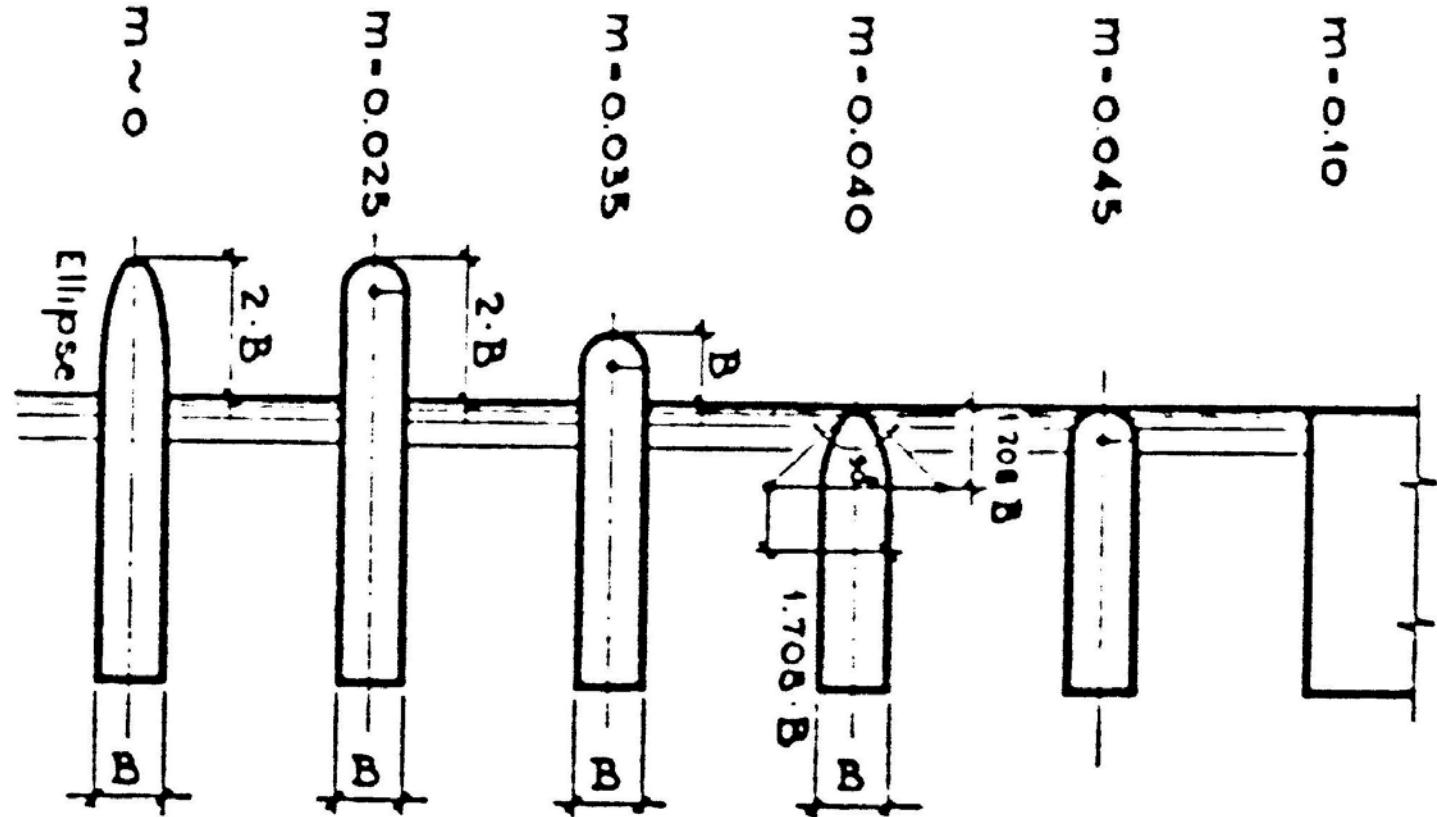
Glede na Francisove raziskave je hidravlična širina prelivnega polja B_K med stebroma:

$$B_K = B_p - m n H_{Kvv}$$

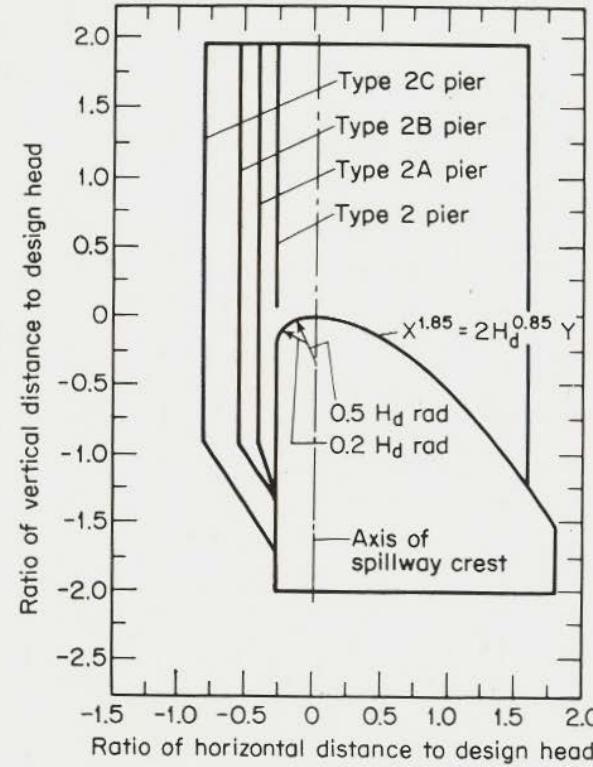
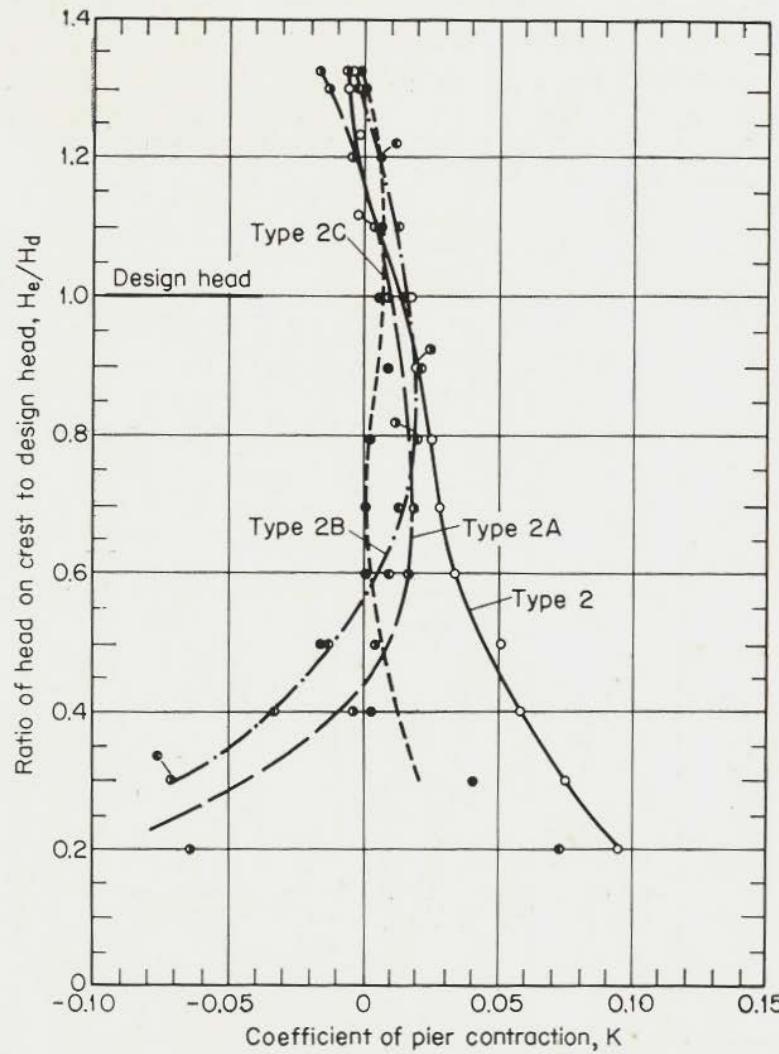
m ... zožitveni (kontrakcijski) koeficient

n ... število zožitev ($n=2$ za vsak steber)

Prepadni preliv – zoožitveni koeficient

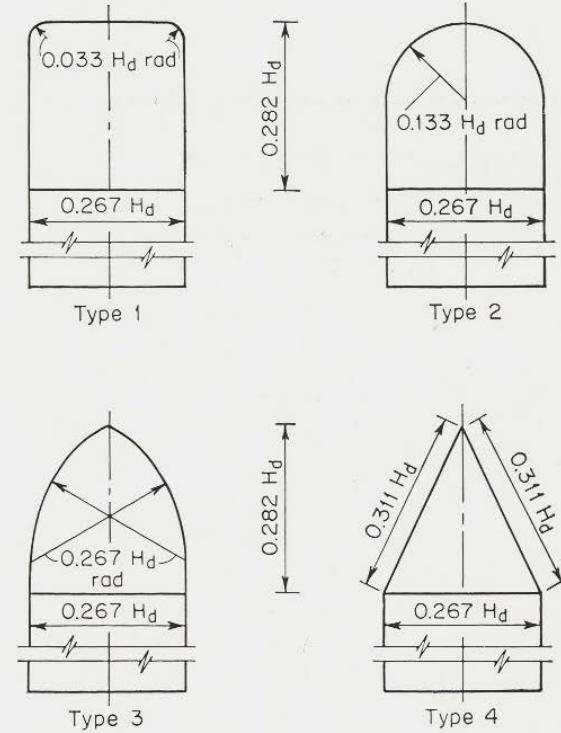
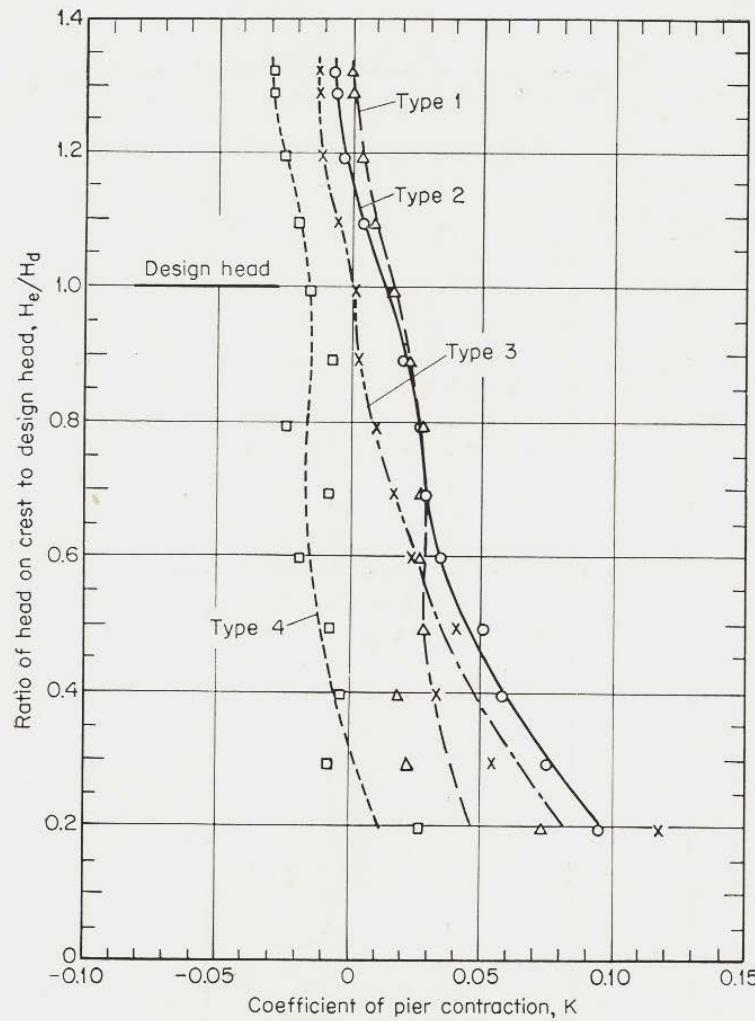


Prepadni preliv – zoožitveni koeficient – vpliv dolžine



HIGH GATED OVERFLOW CRESTS
PIER CONTRACTION COEFFICIENTS
EFFECT OF PIER LENGTH

Prepadni preliv – zoožitveni koeficient – vpliv oblike

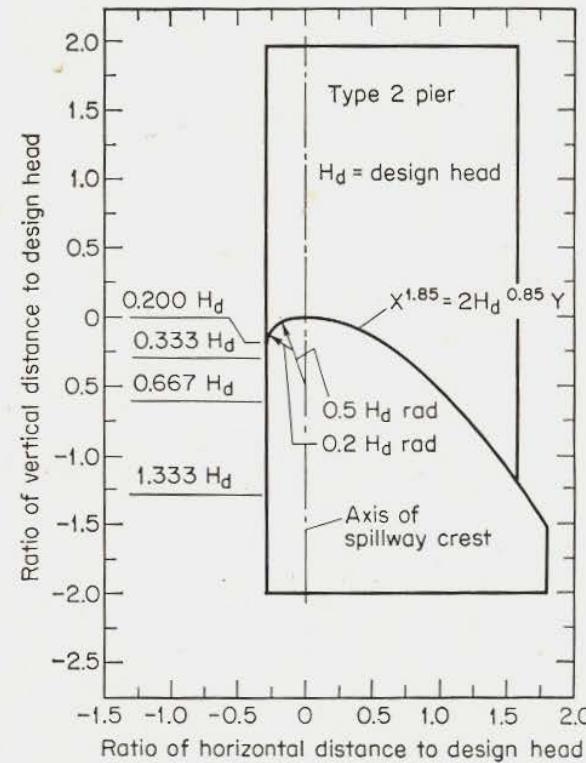
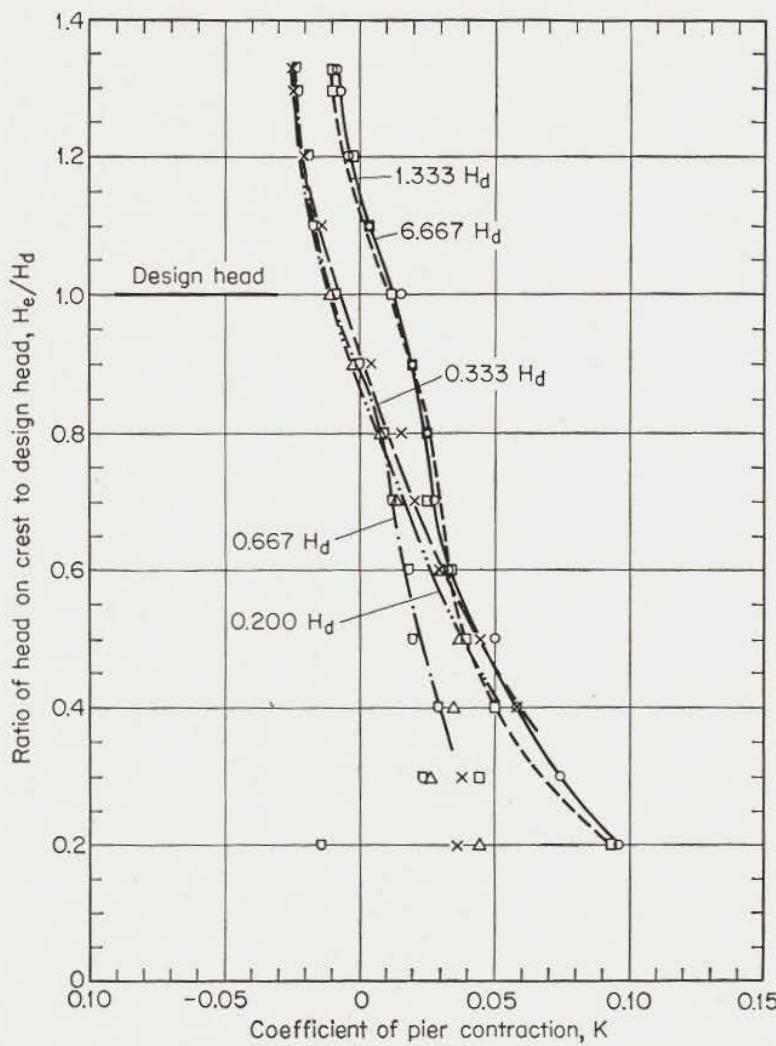


PIER NOSE SHAPES

Note: Pier nose located in same plane as upstream face of spillway

HIGH GATED OVERFLOW CRESTS
PIER CONTRACTION COEFFICIENTS
EFFECT OF NOSE SHAPE

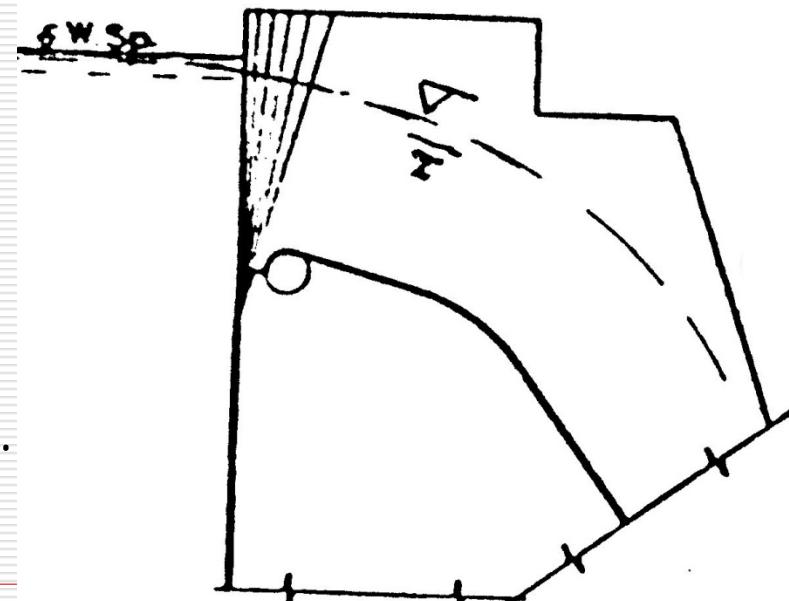
Prepadni preliv – zoožitveni koeficient – vpliv globine



LOW GATED OGEE CRESTS
PIER CONTRACTION COEFFICIENTS
EFFECT OF APPROACH DEPTH

Prepadni preliv: ločilni stebri - oblikovanje

Glava stebra je pogosto *stožčasto oblikovana* v smeri padajoče gladine vodnega toka, zlasti na prelivih visokih pregrad. Taka oblika *zmanjšuje hidravlične izgube* in *kontrakcijo*. Dolvodni konec stebra naj ne bo zakriviljen temveč *ostrorobo oblikovan*. Ostri robovi omogočajo stabilno odlepljanje vodnega toka in preprečujejo nastajanje nestalnih vrtinčnih tokov. Pri premočrtnem zoženju dolvodnega dela stebra naj kot konvergence ne presega 5° .



Prepadni preliv: ločilni stebri - oblikovanje

Na obliko *glave ločilnega stebra* med turbinsko zgradbo in prelivnim poljem vplivajo številni dejavniki. Optimalno jo lahko oblikujemo le na podlagi hidravličnih *modelnih raziskav*.

Hidrodinamično optimalno oblikovana glava ločilnega stebra *minimizira* ali popolnoma *prepreči kontrakcijo* ter *odlepljanje* in *vrtinčenje vodnega toka*, bodisi pri obratovanju samo turbinske zgradbe ali pri hkratnem obratovanju turbinske zgradbe in prelivov.

Prepadni preliv: kratki ločilni steber

Kratek ločilni steber je

praviloma sorazmerno

širok. Odlikuje ga

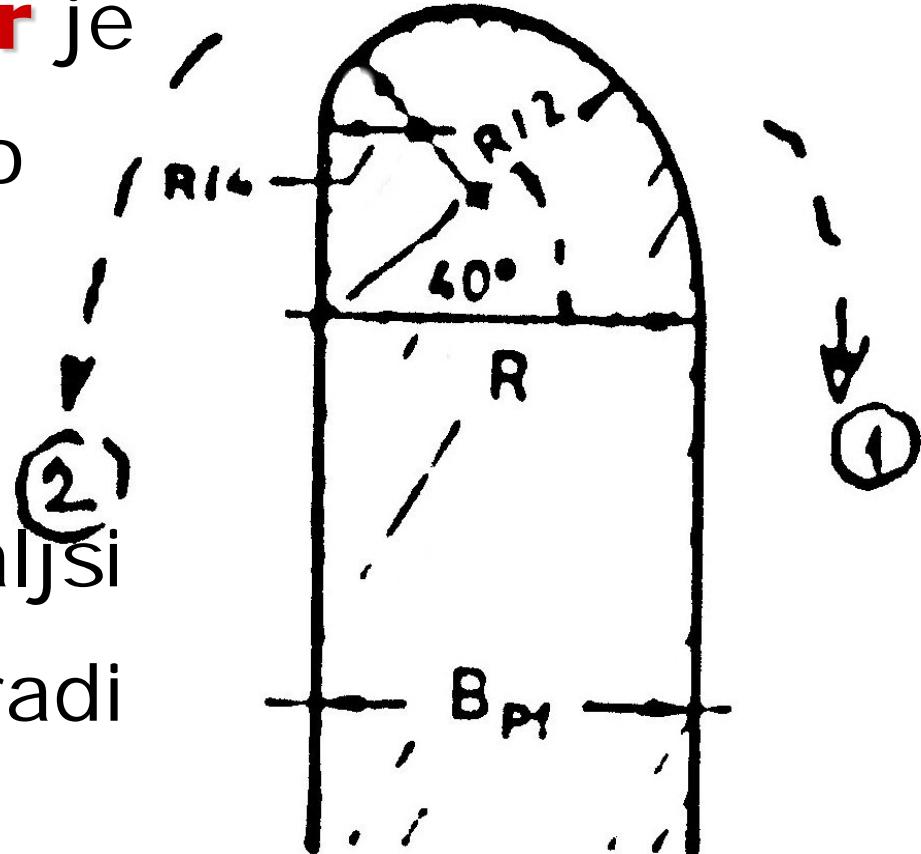
enostavna izvedba.

Uporablja se kadar daljši

steber ni ustrezen zaradi

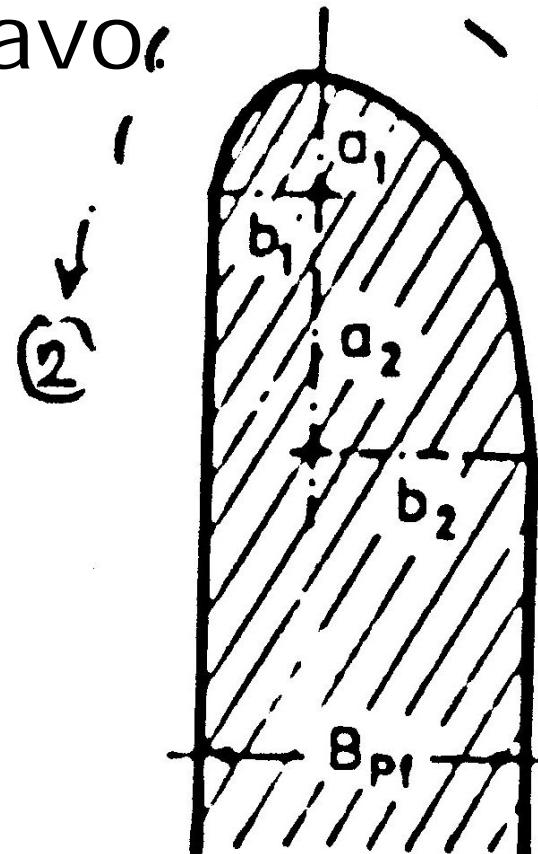
oblikovnih in

konstrukcijskih pogojev.



