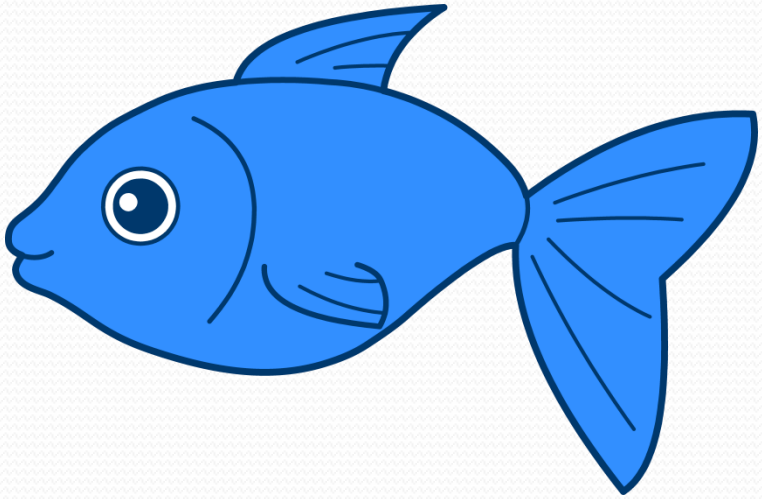
HIDROINŠTITUT

UNIVERZA V LJUBLJANI
FAKULTETA ZA GRAĐBENIŠTVO IN GEODEZIJO
KATEDRA ZA MEHANIKO TEKOČIN

Ribja steza z vertikalnimi režami - meritve hidravličnih veličin in validacija matematičnega modela

dr. Martin Bombač



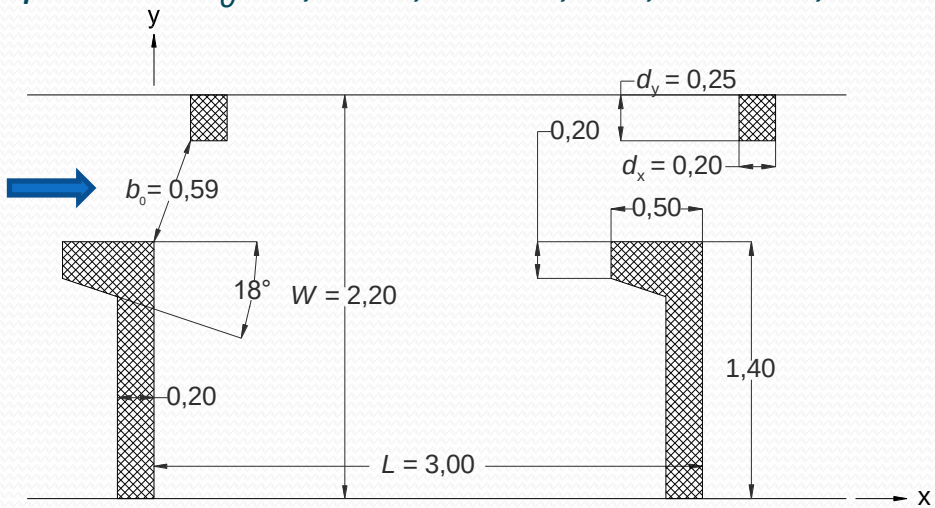
Ljubljana, 14.7.2015

Ribja steza HE Arto-Blanca

- *Z izgradnjo hidroelektrarn in zajezitvijo reke se prekinejo migracijske poti rib*
- *Z namenom omogočiti ribam nadaljnje migracije po reki, se je ob pregradi HE Arto-Blanca leta 2009 zgradil prehod za vodne organizme (ribja steza)*
- *Trenutno edina delujoča ribja steza na velikih hidroenergetskih pregradah v Sloveniji*

Ribja steza HE Arto-Blanca – vtočni betonski odsek

- *višinska razlika med zgornjo in spodnjo koto vode na HE Arto-Blanca znaša 9,4 m*
- *ribja steza je v celoti dolga 680 m*
- *zgornji tehnični del je sestavljen iz dveh vtočnih krakov na različnih nivojih*
- *pretok po ribji stezi je reguliran z zapornicama*
- *vzdolžni nagib tehničnega odseka ribje steze je I_0 = 1,7 %*
- *višinska razlika med posameznimi prekati znaša Δh = 5 cm*
- *prekat: b_0 = 0,59 m; L = 3,0 m; W = 2,2 m*



Vtočni betonski odsek z vertikalnimi regami

Ribja steza HE Arto-Blanca – sonaravni odsek

- *po združitvi obeh tehničnih krakov sledi sonaravni odsek s pragovi in tolmuni*
- *skupna dolžina sonaravnega odseka znaša 570 m*
- *na trasi je 106 talnih pragov, vzdolžni padec I_o = 2 %*
- *širina struge znaša 4,7 m*
- *razdalja med pragovi je 5 m*
- *višinska razlika med pragovi Δh = 10 cm*

