

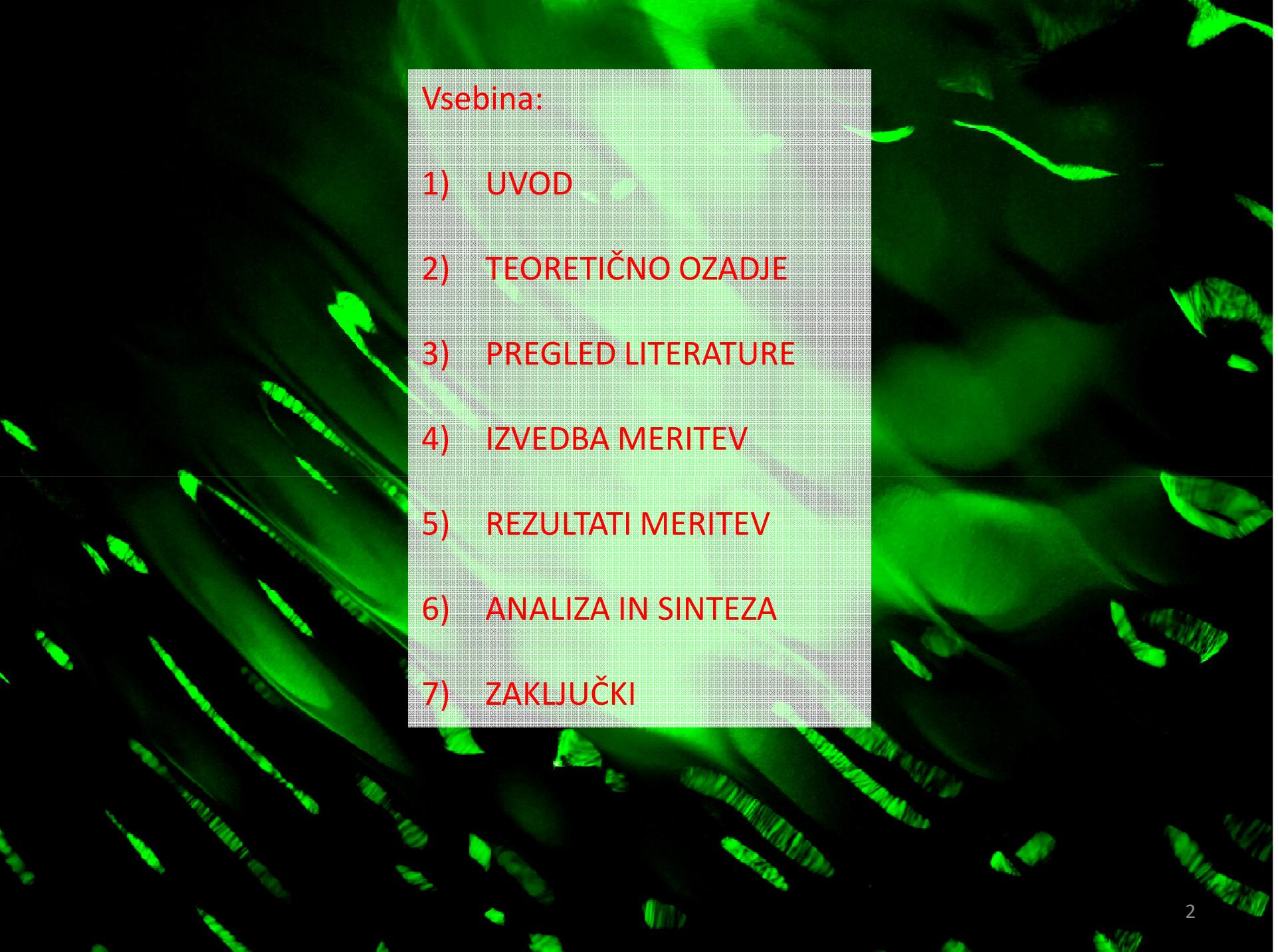


RAZISKAVA HITROSTNEGA POLJA NA MODELU BOČNEGA PRELIVA Z UPORABO VIZUALIZACIJSKE METODE

Predavanje

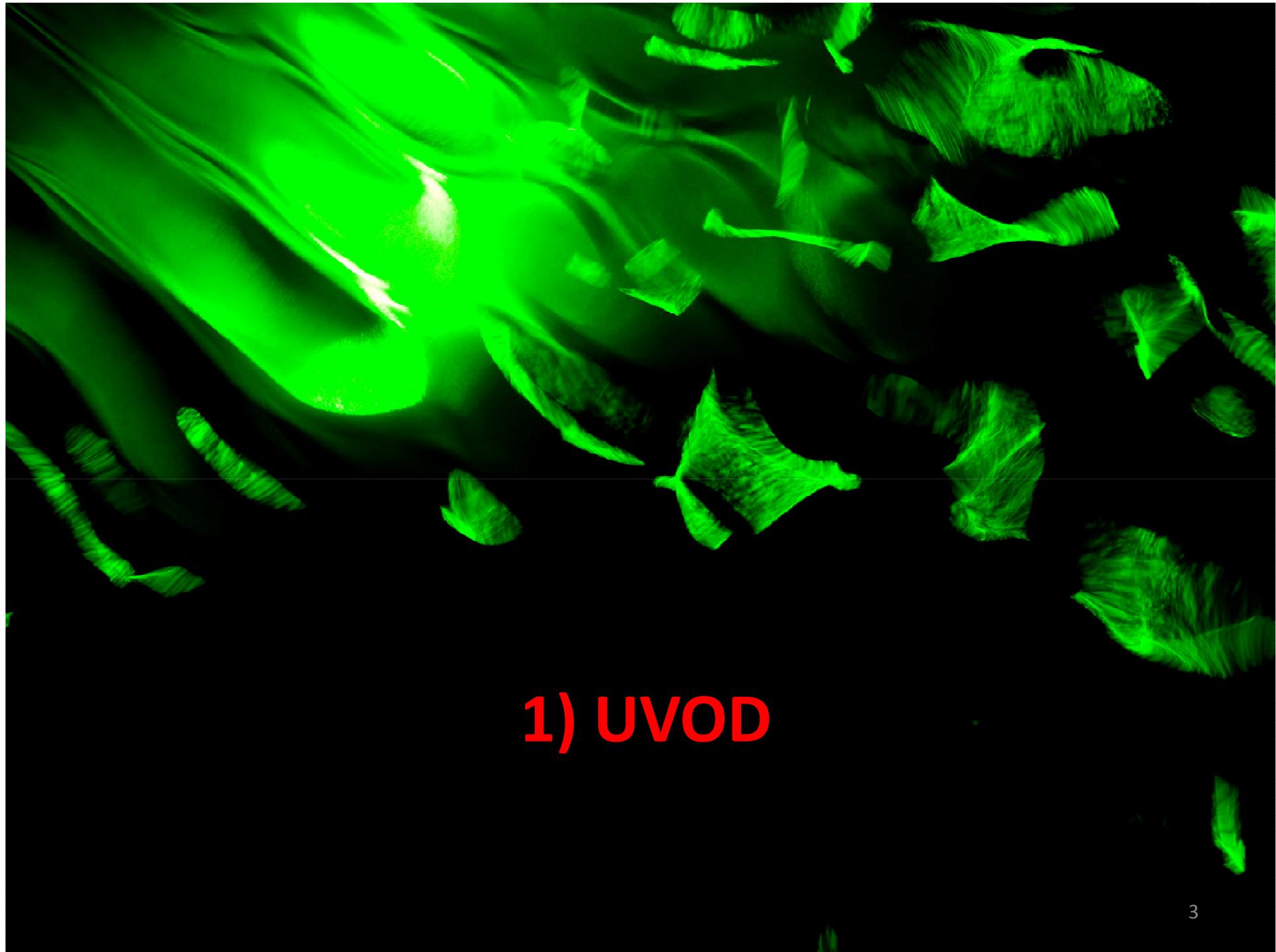
dr. Gorazd Novak, univ. dipl. inž. grad.

Ljubljana, 25.3.2013



Vsebina:

- 1) UVOD
- 2) TEORETIČNO OZADJE
- 3) PREGLED LITERATURE
- 4) IZVEDBA MERITEV
- 5) REZULTATI MERITEV
- 6) ANALIZA IN SINTEZA
- 7) ZAKLJUČKI



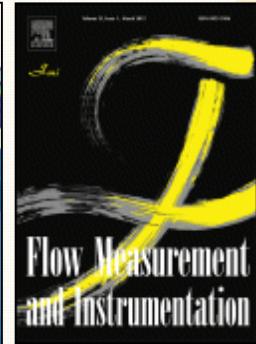
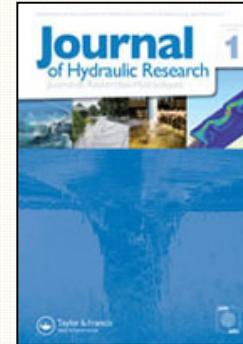
Raziskavo so omogočili: UL FGG KMTe, Hidroinštitut, ARRS

(Razvoj računalniško podprte vizualizacijske metode za diagnostiko hitrostnih polj na področju hidrodinamskih sistemov)

Članek:

Journal of Hydraulic Research 50(1), 129-133 (2012)

Flow Measurement and Instrumentation 29, 45-51 (2013)



TEZA:

- hitrostno polje v območju bočnega preliva kvantificirati
- vizualizacijska metoda, ki praktično ne posega v tok
- izmerjene hitrosti ne bodo enakomerno porazdeljene
- dopolniti obstoječe pretočne enačbe
- značilnosti posebnih topoloških struktur

CILJI:

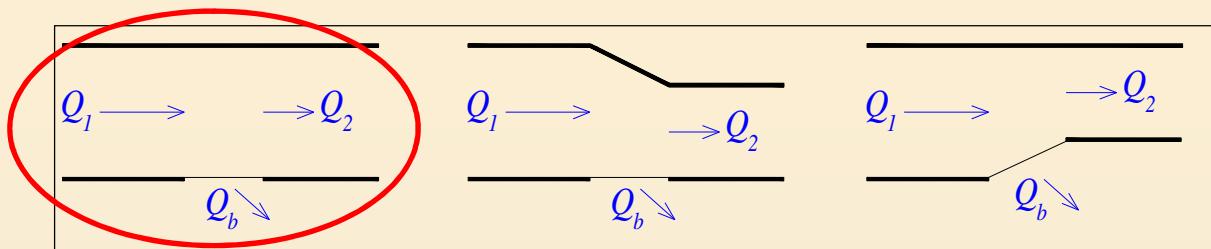
- nekontaktne meritve hitrosti
- zveze med hitrostmi in ostalimi parametri
- dopolniti obstoječe enačbe koeficientov



2) TEORETIČNO OZADJE

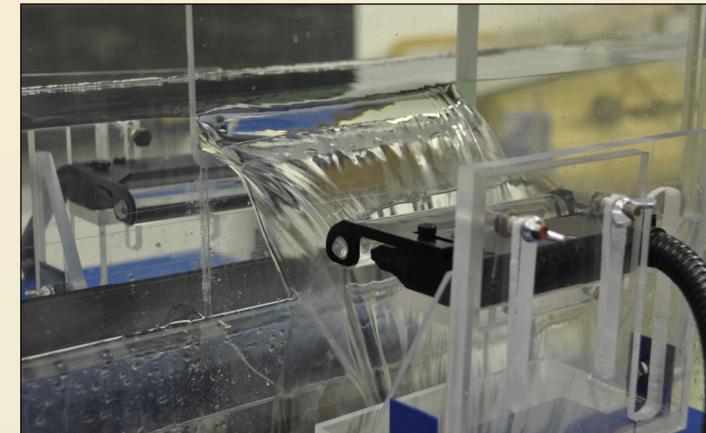
HIDRAVLIKA BOČNIH PRELIVOV

$$Q_1 = Q_2 + Q_b$$



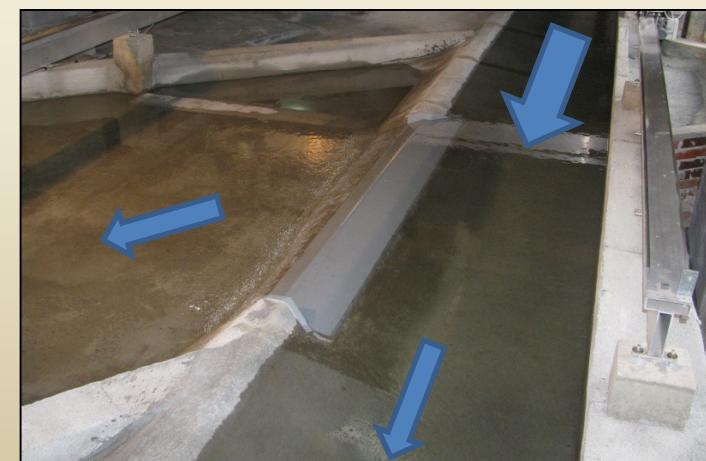
Področja uporabe:

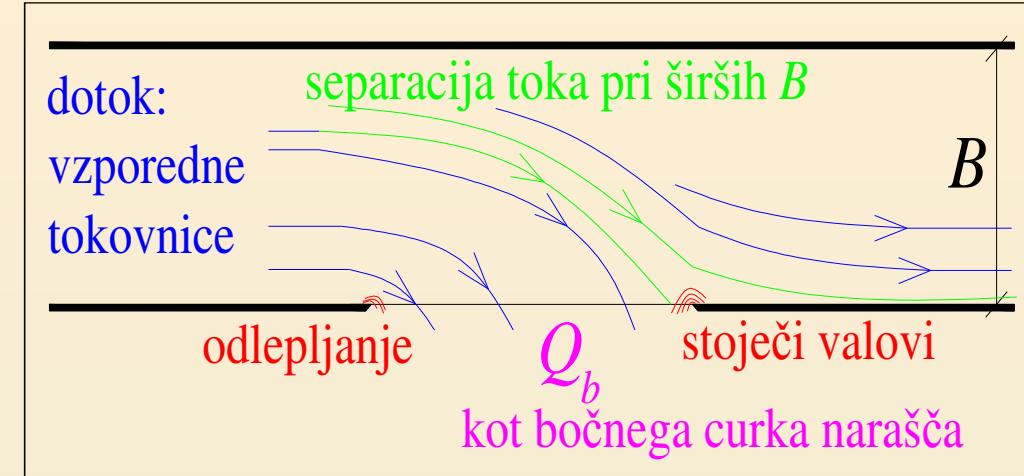
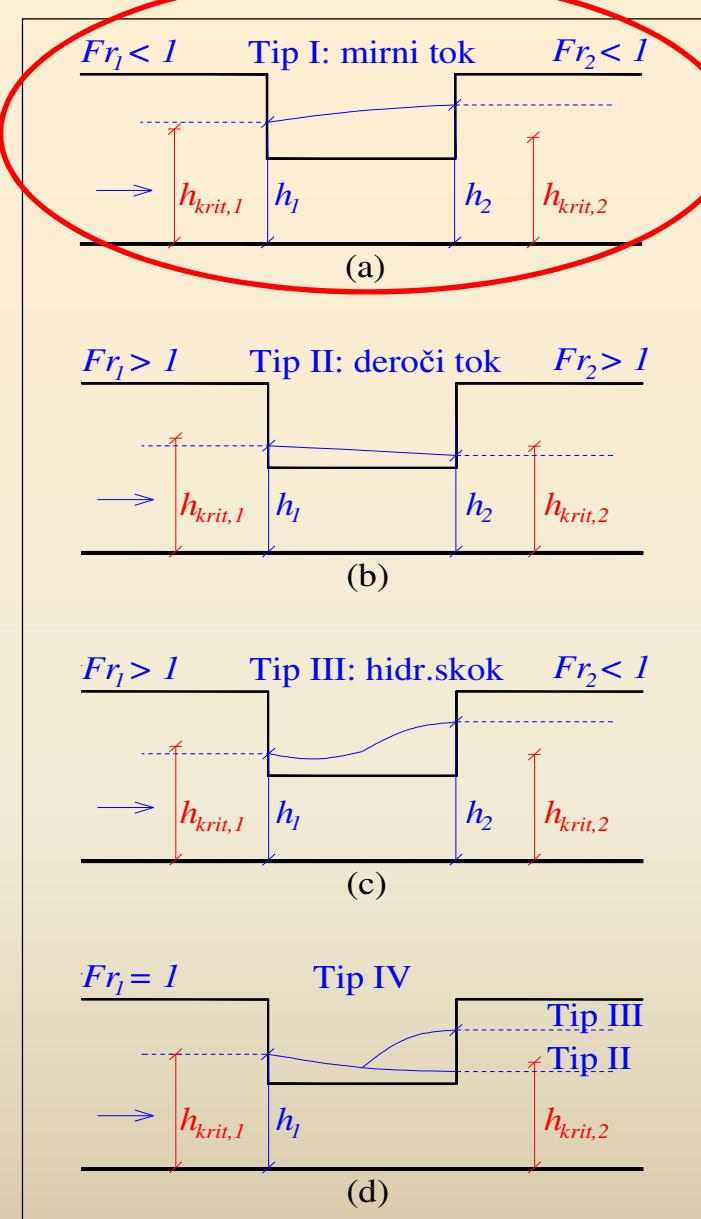
- protipoplavne ureditve
- mešane kanalizacije
- čistilne naprave
- namakalni sistemi
- zajemi vode



