

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



PODIPLOMSKI ŠTUDIJ  
GRADBENIŠTVA

DOKTORSKI ŠTUDIJ

Kandidat:

**GORAZD NOVAK, univ. dipl. inž. grad.**

**HITROSTNO POLJE VODNEGA TOKA V OBMOČJU  
BOČNEGA PRELIVA**

Doktorska disertacija štev.: 224

**VELOCITY FIELD OF WATER FLOW AT SIDE WEIR**

Doctoral thesis No.: 224

Temo doktorske disertacije je odobrila Komisija za doktorski študij na 8. redni seji,  
8. julija 2010. Za mentorja je bil imenovan prof. dr. Franc Steinman,  
za somentorja doc. dr. Tom Bajcar.

Ljubljana, 18. junij 2012

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
gradbeništvo in  
geodezijo



**Komisijo za oceno ustreznosti teme doktorske disertacije v sestavi:**

- prof. dr. Franc Steinman,
- prof. dr. Brane Širok, UL FS,
- prof. dr. Boris Kompare,
- prof. dr. Matjaž Četina,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo  
na 6. redni seji, dne 16. decembra 2009.

**Poročevalce za oceno doktorske disertacije v sestavi:**

- prof. dr. Boris Kompare,
- prof. dr. Brane Širok, UL FS,
- izr. prof. dr. Roman Klasinc, Tehniška univerza Graz,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo  
na 29. redni seji, dne 28. marca 2012.

**Komisijo za zagovor doktorske disertacije v sestavi:**

- prof. dr. Matjaž Mikoš, dekan UL FGG, predsednik,
- prof. dr. Franc Steinman, mentor,
- doc. dr. Tom Bajcar, somentor,
- prof. dr. Boris Kompare,
- prof. dr. Brane Širok, UL FS,
- izr. prof. dr. Roman Klasinc, Tehniška univerza Graz,

je imenoval Senat Fakultete za gradbeništvo in geodezijo  
na 31. redni seji dne, 30. maja 2012.

Univerza  
v Ljubljani

Fakulteta za  
*gradbeništvo in  
geodezijo*



## IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **GORAZD NOVAK**, univ. dipl. inž. grad., izjavljam, da sem avtor doktorske disertacije z naslovom:  
**»HITROSTNO POLJE VODNEGA TOKA V OBMOČJU BOČNEGA PRELIVA«.**

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 18. junij 2012

.....  
(podpis)

## ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo



## **BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM**

**UDK:** 519.61/.64:532.5: 627.1(043.3)  
**Avtor:** Gorazd Novak, uni. dipl. inž. grad.  
**Mentor:** prof. dr. Franc Steinman  
**Somentor:** doc. dr. Tom Bajcar  
**Naslov:** Hitrostno polje vodnega toka v območju bočnega preliva  
**Tip dokumenta:** doktorska disertacija  
**Obseg in oprema:** 99 str., 22 pregl., 36 sl., 83 en., 5 pril.  
**Ključne besede:** bočni preliv, vizualizacijska metoda, hitrostno polje, pretočni koeficient, hidravlični model

### **Izvleček**

Disertacija obravnava hitrostno polje vodnega toka v območju ostrorobih pravokotnih bočnih prelivov in koeficient pretoka teh prelivov za mirni režim toka. Poudarek je na rezultatih eksperimentov, izvedenih na različnih fizičnih hidravličnih modelih. Uporabljena je vizualizacijska metoda, ki v nasprotju z ustaljenimi pristopi, omogoča neinvazivno kvantifikacijo hitrostnih polj. Le-ta so izmerjena v posameznih horizontalnih ravninah obravnavanega vodnega toka. Določitev vektorskega polja hitrosti temelji na analizi posnetkov premikanja v tok vnesenega polutanta, tj. delcev, barvila, ali z elektrolizo generiranih vodikovih mehurčkov. Metoda omogoča numerični izračun komponent vektorjev hitrosti z veliko prostorsko in časovno ločljivostjo.

Rezultati meritev dajejo nov, podrobnejši vpogled v kompleksnost vodnega toka v območju bočnega preliva in v nasprotju z eno od predpostavk energijskega pristopa kažejo na izrazito neenakomerno porazdelitev obravnavanih hitrosti vzdolž toka. Rezultati so primerjani z že objavljenimi raziskavami. Prispevek k znanosti predstavlja tudi nova, fenomenološka enačba za koeficient pretoka bočnega preliva, oblikovana na podlagi dimenzijske analize in potenčnega nastavka. Tako formulirana enačba je preprosta za uporabo in veljavna za dokaj širok razpon brezdimenzijskih parametrov, ki podajajo glavne geometrijske in hidravlične značilnosti toka preko bočnih prelivov.

**BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT**

**UDC:** 519.61/.64:532.5: 627.1(043.3)  
**Author:** Gorazd Novak, B.Sc.  
**Supervisor:** Prof. Franc Steinman, Ph.D.  
**Co-advisor:** Assist. Prof. Tom Bajcar, Ph.D.  
**Title:** Velocity field of water flow at side weir  
**Document type:** Doctoral Dissertation  
**Notes:** 99 p., 22 tab., 36 fig., 83 eq., 5 ann.  
**Keywords:** side weir, visualization method, velocity field, discharge coefficient, hydraulic model

**Abstract**

Doctoral dissertation considers velocity field of water flow at sharp-crested rectangular side weirs and their discharge coefficients for subcritical flow. This work focuses on experimental results, obtained at various physical hydraulic models. A visualization method is employed, which – in contrast to more common approaches – allows non-invasive quantification of velocity fields. These are measured in separate horizontal planes of observed flow. Determination of vector field of velocities is based on the analysis of films displaying the movement of inserted pollutant, e.i. particles, dye or electrolysis-generated hydrogen bubbles. The method allows numerical calculation of components of velocity vectors with great spatial and time resolution.

Results of measurements provide a new, more detailed insight into complexity of water flow at side weir, and – in contrast to one of the energy-approach assumptions – indicate the distinctively non-uniform distribution of considered velocities along the flow. Results are compared with published studies. As an additional contribution to science a new, phenomenological equation for a side weir discharge coefficient has been formulated on the basis of dimensional analysis and a power-law formulation. This equation is simple to use and is valid for fairly wide range of dimensionless parameters that give main geometrical and hydraulic characteristics of flow over side weirs.

## KAZALO VSEBINE

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM.....	I
BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT.....	II
<b>1 UVOD .....</b>	<b>1</b>
1.1 Hipoteza disertacije.....	1
1.2 Cilji disertacije.....	1
1.3 Zgradba disertacije .....	1
<b>2 TEORETIČNE OSNOVE.....</b>	<b>2</b>
2.1 Hidravlika bočnih prelivov.....	2
2.1.1 Splošno o bočnih prelivih .....	2
2.1.2 Izpeljava enačbe z energijskim pristopom .....	4
2.1.3 Predpostavke izračuna z 1D tokom .....	6
2.1.4 Pristop z gibalno količino.....	7
2.1.5 Potek gladin pri bočnih prelivih.....	8
2.1.6 Hitrostno polje v območju bočnega preliva.....	12
2.2 Teoretične podlage vizualizacije toka.....	12
2.2.1 Uvod .....	13
2.2.2 Interpretacija vizualnih podob tokovnih vzorcev.....	13
2.2.3 Vizualizacijske metode v hidravliki .....	14
2.2.4 Vizualizacijska metoda, uporabljena za meritev razmer v območju bočnih prelivov	15
2.3 Merilna negotovost .....	18
2.3.1 Merilna negotovost pri meritvah pretoka .....	18
2.3.2 Meje zaupanja.....	18
2.3.3 Naključni in sistematični pogreški .....	19
2.3.4 Tip merilne negotovosti.....	19
2.3.5 Ovrednotenje negotovosti tipa A.....	20
2.3.6 Ovrednotenje negotovosti tipa B.....	20
2.3.7 Skupna merilna negotovost.....	22
2.3.8 Poročanje o merilni negotovosti preliva .....	22
2.4 Eksperimentalno modeliranje.....	23
2.4.1 Dimenzijska analiza.....	23
2.4.2 Buckinghamov $\Pi$ -teorem .....	23
2.4.3 Multiregresijska analiza.....	24
<b>3 PREGLED LITERATURE – STANJE TEHNIKE .....</b>	<b>25</b>
3.1 Zgodovina raziskav bočnih prelivov.....	25
3.2 Pregled novejših raziskav z energijskim pristopom.....	26
3.3 Pregled raziskav, ki uporabljajo pristop z gibalno količino.....	29



3.3.1	Postopek za dimenzioniranje bočnih prelivov po May in sod.....	32
3.4	Pregled ostalih raziskav bočnih prelivov.....	36
3.5	Pregled hidravličnih raziskav z uporabo vizualizacije toka.....	38
3.5.1	Raziskave, ki za vizualizacijo toka uporabljajo vodikove mehurčke.....	40
3.5.2	Raziskave bočnih prelivov z uporabo vizualizacije toka.....	40
3.6	Tabelarični povzetek pregleda pomembnejših raziskav.....	41
4	<b>EKSPERIMENTALNO DELO</b> .....	44
4.1	Zasnova eksperimentalnega dela.....	44
4.2	Robni pogoji eksperimentov - primerjava z ostalimi avtorji.....	44
4.3	Opisi fizičnih modelov in izvedbe meritev.....	45
4.3.1	Model 1: Vtočni objekt črpalne HE Avče.....	45
4.3.2	Model 2: Visokovodni razbremenilni objekt na spodnji Savi.....	46
4.3.3	Model 3: Ostrorobi bočni preliv – preliminarni eksperimenti KMTe.....	47
4.3.4	Model 4: Ostrorobi bočni preliv – končni eksperimenti KMTe.....	49
4.3.5	Model 5: Ostrorobi bočni preliv – kontrola v širšem koritu Hidroinštituta.....	52
4.3.6	Merilna tehnika - instrumenti.....	56
4.3.7	Merilna tehnika – programska oprema.....	58
4.4	Umerjanje.....	59
4.4.1	Umerjanje instrumentov.....	59
4.4.2	Določanje nastavitve vizualizacijske metode.....	60
4.5	Merilna negotovost vizualizacijske metode.....	62
4.6	Primer poročila o merilni negotovosti izmerjenega pretoka.....	63
4.7	Ocena merilne negotovosti izmerjenih hitrosti.....	64
5	<b>REZULTATI MERITEV</b> .....	65
5.1	Merjene veličine.....	65
5.2	Izvednotene globine in pretoki.....	67
5.3	Izvednotenje lokalnih hitrosti iz posnetega hitrostnega polja.....	68
5.4	Potek energijske črte.....	73
6	<b>HITROSTNA POLJA</b> .....	74
6.1	Hitrostna polja v posamezni merilni ravnini.....	74
6.2	Porazdelitev hitrosti po globini.....	77
6.3	Razmerje vzdolžne komponente hitrosti bočnega odtoka in poprečne hitrosti toka v glavnem koritu.....	78
6.4	Usmerjenost curka bočnega odtoka.....	79
6.5	Vrednosti Boussinesqovega in Coriolisovega koeficienta.....	79
7	<b>NOVA ENAČBA PRETOČNEGA KOEFICIENTA BOČNEGA PRELIVA</b> .....	81
7.1	Utemeljitev potrebe po določitvi nove enačbe.....	81
7.2	Določitev nove enačbe za koeficient pretoka bočnega preliva.....	83
7.3	Ovrednotenje nove enačbe za koeficient pretoka bočnega preliva.....	85
8	<b>ZAKLJUČKI IN NADALJNJE DELO</b> .....	89

8.1	Povzetek ključnih ugotovitev.....	89
8.2	Nadaljnje delo.....	90
9	POVZETEK.....	91
10	SUMMARY.....	92
	VIRI.....	93

**KAZALO PREGLEDNIC**

Preglednica 1: Glavne značilnosti raziskav, ki so relevantnejše za primerjavo s to disertacijo .....	42
Preglednica 2: Enačbe koeficienta pretoka za pravokotne ostrorobe bočne prelive.....	43
Preglednica 3: Robni pogoji raziskav, ki so relevantnejše za primerjavo z rezultati te disertacije .....	44
Preglednica 4: Glavni eksperimentalni parametri tipične variante KMTe – končni .....	52
Preglednica 5: Glavni eksperimentalni parametri tipične variante bočnega preliva v širšem koritu.....	55
Preglednica 6: Umerjanje nastavitve vizualizacijske metode.....	60
Preglednica 7: Višina dna glavnega korita, izmerjena z ostnim merilom .....	65
Preglednica 8: Merjene prelivne višine in globine za primer B14_L20_p10 .....	66
Preglednica 9: Glavne iz vrednotene hidravlične veličine za primer B14_L20_p10 .....	67
Preglednica 10: Iz vrednotene vrednosti $Fr_1, p / h_1$ in $h - p$ za primer B14_L20_p10.....	67
Preglednica 11: Izračunane komponente hitrosti v cm/s; velikost piksla 0,0005 m.....	70
Preglednica 12: Poprečne hitrosti v petih merilnih ravninah.....	70
Preglednica 13: Standardne deviacije za nize treh skalarnih poprečnih vrednosti lokalnih hitrosti ...	71
Preglednica 14: Korekcija velikosti pik.....	71
Preglednica 15: Predpostavljene višine $\Delta z_i$ pripadajočega dela prečnega prereza .....	72
Preglednica 16: Korigirane hitrosti, njihova poprečja in ponderirana poprečja .....	72
Preglednica 17: Izračunani koeficienti $\alpha_B$ in $\alpha_C$ za primer B14_L20_p10 – vzorčni prikaz.....	80
Preglednica 18: Primerjava izmerjenih $\alpha_C$ in vrednosti po Hagerjevem modelu .....	80
Preglednica 19: Vrednosti koeficientov $C_d$ po različnih avtorjih - upoštevani rezultati B14_20_p10..	81
Preglednica 20: Vrednosti $C_{d,mer}$ za vse izmerjene variante .....	84
Preglednica 21: Primerjava $C_{d,nova}$ z vrednostmi $C_d$ po drugih avtorjih - za vse opravljene meritve.....	87
Preglednica 22: Parametri bočnega preliva, za katere velja nova enačba pretočnega koeficienta .....	88

## KAZALO SLIK

Slika 1: Možne spremembe osnovnega korita za bočnim odvzemom .....	2
Slika 2: Ostrorobi pravokotni bočni preliv .....	3
Slika 3: Definijska skica glavnih parametrov bočnega preliva .....	3
Slika 4: Shematični prikaz tipičnih tokovnih razmer v območju bočnega preliva .....	9
Slika 5: Vzdolžni prerezi gladin pri bočnem prelivu (spremenjeno po May in sod., 2003).....	10
Slika 6: Izračun časovnega odvoda koncentracije $N$ (Bajcar in sod., 2009) .....	16
Slika 7: Določitev krajevne razlike koncentracije $N$ (Bajcar in sod., 2009) .....	17
Slika 8: Normalna verjetnostna porazdelitev (ISO 1438:2008) .....	19
Slika 9: Verjetnostne porazdelitve (ISO 1438:2008) .....	21
Slika 10: Fizični hidravlični model vtočnega objekta .....	45
Slika 11: Fizični model razbremenilnega objekta .....	46
Slika 12: Vizualizacija toka z barvilom, vrtinci ob modelnem krilnem zidu .....	47
Slika 13: Model KMTe – preliminarni .....	48
Slika 14: Model KMTe – končni .....	50
Slika 15: Tipična varianta bočnega preliva KMTe – končni .....	51
Slika 16: Odvajanje bočnega odtoka $Q_b$ na prelivih v ožjem in širšem koritu .....	52
Slika 17: Večji model bočnega preliva .....	53
Slika 18: Injiciranje barvila gorvodno od bočnega preliva .....	56
Slika 19: Merilna oprema na modelu KMTe .....	57
Slika 20: Uporabniški vmesnik aplikacije za izračun vektorskega polja hitrosti .....	59
Slika 21: Snemanje potovanja plovca .....	60
Slika 22: Bočni preliv v širšem koritu .....	61
Slika 23: Fotografija lasersko osvetljene presečne ravnine .....	66
Slika 24: Vzdolžni prerez gladine za različne dotoke in višine spodnje vode – preliv B14_L20_p10 ..	68
Slika 25: Potek gladin in energijskih črt vzdolž osi glavnega korita za primer B14_L20_p10 .....	73
Slika 26: Tipično hitrostno polje v območju bočnega preliva, primer L10_p7,5 .....	74
Slika 27: Vektorji hitrosti v višini krone bočnega preliva L50_p12 .....	75
Slika 28: Spreminjanje vzdolžnih hitrosti po širini glavnega korita za primer B14_L20_p10 .....	76
Slika 29: Vertikalni profil vzdolžnih hitrosti $u$ v glavnem koritu .....	77
Slika 30: Spreminjanje razmerja hitrosti $\bar{u}_b/\bar{u}$ vzdolž bočnega preliva .....	78
Slika 31: Spreminjanje razmerja hitrosti $v_b/u_b$ vzdolž bočnega preliva .....	79
Slika 32: Izmerjeni $C_d$ v primerjavi z vrednostmi, izračunanimi po različnih enačbah .....	82
Slika 33: Vrednosti $C_{d,mer}$ vseh eksperimentov (variante parametrov preliva po preglednici 20).....	84
Slika 34: Primerjava med $C_{d,mer}$ in $C_{d,rač}$ z vzporednicama območja odstopanja $C_d \pm 0,03$ .....	86
Slika 35: Podrobnejša primerjava med $C_{d,mer}$ in $C_{d,rač}$ v območju upoštevanih variant .....	86
Slika 36: Primerjava $C_{d,nova}$ in $C_d$ po Singh in sod. (1994) ter May in sod. (2003) za vse meritve .....	87

## KAZALO PRILOG

PRILOGA A: GLAVNI PARAMETRI EKSPERIMENTOV .....	A1
Priloga A.1: Glavni parametri eksperimentov in oznake variant v <b>ožjem koritu</b> .....	A1
Priloga A.2: Glavni parametri eksperimentov in oznake variant v <b>širšem koritu</b> .....	A3
PRILOGA B: IZMERJENE GLOBINE IN PRETOKI.....	B1
Priloga B.1: Izmerjene globine in pretoki za varianto <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 10</math> cm, <math>p = 7,5</math> cm</b> .....	B1
Priloga B.2: Izmerjene globine in pretoki za varianto <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 15</math> cm, <math>p = 7,5</math> cm</b> .....	B2
Priloga B.3: Izmerjene globine in pretoki za varianto <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 15</math> cm, <math>p = 10</math> cm</b> .....	B3
Priloga B.4: Izmerjene globine in pretoki za varianto <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 20</math> cm, <math>p = 10</math> cm</b> .....	B4
Priloga B.5: Izmerjene globine in pretoki za varianto <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 20</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> .....	B5
Priloga B.6: Izmerjene globine in pretoki za varianto <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 25</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> .....	B6
Priloga B.7: Izmerjene globine in pretoki za varianto <b><math>B = 30</math> cm, <math>L = 50</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> .....	B7
Priloga B.8: Izmerjene globine in pretoki za varianto <b><math>B = 30</math> cm, <math>L = 75</math> cm, <math>p = 14</math> cm</b> .....	B8
Priloga B.9: Izmerjene globine in pretoki za varianto <b><math>B = 30</math> cm, <math>L = 100</math> cm, <math>p = 20</math> cm</b> .....	B9
PRILOGA C: POPREČNE HITROSTI V POSAMEZNIH MERILNIH RAVNINAH .....	C1
Priloga C.1: Preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 10</math> cm, <math>p = 7,5</math> cm</b> .....	C1
Priloga C.2: Preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 15</math> cm, <math>p = 7,5</math> cm</b> .....	C3
Priloga C.3: Preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 15</math> cm, <math>p = 10</math> cm</b> .....	C5
Priloga C.4: Preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 20</math> cm, <math>p = 10</math> cm</b> .....	C7
Priloga C.5: Preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 20</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> .....	C9
Priloga C.6: Preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 25</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> .....	C11
PRILOGA D: RAZMERJA HITROSTI $\bar{u}_b/\bar{u}$ TER VREDNOSTI KOEFICIENTOV $\alpha_C$ IN $\alpha_B$ .....	D1
Priloga D.1: Preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 10</math> cm, <math>p = 7,5</math> cm</b> in preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 15</math> cm, <math>p = 7,5</math> cm</b> ..	D1
Priloga D.2: Preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 15</math> cm, <math>p = 10</math> cm</b> in preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 20</math> cm, <math>p = 10</math> cm</b> ...	D2
Priloga D.3: Preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 20</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> in preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 25</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> ...	D3
PRILOGA E: KOEFICIENTI PRETOKA $C_d$ .....	E1
Priloga E.1: Tabelarična primerjava $C_d$ za posamezne bočne prelive .....	E1
Priloga E.2: Grafična primerjava $C_d$ za vse merjene bočne prelive.....	E4

## LIST OF TABLES

Table 1: Main features of investigations, relevant for comparison with present study.....	42
Table 2: Discharge coefficient equations for rectangular sharp-crested side weirs .....	43
Table 3: Boundary conditions of investigations, relevant for comparison with present study .....	44
Table 4: Main experimental parameters for a typical variant of KMTe – final .....	52
Table 5: Main experimental parameters for a typical variant in wider main channel .....	55
Table 6: Calibration of visualization method settings.....	60
Table 7: Main channel elevation measured with a point gauge .....	65
Table 8: Measured overflow depths and water surface elevations for case B14_L20_p10 .....	66
Table 9: Main calculated hydraulic quantities for case B14_L20_p10 .....	67
Table 10: Calculated values $Fr_{1,p} / h_1$ , and $h - p$ for case B14_L20_p10.....	67
Table 11: Calculated velocity components in cm/s; pixel size 0,0005 m .....	70
Table 12: Average velocities in five measured planes .....	70
Table 13: Values of standard deviation for sets of three scalar averaged local velocities .....	71
Table 14: Correction of pixel size .....	71
Table 15: Assumed height $\Delta z_i$ of corresponding part of the cross section .....	72
Table 16: Corrected velocities, their averages and pondered average values .....	72
Table 17: Calculated values of coefficients $\alpha_B$ and $\alpha_C$ for case B14_L20_p10.....	80
Table 18: Comparison of measured $\alpha_C$ and values according to Hager's model .....	80
Table 19: Values of $C_d$ by various authors - for the results of experiments B14_L20_p10.....	81
Table 20: Values $C_{d,mer}$ for all measured variants .....	84
Table 21: Summary of comparison between $C_{d,nova}$ and values $C_d$ by other authors.....	87
Table 22: Parameters which define the range of validity of the proposed $C_d$ equation.....	88

## LIST OF FIGURES

Figure 1: Variations of main channel downstream of side weir .....	2
Figure 2: Sharp-crested rectangular side weir .....	3
Figure 3: Definition sketch for channel with discharge over side weir .....	3
Figure 4: Scheme of typical flow conditions at side weir .....	9
Figure 5: Types of longitudinal flow profile at side weirs (modified from May in sod., 2003).....	10
Figure 6: Calculation of the time derivative of concentration $N$ (Bajcar et al., 2009) .....	16
Figure 7: Determination of spatial difference in concentration $N$ (Bajcar et al., 2009) .....	17
Figure 8: The normal probability distribution (ISO 1438:2008).....	19
Figure 9: Probability distributions (ISO 1438:2008).....	21
Figure 10: Physical hydraulic model of the intake structure .....	45
Figure 11: Physical model of the flood overflow structure .....	46
Figure 12: Flow visualization using dye, vortices at model side walls .....	47
Figure 13: Model KMTe – preliminary .....	48
Figure 14: Model KMTe – final .....	50
Figure 15: Typical variant of side weir KMTe – final.....	51
Figure 16: Side weir overflow $Q_b$ in narrower and wider channel .....	52
Figure 17: Larger model of the side weir .....	53
Figure 18: Injection of dye upstream of the side weir .....	56
Figure 19: Measuring equipment at model KMTe .....	57
Figure 20: User interface of application for calculation of vector velocity field .....	59
Figure 21: Recording of float's trajectory .....	60
Figure 22: Side weir in wider main channel.....	61
Figure 23: Photo of a laser induced vertical plane .....	66
Figure 24: Longitudinal section of water surface for various inflows and tailwater levels.....	68
Figure 25: Longitudinal profile of water surface and E-line along main channel for B14_L20_p10 ...	73
Figure 26: Typical velocity field at side weir, case L10_p7,5.....	74
Figure 27: Velocity vectors in the plane $z_z = p$ at the side weir L50_p12. ....	75
Figure 28: Longitudinal velocities over the width of the main channel for case B14_L20_p10.....	76
Figure 29: Vertical profile of longitudinal velocities in the main channel.....	77
Figure 30: Variation of ratio $\bar{u}_b/\bar{u}$ along the side weir .....	78
Figure 31: Variation of ratio $v_b/u_b$ along the side weir .....	79
Figure 32: Measured $C_d$ compared with values, calculated from various equations .....	82
Figure 33: Values $C_{d,mer}$ from all experiments (variants of parameters according to Table 20).....	84
Figure 34: Comparison between $C_{d,mer}$ and $C_{d,rač}$ with parallel lines indicating area of $C_d \pm 0,03$ .....	86
Figure 35: Detailed comparison between $C_{d,mer}$ and $C_{d,rač}$ in the range of included values.....	86
Figure 36: Comparison between $C_{d,nova}$ and $C_d$ by Singh et al. (1994) and May et al. (2003) for all measurements.....	87

