

# **VPLIV MODELNEGA MERILA NA DOLOČITEV PRETOČNEGA KOEFICIENTA NA FIZIČNEM HIDRAVLIČNEM MODELU**

mag. Primož Rodič, univ. dipl. inž. grad.  
Inštitut za hidravlične raziskave

Goljevščkov spominski dan 2017

23.3.2017

---

# fizično hidravlično modeliranje

- Hidravlično modeliranje v hidrotehnikii
  - ponuja vpogled v hidravlično dogajanje in medsebojni vpliv objekta in tekočine in
  - omogoča tehnično in ekonomsko optimalno rešitev
- Fizični, matematični in hibridni modeli
- Fizični hidravlični modeli so »najboljši analogni računalnik za natančno ponazoritev kompleksnih hidravličnih pojavov« (Le Méhauté, 1990), vendar
  - trpijo za sindromom vpliva modelnega merila (ang. scale effects), ker
  - ne moremo 100% zagotoviti geometrijske, kinematične in dinamične podobnosti

# fizično hidravlično modeliranje

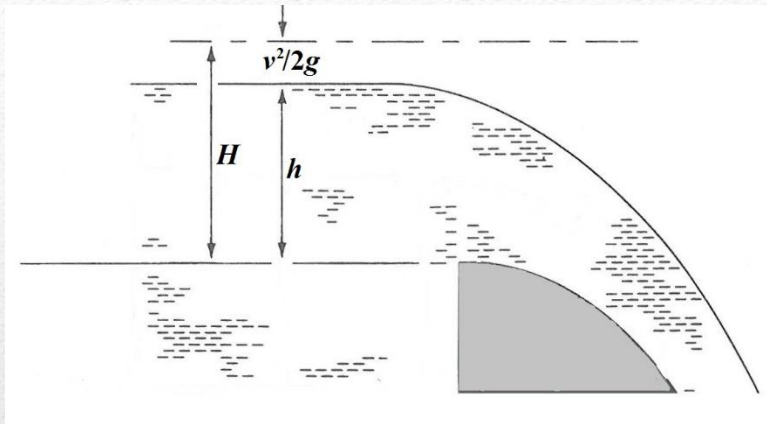
- pogoj mehanske podobnosti med modelom in prototipom

$$\lambda_{Fr} = \lambda_{Re} = \lambda_{We} = \lambda_{Ma} = \frac{\lambda_h}{\lambda_l} = \frac{\lambda_b}{\lambda_l} = \frac{\lambda_d}{\lambda_l} = \frac{\lambda_{\rho_s}}{\lambda_\rho} = 1$$

- popolno mehansko podobnost med modelom in prototipom pri upoštevanju enake tekočine dosežemo le, če je  $\lambda=1$
- v praksi se upošteva prevladujoč vpliv ene izmed sil, ki narekujejo vrsto gibanja tekočine, in zanemari ostale
- Froudova, Reynoldsova, Webrova, Machova modelna podobnost

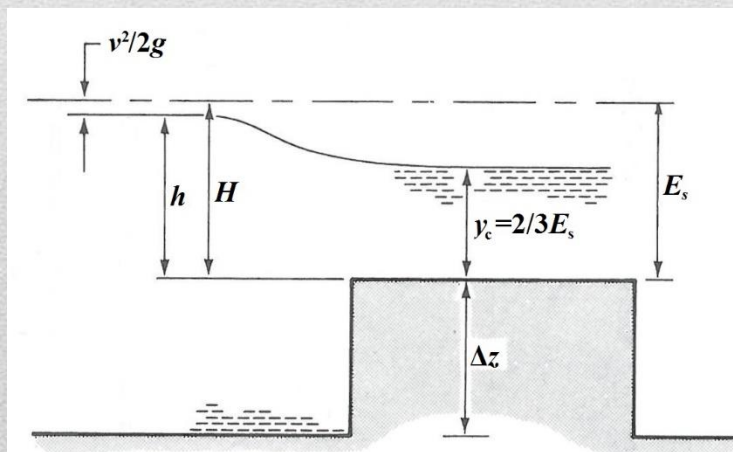
# pretočna enačba in pretočni koeficient $C_d$

- oblika pretočne enačbe pri prostem prelivanju



$$Q = C_d b \sqrt{2gH^{\frac{3}{2}}}$$

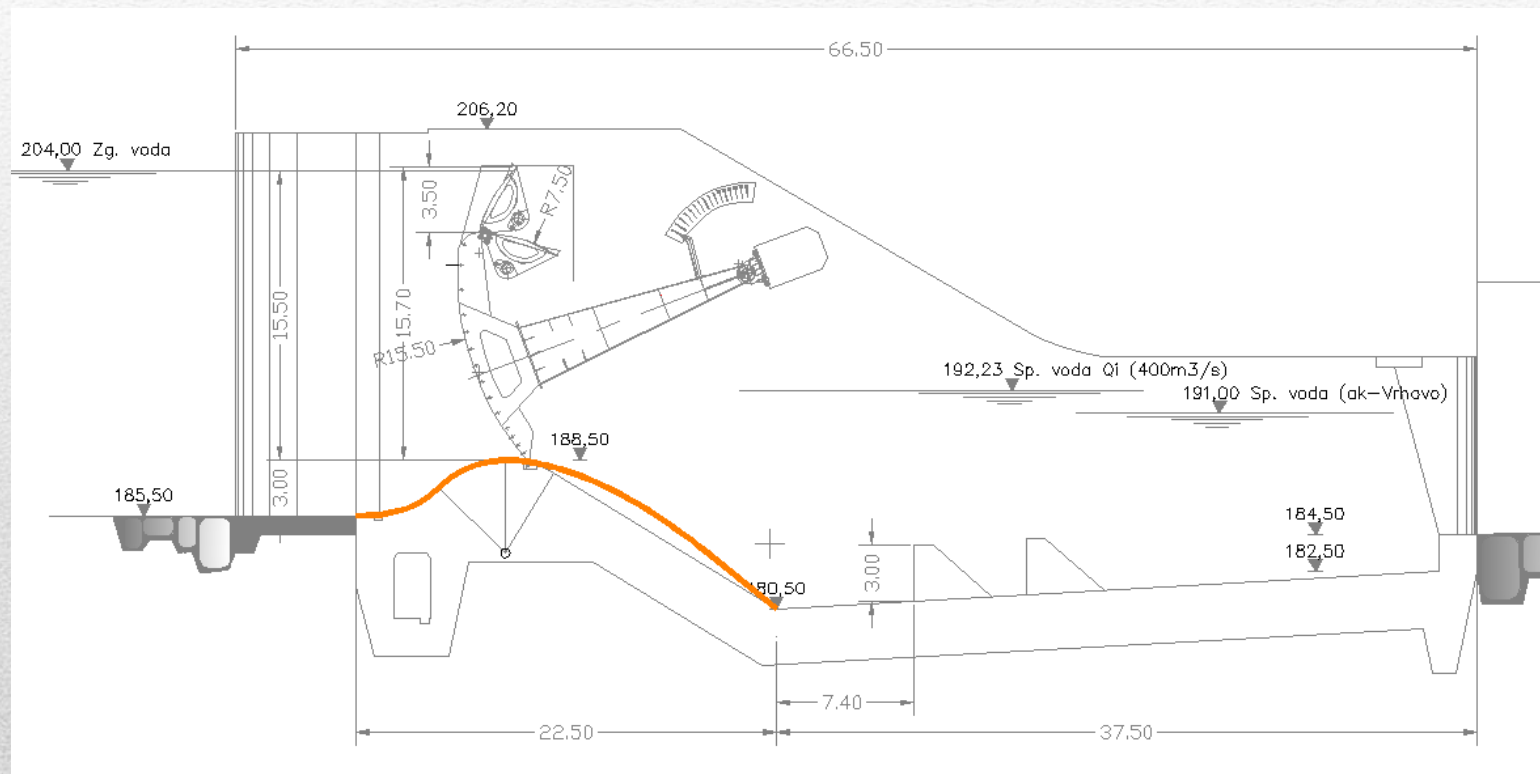
- preliv s širokim pragom, idealna tekočina



$$Q = \frac{2}{3\sqrt{3}} b \sqrt{2gH^{\frac{3}{2}}}$$
$$C_d = \frac{2}{3\sqrt{3}} = 0,385$$