Bočni preliv glede na:

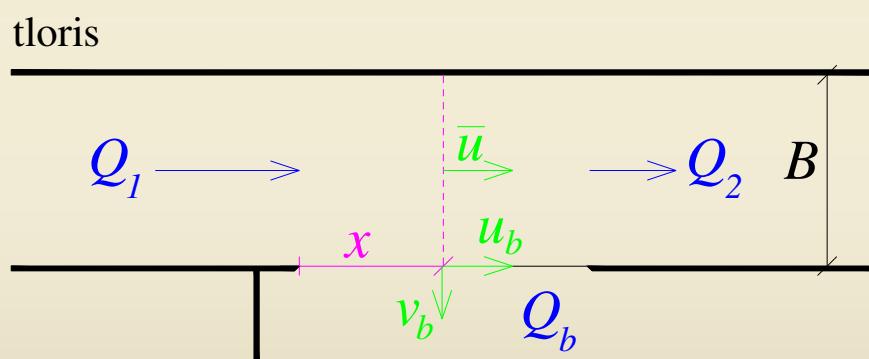
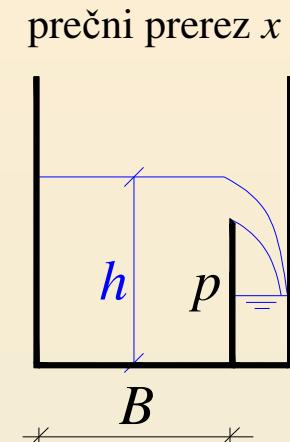
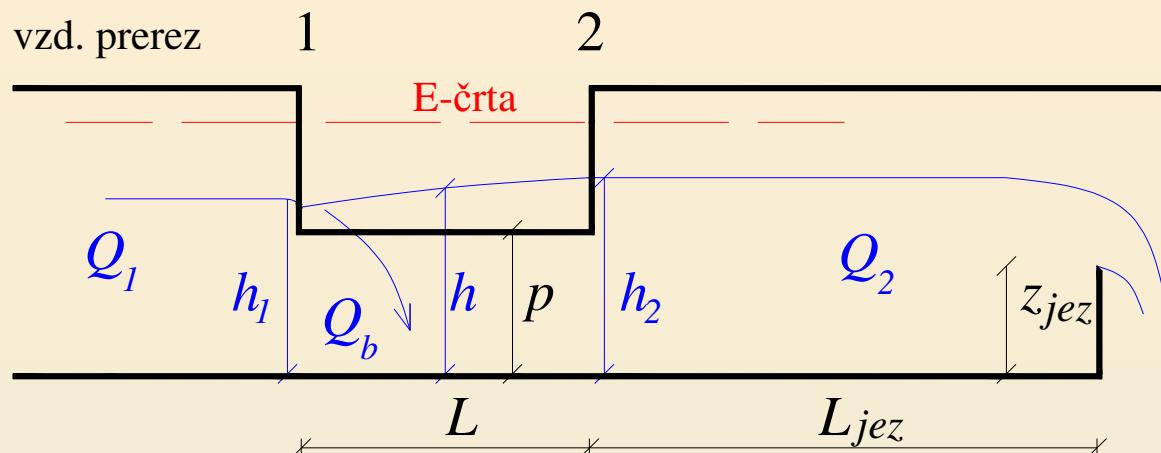
- glavno korito: **pravokotno**, trapezno, ...
- preliv: **pravokotni**, trikotni
- širina krone: **ostrorobi**, široka krona
- bočni odtok: **neovirani**, ovirani
- režim toka: **mirni**, deroči





- bočni preliv \neq (prečni preliv * korekcija)
- v praksi 1D enačbe za skupni $Q_b = f(C_d)$
- PREDPOSTAVKE** izračuna z **1D** tokom:
 - hidrostaticna porazdelitev tlakov
 - gladina v prečnem prerezu vodoravna
 - nepotopljeni Q_b
 - samo trenjske izgube

Osnovni parametri



Prostorsko spremenljivi tok s pojemajočim pretokom

Predpostavka: bočno odtekajoča voda ne vpliva na potek energijske črte.

Izpeljava iz: $E_{sk} = Z_{dno} + h + \alpha_c \frac{\bar{u}^2}{2g} = Z_{dno} + h + \alpha_c \frac{Q^2}{2gA^2}$

Enačba prostorsko spremenljivega toka s pojemajočim pretokom:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I_0 - I_\lambda - \left(\frac{\alpha_c Q}{g A^2}\right) \left(\frac{dQ}{dx}\right)}{1 - \left(\frac{\alpha_c Q^2 B}{g A^3}\right)}$$

opisuje potek gladin

$$\alpha_c = \frac{1}{\bar{u}^3 A} \int_A u^3 dA$$

Coriolisov korekcijski koeficient
kinetične energije

$$\alpha_B = \frac{1}{A} \int_A \left(\frac{u^2}{\bar{u}^2} \right) dA$$

Boussinesqov korekcijski koeficient
gibalne količine

Dva pristopa reševanja osnovne enačbe

1) energijski pristop:

- zakon o ohranitvi mase
(kontinuitetna enačba)
- energijska črta vzporedna dnu
- $\bar{u}_b = \bar{u}$
- $\alpha_C = 1$

2) pristop z gibalno količino

- drugi Newtonov zakon
(dinamična enačba)
- treba poznati $\mathbf{G} = m \cdot \mathbf{v}$
- $\bar{u}_b > \bar{u}$
- $\alpha_B \geq 1$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I_0 - I_\lambda + \frac{qQ_x}{gA^2}}{1 - \frac{BQ_x^2}{gA^3}}$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I_0 - I_\lambda + \left(2\alpha_B - \frac{\bar{u}_b}{\bar{u}}\right) \frac{qQ_x}{gA^2}}{1 - \frac{\alpha_B B Q_x^2}{g A^3}}$$

Relevantnost raziskave "Hitrostno polje vodnega toka v območju bočnega preliva":

- 1) s hitrostmi povezani členi nastopajo v enačbah za dh/dx in C_d (posredno preko Fr)
- 2) izmeriti namesto predpostavljati
- 3) izmeriti brez poseganja v tok

Dimenzioniranje bočnega preliva (določitev skupnega Q_b)

splošna enačba pravokotnih bočnih prelivov: $q_b = - \left(\frac{dQ_b}{dx} \right) = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} (h - p)^{3/2}$

skupni bočni pretok: $Q_b = \int_0^L q_b dx$

$$Q_b = q_b L$$

koeficient pretoka: $C_d = f(Fr, \frac{h}{p}, \frac{B}{L}, \dots)$

Primer: postopek May in sod. (2003):

- 1) C_d po njihovi enačbi
- 2) $\bar{u}_b/\bar{u} = 1,84$ in $\alpha_B = 1,23$ (predpostavka!)
- 3) potek gladine $h(x)$
- 4) skupni Q_b

UPORABLJENA VIZUALIZACIJSKA METODA

vektorsko polje hitrosti → skalarno polje koncentracij → sivine ČB slike → numerično

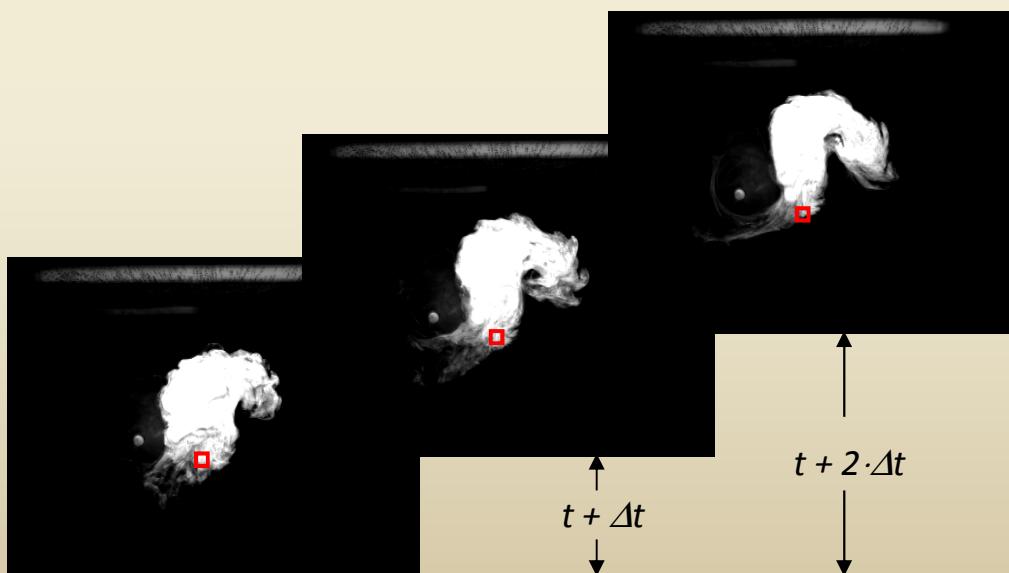
advekcijsko – difuzijska enačba:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(Nv_i)}{\partial x_i} = D\nabla^2 N$$

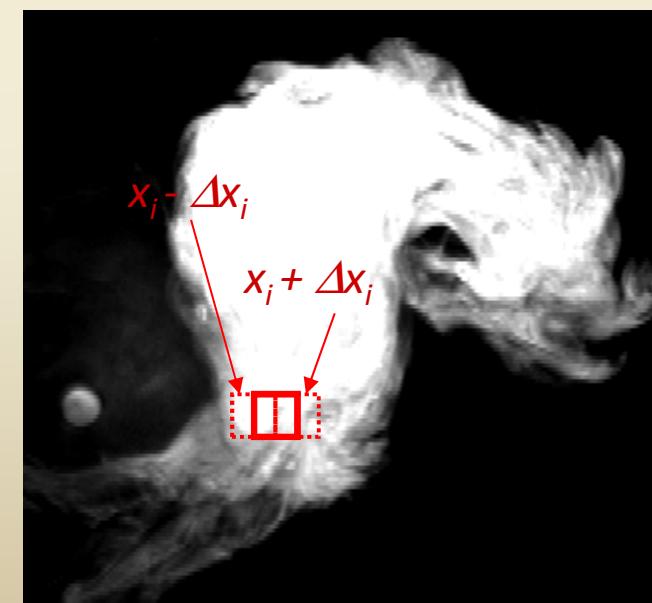
- v ... iskane hitrosti
- D ... difuzivnost je znana
- N ... koncentracija sledila se aproksimira s sivino slike
- odvodi N se izračunajo numerično:

$$S \propto N$$

po času: fiksno okno, zaporedni posnetki



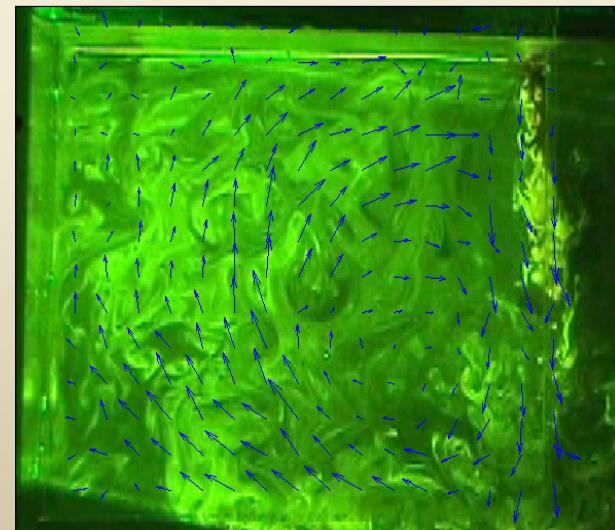
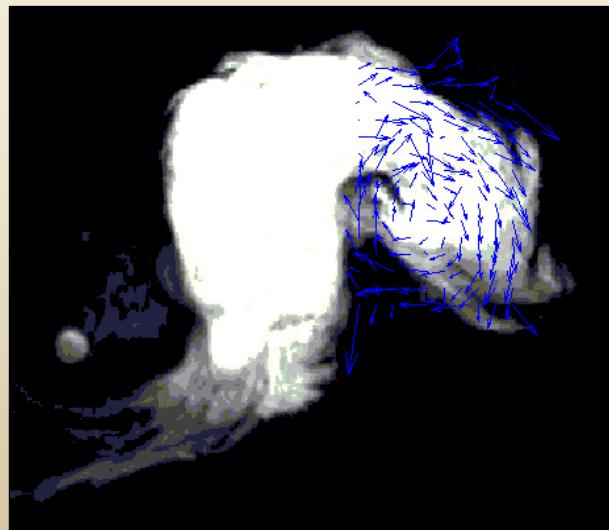
po kraju: fiksen posnetek, premik okna



V 2D: advekcijsko-difuzijska enačba = dve lin.dif. en. z dvema neznankama; zač. pogoji!
Pretvorba v sistem navadnih lin. enačb, kjer neznanke hitrosti in njihovi odvodi.

Poudarki:

- ✓ veljavnost metode preverili Bajcar in sod. (2009) z bolj konvencionalnimi metodami:
zračni curek, anemometrija z vročo žičko
- ✓ se še razvija
- ✓ nekontaktne meritve
- ✓ velika prostorska in časovna ločljivost : 1 pixel, 300 fps
- ✓ račun se izvede hitro
- ✓ metoda uporabna z različnimi sledili (vodikovi mehurčki, barvilo, delci)



FENOMENOLOŠKI MODEL

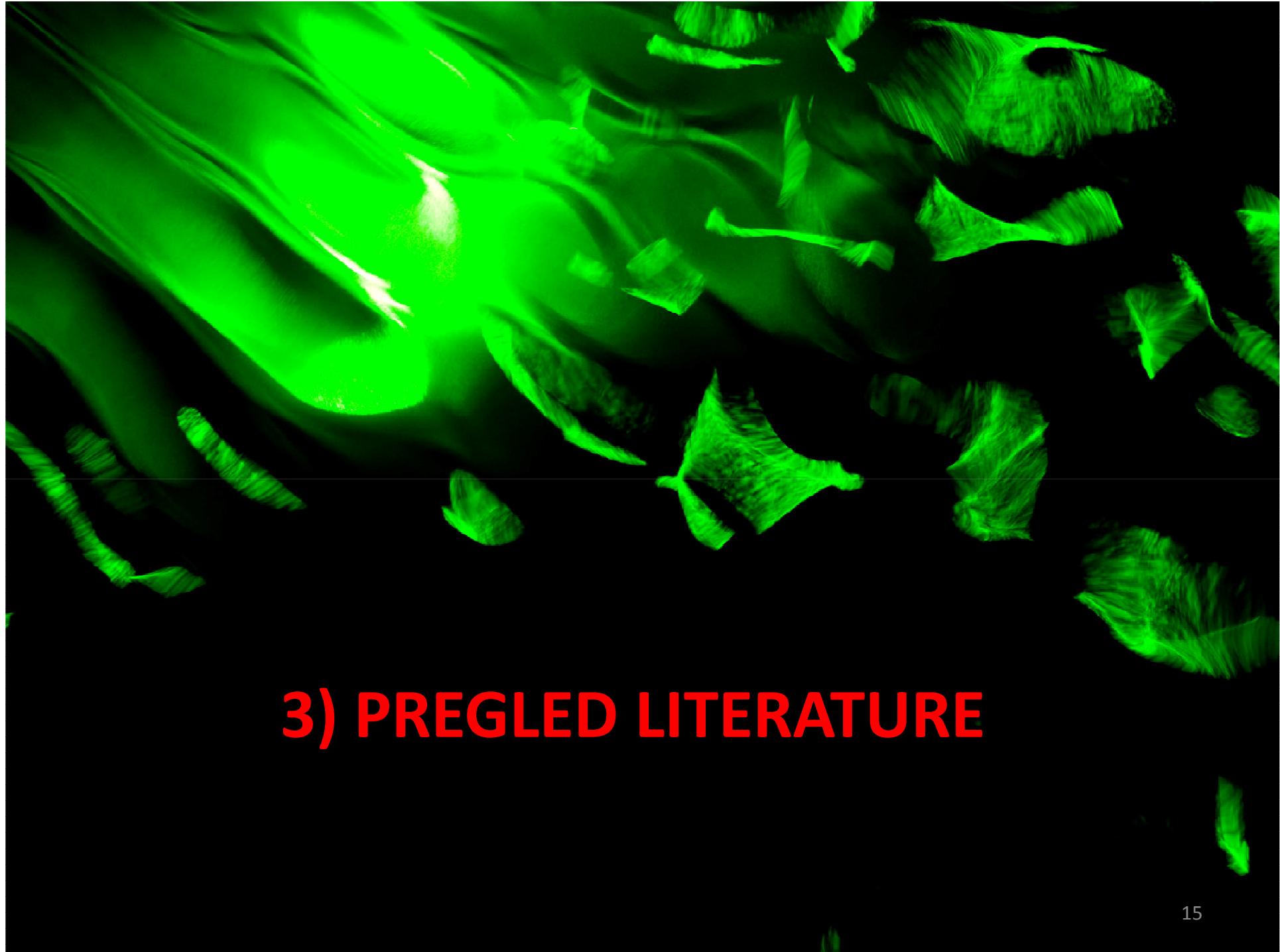
fizikalni proces → rezultati eksperimenta → dimenzijska analiza (brezdimenzijska kvantitativna razmerja) → multiregresija → fenomenološki model