## LIST OF ANNEXES

ANNEX A: MAIN EXPERIMENTAL PARAMETERS .....	A1
Annex A.1: Main experimental parameters and variants notation <b>in narrower channel</b> .....	A1
Annex A.2: Main experimental parameters and variants notation <b>in wider channel</b> .....	A3
ANNEX B: MEASURED FLOW DEPTHS AND DISCHARGES .....	B1
Annex B.1: Measured flow depths and discharges for <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 10</math> cm, <math>p = 7,5</math> cm</b> .....	B1
Annex B.2: Measured flow depths and discharges for <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 15</math> cm, <math>p = 7,5</math> cm</b> .....	B2
Annex B.3: Measured flow depths and discharges for <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 15</math> cm, <math>p = 10</math> cm</b> .....	B3
Annex B.4: Measured flow depths and discharges for <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 20</math> cm, <math>p = 10</math> cm</b> .....	B4
Annex B.5: Measured flow depths and discharges for <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 20</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> .....	B5
Annex B.6: Measured flow depths and discharges for <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 25</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> .....	B6
Annex B.7: Measured flow depths and discharges for <b><math>B = 30</math> cm, <math>L = 50</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> .....	B7
Annex B.8: Measured flow depths and discharges for <b><math>B = 30</math> cm, <math>L = 75</math> cm, <math>p = 14</math> cm</b> .....	B8
Annex B.9: Measured flow depths and discharges for <b><math>B = 30</math> cm, <math>L = 100</math> cm, <math>p = 20</math> cm</b> .....	B9
ANNEX C: AVERAGE VELOCITIES AT MEASURED PLANES.....	C1
Annex C.1: Weir <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 10</math> cm, <math>p = 7,5</math> cm</b> .....	C1
Annex C.2: Weir <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 15</math> cm, <math>p = 7,5</math> cm</b> .....	C3
Annex C.3: Weir <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 15</math> cm, <math>p = 10</math> cm</b> .....	C5
Annex C.4: Weir <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 20</math> cm, <math>p = 10</math> cm</b> .....	C7
Annex C.5: Weir <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 20</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> .....	C9
Annex C.6: Weir <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 25</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> .....	C11
ANNEX D: VELOCITY RATIO $\bar{u}_b/\bar{u}$ AND VALUES OF COEFFICIENTS $\alpha_C$ AND $\alpha_B$ .....	D1
Annex D.1: Weir <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 10</math> cm, <math>p = 7,5</math> cm</b> in preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 15</math> cm, <math>p = 7,5</math> cm</b> .....	D1
Annex D.2: Weir <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 15</math> cm, <math>p = 10</math> cm</b> in preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 20</math> cm, <math>p = 10</math> cm</b> .....	D2
Annex D.3: Weir <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 20</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> in preliv <b><math>B = 14</math> cm, <math>L = 25</math> cm, <math>p = 12</math> cm</b> .....	D3
ANNEX E: DISCHARGE COEFFICIENTS $C_d$ .....	E1
Annex E.1: Tables with comparison of $C_d$ for single side weirs.....	E1
Annex E.2: Graphical comparison of $C_d$ for all measured side weirs .....	E4



## OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

$A$	prečni prerez toka [ $m^2$ ]
$B$	širina glavnega korita (vodotoka) [m]
$C_d$	koeficient preliva [-]
$C_D$	koeficient preliva na osnovi statične (tj. prelivne) višine [-] (po May in sod., 2003)
$C_{DS}$	vrednost $C_D$ za ostrorobi bočni preliv [-] (po May in sod., 2003)
$d$	širina krone preliva (merjena pravokotno na linijo krone) [m]
$D$	molekularna difuzivnost, difuzijska konstanta [ $m^2/s$ ]
$E$	specifična energija toka v koritu [m]; tudi intenziteta sivine opazovanega posameznega piksla (pri teoriji vizualizacijske metode) [-]
$F_f$	sila trenja [N]
$Fr$	Froudovo število [-]
$g$	gravitacijski pospešek [ $m/s^2$ ]
$G$	gibalna količina (vektor) [ $kg \cdot m/s$ ]
$H$	skupna višina nad krono preliva, tudi prelivna višina pri določanju dotoka na model [m]
$h$	globina vode [m]
$h_1$	globina vode na gorvodnem koncu bočnega preliva [m]
$h_2$	globina vode na dolvodnem koncu bočnega preliva [m]
$h_{pr}$	prelivna višina, tj. $h - p$ [m]
$h_0$	prelivna višina na dolvodnem koncu bočnega preliva, $h_0 = h_2 - p$ [m]
$I_k$	trenjski gradient toka, naklon energijske črte [-]
$I_d$	vzdolžni padec glavnega korita [-]
$K$	konstanta [-] (pri sistemu za določitev $C_d$ ), tudi koeficient [-]
$k$	faktor pokritosti (ang. coverage factor), v povezavi s pragom zaupanja [-]
$L$	dolžina krone preliva [m]
$N$	koncentracija sledila [molekul / enota volumna toka]
$n_G$	Manningov koeficient hrapavosti [ $s \cdot m^{-1/3}$ ]
$P$	verjetnost [-]
$p$	višina krone preliva, tj. višina praga nad dnom vodotoka [m]
$q$	specifični pretok [ $m^2/s$ ]
$Q$	pretok [ $m^3/s$ ]
$Q_x$	pretok v glavnem koritu na razdalji $x$ od gorvodnega konca bočnega preliva [ $m^3/s$ ]
$R^2$	koeficient korelacije [-]
$S$	poprečna vrednost sivine v izbranem oknu pikselov črnobelega slike [-]
$u$	lokalna hitrost v vzdolžni smeri [m/s]; tudi merilna negotovost po standardu ISO1438:2008 [-]
$u_b$	vzdolžna komponenta hitrosti bočnega odtoka (komponenta v smeri $x$ nad krono bočnega preliva na lokaciji $x/L$ ) [m/s]
$u^*$	standardna negotovost po standardu ISO1438:2008 [-]
$\bar{u}$	poprečna hitrost toka (v glavnem koritu) [m/s]
$\bar{u}_b$	poprečna $u_b$ na lokaciji $x/L$ (upoštevani meritvi v ravnini $z_z = p$ in $z_z = h$ ) [-]
$v$	lokalna hitrost v prečni smeri [m/s]
$v_b$	prečna komponenta hitrosti bočnega odtoka na lokaciji $x/L$ [m/s]
$v_i$	komponente hitrosti v smereh $x_i$ [m/s]
$vel.$	velikost vektorja hitrosti [m/s]
$W$	komponenta sile teže vode v smeri $x$ [N]
$x$	razdalja vzdolž krone bočnega preliva, merjena od gorvodnega roba, tj. začetka preliva [m]; tudi vzdolžna smer glavnega korita
$y$	prečna smer glavnega korita [m]
$z$	oddaljenost od dna glavnega korita, tudi višina [m]
$\alpha$	kot [ $^\circ$ ]
$\alpha_B$	Boussinesqov koeficient neenakomerne porazdelitve hitrosti, v literaturi pogosto oznaka $\beta$ [-]
$\alpha_C$	Coriolisov koeficient neenakomerne porazdelitve hitrosti [-]
$\gamma, \dots, \eta$	iskani eksponenti v sistemu za določitev enačbe za $C_d$ [-]

$\lambda$	koeficient trenja [-]
$\phi$	gostota masnega toka v smeri $x$ [ $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ]
$\Phi$	funkcija spremenljivega toka (De Marchi) [-]
$\Phi_b$	delež bočnega odtoka, tj. razmerje bočnega prelivanja in dotoka, $\Phi_b = Q_b/Q_I$ [-]
$\Pi$	funkcija fizikalne veličine, člen v fenomenološkem modelu (pri eksperimentalnem modeliranju s $\Pi$ -teoremom) [-]

### Uporabljeni indeksi

$b$	bočni preliv
$e$	efektivni
$jev$	pravokotni preliv za uravnavanje globine spodnje vode bočnega preliva
$krit$	kritična vrednost
$mer$	meritev, izmerjena vrednost
$NAT$	vrednost v natočnem delu glavnega korita
$ODT$	vrednost v odtočnem delu glavnega korita
$ponder.$	ponderirano (tj. upoštevano z utežjo)
$nova$	po novi enačbi za pretočni koeficient
$rač$	računska vrednost
$r$	pravokotni (pri določanju merilne negotovosti)
$SV$	spodnja voda, tj. globina vodnega toka dolvodno od bočnega preliva
$t$	trikotni (pri določanju merilne negotovosti)
$z$	žica (pri vizualizaciji z vodikovimi mehurčki), tudi opazovana ravnina
$ZV$	zgornjanja voda, tj. globina vodnega toka gorvodno od bočnega preliva
$1$	vrednost v točki 1, tj. na gorvodnem koncu bočnega preliva
$1^*$	vrednost tik gorvodno od točke 1
$2$	vrednost v točki 2, tj. na dolvodnem koncu bočnega preliva
$2^*$	vrednost tik dolvodno od točke 2



## 1 UVOD

Disertacija sodi na področje hidrotehnike in hidravlike, v ožjem smislu pa na področje fizičnega hidravličnega modeliranja in vizualizacijske merilne tehnike. Poudarek je na eksperimentalnem delu, saj je bila za kvantifikacijo vodnih tokov uporabljena računalniško podprta vizualizacijska metoda.

### 1.1 Hipoteza disertacije

Kljub dokaj enostavni geometriji bočnih prelivov (zlasti tankostenskih, ostrorobih), predstavlja tok preko takega preliva kar kompleksen, mestoma trodimenzionalen (3D) hidravlični problem. Večina bazičnih raziskav se osredotoča le na določitev skupnega bočnega odtoka, oz. na določanje enačb prelivnega koeficienta, pri tem pa izhajajo iz nekaterih predpostavk in enodimenzijskih (1D) enačb toka. Tudi aplikativne raziskave bočnih prelivov, ki so npr. načrtovani kot razbremenilni objekti, se osredotočajo na optimizacijo oblikovanja preliva (ki ima v večini primerov široko krono), oz. na določitev celotne pretočnosti objekta. V obeh vrstah raziskav je doslej ostajala natančna opredelitev hitrostnega polja slabo raziskana, za sorazmerno redko izvedene meritve hitrosti pa so se uporabljali instrumenti, ki posegajo v tok, npr. Pitotove cevke ali akustični merilniki hitrosti, ki delujejo na principu Dopplerjevega pojava.

Hipoteza disertacije je, da je hitrostno polje v območju bočnega preliva možno zelo natančno kvantificirati z vizualizacijsko metodo, ki praktično ne posega v tok, omogoča pa določitev vektorjev hitrosti z izredno veliko časovno in prostorsko ločljivostjo. Za tako izmerjene hitrosti predvidevamo, da ne bodo enakomerno porazdeljene, čeprav so enakomerne hitrosti predpostavljene v dobršnem delu objavljenih raziskav. Zato sklepamo, da bo treba dopolniti obstoječe pretočne enačbe, oz. v njih nastopajoče koeficiente, ki opisujejo vpliv porazdelitve hitrosti. Z natančno in nekontaktno kvantifikacijo hitrostnega polja bo predvidoma možno opisati značilnosti posebnih topoloških struktur, kar s klasičnimi kontaktnimi instrumenti ni mogoče doseči, bodisi zaradi majhne globine toka (npr. nad krono preliva), bodisi zaradi sorazmerno majhnega obsega in lokalnega značaja pojava (lokalni vrtinci, odlepljanje toka).

### 1.2 Cilji disertacije

Na podlagi hipotez so bili v okviru eksperimentalnega dela zastavljeni naslednji cilji:

1. Opraviti nekontaktno meritve vektorjev hitrosti na celotnem območju bočnega preliva.
2. Določiti zveze med hitrostnim poljem tekočine in glavnimi hidravličnimi parametri obravnavanega toka.
3. Preveriti ustreznost in po potrebi dopolniti obstoječe pretočne enačbe, s poudarkom na določanju koeficienta preliva in koeficientov, ki opisujejo vpliv porazdelitve hitrosti.

### 1.3 Zgradba disertacije

Disertacija je razdeljena na več poglavij. Uvod podaja hipotezo in cilje. V teoretičnih osnovah je govora o hidravliki bočnih prelivov in o vizualizacijskih metodah v hidrotehnikah. Sledi pregled literature oz. stanja tehnike, s poudarkom na raziskavah, ki obravnavajo enako ali sorodno problematiko, torej ostrorobe bočne prelive v pravokotnih koritih z mirnim režimom toka. V poglavju o eksperimentalnem delu so predstavljene vse bistvene značilnosti posameznih faz izvedenih eksperimentov. Sledi opis zbiranja, obdelave in sinteze tipičnega primera meritev. Ključne ugotovitve so izpeljane v poglavju o hitrostnih poljih in poglavju o novi enačbi pretočnega koeficienta, povzete pa so v poglavju z zaključki. Tam so dosežki ovrednoteni tudi z vidika izvirnega prispevka k znanosti, navedene pa so tudi možnosti nadaljnje raziskovalnega dela.

## 2 TEORETIČNE OSNOVE

V tem poglavju so podana teoretična znanja hidravlike bočnih prelivov, teorija uporabljene vizualizacijske metode in - zaradi eksperimentalnega značaja disertacije - tudi teorija določanja merilne negotovosti ter eksperimentalnega modeliranja za določanje fenomenoloških enačb.

### 2.1 Hidravlika bočnih prelivov

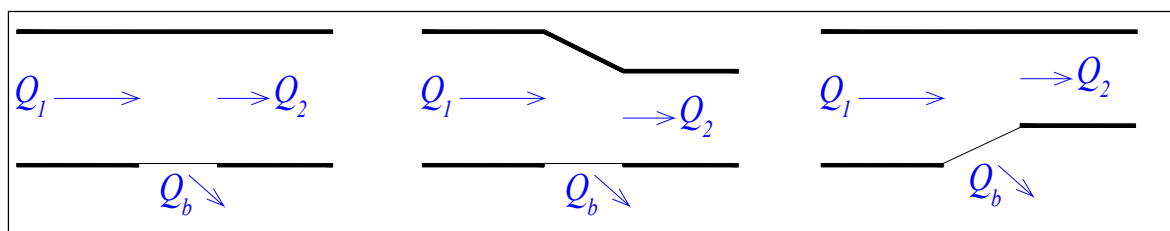
Prva asociacija na izraz "preliv" je pri večini hidrotehnikov verjetno običajni čelni preliv (pravokotni ali trikotni), ki je nameščen prečno na korito oz. vodotok. Teorija tovrstnih prelivov je predmet vseh učbenikov hidravlike (zato tu ne bo podana) in s pridom izkoriščena v najrazličnejših primerih za natančno, zanesljivo in robustno merjenje pretokov. Ker so bočni prelivi, kot ime pove, sorodni običajnim, dobro raziskanim čelnim prelivom, je precej študij, povezanih z bočnim prelivanjem, osnovanih na pristopu, da za bočni preliv velja vse enako kot za čelni preliv, le da je pomnoženo z nekim korekcijskim faktorjem, ki zajame vpliv bočnega odtokanja. Poudariti velja, da je tak pristop zelo pogosto preveč poenostavljen, saj se bočni prelivi kljub določenim podobnostim s čelnimi prelivi od le-teh tudi bistveno razlikujejo, kot je prikazano v nadaljevanju.

#### 2.1.1 Splošno o bočnih prelivih

Bočni ali stranski (imenovani tudi lateralni) prelivi so različno oblikovani prelivi, nameščeni vzdolž stene ali brežine glavnega vodotoka, ki služijo za odvzem dela pretoka iz glavne struge. Bočni prelivi so torej hidrotehnični objekti, pri katerih se projektni (presežni) del pretoka iz glavnega korita odliva bočno preko krone preliva v odtočno korito ali na poplavno ravnico. Bočni prelivi služijo kot odvzemni ali kot razbremenilni objekti in nastopajo predvsem v namakalnih, kanalizacijskih in protipoplavnih sistemih ter v hidroenergetiki (npr. vtočni del zajemnega objekta črpalne hidroelektrarne). Tipični primeri bočnih prelivov so:

- visokovodni razbremenilni objekt na vodotoku, ki presežne količine vode preusmerja v razbremenilnik ali poplavni obtočni kanal in na ta način ščiti dolvodne objekte pred poplavljanjem,
- razbremenilni preliv v mešani kanalizaciji ali pred čistilno napravo, ki odvaja presežne količine vode, da ne pride do preobremenitve sistema ali čistilne naprave,
- pragovi pri stranskih zajemih vode oz. pri vtočnih objektih za dovod vode uporabnikom.

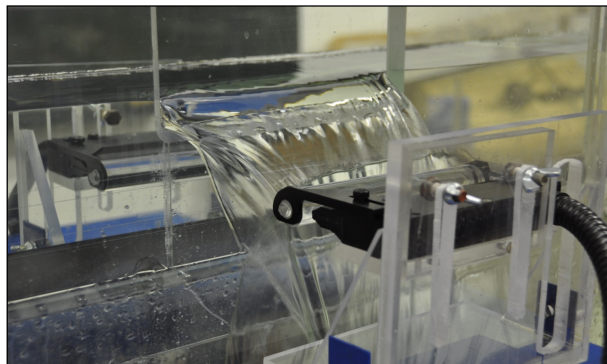
"Konstrukcija [bočnih prelivov] omogoča, da odteka del vodne količine preko krone, ki je vzporedna (oz. tvori le majhen kot) z vzdolžno osjo glavnega vodnega toka. Korito dolvodno od bočnega odvzema je lahko enake širine (kadar imamo odjem vode za občasni pogon vodne naprave) ali pa je ožje, saj naprej odteka zmanjšana količina (pri razbremenilnikih)." (Steinman, 2010, str. 126) To je prikazano na sliki 1, povzeti po Steinman (2010):



Slika 1: Možne spremembe osnovnega korita za bočnim odvzemom

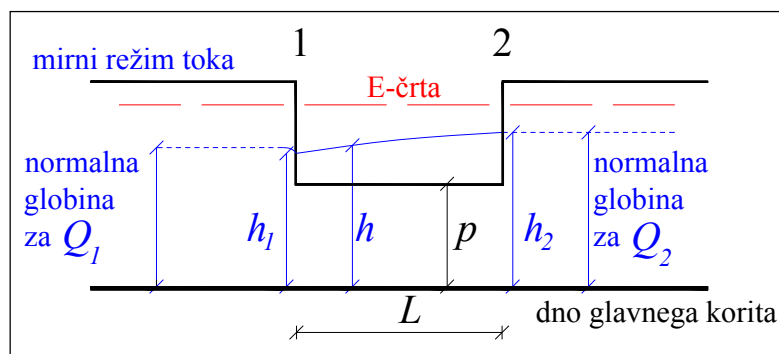
Figure 1: Variations of main channel downstream of side weir

Bočni prelivni so lahko ostrorobi ali taki s široko krono, s krilnimi stenami ali brez, pravokotni ali trikotni in celo t.i. labirintni. Ta disertacija se osredotoča na eksperimentalne raziskave ostrorobnih tankostenskih pravokotnih bočnih prelivov v koritih pravokotnega prečnega prereza pri mirnem režimu toka. Primer takega preliva je na sliki 2:



Slika 2: Ostrorobi pravokotni bočni preliv (v ospredju je tudi del merilne opreme)  
Figure 2: Sharp-crested rectangular side weir (a part of measuring equipment is shown in front)

Osnovni pojmi in veličine so definirani na sliki 3, povzeti po Emiroglu in sod. (2011):



Slika 3: Definijska skica glavnih parametrov bočnega preliva  
Figure 3: Definition sketch for channel with discharge over side weir

S stališča hidravlike je glavna značilnost toka preko bočnega preliva ta, da voda preliva linijo prelivnega roba (krona) pod kotom, ki ni enak pravemu kotu, kot to velja za prečne prelive. Čeprav teče preko bočnega preliva predvsem voda s tistega območja glavnega korita, ki je najbližje prelivu, odlivanje povzroči tudi prerazporeditev toka, ki ostane v glavnem koritu. Zaradi tega so vzorci toka v območju bočnega preliva običajno kompleksni, večinoma dvodimenzionalni (2D), v neposredni bližini prelivnega roba pa lahko celo trodimenzionalni (3D). Razcep toka pri bočnih prelivih povzroča asimetrično porazdelitev hitrosti toka, ki ostaja v glavnem vodotoku, nasproti prelivu se lahko oblikuje separacijska cona (Lee in Holley, 2002), na dolvodnem koncu preliva pa pride do nastanka stoječih valov (zlasti ob eventualnih krilnih zidovih).

Čeprav so numerični modeli, tj. programi za simulacije dinamike tekočin (angl. CFD – Computational Fluid Dynamics), zmožni reproducirati nekatere izmed teh značilnosti toka, še niso uporabni v vseh primerih (še zlasti ne pri simuliranju značilnosti 3D pojavov). Inženirji hidrotehnike še naprej uporabljajo 1D enačbe, ki so enostavnejše od natančnejših numeričnih modelov in mnogo hitreje dajejo rezultate, ki so dovolj dobri za zgodnejše faze načrtovanja različnih bočnih prelivov.

### 2.1.2 Izpeljava enačbe z energijskim pristopom

Disertacija obravnava ostrorobe tankostenske pravokotne bočne prelive v koritih pravokotnega prečnega prereza pri mirnem režimu toka, saj se na to problematiko osredotoča tudi velika večina drugih avtorjev. Pri tem gre za hidravlični problem prostorsko spremenljivega toka s pojemajočim pretokom (ang. spatially varied flow with decreasing discharge). Do osnovne enačbe tega problema lahko pridemo po dveh poteh, s t.i. energijskim pristopom in pristopom z gibalno količino. Načeloma sta oba koncepta uporabna za izpeljavo splošne dinamične enačbe za problem stalnega neenakomernega oz. stalnega prostorsko spreminjajočega se toka (Yen in Wenzel, 1970 cit. po Rosier, 2007). Cheong (1991) je na podlagi študije pretočnega koeficienta bočnih prelivov v trapezoidnem koritu, ki je primerjala oba pristopa, ugotovil, da oba dajeta zelo podobne rezultate (Rosier, 2007).

V nadaljevanju predstavljena izpeljava temelji na energijskem pristopu, za katerega se zdi, da je med raziskovalci bočnih prelivov vendarle bolj sprejet, čeprav bo v nadaljevanju pokazano, da nekatere predpostavke, uporabljene pri tem pristopu, niso nujno upravičene. Tako npr. Chow (1973) pravi, da se mirni tok s pojemajočim pretokom lahko obravnava kot razcep toka, kjer odvedena voda ne vpliva na energijsko višino, in je zato pri reševanju tega problema uporaba energijske enačbe prikladnejša od pristopa z gibalno količino (Chow, V.T., 1973 cit. po Rosier, B. 2007).

Ob predpostavki, da bočno odtekajoča voda ne vpliva na potek energijske črte, lahko za izpeljavo osnovne enačbe bočnega preliva uporabimo energijsko enačbo. Skupna energija  $E_{sk}$  v prečnem prerezu vodotoka je vsota potencialne, tlačne in kinetične energije (Steinman, 2010):

$$E_{sk} = Z_{dno} + h + \alpha_c \frac{\bar{u}^2}{2g} = Z_{dno} + h + \alpha_c \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (1)$$

kjer so:

$Z_{dno}$	razdalja dna korita od primerjalne ravnine,
$h$	globina toka,
$\alpha_c$	korekcijski koeficient kinetične energije (imenovan tudi Coriolisov koeficient), ki podaja vpliv neenakomerne porazdelitve hitrosti po prečnem prerezu
$\bar{u}$	poprečna hitrost toka v vzdolžni smeri,
$A$	prečni prerez toka.