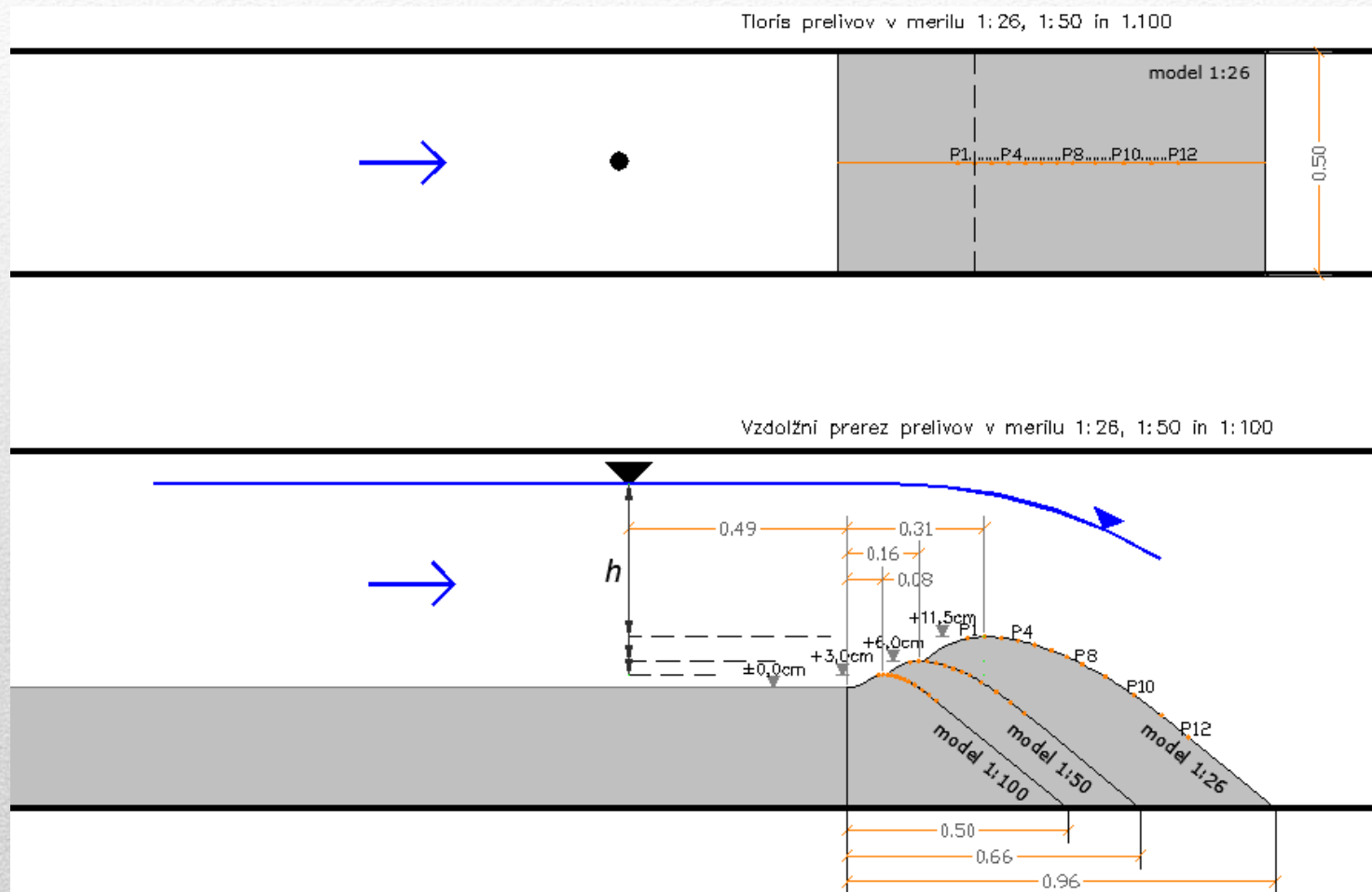
# meritve na modelu

- oblika preliva povzeta po HMR HE Suhadol (WES, U.S. Army Engineers Waterways Experimental Station)



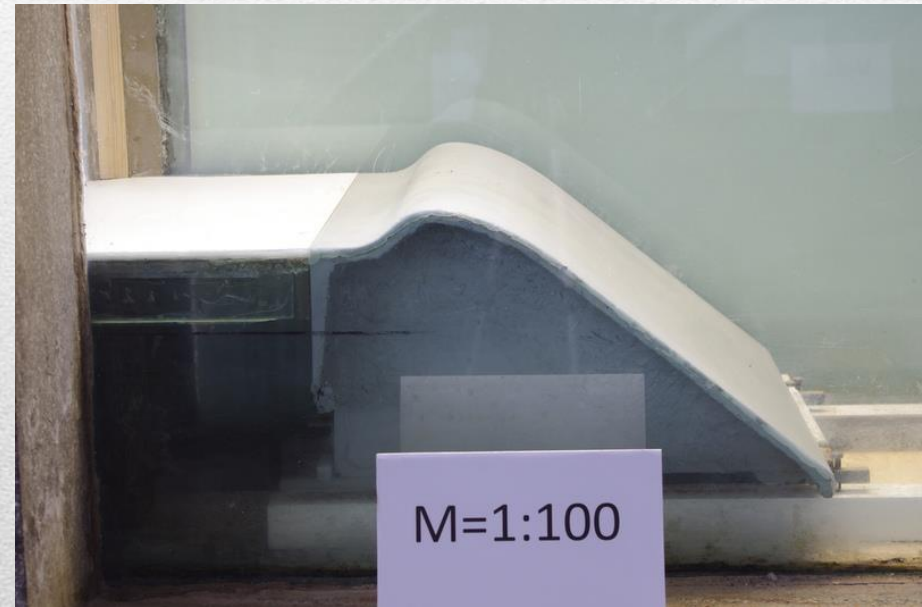
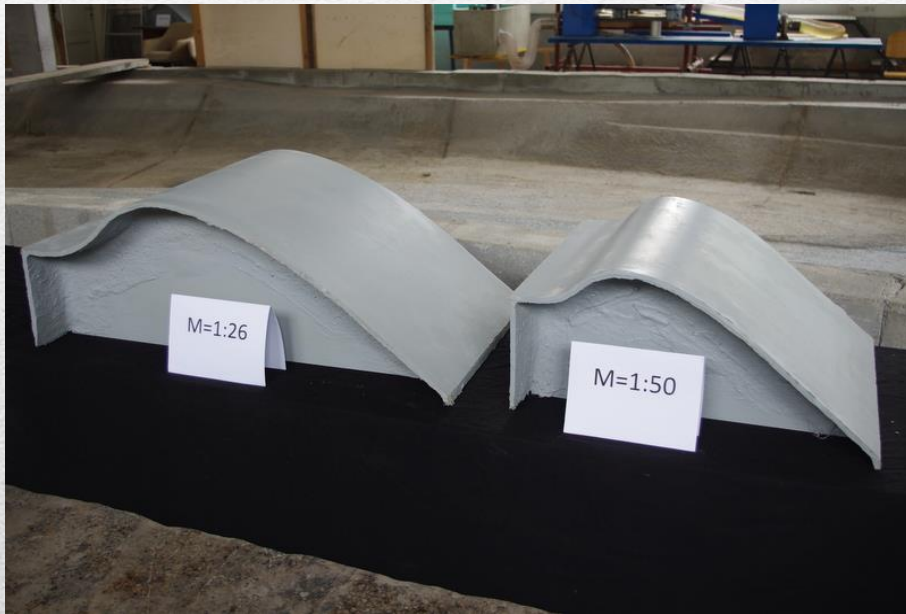
# meritve na modelu