Prepadni preliv: daljši ločilni steber – eliptična glava

Daljši in ožji so ločilni stebri z *eliptično* oblikovano glavo:

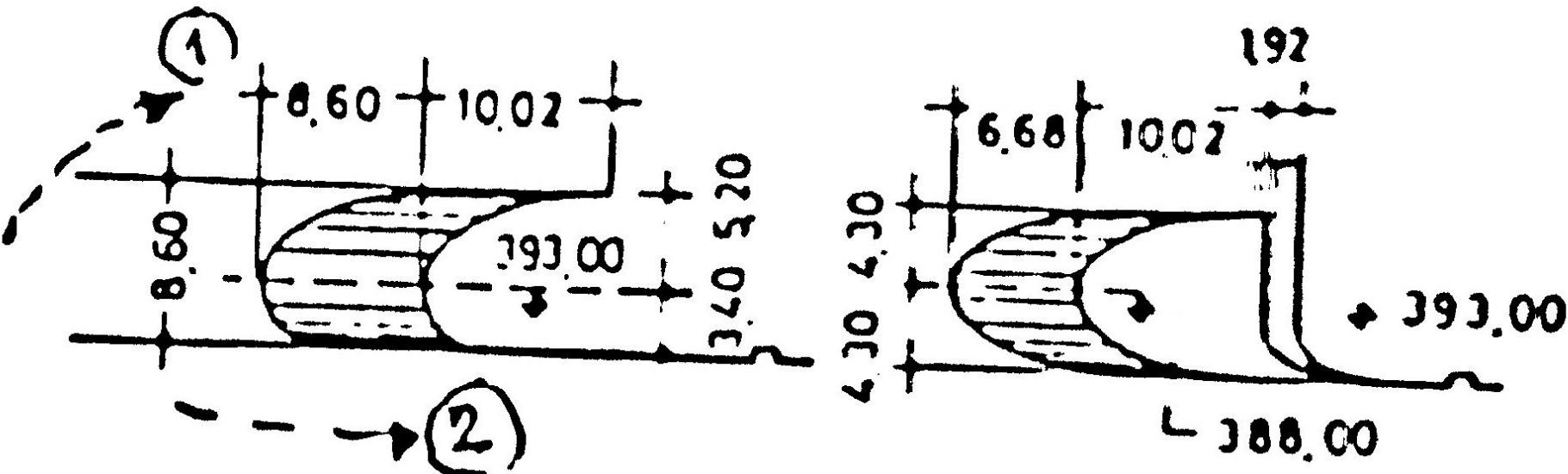


①

$$\begin{aligned} b_1 &= 1/3 B_{Pl} \\ a_1 &= 1,15 b_1 \\ b_2 &= 2/3 B_{Pl} \\ a_2 &= 3 a_1 \end{aligned}$$

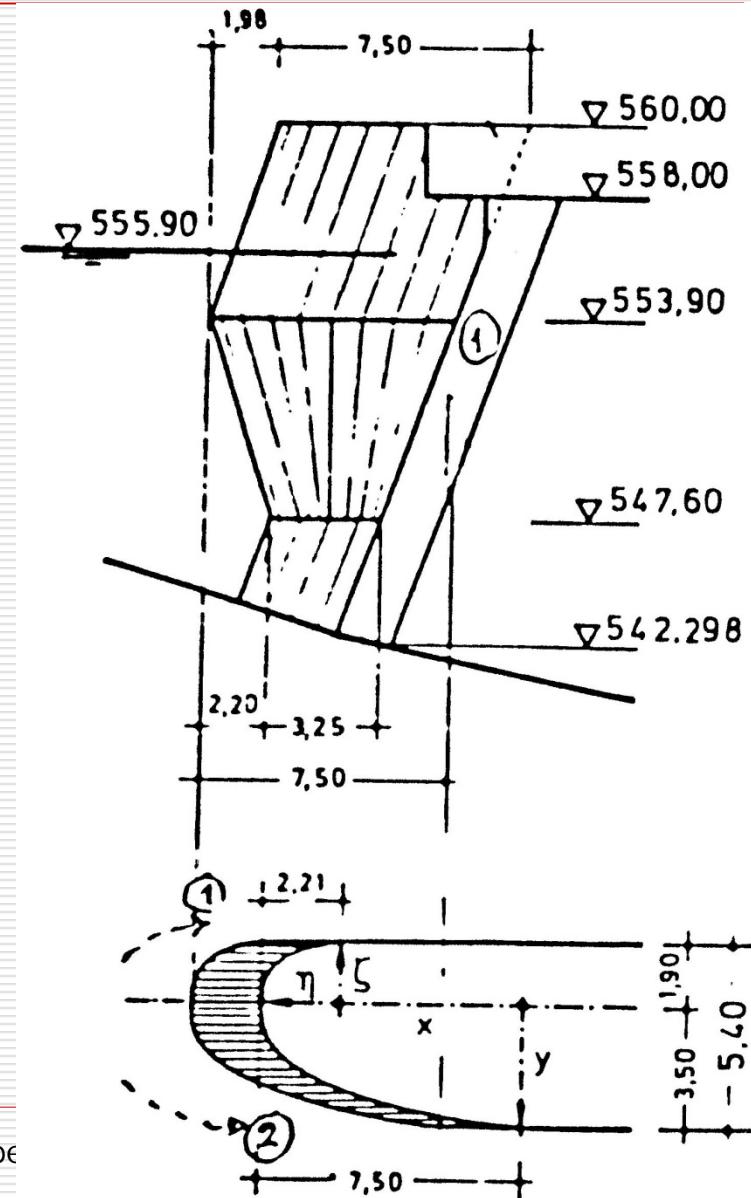
Prepadni preliv: ločilni steber – somerna oblika

Nesomerna oblika glave ločilnega stebra ni vselej optimalna. Modelne raziskave ločilnih stebrov na HE Edling na Dravi so pokazale, da omogoča **somereno oblikovana glava** enakomernejši dotok vode k prelivnemu polju in povzroča plitvejše erozijske tolmune za podslapjem, ne poslabša pa dotoka v turbinsko zgradbo.

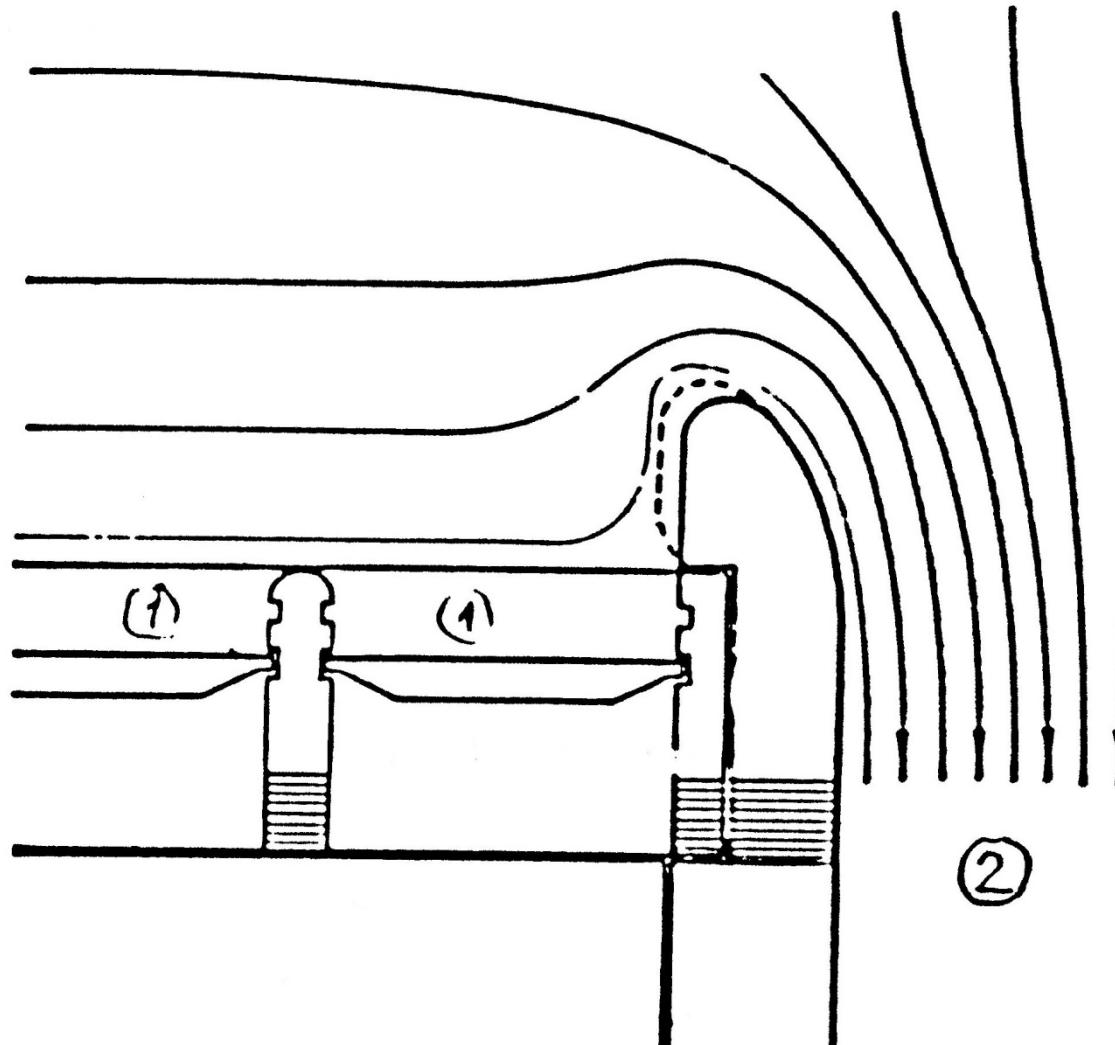


Prepadni preliv: ločilni steber – nesomerna oblika

Pri glavi ločilnega stebra HE na Lechu so v vseh vodoravnih prerezih krivine eliptično oblikovane. Zgornji in spodnji del glave sta nagnjena v smeri vodnega toka, srednji del glave je nagnjen v nasprotni smeri. Vodni tok je optimalno usmerjen k turbinski zgradbi. Motnje na prelivnem polju so neznatne. Modelne raziskave so pokazale, da bi bil pri somerni zasnovi glave dotok vode k turbinski zgradbi slabši, širina stebra pa večja.



Prepadni preliv: ločilni steber – nesomerna oblika



Prepadni preliv: specifični pretok

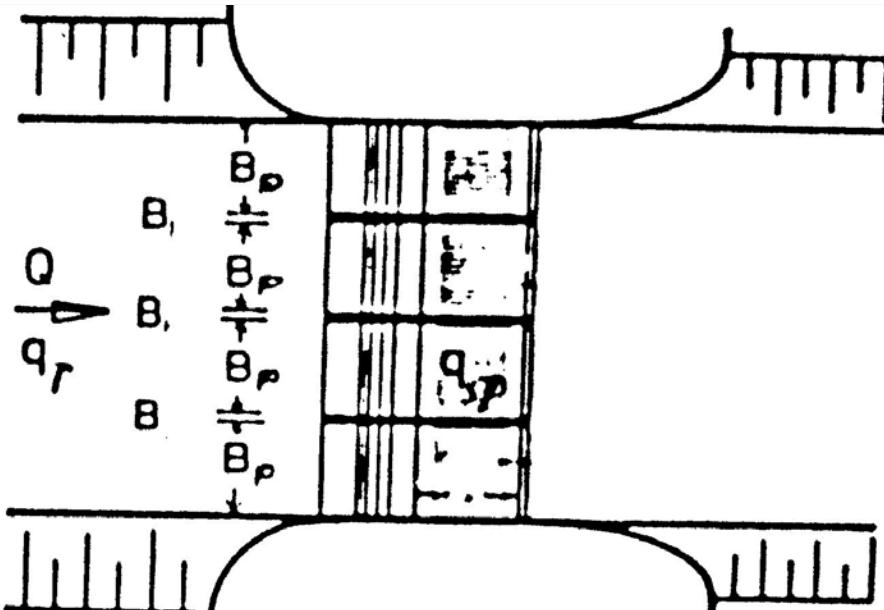
Stebri segajo do konca podslapja

- obratujejo vsa prelivna polja:

$$q_{sp} = Q / (n B_P)$$

- eno prelivno polje je blokirano in ne obratuje:

$$q_{sp} = Q / [(n-1) B_P]$$



Stebri segajo do konca preliva

- obratujejo vsa prelivna polja:

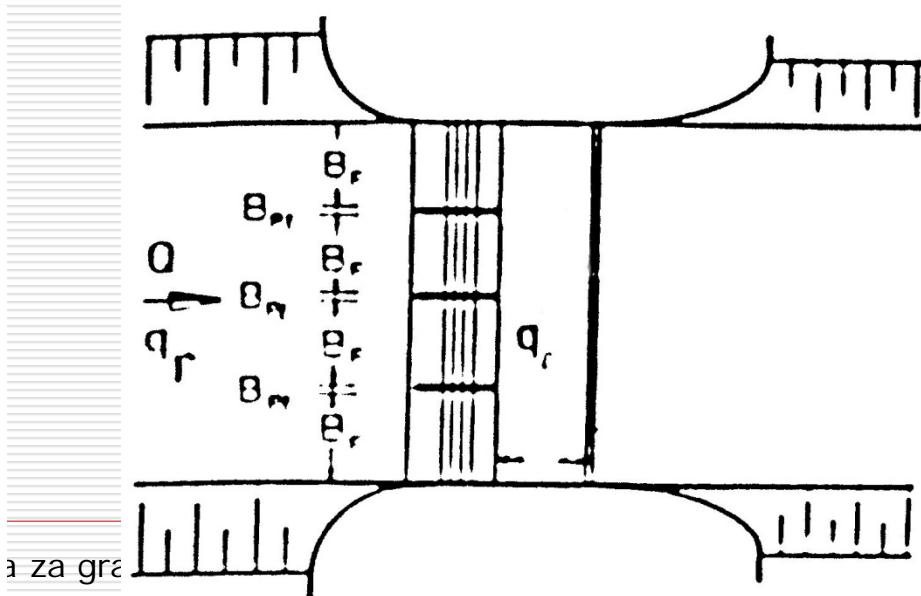
$$q_{sp} = Q / [n B_P + (n - 1) B_S]$$

- stransko polje ne obratuje:

$$q_{sp} = Q / [(n-1) B_P + (n-1,5) B_S]$$

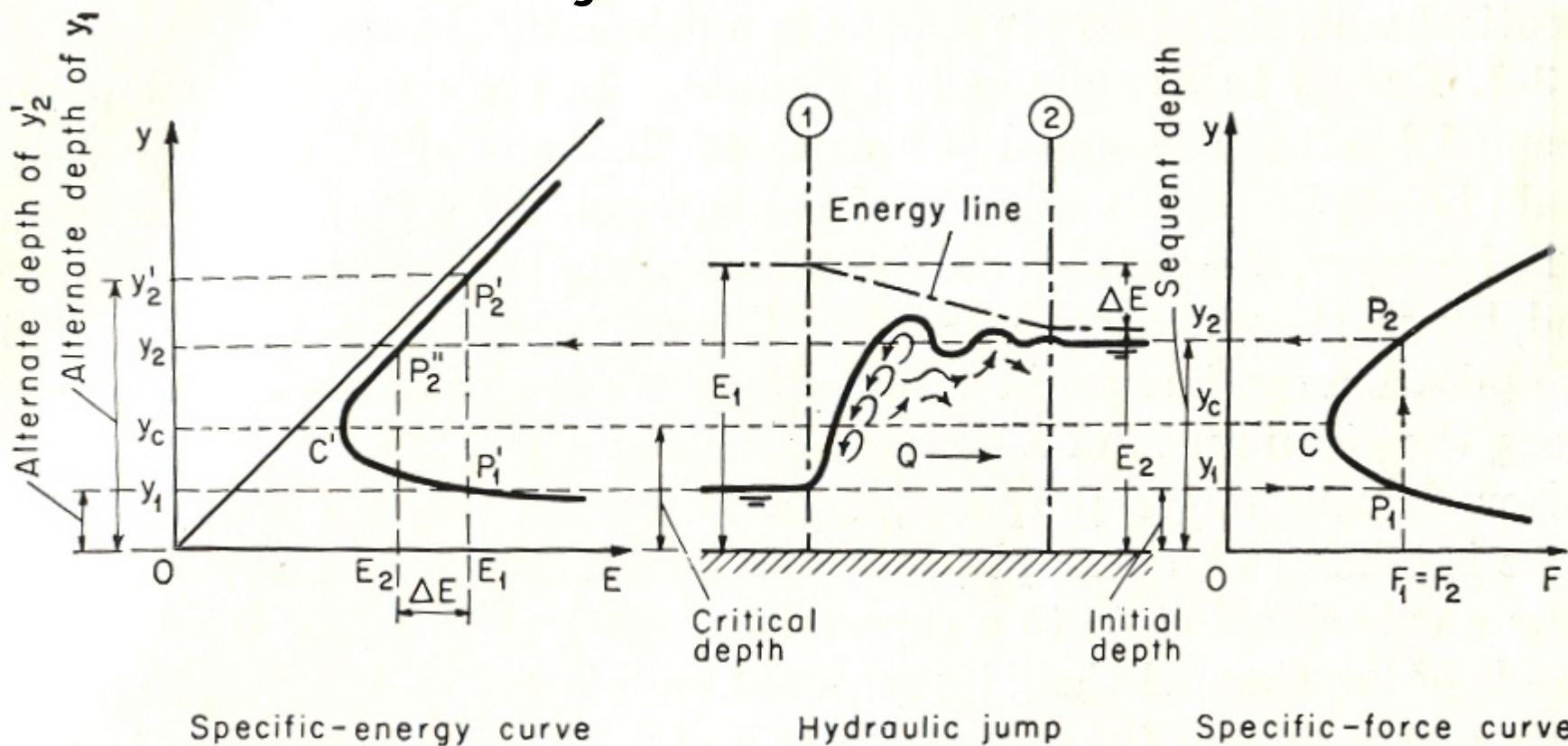
- vmesno polje ne obratuje:

$$q_{sp} = Q / [(n-1) B_P + (n-2) B_S]$$



Vodni skok - definicija

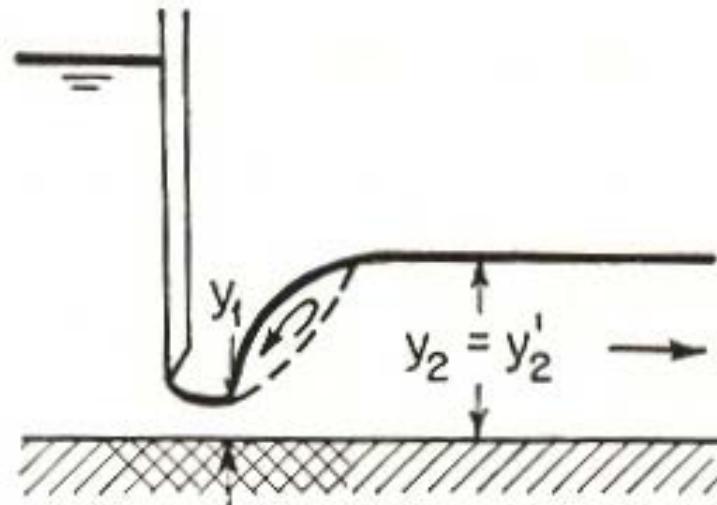
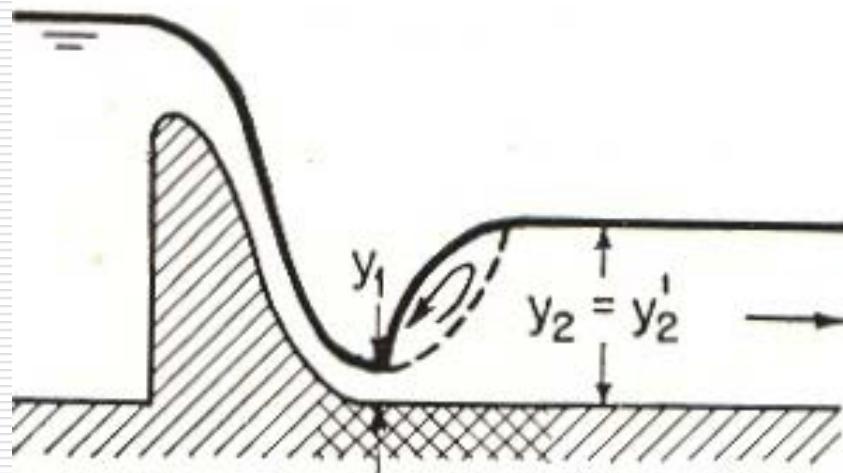
Spremembo oblike proste površine vodotoka v obliki skokovitega prehoda iz silovitega v miren režim toka imenujemo **vodni skok**.



Vodni skok - popoln vodni skok

V primeru, ko je y_2 enaka globini spodnje vode se vodni skok formira tik ob drči – **popoln vodni skok**.

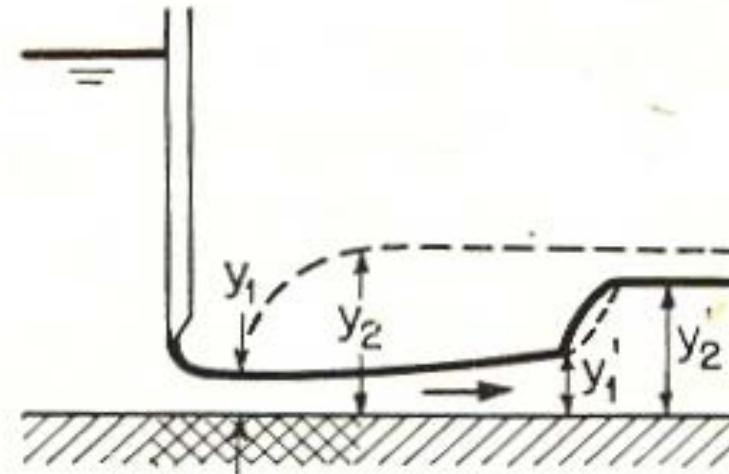
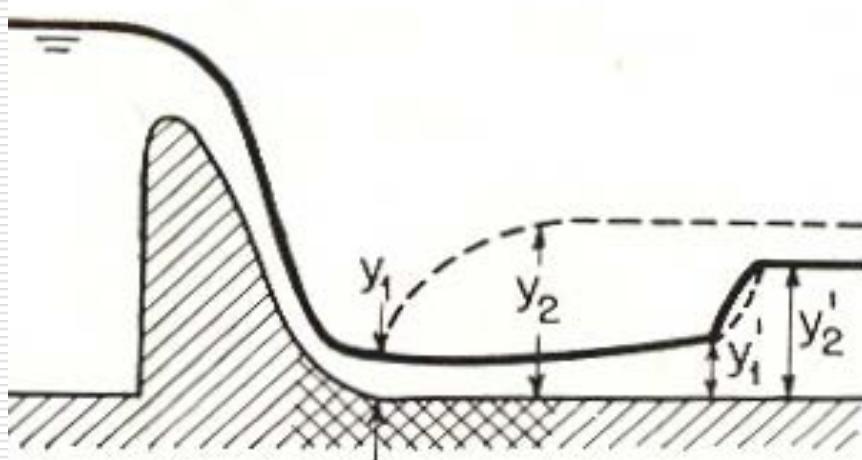
Posledica majhnih razlik v globinah je ta, da vodni skok potuje dolvodno od izhodiščne pozicije, kar otežuje zaščitne ukrepe v utrditvi struge pod drčo.



Case 1: $y'_2 = y_2$

Vodni skok - odgnani vodni skok

V primeru, ko je y_2 večja od globine spodnje vode se vodni skok formira dolvodno od drče – **odgnani vodni skok**. Tak primer vodnega skoka je za ureditev utrditve struge neprimeren in je treba na ustrezен način zagotoviti pogoje, da se formira vodni skok ob drči (poglobitev podslapja, prag,...).