Na tem mestu definirajmo še specifično energijo prereza  $E$  kot (Steinman, 2010):

$$E = h + \alpha_c \frac{\bar{u}^2}{2g} \quad (2)$$

Z odvajanjem enačbe za skupno energijo po  $x$  (vzdolžna smer) dobimo (Rosier, 2007):

$$\frac{dE_{sk}}{dx} = \frac{dZ_{dno}}{dx} + \frac{dh}{dx} + \frac{\alpha_c}{2g} \left( \frac{2QdQ}{A^2 dx} - \frac{2Q^2 dA}{A^3 dx} \right) \quad (3)$$

Nadalje se upošteva, da je  $dE_{sk}/dx = -I_\lambda$ , kar je energijski (ali trenjski) padec,  $dZ/dx = -I_d$  pa padec dna vodotoka. Za primer stalnega enakomernega toka velja:  $I_0 = I_\lambda = I_d = I_{gladine}$ . Upoštevajoč še:

$$\frac{dA}{dx} = \left( \frac{dA}{dh} \right) \left( \frac{dh}{dx} \right) = \frac{Bdh}{dx} \quad (4)$$

kjer je  $B$  konstantna širina korita, se zgornja enačba preoblikuje v (Rosier, 2007):

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I_0 - I_\lambda - \left(\frac{\alpha_C Q}{gA^2}\right) \left(\frac{dQ}{dx}\right)}{1 - \left(\frac{\alpha_C Q^2 B}{gA^3}\right)} \quad (5)$$

kar je dinamična enačba prostorsko spremenljivega toka s pojemajočim pretokom. Kot rečeno se za izpeljavo te enačbe lahko uporabi tudi pristop z gibalno količino, kar bo pokazano kasneje v tej točki. Ob predpostavki, da je  $I_0 - I_\lambda = 0$  (tj. konstantna specifična energija vzdolž preliva) in  $\alpha_C = 1$  (konstantna, tj. enakomerna porazdelitev hitrosti po prečnem prerezu), se splošna enačba pravokotnih bočnih prelivov lahko zapiše (Rosier, 2007):

$$q_b = -\left(\frac{dQ_b}{dx}\right) = \frac{2}{3} C_d \sqrt{2g} (h - p)^{3/2} \quad (6)$$

kjer so:

- $q_b$  specifični bočni pretok, tj. bočno odlivanje na enoto dolžine bočnega preliva,
- $Q_b$  odtok preko bočnega preliva,
- $C_d$  koeficient preliva, ki zajema vpliv kontrakcije curka in vpliv dotočne hitrosti,
- $p$  višina prelivne krone (praga) bočnega preliva.

Člen  $(h - p)$  pomeni prelivno višino; kinetični člen je že zajet v  $C_d$ . Skupni bočni pretok dobimo, če specifični bočni odtok pomnožimo z dolžino krone bočnega preliva  $L$ , tj. (Rosier, 2007):

$$Q_b = q_b L \quad (7)$$

Na tem mestu velja poudariti, da May in sod. (2003) v svoji monografiji o načrtovanju bočnih prelivov pri podajanju osnov energijskega pristopa uporabljajo formulacijo (May in sod., 2003):

$$q = C_D \sqrt{g} h_{pr}^{3/2} \quad (8)$$

kjer so:

- $q$  volumetrična mera odtoka na enoto dolžine bočnega preliva,
- $C_D$  pretočni koeficient preliva na osnovi prelivne višine (ang. static head),
- $h_{pr}$  prelivna višina,  $h_{pr} = h - p$

Ker sta  $q_b$  in  $q$  le različni oznaki, je razmerje pretočnih koeficientov  $C_d / C_D$  iz zgornjih enačb torej enako:

$$\frac{C_d}{C_D} = \frac{3 \cdot Q_b \cdot L \cdot \sqrt{g} \cdot (h - p)^{3/2}}{2 \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot (h - p)^{3/2} \cdot Q_b} = \frac{3 \cdot 1}{2 \cdot \sqrt{2}} = 1,06 \quad (9)$$

kar je treba upoštevati pri primerjavi izračunov količine prelivanja po posameznih avtorjih.

Zaradi predpostavke, da je vzdolž bočnega preliva specifična energija konstantna, je pretok v poljubnem prerezu glavnega korita podan z enačbo (Rosier, 2007):

$$Q = Bh \sqrt{2g(E - h)} \quad (10)$$

Za formulacijo  $C_d$  obstaja veliko različnih enačb številnih avtorjev. V splošnem velja, da z dimenzijsko analizo formuliramo  $C_d$  kot funkcijo brezdimenzijskih parametrov toka in geometrije, npr.:  $C_d = f(Fr_1, p/h_1, \dots)$ . Ta brezdimenzijska razmerja se določi eksperimentalno. Več o tem pri pregledu literature. Na tem mestu dodajmo le še naslednje: Rosier (2007) navaja, da je pri nekaterih enačbah za  $Q_b$  ali  $C_d$  na osnovi energijskega pristopa predpostavljeno, da je glavni cilj načrtovanja



oceniti skupni pretok, medtem ko je globina sekundarnega pomena, kot primere pa Rosier (2007) našteva študije Subramanya in Awasthy (1972), Borghei in sod. (1999), Muslu (2001).

Rosier (2007) dodatno predpostavlja, da je preliv običajno sorazmerno kratek, zato so spremembe nivoja gladine majhne in globina ni odločilen kriterij pri načrtovanju. Zaradi tega sta parametra dotoka, kot sta Froudovo število in globina vode, običajno izračunana glede na normalne pretočne razmere (tj. stalni enakomerni tok), za katere se smatra, da so podobne razmeram toka v prerezu na gorvodnem koncu preliva. Poleg tega je večina izrazov za  $C_d$  osnovana na meritvah globine toka v osi korita in ne na ravnini preliva, ker je predpostavljeno, da je depresijski učinek bočnega preliva zanemarljiv (Ranga Raju, K.G., Prasad, B., Gupta, S.K., 1979, cit. po Rosier, B., 2007).

### 2.1.3 Predpostavke izračuna z 1D tokom

Pri enodimenzijem (1D) obravnavanju toka preko bočnega preliva so upoštevane naslednje predpostavke:

- vsaka ukrivljenost toka je dovolj majhna, da vertikalna porazdelitev tlakov ostaja efektivno hidrostatična,
- gladina je v vsakem prečnem prerezu glavnega korita vodoravna (čeprav se spreminja v vzdolžni smeri korita), zato je hidrostatična višina nad bočnim prelivom v izbrani točki enaka globini vode v prečnem prerezu minus lokalna višina prelivne krone nad dnom oz. ostenjem,
- bočni preliv deluje kot objekt s kritično globino (tj. kot nepotopljen preliv),
- vsako neenakomernost porazdelitve hitrosti v koritu lahko upoštevamo z enostavnimi popravnimi koeficienti, ki se tičejo energije ali gibalne količine.

Vsem tem predpostavkam pri toku z bočnimi prelivni ni v celoti zadoščeno, zato je razumljivo, da metode načrtovanja, ki temeljijo na 1D enačbah toka, niso v celoti skladne z eksperimentalnimi rezultati, in da so potrebne nekatere prilagoditve za minimiziranje napak v napovedih. Ker vodni tok prečka bočni preliv pod kotom, ki se spreminja vzdolž krone (zaradi oblike curka), ni nobenega posebnega razloga, da bi pričakovali, da bo koeficient preliva enak kot v primeru prečnega preliva (May in sod., 2003). Pri določanju skupnega bočnega odtoka  $Q_b$  je zato pozornost namenjena predvsem določitvi poteka gladin vzdolž bočnega preliva (in s tem prelivnih višin) in ustreznega koeficienta bočnega preliva  $C_d$ .

Kot je bilo pokazano v izpeljavi osnovne enačbe, tj. dinamične enačbe prostorsko spremenljivega toka s pojemajočim pretokom, energijski pristop temelji na zgoraj navedenih predpostavkah in še na dveh dodatnih:

- pri bočnem odlivanju od energijskih izgub nastopajo samo izgube zaradi trenja (kar je verjetno smiselna predpostavka, če vmes ni ovir, npr. stebrov, ki bi povzročale lokalne izgube);
- kinetična energija toka, ki se preliva preko bočnega preliva, je enaka povprečni kinetični energiji toka, ki ostaja v glavnem koritu (kar je bilo z eksperimenti že ovrženo, npr. El-Khashab in Smith, 1976).

Energijski pristop temelji na zakonu o ohranitvi mase (kontinuitetna enačba) in upošteva predpostavko o konstantni specifični energiji. Ta pristop nadalje predpostavlja, da je Coriolisov koeficient  $\alpha_C$  enak 1, kar pomeni, da je privzeta enakomerna porazdelitev hitrosti. Energijski pristop torej implicira, da je vzdolžna komponenta hitrosti bočnega odtoka  $\bar{u}_b$  enaka poprečni hitrosti toka v glavnem vodotoku v istem prečnem prerezu, tj.  $\bar{u}_b = \bar{u}$ . Rezultati te disertacije kažejo, da ta predpostavka ni nujno upravičena. Med drugimi podobno trdijo tudi May in sod. (2003).

May in sod. (2003) glede teoretičnih osnov energijskega pristopa dodajajo, da se z integracijo enačbe za  $dh/dx$  lahko izračuna spreminjanje globine  $h$  glede na razdaljo vzdolž korita. Podobno lahko z integracijo enačbe za specifični pretok  $q$  določimo skupno prelivanje preko bočnega preliva  $Q_b$  in s tem vrednost razmerja prelivanja  $\Phi_b$ . Če sta na primer pretok v glavnem koritu in gladina znana na

enem koncu bočnega preliva, je možno izračunati pripadajoče vrednosti na drugem koncu, ob predpostavki, da vzdolž preliva ne pride do vodnega skoka.

Če so dostopni eksperimentalni podatki, je ta teoretični model možno umeriti na podlagi dveh merjenih informacij – vrednosti razmerja prelivanja  $\Phi_b$  in nivoja gladine gorvodno ali dolvodno. V eksperimentih z mirnim tokom je nivo dolvodne gladine običajno določen z dolvodnim prelivom ali zapornico, tako da je gorvodna gladina tista, ki je določena z delovanjem bočnega preliva in je primerna kot podatek za umerjanje. Iz tega sledi, da je v enačbah treba optimizirati dve spremenljivki, da se natančno zadosti znanim rezultatom posameznega preizkusa. Očitna izbira sta običajno pretočni koeficient bočnega preliva  $C_d$  in energijski koeficient  $\alpha_C$ , saj nobenega izmed njiju ni mogoče enostavno določiti brez dodatnih meritev. Kljub temu so se mnogi raziskovalci odločili poenostaviti rešitev s predpostavko, da je  $\alpha_C = 1$ , kar ustreza enakomerni porazdelitvi hitrosti po vseh prečnih prerezih glavnega korita. S tem pristopom običajno ni mogoče doseči, da bi se napovedane vrednosti za razmerja prelivanja in nivoje gladin v celoti ujemale z rezultati eksperimentov.

#### 2.1.4 Pristop z gibalno količino

Gibalna količina je vektorska količina, definirana kot produkt mase in hitrosti telesa,  $\vec{G} = m \cdot \vec{v}$  (pri točkastem telesu; pri razsežnem telesu se upošteva hitrost težišča). Izrek o gibalni količini povezuje spremembo gibalne količine sistema teles s sunkom sile: sprememba skupne gibalne količine teles v sistemu je enaka skupnemu sunku vsote vseh zunanjih sil. Če je vsota vseh zunanjih sil, ki delujejo na sistem teles, enaka nič, izrek o ohranitvi gibalne količine pravi, da je skupna gibalna količina konstantna (Strnad (ur.), 1981).

Izrek o gibalni količini lahko zapišemo:

$$\int_{t_1}^{t_2} \vec{F} dt = \int_{t_1}^{t_2} m \frac{d\vec{v}}{dt} dt = \int_{\vec{v}_1}^{\vec{v}_2} m d\vec{v} = m \cdot \vec{v}_2 - m \cdot \vec{v}_1 = \Delta \vec{G} \quad (11)$$

Ta izrek je ena od oblik drugega Newtonovega zakona (MaFiRaWiki, 2011).

Pristop z gibalno količino torej temelji na drugem Newtonovem zakonu (dinamična enačba) in izhaja iz teorema o gibalni količini. Pristop z gibalno količino je vektorska zveza, ki enači skupno spremembo gibalne količine in vse zunanje sile, ki delujejo na kontrolni volumen v smeri toka. V enačbi gibalne količine gre za ravnovesje sil, ki ga za smer  $x$ , tj. vzporednico dnu glavnega korita, El-Khashab in Smith (1976) podajata z enačbo:

$$\alpha_B \rho (Q + \Delta Q) (\bar{u} + \Delta u) - \rho \frac{dQ}{dx} \Delta x u_b - \alpha_B \rho Q \bar{u} = P_a - P_b + W \sin I_{dno} - F_f \quad (12)$$

kjer so:

$\alpha_B$	Bousinesqov koeficient, ki zajema vpliv neenakomerne porazdelitve hitrosti,
$\rho$	gostota tekočine,
$Q$	pretok,
$\Delta x$	razdalja med točkama $a$ in $b$ na kroni bočnega preliva, ki naj bo kratka, da lahko privzamemo, da so energijske izgube na odseku zanemarljive,
$P_a$	sila hidrostatičnega pritiska na lokaciji prečnega prereza $a$ ,
$P_b$	sila hidrostatičnega pritiska na lokaciji prečnega prereza $b$ ,
$W$	komponenta sile teže vode vzdolž $\Delta x$ ,
$I_{dno}$	naklon dna,
$F_f$	sila trenja vzdolž $\Delta x$ .

Pristop z gibalno količino upošteva, da je Boussinesqov koeficient večji ali enak kot ena ( $\alpha_B \geq 1$ ), ter da je porazdelitev hitrosti neenakomerna, tj.  $\bar{u}_b \neq \bar{u}$ . Pristop z gibalno količino torej obravnava spremembo toka gibalne količine vzdolž glavnega korita. Na ta način se izognemo napakam, ki so povezane s predpostavko, da skupna energija toka v glavnem koritu ostaja konstantna vzdolž bočnega preliva (razen sprememb zaradi trenjskih izgub na robovih). Ta pristop zahteva poznavanje gibalne količine, ki jo voda odnaša preko bočnega preliva. Obravnava sil, ki izhajajo iz enačb hidrostatičnega tlaka in gibalne količine, vodi v naslednjo 1D enačbo, ki opisuje spreminjanje globine vzdolž toka (May in sod., 2003):

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I_0 - I_\lambda + \left(2\alpha_B - \frac{\bar{u}_b}{\bar{u}}\right) \frac{qQ_x}{gA^2}}{1 - \frac{\alpha_B B Q_x^2}{gA^3}} \quad (13)$$

kjer so:

- $Q_x$  pretok v glavnem koritu v prerezu na razdalji  $x$  od gorvodnega konca bočnega preliva,
- $\bar{u}_b$  vzdolžna komponenta hitrosti toka preko preliva (v smeri  $x$ ),
- $\bar{u}$  poprečna hitrost toka v glavnem vodotoku (v istem prečnem prerezu kot  $\bar{u}_b$ ).

Če se predpostavi enakomerno porazdelitev hitrosti (tj.  $\alpha_B = 1$  in  $\bar{u}_b = \bar{u}$ ), potem enačba (13) postane:

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I_0 - I_\lambda + \frac{qQ_x}{gA^2}}{1 - \frac{BQ_x^2}{gA^3}} \quad (14)$$

Ta rezultat je identičen temu, kar dobimo z energijskim pristopom, če v ustrezni enačbi uporabimo vrednost  $\alpha_C = 1$ . Odtod sledi, da energijski pristop in pristop z gibalno količino pripeljeta do ekvivalentnih oblik enačb enodimenzijskega neenakomernega toka preko bočnega preliva, če je porazdelitev hitrosti v glavnem koritu enakomerna ali je kot taka vsaj predpostavljena; po definiciji bo tedaj  $\bar{u}_b$  enaka  $\bar{u}$ . Če pa porazdelitev hitrosti ni enakomerna, enačbi obeh pristopov ne dajeta nujno enakih napovedi za razmerje prelivanja ali za globine toka (May in sod., 2003).

Če so za umerjanje enačbe (13) za potek gladine  $dh/dx$  in enačbe (8) za specifični pretok  $q$  na razpolago eksperimentalni podatki, je treba določiti tri parametre. To so naslednje efektivne vrednosti (May in sod., 2003):

- koeficient bočnega preliva  $C_D$ ,
- koeficient gibalne količine  $\alpha_B$ ,
- razmerje hitrosti  $\bar{u}_b/\bar{u}$ .

Omenjeni avtorji navajajo, da je v večini raziskav običajno mogoče najti le dva neodvisna eksperimentalna podatka, ki ju lahko primerjamo s teoretičnimi napovedmi:

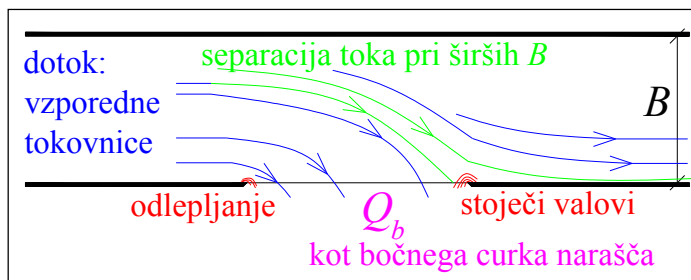
- skupno razmerje prelivanja  $\Phi_b = Q_b/Q_l$ ,
- nivo gladine na gorvodnem ali dolvodnem koncu preliva.

Teoretično zato obstaja veliko kombinacij  $C_D$ ,  $\alpha_B$  in  $\bar{u}_b/\bar{u}$ , ki lahko zadostijo podatkom posameznega eksperimenta, je pa ob zadostni količini informacij iz neodvisnih eksperimentov možno oblikovati korelacije parametrov, ki v skupnem dajejo najboljše prilagajajoče se ujemanje z rezultati (angl. best-fit agreement) (May in sod., 2003).

### 2.1.5 Potek gladin pri bočnih prelivih

To poglavje je večinoma povzeto po May in sod. (2003). Tokovne razmere pri bočnih prelivih so izrazito kompleksnejše od tistih pri prečnih prelivih, zaradi česar zanje ni mogoče podati splošnih

pretočnih enačb, ki bi bile podobno enostavne kot enačbe za prečne prelive. Tipične hidravlične razmere na območju bočnega preliva so za mirni režim toka shematično podane na sliki 4:



Op.: Separacija toka ni nujno izrazita.

Slika 4: Shematični prikaz tipičnih tokovnih razmer v območju bočnega preliva

Figure 4: Scheme of typical flow conditions at side weir

Glavne značilnosti toka, zaradi katerih so razmere kompleksne in zahtevne za analizo, so naslednje:

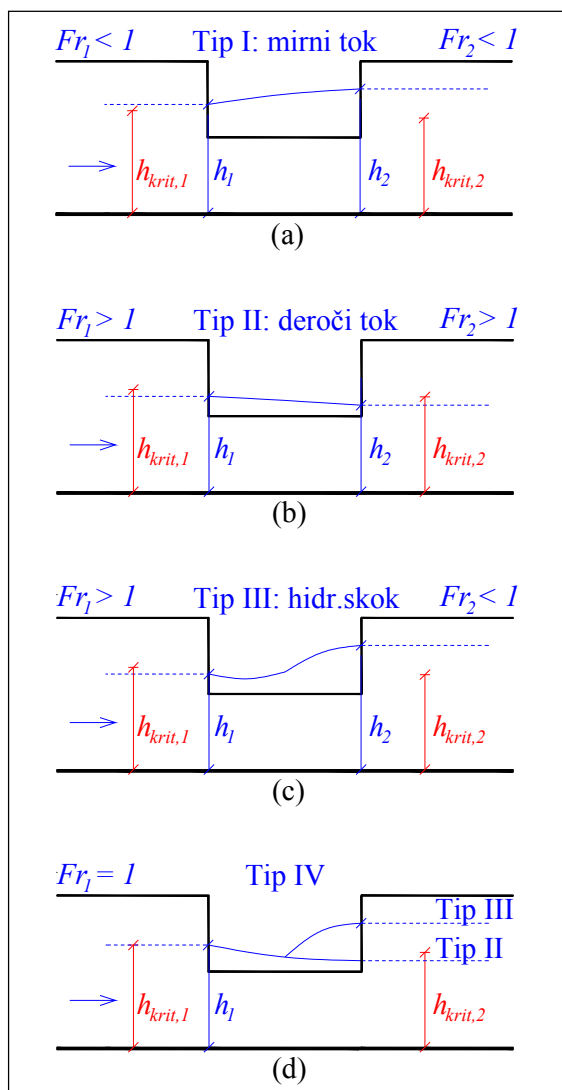
- Površinski sloji blizu bočnega preliva se razlivajo preko krone, medtem ko bočni preliv na preostali tok, ki je bližje dnu ter vzdolž nasprotne stene korita, ne vpliva v tolikšni meri, tako da le-ta nadaljuje svojo pot po glavnem koritu.
- Prelivanje preko krone poteka pod kotom, ne pa pravokotno na krono kot v primeru prečnih prelivov. Kot prelivanja ni konstanten, pač pa odvisen od relativne hitrosti dotekajočega toka. Poleg tega se kot prelivanja spreminja tudi vzdolž samega preliva, saj se hitrost toka zaradi zmanjšanja pretoka, ki ostaja v koritu, manjša v dolvodni smeri.
- Nivo gladine v glavnem koritu ne ostaja konstanten, pač pa se spreminja vzdolž preliva v odvisnosti od tokovnih razmer v koritu. Posledično se prelivna višina spreminja z razdaljo in povzroča spremembo pretoka na enoto dolžine preliva.
- Zaradi prelivanja pod kotom in zaradi nastanka neenakomerne porazdelitve hitrosti v glavnem koritu je analiza pretočnih razmer zahtevna, toka pa ni mogoče popisati v okviru predpostavk in enačb, ki veljajo za prečne prelive.

Iz navedenega je razvidno, da metode načrtovanja bočnih prelivov niso tako enostavne kot pri prečnih prelivih in da je pri uporabi eksperimentalnih ali numeričnih rezultatov treba preveriti, da jih uporabljamo le znotraj meja njihove veljavnosti.

Tokovne razmere v glavnem koritu gorvodno in dolvodno od bočnega preliva lahko bistveno vplivajo na obnašanje toka vzdolž bočnega preliva. Različni tipi razmer so ponazorjeni z vzdolžnimi prerezi gladin glede na Froudovo število, ki podaja režim toka (Slika 5). Froudovo število je razmerje med poprečno hitrostjo toka  $\bar{u}$  v glavnem koritu in kritično hitrostjo  $u_{krit}$ , ki nastopi, ko ima tok kritično globino  $h_{krit}$ , tj. globino, pri kateri je specifična energija  $E$  minimalna (May in sod., 2003):

$$Fr = \frac{\bar{u}}{u_{krit}} = \sqrt{\frac{BQ^2}{gA^3}} \quad (15)$$

Na spodnji sliki (Slika 5) indeks 1 pomeni dotekajoči tok, indeks 2 pa tok dolvodno od preliva; oznaka  $h$  pomeni globino toka:



Slika 5: Vzdolžni prerezi gladin pri bočnem prelivu (spremenjeno po May in sod., 2003)

Figure 5: Types of longitudinal flow profile at side weirs (modified from May in sod., 2003)

Poudariti velja, da je kritična globina dolvodno od preliva manjša od kritične globine dotoka, saj prelivanje preko bočnega preliva zmanjša količino vode, ki ostane v glavnem koritu. Iz slike 5 je razvidno, da so možni štirje osnovni tipi tokovnih razmer:

- Tip I (Slika 5a): V tem primeru tok v vseh točkah gorvodno, dolvodno in vzdolž bočnega preliva ostaja miren (tj.  $Fr < 1$ ). Ta tip običajno nastopi, če ima glavni vodotok enakomeren in sorazmerno majhen padec (npr. reda velikosti 1/200 ali manj). Glavna značilnost tega tipa razmer je, da gladina glavnega korita vzdolž preliva narašča v dolvodni smeri. To pomeni, da je prelivna višina, ki vpliva na količino prelivanja, na dolvodnem koncu večja kot na gorvodnem koncu. Posledica tega je, da intenziteta prelivanja ni konstantna, pač pa se povečuje v dolvodni smeri.
- Tip II (Slika 5b): V tem primeru tok v vseh točkah gorvodno, dolvodno in vzdolž bočnega preliva ostaja deroč (tj.  $Fr > 1$ ). Do tega lahko pride, če je bočni preliv nameščen v strmem glavnem koritu, ki nima uravnavane spodnje vode (npr. z zapornico ali z naravno zožitvijo vodotoka). Tokovne razmere so obratne tistim iz tipa I, saj nivo vode vzdolž preliva pada v dolvodni smeri. Posledica tega je, da intenziteta prelivanja pada proti dolvodnemu koncu preliva.
- Tip III (Slika 5c): Gre za razmere z mešanim režimom toka, pri čemer je dotok deroč (tj.  $Fr_1 > 1$ ). Nivo vode se vzdolž preliva sprva zniža kot pri tipu II, nato pa se pojavi vodni skok in tok

preide v mirni režim, naraščajoča gladina pa je podobna tipu I. Do takih razmer lahko pride, če je gorvodno korito strmo, dolvodno od preliva pa postane položnejše, oziroma se še dlje dolvodno nahaja regulacijski objekt ali naravna zožitev. Slednje povzroči nivo gladine, ki je višji od vrednosti kritične globine toka v glavnem koritu, tako da je  $Fr_2 < 1$ . Prehod iz deročega v mirni tok se izvede s pojavom hidravličnega skoka.