- 1) Buckinghamov Π – teorem: uvedba brezdimenzijskih števil
- 2) linearna regresija: $Y = \Phi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_m) = \beta_0 + \beta_1 \Pi_1 + \dots + \beta_m \Pi_m$
- 3) v modelih pogosto potenčni zakon: $Y = K \cdot \Pi_1^{\beta_1} \cdot \Pi_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot \Pi_m^{\beta_m}$
- 4) logaritmiranje: $\ln Y_m = \ln K + \beta_1 \cdot \ln \Pi_1 + \beta_2 \cdot \ln \Pi_2 + \dots + \beta_m \cdot \ln \Pi_m$
- 5) reševanje sistema linearnih enačb

$$C_d = K \cdot (\Pi_1)^{\beta_1} \cdot (\Pi_2)^{\beta_2} \cdots$$

$$\begin{aligned} AX &= b & A &= \text{matrika } \ln(\Pi_{i, \text{meritev}}) \\ X &= \text{matrika } \ln(\beta_i) \\ b &= \text{matrika } \ln(C_{d, \text{meritev}}) \end{aligned}$$

Matlab → vrednosti β_i in $K \rightarrow C_d$



3) PREGLED LITERATURE

PREGLED LITERATURE

- energijski pristop → enačbe za C_d
- pristop z gibalno količino → tudi koeficienti α_C in α_B
- meritve hitrosti: redki objavljeni rezultati, kontaktne metode

Avtor	Pristop	Rob krone	Režim toka	Tip raziskave
Subramanya in Awasthy (1972)	E	ostri	mirni, deroči	eksperimentalni
El-Khashab in Smith (1976)	G	ostri	mirni, deroči	eksperimentalni, numerični
Ranga Raju in sod. (1979)	E	ostri, široki	mirni	eksperimentalni
Balmforth in Sarginson (1983)	G	ostri	mirni, deroči	eksperimentalni, teoretični
Hager in Volkart (1986)	G	ostri	mirni, deroči	eksperimentalni, teoretični
Singh in sod. (1994)	E	ostri	mirni	eksperimentalni
Swamee in sod. (1994)	E	ostri, široki	mirni	eksperimentalni, teoretični
Borghei in sod. (1999)	E	ostri	mirni	eksperimentalni
Pinheiro in Silva (1999)	E	ostri	mirni	eksperimentalni
May in sod. (2003)	G	ostri, široki	mirni, deroči	eksperimentalni, teoretični
Venutelli (2008)	E	ostri	mirni, deroči	eksperimentalni, numerični
Emiroglu in sod. (2011)	E	ostri	mirni	eksperimentalni
Disertacija	G	ostri	mirni	eksperimentalni

Različne enačbe za C_d

Vir	Enačba za C_d
Nandesamoorthy in sod. (1972)	$C_d = 0,432 [(2 - Fr_I^2)/(1 + 2 Fr_I^2)]^{0,5}$
Subramanya in Awasthy (1972)	$C_d = 0,864 [(1 - Fr_I^2)/(2 + Fr_I^2)]^{0,5}$
Yu-Tech (1972)	$C_d = 0,623 - 0,222 Fr_I$
Ranga Raju in sod. (1979)	$C_d = 0,81 - 0,6 Fr_I$
Cheong (1991)	$C_d = 0,45 - 0,221 Fr_I^2$
Singh in sod. (1994)	$C_d = 0,33 - 0,18 Fr_I + 0,49 (p/h_I)$
Swamee in sod. (1994)	$C_d = 0,447 [((44,7 p)/(49 p + h))^{6,67} + ((h - p)/h)^{6,67}]^{-0,15}$
Jalili in sod. (1996)	$C_d = 0,71 - 0,41 Fr_I - 0,22 (p/h_I)$
Borghei in sod. (1999)	$C_d = 0,7 - 0,48 Fr_I - 0,3 (p/h_I) + 0,06 (L/B)$
May in sod. (2003)	$C_d = 0,650 - 0,149 ((h_2 - p)/p)^{0,0868} (L/(h_2 - p))^{-0,303} (h_2/p)^{0,149}$
Emiroglu in sod. (2011)	$C_d = [0,836 + (-0,035 + 0,39 (p/h_I)^{12,69} + 0,158 (L/B)^{0,59} + 0,049 (L/h_I)^{0,42} + 0,244 Fr_I^{2,125})^{3,018}]^{5,36}$

Vrednosti koeficientov α_C in α_B

Subramanya in Awasthy: $\alpha_{B,1} = 1,02$; $\alpha_{C,1} = 1,04$
(1972)

$$\alpha_{B,2} = \alpha_{C,2} = 1 \text{ (predpostavljen!)}$$

El-Khashab in Smith: $\alpha_{B,1} = 1$; $\alpha_{B,2} = 1,2$
(1976)

Hager: $\alpha_B \cong 1$ $\alpha_C = \left[1 + \left(\frac{q_b}{Q/B} \right)^2 \right]^{4/3} \rightarrow \alpha_{C,1} = 1,02$; $\alpha_{C,2} = 1,18$
(1982)

May in sod.: $\alpha_B = 0,725 + 0,275(\bar{u}_b/\bar{u})$ $\alpha_{C,1} = 1,15$; $\alpha_{C,2} = 1,75$
(2003)



4) IZVEDBA MERITEV

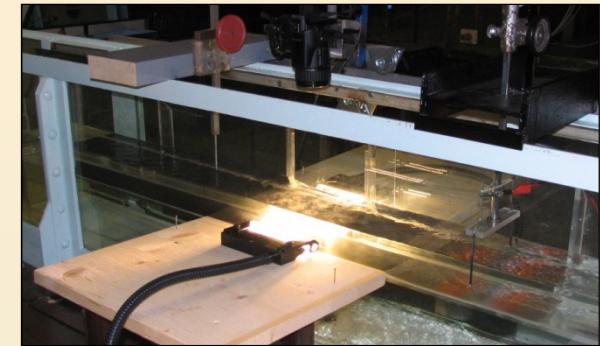
HIDRAVLIČNI MODELI



1) vtočni objekt ČHE Avče
1:28, Hidroinštitut, 2006



2) razbremenilni objekt
1:50, Hidroinštitut, 2010



3) bočni preliv - preliminarni
KMTe, 2011



4) končni – ozko korito ($B = 14$ cm)
KMTe, 2011

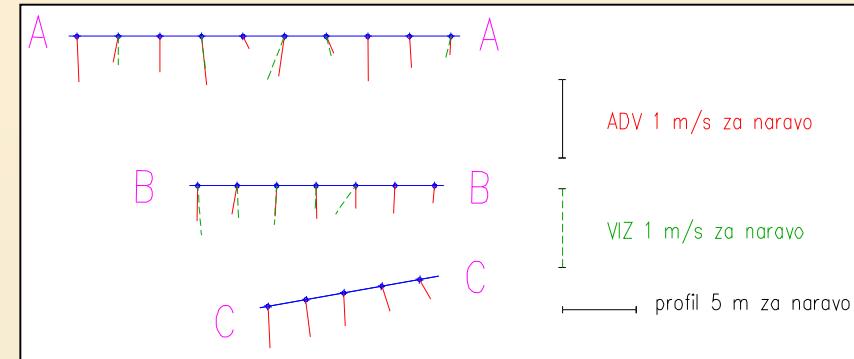


5) končni – širše korito ($B = 30$ cm)
Hidroinštitut, 2011

Robni pogoji relevantnejših raziskav

Avtor	<i>B</i> [cm]	<i>L</i> [cm]	<i>p</i> [cm]	<i>I_d</i> [%]	<i>Q₁</i> [l/s]	<i>B / L</i> [-]	<i>Fr₁</i> [-]	<i>Q_b / Q₁</i> [-]
Subramanya in Awasthy (1972)	24,8 – 61	10 – 15	0 – 51	0	-	1,65 – 6	0,02 – 4,3	-
El-Khashab in Smith (1976)	46	120; 230	10 – 25	razno	≤ 220	0,2 – 0,38	≤ 1,2	0,3 – 0,8
Ranga Raju in sod. (1979)	40 – 100	20; 50	5 – 25	0	-	0,8 – 5	0,1 – 0,5	-
Balmforth in Sarginson (1983)	100	46 – 76	4 – 12	-	-	0,46 – 0,76	razno	-
Hager in Volkart (1986)	30	100	0 – 20	-4 – 5	0 – 45	0,3	0,3 – 2	-
Singh in sod. (1994)	25	10 – 20	6 – 12	-	10 – 14	1,25 – 2,5	0,2 – 0,4	-
Swamee in sod. (1994)	50	20 – 50	0 – 60	0	20 – 100	1 – 2,5	0,1 – 0,93	-
Borghei in sod. (1999)	30	20 – 70	1; 10; 19	-0,5 – 1	35 – 100	0,43 – 1,5	0,1 – 0,9	-
Pinheiro in Silva (1999)	50	150, 200	20	-	30 – 150	0,25 – 0,33	< 1	0,25 – 0,75
May in sod. (2003)	21 – 60	20 – 100	5 – 25	0	-	0,21 – 3	< 1	0,08 – 1
Venutelli (2008)	-	-	15 – 20	0,2 – 0,5	38,8 – 39,1	-	-	0,24 – 0,50
Emiroglu in sod. (2011)	50	15 – 150	12 – 20	-	10 – 150	0,33 – 3,33	0,08 – 0,92	-
Skupaj (razpon)	21 – 100	10 – 200	0 – 25	-4 – 5	0 – 220	0,21 – 5	0,02 – 4,3	0,08 – 1
Disertacija	14 ; 30	10 – 100	7,5 – 20	0,05	3,3 – 34,6	0,3 – 1,4	0,23 – 0,41	0,12 – 0,76

Model 1: vtočni objekt ČHE Avče



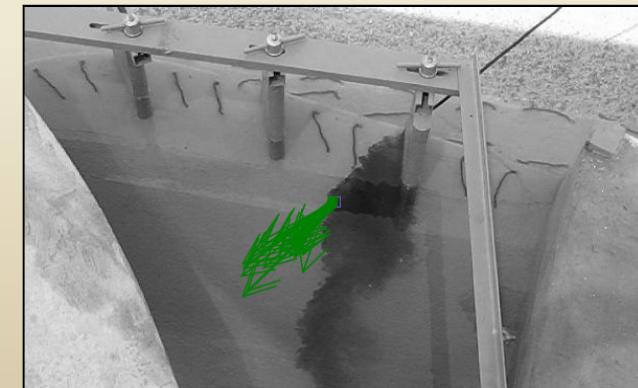
Uporaba obstoječih rezultatov (2006):

- meritve hitrosti na vtočnem delu (2D ADV sonda)
- kvalitativna analiza tokovnic in premeščanja plavin (hipermangan, modelni pesek)



Nadgradnja:

- ✓ kvantitativna analiza (vizualizacijska metoda)
- ✓ metoda zelo uporabna (ob selekciji starih posnetkov glede na osvetljenost, kontrast, odblesk gladine)
- ✓ izračunane hitrosti \cong rezultati ADV



Model 2: razbremenilni objekt na spodnji Savi

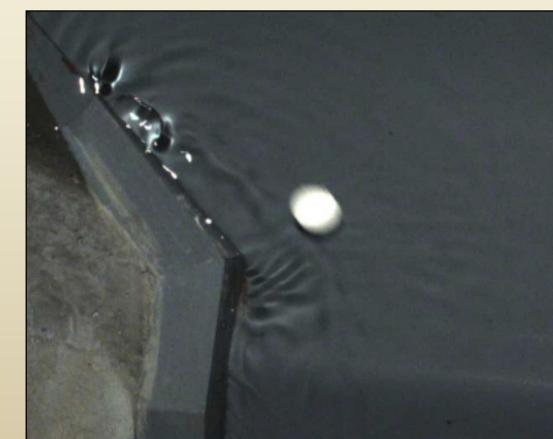
Preliminarne raziskave:

- merilni most (ADV, laser, UZ), piez.
- hipermangan, plovci
- izboljšati vnos barvila (elektroliza)

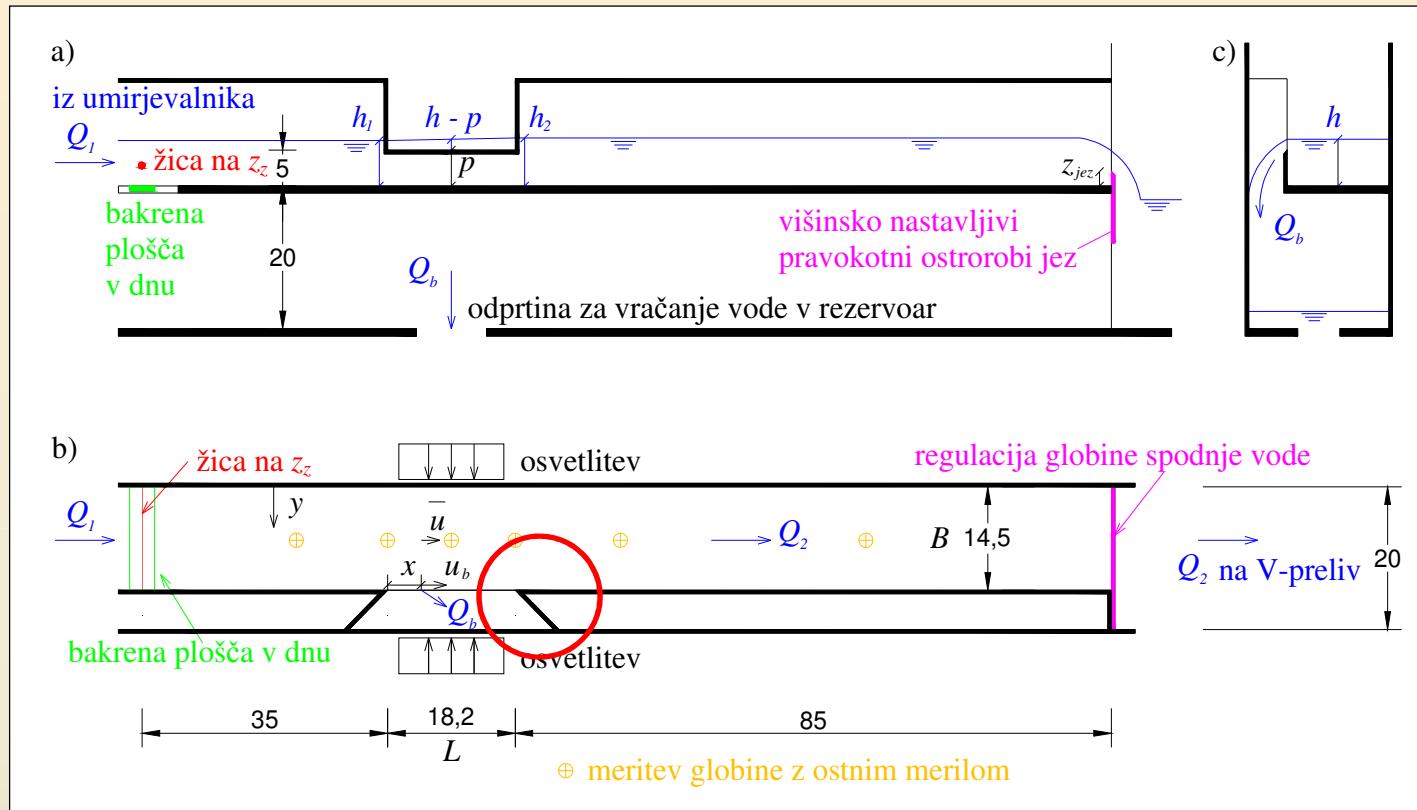
Rezultati:

- ✓ bočno le manjši del dotoka
- ✓ hitrosti neenakomerne
- ✓ $u = 30 \text{ cm/s}$, $w = 2 \text{ cm/s}$
- ✓ vrtinčenje na začetku preliva

➤ izboljšati: merilni most; elektroliza



Model 3: bočni preliv - preliminarni (KMTe)