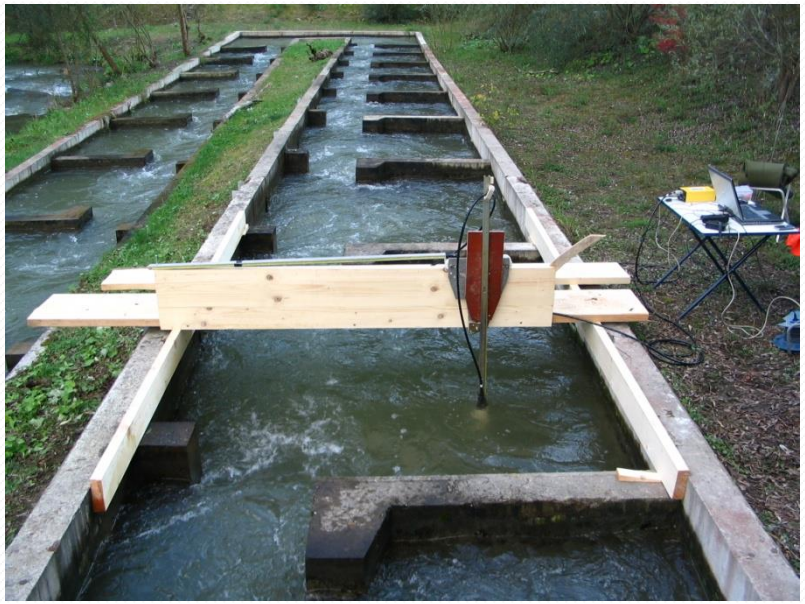
Iztočni odsek

Sonaravni odsek s pragovi in tolmuni

Meritve globin in hitrosti vodnega toka v ribji stezi

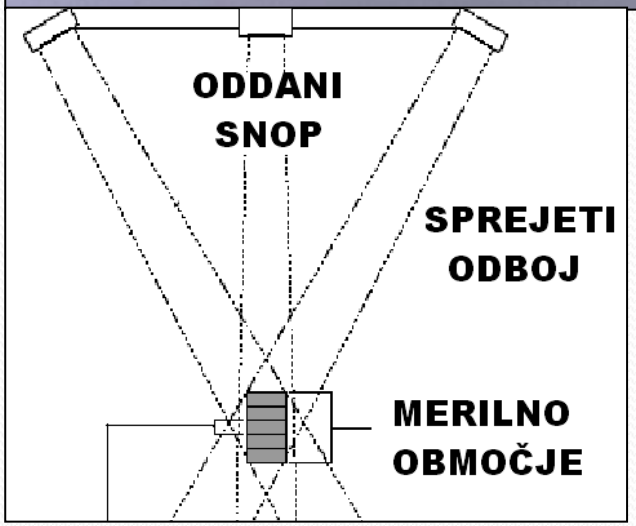
- *hidrodinamika toka v ribji stezi je bila določena zgolj informativno na podlagi analitičnih izračunov*
- *razmere v ribji stezi je bilo potrebno preveriti z meritvami na terenu (globine, hitrosti)*
- *meritve v srednjem prekatu zgornjega vtočnega kraka smo na Hidroinštitutu opravili v jeseni 2014*

Meritve globine vode v prekatu ribje steze



Meritve hitrosti vodnega toka s 3D ADV sondo

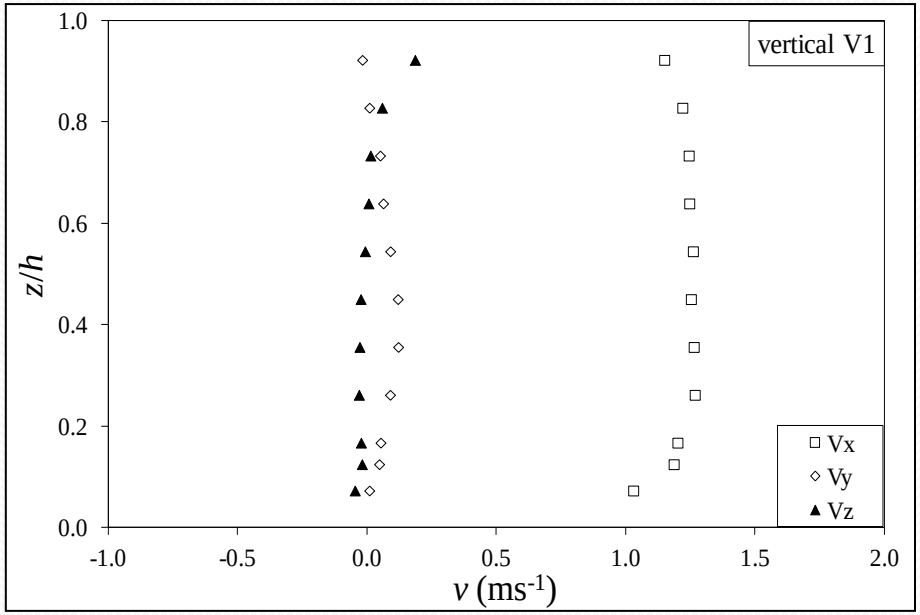
Meritve globin in hitrosti vodnega toka v ribji stezi



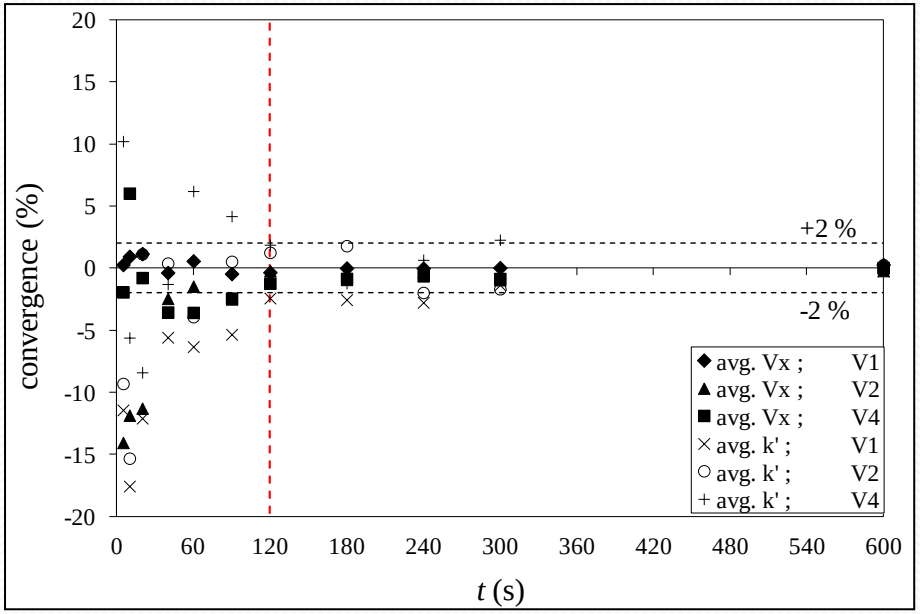
- *3D Micro ADV ultrazvočni merilnik hitrosti*
- *Frekvenca vzorčenja 50 Hz*
- *Vzorčni volumen 5 cm pred tipali, velikosti 0,1 cm^3*
- *Natančnost meritev do 1% merilnega območja (izbrano območje 2,50 m/s)*
- *niveliranje gladine z ostnim merilom*