- Tip IV (Slika 5d): Gre za varianto tipov II in III, pri kateri tok v gorvodnem odseku korita doseže kritično globino na začetku bočnega preliva. Tok gorvodno od bočnega preliva je miren, vendar pa Froudovo število narašča do  $Fr = 1$  na začetku preliva. Dolvodno od te točke se tok pospešuje in se lahko oblikuje kot tip II ali tip III, odvisno od padca dolvodnega glavnega korita ali navzočnosti regulacijskega objekta.

Temeljno razliko v obnašanju toka tipa I in tipa II lahko razložimo z obravnavo energijskih sprememb in sprememb gibalne količine, do katerih prihaja v glavnem koritu zaradi prelivanja preko bočnega preliva. Vzemimo primer pravokotnega korita širine  $B$ . Specifična energija v koritu je podana kot (May in sod., 2003):

$$E = h + \frac{\bar{u}^2}{2g} = h + \frac{Q^2}{2gB^2h^2} \quad (16)$$

Predpostavimo, da se pretok  $Q$  v koritu spremeni (zaradi prelivanja vode preko bočnega preliva), ne da bi tok, ki ostaja v glavnem koritu, izgubil energijo. Za majhno spremembo pretoka lahko pripadajočo spremembo globine vode določimo z odvajanjem enačbe za specifično energijo  $E$  po pretoku  $Q$ . Tako dobimo (May in sod., 2003):

$$\frac{dE}{dQ} = \frac{dh}{dQ} + \frac{Q}{gB^2h^2} - \frac{Q^2}{gB^2h^3} \left( \frac{dh}{dQ} \right) \quad (17)$$

Ker se predpostavlja, da se energija ne izgublja, velja  $dE/dQ = 0$ , in če v zgornjo enačbo vpeljemo še Froudovo število, ki je za pravokotno korito širine  $B$  definirano z enačbo:

$$Fr = \sqrt{\frac{Q^2}{gB^2h^3}} \quad (18)$$

lahko enačbo (17) zapišemo kot (May in sod., 2003):

$$\frac{dh}{dQ} = \frac{-Q}{gB^2h^2(1 - Fr^2)} \quad (19)$$

Ta rezultat kaže, da je pri razmerah tipa I (tj. mirni režim toka,  $Fr < 1$ ) izraz  $dh/dQ$  negativen, in da zato zmanjšanje pretoka v glavnem koritu na račun prelivanja preko bočnega preliva (kar povzroča, da je  $dQ$  negativen) povzroči zvišanje gladine vzdolž preliva. Situacija je ravno obratna, če je tok v deročem režimu in torej  $Fr > 1$ . V tem primeru  $dh/dQ$  postane pozitiven, tako da se globina vode v glavnem koritu zmanjšuje vzdolž preliva.

Vzdolžni prerezi na sliki 5 kažejo na to, da je za bočne prelive nemogoče izpeljati enostavne pretočne enačbe, ki bi upoštevale vse možnosti. Ta problem se v praksi precej poenostavi, saj so za običajne inženirske aplikacije zaželeno in priporočene le razmere tipa I (Borghei in sod., 1999), tako da se dimenzioniranje bočnih prelivov osredotoča le na izpolnitev te zahteve. To velja tudi za postopek dimenzioniranja, katerega teoretična izhodišča so predstavljena v poglavju 3. Seveda pa to ne pomeni, da tokovne razmere tipa III ali IV ne morejo biti predmet raziskav. To potrjuje nedavno delo Farhadi Rad in sod. (2011).

### 2.1.6 Hitrostno polje v območju bočnega preliva

Pri enodimenzijski obravnavi toka, ki je pogosto uporabljena celo za 3D probleme, se razmere v prečnem prerezu ponazori s poprečnimi parametri za tok kot celoto, vendar pa je porazdelitev dejanskih hitrosti že pri ravnem koritu lahko precej neenakomerna, zato se vpliv neenakomerne porazdelitve hitrosti po prerezu zajame s korekcijskimi koeficienti  $\alpha_C$  ali  $\alpha_B$ .

Coriolisov koeficient  $\alpha_C$ , imenovan tudi koeficient kinetične energije, "omogoča zajeti vpliv neenakomerne porazdelitve hitrosti po prerezu pri računih, kjer uporabljamo energijsko enačbo. Njegova vrednost je odvisna od razlike med izračunano kinetično energijo toka, če upoštevamo srednjo hitrost toka, oz. če upoštevamo dejansko porazdelitev hitrosti po prerezu. [...] Možno je pokazati, da ima koeficient  $\alpha_C$  vedno večjo vrednost kot 1. [...] Vrednost Coriolisovega koeficienta postaja tem večja, čim bolj neenakomerna je razporeditev hitrosti po prerezu." (Steinman, 2010, str. 134). Coriolisov koeficient je definiran takole (Al-Khatib in Göğüş, 1999):

$$\alpha_C = \frac{1}{\bar{u}^3 A} \int_A u^3 dA \quad (20)$$

kjer sta:

- $u$  porazdelitev lokalnih hitrosti po prečnem prerezu korita,
- $\bar{u}$  poprečna hitrost prečnega prereza toka.

Podobno Lee in Holley (2002) definirata korekcijski faktor kinetične energije z enačbo:

$$\alpha_C = \frac{1}{A} \int_A \left( \frac{u^3}{\bar{u}^3} \right) dA \quad (21)$$

kjer je  $u$  točkovna hitrost v koritu.

Tudi Boussinesqov koeficient  $\alpha_B$  zajema vpliv neenakomerne porazdelitve hitrosti po prerezu, le da nastopa pri računih, kjer se uporabi teorijo gibalne količine. Lee in Holley (2002) definirata korekcijski faktor gibalne količine tako:

$$\alpha_B = \frac{1}{A} \int_A \left( \frac{u^2}{\bar{u}^2} \right) dA \quad (22)$$

Koeficient  $\alpha_B$  se v literaturi pogosto označuje s simbolom  $\beta$ . Koeficient  $\alpha_B$  "je vedno večji od vrednosti ena" (Steinman, 2010, str. 134).

## 2.2 Teoretične podlage vizualizacije toka

Področje vizualizacije toka je zelo obsežno in izrazito interdisciplinarno, saj z omenjenimi metodami rešujejo kompleksne probleme tokov fluidov in transporta delcev na področju strojništva (avtomobilska industrija, aerodinamika, turbinski stroji), gradbeništva (hidrotehnični objekti, podzemne vode), meteorologije in celo biomehanike ter medicine. Spekter raziskav s področja vizualizacije je temu primerno zelo širok, kategorizacija tovrstnih raziskav pa ni enostavna.

V okviru te disertacije je pregled teorije vizualizacijskih metod omejen na njihovo uporabo pri reševanju hidrotehničnih problemov. Teoretična podlaga je podrobneje podana v točki 2.2.4, in sicer za metodo, uporabljeno pri eksperimentih te disertacije. Pri tem povzemam Bajcar in sod. (2009).

### 2.2.1 Uvod

Fluidi v gibanju pogosto tvorijo vzorce, ki so preveč zapleteni, da bi si jih lahko intuitivno predstavljali, zato nam vizualne podobe tokov lahko pomagajo pri analiziranju realnih vzorcev toka. V časovno odvisnih tokovih so tokovni vzorci, ki si sledijo, različni, zato je razumevanje tokovnega pojava težko doseči le na podlagi rezultatov nekaj kontaktnih tipal na fiksnih lokacijah. Različne vizualizacijske metode so lahko uporabljene kot eksperimentalno orodje za določanje splošne narave kompleksnih tokov in za kvantitativne meritve veličin kot so hitrosti, gostota, časovna zaporedja ipd. (Kline, 1969).

Vizualizacija toka je morda najstarejše raziskovalno orodje v mehaniki tekočin in v hidravliki, saj je verjetno bolj kot katerikoli orodje, ki omogoča obravnavo mehanike tekočin v splošnem, še posebej pa turbulenco, pripomogla k številnim najbolj zanimivim odkritjem na tem področju. Ker je vizualizacija sorazmerno preprosta, hitra in zmožna prikaza globalnega in lokalnega obnašanja toka, lahko daje tovrstna obravnava gibanja tekočine, ki je dostopno vizualni zaznavi, neprecenljive kvalitativne in kvantitativne informacije o kompleksnem toku (Fujita, 2002).

Začetnik žanra vizualizacije toka je bil Leonardo da Vinci pred približno 500 leti. Leonardo je skiciral prosti vodni curek, ki je iz kvadratne odprtine padal v tolmun, in njegov pristop predstavlja morda prvo uporabo vizualizacije kot znanstvenega orodja za preučevanje turbulentnega toka. Renesančni genij je zapisal: "Opazuj gibanje vodne površine, ki je podobno lasem, ki imajo dvoje gibanj, od katerih je eno povzročeno s težo las, drugo pa s smerjo kodrov; na ta način ima voda vrtilčna gibanja, od katerih so ena posledica glavnega toka, druga pa naključnega in povratnega gibanja." Na podlagi tega odstavka se je porodilo ugibanje, da je Leonardo da Vinci morda odkril danes znano Reynoldsovo dekompozicijo turbulence skoraj 400 let pred Reynoldsovo vizualizacijo toka in sodobnimi analizami (Gad-el-Hak, 2000).

S prihodom digitalne revolucije v modernih časih so se te, v osnovi kvalitativne tehnike, spremenile v kvantitativne. Ena od izrazitih prednosti vizualizacije toka v primerjavi z ostalimi eksperimentalnimi pristopi je ta, da so v bistvu neinvazivne oz. neintruzivne. Preko stalnega in sofisticiranega tehnološkega razvoja so nedavno postale dosegljive 2D ali 3D vektorske in povezane skalarne tokovne kvantifikacije. Sodobni instrumenti za vizualizacijo toka stalno pridobivajo na prostorski in časovni zmogljivosti, tako da čedalje bolj dopolnjujejo podatke, pridobljene z numeričnimi modeli (Fujita, 2002).

### 2.2.2 Interpretacija vizualnih podob tokovnih vzorcev

Ko uporabljamo poljubno vizualizacijsko metodo, se moramo vprašati, katero fizikalno lastnost toka ali fluida ta slika prikazuje in kako naj te vzorce na sliki interpretiramo. Pri uporabi metod, kjer se delce tekočine na nek način označi (npr. dim, barvilo, vzgonsko nevtralni delci, vodikovi mehurčki, površinski prah), je pomembno razumevanje odnosov med slikami opazovanj in naslednjimi štirimi koncepti: trajektorija (ang. *pathline*), časovna linija (ang. *timeline*), sled (ang. *streakline*) in tokovnica (ang. *streamline*), ki jih Kline (1969) definira takole:

- *Trajektorija (ang. pathline)* je črta, ki povezuje množico točk (ang. *locus of points*), po kateri potuje dani tekočinski delec v opazovanem časovnem intervalu; trajektorija je dejanska pot delca v tem časovnem intervalu.
- *Časovna linija (ang. timeline)* je niz tekočinskih delcev, ki tvorijo črto v danem trenutku. Časovno linijo danega trenutka naredimo vidno s tem, da jo označimo z mehurčki ali na kak drug način. V kasnejšem času sta oblika in lokacija časovne linije v splošnem drugačna.
- *Sled (ang. streakline)* je množica delcev, ki so šli skozi izbrano točko v določenem časovnem intervalu. Barvilo ali dim, ki počasi iztekata iz fiksnega injektorja, tvorita tako sled, ki poteka skozi točko vnosa.



- *Tokovnica* (ang. *streamline*) je črta, na katero je v danem trenutku vektor hitrosti povsod tangenta na krivuljo. Koncept tokovnic je v bistvu po svojem značaju matematičen. Z vizualizacijo običajno generiramo sledi, trajektorije in časovne linije. Polje tokovnic in posamezne tokovnice se lahko določi iz sledi, trajektorij in časovnih linij na različne načine.

Eden od načinov, da se trajektorije, sledi in časovne linije naredi vidne, je metoda z vodikovimi mehurčki. V stalnem toku so sled, trajektorija in tokovnica skozi posamezno točko identične (tj. sovpadajo). To izvira iz dejstva, da se hitrostno polje ne spreminja po času; torej vsak delec potuje po enaki trajektoriji. Torej vsak delec, ki gre skozi fiksno točko prostora, potuje po enaki sledi; to je njegova trajektorija (po definiciji) in je tudi povsod tangenta na vektorsko polje hitrosti. Na ta način je pri stalnem gibanju vzorec tokovnic priročno prikazan z nizom sledi barvila ali dima. (Kline, 1969)

Poudariti velja, da so bile tokovne razmere na vseh obravnavanih modelih bočnih prelivov neenakomerne, a stalne. Neenakomerni tok nastopa, če v danem trenutku hitrosti niso enake v vseh točkah vzdolž toka. Stalni tok je tok, v katerem se razmere (hitrost, tlak in prečni prerez) lahko spreminjajo od točke do točke, a se ne spreminjajo s časom (Sleigh in Noakes, 2009).

Kline (1969) nadaljuje: Včasih hočemo določiti vektorsko polje hitrosti. V stalnem, dvodimenzijem, nestisljivem toku lahko to dosežemo bodisi z uporabo trajektorij ali sledi, saj je tok vedno vzporeden z njimi, velikost vektorja hitrosti pa je obratno sorazmerna njihovi separaciji oz. razmiku. Toda numerična točnost take metode ni dobra, saj moramo meriti majhne razdalje med linijami, ki niso nujno zelo ostro definirane (Kline, 1969).

### 2.2.3 Vizualizacijske metode v hidravliki

Vizualizacija toka, navadna ali računalniško podprta, je merilna metoda oz. orodje, s katerim lahko opazujemo in merimo tokovne strukture pri dinamiki tekočin. Za tekočinske tokove se eksperimente izvaja z vodo ali zrakom, in ker sta ta čista fluida prosojna, je potrebno tok kvantitativno vizualizirati z uporabo in gibanjem dodanih delcev, t.i. markerjev toka. Strukture toka postanejo torej vidne, če se toku doda pasivna sledila, ki so običajno: dim (pri raziskavah aerodinamike), barvila, trdni delci sledila ali mehurčki (pri hidrodinamiki).

Variante barvil so zelo številne. Mednje sodijo različno obarvana fluorescentna barvila (npr. fluorescein, rodamin-B, rodamin-6G), ki se uporabljajo v kombinaciji z lasersko osvetlitvijo primerne valovne dolžine, različne mešanice (zlasti barv in alkohola) in celo prehranska barvila, mleko, mehčalec ipd. Kot sledila, ki jih homogeno ali v plasteh posejemo v tok, se uporabljajo npr. fluorescentni, polistirenski, srebrno premazani ali visoko reflektivni delci (Smits in Lim, 2000), bela polietilenska zrna (Baud in sod., 2005) in različni posebno oblikovani plovci (Pogačnik, 2005). Do določene mere sorodna, a svojevrstna oblika sejanja delcev so vodikovi mehurčki, generirani z elektrolizo (Okamoto in sod., 1971).

Z ustrezno izbiro barvila oz. sledila je treba zagotoviti, da slednje natančno sledi toku tekočine, saj se z vizualizacijskimi metodami osredotočamo na premikanje sledila, oz. na prostorske in časovne spremembe koncentracij. Če dogajanje posnamemo, lahko posnetke procesiramo za različne namene, npr. za analizo ločevanja vrtincev (Širok in sod., 2000), prostorsko določevanje območij recirkulacije (Širok in sod., 2002), opazovanje kavitacijskih struktur (Širok in sod., 2003), določanje vpliva toka na usedanje delcev (Bajcar in sod., 2007) – in nenazadnje za določanje hitrostnih polj, kar je tema te disertacije.

Računalniško podprta vizualizacija za meritve hitrostnih polj toka uporablja predvsem dodajanje trdnih delcev v tok, značilen primer je metoda PIV (Particle Image Velocimetry – meritev hitrosti na podlagi slik premikov delca). Da bi z računalniško podprto vizualizacijo raziskovali kvalitativne, kakor tudi kvantitativne lastnosti toka, je običajno treba uporabiti dva sistema hkrati, enega s sledilom v toku za kvalitativne meritve, kot je npr. metoda PLIF (Planar Laser Induced Fluorescence –

ravninska lasersko inducirana fluorescenca), in drugega za kvantitativne meritve, kot je npr. metoda PIV (Hu in sod., 2004 ter Reungoat in sod., 2007). Tovrstni kombinirani sistemi so pogosto kompleksni, saj dva sistema potrebujeta dve kameri z ustreznimi filtri in dva tipa sledil. Metoda PIV sama po sebi terja pulzirajočo lasersko svetlobno ravnino, število v tok dodanih delcev pa je običajno omejeno s tem, koliko je programsko orodje za procesiranje slik zmožno prepoznati posamezen delček množice na dveh zaporednih slikah. Druge merilne metode, kot sta na primer HWA (Hot-Wire Anemometry – anemometrija z vročo žičko) ali LDA (Laser-Doppler Anemometry – laserska Dopplerjeva anemometrija), so zmožne meriti hitrostno polje le v eni točki naenkrat. Poleg tega so te metode bodisi invazivne, tj. povzročajo fizično motnjo toka (HWA), ali pa so komplicirane in zahtevajo dolgotrajne priprave na meritev (LDA). Povrh tega večina običajnih merilnih metod ne omogoča merjenja hitrosti v nestacionarnih ali periodičnih tokovnih strukturah, kakršni so npr. von Karmanovi vrtinci (Bajcar in sod., 2009).

#### 2.2.4 Vizualizacijska metoda, uporabljena za meritev razmer v območju bočnih prelivov

Kvantifikacija toka v območju bočnega preliva je bila izvedena z uporabo računalniško podprte vizualizacijske metode za diagnostiko časovno variabilnih topoloških struktur sledila v opazovanem vodnem toku. Ta temelji na hipotezi, da je nivo sivine digitalizirane slike v izbranem oknu in v danem trenutku proporcionalen koncentraciji barvila, ki se nahaja v opazovanem oknu. Metoda temelji na predpostavki, da je kinematika barvila zajeta v advekcijem zakonu, ki povezuje konvektivne in difuzivne mehanizme transporta inicirane snovi v osnovni vodni tok. Advekcijška enačba je parcialna diferencialna enačba drugega reda. Če se vanjo uvede časovno variabilno matriko, ki popisuje topološko strukturo skalarnega polja koncentracije polutanta, se matematični zapis advekcijške enačbe zreducira v enostavnejšo parcialno enačbo, ki je numerično rešljiva. Rešitev enačbe je dvodimenzionalno hitrostno polje, s čimer se izvede prehod od polja koncentracij polutanta k polju hitrosti v poljubni merjeni plasti vodnega toka.

Sledi podrobnejša predstavitev metode: Najpomembnejši korak metode je, da se vektorsko polje hitrosti poveže s skalarnim poljem koncentracij, tega pa s črnobelimi (ČB) oz. sivimi (ang. grayscale) slikami. Če v tok vpeljemo sledilo s koncentracijo  $N$ , se gradient  $N$  v smeri  $x$  ohranja, če dovajamo molekule sledila tako, da zadostimo enačbi (McComb, 1996):

$$\phi = -D \frac{dN}{dx} \quad (23)$$

kjer so:

$\Phi$	gostota masnega toka, tok v smeri $x$ ,
$D$	molekularna difuzivnost,
$N$	koncentracija.

Enačba (23) predstavlja Fickov zakon difuzije. Če se upošteva procese nestalnega transporta, pri katerih je stopnja spremembe koncentracije  $N$  v elementarnem volumnu predstavljena z razliko med dotokom in odtokom sledila skozi meje tega volumna, se enačbo (23) lahko zapiše v obliki (McComb, 1996):

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D \nabla^2 N \quad (24)$$

Če nastopajo še prostorski premiki tekočine (tj. konvekcija), se v enačbi (24) parcialni odvod po času nadomesti s totalnim odvodom:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(Nv_i)}{\partial x_i} = D \nabla^2 N \quad (25)$$

kjer  $v_i$  pomenijo komponente hitrosti v smereh  $x_i$ .

Drugi člen na levi strani enačbe (25) vključuje vplive konvekcije tekočine. Enačba (25) je poznana kot advekcijsko-difuzijska enačba in predstavlja osnovno povezavo med koncentracijo sledila in kinematiko toka. Če poznamo molekularno difuzivnost sledila v toku in vrednosti koncentracije  $N$ , ter posledično vrednosti njenih odvodov, ostane edina neznanka enačbe (25) vrednost hitrosti, oz. njenih komponent  $v_i$  (v smereh  $x_i$ ). Molekularna difuzivnost  $D$  je snovna lastnost in je definirana za različne pare substanc glede na tlak in temperaturo. Koncentracija sledila  $N$  se stalno spreminja, zato je treba izmeriti njeno trenutno vrednost. V našem primeru se to določi iz črnobelih posnetkov toka.

Slika toka, v katerem je sledilo, tvori matriko pikslov z različnimi odtenki sivine. Normalno celoštevilске vrednosti sivine segajo pri 8-bitnem digitalnem zapisu od 0 (črna) do 255 (bela), lahko pa jih normaliziramo na interval med 0 in 1. Ko sledilo v toku osvetlimo z zunanjim svetilom, so njegove vrednosti sivine običajno višje od vrednosti, ki jih ima tekočina. Večja ko je koncentracija sledila v toku, večja je vrednost sivine tega sledila na ČB slikah. Torej je:

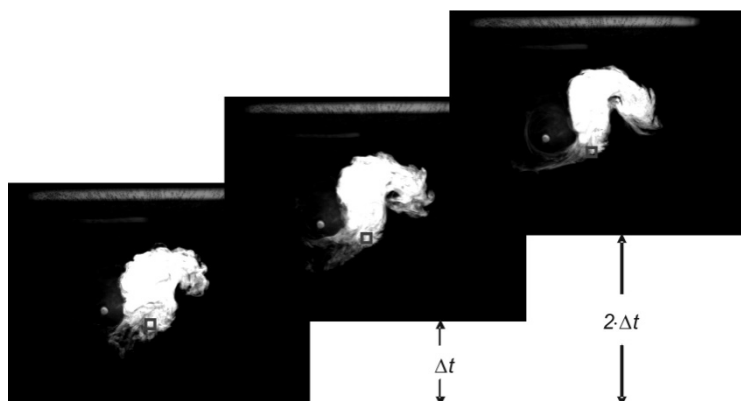
$$S \propto N \quad (26)$$

kjer  $S$  označuje povprečno vrednost sivine v izbranem oknu pikslov ČB slike.