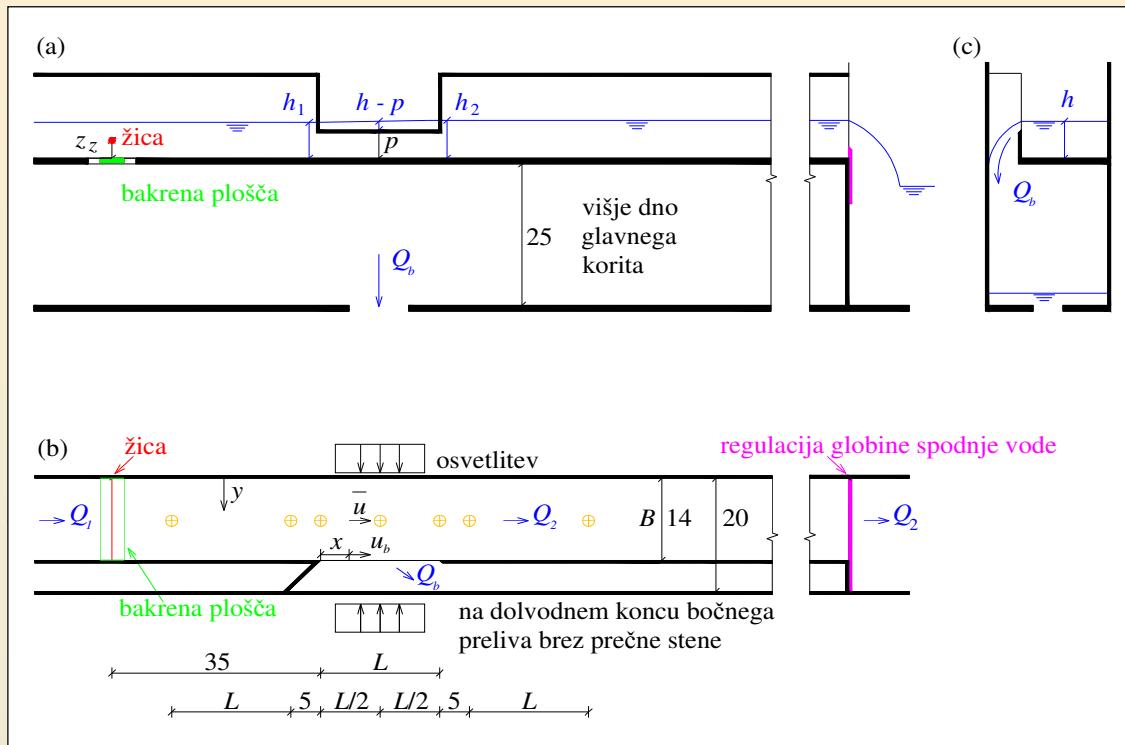
Značilnosti:

- ostna merila, Q-H krivulja za V-preliv (Q_2)
- ena kombinacija L, p ; variante Q_1 in z_{jez}
- optimiziranje: el. tok, pozicija žičke, osvetlitev

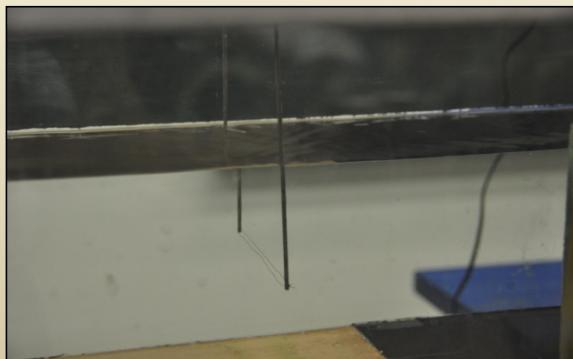
Rezultati:

- ✓ hitrostna polja (4 ravnine z_z)
- izboljšati:
krilna stena (neoviran Q_b)

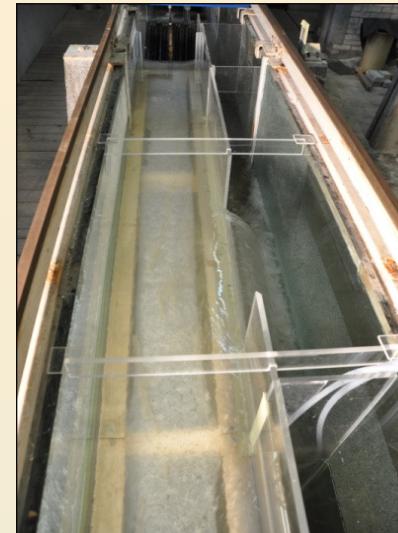
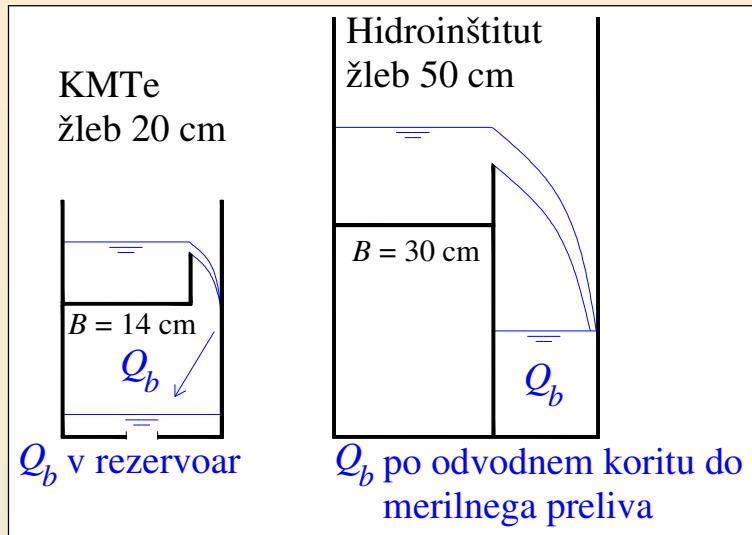
Model 4: bočni preliv – ozko korito (KMTe)



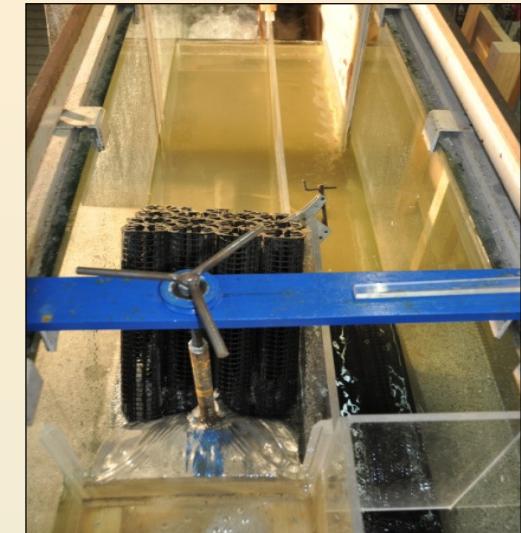
- brez krilne stene, ožje korito, višje dno
 - izboljšana osvetlitev
 - dodajanje soli
 - 6 prelivov (var. L_p)
 - za vsak preliv 9 kombinacij Q_1 in z_{jez}
 - 5 globin z_z
 - $x/L = -0,25$ do $1,25$
 - laser



Model 5: bočni preliv – široko korito (Hidroinštitut)



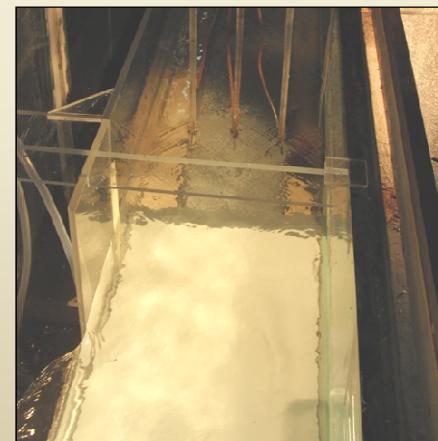
vzporedni kanal



umirjevalniki toka



hipermangan

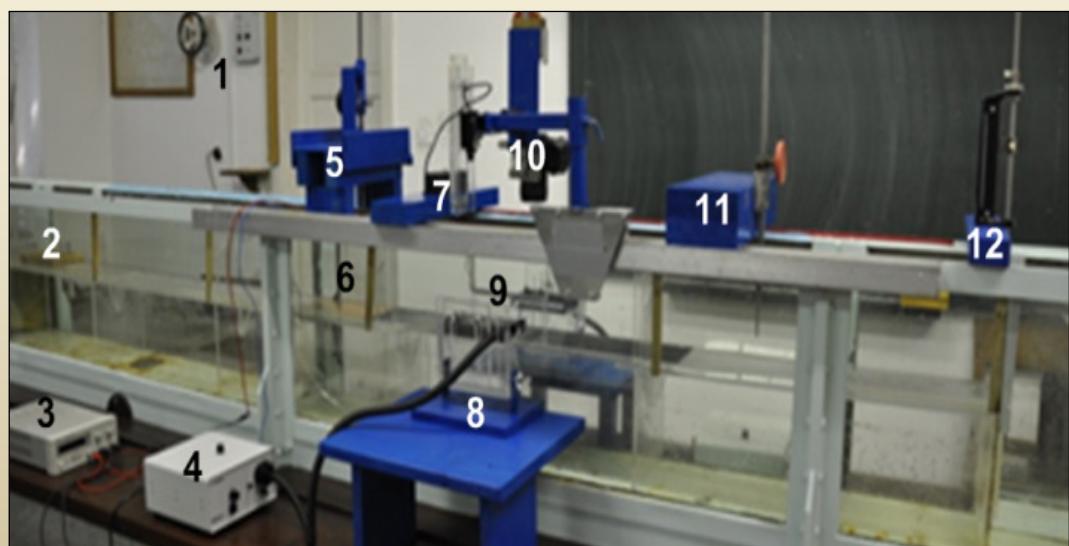
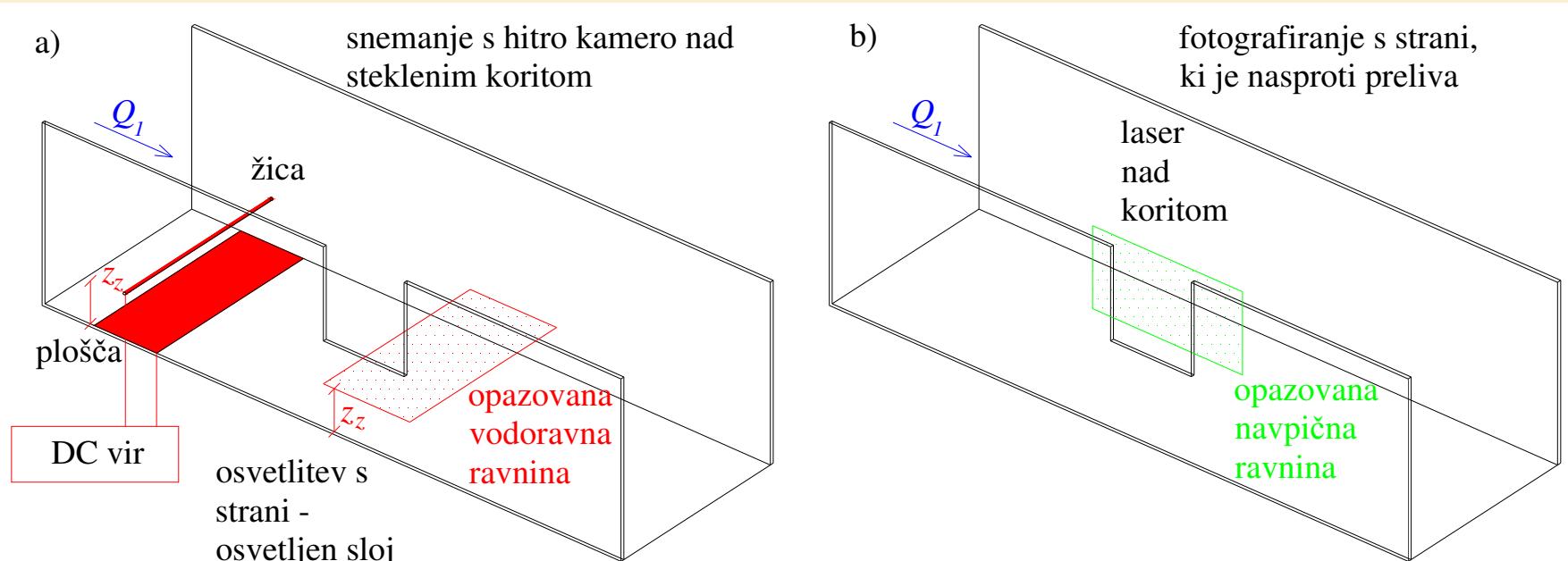


injekcijske igle



bolj "kontaktna" metoda

Merilna oprema (model KMTe)



- 1) regulacija in meritev dotoka Q_1
- 2) umirjevalni del steklenega korita
- 3) vir enosmerne napetosti
- 4) svetlobni vir
- 5) nastavljanje pozicije žičke
- 6) žička na višini z_z
- 7) laser
- 8) optični kabel in ravninska leča
- 9) krona bočnega preliva
- 10) digitalna kamera
- 11) ostno merilo na tračnicah
- 12) ostno merilo za merjenje z_{jez}

Primer: Vektorji hitrosti po širini glavnega korita

snemanje → film v slike (Bink RAD Video Tools) → ČB slike (Matlab) → uvoz bmp
→ nastavitev (vmesnik) → račun → rezultati txt, bmp → xls

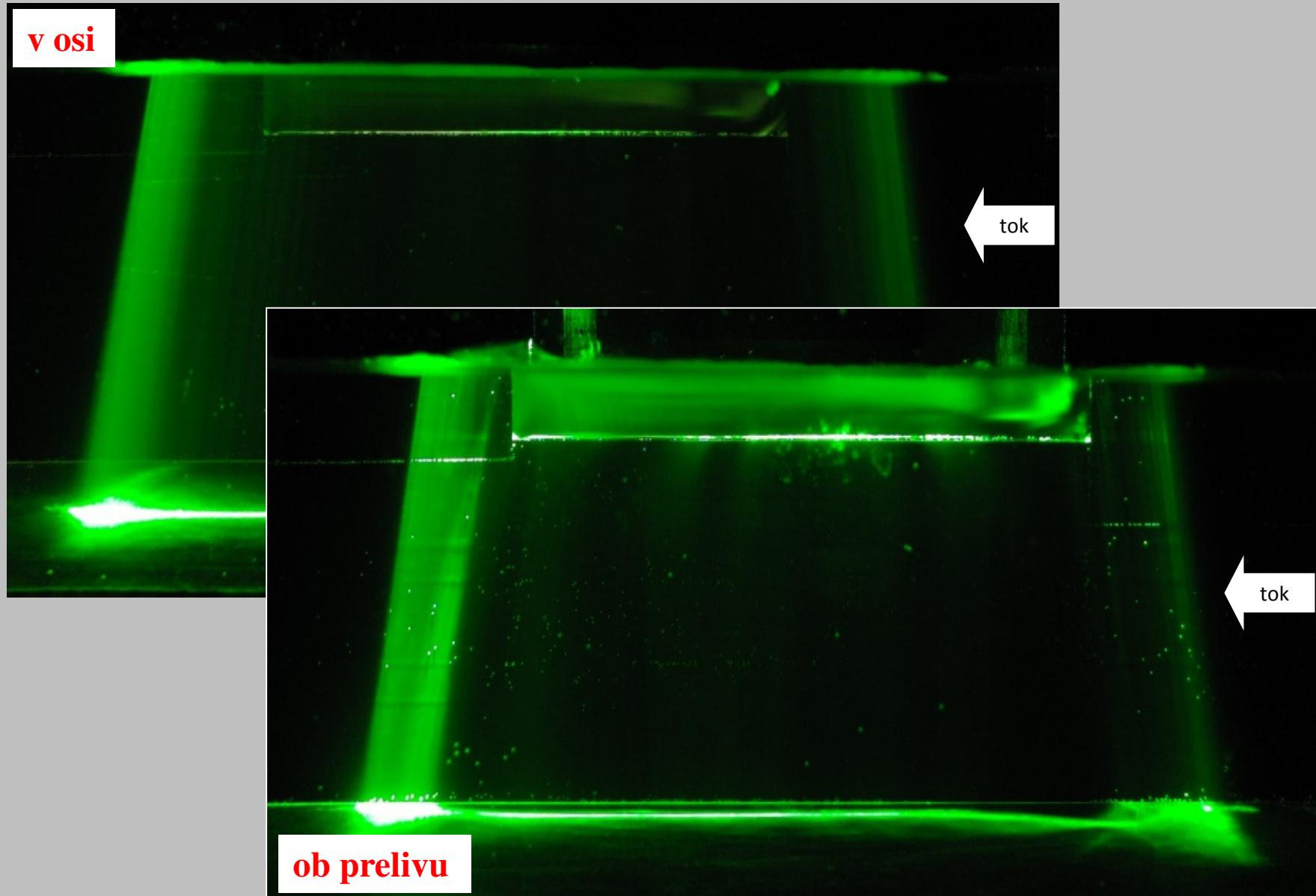


Film

L10_p7,5Q3Z3_A; 300 fps; 1 s na modelu



Primer: Vzdolžní prerez gladine



Merilna negotovost

1) Meritve Q : merilni prelivi (prečni, ne bočni!) ← ISO 1438:2008, ISO/TS 25377:2007

za V-preliv: enačba Kindsvater – Shen:

$$Q_t = C_{d,t} \cdot \frac{8}{15} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \sqrt{2g} \cdot h_e^{5/2}$$

$$u_c^*(Q)_r = \sqrt{u^*(C_{d,r})^2 + u^*(b_e)^2 + [1,5u^*(h_e)]^2}$$

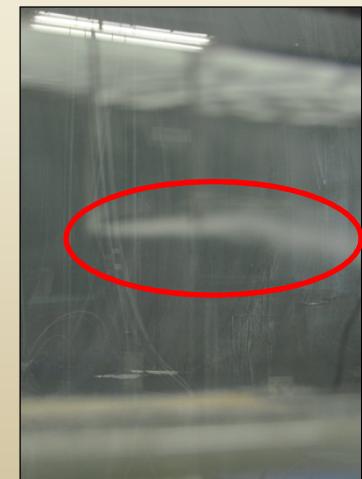
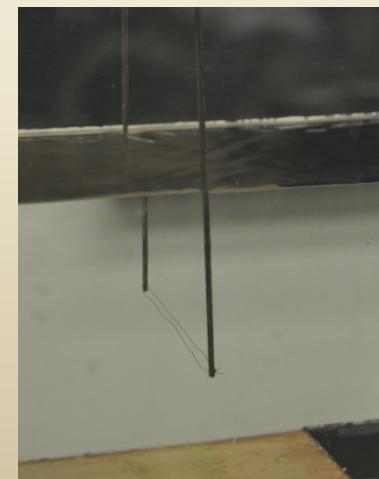
$$u_c^*(Q)_t = \sqrt{u^*(C_{d,t})^2 + u^*[\tan(\alpha/2)]^2 + [2,5u^*(h_e)]^2} = 2\%$$