- modeli prelivov v merilu 1:26, 1:50 in 1:100 v hidravličnem kanalu širine 0,5m



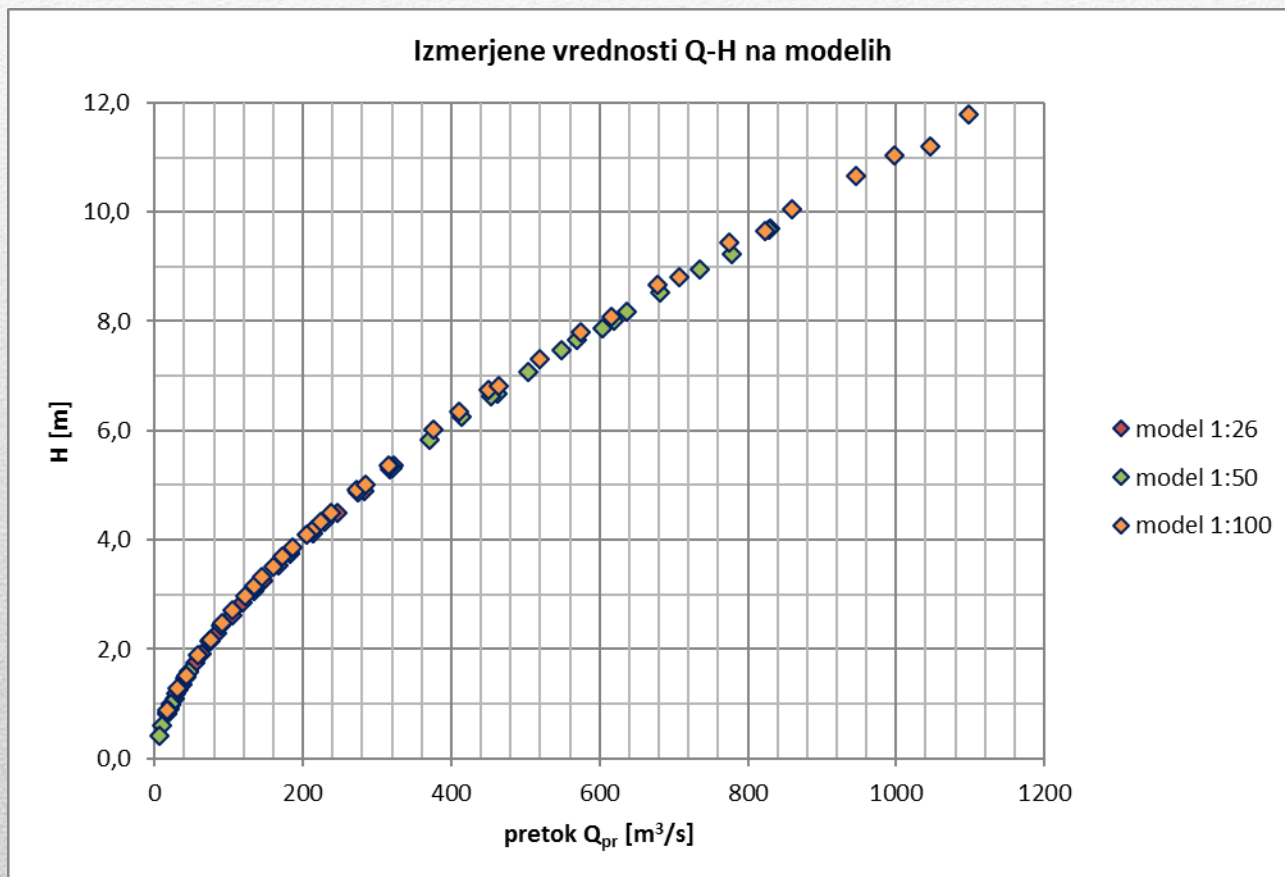
# meritve na modelu

- natančnost izvedbe prelivov in ureditve v kanalu
- gladka površina



# meritve na modelu

- primerjava meritev pretočne sposobnosti Q-H
- $H$  ... energijska višina

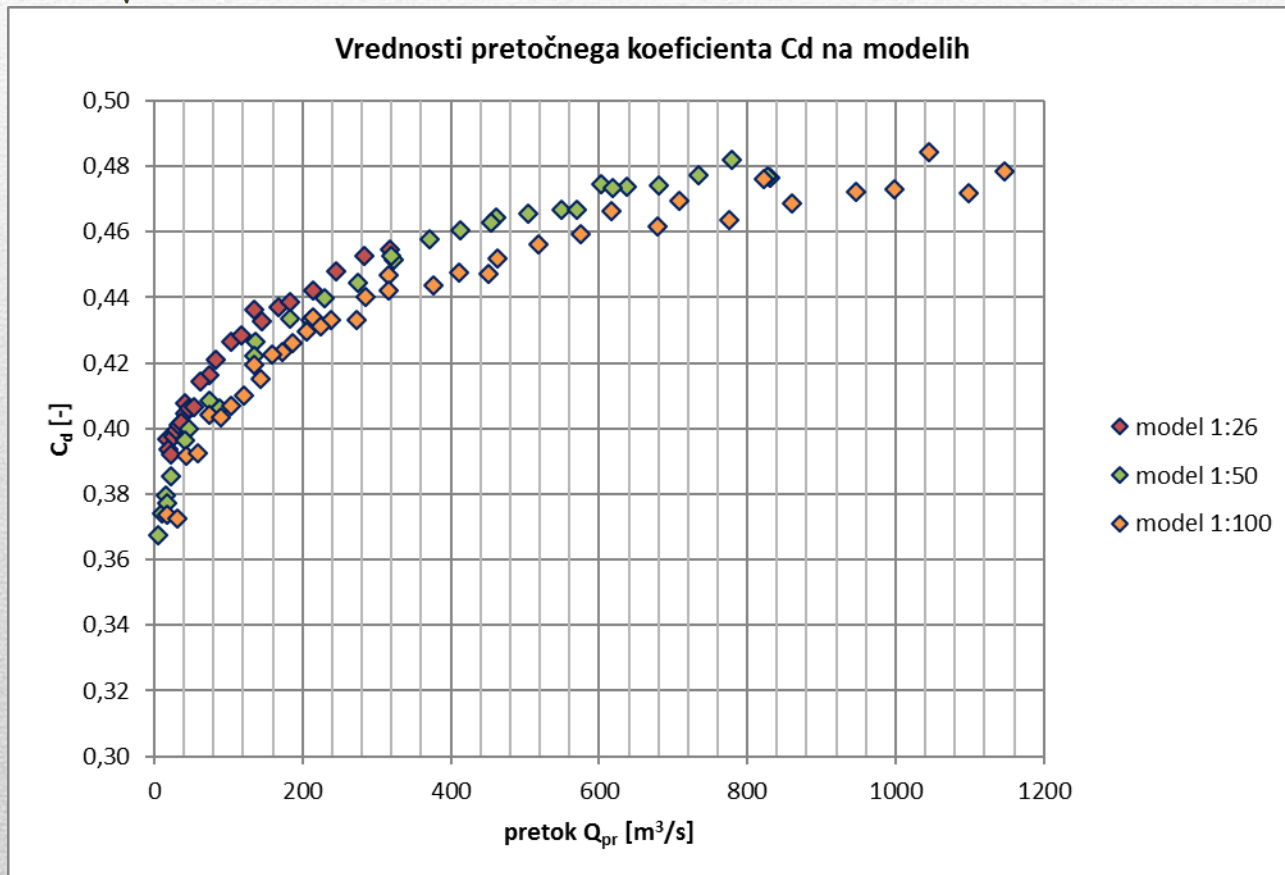




# meritve na modelu

- primerjava meritev pretočnega koeficienta  $C_d$

- $$C_d = \frac{Q}{b\sqrt{2gH^2}^{\frac{3}{2}}}$$

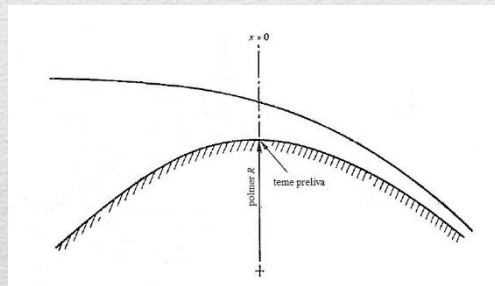


# aproksimacija pretočnega koeficienta

- originalna enačba (Matthew, 1990)

$$C_d = \frac{2}{3\sqrt{3}} \left[ \underbrace{1 + 0,271 \frac{H}{R} - 0,045 \left(\frac{H}{R}\right)^2}_{\text{vpliv ukrivljenosti tokovnic}} - \underbrace{0,833 \left(\frac{\sigma}{\rho g R^2}\right) \left(\frac{R}{H}\right)}_{\text{vpliv površinske napetosti}} - \underbrace{1,05 \left(\frac{3}{g}\right)^{1/4} \frac{\nu^{1/2}}{R^{3/4}} \left(\frac{R}{H}\right)}_{\text{vpliv viskoznosti}} \right]$$