Meritve hitrosti vodnega toka v ribji stezi

- *preliminarne meritve hitrosti v 4 vertikalah → določitev potrebnega časa posamezne meritve, potrditev dvo-dimenzionalne narave toka*



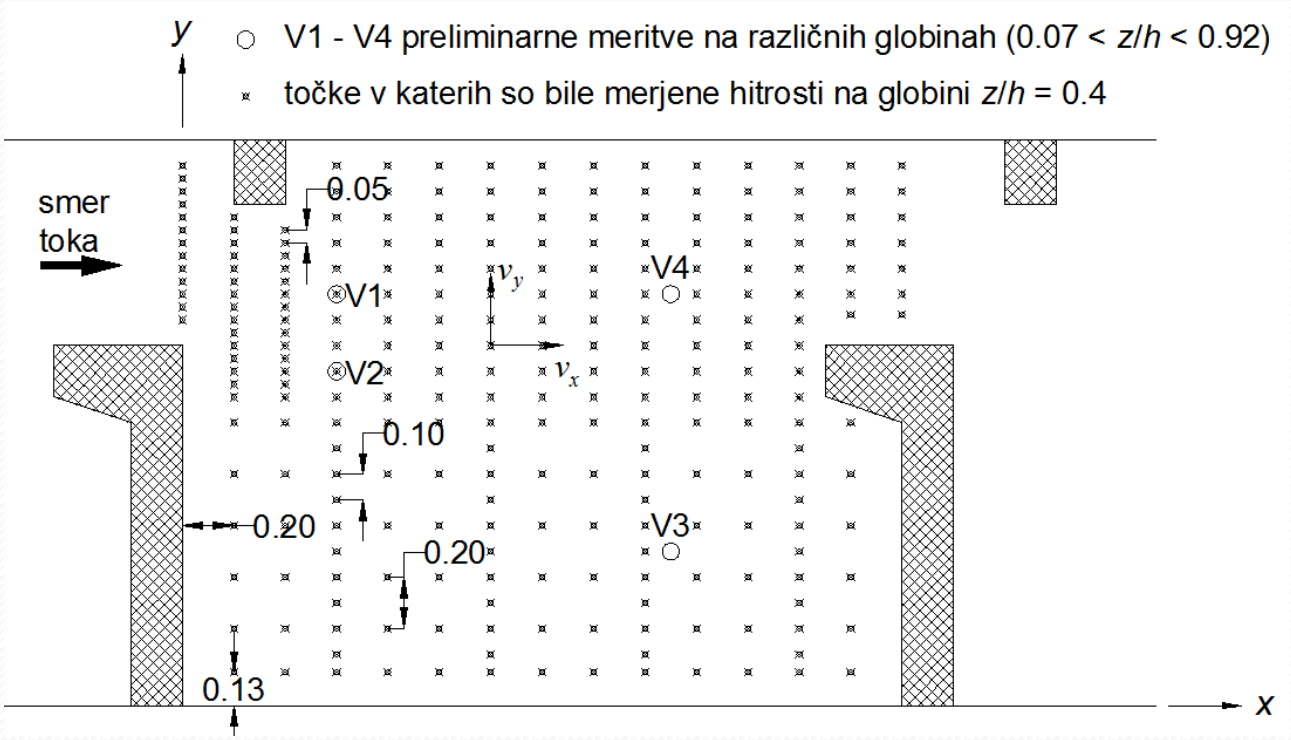
Razpored izmerjenih hitrosti po vertikali, ki potrjuje dvo-dimenzijsko naravo toka



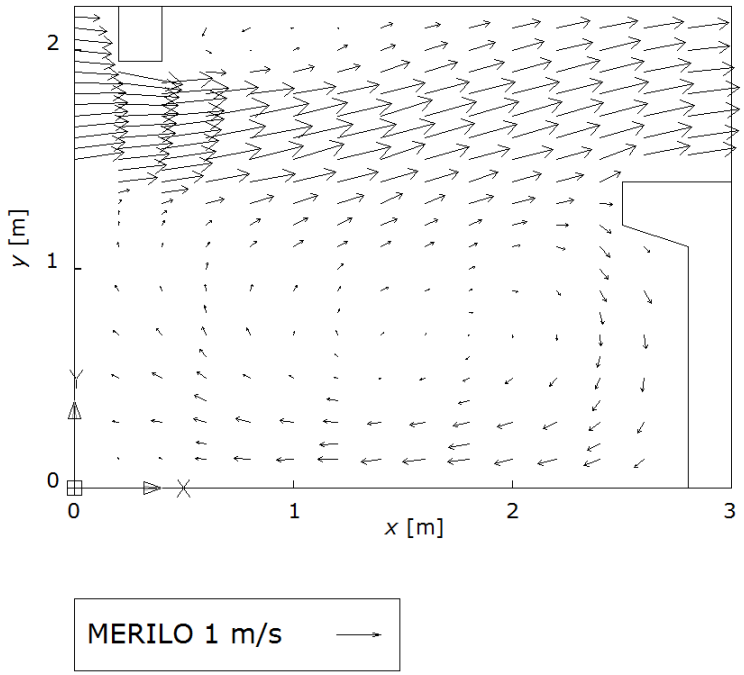
Konvergenca izmerjenih vzdolžnih komponent hitrosti v_x in turbulentne kinetične energije *k'*