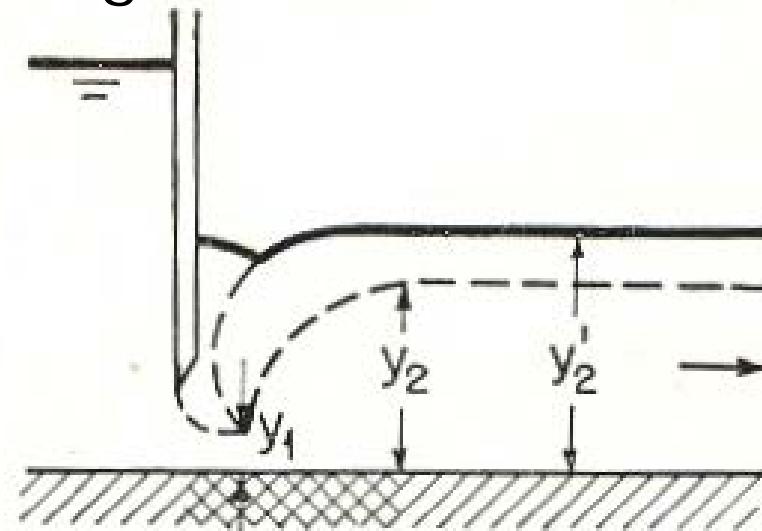
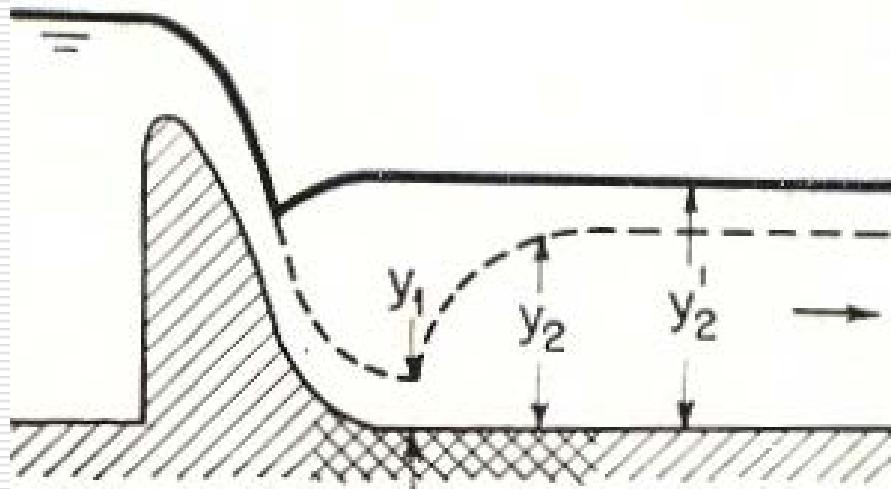


Case 2: $y_2' < y_2$

Vodni skok - popoln vodni skok

V primeru, ko je y_2 manjša od globine spodnje vode se vodni skok formira ob drči – **potopljeni vodni skok**.

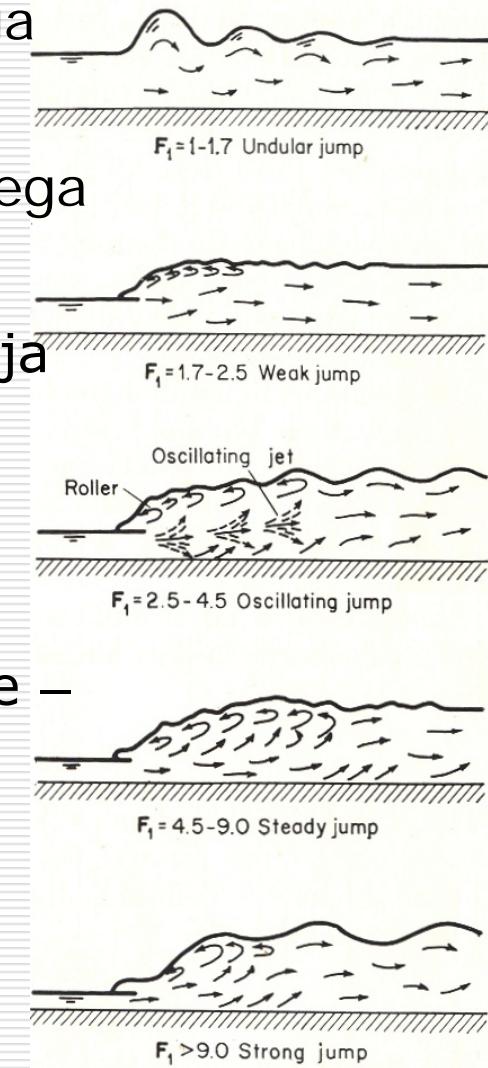
Tak primer vodnega skoka zahteva minimalne utrditve struge pod drčo, vprašljiva pa je zadostna disipacija energije zaradi potopljenosti vodnega skoka.



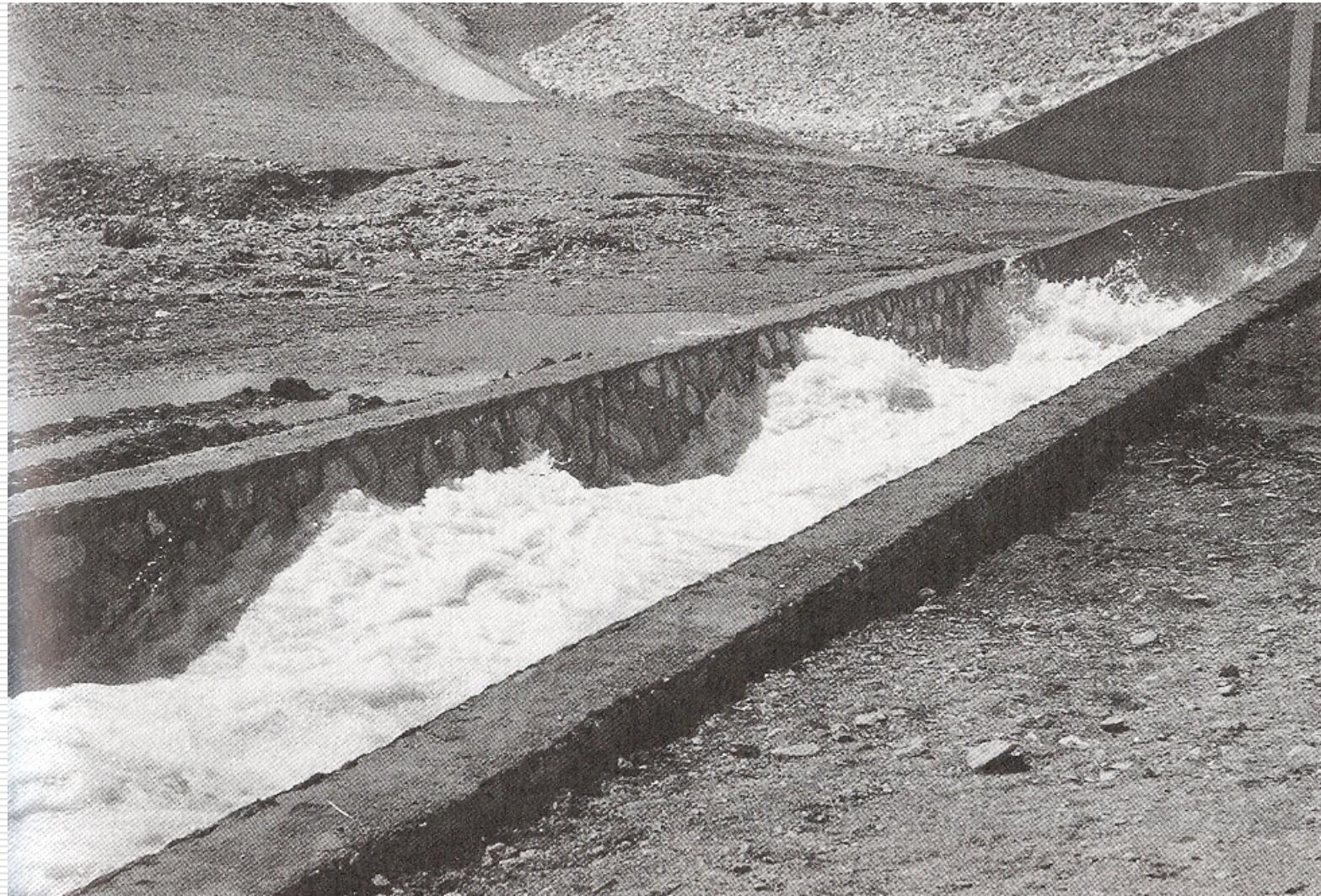
Case 3: $y_2' > y_2$

Vodni skok - klasifikacija

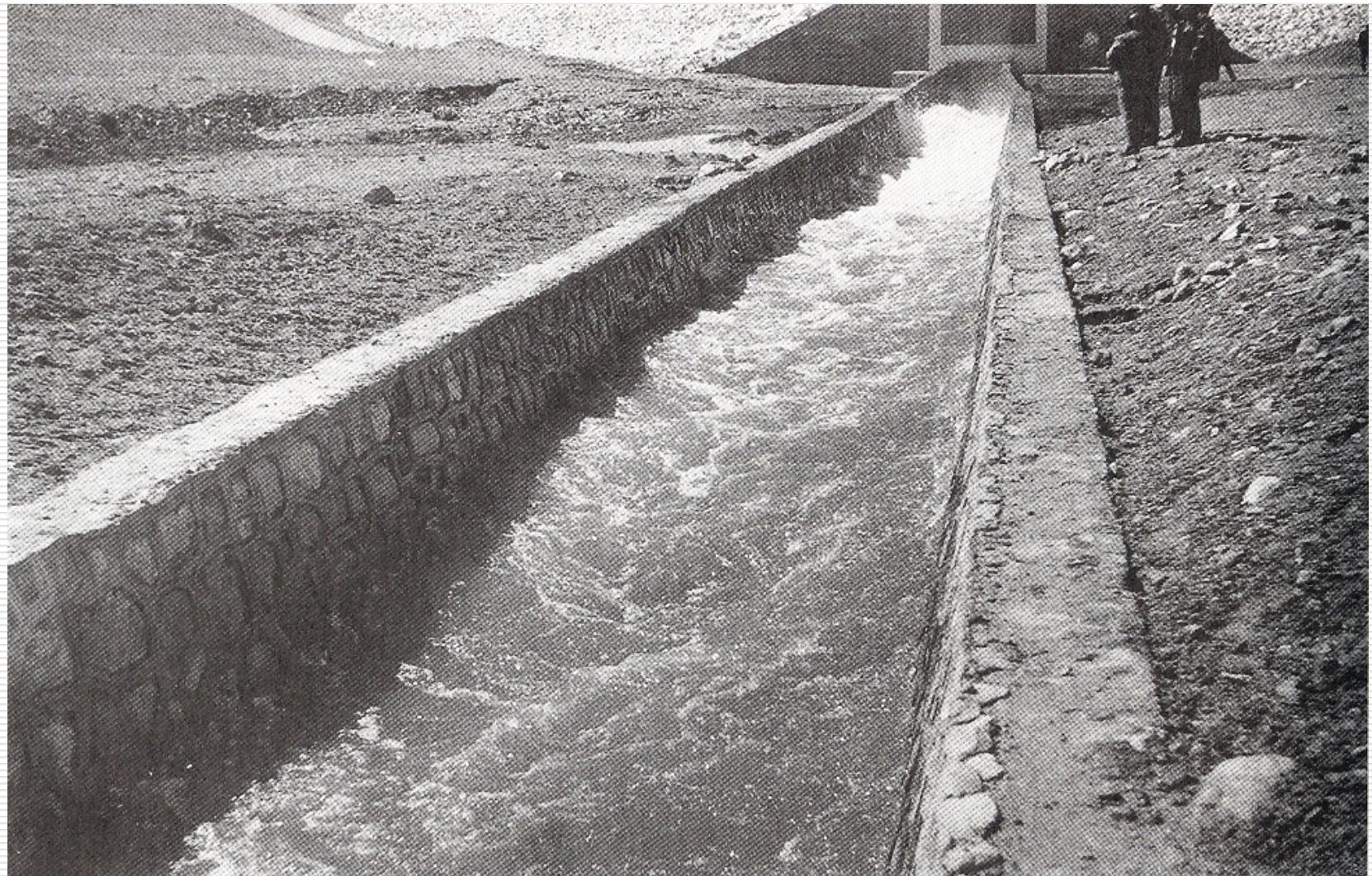
- $1 < Fr_1 < 1,7$ **valovit vodni skok** brez krovnega vala – slaba pretvorba – *utrditev struge*
- $1,7 < Fr_1 < 2,5$ **slaboten vodni skok** brez krovnega vala – slaba pretvorba – *ureditev podslapja*
- $2,5 < Fr_1 < 4,5$ **oscilujoč vodni skok** čigar motnja potuje dolvodno in izpodjeda bregove – slaba pretvorba – *neugodno stanje za podslapje*
- $4,5 \leq Fr_1 < 9$ **stabilen vodni skok** s krovnim valom, ki omogoča optimalno pretvorbo energije – *ureditev podslapja*
- $Fr_1 > 9$ **izrazit vodni skok** z valovitim odtokom dolvodno – *poglobitev podslapja*, pri $Fr_1 > 10$ se priporoča *odskočna rampa*



Vodni skok – valovit vodni skok



Vodni skok – slaboten vodni skok



Vodni skok – razvit vodni skok



Vodni skok - karakteristike

1) energijske izgube

$$\Delta E = E_2 - E_1 = \frac{(y_2 - y_1)^2}{4 y_1 y_2}$$

2) učinkovitost

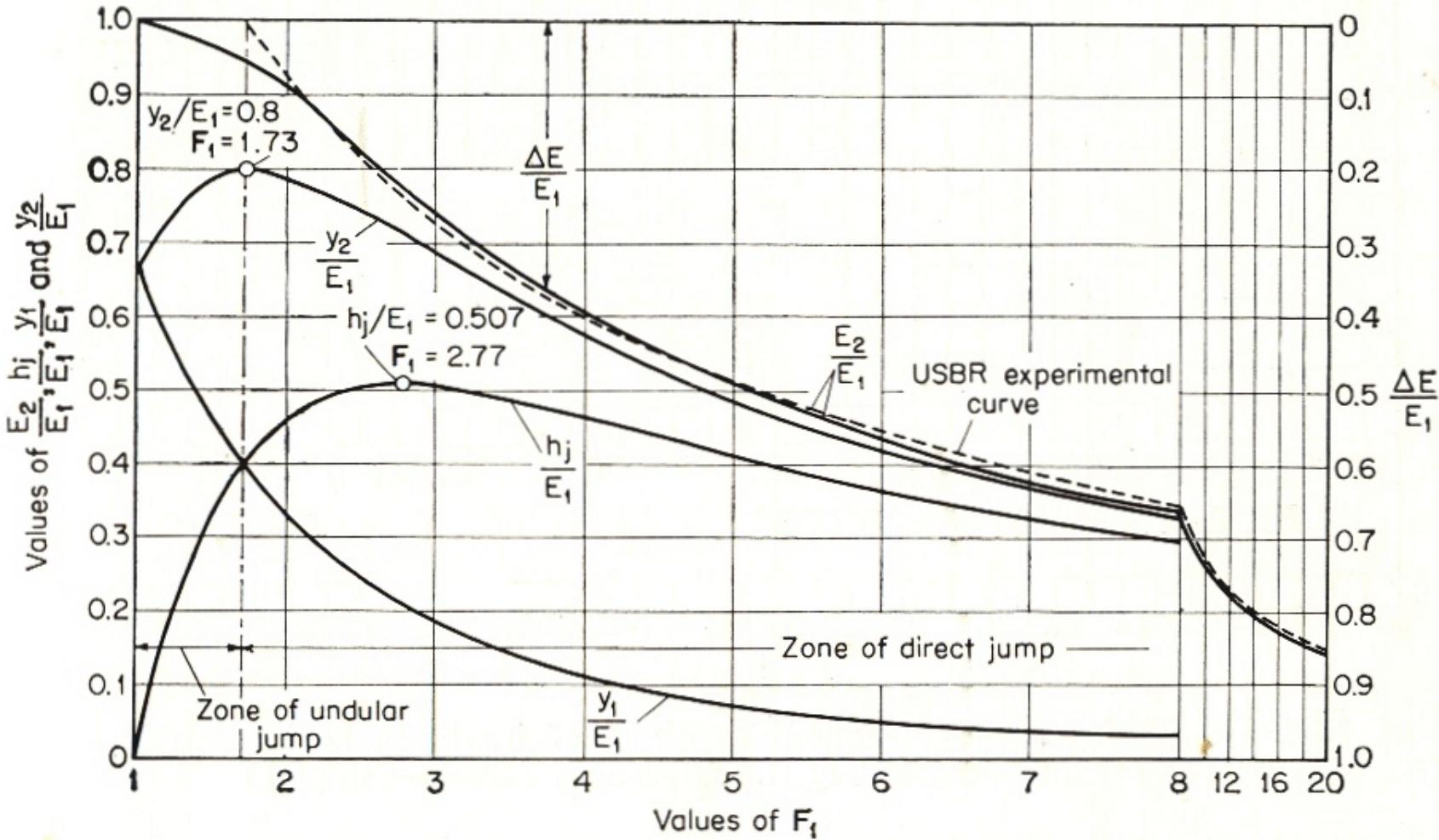
$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{(8 F_1^2 + 1)^{\frac{3}{2}} - 4 F_1^2 + 1}{8 F_1^2 (2 + F_1^2)}$$

3) višina skoka

$$\frac{h_j}{E_1} = \frac{y_2}{E_1} - \frac{y_1}{E_1}$$

$$\frac{h_j}{E_1} = \frac{\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 3}{F_1^2 + 2}$$

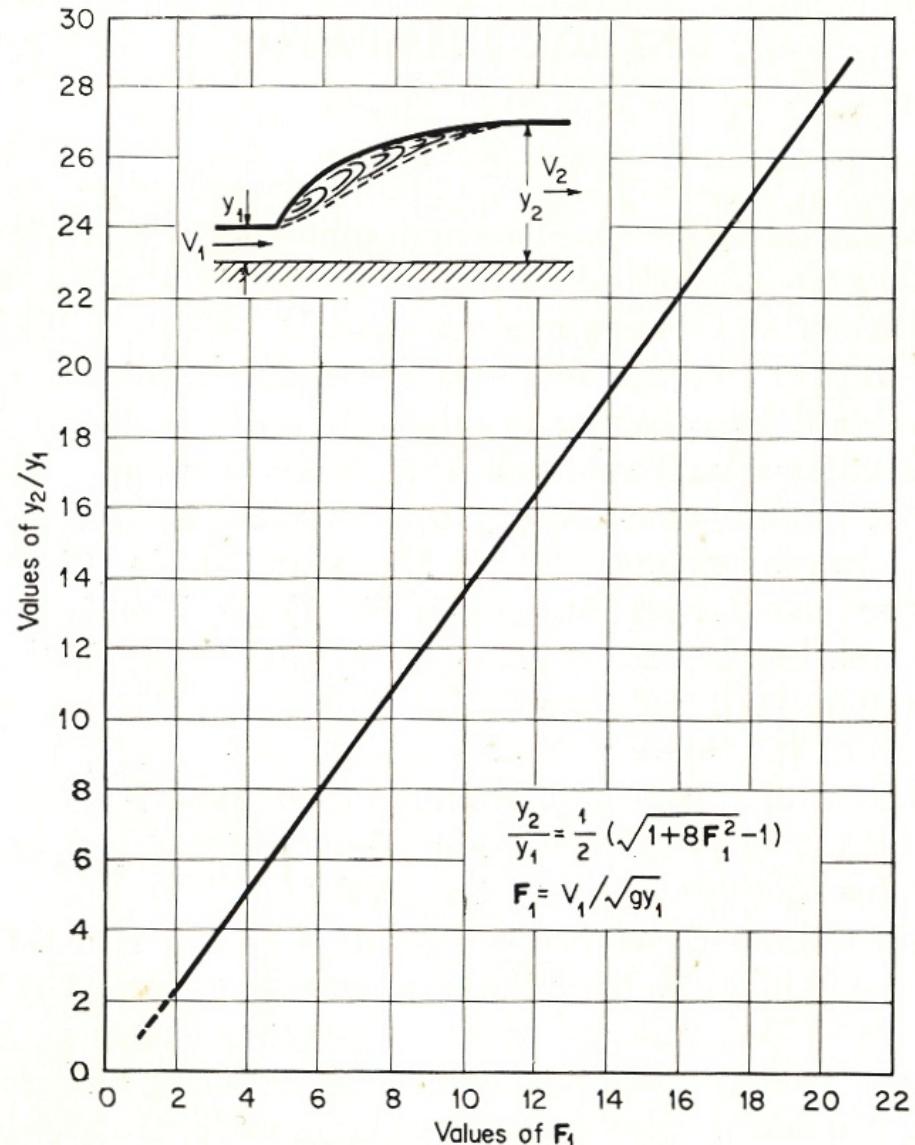
Vodni skok - karakteristike



Podslapje: definicija

Podslapje služi za pretvorbo kinetične energije v potencialno energijo vodnega toka. Učinkovitost pretvorbe, oziroma disipacije, je odvisna od:

- Froudeovega števila pred vodnim skokom Fr_1
- globine spodnje vode y_s



Podslapje – povečanje učinkovitosti

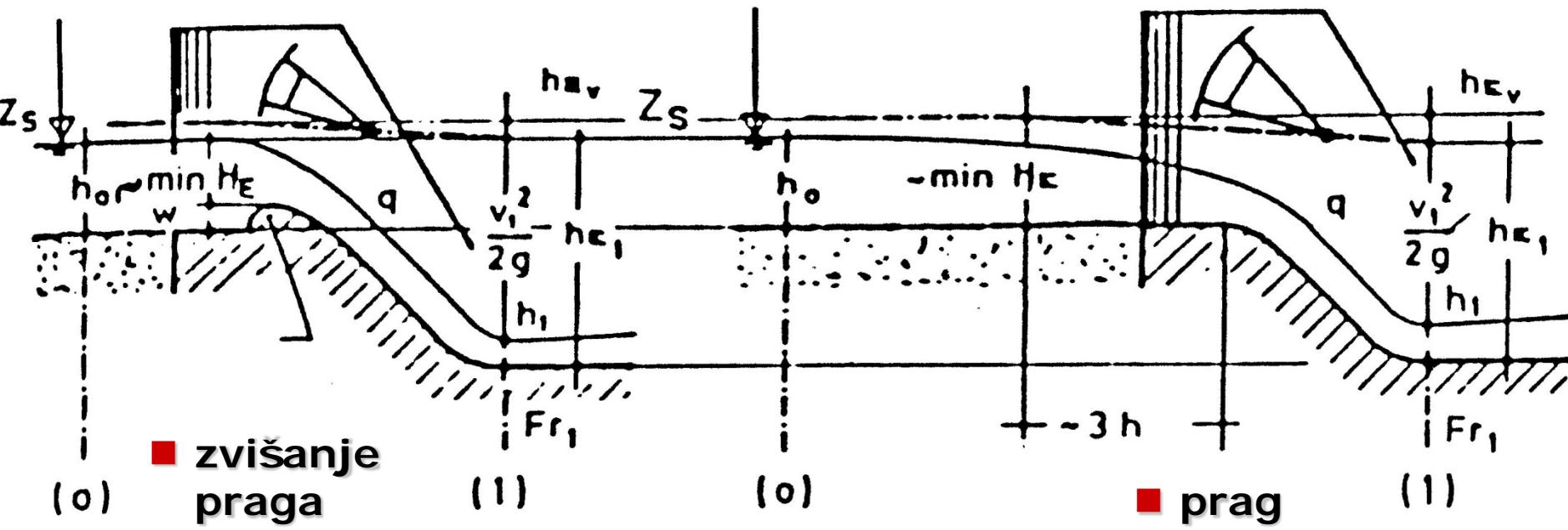
Na nizkih jezovih in pragovih je mogoče zvečati hidravlično učinkovitost podslapja, s *poglobitvijo dna* podslapja ali z *nadvišanjem prelivne krone*. S poglobitvijo dna podslapja se pogosto zveča tudi *negativni vpliv* spodnje vode na kvaliteto vodnega skoka, zaradi nezaželene potopitve. Hidravlično *primernejše* je *zvišanje* prelivne krone jezu ali praga.