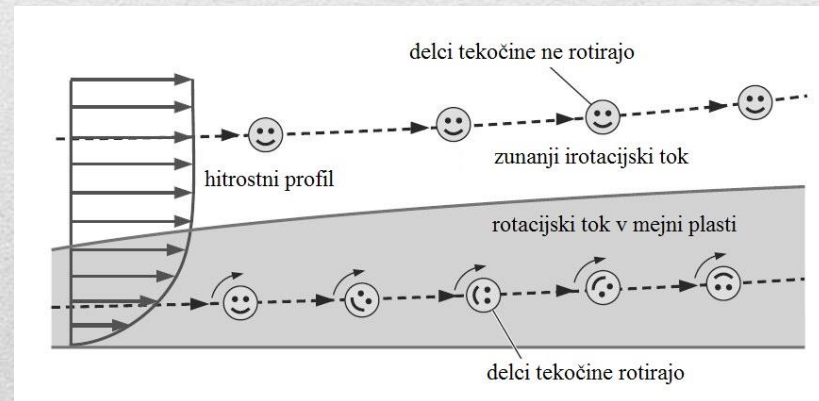
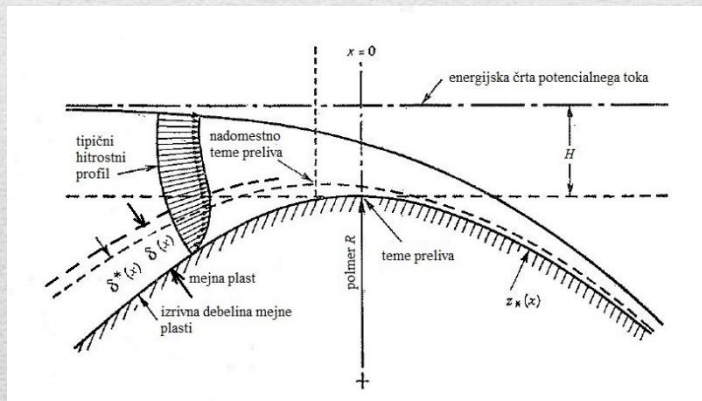
- simetrični preliv s polmerom zakrivljenosti R v območju temena



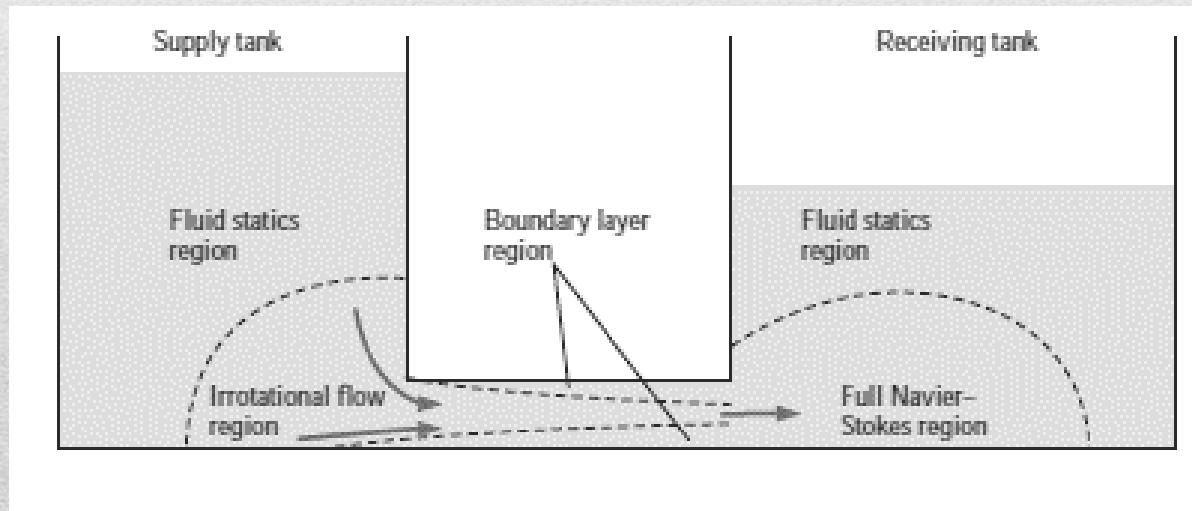
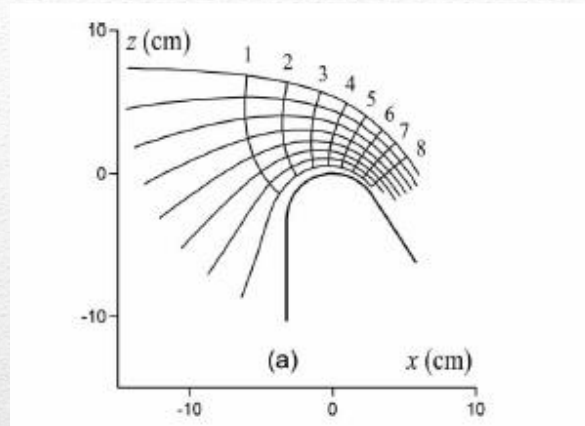
- laminarna mejna plast,  $\delta_c^* = 0,7\nu^{1/2} \left(\frac{3R}{g}\right)^{1/4}$
- veljavnost enačbe,  $H/R < 0,75$

# potencialni tok in mejna plast

- tok vode razdeljen na zunanji, neviskozen in irotacijski potencialni tok in na tanko viskozno mejno plast debeline  $\delta$
- izrazit gradient vzdolžne hitrosti v mejni plasti in trenje med plastmi tekočine z različnimi hitrostmi (viskoznost tekočine)

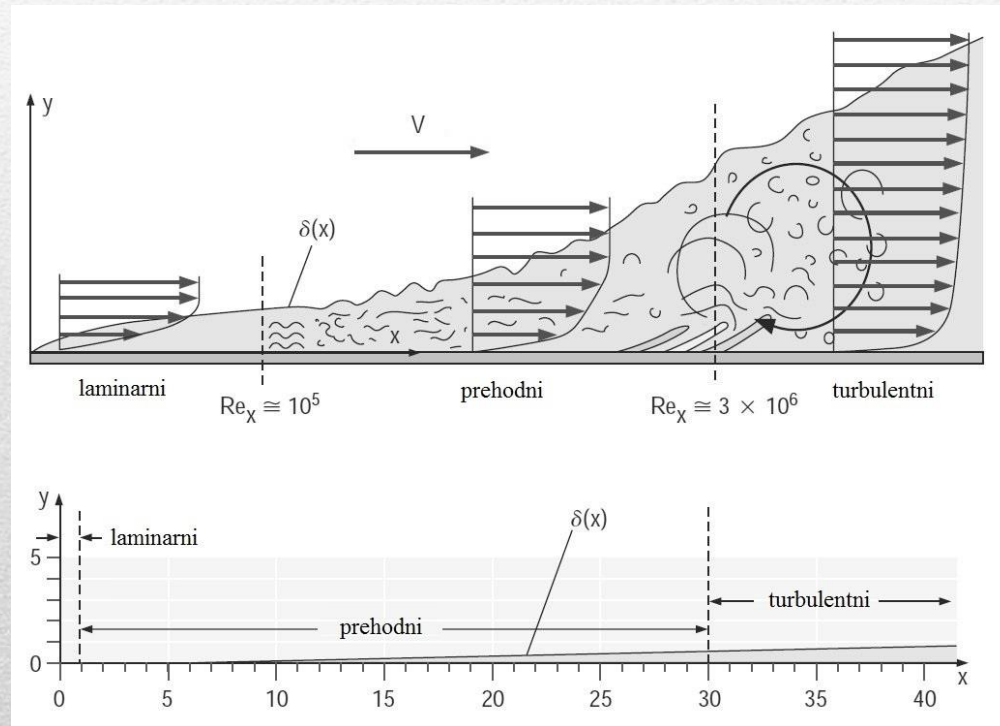


# potencialni tok



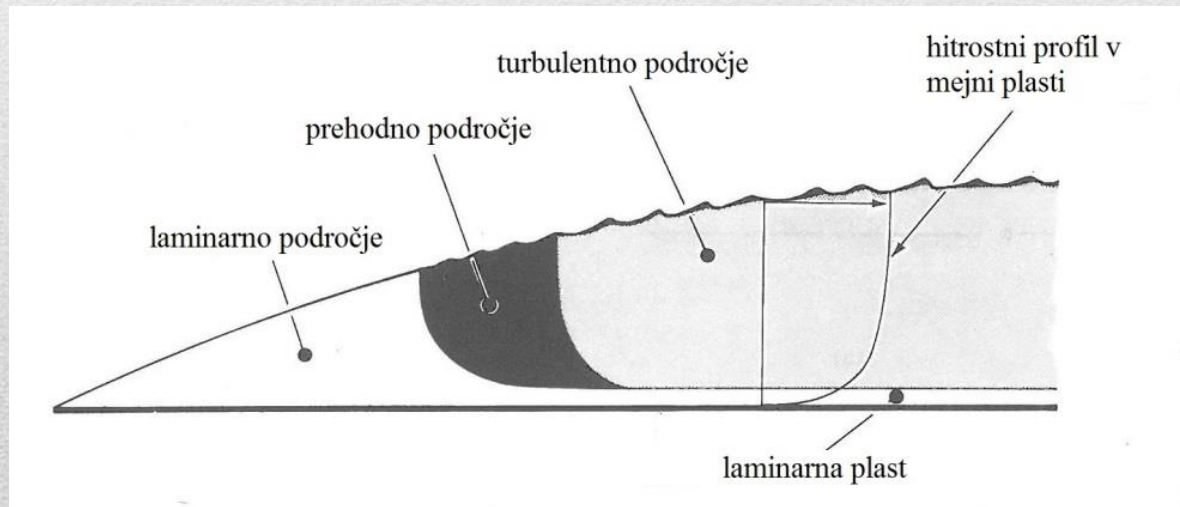
# mejna plast ob tanki ravni plošči

- Reynoldsovo število v mejni plasti,  $Re = \frac{vx}{\nu}$
- prehod iz laminarnega v turbulentni režim