Aider in Westfreid (1995) ter Simoens in Ayrault (1994) so pokazali, da je razmerje med vrednostjo svin in koncentracijo sledila v enačbi (26) linearno. Povprečno vrednost sivine v oknu pikslov se dobi z dvojno vsoto (Širok in sod., 2002):

$$S = \frac{1}{l} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^m E_{ij} \quad (27)$$

kjer  $E$  predstavlja intenziteto sivine opazovanega posameznega piksla na lokaciji  $(i, j)$  znotraj okna, ki ima  $(l \times m)$  pikslov. Numerični izračun časovnega odvoda koncentracije  $\partial N / \partial t$  se izvede z upoštevanjem povprečnih vrednosti svin  $S$  okna, katerega položaj je fiksiran na zaporedju slik, kot kaže slika 6:



Slika 6: Izračun časovnega odvoda koncentracije  $N$  (fiksno okno, zaporedne slike v razmaku  $\Delta t$ ) (Bajcar in sod., 2009, str. 217)

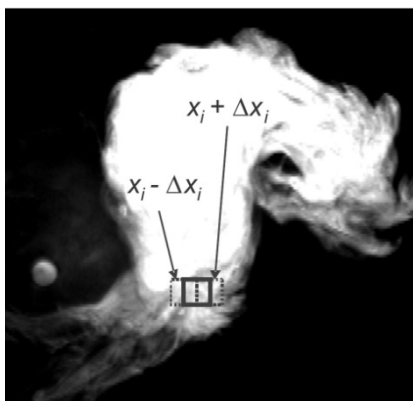
Figure 6: Calculation of the time derivative of concentration  $N$  (fixed window, sequence of images) (Bajcar et al., 2009, p. 217)

Če poznamo čas med dvema zaporednima slikama  $\Delta t$  (kar se enostavno določi iz frekvence, s katero kamera zajema slike), lahko izraz  $\partial N / \partial t$  aproksimiramo z izrazom:

$$\frac{\partial N}{\partial t} \approx \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (28)$$

kjer  $\Delta S$  označuje razliko poprečne vrednosti sivine v fiksnem oknu med dvema zaporednima slikama, posnetima v časovnem zamiku  $\Delta t$ .

Krajevni odvod koncentracije sledila  $\partial N/\partial x_i$  se lahko izračuna iz posamezne slike toka. V tem primeru se premika okno, in sicer v izbrani smeri  $x_i$ , da dobimo krajevno razliko povprečne vrednosti sivine  $S$ , kot kaže slika 7:



Slika 7: Določitev krajevne razlike koncentracije  $N$  (premik okna na posamezni sliki za  $\Delta x$ )  
(Bajcar in sod., 2009, str. 218)

Figure 7: Determination of spatial difference in concentration  $N$  (window moves over a single image)  
(Bajcar et al., 2009, p. 218)

Izračun krajevnih odvodov se lahko izvede z uporabo standardnih numeričnih tehnik, kakršna je metoda centralnih razlik (Mathews in Kurtis, 2004), kot kažeta naslednji enačbi:

$$\frac{\partial N}{\partial x_i} = \frac{S(x_i + \Delta x_i) - S(x_i - \Delta x_i)}{2\Delta x_i} \quad (29)$$

$$\frac{\partial^2 N}{\partial x_i^2} = \frac{S(x_i + \Delta x_i) - 2S(x_i) + S(x_i - \Delta x_i)}{(\Delta x_i)^2} \quad (30)$$

V 2D sistemu enačba (25) predstavlja dve linearni diferencialni enačbi z dvema neznankama, tj. dvema komponentama hitrosti. Pri reševanju takega sistema enačb je treba določiti začetne pogoje, kar pa je pogosto kar zoprn in zahtevno zaradi dejstva, da kinematične lastnosti toka v splošnem niso znane, razen če so izmerjene z neko drugo metodo. Namesto tega se sistem diferencialnih enačb (25) lahko pretvori v sistem navadnih linearnih enačb, v katerem so neznanke komponente hitrosti in njihovi krajevni odvodi. Taki sistemi so v splošnem numerično enostavno rešljivi in se obnesejo tudi če so predoločeni (tj. število enačb je večje od števila neznank). V primerjavi s sistemom diferencialnih enačb se torej število neznank podvoji, kar povzroči, da so za 2D sistem potrebne vsaj štiri navadne enačbe. Vsaka enačba potrebuje dve zaporedni sliki toka zaradi izračuna časovnega odvoda. Z drugimi besedami, za pridobitev informacije o dveh hitrostnih komponentah toka je potrebnih najmanj pet zaporednih slik toka.

Opisana metoda temelji na znanih fizikalnih zvezah in odraža osnovne principe določanja kinematike toka s sredstvi računalniško podprte vizualizacije. Njeno veljavnost so Bajcar in sod. (2009) primerjalno preverili z bolj konvencionalnimi merilnimi metodami, in sicer v raziskavi zračnega curka, ki je uporabljala tudi anemometrijo z vročo žičko. Ugotovili so, da je metoda sposobna izračunati tako smer toka (tj. smer pasivnega sledila v toku), kakor tudi velikost hitrosti toka z dobro natančnostjo. V času omenjene raziskave je bila obravnavana vizualizacijska metoda na začetku

razvoja in v smislu natančnosti še inferiorna običajnim merilnim metodam, kot so HWA, PIV ali LDA (Bajcar in sod., 2009). To je bilo v novejši verziji metode, uporabljeni tudi v tej disertaciji, izboljšano. Izvedba meritev (elektroliza, osvetlitev, snemanje, nastavitve parametrov numeričnega računa) je bila za poseben primer raziskave obravnavana v Klemenčič (2010), podrobneje pa bo opisana v tej disertaciji, v poglavju o meritvah.

### 2.3 Merilna negotovost

Pri meritvah gre za eksperimentalno določevanje neke fizikalne veličine, ki jo imenujemo merjena veličina. Rezultat merjenja (merilni rezultat) je merjena vrednost merjene veličine in je lahko izračunan iz več merjenih vrednosti (Solar, 2001).

"Kljub temu, da je merjenje objektivni postopek, z njim ne dobimo prave vrednosti veličine" (Bergelj, 2002, str. 57). V okviru te disertacije se vprašanje merilne negotovosti poraja predvsem v povezavi z meritvami pretokov (merilni prelivi) in določitvijo hitrostnih polj toka na podlagi snemanja vodikovih mehurčkov. V prvem primeru lahko uporabimo standard ISO 1438:2008, saj gre za klasično metodologijo, v drugem primeru pa je treba zaradi specifičnosti vizualizacijske metode, ki predstavlja nov in nestandardizirani pristop, utemeljitev ustreznosti podatki na drug način.

V nadaljevanju so zato podane splošne teoretične osnove merilne negotovosti (pri merjenju pretoka) s primeri in pregled merilne negotovosti vizualizacijske metode, z utemeljitvijo ustreznosti uporabe vodikovih mehurčkov kot sledila za vizualizacijo toka.

#### 2.3.1 Merilna negotovost pri meritvah pretoka

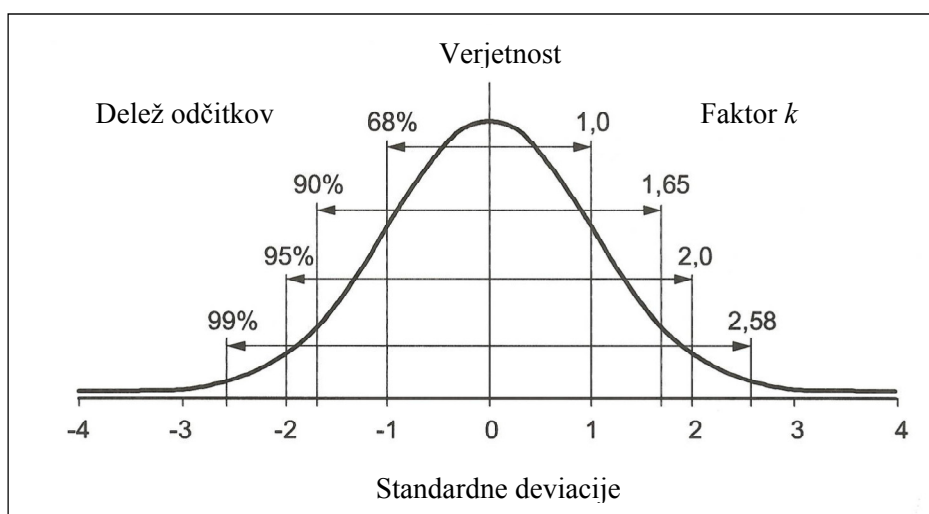
O meritvah in pogreških obstaja veliko gradiva, npr. Bergelj (2002), Solar (2001), Mikola in Golob (2001), Jeglič (1977) ter Kirkup in Frenkel (2006), vendar je v nadaljevanju namenoma predstavljen le povzetek standarda ISO 1438:2008 - dodatek C, saj le-ta podaja teoretične osnove merilne negotovosti za aplikacije hidrometrije. Poudariti velja, da so pri tem oznake veličin enake kot v standardu, npr.  $u$  pomeni merilno negotovost (ang. uncertainty) in ne hitrost.

Rezultati merjenja ali analize ne morejo biti točni. Odstopanje med pravo vrednostjo, ki je ni mogoče poznati (ang. unknowable), in merjeno vrednostjo, imenujemo merilna napaka. Koncept negotovosti je način za izražanje tega pomanjkanja védenja. Na primer, če vodo reguliramo, da teče s konstantnim pretokom, potem odčitki merilnika pretoka izkazujejo raztros merjenih vrednosti okrog povprečne vrednosti. Če se negotovemu značaju podatkov ne daje pozornosti, so lahko sklenjene napačne odločitve, ki imajo finančne in pravne posledice. Realistična izjava o negotovosti meritve poveča kvaliteto informacije in jo dela koristnejšo.

Standard navaja, da za vrednosti pretokov lahko določimo: (a) funkcijo verjetnostne gostote, tj. verjetnost, da meritev pretoka pri stalnih razmerah zavzame posamezno vrednost zaradi negotovosti različnih komponent merilnega procesa, (b) histogram meritev pretoka, in (c) standardno deviacijo meritev. Ker gre za znane pojme iz vede o statistiki, jih na tem mestu ne obravnavamo podrobneje.

#### 2.3.2 Meje zaupanja

Za normalno porazdelitev verjetnosti analize kažejo, da 68 % velikega niza meritev leži znotraj območja ene standardne deviacije okrog povprečne vrednosti. Zato se reče, da ima standardna negotovost 68 % prag zaupanja. Vendar pa je za rezultate meritev običajno, da se negotovost izrazi na meji zaupanja, ki pokriva večji delež meritev, na primer pri 95 % pragu zaupanja. To se stori z uporabo faktorja pokritosti (ang. coverage factor)  $k$  na izračunano vrednost standardne negotovosti (Slika 8).



Slika 8: Normalna verjetnostna porazdelitev (ISO 1438:2008, str. 39)

Figure 8: The normal probability distribution (ISO 1438:2008, p. 39)

Za normalno verjetnostno porazdelitev je pokritih 95,45 % (efektivno 95 %) merjenih vrednosti, če je  $k = 2$ . Torej je negotovost pri 95 % pragu zaupanja dvakratna vrednost standardne negotovosti.

V praksi velja, da variance meritev redko potekajo blizu normalni verjetnostni porazdelitvi. Lahko so boljše predstavljene s trikotno, pravokotno ali bimodalno verjetnostno porazdelitvijo (Slika 9) in so le včasih aproksimirane z normalno verjetnostno porazdelitvijo. Torej je za modeliranje opazovanih varianc treba izbrati ustrezno verjetnostno porazdelitev.

### 2.3.3 Naključni in sistematični pogreški

Izraza "naključni" in "sistematični" pogreški se v hidrometričnih standardih uporabljata za ločevanje med: (a) naključnimi pogreški, ki predstavljajo inherenten raztros vrednosti pod stalnimi pogoji, in (b) sistematičnimi pogreški, ki so povezani z inherentnimi omejitvami sredstev za določanje merjene veličine. Težava s konceptom sistematičnega pogreška je v tem, da sistematičnega pogreška ne moremo določiti brez predhodnega poznavanja pravih vrednosti. Če se za obstoj sistematičnega pogreška ve ali se nanj sumi, je treba ukrepati, da se tak pogrešek minimizira, bodisi s ponovnim umerjanjem opreme bodisi z upoštevanjem njegovega vpliva v postopku izračunavanja.

Sistematični pogrešek prispeva k negotovosti na enak način kot naključne komponente negotovosti. Zato smernice GUM (International Guidelines for calculating and expressing uncertainty in measurements) ne razlikujejo med obravnavo naključnih in sistematičnih negotovosti. V splošnem pri določanju posameznega pretoka prevladujejo naključni pogreški in ni potrebe po ločevanju naključnih in sistematičnih pogreškov, lahko pa pride do tega, da so sistematični pogreški, čeprav reducirani, prevladujoči pri oceni negotovosti.

### 2.3.4 Tip merilne negotovosti

Smernici GUM in HUG (tj. ISO/TS 25377:2007 Hydrometric uncertainty guidance) predpisujeta pravila za uporabo principov merilne negotovosti, še zlasti glede identifikacije komponent pogreškov, kvantifikacije njihovih pripadajočih negotovosti in kako je to združeno z uporabo metod, izpeljanih iz teorije statistike, v skupni rezultat za proces merjenja.

Komponente negotovosti so določene z ocenami standardnih deviacij. Obstajata dve metodi ocenjevanja:

- Ocena tipa A, s statistično analizo ponovljenih meritev, iz katerih je izpeljana ekvivalentna standardna deviacija. Ta proces je možno avtomatizirati v realnem času, npr. za meritve globin ali hitrosti.
- Ocena tipa B, s predpostavljanim verjetnostne porazdelitve procesu merjenja. To je uporabno pri človeškem presojanju ročno izvedene meritve (razdalje ali teže), ročnih odčitavanjih z instrumenta (izjava proizvajalca), ali pri podatkih umerjanja (od proizvajalca).

### 2.3.5 Ovrednotenje negotovosti tipa A

Po definiciji iz standarda ISO 1438:2008 je "standardna negotovost" enaka raztrosu merjenih vrednosti, izraženem s standardno deviacijo. Torej ima poljubna posamezna meritev iz niza  $n$  meritev po definiciji naslednjo negotovost:

$$u(x) = t_e \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (31)$$

kjer je  $\bar{x}$  najboljša ocena pravega poprečja:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) \quad (32)$$

in je  $t_e$  iz statistične teorije izpeljan faktor, s katerim se upošteva povečanje negotovosti, kadar je na razpolago majhno število meritev. Vrednosti tega faktorja so tabelirane v ISO 1438:2008, str.37.

Če pa negotovost uporabimo za poprečje vseh  $n$  meritev, potem velja:

$$u(\bar{x}) = \frac{t_e}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (33)$$

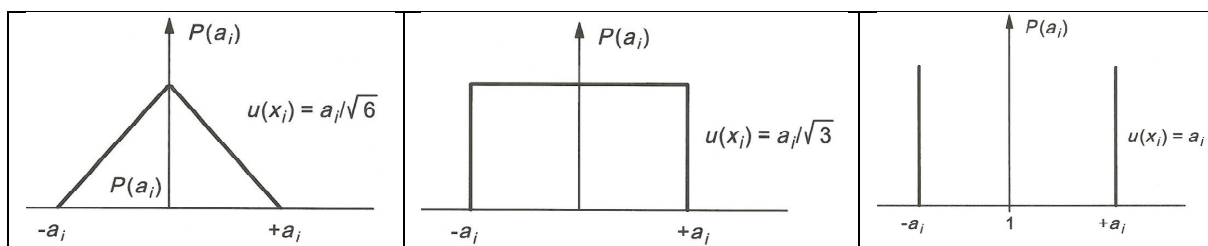
Za kontinuirno meritev se lahko evaluacije tipa A izpeljejo kot kontinuirna spremenljivka iz primarnih meritev, npr. gladin ali hitrosti vode.

Če se vzame poprečne vrednosti velikega števila  $n$  meritev, se negotovost povprečne vrednosti  $u(\bar{x})$  reducira s faktorjem  $1/\sqrt{n}$  v primerjavi z negotovostjo  $u(x)$  posamezne meritve. Zaradi tega bi morala imeti merilna oprema specificirano merilno učinkovitost tako v smislu merilne negotovosti  $u(\bar{x})$  kakor tudi  $u(x)$ , da se vidi, do katere mere je uporabljeno poprečenje.

### 2.3.6 Ovrednotenje negotovosti tipa B

Če nimamo na razpolago kontinuirnega niza merjenih vrednosti ali če ni obsežnega nabora meritev, se uporabi metoda ocene tipa B, s katero se: (1) merilnemu procesu pripiše verjetnostno porazdelitev, s katero se predpostavi verjetnost, da je prava vrednost predstavljena s katero od posameznih izmerjenih vrednosti, (2) definira zgornjo in spodnjo mejo meritve, in (3) določi standardno negotovost iz standardne deviacije, implicirane s pripisano verjetnostno porazdelitvijo.

Metode tipa B dopuščajo, da se ocene zgornjih in spodnjih mejnih vrednosti uporabijo za izpeljavo ekvivalentne standardne deviacije. V smernicah GUM in delu standarda, ki ga tu povzemam, so opisane naslednje verjetnostne porazdelitve: trikotna, pravokotna, normalna in bimodalna (Slika 9).



Slika 9: Verjetnostne porazdelitve: (a) trikotna, (b) pravokotna, (c) bimodalna (ISO 1438:2008, str. 38,39). Oznake: P = verjetnost,  $a_i$  = meja intervala,  $u(x_i)$  = merilna negotovost  
Figure 9: Probability distributions: (a) triangular, (b) rectangular, (c) bimodal. (ISO 1438:2008, p. 38,39)

Trikotna porazdelitev (Slika 9a) se običajno uporabi pri ročno izvedenih meritvah, kjer je poprečna vrednost najverjetneje bližje pravi vrednosti kot ostale merjene vrednosti med določljivo zgornjo in spodnjo mejo meritve. Za trikotno porazdelitev velja:

$$u(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{6}} \left( \frac{x_{max} - x_{min}}{2} \right) \quad (34)$$

Pravokotna porazdelitev (Slika 9b) se običajno uporabi pri meji ločljivosti (ang. resolution limit) merilnega instrumenta, tj. ločljivost internih analognih/digitalnih pretvornikov. Vendar pa to ni edini vir negotovosti merilne opreme. Obstaja lahko tudi negotovost zaradi merilnega algoritma in/ali procesa umerjanja. Če oprema meri relativne vrednosti, potem obstaja tudi negotovost določitve njene ničle (ang. datum). Za pravokotno porazdelitev velja:

$$u(\bar{x}) = \frac{1}{\sqrt{3}} \left( \frac{x_{max} - x_{min}}{2} \right) \quad (35)$$

Tu gre za negotovost na osnovi samostojne (ang. off-line) statistične analize, ki je običajno del procesa umerjanja, v katerem je negotovost izpeljana z uporabo procesa tipa A. Če je negotovost izražena kot standardna negotovost, mora biti vrednost negotovosti uporabljena neposredno z ekvivalentnim faktorjem  $k = 1$ .

Bimodalna verjetnostna porazdelitev (Slika 9c) nastopa pri merilni opremi s histerezo, ki lahko kaže le vrednosti na zgornji in spodnji meji meritve. Primer tega je mehanizem s plovcem (ang. float mechanism), pri katerem trenje in površinska napetost skupaj povzročita, da se plovec premika v končnih korakih. Za bimodalno verjetnostno porazdelitev velja:

$$u(\bar{x}) = \frac{x_{max} - x_{min}}{2} \quad (36)$$

Normalna verjetnostna porazdelitev je prikazana na sliki 8. Za normalno porazdelitev velja:

$$u(\bar{x}) = \frac{u}{k} \quad (37)$$

kjer je  $k$  faktor pokritosti glede na specificirano vrednost negotovosti.



### 2.3.7 Skupna merilna negotovost

Za večino merilnih sistemov je rezultat meritve izpeljan iz nekaj spremenljivk. Tako je na primer meritev pretoka  $Q$  v pravokotnem koritu lahko izražena kot funkcija neodvisnih spremenljivk  $b$  (širina korita),  $h$  (globina vode) in  $v$  (poprečna hitrost), ki so vse merjene neodvisno. Tako kot so  $b$ ,  $h$  in  $v$  kombinirane za določitev vrednosti  $Q$ , je treba kombinirati tudi vsako komponento negotovosti, da se določi vrednost skupne negotovosti  $u_c(Q)$ . To se stori z oceno občutljivosti vrednosti  $Q$  na majhno spremembo  $\Delta$  vrednosti  $b$ ,  $h$  ali  $v$ . Tako je:

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial b} \Delta b + \frac{\partial Q}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial Q}{\partial v} \Delta v \quad (38)$$

kjer so parcialni odvodi  $\partial Q/\partial b$ ,  $\partial Q/\partial h$  in  $\partial Q/\partial v$  koeficienti občutljivosti. Za enačbo  $Q = bhv$  je to enako:

$$\frac{\Delta Q}{Q} = \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta v}{v} \quad (39)$$

V analizi negotovosti so vrednosti  $\Delta Q/Q$ ,  $\Delta b/b$ ,  $\Delta h/h$  in  $\Delta v/v$  brezdimenzijske standardne negotovosti. Označene so kot  $u_c^*(Q)$ ,  $u^*(b)$ ,  $u^*(h)$  in  $u^*(v)$ . Ker so negotovosti vrednosti  $b$ ,  $h$  in  $v$  medsebojno neodvisne, velja naslednja enačba:

$$u_c^*(Q) \cong \sqrt{u^*(v)^2 + u^*(b)^2 + u^*(h)^2} \quad (40)$$

### 2.3.8 Poročanje o merilni negotovosti preliva

Kot zaključek poglavja o merilni negotovosti je podan še pregled standardiziranega postopka poročanja o merilni negotovosti na primeru preliva za merjenje pretoka. V poročilih o izvedbi meritev se merilna negotovost v splošnem lahko poda tabelarično, pri čemer so navedene naslednje informacije (oz. vsaj večina le-teh):

- metoda ovrednotenja (iz ISO 1438:2008 Annex C)
- vrednosti standardnih negotovosti:
  - i)  $u^*(C_d)$  (po ISO 1438:2008 Preglednica 2, str. 25)
  - ii)  $u^*[\tan(\alpha/2)]$  (v odvisnosti od verjetnostne porazdelitve)
  - iii)  $u^*(h_e)$  (lahko po ISO 1438:2008 Dodatek D, str. 42)
- koeficienti relativne občutljivosti, podani z enačbama:

$$\frac{\Delta Q_r}{Q_r} = \frac{\Delta C_d}{C_d} + \frac{\Delta b_e}{b_e} + 1,5 \frac{\Delta h_e}{h_e} \quad (41)$$

$$\frac{\Delta Q_t}{Q_t} = \frac{\Delta C_d}{C_d} + \frac{\Delta \tan(\alpha/2)}{\tan(\alpha/2)} + 2,5 \frac{\Delta h_e}{h_e} \quad (42)$$

kjer indeks  $r$  pomeni pravokotni preliv, indeks  $t$  pa trikotnega.

- skupna merilna negotovost  $u_c^*(Q)$  po enačbah:

$$u_c^*(Q)_r = \sqrt{u^*(C_d)^2 + u^*(b_e)^2 + [1,5u^*(h_e)]^2} \quad (43)$$

$$u_c^*(Q)_t = \sqrt{u^*(C_d)^2 + u^*[\tan(\alpha/2)]^2 + [2,5u^*(h_e)]^2} \quad (44)$$

- razširjena negotovost  $U^*(Q)$  za prag zaupanja 95 % se izračuna po preglednici ISO 1438:2008 Table C.1, str. 37.

## 2.4 Eksperimentalno modeliranje

Inženirska uporaba mehanike fluidov temelji predvsem na empiričnih rezultatih, pri čemer eksperimenti vključujejo večje serije spreminjajočih se parametrov. V takšnih primerih je smiselno uporabiti eksperimentalno modeliranje oz. multiregresijsko analizo, pri kateri se na osnovi rezultatov izvedenih eksperimentov določi model vpliva posameznih parametrov na vedenje sistema. Rezultat multiregresijske analize je fenomenološki model, tj. zveza oz. zakon, ki velja za realni sistem pri širokem razponu vplivnih parametrov. Pri tem je ključnega pomena teorija podobnosti, ki temelji na dimenzijski analizi.

### 2.4.1 Dimenzijska analiza

Rezultat dimenzijske analize je popoln nabor brezdimenzijskih števil, ki popisujejo fizikalni proces in podajajo pogoje, pri katerih se model procesa obnaša podobno kot realni sistem, ki ga model posnema (Zlokarnik, 1991). Pri analizi fizikalnih procesov imajo bistven pomen kvantitativna razmerja med fizikalnimi veličinami, zato je treba ugotoviti, kako se določene fizikalne lastnosti oz. veličine kvantificirajo in obravnavajo kot matematični objekti, za katere se lahko oblikujejo funkcionalna razmerja. Pri tem veljajo naslednje ugotovitve (Zlokarnik, 1991):

- katerikoli dve fizikalni veličini enakega tipa (npr. masa, dolžina, čas itd.) sta lahko medsebojno primerljivi;
- vsak fizikalni pojav oz. proces je lahko predstavljen kot razmerje oz. zveza fizikalnih veličin, ki so v pojavu udeležene.