Podslapje – povečanje učinkovitosti

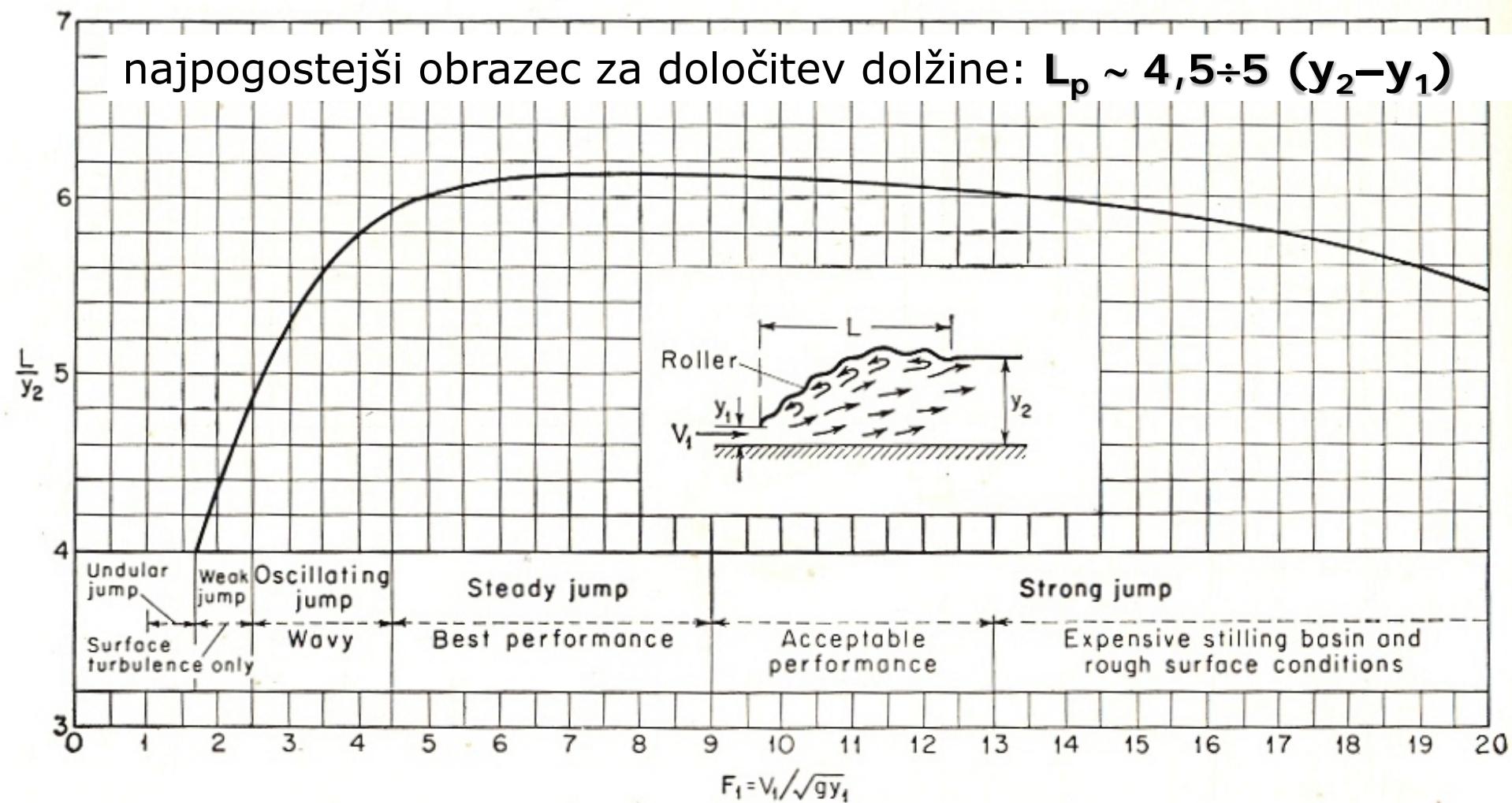
Če je prelivna krona hidrodinamično oblikovana in njena višina **w** ne presega **10% – 15%** prelivne višine odločilnega pretoka, ne vpliva na globino odločilnega pretoka. Tudi pomicni del jezu (*zapornica*) je potem takem za 10% – 15% *nizji, cenejši* v izvedbi in vzdrževanju ter *varnejši* pri obratovanju, ker je s spodnjim delom nad gladino vode v podslapju.

Podslapje – povećanje učinkovitosti

Z **zvišano prelivno krono** je popolnoma eliminirano depresijsko območje vodnega toka pred pragom. E_{min} se oblikuje tik za prelivno krono, pri pragu se oblikuje E_{min} na razdalji 3 h_{kr} (h_{kr} – kritična globina) gorvodno od prelivnega roba. Razlika v energijski višini gre torej v korist zvečanja kinetične višine vodnega toka, oz. Fr_1 .



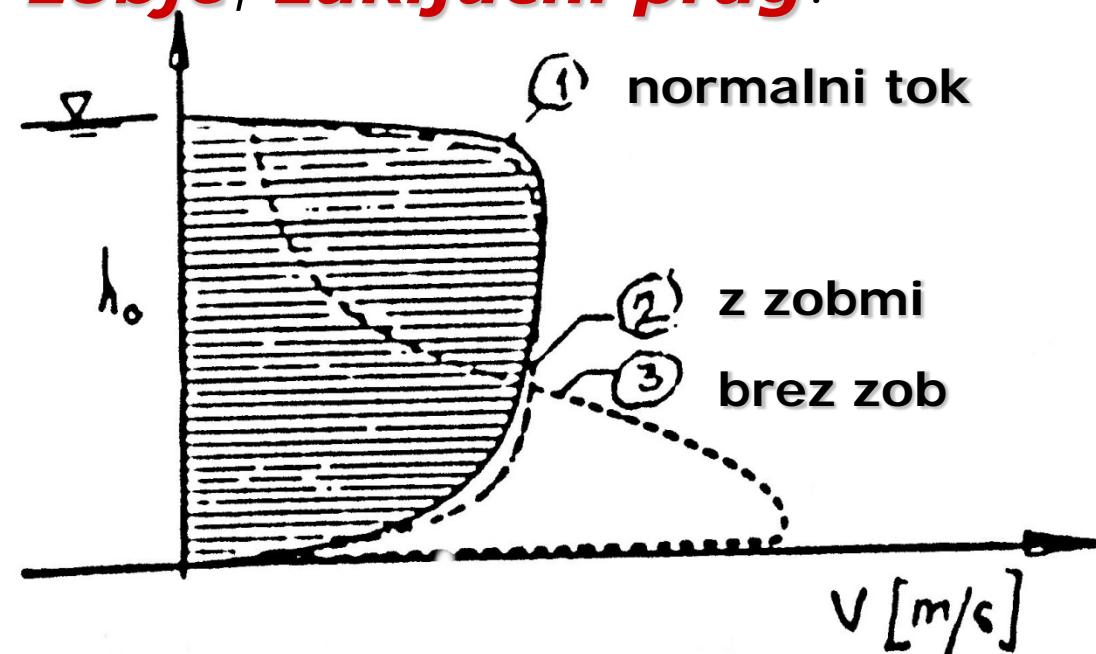
Vodni skok – dolžina podslapja



Podslapje – povečanje učinkovitosti

Kompenzacija hidravlično neugodno oblikovanega podslapja zgolj z večanjem dolžine ni gospodarna. Dolžino podslapja je mogoče skrajšati (do 20%) z oblikovanimi elementi za pretvorbo energije v podslapju: **usmerniki, zobje, zaključni prag**.

Pravilno oblikovani in nameščeni zobje omogočajo oblikovanje makroturbulence in mešanje vodnega toka v vodnem skoku ter stabilizirajo krovni val v podslapju.



Podslapje – oblikovanje razbijačev

- *Širina zoba* naj bo približno enaka globini **y₁** pri odločilnem pretoku za dimenzioniranje podslapja. Približno enaka ali večja je širina razmika med zobmi.
- *Skupna širina zob* v vrsti naj ne presega **40% širine** podslapja. Prva vrsta zob naj bo nameščena približno na prvi tretjini dolžine podslapja.
- Ob *hidrodinamičnih silah* učinkujejo na zobe tudi *udarne sile* zaradi ledu in plavajočih predmetov. Zobje so AB izvedbe, sidrani v temeljno betonsko ploščo. Pred erozijo zaradi kavitacijskih podtlakov, rinjenih plavin ter udarcev plavajočih predmetov so robovi betonskih zob zavarovani z jeklenimi kotniki.

Podslapje – oblikovanje razbijačev

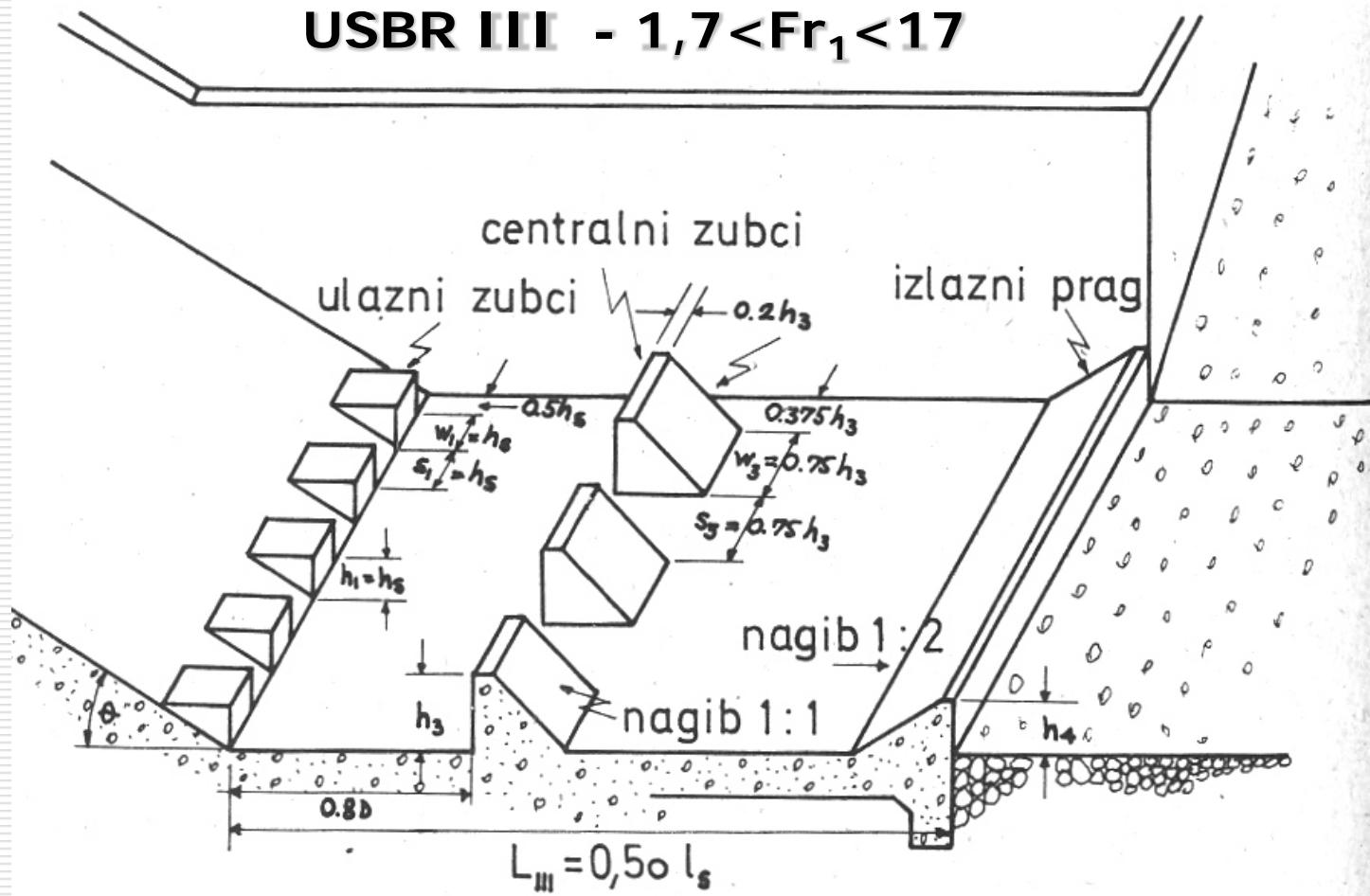
- Namesto betonskih uporabljajo tudi *jeklene zobe*, privijačene na betonsko ploščo podslapja.
- S posebnim oblikovanjem zob in dna podslapja je mogoče zmanjšati podtlake na zobeh in usmeriti superkavitacijska jedra v okoliško vodo.
- Zobje omogočajo primerno *turbulenco* vodnega toka.

Podslapje – oblikovanje usmernikov

- Pri *zalitem vodnem skoku* ter pri *nizkih številih Fr*, je nizka pretvorba energije - zaradi nezadostne, skoraj izključno površinske pretvorbe energije, se oblikuje *oscilujoča* vodna gladina v podslapju in dolvodno od njega v rečni strugi.
- Ustrezno dušenje takih oscilacij je mogoče doseči z **usmerniki**, nameščenimi na dolvodni strani jezu ter **visokimi zobmi**. Usmerniki spreminjajo frekvenco deročega toka, vzbujevalca oscilacij gladine in dušijo njegov učinek na oscilacije. Zobje omogočajo primerno turbulenco vodnega toka.

Podslapje – oblikovanje razbijačev

Tip podslapja za majhne objekte, temeljni izpust, kanali,..



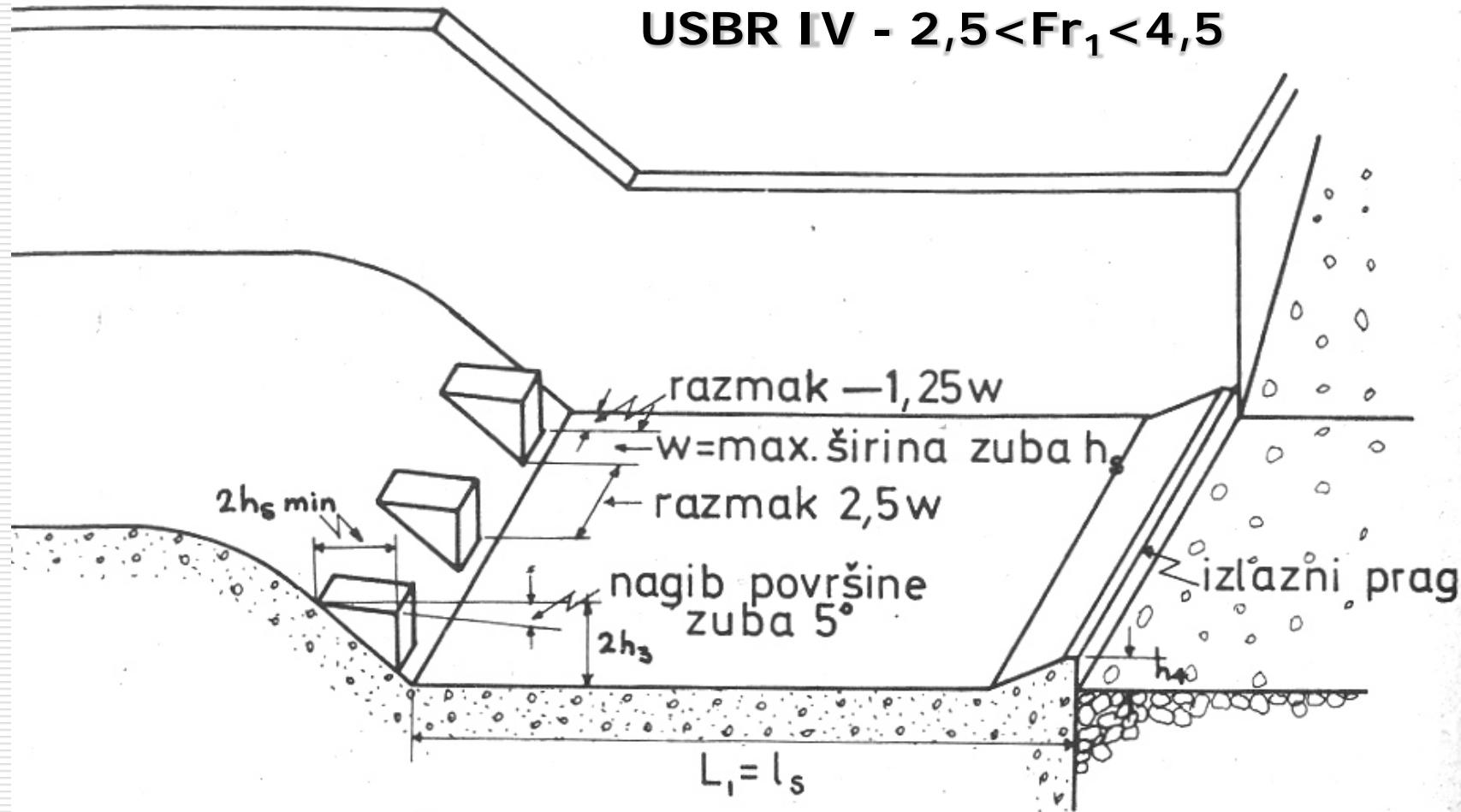
Podslapje – oblikovanje usmernikov

- Skupna širina usmernikov naj ne presega **40%** širine podslapja.
- Usmerniki lahko negativno vplivajo na stabilnost zapornice na nizkih jezovih, če so nameščeni preblizu zaporničnega noža - zaradi oscilujoče gladine lahko povzročijo periodično vibriranje zapornice. Namestitev usmernikov je treba preveriti na hidravličnem modelu.

Podslapje – oblikovanje usmernikov

Tip podslapja za derivacijske objekte

USBR IV - $2,5 < Fr_1 < 4,5$



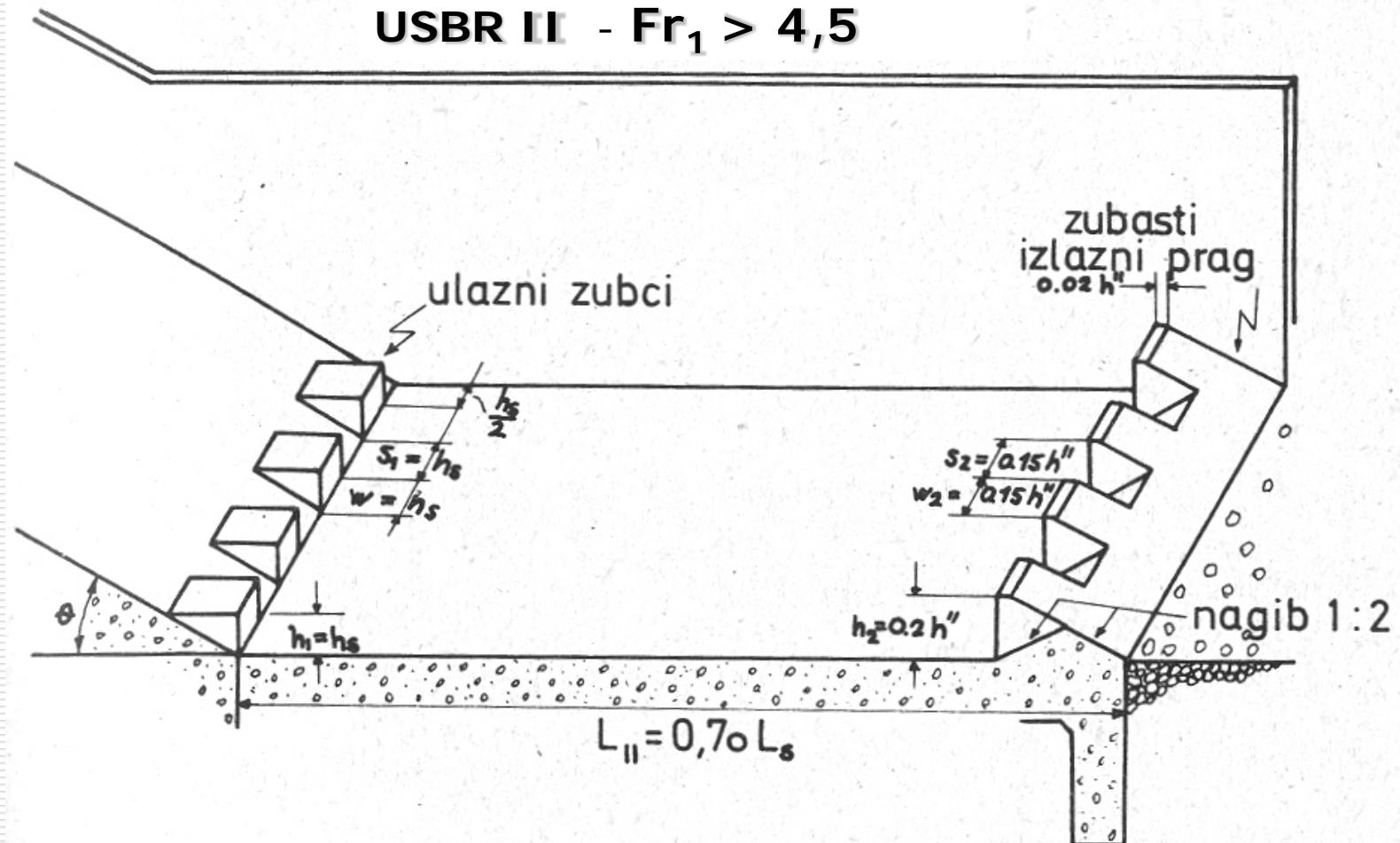
Podslapje – oblikovanje pragu

- Z nizkim nazobčanim *zaključnim pragom*, je mogoče doseči enakomernejšo razporeditev hitrosti vodnega toka ter preprečiti večje poglabljanje rečnega dna neposredno za podslapjem.

Podslapje – oblikovanje pragu

Tip podslapja za velike objekte, prelive, kanale,..