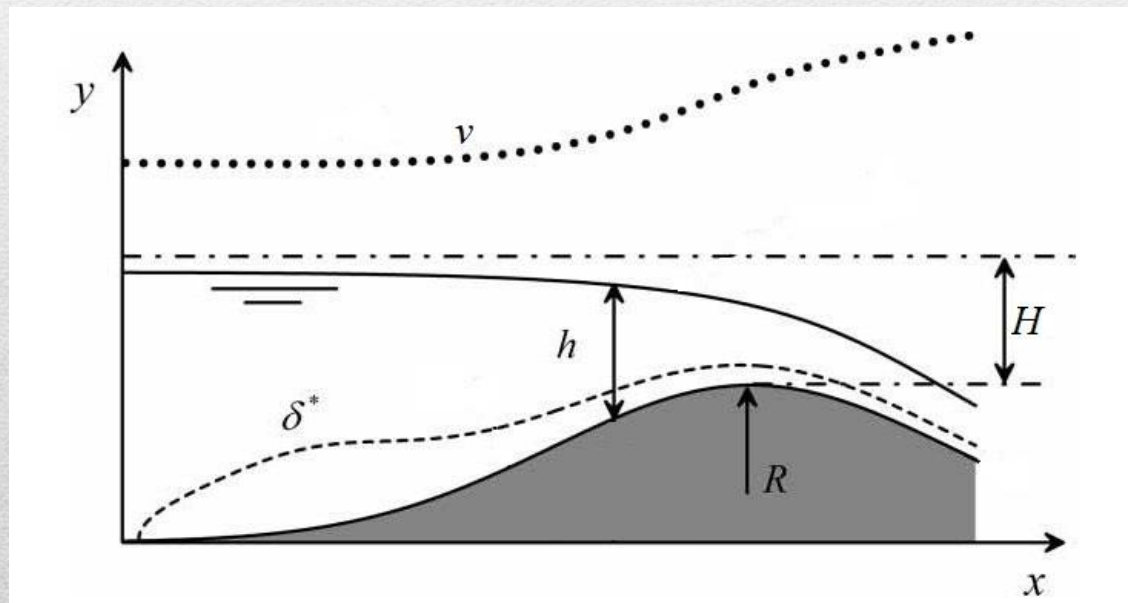
# mejna plast in hrapavost površine

- v laminarni mejni plasti hrapavost nima vpliva in se trenje izraža samo zaradi strižnih napetosti
- v turbulentni mejni plasti na trenje dodatno vpliva debelina hrap, če je večja od debeline laminarnega podsloja



# mejna plast na prelivu

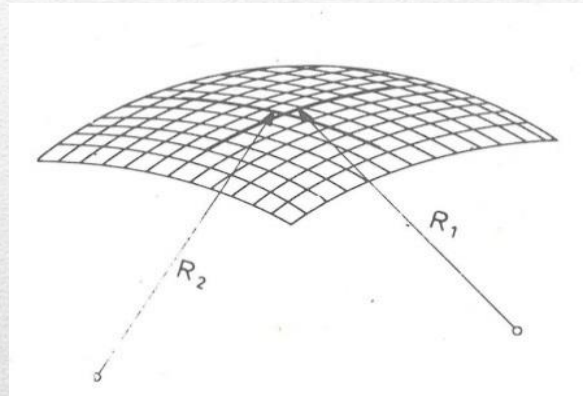
- debelina mejne plasti narašča z oddaljenostjo od točke nastanka mejne plasti in je tanjša pri večji hitrosti
- na gorvodnem, natočnem delu je mejna plast bistveno debelejša kot na vrhu preliva zaradi pospešene hitrosti vode



# površinska napetost

- zaradi ukrivljenosti gladine se pojavi vpliv površinske napetosti, zaradi katere je tlak znotraj ukrivljene površine večji kot na zunanji strani

$$p_0 = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$



- če je prelivna gladina je valjasta ploskev

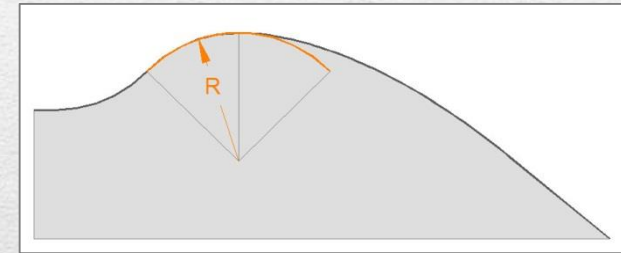
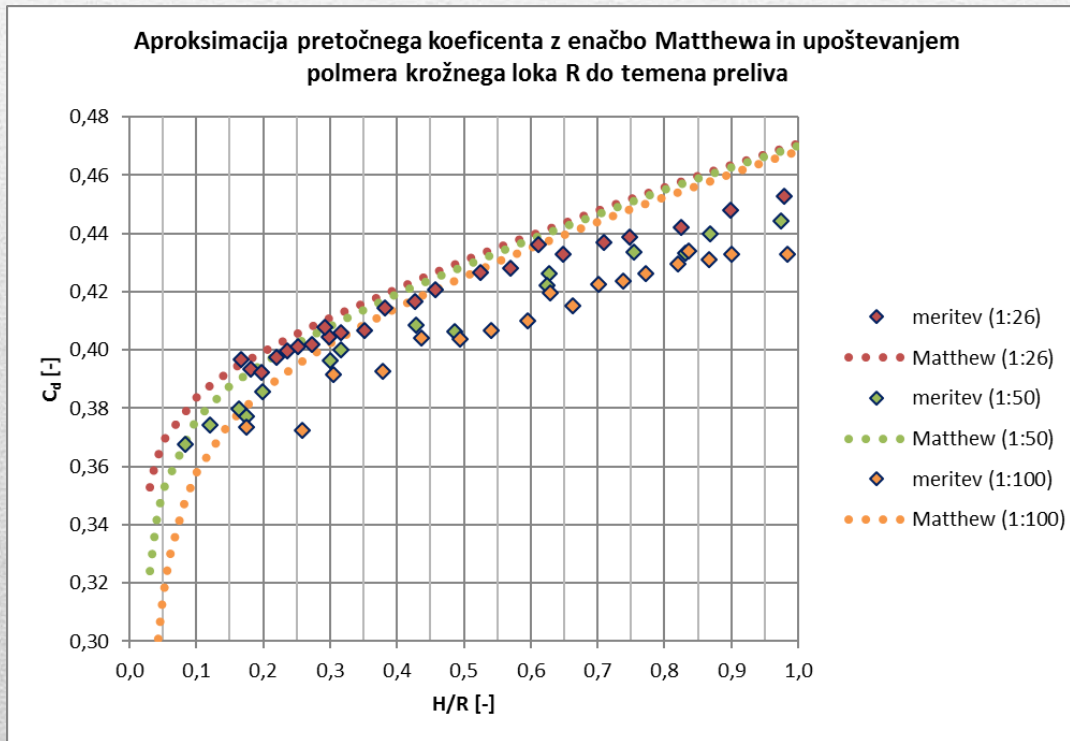
$$p_0 = \frac{\sigma}{R}$$