Meritve hitrosti vodnega toka v ribji stezi

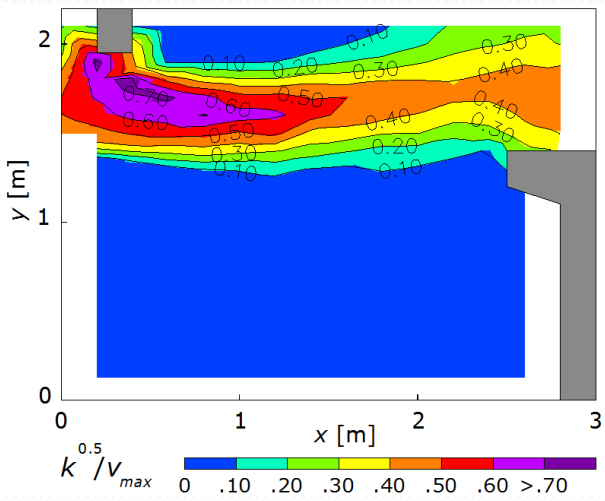
- *s predhodno določenimi karakteristikami posamezne meritve so bile izvedene detajlne meritve hitrosti v eni horizontalni ravnini (255 točk)*
- *15 prečnih profilov v razdalji 0,20 m*
- *razdalja med točkami v prečni smeri od 0,05 m do 0,20 m*



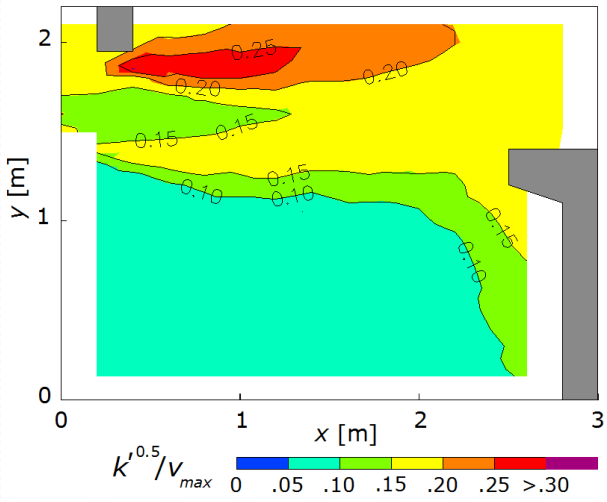
Rezultati meritev hitrosti vodnega toka v ribji stezi



Z meritvami določeno hitrostno polje v prekatu ribje steze HE Arto - Blanca



Kvadratni koren kinetične energije povprečnega toka *k* normaliziran z največjo izmerjeno hitrostjo v_{max}



Kvadratni koren turbulentne kinetične energije toka *k'* normaliziran z največjo izmerjeno hitrostjo v_{max}

v_{max} = 1,5 m/s > v_{max_dim} = 1,0 m/s
Q = 1000 l/s > Q_{dim} ≈ 660 l/s

Matematični model ribje steze HE Arto-Blanca

- *z namenom vzpostaviti orodje, ki omogoča natančno določitev hidravličnih karakteristik toka v ribji stezi, je bil vzpostavljen matematični model vtočnega objekta ribje steza*
- *uporabljen je bil program PCFLOW2D, ki rešuje globinsko povprečene Navier-Stokesove enačbe*
- *uporabljen je bil v program vgrajeni k – ε model turbulence*
- *matematični model je bil verificiran z meritvami na prototipu*
- *s takšnim orodjem je mogoča optimizacija obstoječih in lažje načrtovanje novih ribjih stez*

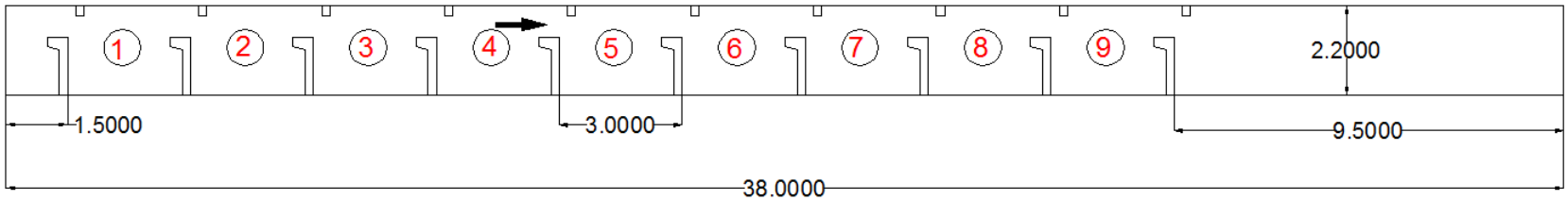
$$\frac{\partial h}{\partial t}+\frac{\partial\left(hv_x\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(hv_y\right)}{\partial y}=0$$

$$\frac{\partial\left(hv_x\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left(hv_x^2\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(hv_xv_y\right)}{\partial y}=-gh\frac{\partial h}{\partial x}-gh\frac{\partial z_b}{\partial x}-ghn_g{}^2\frac{v_x\sqrt{v_x^2+v_y^2}}{h^{\frac{4}{3}}}+\frac{\partial}{\partial x}\left(h\nu_T\frac{\partial v_x}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h\nu_T\frac{\partial v_x}{\partial y}\right)$$

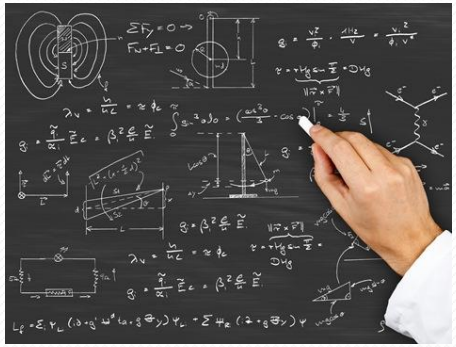
$$\frac{\partial\left(hv_y\right)}{\partial t}+\frac{\partial\left(hv_xv_y\right)}{\partial x}+\frac{\partial\left(hv_y^2\right)}{\partial y}=-gh\frac{\partial h}{\partial y}-gh\frac{\partial z_b}{\partial y}-ghn_g{}^2\frac{v_y\sqrt{v_x^2+v_y^2}}{h^{4/3}}+\frac{\partial}{\partial x}\left(h\nu_T\frac{\partial v_y}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(h\nu_T\frac{\partial v_y}{\partial y}\right)$$