USBR II - $Fr_1 > 4,5$



Podslapje – potopljenost

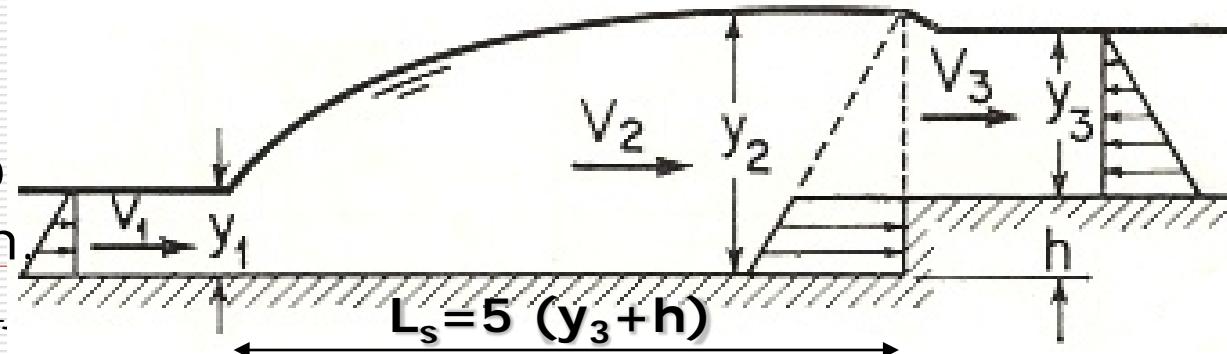
Dopustna potopljenost vodnega skoka pri ravninskem toku:

$$1,05 \leq (y_3 + h)/y_2 \leq 1,25 \quad h \text{ je višina praga; } y_3 \text{ spodnja voda}$$

Prvi pogoj (**$\sigma=1,05$**) zagotavlja, da vodni skok ne »uide«. Drugi pogoj (**$\sigma=1,25$**) preprečuje zalitje (potopitev) vodnega skoka (krovni val še ni zalist). Ker so y_1 , y_2 , y_3 in h odvisni od pretoka, učinkovitost pretvorbe energije ni enaka pri vseh pretokih. Podslapje oblikujemo za odločilni pretok. Če je vodni skok *zelo potopljen*:

$$(y_3 + h)/y_2 > 1,25$$

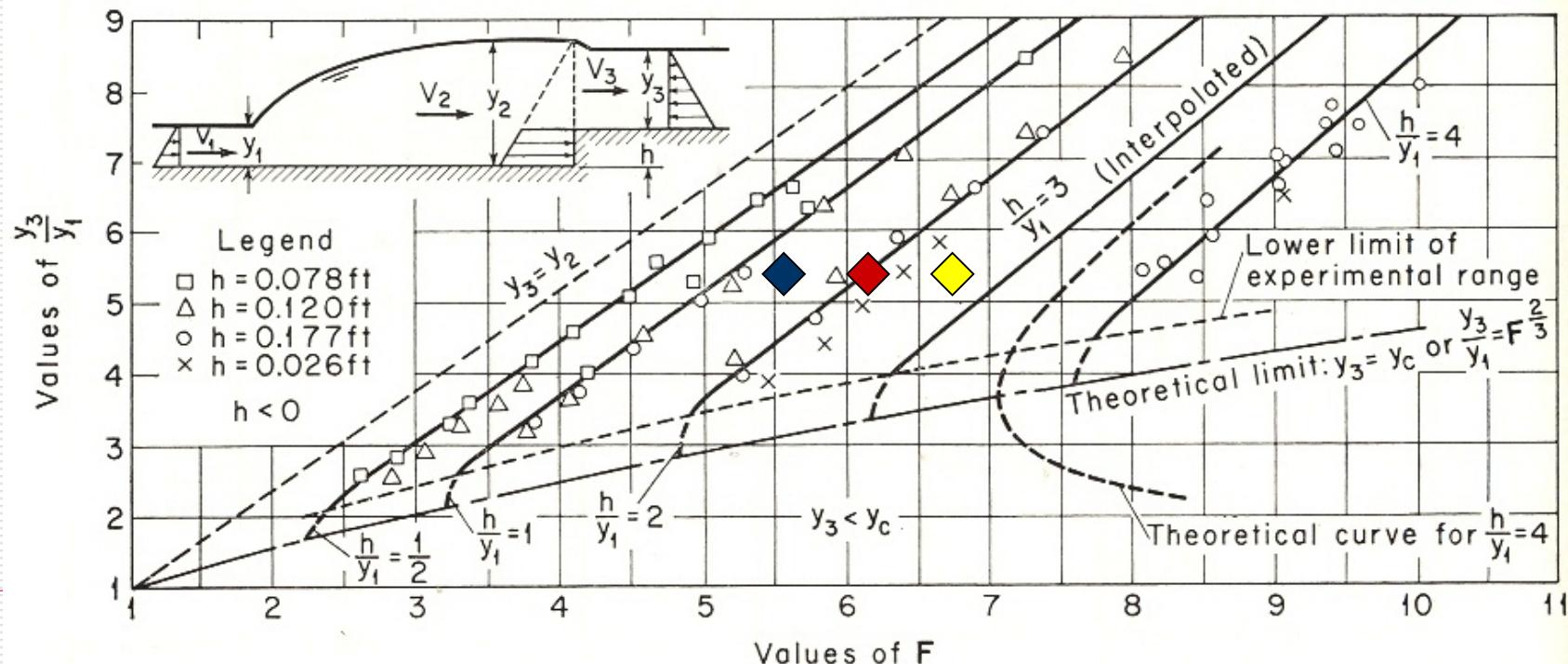
se krovni val ne more oblikovati - pretvorba energije se ne izvrši po vsej višini vodnega toka, temveč skoraj samo na površini, kar zniža njen učinek in tudi učinek zob na disipacijo je zmanjšan.



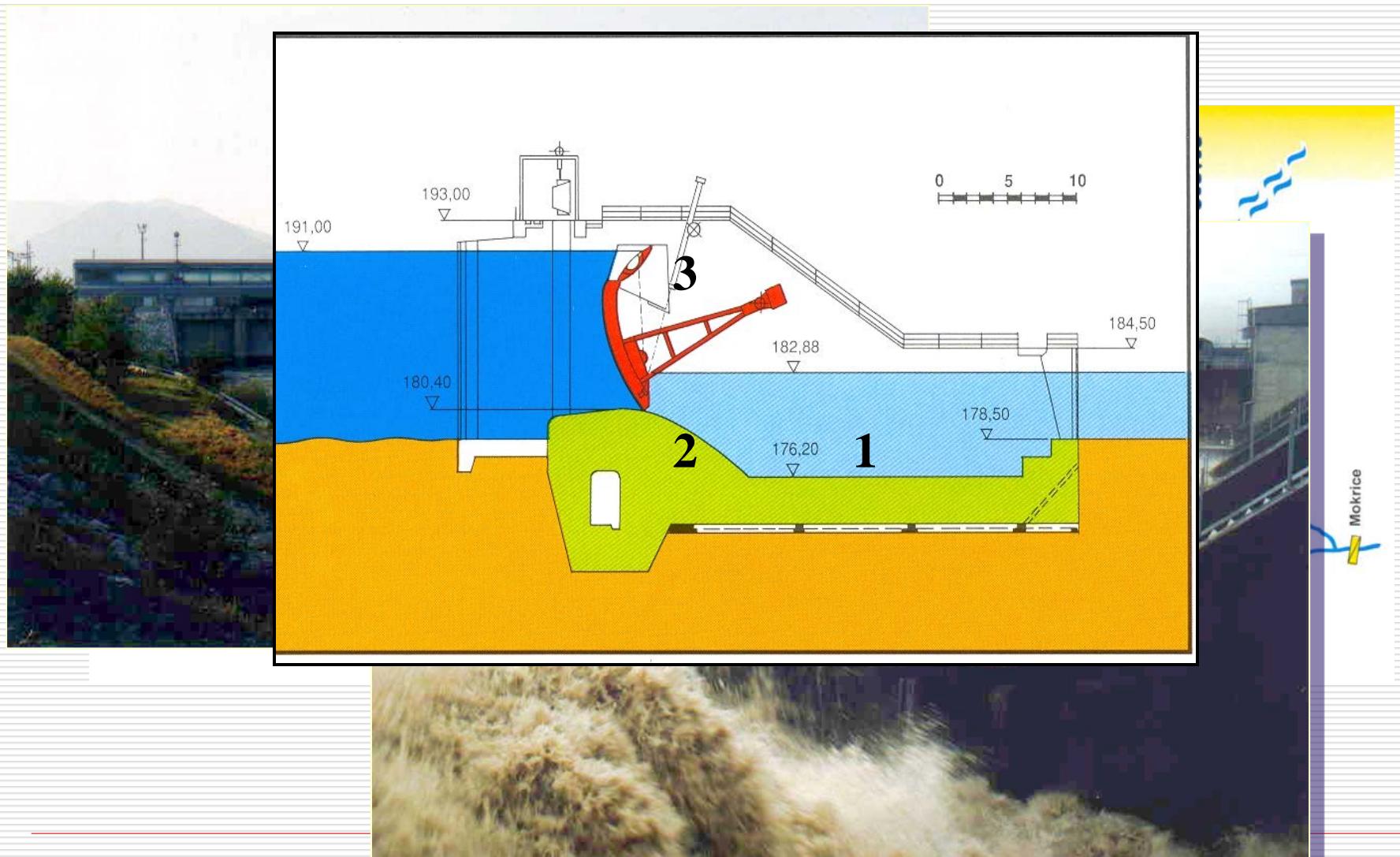
Podslapje – poglobljeni podslapje

Če je $y_3 < y_2$ je potrebno **poglobiti podslapje**. Parametrične krivulje h/y_1 dosežejo maksimalne vrednosti in delijo diagramme na tri območja: I. *območje mirnega toka* [$h/y_1=0$; $y_3=y_c$]; II. *območje deročega toka* [$y_3=y_c$; $y_3/y_1=1$]; III. *izvedba negativnega praga* [$F_1=1$; $h/y_1=0$]

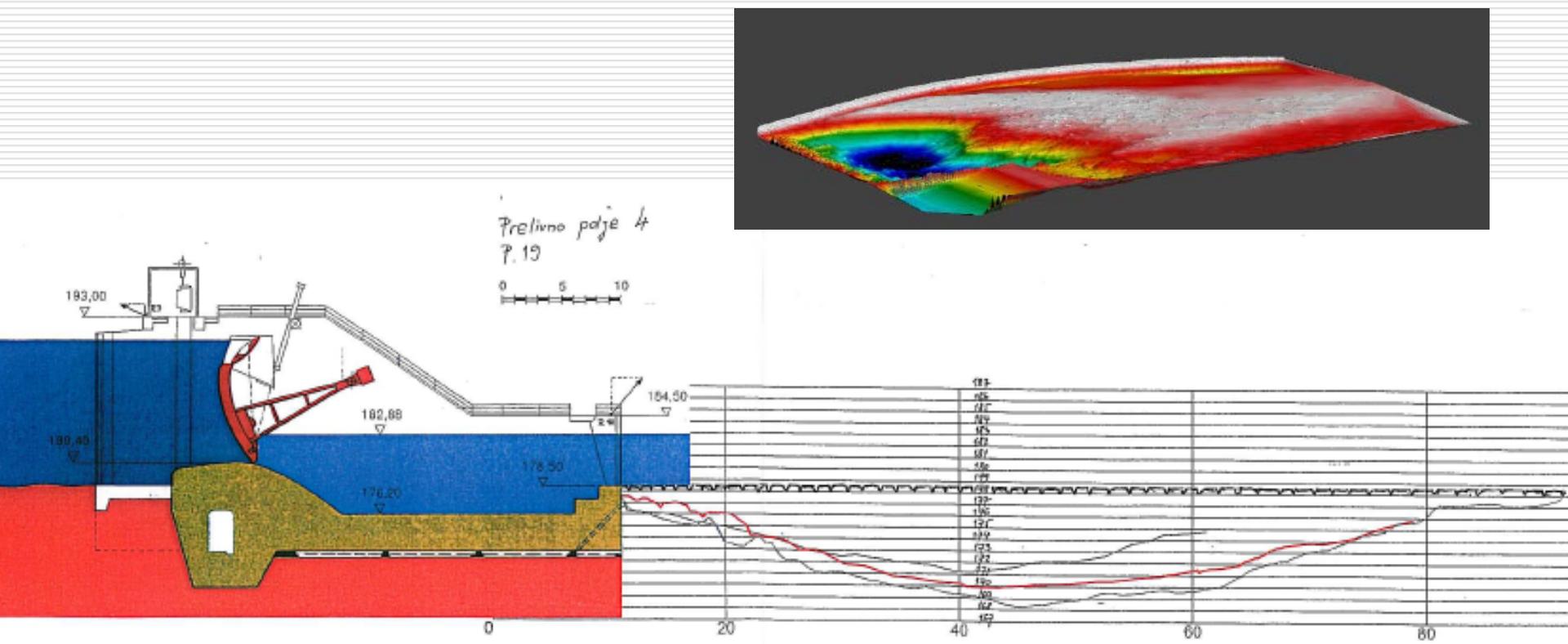
◆ $L_s=5 (y_3+h)$; ◆ **vodni skok je potopljen;** ◆ **odgnani vodni skok**



Podslapje – poglobljeni podslapje

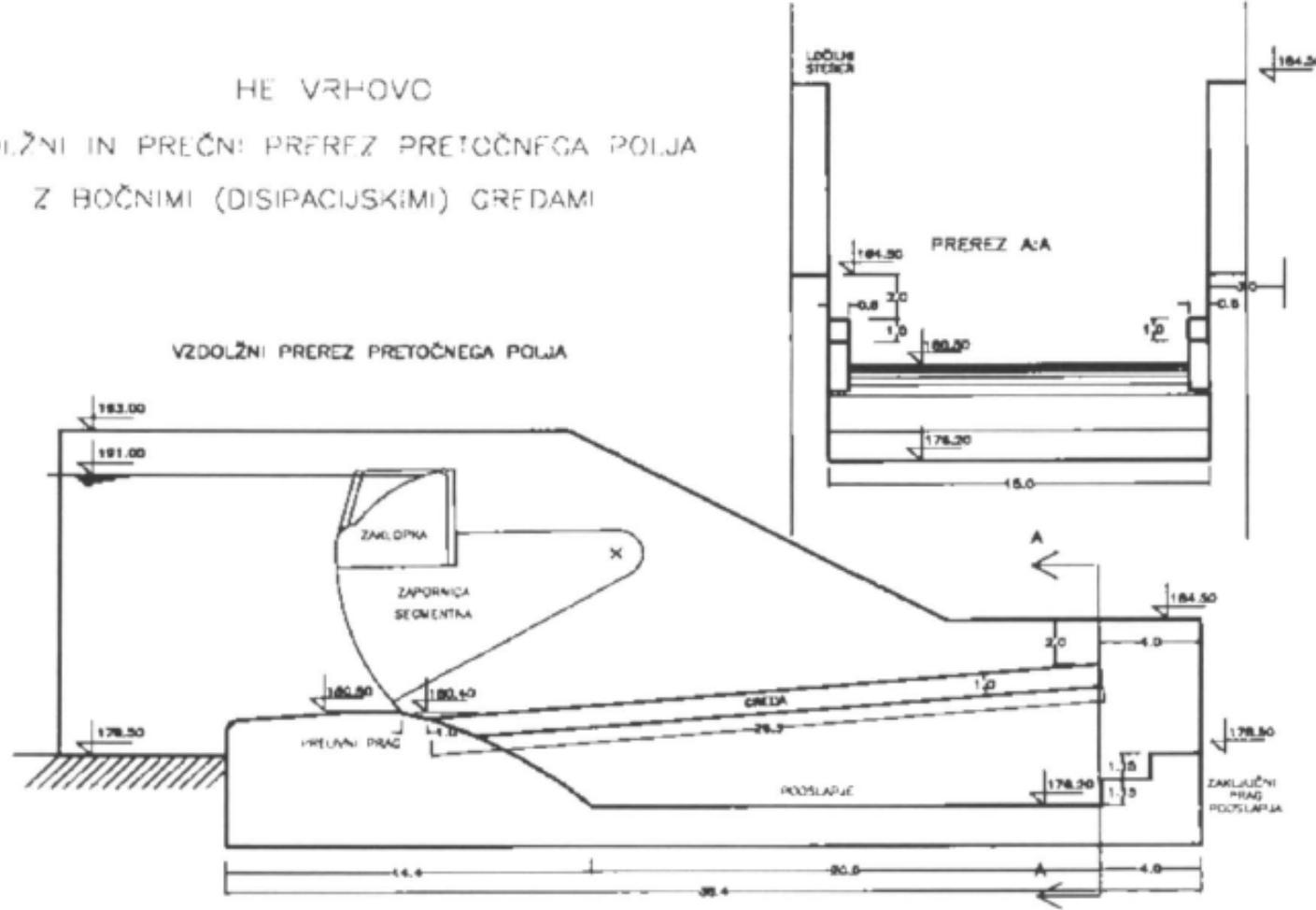


Podslapje – poglobljeno podslapje



Podslapje – poglobljeno podslapje

HE VRHOV
VZDOLŽNI IN PREČNI PREREZ PRETOČNEGA POLJA
Z BOČNIMI (DISIPACIJSKIMI) GREDAMI



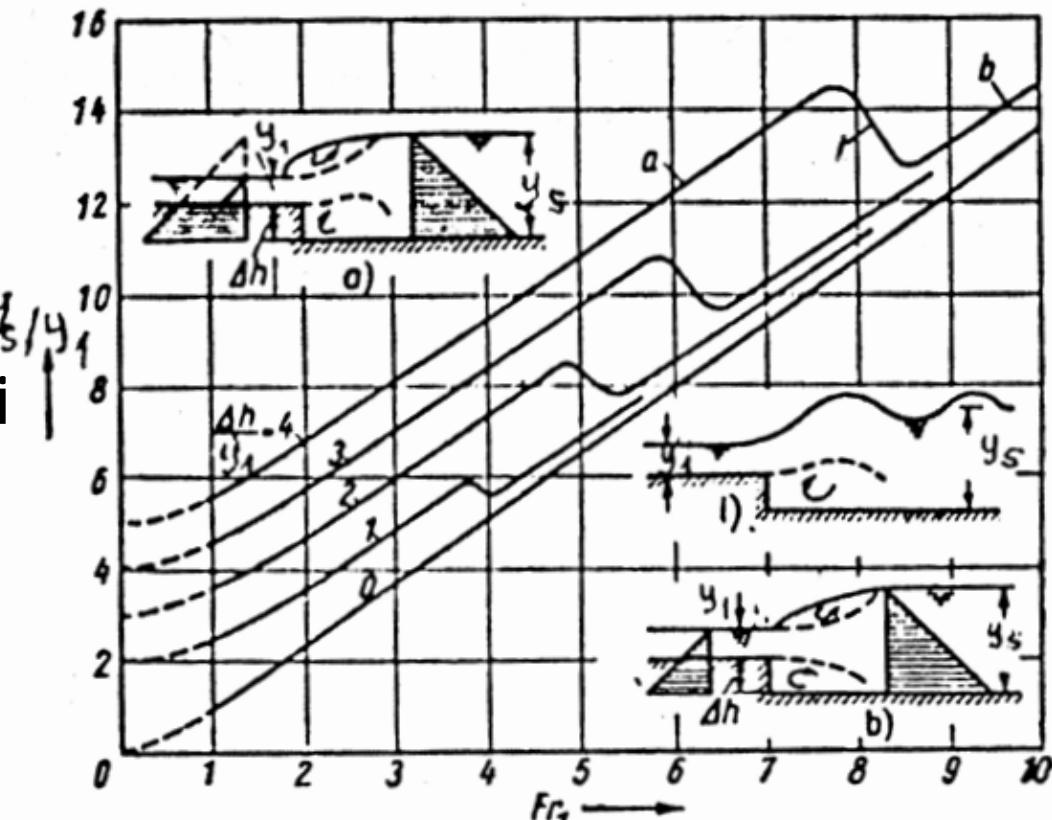
Podslapje – poglobljeno podslapje



Podslapje – negativni prag

Vodni skok je mogoče zajeziti in fiksirati na želenem mestu tudi s poglobitvijo rečne struge z »negativnim pragom«. Kvaliteta vodnega skoka je odvisna od območja na katerem se vodni skok oblikuje.

Vodni skok je stabilen, če se formira v območjih **a** (vpliv spodnje vode) ali **b** (vpliv zgornje vode), med njima, v območju **i** (skok) pa je vodni skok nestabilen.



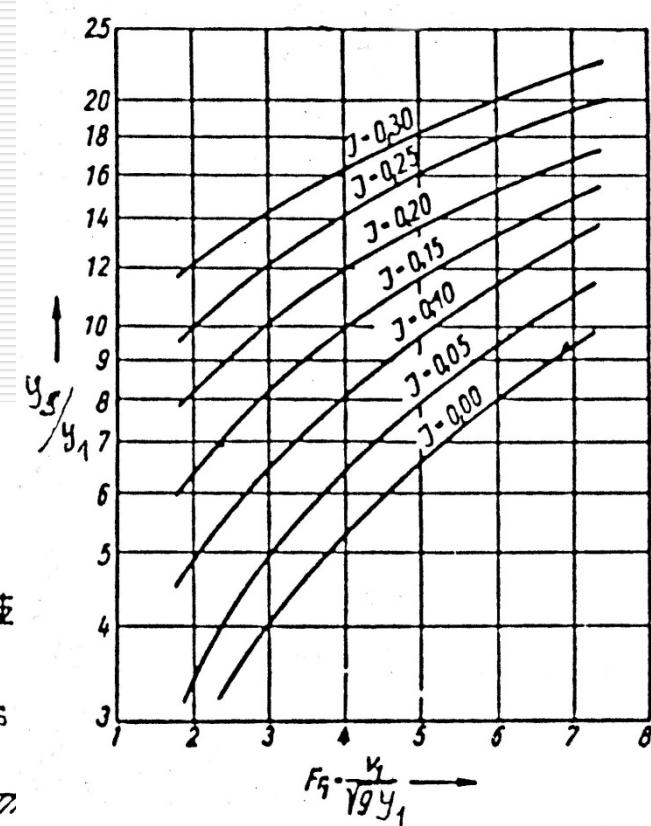
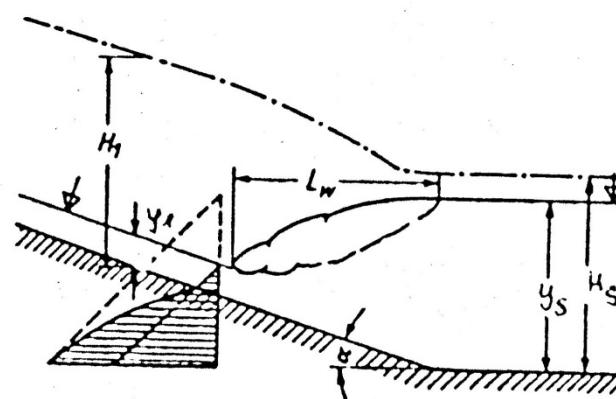
Podslapje – nagnjeno dno

Enačba vodnega skoka se glasi:

$$y_2 = y_1 \left\{ \left(\frac{8 Fr_1^2 \cos \alpha^2}{1 - \varphi \tan \alpha} + 1 \right)^{1/2} - 1 \right\} / (2 \cos \alpha)$$

Koeficient $\varphi = \varphi (Fr_1, \alpha)$ je določimo eksperimentalno. Pri enakem **Fr₁** je razmerje **y₂/y₁**

tem višje, čim večji je naklon dna **I** ($I = \sin \alpha$). Vpliv globine spodnje vode **y_s** na vodni skok je mogoče omejiti in preprečiti njegovo zalitje z ustreznim naklonom dna.