2) Meritve \bar{u} : nestandardna metoda

Možni vzroki negotovosti pri uporabi vodikovih mehurčkov:

- premik tokovnic zaradi vzgona
 - vstopna dolžina pospeševanja mehurčkov
 - brazda, ki nastane za žico v toku
 - čas razpada mehurčka zaradi absorpcije
- ← optimizacija, umerjanje

$$u_c^*(\bar{u}) = \sqrt{u^*(t)^2 + u^*(x)^2} = 2\%$$



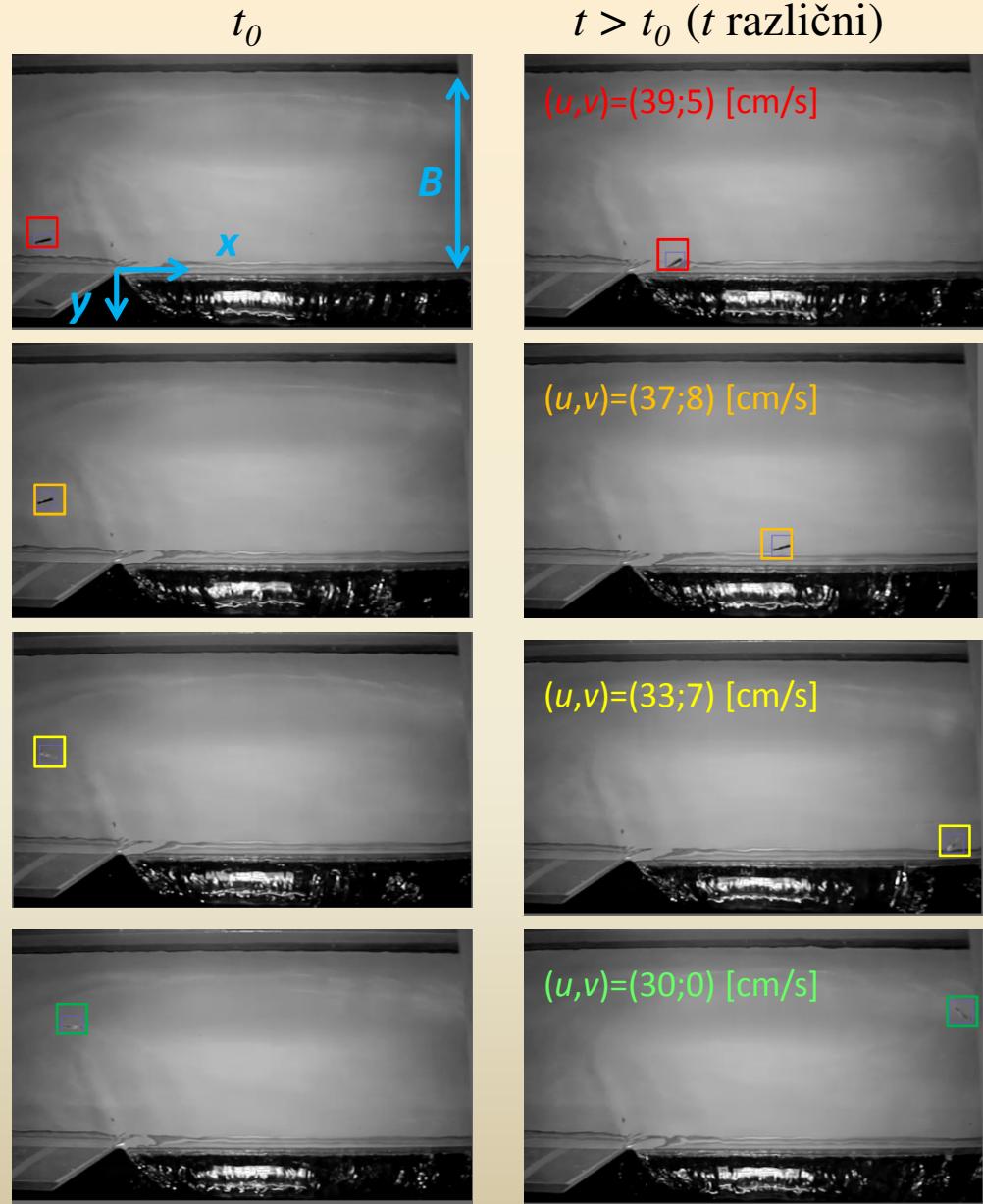
Umerjanje nastavitev vizualizacijske metode

$$\bar{u}_{plovec} = x[\text{pixel}] / t[\text{s}]$$

$$\bar{v}_{plovec} = y[\text{pixel}] / t[\text{s}]$$



Zgoraj: Vsaka 50. slika filma 300 fps

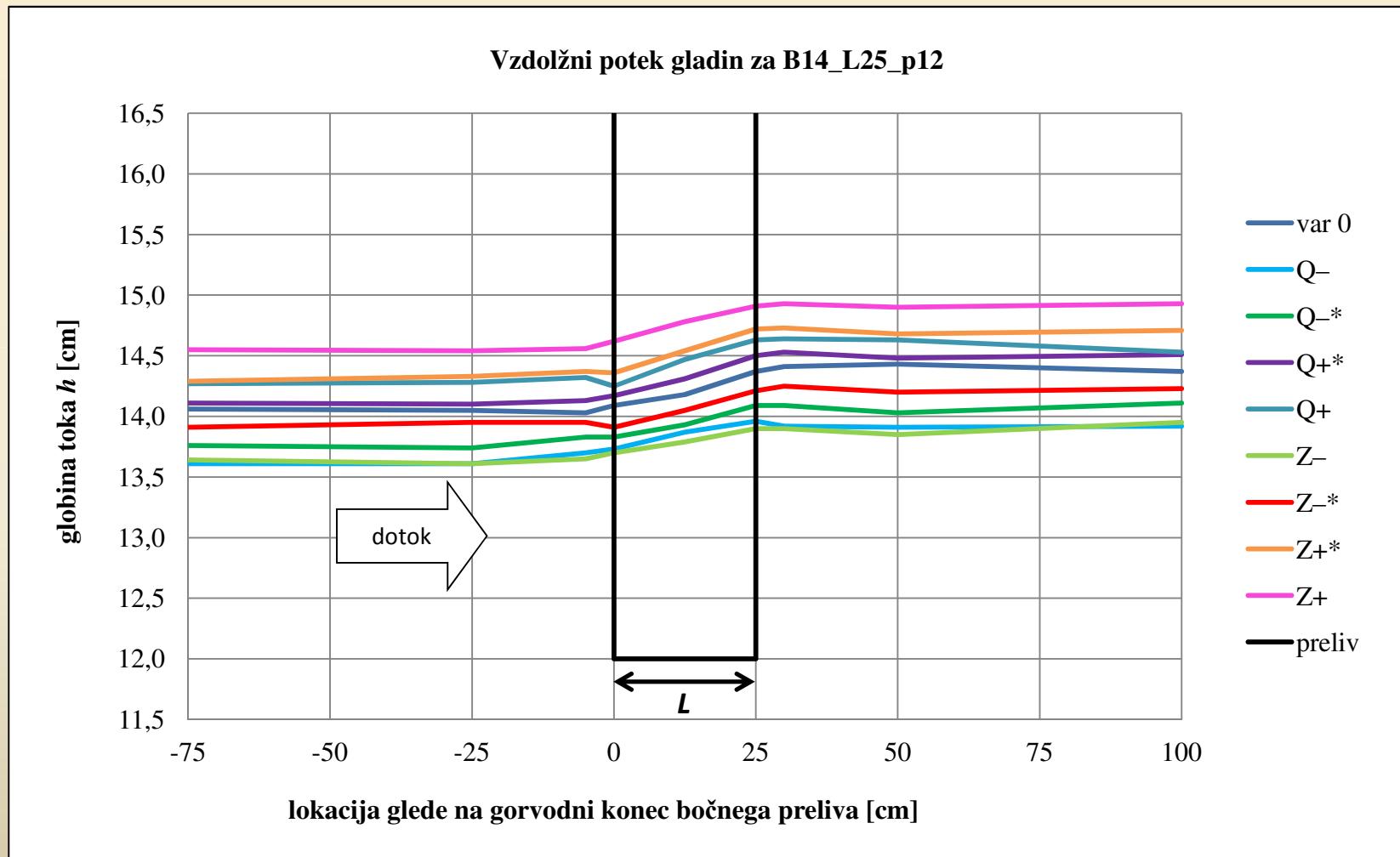




5) REZULTATI MERITEV

IZMERJENI POTEK GLADIN – V OSI GLAVNEGA KORITA

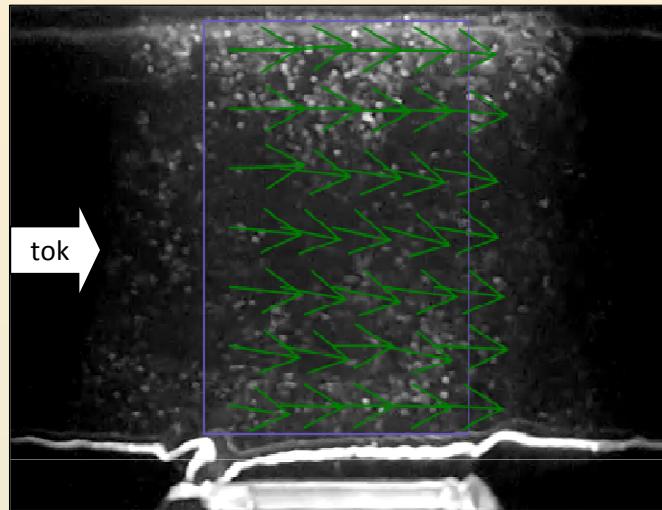
merjeno: z_{dno} , z_{jez} , h → izvrednoteno: pretoki, potek gladin → C_d



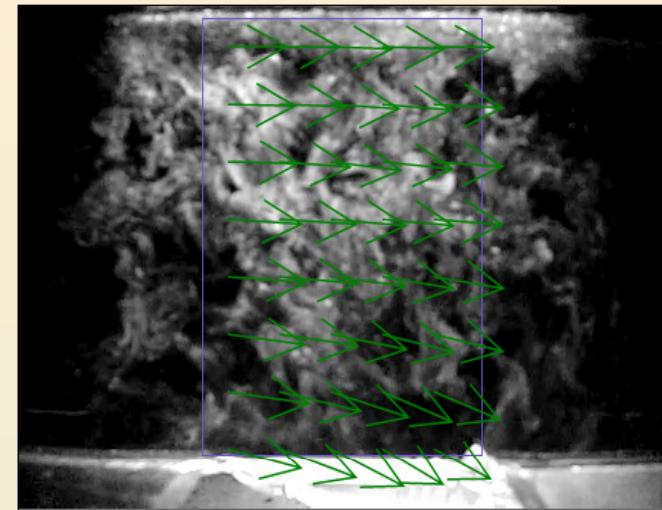
IZMERJENA HITROSTNA POLJA

posnetki premikanja sledila → izvrednoteno: $u_i, v_i \rightarrow a_C, a_B (\rightarrow E)$

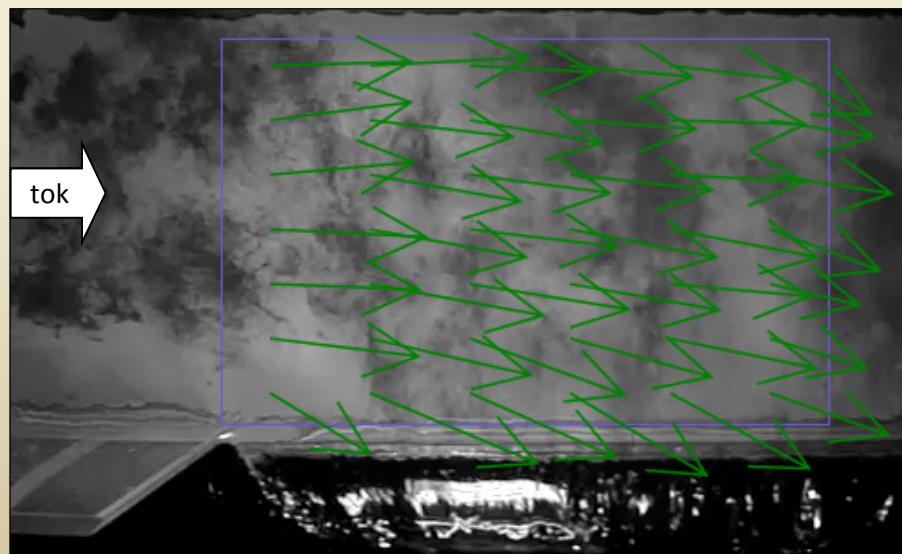
L10_p7,5
 $z_z = p/3$



L10_p7,5
 $z_z = h - 0,5 \text{ cm}$



L50_p12_B30
 $z_z = p$
temno sledilo
na svetli podlagi



- ob dnu vzporedni
- se manjšajo v smeri x
- $z_z < p/3$: manjši
- $z_z \geq p$: večji + odklon
- kot curka se vzdolž x veča
- $x/L = 0$: odlepljanje
- $x/L = 1$: stoječi valovi
- $x/L = 1$ nasproti krone:
zastojna cona (pri visoki h_2)