Matematični model ribje steze HE Arto-Blanca

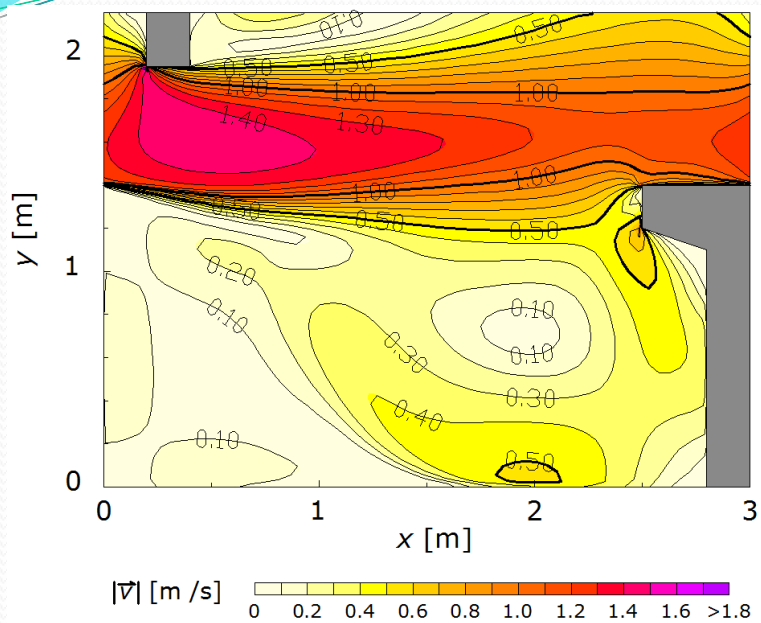
- *9 prekatov + natočni in iztočni del*
- *rezultati izvrednoteni v srednjem prekatu, kjer ni vpliva robnih pogojev*

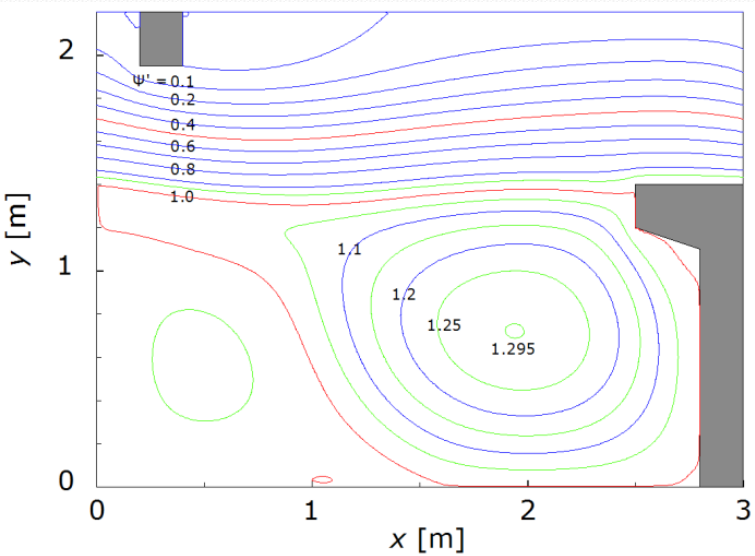


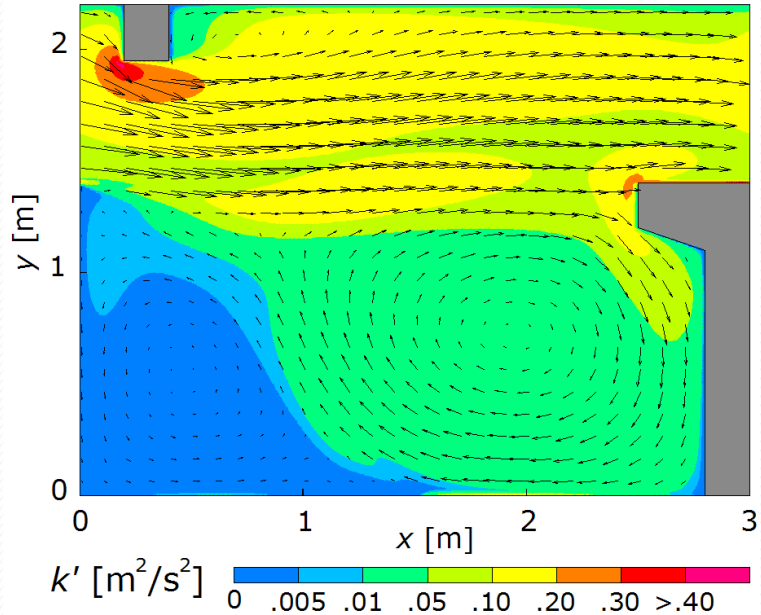
- *uporabljena gosta numerična mreža (Δx = 1 cm; Δy = 2 cm)* → *natančen opis geometrije + numerična difuzija je ustrezno majhna*
- *Δt = 0,1 s; tmax = 2 h = 7.200 s* → *72.000 časovnih korakov*