Podslapje – nagnjeno dno

1) staro podslapje – ravno dno

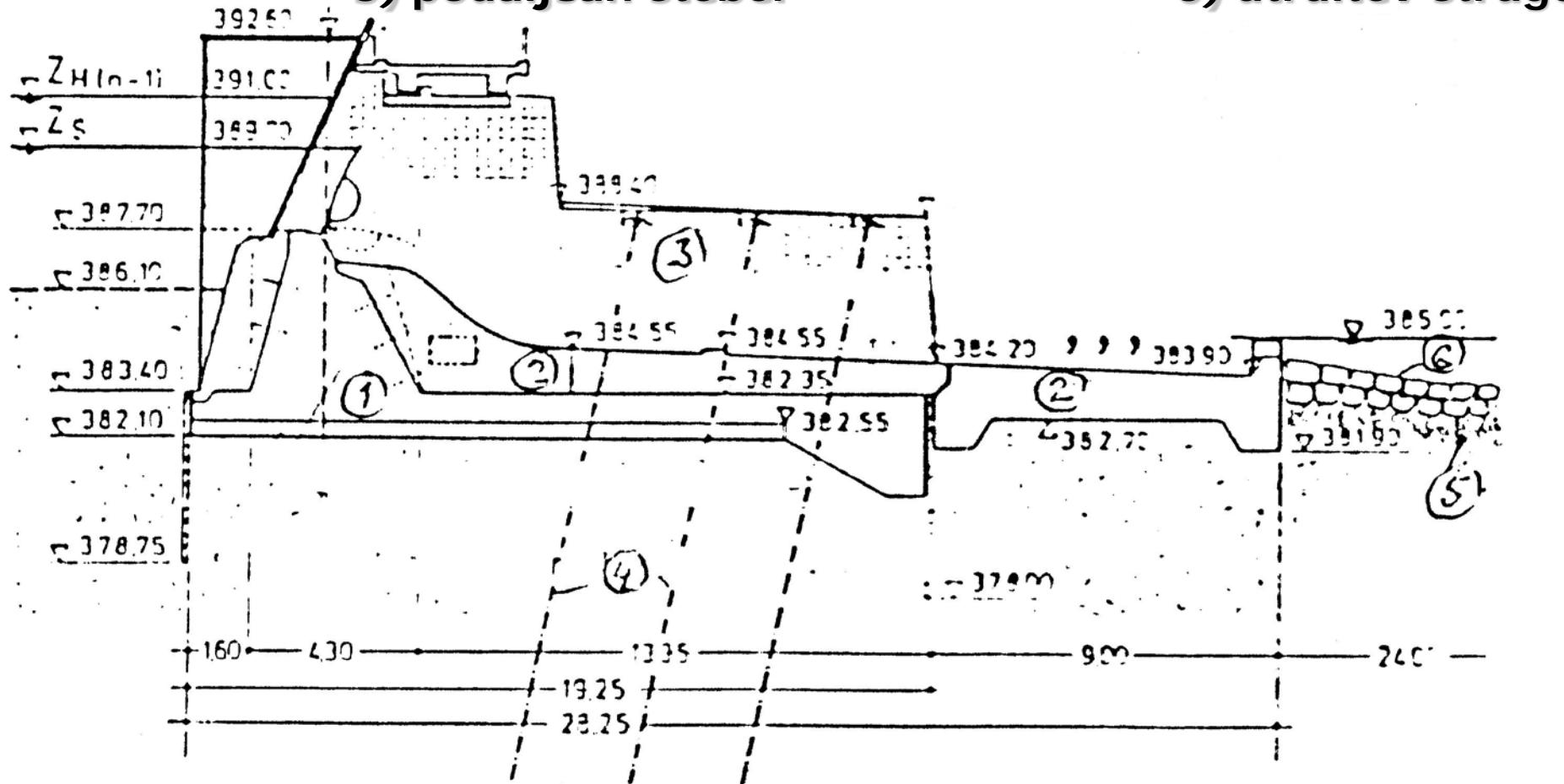
2) novo podslapje – nagnjeno dno

3) podaljšan steber

4) sidra

5) filter

6) utrditev struge

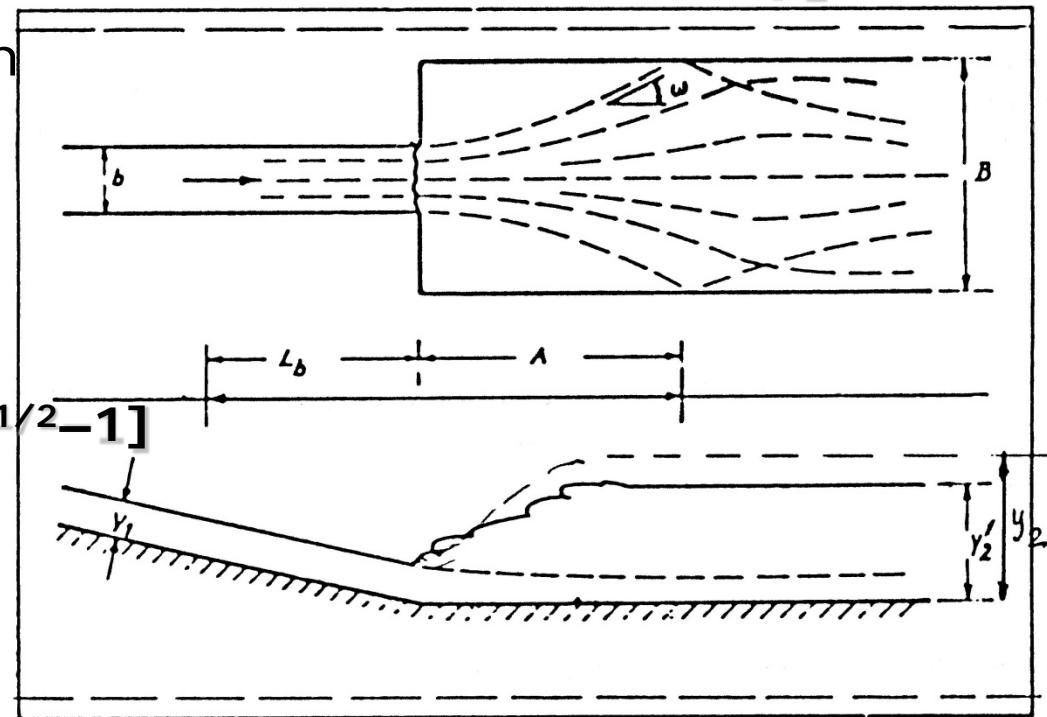


Podslapje – razširjeno podslapje

Prostorski vodni skok se oblikuje v podslapju, čigar širina pred vodnim skokom **b** je manjša od širine za vodnim skokom **B**. Na podlagi teoretičnih in eksperimentalnih raziskav je ugotovljeno, da je globina y_2' v razširjenem podslapju manjša od globine y_2 pri ravninskem vodnem skoku in je razmerje y_2'/y_2 sorazmerno $(b/B)^{1/2}$.

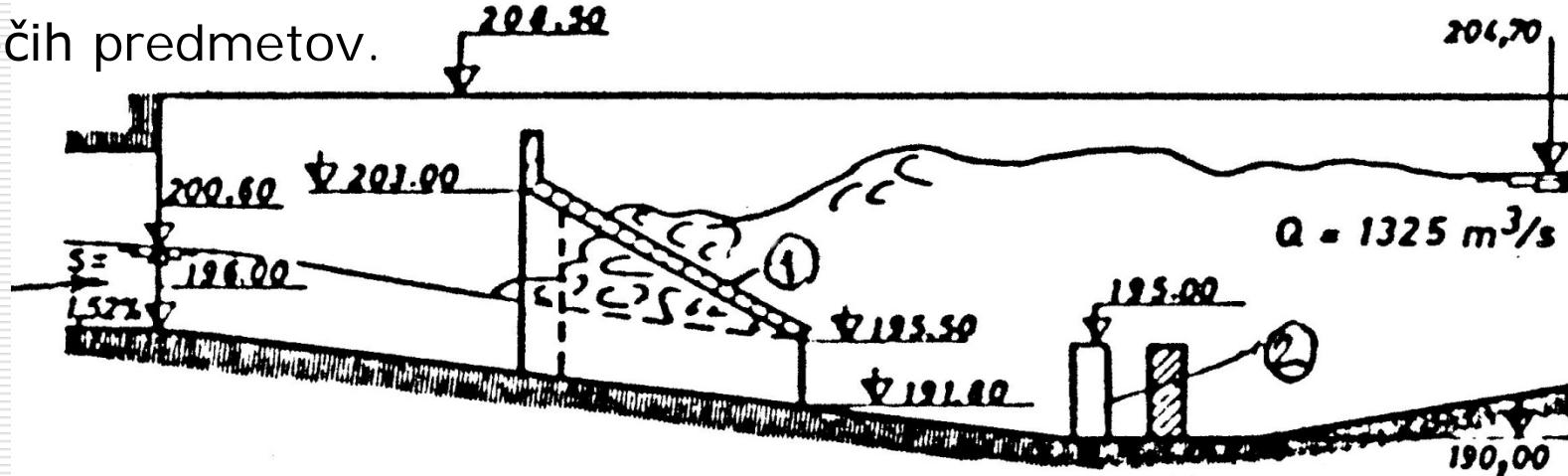
$$y_2' = 0,5y_1(b/B)^{1/2}[(1+8Fr_1^{-2})^{1/2}-1]$$

$$b/B \geq 0,33; Fr_1 = v_1 / (g y_1)^{1/2}$$



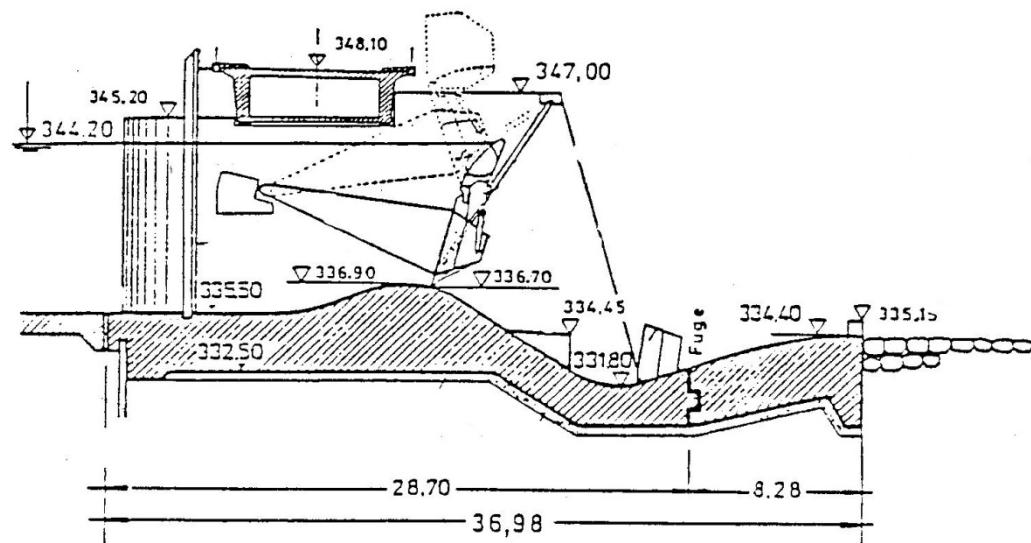
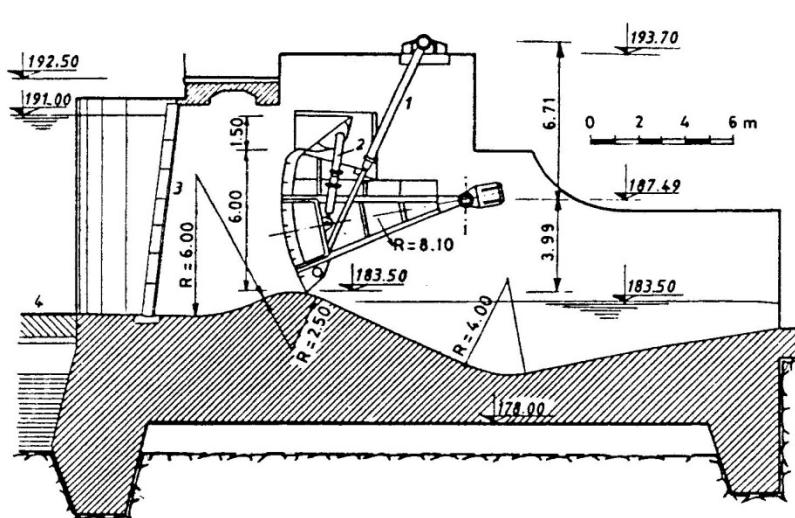
Podslapje – razširjeno podslapje

Vodni skok v razširjenem podslapju, zlasti nesomernem, je nestabilen. Stabilizirati ga je mogoče z ustreznimi disipacijskimi zgradbami. **Poševna stena**, pravokotna na vodni tok (1) in **dvojna vrsta zob** v šahovski razvrstitvi (2) omogočata enakomerno in stabilno razširitev vodnega toka po vsej širini podslapja. Pri taki ureditvi je potrebno modelno preveriti hidrodinamične obremenitve na poševno steno in odpraviti možnosti zatikanja lesa, ledu idr. plavajočih predmetov.



Podslapje – kadunjasto podslapje

- Glede na podslapja z vodoravnim dnom in visokim zaključnim pragom je **kadunjasto podslapje** hidravlično ustrezejša alternativa.



Podslapje – kadunjasto podslapje

- Dejanska *globina kadunje* pri hidrodinamičnem ravnovesju je sicer nekoliko večja od teoretične globine, določene po impulznem stavku, do *40 %* pa je *krajše podslapje* glede na konvencionalna podslapja z vodoravnim dnom. Večja globina kadunje izboljša hidravlično učinkovitost vodnega skoka.
- Ker je oblikovano dno podslapja za kadunjo v blagem *protinaklonu*, je vodni tok na koncu podslapja usmerjen rahlo navzgor in razbremenjuje dno struge za podslapjem.

Podslapje – kadunjasto podslapje

- Glede na podslapje z vodoravnim dnom, zlasti z visokim nenazobčanim zaključnim pragom, je *hitrostni profil* na koncu kadunjastega podslapja *bolj izenačen*; hitrosti vodnega toka ob dnu so manjše in manjši so tudi erozijski tolmuni ter valovanje vodne gladine za podslapjem.
- Tudi v kadunjastem podslapju so potrebni zobje, vendar v manjšem številu in samo eni vrsti, ter usmerniki in morebiti nizek nazobčan zaključni prag pri nizkih Fr_1 številih in zatem vodnem skoku.

Podslapje – kadunjasto podslapje

- Kadunjasta podslapja pomenijo korak naprej pri optimizaciji podslapij. Hidravlične prednosti glede na podslapja z vodoravnim dnom so tolikšne, da odtehtajo pomanjkljivosti zaradi nekoliko globljega fundiranja ter večjega vzgona na prazno podslapje.
- Številne izvedbe kadunjastih podslapij pri nas (npr. na Dravskih elektrarnah) in v tujini so dokazale odločilno hidravlično prednost pred podslapji z vodoravnim dnom in visokim zaključnim pragom.

Podslapje – zavarovanje struge

Pri $\text{Fr}_1 < 4$ obstaja na koncu podslapja še del nepretvorjene kinetične energije in makroturbulanca, zlasti pri: *zalitem vodnem skoku* v podslapju, *pomanjkljivo dimenzioniranem* podslapju ter delnem ali popolnem *zastajanju proda* pred zajezitveno zgradbo. Dno in bregovi vodotoka za podslapjem so potem takem izpostavljeni *erozijskemu procesu*, ki končno lahko ogrozi tudi zajezitveno zgradbo in podslapje.

Podslapje – zavarovanje struge

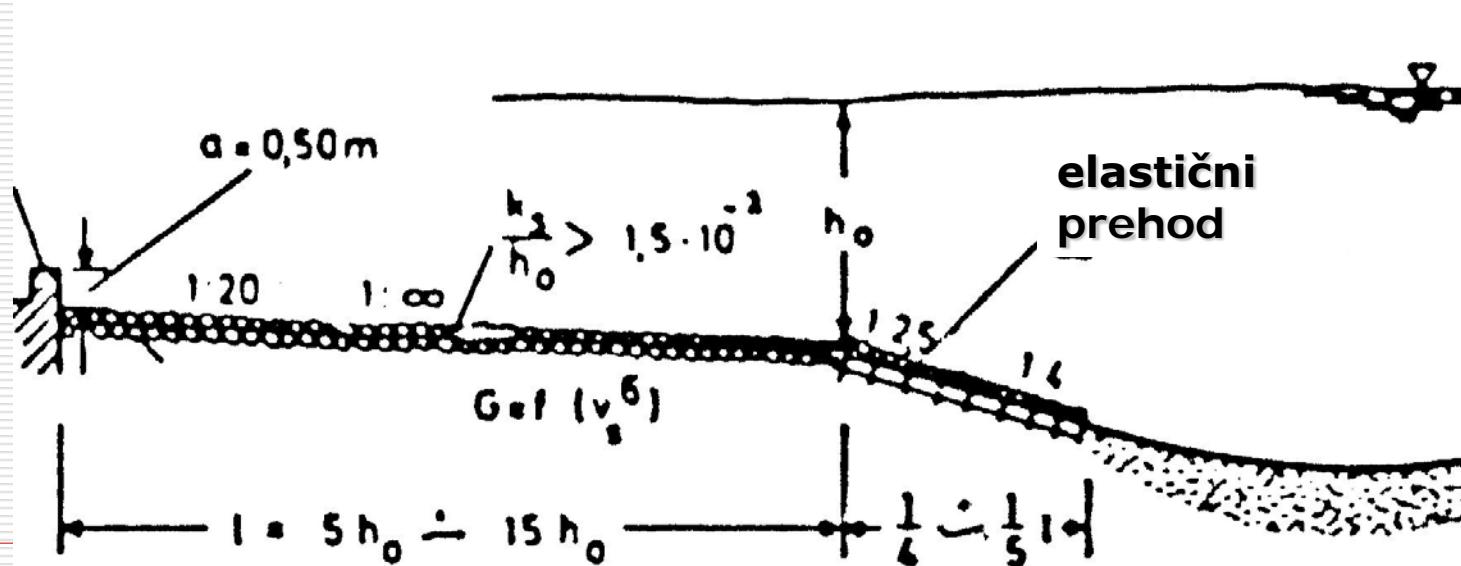
Vprašanja v zvezi z optimalnim zavarovanjem oz. utrditvijo rečne struge za podslapjem pred erozijo se nanašajo predvsem na:

- dolžino in obliko utrditve
- vpliv hrapavosti in velikosti elementov utrditve na vodni tok
- prehod utrjenega dela dna na naravno rečno dno

Zanesljiv odgovor omogočajo samo hidravlične modelne raziskave, zlasti pri prostorskem toku in oblikovanju sekundarnih makrovrtincev za podslapjem.

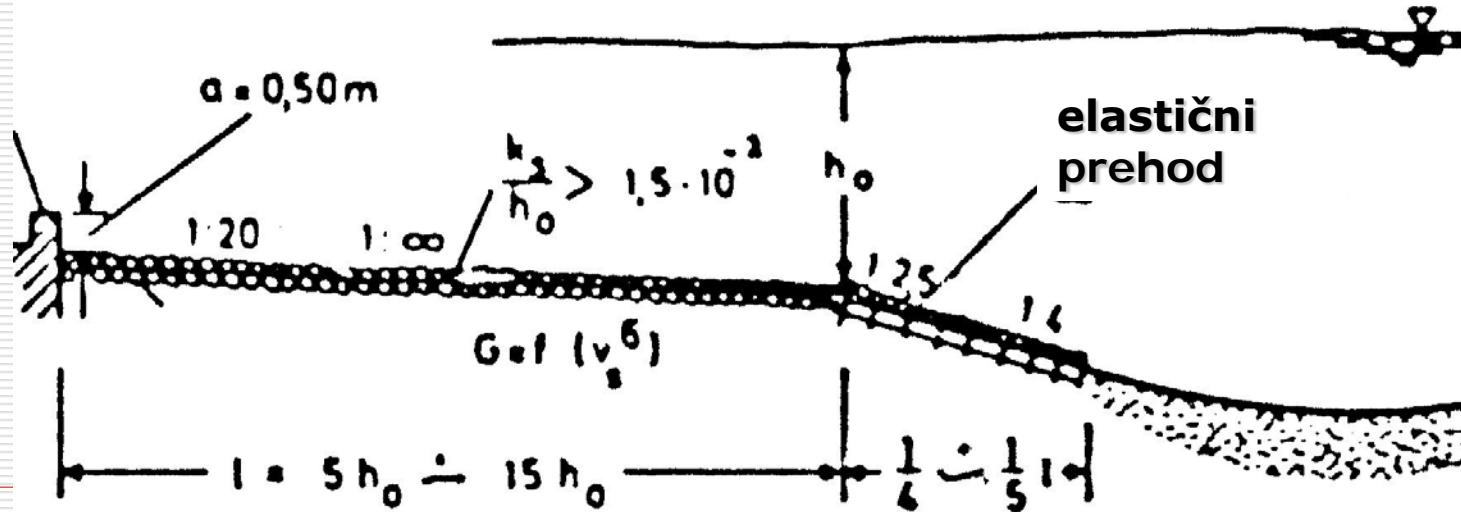
Podslapje – zavarovanje struge

- Utrditev naj bo speljana premočrtno in v čim blažjem naklonu (naklon naj ne presega 1:20). Na strmejših naklonih se vodni tok odlepi; oblikujejo se vrtinčni tokovi, ki pospešujejo erozijo.
- Povprečna dolžina utrditve v naravi znaša $5 h_o \div 15 h_o$.
- Zgornji rob utrditve naj sega nižje od krone zaključnega praga podslapja, vendar ne več kot 0,5 m.



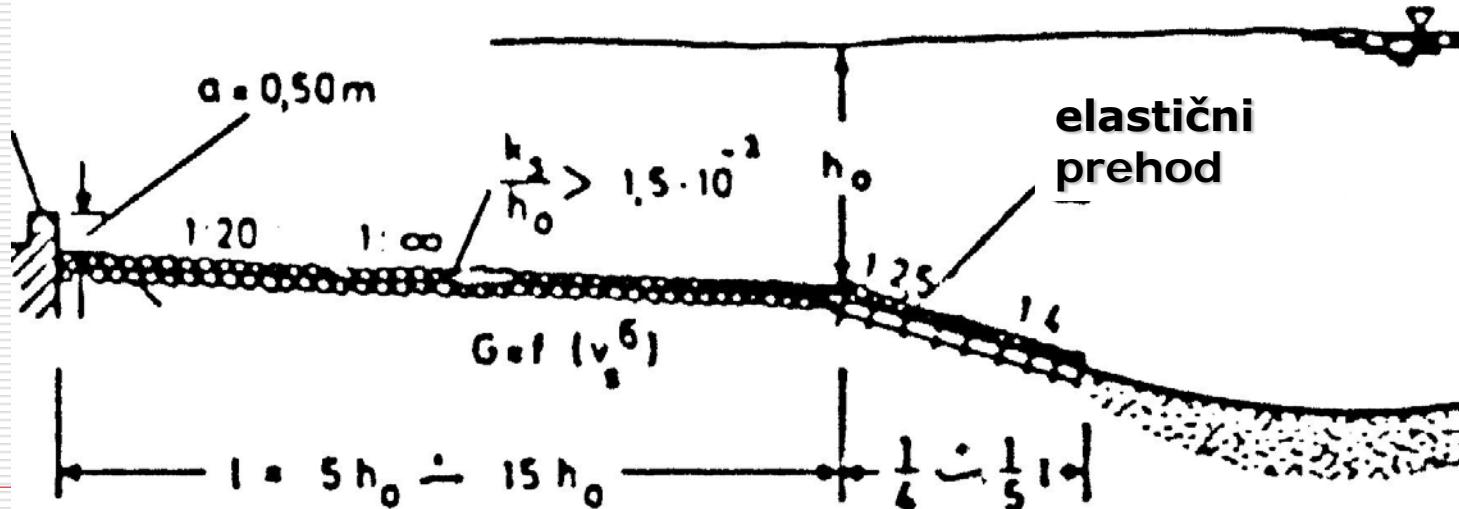
Podslapje – zavarovanje struge

- Relativna hrapavost utrditve, bodisi s skalometom ali z zloženimi kamnitimi bloki, naj ima razmerje k_s/h_o , ki ni večje od $1,5 \cdot 10^{-2}$. Kadunjasto oblikovanje in utrjevanje erozijskega tolmuna se ne obnese; na krivočrtinem hrbtnu tolmuna se oblikujejo vrtinci zaradi odlepjanja vodnega toka, ki se nato prenašajo dolvodno.