Z uporabo dimenzijske analize posameznega fizikalnega pojava dobimo sistem linearnih enačb, v katerem nastopajo razmerja med posameznimi fizikalnimi veličinami. Pri tem je treba upoštevati dimenzijsko homogenost – leva in desna stran enačb morata imeti isto dimenzijo. Osnovo dimenzijske analize skupaj z dimenzijsko homogenostjo predstavlja Buckinghamov  $\Pi$ -teorem, predstavljen v nadaljevanju.

### 2.4.2 Buckinghamov $\Pi$ -teorem

Buckinghamov  $\Pi$ -teorem predstavlja splošno strategijo oblikovanja fizikalnih razmerij in je osnovan na teoriji podobnosti. Bistvo  $\Pi$ -teorema je dejstvo, da je vsako fizikalno razmerje oz. zvezo med  $n$  fizikalnimi veličinami mogoče skrčiti na zvezo med  $m = (n - r)$  medsebojno neodvisnimi brezdimenzijskimi števili, kjer je vrednost  $r$  enaka številu osnovnih (nedeljivih) veličin, ki so zajete v omenjenih fizikalnih veličinah.

Če je fizikalni zakon mogoče zapisati kot zvezo  $n$  fizikalnih veličin  $x_k$  v obliki:

$$f(x_k) = 0, \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (45)$$

lahko enačbo (45) s  $\Pi$ -teoremom skrčimo na izraz:

$$\Phi(\Pi_m) = 0, \quad m = 1, 2, \dots, n - r \quad (46)$$

kjer so brezdimenzijska števila  $\Pi_m$  funkcije fizikalnih veličin  $x_k$ .

Z uporabo  $\Pi$ -teorema torej dosežemo zmanjšanje števila spremenljivk v sistemu enačb, poleg tega pa uvedba brezdimenzijskih števil povzroči neodvisnost od merilnega sistema in izpolni pogoj dimenzijske homogenosti. Reševanje enačbe (46) poteka z metodami multiregresijske analize, ki je opisana v nadaljevanju.

### 2.4.3 Multiregresijska analiza

V fizikalnih procesih nastopa več spremenljivk, ki proces definirajo. Za oblikovanje fenomenološkega modela, ki bi omogočil napoved obnašanja takšnega procesa, je treba določiti medsebojno odvisnost teh spremenljivk. To omogoča multiregresijska analiza, katere cilj je popisati odnos oz. razmerje med eno odvisno spremenljivko in skupino neodvisnih oz. regresijskih spremenljivk do najboljše možne stopnje. Pomembno vejo multiregresijske analize predstavlja linearna multiregresija oz. postavitve linearnega fenomenološkega modela. Na ta način dobi enačba (46) obliko:

$$Y = \Phi(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_m) = \beta_0 + \beta_1 \Pi_1 + \dots + \beta_m \Pi_m \quad (47)$$

ki je linearna za parametre  $\beta_i$  (Seber in Lee, 2003). Oblika fenomenološkega modela je odvisna od narave fizikalnega procesa, vendar je v modelih najpogosteje uporabljen potenčni zakon, tj. enačba:

$$Y = K \cdot \Pi_1^{\beta_1} \cdot \Pi_2^{\beta_2} \cdot \dots \cdot \Pi_m^{\beta_m} \quad (48)$$

Potenčni zakon je v fenomenoloških modelih uporaben predvsem tedaj, ko ne poznamo vpliva nobene od regresijskih spremenljivk, in še zlasti v primerih, ko se odvisna spremenljivka znotraj opazovanega razpona regresijskih spremenljivk spreminja zvezno in brez velikih skokov. Modeli, ki temeljijo na potenčnem zakonu, imajo velik pomen v začetni fazi spoznavanja zakonitosti fizikalnega procesa, saj dajejo hitro oceno o mehanizmu, zajetem v fizikalnem procesu. Posebna uporabnost modelov s potenčnim zakonom je tudi v tem, da jih je mogoče reševati z metodo linearne regresije, pri čemer jih je treba najprej linearizirati s pomočjo logaritmiranja.

Enačba (48) je brezdimenzijska. Faktor  $K$  na desni strani enačbe je brezdimenzijska konstanta modela. Vrednost eksponenta  $\beta_i$  predstavlja jakost vpliva člena  $\Pi_i$  na brezdimenzijsko veličino  $Y$ . Z logaritmiranjem sistema enačb (48) dobimo naslednji sistem enačb, ki so linearne za eksponente ( $\beta_1$  do  $\beta_m$ ) ter s tem lažje za reševanje:

$$\ln Y_m = \ln K + \beta_1 \cdot \ln \Pi_1 + \beta_2 \cdot \ln \Pi_2 + \dots + \beta_m \cdot \ln \Pi_m \quad (49)$$

Sistem enačb (49) je predoločen, saj je število enačb večje od števila spremenljivk. Reševanje sistema lahko poteka numerično, npr. s pomočjo Gaussove metode, vgrajene v programskem paketu Matlab.

### 3 PREGLED LITERATURE – STANJE TEHNIKE

Pregled literature je podan v dveh sklopih, prvi obravnava bočne prelive, drugi pa vizualizacijske metode. Literatura na temo bočnih prelivov je bogata in se dokaj redno dopolnjuje (ena najnovejših študij je delo Inštituta za hidravlične raziskave in sod., 2011), saj imajo ti prelive raznovrstna področja uporabe in so glede na različne namene lahko izvedeni v zelo različnih variantah geometrije (oblika glavnega korita, krone, odtočnega kanala, smeri natoka). K obsežnosti literature dodatno pripomore tudi dejstvo, da so kot bočni prelive obravnavani tudi razni zajemi (npr. Vošnjak in Mlačnik, 2007; Rodič in sod., 2006; Steiner, 1984), razcepi oz. bifurkacije vodnega toka (npr. Kesserwani in sod., 2010) in primeri prelivanja visokovodnih nasipov - pogosto s poružitvijo le-teh (Boes (ur.), 2011; Roger in sod., 2009).

Tako kot v objavljenih raziskavah je tudi v disertaciji poudarek na pravokotnih ostrorobih bočnih prelivih s pravokotnim glavnim koritom in mirnim režimom toka. Pregled literature je v nadaljevanju podan v več sklopih (glede na temo raziskav):

- pregled obsežnosti različnih raziskav, ki naj pokaže pestrost raziskav v smislu obravnavanih prelivnih oblik, uporabljenih metod ipd.,
- starejše raziskave, ki naj opozorijo na dolgo zgodovino študij s tega področja,
- raziskave z energijskim pristopom (poudarek na enačbah za koeficient  $C_d$ ),
- raziskave s pristopom z gibalno količino (poudarek na koeficientih  $\alpha_C$  oz.  $\alpha_B$ ).

Pregled raziskav v splošnem temelji na pregledih, podanih v novejših študijah, npr. Rosier (2007), May in sod. (2003) ter Lee in Holley (2002), ki pa so tu dopolnjene z ugotovitvami raziskav, ki so za izvedbo v nadaljevanju predstavljenih eksperimentov najbolj relevantne.

#### 3.1 Zgodovina raziskav bočnih prelivov

Teorija prostorsko spreminjajočega se glavnega toka s pojemajočim pretokom je bila verjetno prvič uporabljena pri oblikovanju bočnih prelivov. Laboratorijske poskuse tovrstnih objektov je prvi opravil Engels (1917), sledila sta Coleman in Smith (1923) (Engels, H., 1917 ter Coleman, G.S., Smith, D., oboje cit. po Rosier, B., 2007).

Forchheimer (1930) se je problema lotil analitično, s predpostavkama, da je energijska črta vzporedna kroni preliwa in dnu korita ter da je pretočni profil (oz. vzdolžni potek gladine) vzdolž krone preliwa linearen (Forchheimer, P., 1930, cit. po Rosier, B. 2007).

Favre (1933) je vpeljal aksialno enačbo gibalne količine in pri tem predpostavil enakomerno porazdelitev hitrosti in hidrostatično porazdelitev tlakov (Favre, H., 1933, cit. po Hager, W.H., Volkart, P.U., 1986).

De Marchi (1934) je teoretično dokazal, da je energijska višina vzdolž krone preliwa v bistvu konstantna in da je pretočni profil ukrivljen, pri čemer v mirnem režimu toka narašča, v deročem pa upada (De Marchi, G., 1934, cit. po Rosier, B. 2007). De Marchi je vpeljal pretočni koeficient  $C_d$  takole (De Marchi, G., 1934 cit. po Rosier, B., 2007):

$$C_d = \frac{3B}{2L} \Phi + const. \quad (50)$$

kjer so:

- $B$  širina glavnega korita,
- $L$  dolžina krone bočnega preliwa,
- $\Phi$  funkcija spremenljivega toka (definirana v nadaljevanju).

Funkcijo  $\Phi$  je De Marchi izrazil kot:

$$\Phi_i = \frac{2E_i - 3p}{E_i - p} \sqrt{\frac{E_i - h_i}{h_i - p}} - 3 \arcsin \sqrt{\frac{E_i - h_i}{E_i - p}} \quad (51)$$

kjer so:

- $E_i$       specifična energija prereza  $i$ , tj. globina toka + hitrostni člen,
- $p_i$       višina praga bočnega preliva v prerezu  $i$  glede na dno glavnega korita,
- $h_i$       višina gladine v prerezu  $i$  glede na horizontalno primerjalno ravnino,

argument od  $\arcsin$  pa je treba podati v radianih.

Če gorvodni in dolvodni konec bočnega preliva dolžine  $L$  označimo z indeksom 1 in 2, se pretočni koeficient izrazi:

$$C_d = \frac{3B}{2L} (\Phi_2 - \Phi_1) \quad (52)$$

Če poznamo razmere v prerezu 1 (tj.  $Q_1$  in  $h_1$ ), lahko določimo  $\Phi_2$  in zato  $Q_2$ , ob pogoju, da je  $C_d$  znan.

De Marchijeva teoretična študija je bila eksperimentalno potrjena za nizka Froudova števila s strani avtorjev: Favre in Braendle (1937), Gentilini (1938) in Ferroglio (1941) (vse troje cit. po Rosier, B., 2007). Ob tem pa velja omeniti, da sta Hager in Volkart (1986) za  $Fr > 0,5$  odkrila resna odstopanja.

Pristop z upoštevanjem gibalne količine je prvi sistematično raziskoval Favre (1933). Teoretične in praktične raziskave toka so izvajali in izpopolnjevali še Favre (1933 in 1937), Schmidt (1954 in 1955), Ackers (1957), Allen (1957), Collinge (1957), Frazer (1957) in drugi. (vse cit. po Rosier, B., 2007)

### 3.2 Pregled novejših raziskav z energijskim pristopom

Subramanya in Awasthy (1972) sta v skupno 200 poskusih raziskovala prostorsko spreminjajoči se tok preko bočnih odlivov ( $p = 0$ ) in bočnih prelivov ( $p > 0$ ) v dveh pravokotnih prizmatičnih vodoravnih koritih. Prelivi so bili ostrorobi in polno ozračeni na dolvodni strani. Ob predpostavki, da so učinki geometrijske konfiguracije toka (razmerje  $L/B$ , razmerje  $h_i/L$ , razmerje  $p/h_i$ ) zanemarljivi, sta predlagala enačbo za  $C_d$  za primer mirnega in deročega toka, v kateri kot glavni vhodni parameter nastopa Froudovo število dotoka. Pri tem je bil pretočni koeficient bočnega preliva ( $p > 0$ ) v bistvu enak kot za bočni odliv ( $p = 0$ ). Poleg tega sta predlagala enačbo za odklon prelivnega curka od smeri vzdolžne osi glavnega korita. Njuna formulacija pretočnega koeficienta bočnega preliva, ki je odvisen le od Froudovega števila na gorvodnem koncu bočnega preliva  $Fr_1$ , je (Subramanya, K. in Awasthy, S.C., 1972, cit. po Rosier, B., 2007):

$$C_d = 0,611 \sqrt{1 - \frac{3Fr_1^2}{2 + Fr_1^2}} \quad (53)$$

V diskusiji omenjene raziskave sta Nadesamoorthy in Thomson (1972) opozorila, da je  $C_d$  odvisen še od širine korita, a predlagala enačbo za  $C_d$ , v kateri spet nastopa samo  $Fr_1$ , in ki naj bi veljala tako za mirni, kakor tudi za deroči tok (Nadesamoorthy, T. in Thomson, A., 1972, cit. po Rosier, B., 2007):

$$C_d = 0,432 \sqrt{\frac{2 + Fr_1^2}{1 + 2Fr_1^2}} \quad (54)$$

Različni kasnejši avtorji navajajo  $C_d$  iz te raziskave z različnimi enačbami! Enačba (54) je povzeta iz McEnroe-jeve (1995) diskusije rezultatov študije Swamee in sod. (1994a). Vendar pa Hager (1987) pravi, da pristop Nadesamoorthyja in Thomsona prezre lokalni tokovni vzorec in se nanaša le na dano konfiguracijo bočnega preliva.

Smith (1973) je razširil raziskave iz prizmatičnega vodoravnega korita (padec dna enak nič) avtorjev Subramanya in Awasthy (1972) na poljubne oblike prečnih prerezov in na širok nabor spremenljivk, kot sta naklon dna in višina bočnega preliva. V ta namen je bil razvit numerični računski postopek za mirni in deroči tok. (Smith, K.V.H., 1973, cit. po Rosier, B., 2007)

Ranga Raju in sod. (1979) so preučevali učinek bočnih omejitev toka zaradi sten pri  $90^\circ$  odcepu korita. Tako je bil vpeljan nov robni pogoj, ki je bil dotlej vedno obravnavan kot nepotopljeni preliv. Upoštevana je bila efektivna dolžina krone, pri čemer je bil vpeljan korekcijski faktor za dejansko dolžino krone. Eksperimenti so bili omejeni na mirni tok, glavno korito je bilo pravokotno, krona preliva je bila ostroroba (7 poskusov), oz. široka (15 eksperimentov). Za pretočni koeficient se je predpostavilo, da je funkcija Froudovega števila dotoka ( $Fr_1$ ). Za preliv s široko krono je bil k izrazu za  $C_d$  dodan empirični koeficient, ki je bil funkcija razlike ( $h_1 - p$ ) in širine krone. Vrednost ( $h_1 - p$ ) so vzdrževali v območju ( $h_1 - p$ ) > 10 cm, tako da so bili izločeni učinki viskoznosti in površinske napetosti, ki bi lahko bili pomembni pri majhnih prelivnih višinah. Z ozirom na pristop s konstantno specifično energijo je bila njihova izmerjena razlika le-te med gorvodnim in dolvodnim koncem preliva manjša od 2 %, zato je bila ta predpostavka ovrednotena kot upravičena. Njihova enačba za  $C_d$  je (Ranga Raju, K.G., Prasad, B., Gupta, S.K., 1979, cit. po Rosier, B., 2007):

$$C_d = 0,81 - 0,60 \cdot Fr_1 \quad (55)$$

Razliko glede na enačbo Frazerja (1957), kjer je za bočni preliv v pravokotnem koritu določeno (Frazer, W., 1957, cit. po Rosier, B., 2007):

$$C_d = 0,55 - 0,115 \cdot Fr_1^2 - \frac{0,017 \cdot E_1}{L} \quad (56)$$

so pripisali empiričnemu korekcijskemu faktorju za izračun efektivne dolžine preliva in vplivom sten razcepa.

Singh in sod. (1994) so eksperimentalno obravnavali pretočni koeficient pravokotnega ostrorobega bočnega preliva v prizmatičnem pravokotnem glavnem koritu pri mirnem toku. Za razliko od ugotovitev predhodnih avtorjev, naj bi bil  $C_d$  odvisen tudi od razmerja med višino praga in gorvodno globino toka, tj. od razmerja  $p/h_1$ :

$$C_d = 0,33 - 0,18 \cdot Fr_1 + 0,49 \frac{p}{h_1} \quad (57)$$

Diskusijo teh raziskav sta podala Jalili in Borghei (1996), ki sta predlagala zvezo:

$$C_d = 0,71 - 0,41 \cdot Fr_1 - 0,22 \frac{p}{h_1} \quad (58)$$

Swamme in sod. (1994a) so izhajali iz ugotovitve, da so različni predhodni raziskovalci povezali svoje enačbe za pretočne koeficiente s Froudovim številom gorvodnega glavnega korita in da prevladujoče razmerje prelivne višine bočnega preliva in višine praga (tj. razmerje  $(h - p)/p$ ) v predhodnih raziskavah ni bilo obravnavano. Razvili so koncept pretočnega koeficienta za pretok kratkega osnovnega pravokotnega odseka vzdolž krone preliva, njihova enačba za  $C_d$  pa se glasi:

$$C_d = 0,447 \left[ \left( \frac{44,7 \cdot p}{49 \cdot p + h} \right)^{6,67} + \left( \frac{h-p}{h} \right)^{6,67} \right]^{-0,15} \quad (59)$$

Po omenjenem konceptu se vhodne spremenljivke ne nanašajo le na prerez 1, pač pa se spreminjajo vzdolž krone preliva, tako da je za račun bočnega pretoka z enačbo za specifični pretok  $q$  treba izvesti integracijo vzdolž krone preliva. Tako kot velja za običajen preliv, je pretočni koeficient povezan le z razmerjem tlačne višine in višine praga bočnega preliva. Koncept je zasnovan na numerični rešitvi dveh diferencialnih enačb za pretok in globino vode. Konstante v pretočnem koeficientu so bile določene na podlagi 257 eksperimentov za ostrorobi pravokotni bočni preliv v vodoravnem pravokotnem glavnem koritu. Kmalu za tem so Swamee in sod. (1994b) omenjeni koncept vrednosti  $C_d$  razširili še na pravokotne bočne prelive s široko krono. Poleg tega sta bili obe konfiguraciji raziskani tako s prostim prelivanjem, kakor tudi s potopljenim prelivanjem. Nadalje so preučili tudi trikotni ostrorobi preliv. Vse relevantne konstante so določili eksperimentalno.

Pinheiro in Silva (1999), ki ju povzema tudi Cverle (2009), sta primerjala enačbe pretočnih koeficientov šestih dotedanjih raziskav in izvedla eksperimente v pravokotnem glavnem koritu širine 50 cm, s pretoki v glavnem koritu do 150 l/s. Ugotovila sta, da so se njuni eksperimentalni rezultati najbolje ujemali z enačbo Singh in sod. (1994). Predlagala sta enačbo, ki kot glavne upošteva parametre Singh in sod. (1994), tj. člene  $Fr_1$  in  $h/p$ , in še dodaten člen, označen kot  $L_{ndim} = L/(u_1^2/2g)$ , s katerim je zajet vpliv hitrosti dotoka glede na dolžino bočnega preliva:

$$\frac{1}{C_d} = 1,57 + 0,127 \frac{1}{Fr_1} + 7,45 \frac{1}{L_{ndim}} + 0,52 \frac{h_m}{p} \quad (60)$$

kjer je  $h_m$  srednja globina toka.

Eksperimente sta namenoma izvedla na obsežnem modelu, da bi učinki modelnega merila kar najmanj vplivali na rezultate. Avtorja pravita, da parameter  $L_{ndim}$  zajema vpliv učinkov ostenja (angl. boundary effects), zaradi česar je njun izraz primeren za bočne prelive različnih dolžin.

Borghesi in sod. (1999) so raziskovali vpliv tokovnih razmer in geometrije korita ter oblike preliva na pretočni koeficient bočnega preliva na podlagi več kot 250 eksperimentov v mirnem režimu toka. Glavno korito je bilo pravokotno, preliv pa ostrorobi pravokotni. Ugotovili so, da je predpostavka konstante specifične energije sprejemljiva, saj povprečna energijska razlika v koritu med obema koncema preliva znaša 3,7 %. Za pretočni koeficient so ugotovili, da je funkcija gorvodnega Froudovega števila, razmerja  $p/h_1$  in razmerja  $L/B$ , medtem ko so vpliv naklona korita očitno zanemarili:

$$C_d = 0,7 - 0,48 \cdot Fr_1 - 0,3 \frac{p}{h_1} + 0,06 \frac{L}{B} \quad (61)$$

Yüksel (2004) je v svojem prispevku obravnaval, kako spreminjanje višine specifične energije vzdolž bočnega preliva učinkuje na bočni odtok. Hidravlični profil vzdolž roba preliva in prelivna višina sta bila dobljena z uporabo dveh brezdimenzijskih parametrov kot funkcija Froudovega števila. Ugotovil je, da je bočni odtok znatno odvisen od spreminjanja specifične energije vzdolž bočnega preliva, kadar je prelivna višina določena na podlagi globine toka v vertikalni ravnini preliva. Poleg tega je zaključil, da v tem primeru obstajajo znatna odstopanja od predpostavke konstantne specifične energije, zlasti kadar je razlika v pretoku vzdolž bočnega preliva velika.

Obsežno raziskavo (skupno 843 poizkusov) pravokotnih ostrorobih bočnih prelivov v ravnih koritih (mirni režim toka, nepotopljen bočni odtok) so nedavno predstavili Emiroglu in sod. (2011). Laboratorijsko glavno korito je bil 0,5 m širok in 0,5 m globok steklen žleb z naklonom dna 0,001. Za reguliranje globine toka so uporabili tablasto zapornico, nameščeno na koncu glavnega korita. Odvodni kanal podobnih dimenzij je bil nameščen vzporedno glavnemu. Dotok so merili z

elektromagnetnim merilcem in trikotnim 90° prelivom, bočni odtok pa s kalibriranim standardnim pravokotnim prelivom. Gladine so merili z ostrim merilom, hitrosti toka pa z akustično hitrostno sondo. Obravnavali so pet različnih dolžin bočnega preliva (0,15 m do 1,50 m) in tri višine krone (0,12 m do 0,20 m), toda za določitev koeficienta  $C_d$  so uporabili le bočne prelive, dolge od 0,20 m do 0,70 m. Njihova formulacija pretočnega koeficienta na osnovi brezdimenzijske analize je precej bolj zapletena kot druge enačbe v literaturi in se glasi:

$$C_d = \left[ 0,836 + \left( -0,035 + 0,39 \left( \frac{p}{h_1} \right)^{12,69} + 0,158 \left( \frac{L}{b} \right)^{0,59} + 0,049 \left( \frac{L}{h_1} \right)^{0,42} + 0,244 Fr_1^{2,125} \right)^{3,018} \right]^{5,36} \quad (62)$$

Ujemanje med eksperimentalno določenimi vrednostmi koeficienta  $C_d$  in pripadajočimi vrednostmi, izračunanimi po zgornji enačbi, je bilo po navedbah avtorjev zelo dobro, opisano z determinističnim koeficientom  $R^2 = 0,912$ . Kljub temu velja omeniti, da grafi  $C_d = f(p/h_1)$  in  $C_d = f(L/h_1)$  iz omenjene študije prikazujejo zelo velik raztros rezultatov. Vpliv  $p/h_1$  na  $C_d$  avtorji razlagajo s sklicevanjem na diskontinuitetno območje (ang. discontinuity region). To diskontinuitetno območje ima močno sekundarno gibanje zraven ostenja na strani preliva. Intenzivnost sekundarnega gibanja zraven ostenja se manjša z večanjem višine krone bočnega preliva zaradi trenja na površini preliva. Intenzivnost sekundarnega toka, ki ga povzroča lateralni tok, je definirana kot razmerje med poprečno kinetično energijo lateralnega gibanja in skupno kinetično energijo glavnega toka v danem prečnem prerezu.