Primer: Komponente hitrosti za posamezno varianto

<i>x/L</i>	-0,25		0 (odlepjanje)		0,25		0,50		0,75		1 (valovi)		1,25	
<i>zz</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
ravnina A; <i>zz</i> = 12 cm	36,6	0,4	39,1	1,5	37,7	4,2	34,9	5,7	33,9	6,6	33,0	3,1	32,9	1,0
	35,8	1,7	37,7	2,4	35,7	4,8	36,4	5,4	35,9	6,2	31,4	4,0	31,5	1,5
	36,3	0,8	38,4	2,0	36,8	4,7	36,2	5,4	35,3	6,1	32,5	3,3	32,7	1,1
	36,2	1,0	38,4	2,0	36,7	4,6	35,8	5,5	35,0	6,3	32,3	3,5	32,4	1,2
	<i>u b</i>	<i>v b</i>	<i>u b</i>	<i>v b</i>	<i>u b</i>	<i>v b</i>	<i>u b</i>	<i>v b</i>	<i>u b</i>	<i>v b</i>	<i>u b</i>	<i>v b</i>	<i>u b</i>	<i>v b</i>
	-	-	39,5	5,1	35,1	15,6	35,5	11,1	34,6	11,8	31,2	12,1	-	-
	-	-	39,7	4,6	36,0	16,6	35,1	11,8	35,3	13,2	33,6	13,1	-	-
	-	-	39,1	5,3	35,3	17,1	35,9	12,8	35,4	13,0	33,1	11,8	-	-
			39,4	5,0	35,5	16,4	35,5	11,9	35,1	12,7	32,6	12,3		
ravnina B; <i>zz</i> = 10 cm	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
	36,6	0,1	38,1	1,6	35,8	3,8	35,1	5,1	34,7	5,7	28,4	4,1	29,9	1,8
	35,8	1,0	37,4	2,1	35,6	4,2	36,1	5,2	35,2	5,5	28,5	4,0	30,6	1,8
	37,0	0,7	38,6	1,7	36,8	4,1	34,9	5,4	34,2	5,8	28,7	3,2	31,3	1,2
	36,5	0,6	38,0	1,8	36,1	4,0	35,4	5,2	34,7	5,7	28,5	3,8	30,6	1,6
	<i>u b</i>	<i>v b</i>	<i>u b</i>	<i>v b</i>	<i>u b</i>	<i>v b</i>	<i>u b</i>	<i>v b</i>	<i>u b</i>	<i>v b</i>	<i>u b</i>	<i>v b</i>	<i>u b</i>	<i>v b</i>
	-	-	33,9	5,6	34,0	13,9	34,9	13,1	34,6	11,7	30,1	11,8	-	-
	-	-	35,6	5,3	36,4	13,0	35,0	12,4	34,4	11,5	30,7	13,3	-	-
	-	-	35,0	4,8	35,3	12,9	34,7	11,9	33,7	11,1	31,4	12,4	-	-
			34,8	5,2	35,2	13,3	34,9	12,5	34,2	11,4	30,7	12,5		
C; <i>zz</i> = 6,7 cm	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
	31,3	0,9	36,1	1,9	32,0	1,8	32,7	2,1	32,8	2,0	28,5	0,5	28,0	0,0
	31,9	1,1	36,0	1,2	32,3	2,0	33,9	2,6	32,5	2,4	24,5	0,0	26,4	0,1
	31,3	1,4	35,5	1,4	31,2	1,6	33,9	1,8	32,6	2,1	27,9	1,4	26,6	1,1
	31,5	1,1	35,9	1,5	31,8	1,8	33,5	2,2	32,6	2,2	27,0	0,6	27,0	0,4
	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
	26,4	0,0	29,9	(-0,1)	23,3	0,3	28,0	0,6	26,5	(-0,3)	21,2	(-0,6)	20,6	(-1,6)
	25,0	(-0,3)	29,7	(-0,8)	24,8	0,4	28,4	0,8	26,4	0,1	19,1	(-0,7)	22,4	(-0,9)
	27,3	0,5	30,4	0,4	24,5	0,9	28,0	0,6	26,6	0,1	20,5	(-0,2)	24,1	(-0,5)
	26,2	0,3	30,0	0,4	24,2	0,5	28,1	0,7	26,5	0,1	20,3	#DEL/0!	22,4	#DEL/0!
D; <i>zz</i> = 3,3 cm	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
	19,6	0,8	24,4	0,3	17,8	(-1,0)	23,0	(-0,2)	23,1	(-0,6)	17,5	1,0	neup.	neup.
	19,8	0,8	23,2	(-0,9)	18,1	(-1,5)	23,7	(-0,2)	21,7	(-0,6)	18,1	1,0		
	19,2	1,1	23,7	(-0,9)	18,1	(-2,0)	22,6	0,0	21,7	(-0,7)	20,1	1,1		
	19,5	0,9	23,8	0,3	18,0	#DEL/0!	23,1	0,0	22,2	#DEL/0!	18,6	1,0	#DEL/0!	#DEL/0!
E; <i>zz</i> = 0,5 cm	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>	<i>u</i>	<i>v</i>
	19,6	0,8	24,4	0,3	17,8	(-1,0)	23,0	(-0,2)	23,1	(-0,6)	17,5	1,0	neup.	neup.
	19,8	0,8	23,2	(-0,9)	18,1	(-1,5)	23,7	(-0,2)	21,7	(-0,6)	18,1	1,0		
	19,2	1,1	23,7	(-0,9)	18,1	(-2,0)	22,6	0,0	21,7	(-0,7)	20,1	1,1		
	19,5	0,9	23,8	0,3	18,0	#DEL/0!	23,1	0,0	22,2	#DEL/0!	18,6	1,0	#DEL/0!	#DEL/0!

Korekcija zaradi projekcije; upoštevanje deležev prečnega prereza

	izmerjena velikost pike		korekcijski faktor	
globina	smer x	smer y	smer x	smer y
A	0,00048	0,00043	0,96	0,86
B	0,00045	0,00045	0,91	0,90
C	0,00048	0,00046	0,97	0,93
D	0,00054	0,00054	1,09	1,09
E	0,00055	0,00056	1,10	1,13



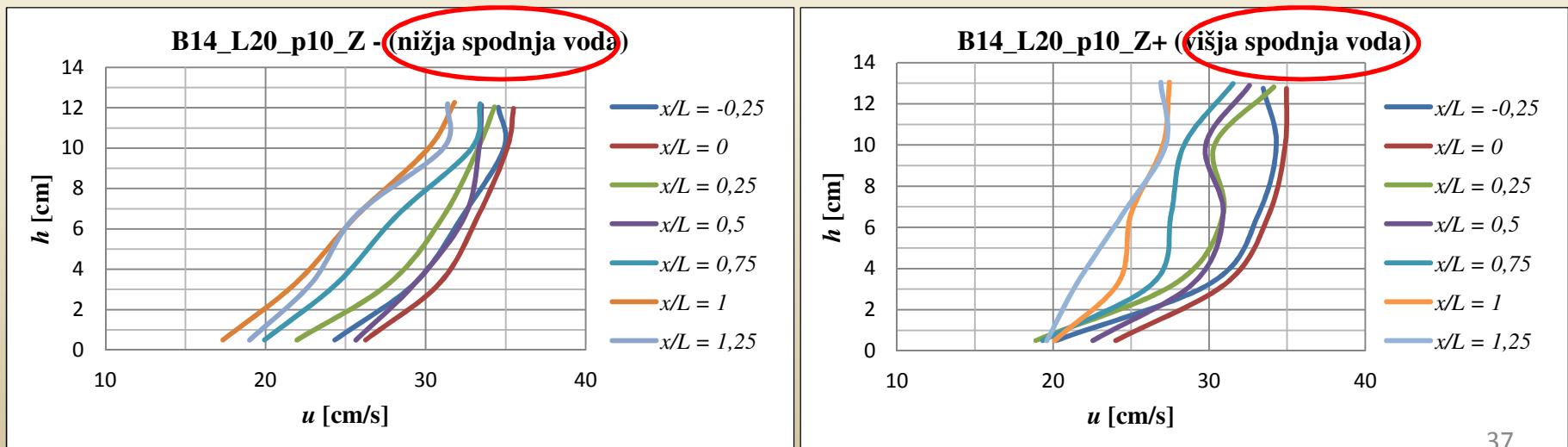
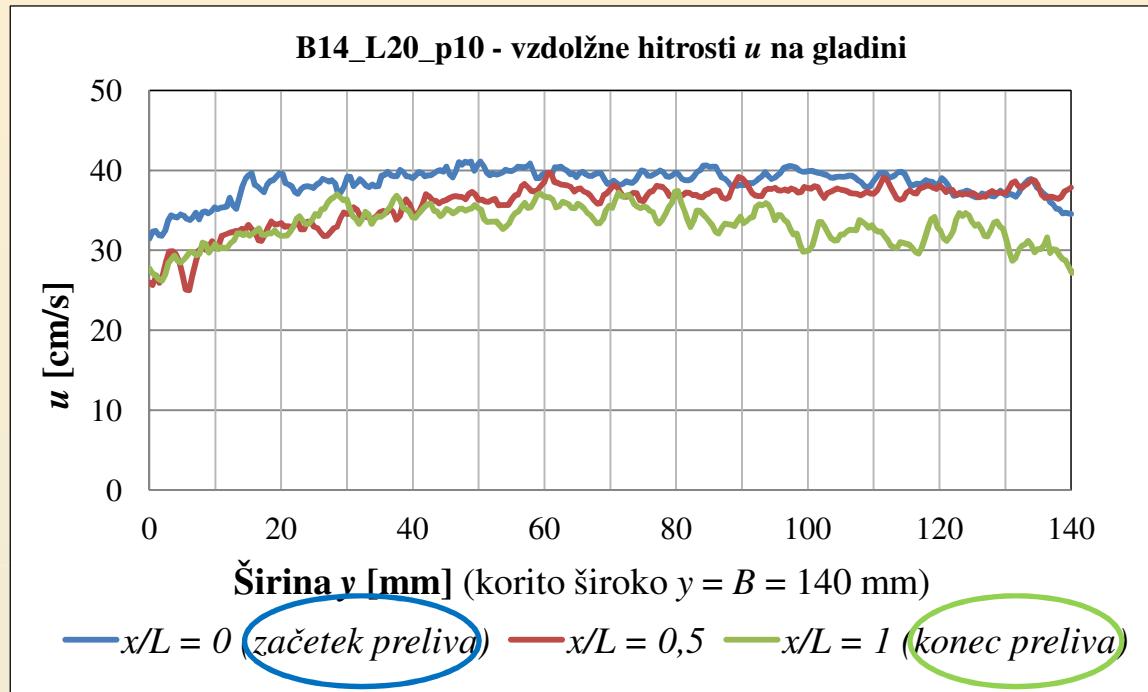
\bar{u}

x/L	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (valovi)			1,25		
z_z	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.
A	34,9	0,8	34,9	37,0	1,7	37,1	35,4	3,9	35,6	34,5	4,8	34,9	33,8	5,4	34,2	31,1	3,0	31,3	31,2	1,0	31,2
B	33,2	0,5	33,2	34,6	1,6	34,6	32,8	3,6	33,0	32,2	4,7	32,5	31,5	5,1	32,0	25,9	3,4	26,2	27,8	1,4	27,9
C	30,5	1,1	30,5	34,7	1,4	34,8	30,8	1,7	30,9	32,4	2,0	32,5	31,6	2,0	31,7	26,1	0,6	26,1	26,2	0,4	26,2
D	28,6	0,3	28,6	32,7	0,4	32,7	26,4	0,6	26,4	30,7	0,7	30,7	28,9	0,1	28,9	22,1	0,3	22,1	24,4	0,3	24,4
E	21,4	1,0	21,4	26,0	0,3	26,0	19,7	0,2	19,7	25,3	0,0	25,3	24,3	0,0	24,3	20,3	1,2	20,4	20,0	0,0	20,0
poprečje	29,7	0,7	29,7	33,0	1,1	33,0	29,0	2,0	29,1	31,0	2,4	31,2	30,0	2,5	30,2	25,1	1,7	25,2	25,9	0,6	25,9
ponder.	29,8			33,3			29,1			31,2			30,2			24,9			25,9		

\bar{u}_b

nad krono bočnega preliva	x/L	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (valovi)		
	z_z	u_b	v_b	vel.	u_b	v_b	vel.	u_b	v_b	vel.	u_b	v_b	vel.	u_b	v_b	vel.
	A	38,0	4,3	38,3	34,2	14,2	37,0	34,2	10,3	35,7	33,8	10,9	35,6	31,5	10,7	33,2
B	31,7	4,7	32,0	32,0	11,9	34,2	31,7	11,2	33,6	31,1	10,3	32,8	27,9	11,2	30,1	
poprečje	34,8	4,5	35,1	33,1	13,1	35,6	33,0	10,7	34,7	32,5	10,6	34,2	29,7	10,9	31,7	

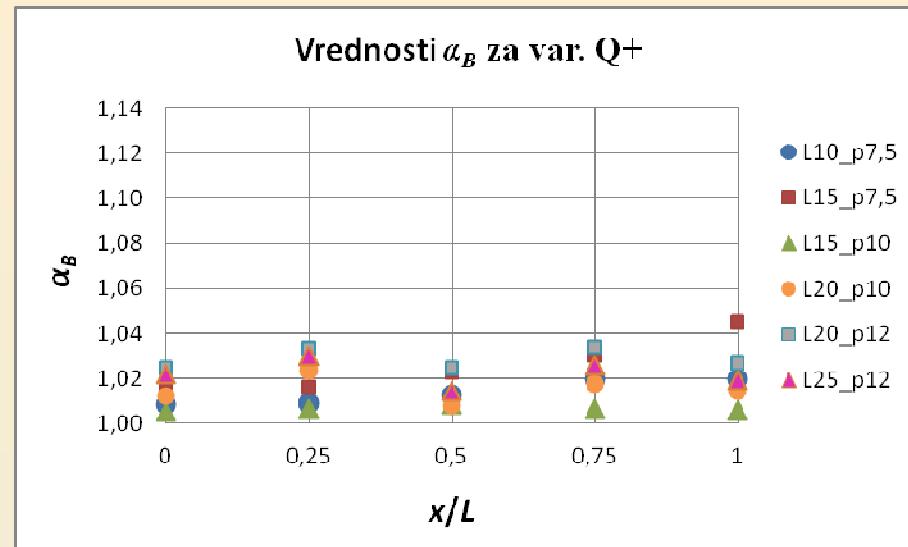
Različni prikazi izmerjenih hitrosti





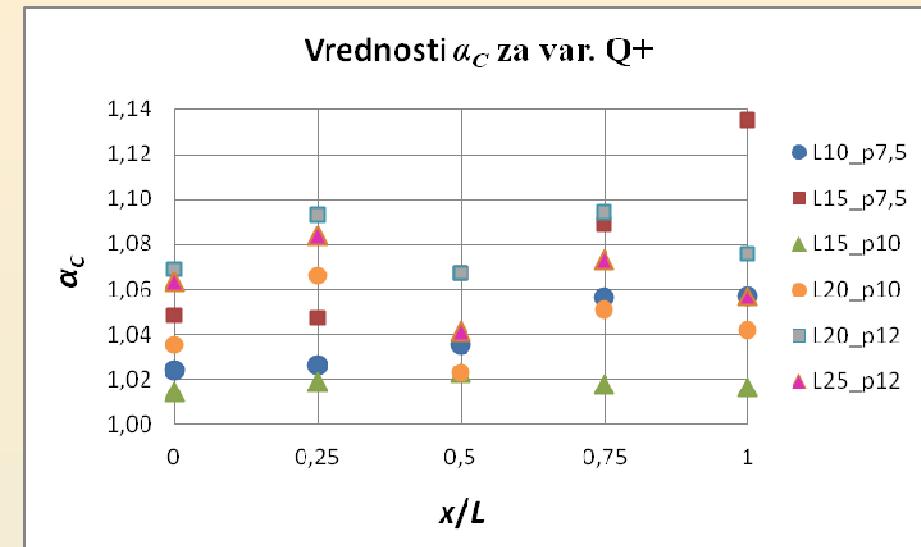
6) ANALIZA IN SINTEZA

1) VREDNOSTI KOEFICIENTOV α_B in α_C



$$\alpha_{B,1} = 1 \text{ do } 1,02$$

$$\alpha_{B,2} = 1 \text{ do } 1,04$$



$$\alpha_{C,1} = 1,01 \text{ do } 1,07 \quad \alpha_{C,2} = 1,02 \text{ do } 1,14$$

$$\alpha_B \approx 1$$

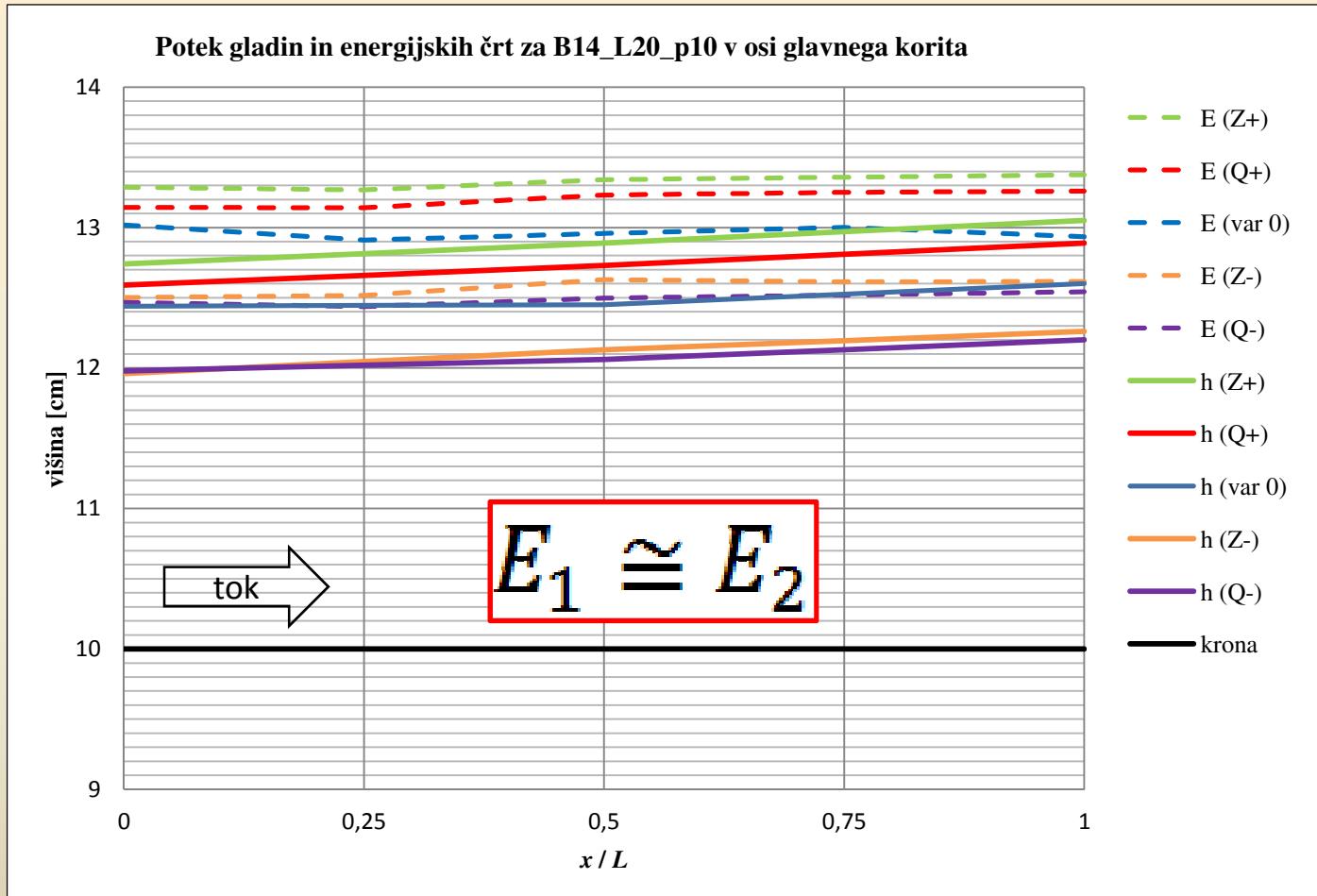
$$\alpha_C = 1 \text{ do } 1,15$$

var.	Hagerjev model		naši rezultati		razlika [%]	
	$\alpha_{C,1}$	$\alpha_{C,2}$	$\alpha_{C,1}$	$\alpha_{C,2}$	$\alpha_{C,1}$	$\alpha_{C,2}$
0	1,03	1,05	1,03	1,05	0	0
Q-	1,02	1,04	1,04	1,05	2	1
Q+	1,03	1,06	1,04	1,04	1	-2
Z-	1,01	1,02	1,02	1,10	1	7
Z+	1,04	1,09	1,03	1,02	-1	-7
Q-*	1,02	1,04				
Q+*	1,03	1,05				
Z-*	1,02	1,04				
Z+*	1,03	1,07				