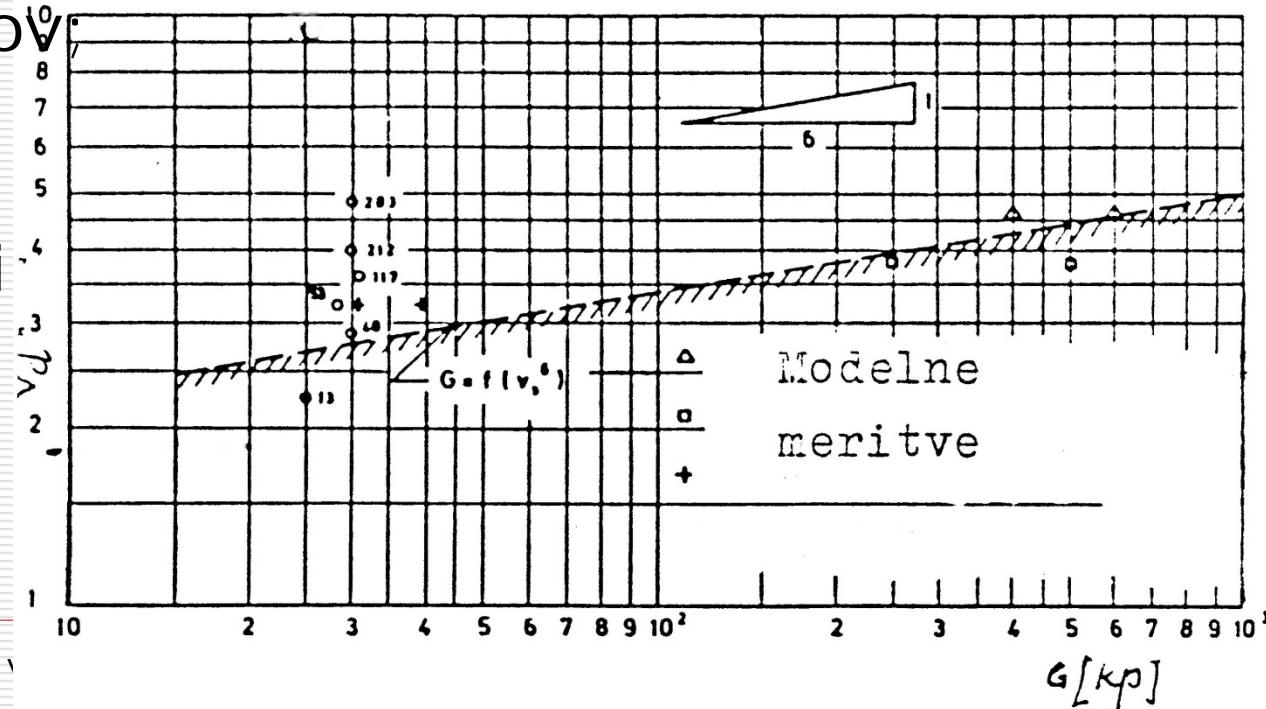
Podslapje – zavarovanje struge

- Konec utrditve naj ne bo zaključen togo z zagatno steno, temveč elastično povezan z naravnim rečnim dnom. Pomemben je dovolj **elastičen prehod** med sorazmerno togo utrditvijo in normalnim, zlasti drobnozrnatim dnom vodotoka, izveden npr. z elastično povezanimi žičnimi košarami, polnjenimi z debelim prodom ali drobljencem ipd.
- Dolžina elastičnega prehoda naj bo **0,2 I ÷ 0,25 I**.



Podslapje – zavarovanje struge

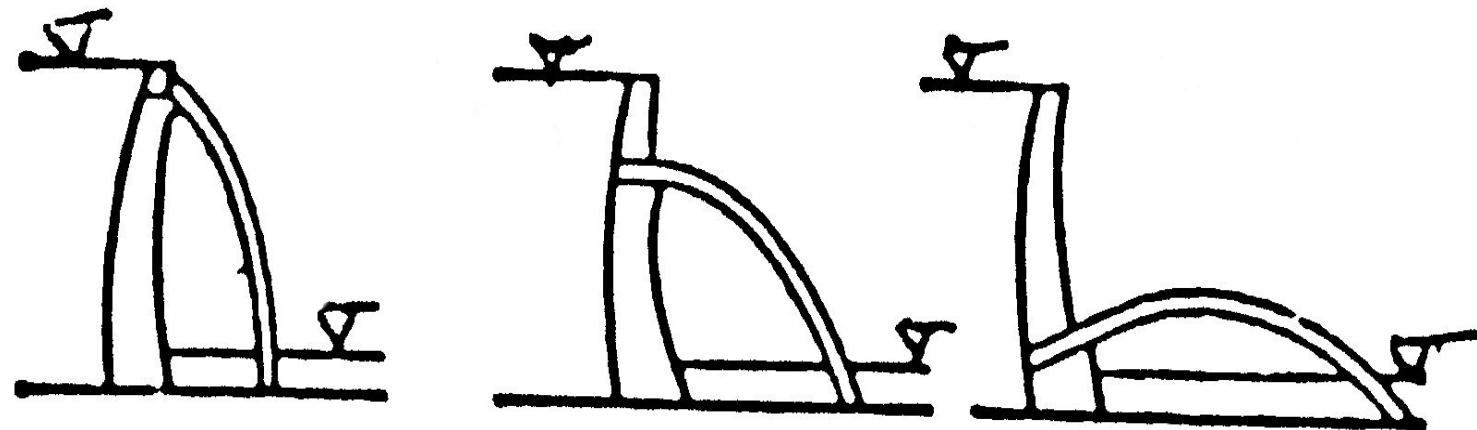
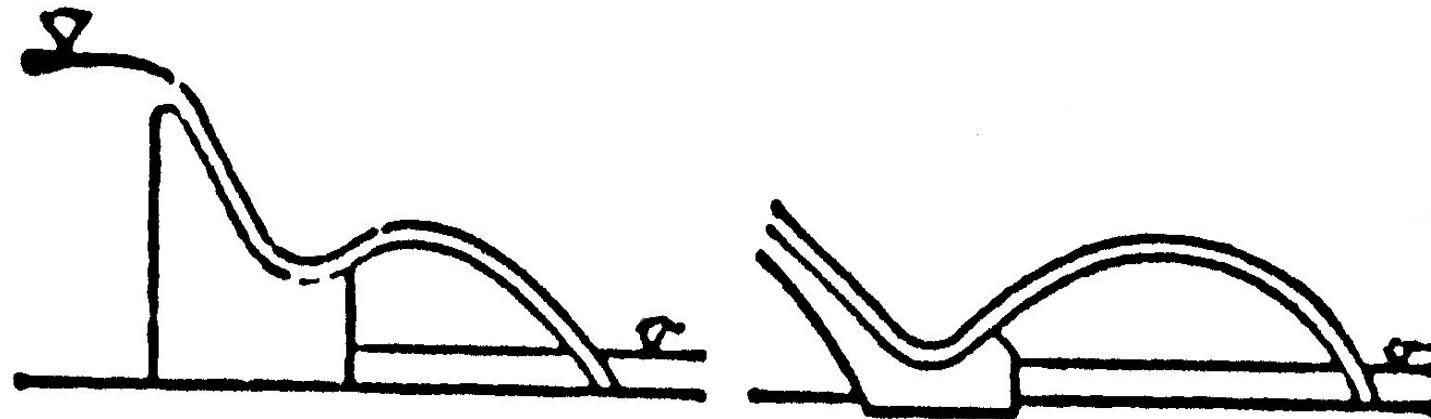
- Globina erozijskega tolmuna je močno odvisna od hitrosti vodnega toka ob dnu v_d in zrnavostne sestave rečnega dna.
 - Stabilnost utrditve je odvisna od teže G nasutih ali zloženih kamnov
- $G = f(v_d^6)$
- že pri normalni
turbulenci



Odskočne rampe

Pri $Fr_1 \geq 9$ (prim. preliv na visokih pregradah), so hitrosti vodnega toka tolikšne, da so navadna podslapja neprimerna za pretvorbo kinetične energije. V takih primerih preliv ne sega do podslapja. Na konkavno oblikovanem *odskočnem nosu* ali *rampi* na koncu prelivnega hrbta vodni tok *odskoči* in v loku pada v *umirjevalni bazen* dolvodno od pregrade. Pri tem se pretvori del njegove kinetične energije zaradi trenja z zrakom.

Odskočne rampe



Odskočne rampe - oblikovanje

- **Odskočne rampe** izvajamo tam, kjer je zadosti nosilna temeljna hribina za izvedbo umirjevalnega tolmuna, brez večjih potrebnih del za izvedbo disipacijskih objektov.
- Uporabne so v ozkih dolinah, pri objezovni elektrarni, ko je preliv izведен z rampo preko strojnice.
- Odskok vodnega toka je toliko oddaljen od pregrade, da ni vplivov na temelje.

Odskočne rampe - oblikovanje

- Pri zasnovi umirjevalnih tolmunov je treba upoštevati nosilnost temeljnih tal, da ne prišlo do spodkopavanja temeljev pregrade,
- V zimskem času obstaja nevarnost poledenitve vodnega prša, kar bi lahko povzročilo poškodbe na objektih dolvodno.

Odskočne rampe - oblikovanje

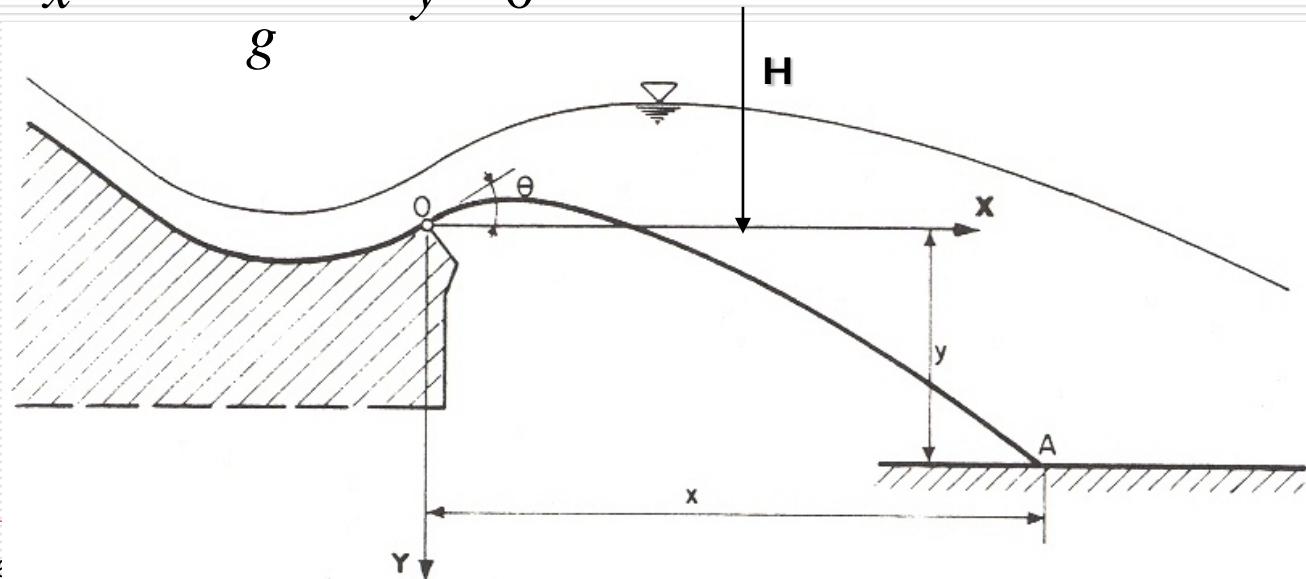
Pri računu vodnega odskoka je treba opredeliti:

- kot odskoka **a**
- dolžino **x** in višino **y** odskoka

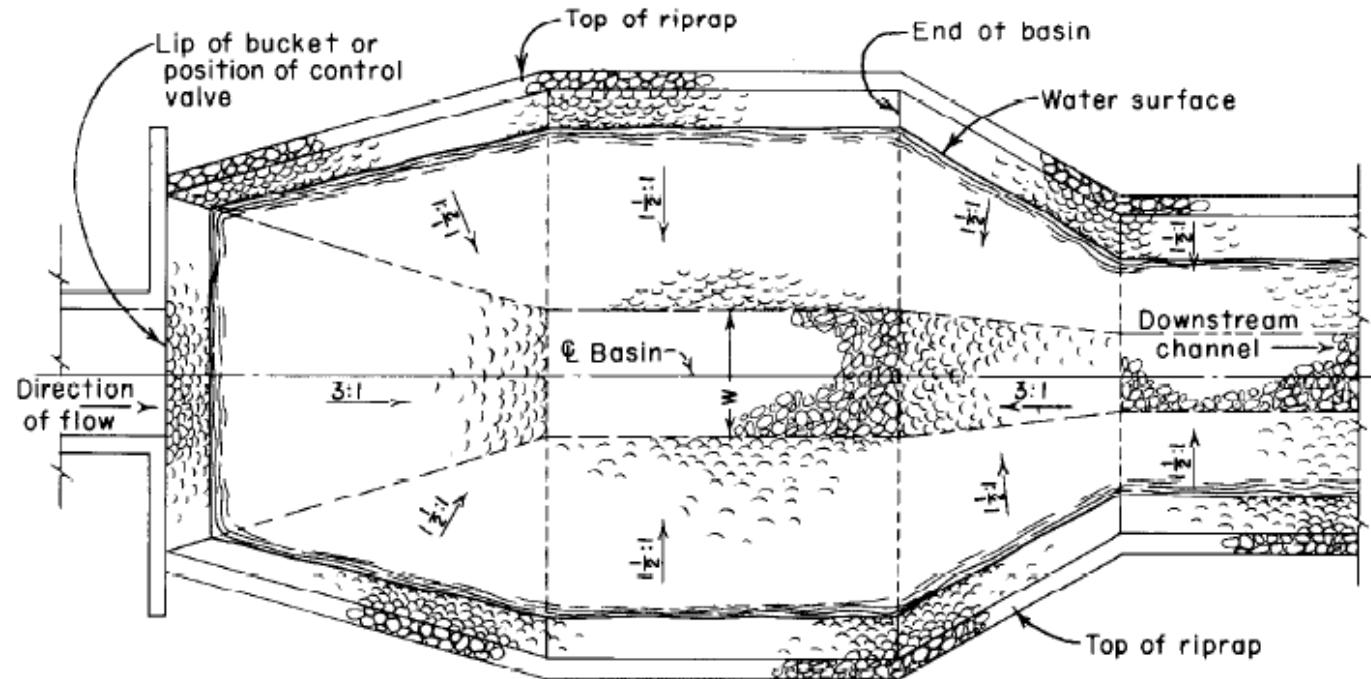
$$x^2 - \frac{2v^2 \sin \alpha \cos \alpha}{g} x - \frac{2v^2 \cos^2 \alpha}{g} y = 0$$

$$v = \varphi \sqrt{2gH}$$

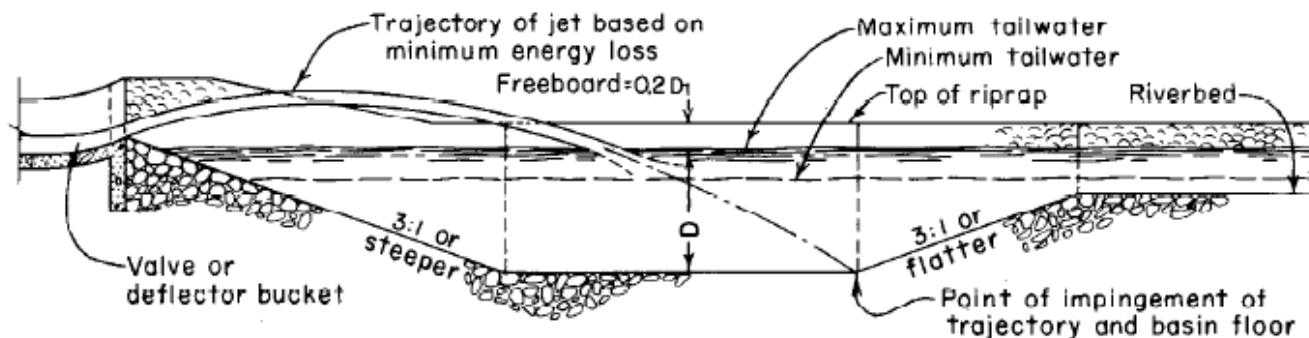
$$\varphi = 0,86 \div 0,92$$



Odskočne rampe – umirjevalni tolmu



PLAN



ELEVATION

Hrapave drče

- **Hrapave drče** se uporabljajo na manjših vodotokih za zmanjšanje ali vzdrževanje hidravličnega padca vodotoka (npr. zaradi preprečevanja talne in stranske erozije).
- Pri $Fr_1 < 2,5 \sim 3$ *nizki jezovi* ali *pragovi* zaradi nezadostne disipacije energije niso vselej ustrezna hidravlična rešitev.
- Ob tem predstavljajo jezovi oviro za migracije vodnih organizmov ter slabšo vključenost v okolje.

Hrapave drče

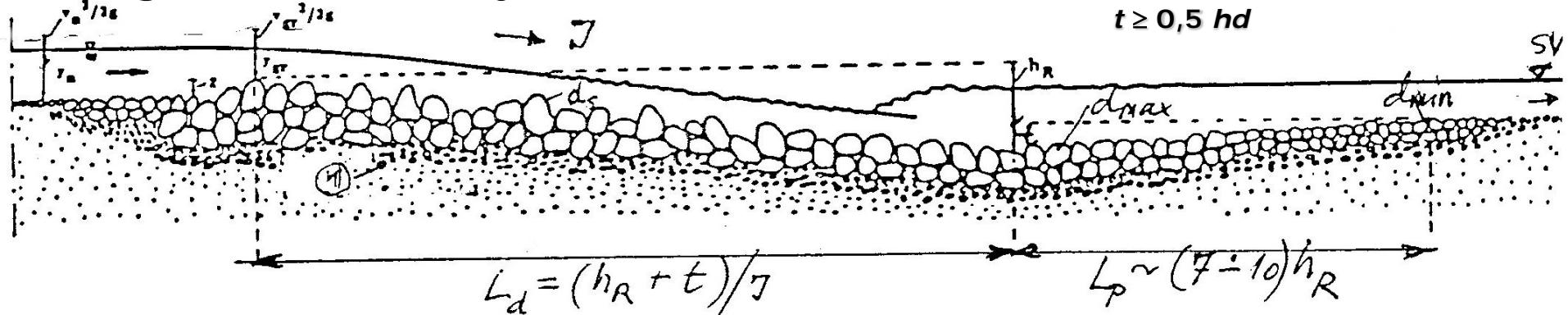
Zgradbe so kamnite. Po načinu izvedbe ločimo:

- ***nasute drče***
- ***zložene drče***

Višina drče naj praviloma **h_r** ne presega $2 \div 2,5 \text{ m}$, naklon drče **J** pa je $1:8$ ali manj.

Hrapave drče – nasute drče

- **Nasuta drča** se izvaja z ročnim ali strojnim polaganjem kamnov v več plasteh na dno struge. Dno mora biti zavarovano s *filtrom*, zlasti če je drobnozrnate sestave. Vrhnjo plast sestavlja največji kamni.
- Nasuta drča je elastična zgradba in prevzema obremenitve zaradi vodnega toka s težo kamnov. Kamni se posedajo in hrapavost drče se s časoma zmanjšuje. Vzrok porušitve drče je v večini primerov regresivna erozija.



Hrapave drče – nasute drče

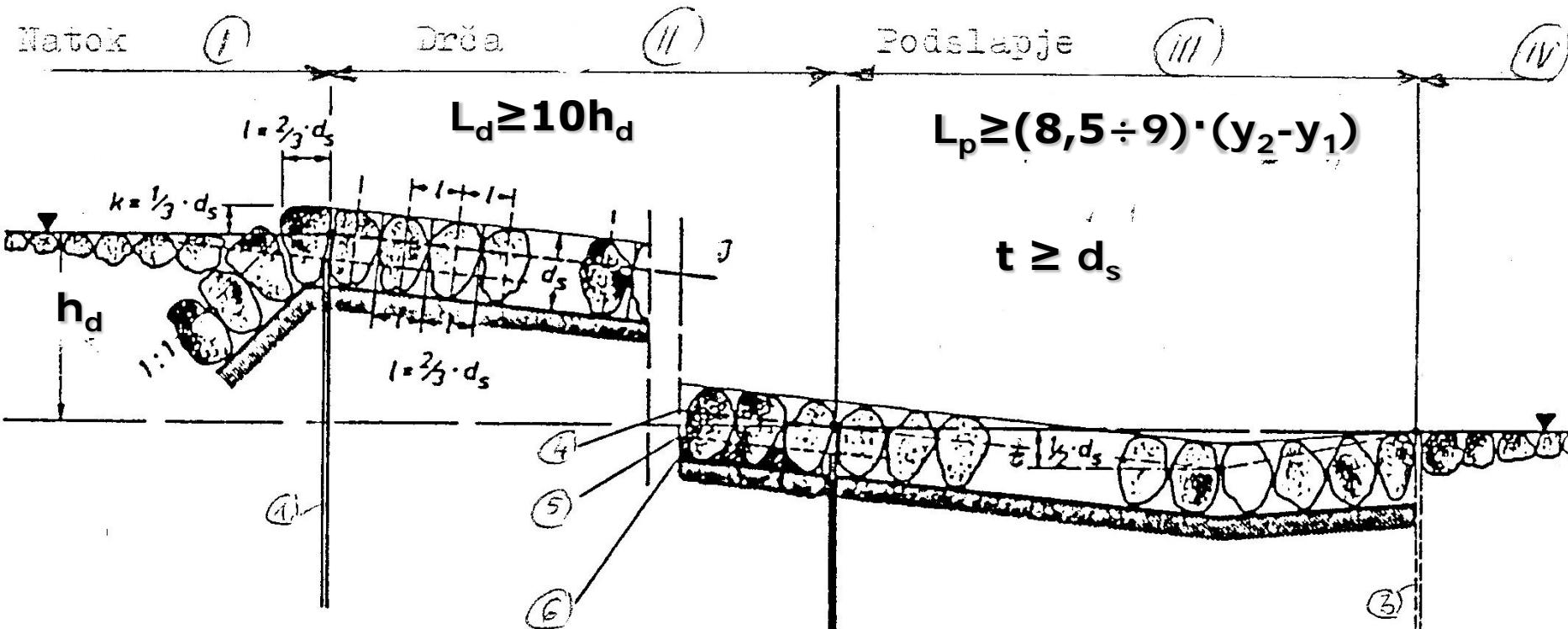
- Na dolvodnem in gorvodnem koncu drče je zavarovanje z *jeklenimi* ali *lesenimi piloti*, pri čemer pa mora biti razmik med piloti manjši od najmanjših kamnov.
- Prečni prerez drče mora biti *kadunjasto* oblikovan. Naklon stranic naj ne bo manjši od *1:1,5*. Pri takem prečnem prerezu je usmerjen vodni tok po sredinskem delu drče in je omogočena migracija vodnih organizmov tudi pri malih pretokih.
- Ob straneh mora biti drča ustrezno povezana z bregovi ali ojačena s kamnometom.

Hrapave drče – zložene drče

- **Zložena drča** se izvaja s polaganjem kamnov, ročno ali z bagrom, v eni plasti na dno struge, zavarovano s *filtrom*.
- Gradnja poteka od dolvodnega konca proti gorvodnemu koncu drče. Kamne postavljamo navpično, tesno drug ob drugega na prodnato podlago.
- Zelo ugodno hrapavost in disipacijo energije je mogoče doseči s profiliranimi kamni na betonski podlagi, kjer je tak način utrditve ekološko doposten.

Hrapave drče – zložene drče

- Dolvodni in gorvodni konec drče sta praviloma zavarovana z *zagatnicami* ali gosto zaveso *ječlenih* ali *lesenih pilotov*. Pri dolgih drčah so priporočljive vmesne ojačitve s piloti na vsakih 15 m.



Hrapave drče – primerjava

- Zložene drče so toge konstrukcije in so v primerjavi z nasutimi *bolj odporne* na obremenitve z vodnim tokom.
- Zložene drče omogočajo večjo in obstojnejšo *hrapavost* od nasutih drč.
- Morebitni premiki posameznih kamnov lahko povzročijo rušenje celotne drče. *Solidnost gradnje* je potem takem odločilnega pomena za stabilnost zloženih drč.
- Za gradnjo drč uporabljamо kamne odporne proti *obrusu* in *mrazu* (npr. granit).