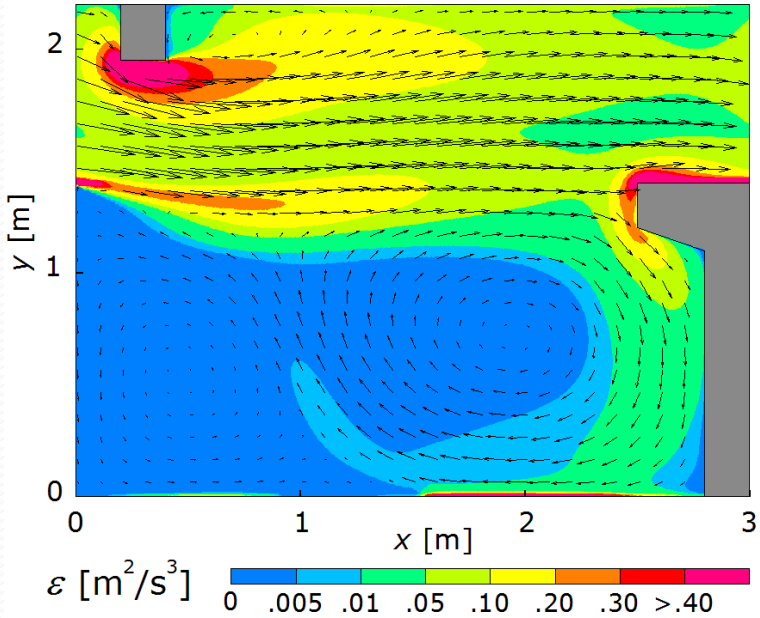


Rezultati matematičnega modela ribje steze HE Arto-Blanca



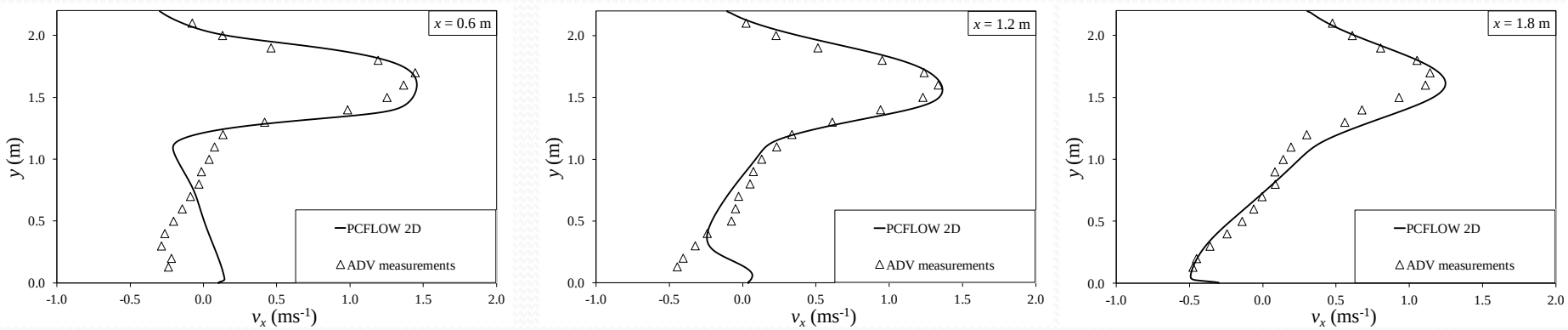






Verifikacija matematičnega modela ribje steze HE Arto-Blanca

- *rezultati matematičnega modela in meritev se odlično ujemajo*
- *poudarimo, da matematični model ni bil umerjen na meritve, meritve uporabljene zgolj za verifikacijo*
- *edino umerjanje MM je bilo iterativno iskanje primernega sp. rob. pogoja, ki daje ustrezen naklon gladine (Δh = 5,0 cm)*

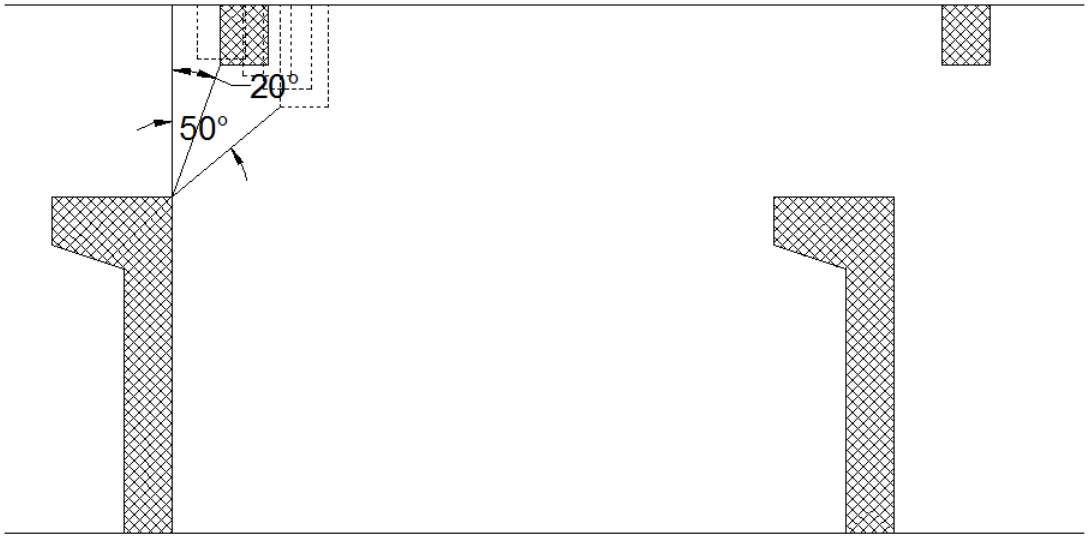


- *matematični model PCFLOW2D se je izkazal za primerno orodje za načrtovanje in optimizacijo ribjih stez z vertikalnimi režami*