hitrostna polja
niso bila
merjena

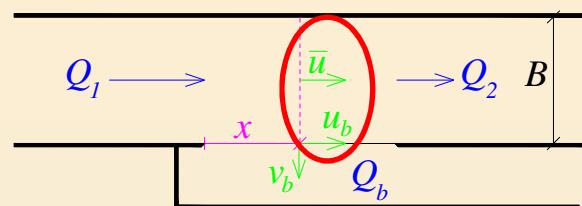
2) POTEK E - črte

specifična energija v posameznem prečnem prerezu: $E = Z_{dno} + h + \alpha_c \frac{\bar{u}^2}{2g}$



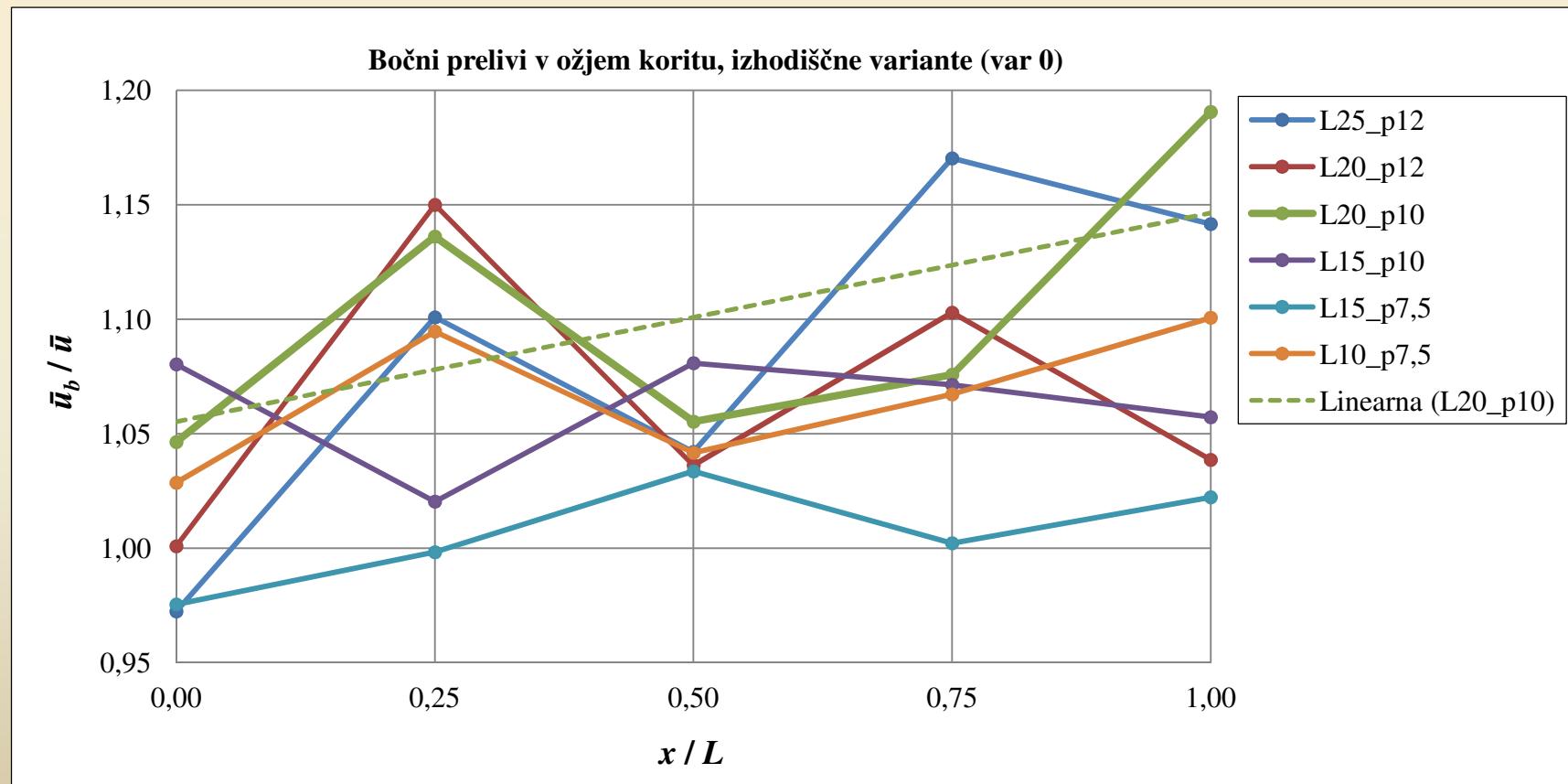
izgube ΔE le zaradi trenja, obravnavani bočni prelivи ne povzročajo opaznih ΔE_{lok}

3) RAZMERJA \bar{u}_b / \bar{u}

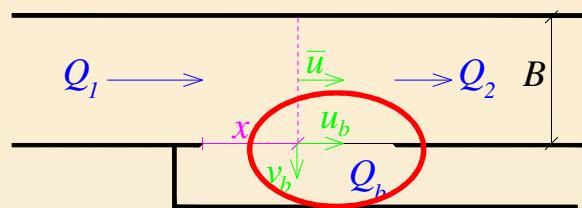


Primer: $x/L = 0: \bar{u}_b/\bar{u} = 0,95 \text{ do } 1,08$
 $x/L = 1: \bar{u}_b/\bar{u} = 1,03 \text{ do } 1,19$

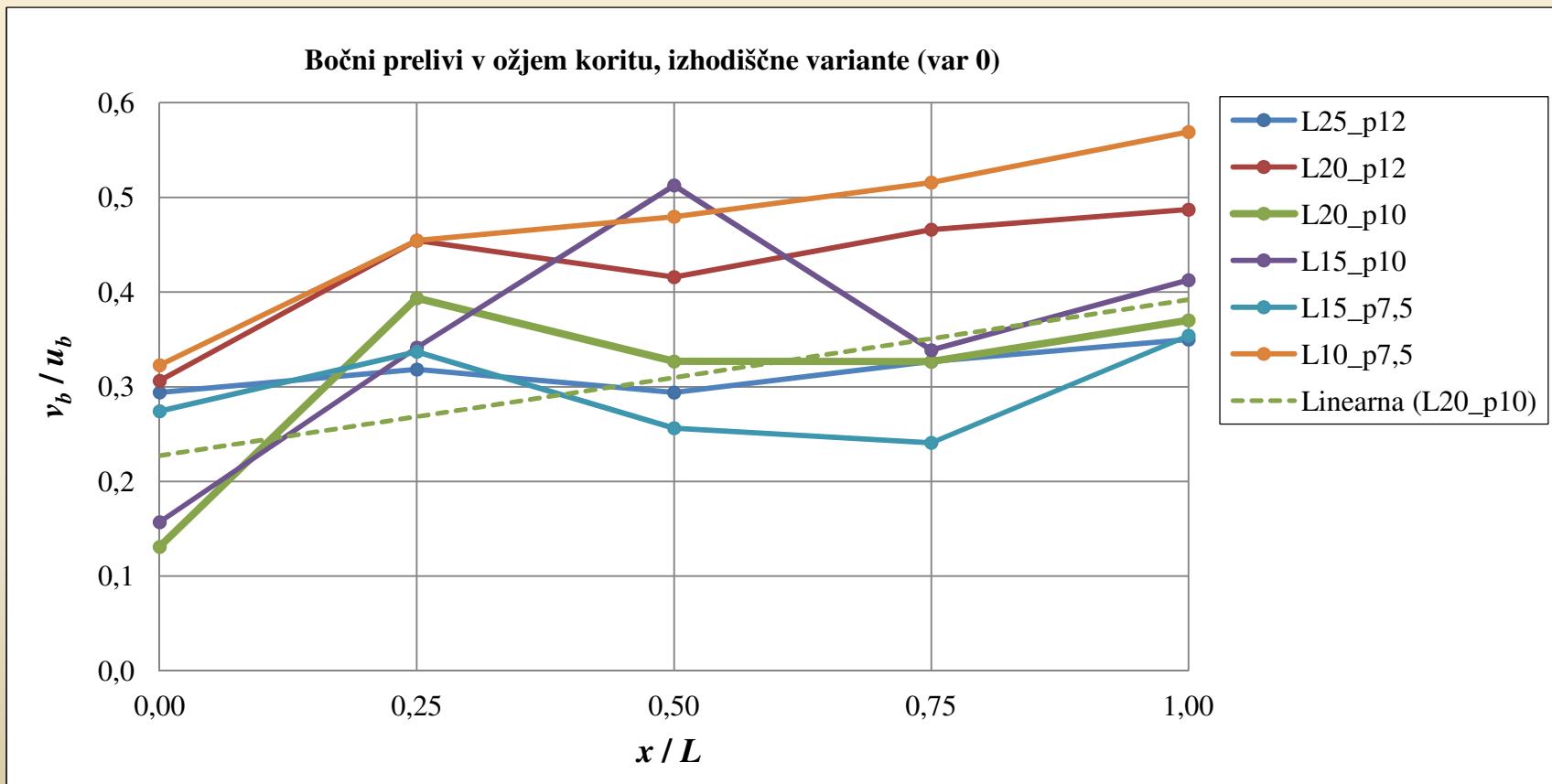
Vsi prelivi: \bar{u}_b/\bar{u} narašča z x/L in znaša od 1 do 1,25
 (May in sod.: $\bar{u}_b/\bar{u} = \text{konst.} = 1,84$)



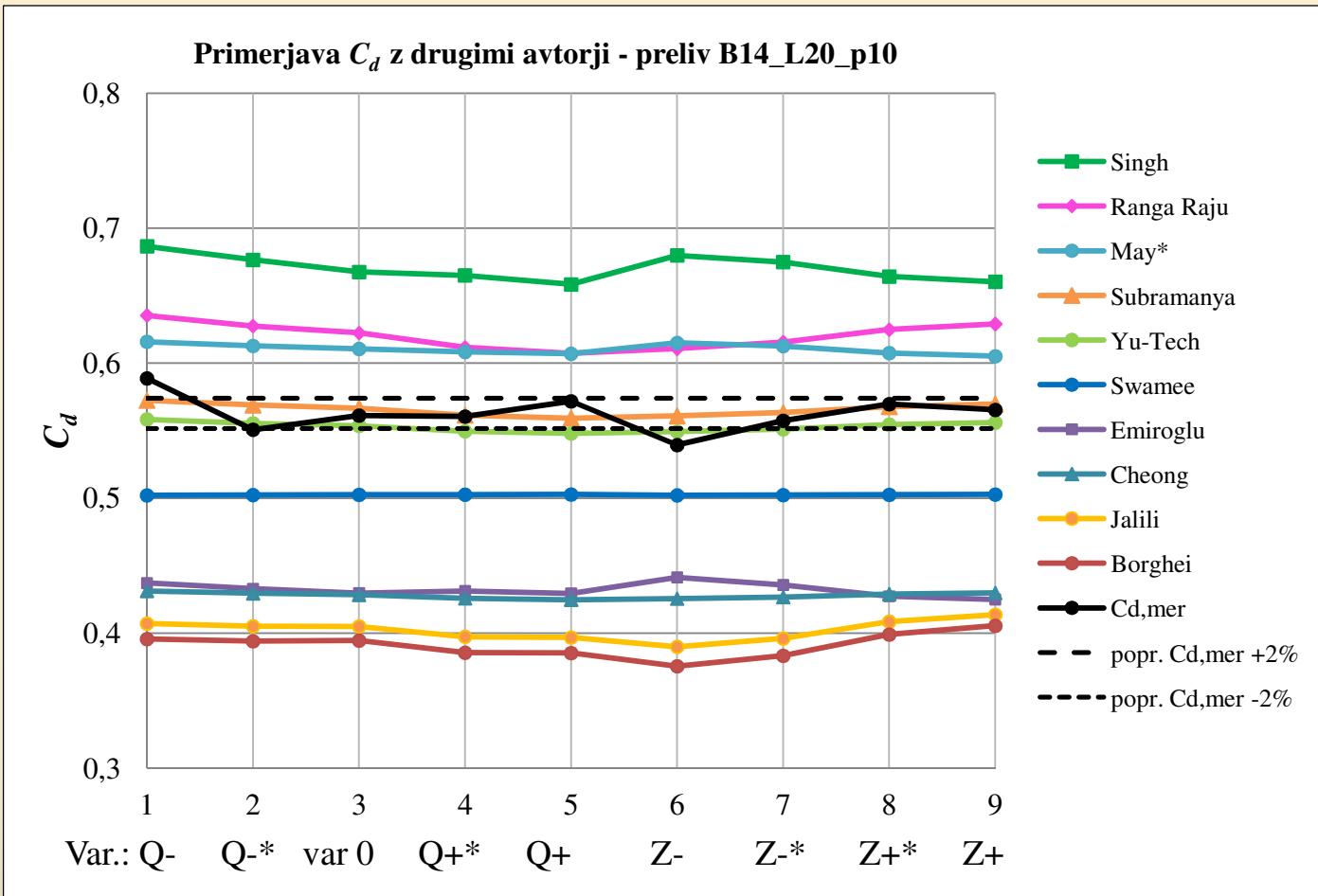
4) RAZMERJA v_b / u_b



Primer: $x/L = 0: v_b/u_b = 0,11 \text{ do } 0,35$
 $x/L = 1: v_b/u_b = 0,33 \text{ do } 0,60$
Vsi preliv: **v_b/u_b hitro narašča do $x/L = 0,25$**
(nato se ustali)