Emiroglu in sod. (2011) so glede hitrostnih polj ugotovili naslednje: vpliv bočnega odtoka je izrazit, zlasti za razmere z visoko prelivno višino (ang. high overflow conditions). Učinek razcepa toka blizu dolvodnega konca preliva je očiten blizu dna korita. Ker se pojavlja sloj nizkih hitrosti, se usmerjenost maksimalne hitrosti postopoma premika od smeri k bočnemu prelivu proti osi glavnega korita in pri tem preide cono ločitve (ang. separation zone). Ta cona vedno zavzema območje blizu dna (tj. na 0,2 do 0,4-krat poprečne globine toka na dani lokaciji vzdolž bočnega preliva) in se spreminja glede na območje, ki ga zavzema sloj nizke hitrosti. Pri nizkih Froudovih številih je bil na dolvodnem koncu bočnega preliva opažen povratni tok (ang. reverse flow). Pri  $Fr_1 > 0,42$  območje povratnega toka izgine, nastanejo pa šibki stoječi valovi. Pri  $Fr_1 > 0,85$  se na dolvodnem koncu bočnih prelivov pojavi gladinski skok (ang. surface jump). Zastojno cono (ang. stagnation zone) povzroča odklon od poti vlakna maksimalne hitrosti (ang. maximum velocity thread). Lokaciji zastojne cone in območja povratnega toka sta odvisni predvsem od  $Fr_1$ ,  $L$  in višine prelivnega curka. Z večanjem intenzivnosti toka ali gibalne količine v glavnem koritu proti dolvodni smeri se območje povratnega toka premakne proti dolvodnemu koncu bočnega preliva.

Tabelarični pregled eksperimentalnih robnih pogojev omenjenih raziskav, ki so pomembnejše za primerjavo z rezultati te disertacije, je podan v poglavju 3.6.

### 3.3 Pregled raziskav, ki uporabljajo pristop z gibalno količino

V raziskavah, ki uporabljajo pristop z gibalno količino, je pozornost namesto enačbam za  $C_d$  namenjena izrazom za koeficiente  $\alpha_C$  in/ali  $\alpha_B$  ter asimetriji toka, ki vodi v oblikovanje separacijske in/ali zastojne cone. Pregled glede asimetrije toka podajata Lee in Holley (2002). Pri skupini raziskav iz prejšnjega poglavja, ki temeljijo na konceptu konstantne specifične energije, so vrednosti koeficienta  $\alpha_C$  po predpostavki enaki ena.

Od te predpostavke rahlo odstopa že omenjena raziskava Subramanya in Awasthy (1972), v kateri je navedeno, da na gorvodnem koncu bočnega preliva velja  $\alpha_C = 1,04$  in  $\alpha_B = 1,02$ . Za dolvodni konec preliva avtorja nista navedla nobenih vrednosti, dejala pa sta, da se jih lahko privzame kot  $\alpha_C = \alpha_B = 1$ ,



ne da bi pri tem storili omembe vredno napako. Poleg tega sta navedla, da sta v glavnem koritu nasproti bočnega preliva opazila separacijsko cono, za katero pa nista podala kvantitativnih informacij ali dodatnih podrobnosti. Njuni hitrostni profili ne kažejo dokazov separacijskih con, tako da očitno niso nastopale pri vseh eksperimentih (Subramanya, K. in Awasthy, S. C., 1972, cit. po Lee, K.-L. in Holley, E. R., 2002).

El-Khashab in Smith (1976) sta med eksperimentalnimi raziskavami mirnega in deročega toka ugotovila, da je vzdolžna komponenta hitrosti bočnega odtoka vedno višja kot poprečna hitrost toka v koritu. Ker je to za energijski koncept težava, sta privzela pristop z gibalno količino za določitev zvez za vzdolžno komponento hitrosti bočnega odtoka in za razvoj računskega postopka. Ta numerični postopek temelji na razvrstitvi toka v tri kategorije glede na režim toka in razmerje prelivanja ( $Q_b/Q_I$ ). Tako sta mirni režim toka razdelila na  $Q_b/Q_I < 0,5$  in  $Q_b/Q_I > 0,5$ . Tretjo kategorijo predstavlja deroči režim toka.

Avtorja nista podala enačbe za  $C_d$ , pač pa nekaj zaključkov, ki so ključni za to disertacijo, zato so predstavljeni v celoti:

- Tradicionalna predpostavka, da skupna energija v koritu z bočnim prelivom ostaja konstantna, z izjemo trenjskih izgub, ni bila potrjena.
- Kljub temu pa računski postopki, ki temeljijo na rešitvi s konstantno energijo, dajejo rezultate, ki so običajno izrazito točnejši kot pa empirične krivulje ali enačbe, ki veljajo za eksperimente omejenega obsega.
- Razlog, da predpostavka o konstantni energiji odpove, je ta, da je v poljubnem prerezu longitudinalna komponenta hitrosti bočnega odtoka večja od poprečne hitrosti v koritu bočnega preliva.
- Za diferencialno enačbo toka v koritu z bočnim prelivom je možno dobiti zadovoljivo rešitev, ki upošteva pristop z gibalno količino. To rešitev je treba dopolniti z metodami za napovedovanje longitudinalne komponente hitrosti bočnega odtoka.
- Funkcijske povezave za longitudinalno komponento hitrosti bočnega odtoka so različne za mirni in deroči tok ter odvisne od razmerja prelivanja.
- Računski postopek, ki temelji na pristopu z gibalno količino, zadovoljivo napove potek vodne gladine in bočni odtok za korita z bočnim prelivom (El-Khashab in Smith, 1976).

Avtorja sta navedla, da je separacijska cona obstajala za  $Q_b/Q_I \geq 0,70$  za mirni režim toka, vendar te cone nista prikazala. Pri izpeljavi računalniškega modela, ki temelji na gibalni količini, sta sicer dejala, da je zaradi praktičnosti koeficient  $\alpha_B$  lahko privzet kot konstanten vzdolž dela preliva ali vzdolž celotnega preliva, in še, da je  $\alpha_B = 1$ , toda to naj bi očitno veljalo le za  $\alpha_B$  na gorvodnem koncu bočnega preliva, saj je iz njunega diagrama spreminjanja  $\alpha_B$  vzdolž bočnega preliva razvidno, da  $\alpha_B$  narašča od 1 do vrednosti 1,2.

Hager (1982) je obravnaval razcepe (ang. distribution channels) z namenom, da bi formuliral razširjeno obliko enodimenzijske zveze za gibalno količino. Na podlagi zelo raznolikih parametrov eksperimentov je predlagal naslednjo pomembno enačbo za  $\alpha_C$ :

$$\alpha_C = \left[ 1 + \left( \frac{q_b}{Q/B} \right)^2 \right]^{4/3} \quad (63)$$

Uporabnost enačbe (63) je tudi v tem, da določa neenakomernost hitrostnega polja le na podlagi izmerjenih pretokov in geometrije bočnega prereza (tj. brez meritev hitrosti).

Balmforth in Sargison (1983) sta na osnovi pristopa z gibalno količino predstavila modificiran model izračuna ostrorobega bočnega preliva v pravokotnem koritu. Eksperimente sta izvedla za pet tipov toka, kot jih je podal Frazer (1957). Te tipe sta identificirala kot tokove v koritu z blagim naklonom in sicer kot: (I) nizki preliv brez dolvodne zajeze, (II) višji preliv in dolvodna zajeza, (III) nizki preliv in dolvodna zajeza, (IV) in (V) pa naj bi bila podobna kot tipa I in III, le da za strma korita. Avtorja

nista podala razponov hidravličnih robnih pogojev in dimenzij opazovanih prelivov. Dejala sta, da je  $\alpha_B$  le malo odstopal od vrednosti 1,05 – toda  $\alpha_B$  sta vrednotila za korito s širino, ki se je manjšala v smeri toka (Balmforth, D.J. in Sargison, E.J., 1983, cit. po Lee, K. –L., Holley, E. R., 2002). Kot pravi Tynes (1989) lahko tovrstno zoževanje preprečuje nastanek separacijskih con celo v trapezoidnih koritih (Tynes, K. A., 1989, cit. po Lee, K.–L., Holley, E. R., 2002).

Hager in Volkart (1986) sta v svoji analitični in eksperimentalni obravnavi razcepov toka (bočni preliv, bočna odprtina in odprtina v dnu) izhajala iz teorema gibalne količine. Z aksialno enačbo gibalne količine sta določila profil gladine in porazdelitev lokalnega pretoka. Enačbe prečnih prelivov in odprtin sta nadomestila z izrazi, v katerih so upoštevani učinki geometrije bočnega odtoka, odklona curka in vpliv hitrosti natoka. Pokazala sta, da so optimalne odtočne karakteristike dosežene pri t.i. psevdo-enakomernih pretočnih razmerah, ko je bočni odtok enakomeren, hitrosti v koritu pa konstantne. Psevdo-enakomerne razmere sta dosegla z linearnim vzdolžnim zoženjem korita, negativnim naklonom dna ali z obojim hkrati. Za izračun poteka gladin sta predlagala izbiro ustreznih robnih pogojev na pravilno izbranih kontrolnih točkah. Prostorski mehanizem odtoka sta razložila s hitrostnimi profili in površino toka. Prikazala sta hitrostne profile za  $Q_b/Q_l = 0,5$ , iz katerih je razvidna asimetrija, ne pa tudi separacijska cona. V povezavi s potekom gladin pri bočnih prelivih Hager in Volkart (1986) trdita, da je možno pokazati, da je vpliv  $\alpha_B$  na globine  $h(x)$  in pretoke  $Q(x)$  omejen na tokove v mirnem režimu, vendar pa ga je v primerjavi z vplivom ostalih parametrov (tj. geometrijskih in hidravličnih) možno zanemariti do najnižjega reda aproksimacije, tako da se predpostavi  $\alpha_B = 1$ .

Das (1997) je na fizičnih modelih raziskoval bočne prelive preko vzdolžnih nasipov. Avtor poroča, da je na osnovi pristopa z gibalno količino, ki sta ga podala El-Khashab in Smith (1976), z vključitvijo znanstvene razprave Balmforth in Sargison (1977), formuliral matematični model prostorsko spreminjajočega se toka preko bočnega preliva s široko krono (Balmforth, D. J., Sargison, E. J., 1977, cit. po Das, A., 1997). Na ta način je preučeval razmere, kakršne nastopijo pri prelivanju (visokovodnih) nasipov. Njegov matematični model je vključeval naslednji predpostavki:

- nasip se obnaša kot široki prag, lokalni kritični tok nastopi nekje na kroni nasipa,
- lokalna poprečna hitrost glavnega korita in lateralna komponenta hitrosti prostorsko preusmerjenega toka preko nasipa sta enakega reda velikosti, kot sta podala Balmforth in Sargison (1983).

Izmerjene profile gladin je izrisal z normaliziranimi izobatami (črtami enakih globin). Izkazalo se je, da so v splošnem globine naraščale v longitudinalni smeri in da je potek gladin padal v lateralni smeri. Meritve hitrosti so pokazale, da znašata  $\alpha_C = 1,166$  in  $\alpha_B = 1,074$ . Prostorsko spreminjanje pretokov je določil z integracijo izotah, računal pa ga je tudi z matematičnim modelom prostorsko spremenljivega toka. V vseh primerih so bili profili gladin tipa M1 (t.i. "zajezna krivulja"). Avtor v zaključkih omenja, da je na tok preko bočnega preliva morda vplivala navpična stena glavnega korita nasproti "brežine" z bočnim prelivom.

Lee in Holley (2002) sta predstavila program za hidravlične izračune razcepov, oz. visokovodnih razbremenilnih objektov, ki imajo obliko trapeznih bočnih prelivov s široko krono, v koritih s trapeznim prečnim prerezom. Izhodišča za simulacije so bila določena z meritvami na fizičnih modelih bočnih prelivov. Raziskava je pokazala, da je treba upoštevati asimetrijo toka in pojav separacijske cone, do katerega prihaja, ko bočno odlivanje preseže 20 do 30 % dotoka (odvisno od geometrije). Dolvodno od preliva se asimetrija toka in z njo separacijska cona porazgubi. Nadalje ugotavljata, da se globino toka na dolvodnem koncu preliva lahko določi z uporabo enačbe gibalne količine ali energijske enačbe, pri čemer se s koeficientom  $\alpha_B$  ali s koeficientom  $\alpha_C$  upošteva asimetrijo toka. Po ugotovitvah avtorjev so vrednosti  $\alpha_B$  in  $\alpha_C$  odvisne predvsem od razmerja prelivanja ( $Q_b/Q_l$ ), in sicer naraščajo z naraščanjem tega razmerja. Za 50 % odlivanja so se na dolvodnem koncu bočnega preliva vrednosti  $\alpha_B$  gibale od 1,6 do 1,9 (odvisno od geometrije), vrednosti  $\alpha_C$  pa so se gibale od 2,6 do 3,6 (odvisno od naklona brežin). Za primerjavo povejmo, da znaša na dolgih ravnih odsekih  $\alpha_C = 1,05$  do 1,10. (Steinman, 2010).

May in sod. (2003) so na podlagi rezultatov šestih starejših raziskav različnih avtorjev (in sicer: Prasad, B. (1976), Frazer, F. (1954), Engels, H. (1917), Schmidt, M. (1954), Gentilini, B. (1938), Tyler, R. G., Canollo, J. A., Steyskal, N.A. (1929) vse cit. po May in sod. (2003)) predlagali postopek za dimenzioniranje bočnih prelivov. Njihove ugotovitve so delno podane že v poglavju 2, dodatno in nekoliko podrobneje pa v nadaljevanju, saj so povezane z zaključki te disertacije.

### 3.3.1 Postopek za dimenzioniranje bočnih prelivov po May in sod.

V nadaljevanju je podan pregled monografije May in sod. (2003) o načrtovanju bočnih prelivov. Pregled je razdeljen na posamezna sklope: metoda, ovrednotenje vhodnih podatkov, izbira pristopa, rezultati analize ter predlog postopka za dimenzioniranje bočnih prelivov.

#### a) Metoda študije May in sod. (2003)

V starejših študijah bočnih prelivov so raziskovalci uporabili različne metode za analizo izmerjenih veličin, zato je njihove rezultate težko primerjati in ovrednotiti na zanesljivi osnovi. V svoji raziskavi so May in sod. (2003) postopali na sledeč način:

- pregledali so originalne podatke predhodnih eksperimentalnih raziskav bočnih prelivov,
- analizirali so podatke na skupni osnovi z uporabo alternativnih 1D numeričnih modelov,
- določili so, kateri model se najbolj prilega podatkom,
- ta model so uporabili za določitev splošne metode za napovedovanje prelivnega koeficienta  $C_D$  za bočne prelive ( $C_D$  je njihova oznaka, ki jo namenoma ohranjam tudi v nadaljevanju),
- z uporabo izbranega 1D modela in metode za določitev  $C_D$  so skušali simulirati širši obseg razmer,
- rezultate numeričnih simulacij so zapisali v brezdimenzijski obliki in tvorili poenostavljene enačbe in krivulje za načrtovanje standardnih primerov bočnih prelivov.

Pri tem je bila 1D enačba neenakomernega toka je bila integrirana numerično, z metodo Runge – Kutta četrtega reda, za katero je bilo pokazano, da je računsko mnogo učinkovitejša od enostavnejše metode standardnega koraka (angl. standard-step method). (Burton, 1993, cit. po May in sod., 2003). Program je omogočal avtomatično iteracijsko tehniko za določanje vrednosti umeritvenih spremenljivk (npr.  $C_D$ ) iz eksperimentalnih podatkov.

#### b) Ovrednotenje obstoječih vhodnih podatkov

Prva faza analize je obsegala neodvisno ovrednotenje različnih teoretičnih rešitev toka preko bočnega preliva in v ta namen so bile potrebne podrobnosti o izvedbi originalnih eksperimentov. Obravnavano je bilo znatno število publikacij, ki opisujejo teoretične in eksperimentalne raziskave bočnih prelivov, vendar se je izkazalo, da reference, ki opisujejo eksperimentalne študije, v mnogih primerih podajajo le povzetke skupnih rezultatov, ne pa tudi podrobnih podatkov, potrebnih za sistematično analizo. Izkazalo se je, da je primerne podatke nudilo šest različnih študij, ki zajemajo skupno 470 posameznih poskusov. Večinoma je šlo za (zelo) stare raziskave. Izmed študij z uporabnimi podatki so bile vse, razen ene, izvedene s pravokotnimi ostrorobimi bočnimi prelivni. Izjema je bila študija Prasada (1976), ki je preizkušal tako ostrorobe, kakor tudi prelive s široko krono. May in sod. (2003) poudarjajo:

- nekateri prelive iz študije Engels (1917) so bili dolgi tudi do 10 m, opazovani pa so bili z zelo majhnimi prelivnimi višinami, tako da niso bili tipični za normalne pretočne razmere,
- Frazer (1954) ter Tyler in sod. (1929) so teste izvajali z razmerjem  $(h - p) / p > 3$ , kar je preko meje, znotraj katere so normalno uporabljeni standardni merilni prelive,
- podatki študije Tyler in sod. (1929) so za vsak poizkus vključevali le eno vrednost globine, vendar ni znano, na kateri lokaciji vzdolž preliva je bila merjena.

#### c) Izbira pristopa

V večini starejših študij, ki so jih za izhodišče svojih analiz vzeli May in sod. (2003), je bila uporabljena energijska oblika enačbe bočnega preliva s predpostavljenim Coriolisovim koeficientom  $\alpha_C = 1$  in predpostavko, da ni učinkov trenjskega upora v glavnem koritu (tj.  $I_x = 0$ ). V večini starejših

študij so raziskovalci z metodo poizkusov in napak določili efektivno vrednost  $C_D$ , ki je ustrezala opazovanim razmerjem pretoka. Običajno se ni preverjalo, ali so izračunane globine  $h_l$  na gorvodnem koncu preliva pri pripadajočem izmerjenem pretoku  $Q_b$  v skladu z izmerjenimi globinami. May in sod. (2003) so pokazali, da optimiziranje vrednosti  $C_D$  zgolj na podlagi količine prelivanja daje sorazmerno slabe ocene spreminjanja gladine.

Laboratorijske razmere obravnavanih študij so bile po predpostavki May in sod. (2003) predstavljene z vrednostjo Manningovega koeficienta  $n_G = 0,02$ . Rezultirajoča vrednost energijskega koeficienta  $\alpha_C$  je bila večinoma reda velikosti 3 ali več, kar so May in sod. (2003) smatrali za previsoko in fizikalno nerealno vrednost. Poleg tega v znatnem številu primerov niso mogli najti kombinacije  $C_D$  in  $\alpha_C$ , ki bi ustrezala opazovanima vrednostima  $Q_b$  in  $h_l$ . Tako so May in sod. (2003) ugotovili, da energijska oblika enačbe toka preko bočnega preliva v splošnem ni veljavna, in da v nasprotju z običajnimi predpostavkami lahko prihaja do drugačnih energijskih izgub v glavnem koritu, vrednost energijskega koeficienta pa se lahko znatno spreminja vzdolž bočnega preliva.

Zaradi navedenega so se May in sod. (2003) odločili za uporabo enačbe, ki temelji na ohranitvi gibalne količine. Za napoved prelivanja  $Q_b$  in gorvodne globine vode  $h_l$  se enačba numerično integrira na enak način kot energijska oblika te enačbe. Obstajajo tri spremenljivke, ki na začetku niso znane: pretočni koeficient  $C_D$ , koeficient  $\alpha_B$  in razmerje hitrosti  $\bar{u}_b/\bar{u}$ . V obravnavanih starejših študijah so bili navedeni le  $Q_b$  in  $h_l$ , tako da May in sod. (2003) iz rezultatov posameznega poskusa niso mogli istočasno določiti vrednosti  $C_D$ ,  $\alpha_B$  in  $\bar{u}_b/\bar{u}$ . Ta problem so rešili tako, da so na podlagi razpoložljivih podatkov določili korelacijo najboljšega ujemanja med dvema od treh spremenljivk.

#### d) Rezultati analize

Smiselno je pričakovati, da bo v koritu z bočnim prelivom neke vrste korelacija med koeficientom  $\alpha_B$  in hitrostnim razmerjem  $\bar{u}_b/\bar{u}$ . Ko je  $\bar{u}_b$  izrazito večja od  $\bar{u}$ , kot poročata El-Khashab in Smith (1976), je to povezano z zelo neenakomerno porazdelitvijo hitrosti v glavnem koritu in posledično z vrednostmi  $\alpha_B$ , ki so znatno večje od 1. Pri analizi vseh starih poskusov so May in sod. (2003) razmerje  $\bar{u}_b/\bar{u}$  najprej predpostavili na vrednost med 1 in 2, nato so izračunali vrednosti  $\alpha_B$  in  $C_D$ , ki sta odgovarjali izmerjenemu razmerju prelivanja  $\Phi_b$  in globini  $h_l$  posameznega eksperimenta. To je bilo nato ponovljeno za druge vrednosti  $\bar{u}_b/\bar{u}$ . Ugotovili so, da povečanje predpostavljene vrednosti  $\bar{u}_b/\bar{u}$  zmanjšuje ocenjeno vrednost  $C_D$ . Rezultati so pokazali dokaj dobro korelacijo med  $\alpha_B$  in  $\bar{u}_b/\bar{u}$ , ki se jo je dalo opisati z enačbo:

$$\alpha_B = 0,725 + 0,275(\bar{u}_b/\bar{u}) \quad (64)$$

Za popolnoma enakomerno porazdelitev hitrosti ( $\alpha_B = 1$ ) zgornja enačba da vrednost  $\bar{u}_b/\bar{u} = 1$ . Poleg tega za polno razvit tok v koritu s prosto gladino brez bočnega preliva tipična vrednost  $\alpha_B = 1,025$  odgovarja vrednosti  $\bar{u}_b = 1,09 \bar{u}$ . Mnoge študije so neodvisno pokazale, da je pri toku v odprtem koritu maksimalna površinska hitrost oz. hitrost blizu gladine od 1,08 do 1,10-krat večja od poprečne hitrosti prereza, kar se torej sklada z napovedjo iz enačbe (64).

Z uporabo korelacije iz enačbe (64) so nato izračunali vrednosti  $C_D$ ,  $\alpha_B$  in  $\bar{u}_b/\bar{u}$  za posamezne poskuse. V določenem številu primerov še vedno niso dosegli istočasnega ujemanja z razmerjem prelivanja in gorvodno globino, vendar je bilo število takih primerov znatno manjše kot z uporabo energijske enačbe. Za eksperimente z ostrorobimi prelivi se je izkazalo, da je efektivni koeficient pretoka  $C_{DS}$  (njihova oznaka) odvisen predvsem od naslednjih treh brezdimenzijskih parametrov:

- razmerje  $h_0/p$
- razmerje  $L/h_0$
- razmerje  $h_2/p$

kjer je  $h_0$  prelivna višina na dolvodnem koncu bočnega preliva, tj.  $h_0 = h_2 - p$ . V nadaljevanju za ta člen uporabljamo oznako  $h_{pr,2} = h_2 - p$ .

Ob upoštevanju teh dejavnikov so najboljšo korelacijo dosegli, ko so za  $C_{DS}$  vzeli:

$$C_{DS} = 0,650 - 0,149 \left( \frac{h_{pr,2}}{p} \right)^{0,0868} \left( \frac{L}{h_{pr,2}} \right)^{-0,303} \left( \frac{h_2}{p} \right)^{0,149} \quad (65)$$

Rezultati za  $C_{DS}$  kažejo, da se efektivna vrednost pretočnega koeficienta spreminja med približno 0,4 in 0,6 ter da je težko v polni meri upoštevati raznolikost eksperimentalnih podatkov (tj. raztros točk okoli trendne linije). Avtorji May in sod. (2003) poudarjajo, da efektivne vrednosti  $C_{DS}$  niso nujno absolutne vrednosti, pač pa so do določene mere odvisne od metode analize (tj. uporabe "gibalne" oblike enačbe za prostorsko spreminjajoči se tok in izbranih vrednosti  $\alpha_B$  in  $\bar{u}_b/\bar{u}$ ). Ocena pretočnega koeficienta je bila le del njihove analize; omenjeni avtorji pravijo, da vrednosti bočnega prelivanja  $Q_b$ , ki jih daje njihov nov postopek načrtovanja, izkazujejo manjšo skupno spremenljivost, ko se jih primerja z originalnimi eksperimentalnimi podatki.

May in sod. (2003) so torej skušali poiskati podoben tip korelacije za napovedovanje vrednosti  $\bar{u}_b/\bar{u}$  iz geometrije bočnega preliva in dolvodnih tokovnih razmer. Čeprav so bili v podatkih nekateri vzorci, niso našli konsistentne oblike korelacije, zato so predpostavili konstantno vrednost razmerja  $\bar{u}_b/\bar{u} = 1,84$ . To vrednost so dobili kot skupno poprečje za vse analizirane podatke. Pripadajoča vrednost Boussinesqovega koeficienta iz enačbe (64) je bila  $\alpha_B = 1,23$ .