Optimizacija ribje steze

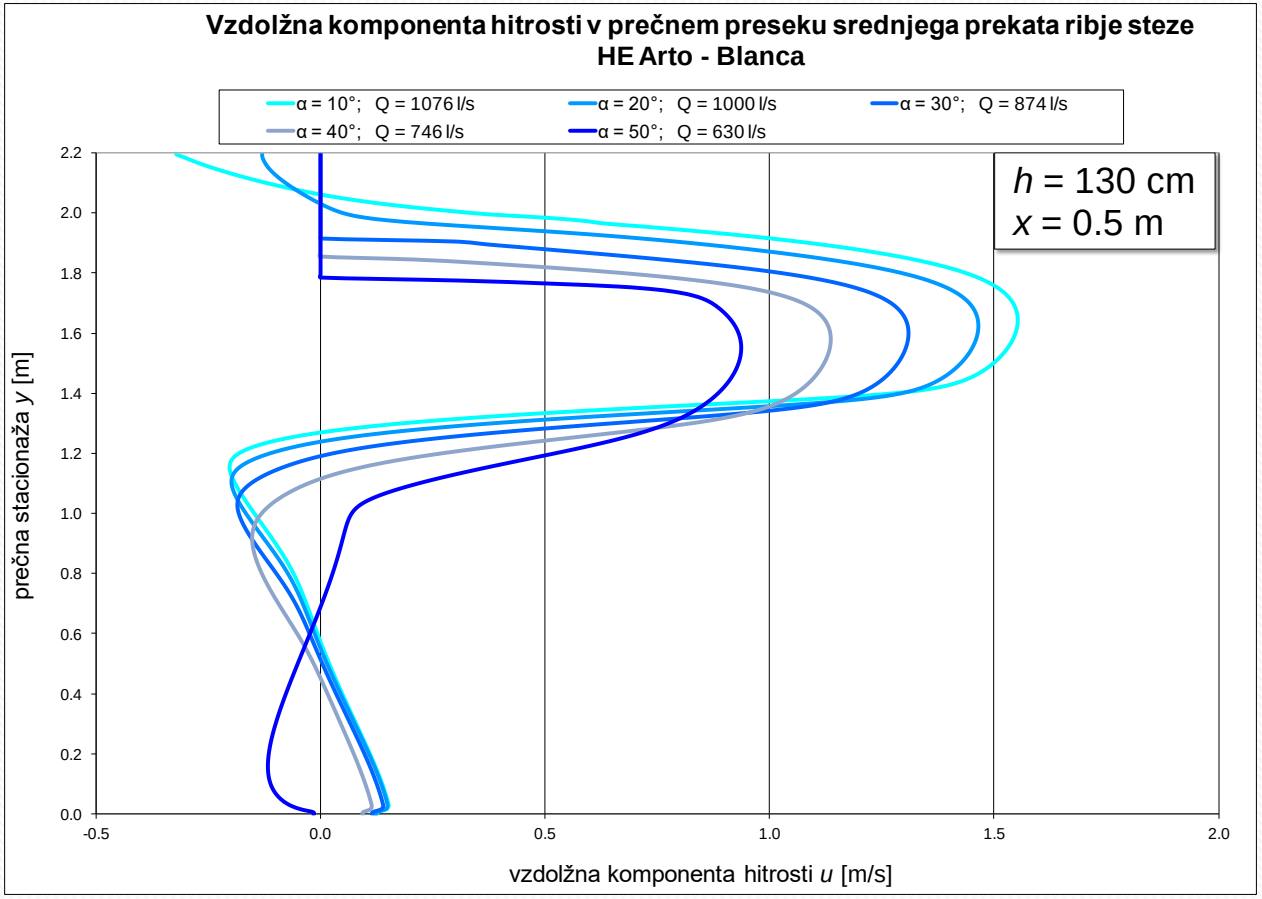
- *meritve (in simulacija) so pokazale, da so v_{max}* ***večje od načrtovanih***
- *analitična enačba iz priročnikov* $v_{\max} = \sqrt{2 * g * \Delta h}$ *ne drži vedno, saj ni nujno izpolnjena predpostavka, da je hitrost vodnega toka pred vertikalno režo v gorvodnem prekatu ribje steze zanemarljiva*
- *opravljena je bila optimizacija ribje steze, pri čemer je bil variirani parameter kot α med obema rebroma (**α = 10°, 20°, 30°, 40°, 50°**)*

v_{max} = 1,5 m/s > v_{max_dim} = 1,0 m/s



Optimizacija ribje steze

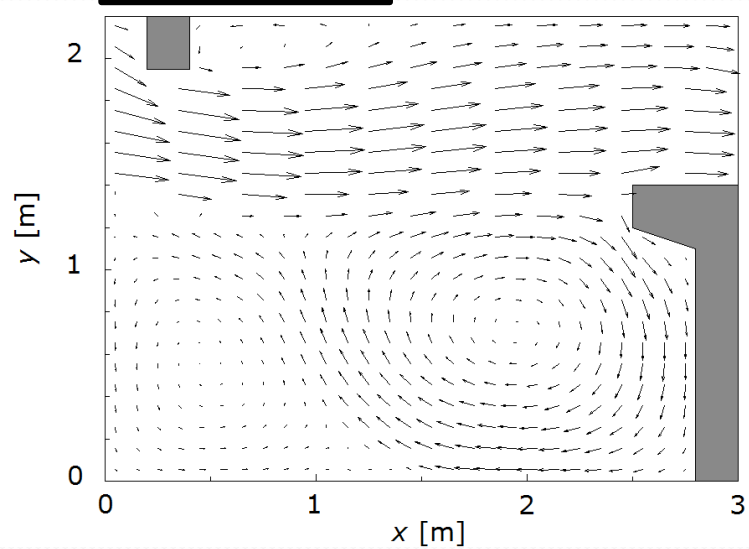
v_{dim} = 1,00 m/s; Q_{dim} = 660 l/s; h_{dim} = 1,30 m



Optimizacija ribje steze

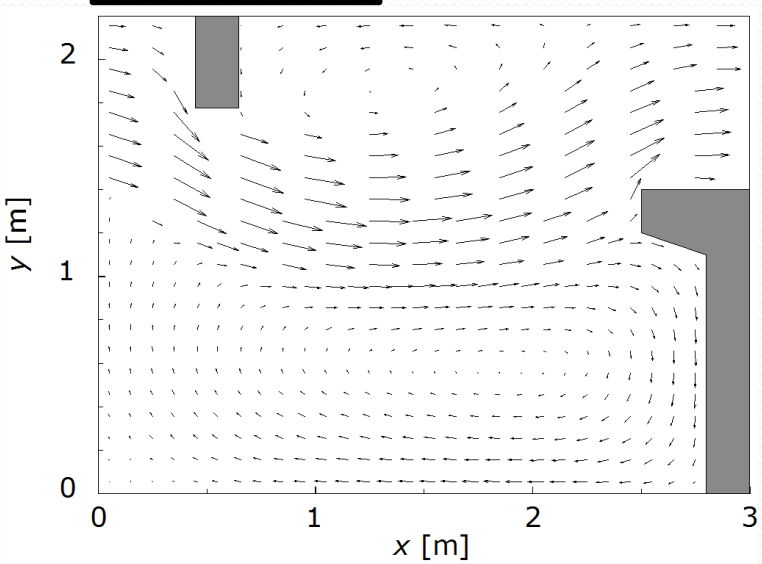
v_{dim} = 1,00 m/s; Q_{dim} = 660 l/s; h_{dim} = 1,30 m