# aproksimacija z enačbo Matthewa

- R ... polmer gorvodnega temena preliva

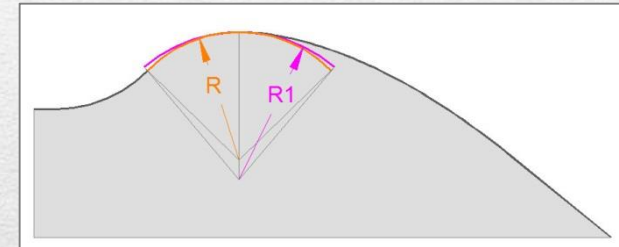
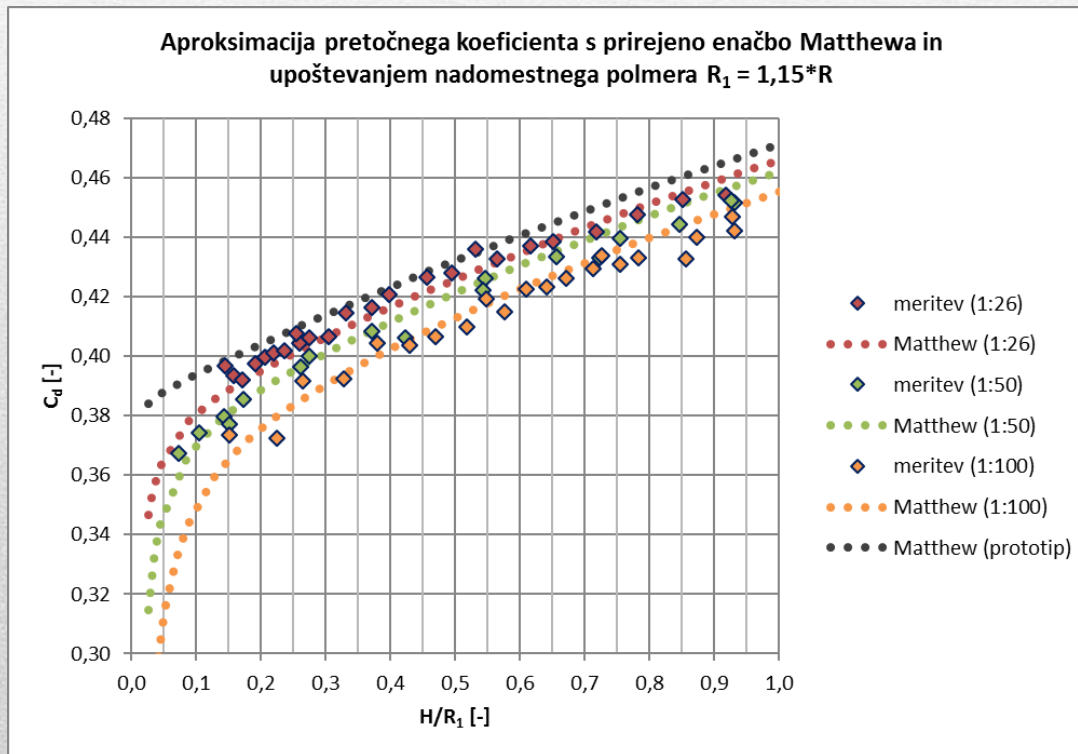
$$C_d = \frac{2}{3\sqrt{3}} \left[ 1 + 0,271 \frac{E}{R} - 0,045 \left( \frac{E}{R} \right)^2 - 0,833 \left( \frac{\sigma}{\rho g R^2} \right) \left( \frac{R}{E} \right) - 1,05 \left( \frac{3}{g} \right)^{1/4} \frac{v^{1/2}}{R^{3/4}} \left( \frac{R}{E} \right) \right]$$



# prirejena enačba Matthewa

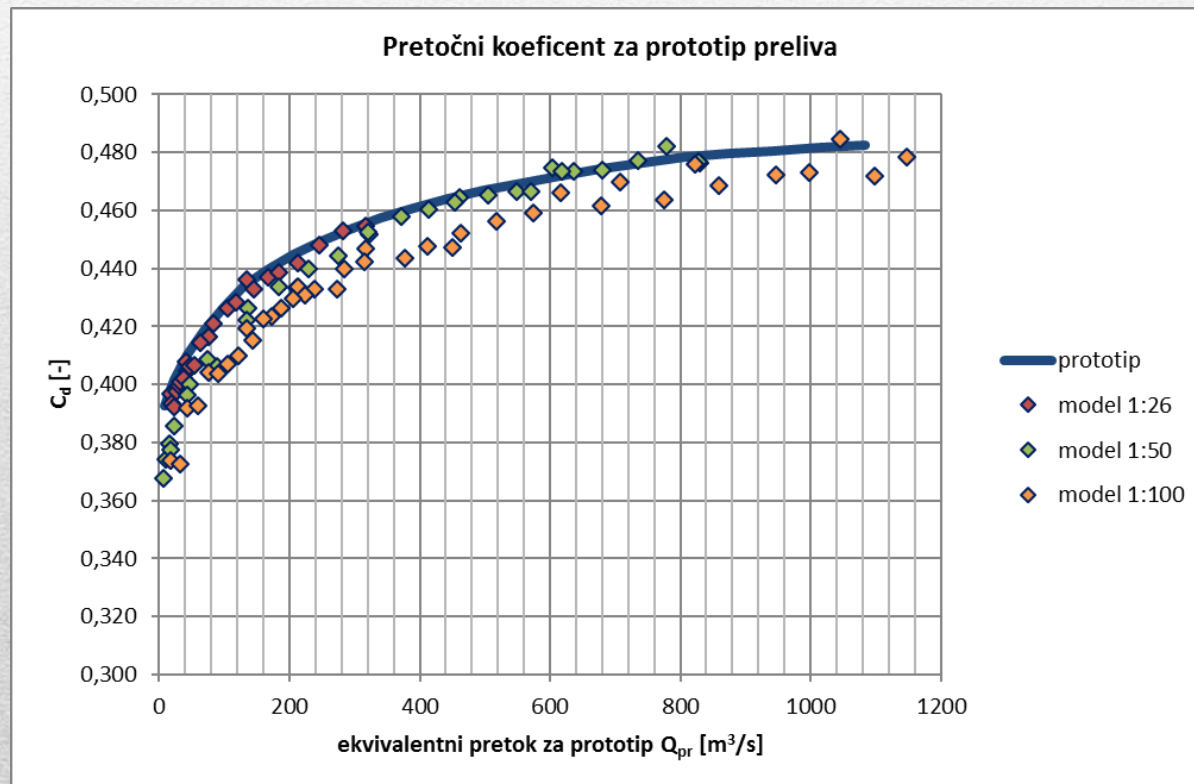
- vpeljava nadomestnega polmera temena,  $R_1 = 1,15R$
- povečanje debeline mejne plasti,  $k_\delta = 1 + 5,2 \frac{H}{R_1}$

$$C_d = \frac{2}{3\sqrt{3}} \left[ 1 + 0,271 \frac{H}{R_1} - 0,045 \left( \frac{H}{R_1} \right)^2 - 0,833 \left( \frac{\sigma}{\rho g R_1^2} \right) \left( \frac{R_1}{H} \right) - k_\delta 1,05 \left( \frac{3}{g} \right)^{1/4} \frac{v^{1/2}}{R_1^{3/4}} \left( \frac{R_1}{H} \right) \right]$$