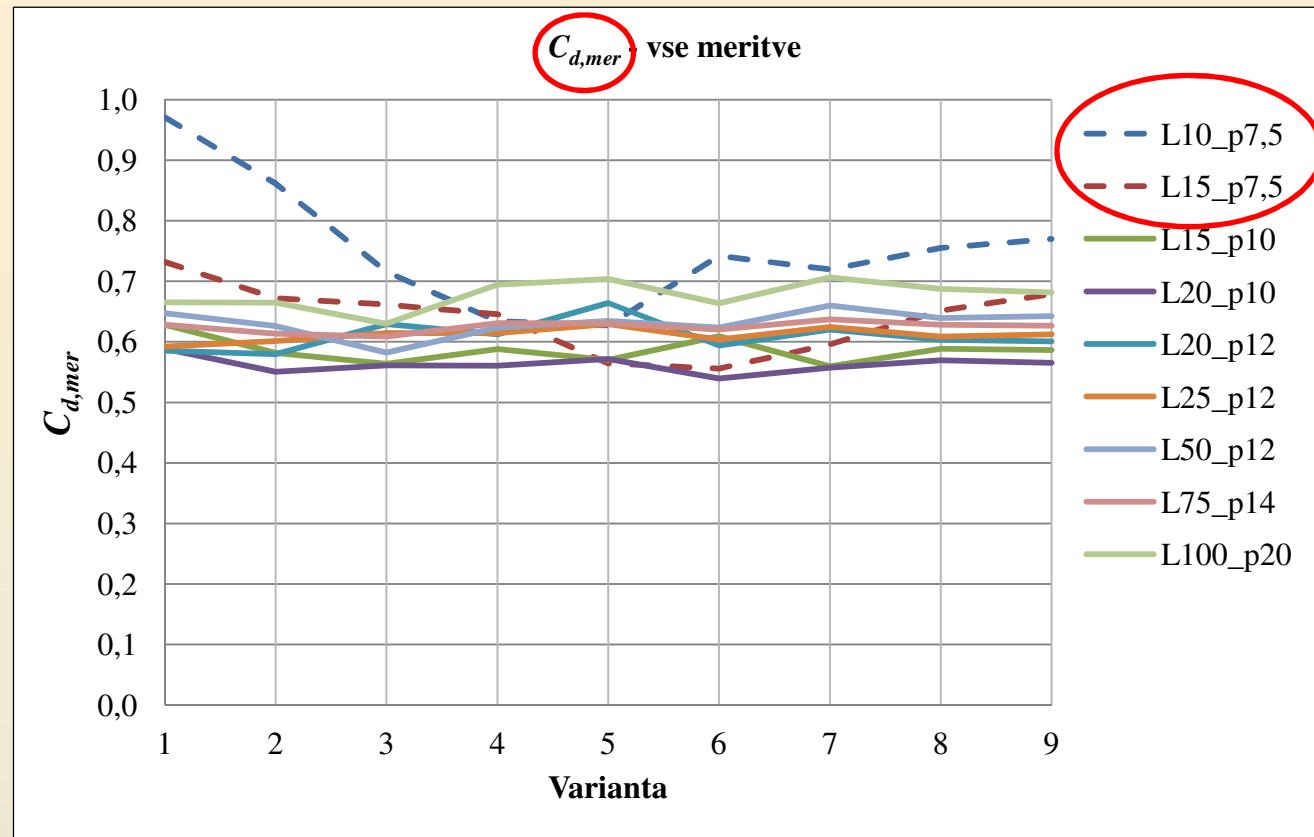


5) DOLOČITEV NOVE ENAČBE ZA C_d : razlike med enačbami



$$C_{d,mer} = \frac{Q_{b,mer} \cdot 3}{L \cdot 2 \cdot \sqrt{2g} \cdot (h_{mer} - p)^{3/2}} \quad h_{mer} = \frac{1}{5} \cdot (h_1^* + h_1 + h_{L/2} + h_2 + h_2^*)$$

Izločitev dveh nizov meritve



var.	var.	L10_p7,5	L15_p7,5	L15_p10	L20_p10	L20_p12	L25_p12	var.	L50_p12	var.	L75_p14	var.	L100_p20
1	Q-	0,97	0,73	0,63	0,59	0,59	0,59	Q20_a	0,65	Q28_a	0,63	Q35_a	0,67
2	Q-*	0,86	0,67	0,58	0,55	0,58	0,60	Q20_b	0,63	Q28_b	0,61	Q35_b	0,66
3	var 0	0,72	0,66	0,56	0,56	0,63	0,61	Q20_c	0,58	Q28_c	0,61	Q35_c	0,63
4	Q+*	0,63	0,65	0,59	0,56	0,61	0,61	Q17_a	0,62	Q25_a	0,63	Q30_a	0,69
5	Q+	0,63	0,56	0,57	0,57	0,66	0,63	Q17_b	0,63	Q25_b	0,63	Q30_b	0,70
6	Z-	0,74	0,56	0,61	0,54	0,59	0,60	Q17_c	0,62	Q25_c	0,62	Q30_c	0,66
7	Z-*	0,72	0,60	0,56	0,56	0,62	0,62	Q14_a	0,66	Q22_a	0,64	Q25_a	0,71
8	Z+*	0,75	0,65	0,59	0,57	0,60	0,61	Q14_b	0,64	Q22_b	0,63	Q25_b	0,69
9	Z+	0,77	0,68	0,59	0,57	0,60	0,61	Q14_c	0,64	Q22_c	0,63	Q25_c	0,68
	STDEV	0,107	0,057	0,022	0,014	0,026	0,011		0,022		0,009		0,024

NOVA ENAČBA ZA C_d

$$C_d = K \left(\frac{h_{ZV}}{p} \right)^\gamma \left(\frac{h_2}{p} \right)^\delta \left(\frac{z_{jez}}{p} \right)^\varepsilon \left(\frac{L}{L_{jez}} \right)^\zeta \left(\frac{B}{L} \right)^\eta$$

- izločitev nekaterih meritev
- sistem 60 enačb, 6 neznank (konstanta in eksponenti)
- rešitev:

$$K = 0,9738$$

$$\gamma = 1,2672$$

$$\delta = -1,588$$

$$\varepsilon = 0,0374$$

$$\zeta = 0,1867$$

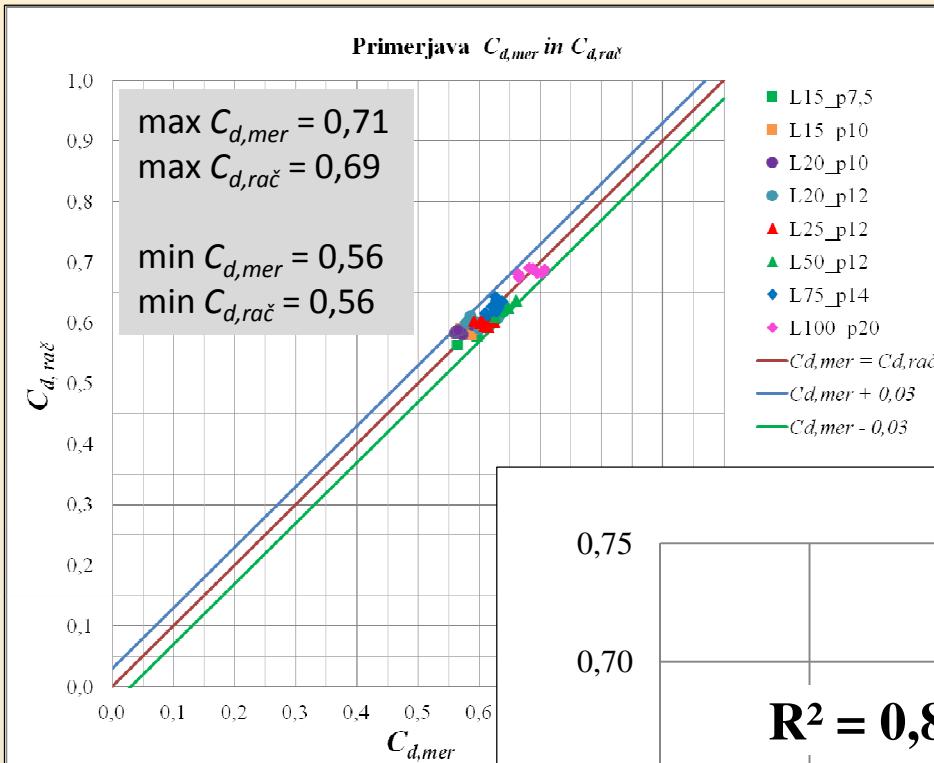
$$\eta = 0,2265$$

$$C_d = 0,9738 \left(\frac{h_{ZV}}{p} \right)^{1,2672} \left(\frac{h_2}{p} \right)^{-1,588} \left(\frac{z_{jez}}{p} \right)^{0,0374} \left(\frac{L}{L_{jez}} \right)^{0,1867} \left(\frac{B}{L} \right)^{0,2265}$$

- veljavnost: $Q, B, L, p, z_{jez}, L_{jez}$ kot v raziskavi. Tudi za večje modele, če :

$I_d [\%]$	$B / L [-]$	$Fr_1 [-]$	$Q_b / Q_1 [-]$
0,0005	0,3 – 1,4	0,23 – 0,41	0,12 – 0,76

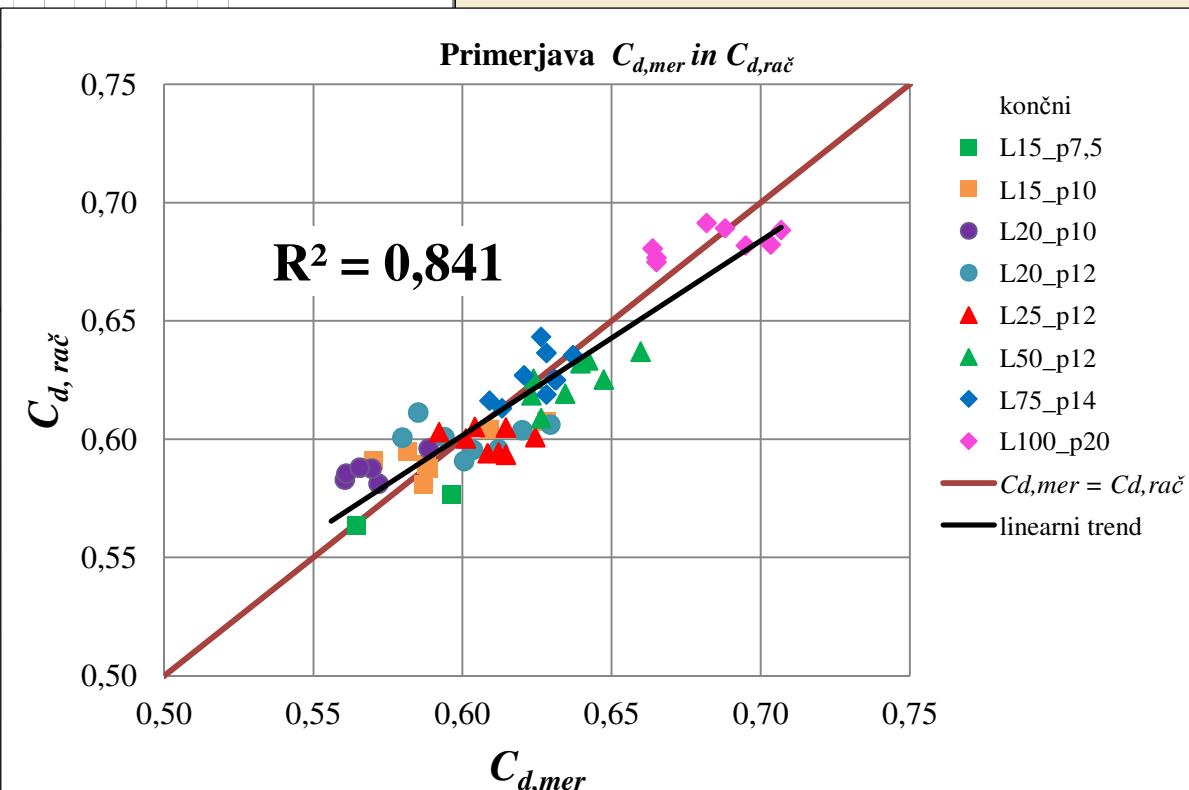
Ovrednotenje nove enačbe za C_d



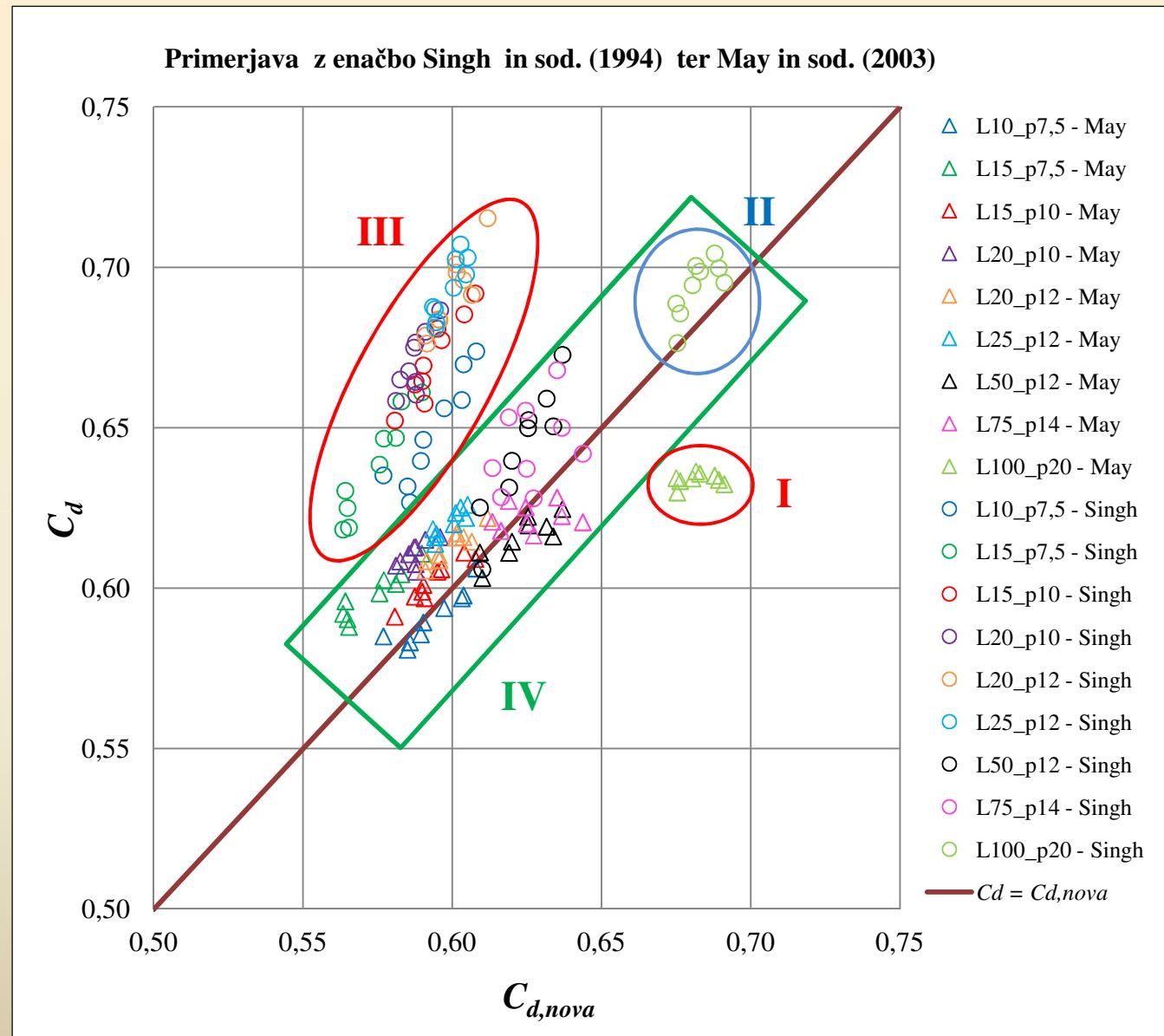
za upoštevanih 60 variant:

✓ $C_{d,mer} - C_{d,rač} = 0$ do $0,03$
 (tj. znotraj $\pm 5\%$)

✓ lin. trendna črta: $R^2 = 0,84$
 ✓ korel. koeficient: $r = 0,92$



Primerjava $C_{d,nova}$ z enačbama Singh in sod. (1994) ter May in sod. (2003)



I) odstopanje
➤ May < 0,69

II) ujemanje s Singh

III) odstopanje
➤ Singh nima B/L

IV) območje primerjave

Za to območje velja:

$$R^2 = 0,896$$

$$r = 0,95$$



7) ZAKLJUČKI

POVZETEK KLJUČNIH UGOTOVITEV

✓ VIZUALIZACIJSKA METODA:

- meritve na celotnem območju bočnega preliva
- brez poseganja v tok
- 2D hitrostna polja, na celotni merilni ravnini hkrati (ne le točkovno)
- velika prostorska in časovna ločljivost (ne le redka mreža točk)
- malo opreme, sorazmerno poceni (enostavnejše kot npr. LDA)

✓ HITROSTNO POLJE:

- izmerjena neenakomerna porazdelitev (ne predpostavljena enakomerna)
 - 1) \bar{u}_b/\bar{u} narašča z x/L in znaša od 1 do 1,25
 - 2) α_C narašča z x/L in znaša od 1 do 1,15
 - 3) v_b / u_b narašča z x/L in znaša od 0,1 do 0,6
- primernejši pristop z gibalno količino
- izmerjene tudi hitrosti nad krono bočnega preliva (kontaktno neizvedljivo)

✓ NEKONTAKTNA DOLOČITEV VZDOLŽNEGA PREREZA GLADINE (LASER)

✓ NOVA ENAČBA ZA C_d

- pokazano, da različne enačbe za C_d dajejo zelo različne vrednosti
- fenomenološki model na podlagi obsežnih eksperimentov (lastnih)
- primerna za ozka korita (z upoštevanjem omejitev tudi za večje modele)

NADALJNJE DELO

- 1) Izboljšava uporabniškega vmesnika
- 2) Izhodišče za umerjanje 2D numeričnih modelov
- 3) Raziskave plitvih tokov
- 4) Metodo prilagoditi za:
 - fizični modeli večjih dimenzij
 - industrijske aplikacije
 - terenske meritve