α = 20°



v_{max} = 1,48 m/s
Q = 1000 l/s
h = 1,30 m

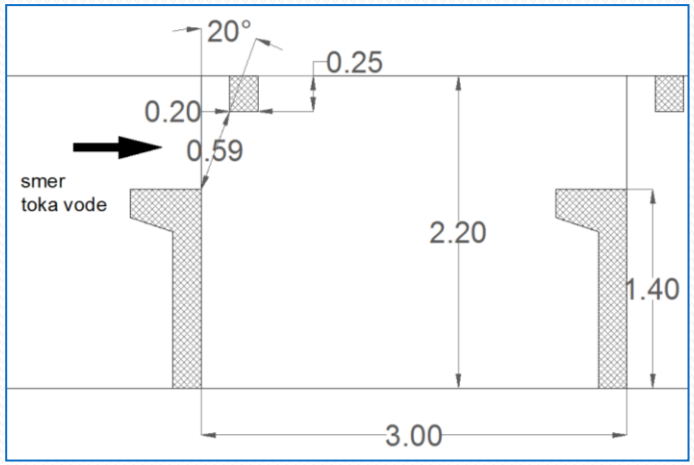
α = 50°



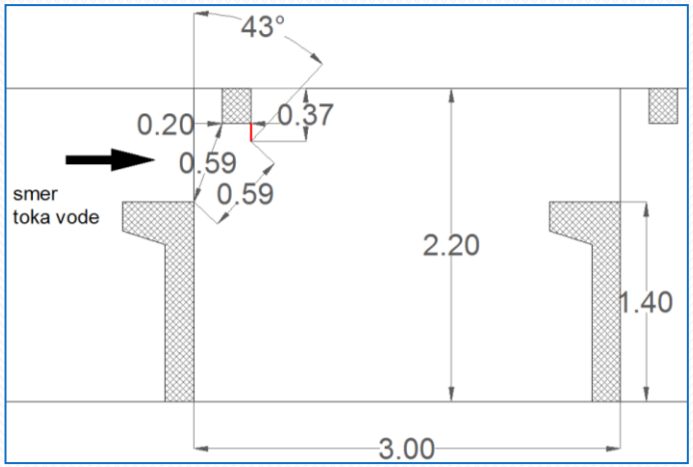
v_{max} = 1,05 m/s
Q = 630 l/s
h = 1,30 m

Fizični model ribje steze 1:4,4

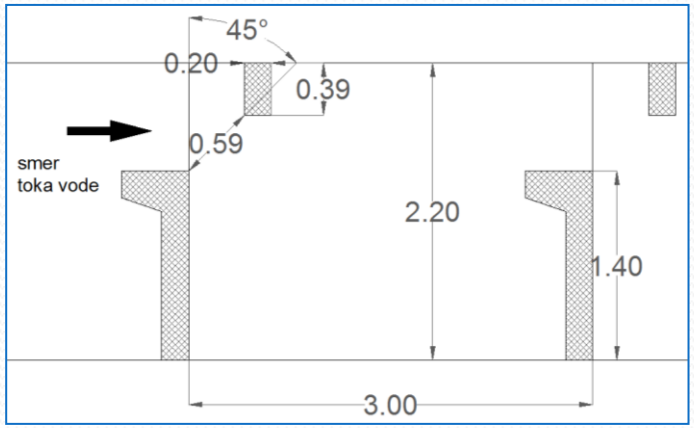
varianta I



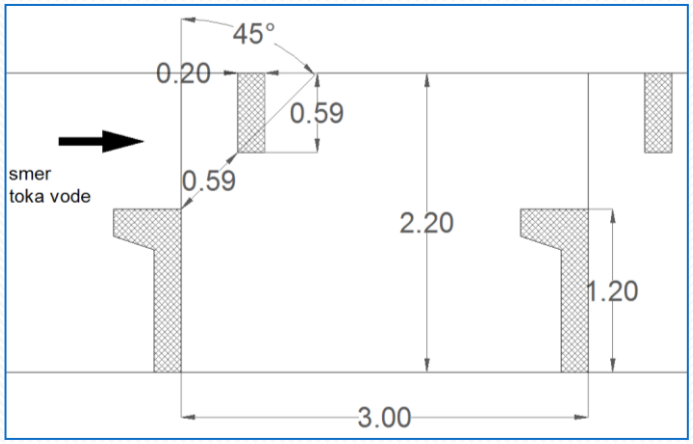
varianta II



varianta III



varianta IV



Povzetek ključnih ugotovitev

- ✓ *natančne meritve hitrosti v ribji stezi HE Arto – Blanca so potrdile, da je tok v ribjih stezah z vertikalnimi režami izrazito dvo-dimenzionalen*
- ✓ *največje hitrosti v ribji stezi so bistveno večje od dimenzioniranih (določenih analitično) ➡ otežen prehod slabšim plavalcem*
- ✓ *posledično je v ribji stezi pretok večji od načrtovanega, kar neugodno vpliva tudi na hidrodinamiko toka na vtoku, v sonaravnem odseku in iztoku iz ribje steze*
- ✓ *verificiran matematični model PCFLOW2D se je izkazal kot učinkovito orodje za optimizacijo oziroma načrtovanje toka v ribjih stezah z vertikalnimi režami*
- ✓ *natančne meritve na fizičnem modelu bodo dale ustrezno osnovo za dimenzioniranje nove ribje steze na HE Brežice*