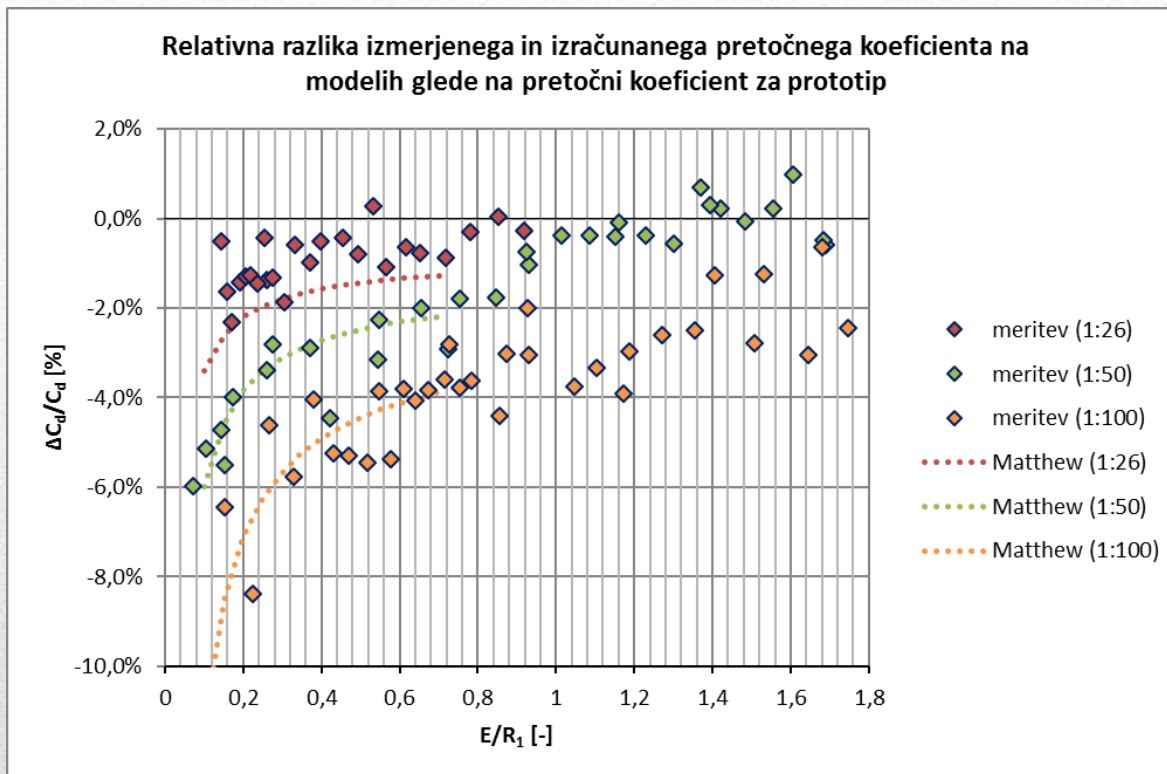


# pretočni koeficient za prototip

- po (prirejeni) enačbi Matthewa (do  $E/R_1 = 0,6$ ,  $Q=160$   $m^3/s$ )
- nadaljevanje poteka pretočnega koeficienta na podlagi izmerjenih vrednosti



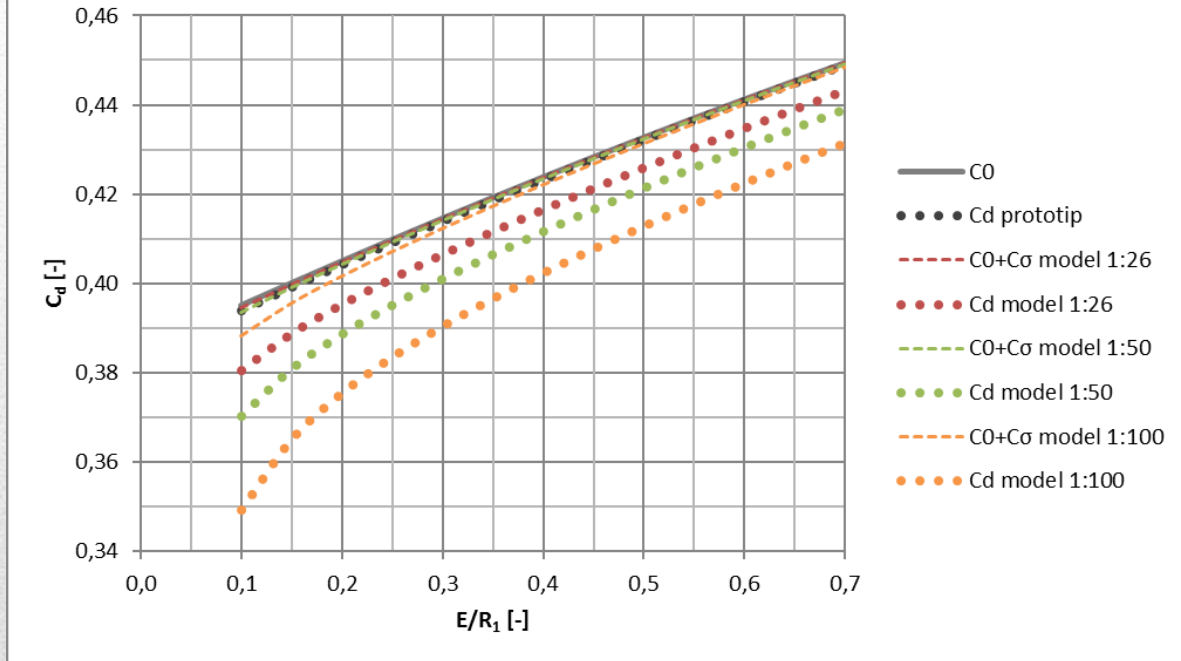
# analiza vpliva modelnega merila



	Prototip		Model 1:26			Model 1:50			Model 1:100		
$E/R_1$	$Q$	$C_{d,pr}$	$C_{d}/C_{d,pr}$	$C_{v}/C_{d,pr}$	$C_{d}/C_{d,pr}$	$C_{d}/C_{d,pr}$	$C_{v}/C_{d,pr}$	$C_{d}/C_{d,pr}$	$C_{d}/C_{d,pr}$	$C_{v}/C_{d,pr}$	$C_{d}/C_{d,pr}$
[-]	[m <sup>3</sup> /s]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0,10	10	0,394	-0,1	-3,3	-3,4	-0,4	-5,6	-6,0	-1,8	-9,6	-11,4
0,20	29	0,404	-0,1	-2,1	-2,2	-0,2	-3,6	-3,8	-0,9	-6,3	-7,2
0,30	54	0,414	-0,0	-1,8	-1,8	-0,1	-3,0	-3,1	-0,6	-5,1	-5,6
0,40	85	0,423	-0,0	-1,5	-1,5	-0,1	-2,6	-2,7	-0,4	-4,5	-4,9
0,50	121	0,432	-0,0	-1,4	-1,4	-0,1	-2,4	-2,5	-0,3	-4,1	-4,4
0,60	163	0,441	-0,0	-1,3	-1,3	-0,1	-2,2	-2,2	-0,3	-3,9	-4,2
0,70	207	0,449	-0,0	-1,3	-1,3	-0,1	-2,1	-2,1	-0,2	-3,7	-3,9

# analiza vpliva modelnega merila

Analiza pretočnega koeficienta na modelnih prelivih in na prototipu glede na vplivne dejavnike

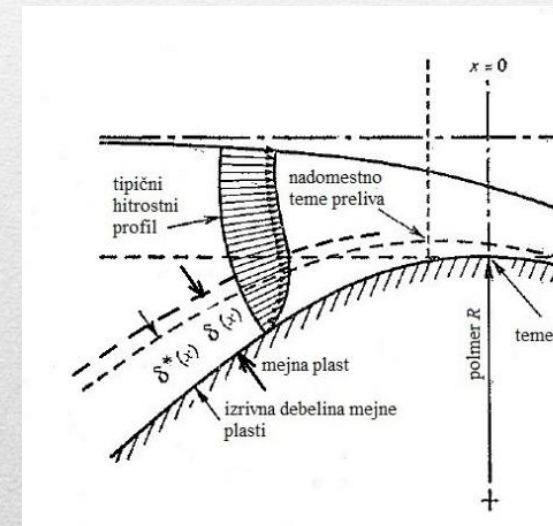
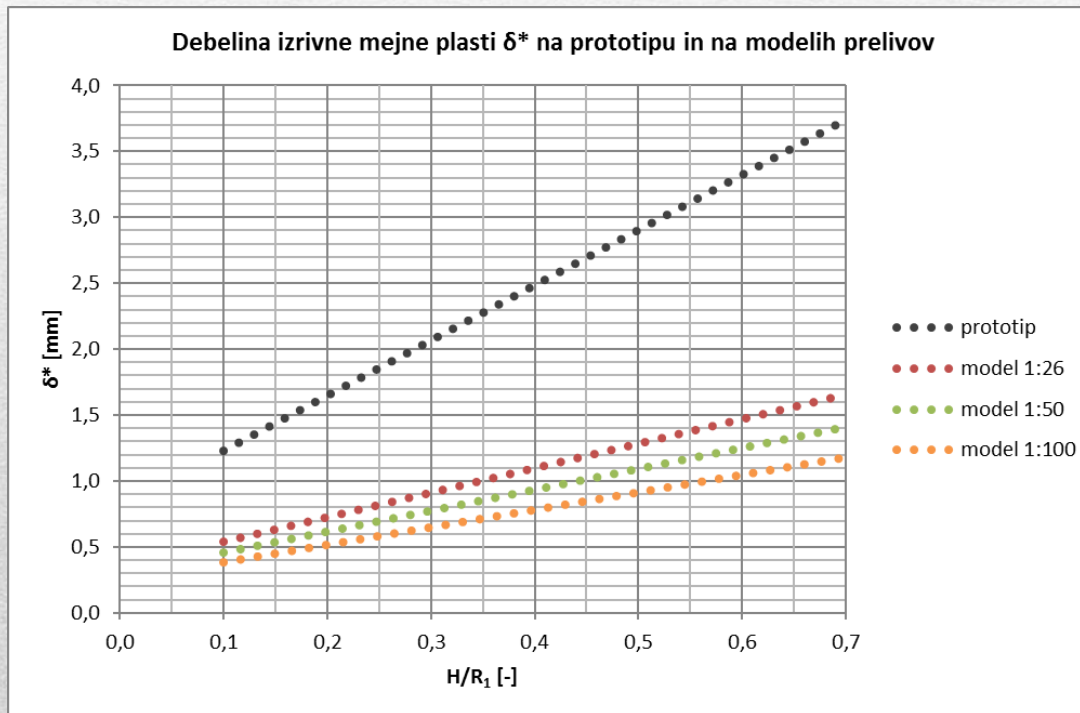