Hrapave drče – oblikovanje

Pod dolvodnim delom drče je treba utrditi in poglobiti dno struge. Minimalna dolžina utrjenega dela znaša pri:

- zloženih drčah: $L \geq (8,5 \div 9) \cdot (y_2 - y_1)$; $t \geq d_s$
- nasutih drčah: $L \geq (7 \div 10) \cdot h_d$; $t \geq 0,5 \cdot h_d$

y_1, y_2 ... konjugirani globini

h_d ... višina nasute drče

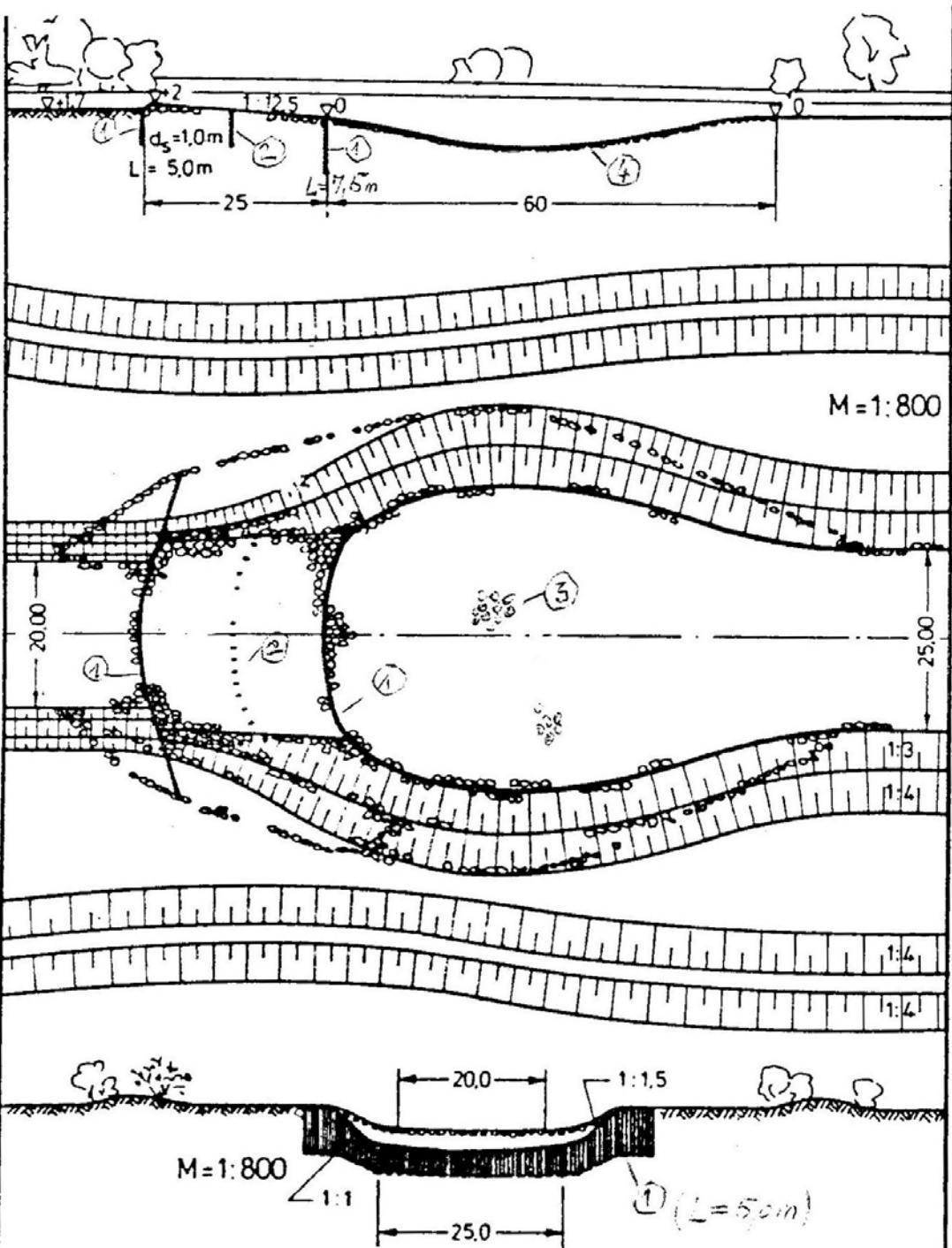
d_s ... višina kamna pri zloženi drči

t ... globina podslapja

Dolžina podslapja je odvisna od dolžine (padca) drče: daljša (položnejša) drča ima kratko podslapje in obratno. Za položnejše drče so potrebni manjši kamni in je zato preskrba s kamni enostavnejša in cnejša.

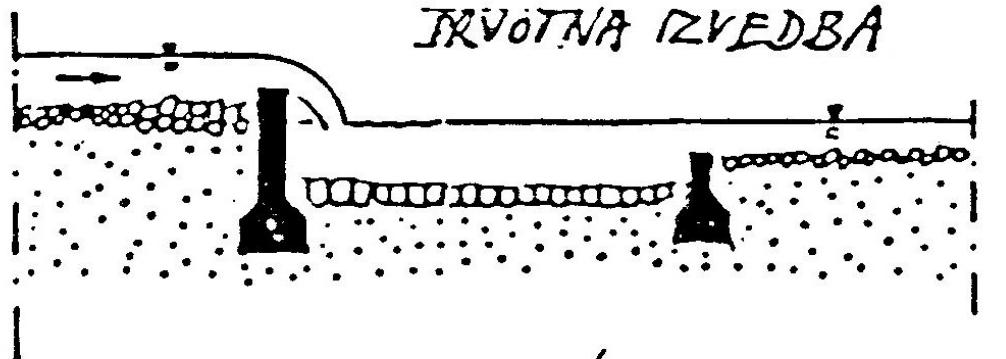
Hrapave drče – primer I.

- Sorazmerno kratka zložena drča dolžine 25 m z dolgim sonaravno oblikovanim (razširjenim na 25 m) podslapjem **3** dolžine 60 m na reki Vils na Bavarskem.
- Prečni prerez drče je kadunjasto oblikovan **4**. Drča je ojačana na začetku in koncu z zagatnicama **1** dolžine 5 m zgoraj in 7,5 m spodaj, v sredini pa s piloti **2** premera 1 m.
- Z bregovi je drča povezana s kamnometom.

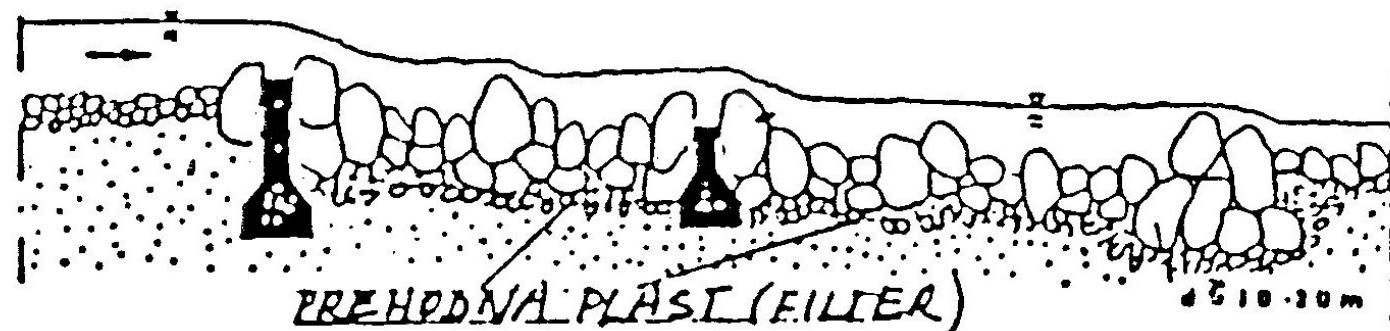


Hrapave drče –primer II.

- Nasuta drča na filternem sloju kot izboljšana izvedba utrditve dna struge, kjer pragove ohranimo.



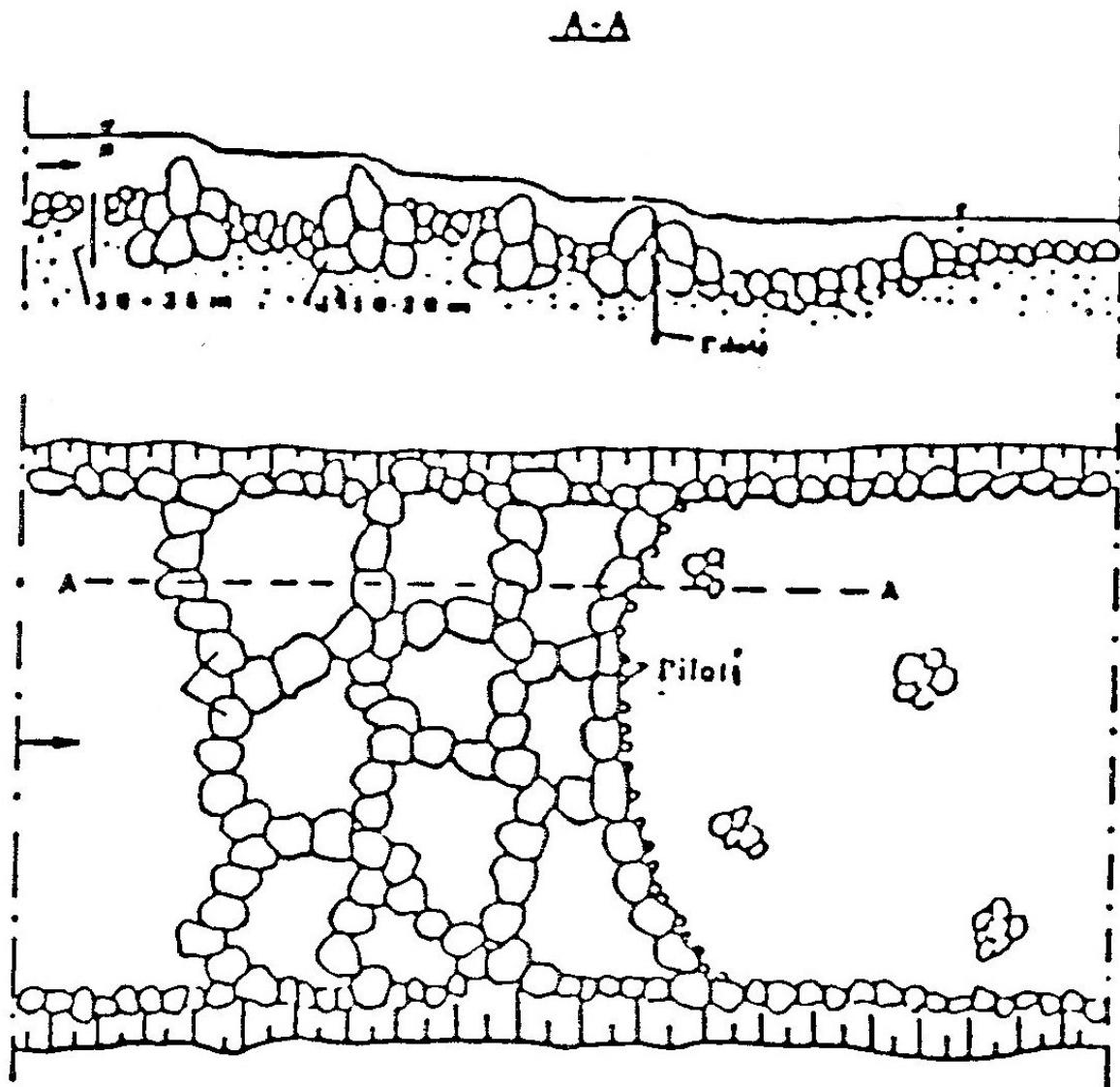
IZBOLJŠANA IZVEDBA



PREHODNA PLASTI (FILTER)

Hrapave drče –primer III.

■ Nasuta drča,
izvedena kot
kaskadna
zgradba iz
vencev
grobejšega
kamna, spodaj
podprta s piloti.



Hrapave drče - prednosti

Prednosti :

- Hrapave drče se dobro vključujejo v naravo (sonaravne zgradbe).
- Makroturbulanca zaradi velike hrapavosti drče omogoča intenzivno vsrkavanje zraka v vodni tok.
- Drče omogočajo migracijo rib in drugih vodnih organizmov.

Hrapave drče - pomanjkljivosti

Pomanjkljivosti:

- Velika mešanica vode in zraka na drči lahko škoduje ribam pri dihanju.
- Velika hrapavost otežuje migracijo ribam pri malih pretokih.
- Zatikanje in zastajanje plavajočih predmetov na drčah (potrebno je vzdrževanje).

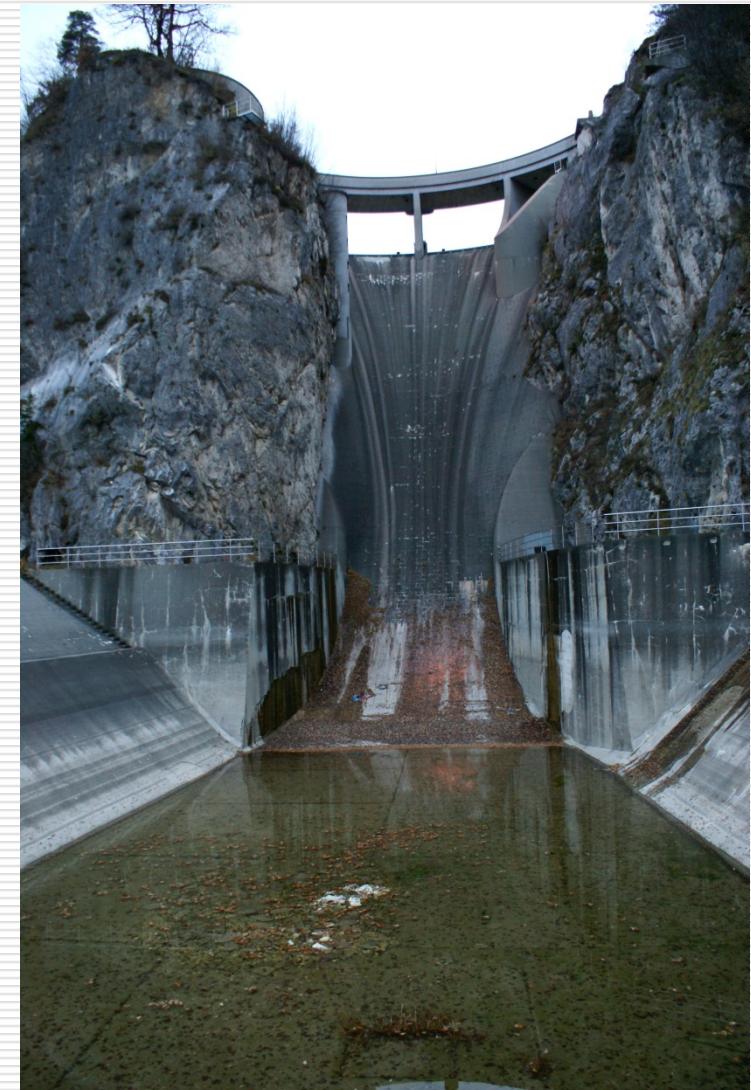
Fiksni preliv



Preliv z zapornico



Preliv na pregradi



Stranski preliv na nasuti pregradi



Prepadni preliv z odskokom



Prepadni preliv in natega

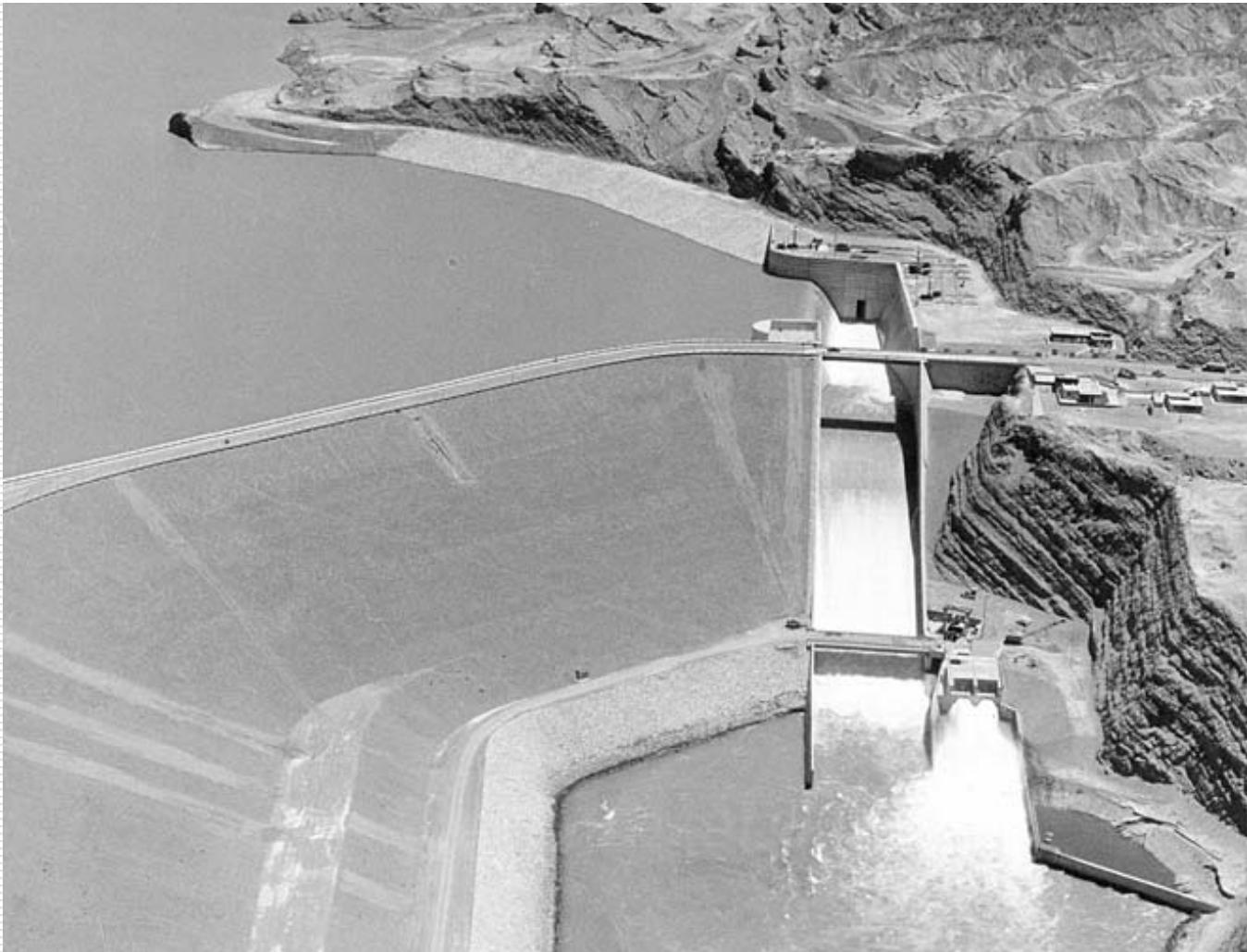


Stranski preliv



a za gr

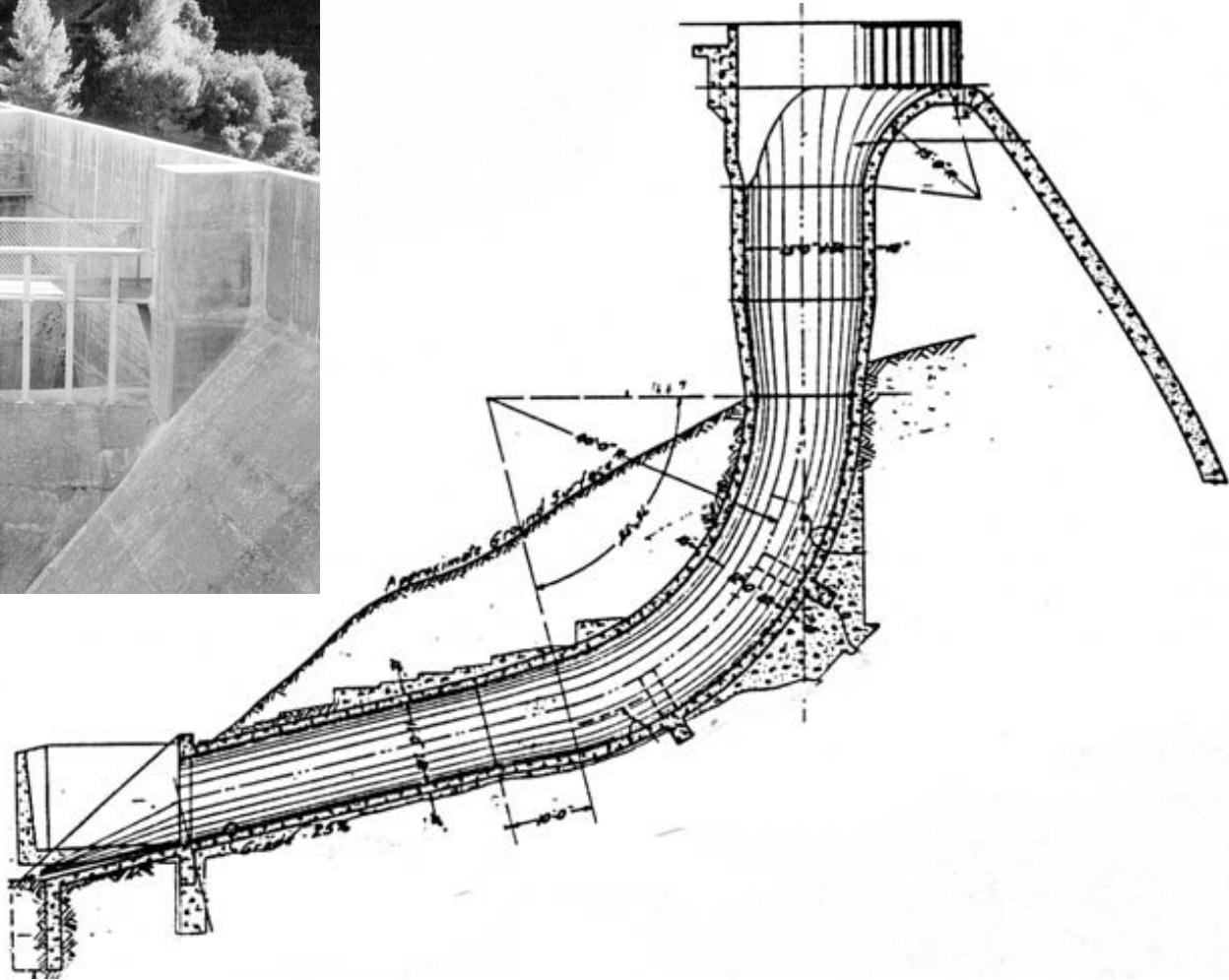
Stranski preliv



Jaškast preliv



Jaškast preliv



Labirintni preliv



Labirintni preliv – klavirske tipke



Razširjeno podslapje

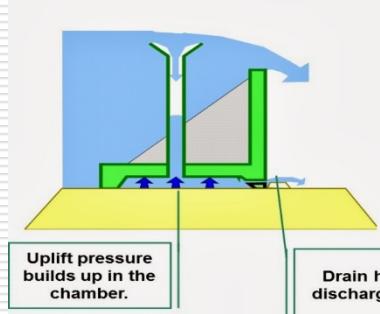
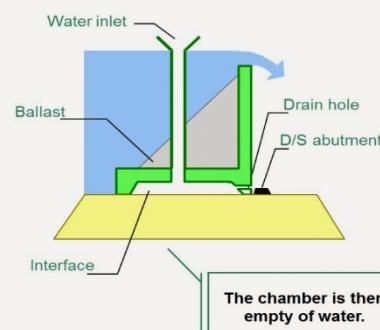


- izvedba podslapja z razširitvijo in trapezno oblikovanem dnu tolmuna
- poškodbe po prelitju vodnega skoka

- prelitje vodnega skoka iz podslapja talnega izpusta na pregradi Drtijščica



Porušne zapornice



Uplift pressure causes the Fusegate to overturn.