	Prototip		Model 1:26			Model 1:50			Model 1:100		
E/R <sub>1</sub>	Q	C <sub>d,pr</sub>	C <sub>σ</sub> /C <sub>d,pr</sub>	C <sub>v</sub> /C <sub>d,pr</sub>	C <sub>d</sub> /C <sub>d,pr</sub>	C <sub>σ</sub> /C <sub>d,pr</sub>	C <sub>v</sub> /C <sub>d,pr</sub>	C <sub>d</sub> /C <sub>d,pr</sub>	C <sub>σ</sub> /C <sub>d,pr</sub>	C <sub>v</sub> /C <sub>d,pr</sub>	C <sub>d</sub> /C <sub>d,pr</sub>
[-]	[m <sup>3</sup> /s]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0,10	10	0,394	-0,1	-3,3	-3,4	-0,4	-5,6	-6,0	-1,8	-9,6	-11,4
0,20	29	0,404	-0,1	-2,1	-2,2	-0,2	-3,6	-3,8	-0,9	-6,3	-7,2
0,30	54	0,414	-0,0	-1,8	-1,8	-0,1	-3,0	-3,1	-0,6	-5,1	-5,6
0,40	85	0,423	-0,0	-1,5	-1,5	-0,1	-2,6	-2,7	-0,4	-4,5	-4,9
0,50	121	0,432	-0,0	-1,4	-1,4	-0,1	-2,4	-2,5	-0,3	-4,1	-4,4
0,60	163	0,441	-0,0	-1,3	-1,3	-0,1	-2,2	-2,2	-0,3	-3,9	-4,2
0,70	207	0,449	-0,0	-1,3	-1,3	-0,1	-2,1	-2,1	-0,2	-3,7	-3,9

# analiza vpliva modelnega števila

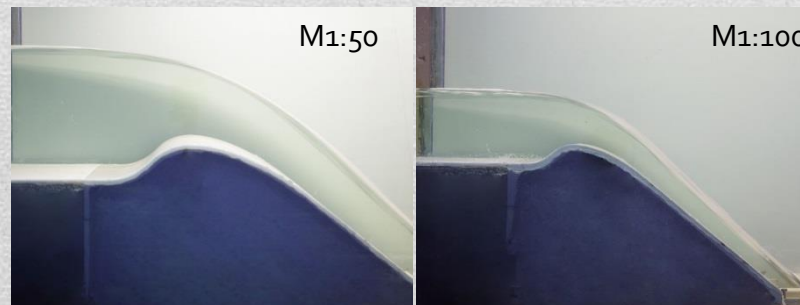
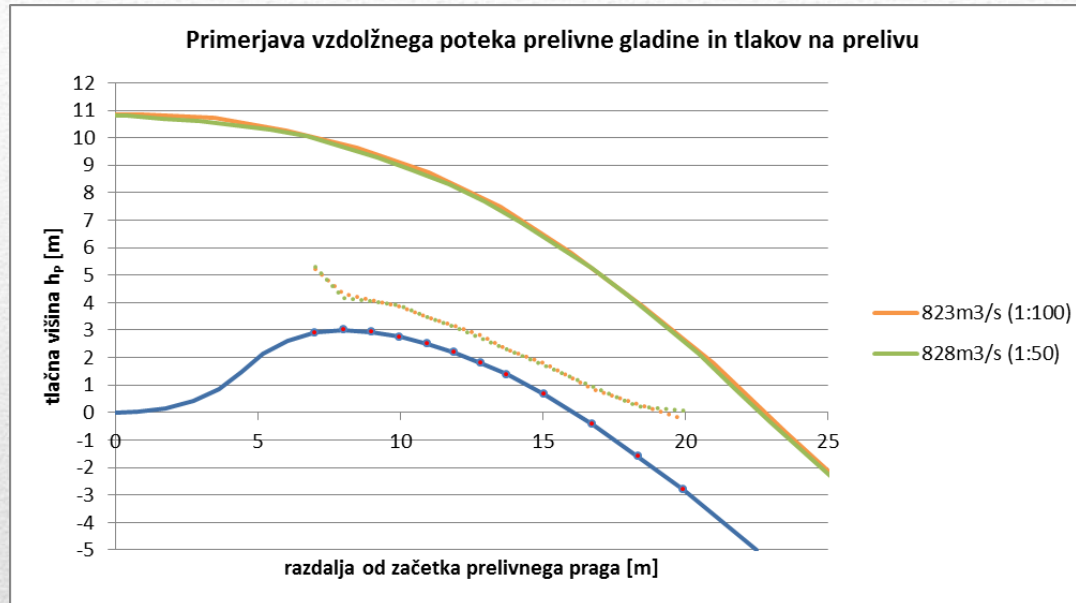
- izrivna debelina mejne plasti na temenu preliva

- $$\delta_c^* = \left(1 + 5,2 \frac{H}{R_1}\right) * 0,7v^{1/2} \left(\frac{3R_1}{g}\right)^{1/4}$$



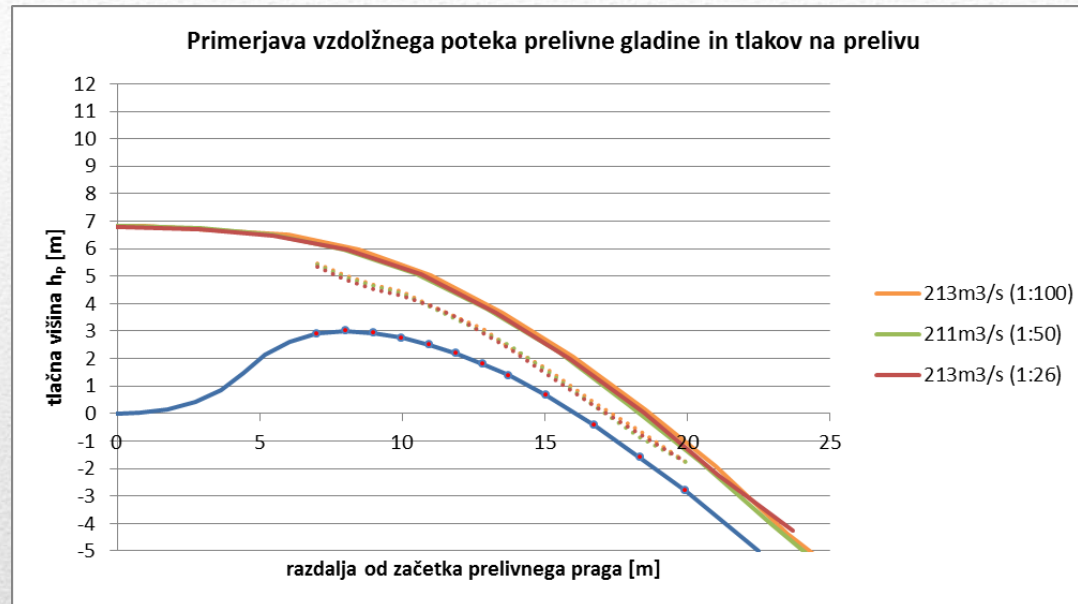
# primerjava tlakov in vzdolžnega poteka gladine

- nominalni pretok  $Q=823\text{m}^3/\text{s}$



# primerjava tlakov in vzdolžnega poteka gladine

- nominalni pretok  $Q=213\text{m}^3/\text{s}$





- Pomanjkljivost fizičnega hidravličnega modeliranja je porušitev medsebojnega razmerja sil, ki delujejo na prototip oz. model
- Za analizo vpliva modelnega merila je potrebno poznavanje zakonov modelne podobnosti in fizikalnega ozadja
- Modelna raziskava prototipa praktičnega preliva na treh modelih v merilih 1:26, 1:50 in 1:100
- Vpliv modelnega merila določen na podlagi rezultatov meritev in prirejene (umerjene) enačbe (Matthew)
- Najmanjše modelno merilo za določitev pretočne sposobnosti 1:50