Po May in sod. (2003) je računski postopek za določitev pretočnosti  $Q_b$  pravokotnega ostrorobega bočnega preliva z znanimi pretočnimi razmerami mirnega toka na dolvodnem koncu sledeč:

1. Izračuna se pretočni koeficient bočnega preliva z uporabo enačbe (65) in z uporabo znane prelivne višine  $h_0$  in globine vode  $h_2$ .
2. Predpostavi se fiksne vrednosti  $\bar{u}_b/\bar{u} = 1,84$  in  $\alpha_B = 1,23$ .
3. Numerično se integrira "gibalno" obliko enačbe bočnega preliva za določitev vzdolžnega poteka gladine in s tem gorvodne globine  $h_1$ .
4. Bočni pretok  $Q_b$  se izračuna z integriranjem enačbe za  $q$  in uporabo vrednosti globine  $h(x)$  iz koraka 3.

Analiza poskusov, ki jih je izvedel Prasad (1976) na bočnih prelivih s pravokotno široko krono širine  $d$ , je pokazala, da so bili v teh primerih efektivni koeficienti pretoka (oznaka  $C_{DB}$ ) skoraj vsakič nižji od ekvivalentnih vrednosti za ostrorobe prelive. May in sod. (2003) poročajo, da je podrobna primerjava med Prasadovimi vrednostmi in rezultati enačbe (65) za enake predpostavljene pretočne razmere pokazala naslednje korelacije:

$$\frac{C_{DB}}{C_{DS}} = 1 - 0,064 \left( \frac{d}{h_0} \right) \quad \text{za } 0 < \frac{d}{h_0} < 2,5 \quad (66)$$

$$\frac{C_{DB}}{C_{DS}} = 0,84 \quad \text{za } \frac{d}{h_0} \geq 2,5 \quad (67)$$

kjer je  $d$  širina krone preliva (merjena pravokotno na linijo krone).

Po mnenju May in sod. (2003) je zgornja formulacija kar skladna s tem, kar je moč pričakovati iz primerjave pretočnih koeficientov za prelive z ostrorobimi in širokimi kronami, kadar so slednji uporabljeni konvencionalno, kot prečni prelive za merjenje pretoka.

#### e) Postopek za dimenzioniranje

V nadaljevanju predstavljen postopek za dimenzioniranje bočnih prelivov glede na izračunani  $Q_b$  po May in sod. (2003) velja za tokovne razmere tipa I, pri katerem je tok v glavnem vodotoku v mirnem režimu vzdolž celotne dolžine bočnega preliva. Ker je tok v mirnem režimu, je izračune treba izvajati v gorvodni smeri, začenši na primerni kontrolni točki ali lokaciji z znano pretočno krivuljo. Ob tem May in sod. (2003) predpostavljajo, da je načrtovalec bočnega preliva že sam določil pretočno krivuljo spodnje vode glavnega korita. Omenjeni avtorji predlagajo naslednjo enačbo za določitev  $Q_b$ :

$$Q_b = \eta \sqrt{g} L h_{pr,2}^{1,5} \left[ J - K \left( \frac{L}{B} \right) Fr_2 \right] \quad (68)$$

kjer so:

- $\eta$  faktor prečnega profila bočnega preliva [-], za ostrorobe velja  $\eta = 1$   
 $h_{pr,2}$  višina gladine nad krono bočnega preliva na dolvodnem koncu preliva [m]  
 $L$  efektivna dolžina krone bočnega preliva [m],  
 $J$  koeficient, ki je funkcija brezdimenzijskih razmerij  $h_{pr,2} / p$  in  $h_{pr,2} / L$ , in sicer:

$$J = c_1 + c_2 \left( \frac{1}{1 + (4h_{pr,2}/L)} \right) \quad (69)$$

$$c_1 = 0,5212 - 0,1752\Omega \quad (70)$$

$$c_2 = 0,1041 + 0,1426\Omega \quad (71)$$

$$\Omega = \frac{h_{pr,2}/p}{1,5 + (h_{pr,2}/p)} \quad (72)$$

- $K$  koeficient, odvisen od razmerja  $h_{pr,2} / p$ , in sicer:

$$K = 0,018 + 0,149 \left( \frac{h_{pr,2}/p}{0,27 + (h_{pr,2}/p)} \right) \quad (73)$$

Glede uporabnosti te metode avtorji opozarjajo na sledeče:

- Dolvodne razmere v glavnem koritu morajo biti take, da je Froudovo število manjše od 1. Za zanesljivo uporabo predlaganega postopka se priporoča  $Fr_2 < 0,6$ .
- Napovedana vrednost gorvodnega  $Fr_1$  mora biti  $Fr_1 < 1$ . Za zanesljivo uporabo predlaganega postopka se priporoča, da velja  $Fr_1 < 0,6$ .
- Metoda dimenzioniranja velja tudi za primer, pri katerem se vsa dotekajoča voda odvaja preko bočnega preliva.
- Metoda dimenzioniranja je bila razvita iz podatkov za bočne prelive, ki so imeli krono vzporedno smeri dotekajočega toka. Nedavna laboratorijska raziskava (Alexander, C., 2000 cit. po May in sod., 2003) je pokazala, da spreminjanje usmerjenosti preliva proti dotekajočemu toku sorazmerno malo učinkuje na skupni bočni odtok.
- Predstavljen postopek velja za primer glavnega korita in enega bočnega preliva. V določenih situacijah sta lahko bočna preliva vgrajena na obeh straneh glavnega korita, da vodo enakomerno odvajata na dve strani (npr. pri pripravi pitne vode, pri čiščenju odpadne vode). Metodo je možno uporabiti tudi v primeru dveh enakih, simetrično postavljenih bočnih prelivov, pri čemer se skupni dotok razdeli.
- Metoda dimenzioniranja velja samo za bočne prelive brez zapornic, pri katerih se bočni odtok preliva neovirano. Za zagotavljanje nepotopljenega bočnega odtoka (potopljen bočni odtok ima manjšo pretočno sposobnost) se priporoča, da je odvodni kanal tolikšen, da je gladina na dolvodnem koncu bočnega preliva za več kot 0,1  $h_{pr,2}$  pod nivojem krone.
- V primeru postavitve stebrov oz. mostnih opornikov na krono bočnega preliva je njihov vpliv treba upoštevati pri določitvi efektivne  $L$ . Pri načrtovanju podpor se je treba zavedati, da tok preko bočnega preliva ni ortogonalen, zato konvencionalne oblike mostnih opornikov ne pridejo v poštev. Stebri s krožnim prečnim prerezom so verjetno najprimernejša rešitev.

Zaradi primerjave z ostalimi avtorji je podan še pregled značilnosti hitrostnih polj po May in sod. (2003): za tok, ki se bočnemu prelivu bliža po pretežno prizmatičnem koritu, se lahko pričakuje  $\alpha_{C,1} = 1,15$ . Vendar pa je analiza, izvedena pri sestavljanju postopka za načrtovanje, pokazala, da lahko bočni preliv povzroči zelo neenakomerno porazdelitev hitrosti na dolvodnem koncu bočnega preliva. Za povprečno vrednost Boussinesqovega koeficienta se je izkazalo, da znaša  $\alpha_B = 1,23$ . Razmerje med vrednostima  $\alpha_C$  in  $\alpha_B$  je odvisno od posamezne oblike hitrostne porazdelitve, toda za pretežno gladko porazdelitev, opisano npr. s potenčnim zakonom, se lahko pokaže, da je vrednost  $\alpha_B = 1,23$  ekvivalentna koeficientu  $\alpha_C = 1,66$ . May in sod. (2003) pravijo, da je njihova nadaljnja analiza podatkov iz uporabljenih starih eksperimentov pokazala, da je ob predpostavki tipične vrednosti  $\alpha_{C,1} = 1,15$  optimalna vrednost tega koeficienta na dolvodnem koncu bočnega preliva znašala  $\alpha_{C,2} = 1,75$ . Z upoštevanjem teh koeficientov, merjenih pretočnih razmer  $Q_2$ ,  $h_{pr,2}$  in  $h_{pr,1}$  ter oceno  $Q_1$  po njihovem novem postopku, so primerjali vrednosti specifične energije  $E_1$  in  $E_2$ . Izkazalo se je, da velja  $E_1 = E_2$ .

### 3.4 Pregled ostalih raziskav bočnih prelivov

Večina raziskav obravnava pravokotne ostrorobe bočne prelive s pravokotnim glavnim koritom, vendar pa se precej raziskav nanaša tudi na drugačne konfiguracije ali robne pogoje. V nadaljevanju je podan zgolj informativen pregled teh raziskav:

- ne-pravokotna geometrija glavnega korita:
  - trapezni: Ramamurthy in sod. (1986), Cheong (1991), Das (1997), Lee in Holley (2002)
  - okrogli: Uyumaz in Muslu (1985)
  - U-oblike: Uyumaz (1997)
  - trikotni: Uyumaz (1992)
  - krivočrtni: Agaccioglu in Yüksel (1998)
- ne-pravokotna oblika bočnega preliva - trikotni: Kumar in Pathak (1987)
- bočni prelive s široko krono: Oertel in sod. (2011), May in sod. (2003), Das (1997), Lee in Holley (2002)

Precej raziskav obravnava bočne prelive v kanalizacijskih sistemih, npr. Gisonni in Hager (1997), Del Giudice in Hager (1999), Burt in sod. (2004). Ena vidnejših in obsežnejših raziskav pa obravnava bočni preliv v kombinaciji s transportom plavin (Rosier, 2007). Ker vse zgoraj navedene raziskave po problematiki niso povsem primerljive z eksperimenti v okviru te disertacije, sledi le pregled njihovih ključnih ugotovitev:

Cheong (1991) je določil pretočni koeficient bočnega preliva (bočni odtok se nadaljuje v odtočni kanal) za primer prizmatičnega trapeznega glavnega korita in mirni tok. Opazovani parametri so bili različna Froudova števila, dolžine krone in nakloni brežin glavnega korita. Raziskave so pokazale, da energijski pristop in pristop z gibalno količino dajeta praktično enake rezultate za  $C_d$ . Nazadnje je s pristopom konstantne energije predlagal enačbo, v kateri je  $C_d$  povezan z gorvodnim Froudovim številom.

Uyumaz in Muslu (1985) sta raziskave opravila za korita krožnega prereza in proučevala tok preko ostrorobih bočnih prelivov tako teoretično, kakor tudi eksperimentalno. Tako razvit teoretični model je bil rešljiv z metodo končnih razlik. Za praktično uporabo sta rezultate podala v obliki diagrama. V eksperimentu sta bila obravnavana mirni in deroči tok. V mirnem režimu je bil pretočni koeficient le malo odvisen od razmerja  $p/D$  (kjer je  $D$  premer korita), a izrazito odvisen od  $L/D$ . V deročem režimu toka je bil  $C_d$  močno odvisen od obeh razmerij,  $p/D$  in  $L/D$ .

Uyumaz (1997) je raziskoval tok preko bočnih prelivov v U-oblikovanih koritih, tako za mirni, kakor tudi deroči režim. Razvil je numerični model in ga primerjal z eksperimentalnimi rezultati, podal pa je tudi grafikone za praktično inženirsko uporabo.

Uyumaz (1992) je poleg postopkov za načrtovanje toka preko bočnih prelivov v pravokotnih in okroglih koritih (Uyumaz in Smith, 1991) izpeljal splošne izraze za potek gladine vzdolž bočnih prelivov v trikotno oblikovanih koritih.

Uyumaz in Smith (1991) sta tok preko bočnih prelivov v pravokotnih in okroglih koritih raziskovala numerično. Numerični modeli so bili rešeni z metodo končnih razlik. Predlagala sta teoretične in eksperimentalne postopke za določitev dolžine bočnih prelivov in okroglih dovodnih kanalov. Poleg tega sta pokazala, da postopki za bočne prelive v pravokotnih koritih ne smejo biti uporabljeni za določanje pretoka in prerezov gladin za bočne prelive v okroglih koritih, kot so predlagali Smith (1973) ter El-Khashab in Smith (1976) (Smith, K.V.H., 1973, cit.po Rosier, B., 2007).

Agaccioglu in Yüksel (1998) sta raziskovala hidravlične razmere pravokotnega ostrorobega preliva na različnih lokacijah vzdolž  $180^\circ$  zavoja. Med eksperimenti v mirnem toku sta opazila zastočno cono na odseku bočnega preliva vzdolž notranje strani zavoja, dolvodno od bočnega preliva pa so se pojavili stoječi valovi. Za oba pojava se je izkazalo, da sta močno odvisna od Froudovega števila. Njun pretočni koeficient  $C_d$  je bil odvisen od gorvodnega Froudovega števila, od razmerja  $p/h_1$  in razmerja  $L/B$ .

Kumar in Pathak (1987) sta eksperimentalno raziskovala značilnosti trikotnega bočnega preliva (ostrorobega in takega s široko krono) na koncu  $90^\circ$  razcepa korita. Prizmatični glavni kanal je bil pravokoten, režim toka pa omejen na mirnega. Kot pri Ranga Raju in sod. (1979) sta vrednost  $h_1 - p$  vzdrževala nad 10 cm za izločitev učinkov viskoznosti in površinske napetosti. Določila sta zveze med pretočnim koeficientom in Froudovim številom glavnega korita za različne vršne kote trikotnega preliva ( $60^\circ$ ,  $90^\circ$  in  $120^\circ$ ). Izkazalo se je, da je pri ostrorobem prelivu vpliv  $p/h$  na  $C_d$  nepomemben, kar je v skladu z ugotovitvami Subramanya in Awasthy (1972). Pri prelivih s široko krono je bilo ugotovljeno, da parameter  $(h - p)/L$  pomembno vpliva na  $C_d$ .

V zgoraj navedenih raziskavah so bili obravnavani izključno posamezni bočni preliivi. Singh in Satyanarayana (1994) sta raziskovala avtomatiziran namakalni sistem z uporabo več bočnih prelivov. Z analiziranjem značilnosti prostorsko spreminjajočega se toka vzdolž glavnega korita s številnimi bočnimi preliivi sta določila koeficient hrapavosti korita, ki je bil primeren prostorsko spreminjajočemu se toku. Na osnovi te analize sta oblikovala računalniški program za določitev geometrijskih parametrov enakomerno prelivajočih prelivov namakalnega sistema. Eksperimenti (8 poskusov), izvedeni za ovrednotenje učinkovitosti razvitega programa, so pokazali odstopanja reda 5 do 10 %.

Dosedanje raziskave so bile izvedene z uporabo različnih eksperimentalnih pristopov oz. matematičnih orodij. V naslednjem pregledu so podani nekateri značilni primeri.

Muslu (2001) je predstavil teoretično analizo pretoka preko bočnega preliva z obravnavanjem bočnega dviga gladine. Za izpeljavo splošenih enačb za pretok in gladino je preliv razdelil na elementarne odseke. Veljavnost predlaganega modela je bila preverjena z uporabo podatkov iz raziskave Subramanya in Awasthy (1972) (Subramanya, K. in Awasthy, S.C., 1972, cit. po Rosier, B., 2007). Poleg tega so bile predlagane enačbe eksperimentalno verificirane še z avtorjevimi lastnimi laboratorijskimi študijami in s podatki iz raziskav Hager (1982a) in Hager (1982b) (Hager, W.H., 1982, cit. po Rosier, B., 2007). V nadaljevanju je Muslu (2002) bočni odtok obravnaval z metodo prilegajočih se krivulj. Model je bil izboljššan z upoštevanjem odklona toka preko bočnega preliva, kar so obravnavali Muslu in sod. (2003). Muslu in sod. (2004) so poročali, da so bili še boljši rezultati doseženi, če pogoj prehoda na koncih bočnega preliva ni vključeval bočnega naklona gladine. Poleg tega je bilo navedeno, da je učinek naklona gladine v bočni smeri drugotnega pomena v primerjavi z odklonom bočnega curka vzdolž preliva. Te raziskave je obravnaval v diskusiji Clemmens (2005), ki je izpostavil, da delo Muslu (2001) vsebuje tehnične napake, ki spodbijajo veljavnost njegovega omenjenega dela in niza njegovih kasnejših objav. Clemmens (2005) je opozoril, da Muslu (2001) izpeljuje svoje enačbe za primer bočnega odliva, tj.  $p = 0$ , a te enačbe uporablja za primere bočnih prelivov, kjer je  $p > 0$ . Poleg tega Clemmens oporeka, da Muslu (2001) najprej izpeljuje enačbo



pretočnega koeficienta bočnega preliva le na podlagi predpostavljene velikosti kinematičnega člana za primer  $p = 0$ , nato pa izpeljani enačbi predpisuje splošno veljavo. Clemmens (2005) poudarja, da bi pristop z gibalno količino moral dati boljše rešitve, in da bi se na ta način izognili potrebnim grobim aproksimacijam znotraj energijske enačbe. Menim, da je Clemmensova diskusija povsem upravičena.

Ramamurthy in Carballada (1980) sta oblikovala model bočnega preliva na podlagi teorije iztoka iz odprtine, z upoštevanjem spreminjanja kota izstopnega curka. V ta namen je bil privzet dvodimenzionalni model bočnega izpusta. Izkazalo se je, da je pretočni koeficient bočnega preliva zelo odvisen od razmerja hitrosti curka (hitrost v glavnem koritu / hitrost prelivnega curka) in od razmerja  $L/B$ . Za verifikacijo teoretičnih napovedi je bil izveden eksperiment. Pokazalo se je, da je ta pristop uporaben za bočne prelive, ki so lahko dolgi največ toliko kot širina glavnega korita. (Ramamurthy, A.S. in Carballada, L., 1980, cit. po Rosier, B., 2007)

Khorchani in Blanpain (2005) sta razvila enačbo pretočnega koeficienta z uporabo umetnih nevronske mreže. Njun model je bil umerjen in validiran z eksperimentalnimi podatki.

Ramamurthy in sod. (2006) so zasnovali nov pristop k izračunu  $C_d$  za pravokotne in okrogle bočne prelive z uporabo multivariabilne nelinearne parcialne metode najmanjših kvadratov (PLS). S to metodo se določijo empirične enačbe, ki  $C_d$  povezujejo z brezdimenzijskimi parametri preliva  $Fr_1$ , razmerjem  $p/h_1$  in razmerjem  $L/B$ .

Poseben numerični postopek izračuna nelinearne navadne diferencialne enačbe za prostorsko spremenljiv pojemajoči tok je ob predpostavkah, značilnih za energijski pristop, podal tudi Venutelli (2008).

Oertel in sod. (2011) so bočni preliv s široko krono modelirali s 3D numeričnim modelom FLOW-3D, pri čemer so prosto gladino računali z metodo volumna tekočine, model pa so umerili s fizičnim modelom. Avtorji poudarjajo, da bo njihov pristop treba preveriti za večji razpon geometrijskih in hidravličnih robnih pogojev.

### 3.5 Pregled hidravličnih raziskav z uporabo vizualizacije toka

Vizualizacija toka je dandanes čedalje uporabnejše orodje za kvalitativno in kvantitativno analizo tokovnih razmer zato nastopa v številnih raziskavah različnih znanstvenih področij. Prednost neinvazivnosti vizualizacijskih metod pride do izraza predvsem pri fizičnih modelnih raziskavah plitvih tokov, npr. pri modelnih raziskavah toka po poplavnih ravninah (Rak in sod., 2011), ali plitvega toka ob modelni jezbi (Kadota in sod., online). V eksperimentih se pogosto uporabljajo različna barvila (Novak in sod., 2010), še zlasti, če raziskava obravnava problematiko širjenja polutantov, npr. v meandrirajočih rekah (Baek in sod., 2006), morskih obalah (Obropta in Hires, 2007) ali vzdolž linijskih virov blizu ostenja (Khan in sod., 2007).

Z napredkom računalniške tehnologije so čedalje pogostejše raziskave, ki uporabljajo metodo PTV (particle tracking velocimetry), PIV ter njeno varianto LSPIV (large-scale PIV). Metoda PIV je uporabljena na primer v kombinaciji z akustičnimi merilniki hitrosti za določitev 3D tokovnih razmer in turbulentne kinetične energije na razbremenilnih kanalizacijskih objektih (Dufresne in sod., 2007), pri nekontaktnem določanju pretoka (Baud in sod., 2005), v še večji meri pa se tovrstne raziskave osredotočajo na turbulenco in koherentne strukture v toku (Nezu in Nakayama, 1997 ter Lukowicz in Köngeter, 1999), pogosto v kombinaciji s problematiko prostih tokov po meandrirajočih strugah s sestavljenimi prečnimi prerezi (Sanjou in Nezu, 2009).

Nezu in Nakayama (1997) sta PTV v kombinaciji z LDA uporabila za modelno raziskavo mehanizma interakcije med glavnim vodotokom in poplavno ravnico, ki ga inducirajo koherentni vrtinci, t.i. intermitentni (prekinjajoči se) sekundarni tokovi. Časovno poprečene strukture sekundarnih tokov sta določila eksperimentalno z LDA, razvoj vzorcev horizontalnih velikih vrtincev, ki so odločilnega

pomena za plitve tokove po poplavnih ravninah, pa sta raziskovala s kvantitativno vizualizacijsko metodo PTV. Z njo sta določila komponente trenutne hitrosti v vseh točkah opazovane horizontalne ravnine, generirane z lasersko svetlobo (t.i. laser-light-sheet, oz. LLS).

Problematiko koherentnih struktur v odprtih vodotokih s sestavljenim prečnim prerezom sta eksperimentalno raziskovala tudi Lukowicz in Köngeter (1999), ki sta v ravnem kanalu snemala delce v horizontalni ravnini z uporabo CCD kamere in tako dobila polja trenutnih hitrosti. Tako dobljene podatke sta obdelala z algoritmom za dinamično filtriranje in primerjala različne dekompozicijske tehnike za pridobitev turbulentnih fluktuacij hitrostnih polj. Pokazala sta, da je prostorsko-časovna korelacija uporabno orodje za identifikacijo vrtničnih struktur ter da tok na prehodu med strugo in inundacijo predstavlja kompleksen 3D problem.

Fujita in sod. (1998) so pokazali, da je LSPIV dejansko razširitev metode PIV, s katero se lahko določi hitrostna polja na večjih območjih pri laboratorijskih ali terenskih pogojih. LSPIV omogoča določitev tokovnih struktur velikega merila in opredelitev pretokov. Algoritmi za procesiranje slik in podatkov so podobni tistim iz običajne PIV, potrebne pa so določene prilagoditve za osvetlitev, postopke sejanja sledil in pred-procesiranja posnetih slik. Omenjena raziskava je LSPIV implementirala na tri hidravlične primere, ki so obsegali od 4 m<sup>2</sup> do 45000 m<sup>2</sup>, in sicer: procesi prenosa plinov dolvodno od modelnega preliva, pretok ledu po modelu rečnega sotočja in poplavni tok po inundaciji v naravi. LSPIV se je izkazala za zanesljivo, prilagodljivo in ekonomsko učinkovito orodje za diagnostiko toka, ki je uporabno pri načrtovanju terenskih opazovanj, opozarjanju pred poplavami in upravljanju aktivnosti, povezanih z obravnavanim vodotokom.

Weitbrech in sod. (2002) so izvedli laboratorijsko aplikacijo metode LSPIV na površini plitvega toka in z njo analizirali učinke plitvih zastojskih con na procese izmenjave snovi v rekah, pri katerih velike koherentne 2D tokovne strukture v plasti mešanja dominirajo tokovnim karakteristikam.

Meselhe in sod. (2004) so raziskali zmožnosti in omejitve LSPIV v smislu njene občutljivosti na gostoto sejanja in časovnega intervala med zaporednimi posnetki. Ugotovili so, da se ob zadostnem sejanju in ustrezni frekvenci posnetkov natančnost tehnike LSPIV ne poslabša vse dokler se pretočne hitrosti ne zmanjšajo do 0,015 m/s. To kaže, da je LSPIV primerna tudi za tokovna polja z majhnimi hitrostmi, ki so pogosto pod mejo detekcije večine konvencionalnih merilnih naprav.

S hitrim napredkom računalniške tehnologije je poudarek na računalniški podpori vizualizacije toka čedalje večji, saj se z dostopnostjo zmogljivih procesorjev in hitrih digitalnih kamer veča možnost vizualizacije toka z veliko prostorsko in časovno ločljivostjo, ki temelji na tem, da se sliko toka obravnava kot matriko pikslov. Temu sledi tudi razvoj algoritmov, po katerih se izvede analiza posnetega barvila oz. delcev v toku in izračuna hitrostno polje opazovanega toka. Skupnost raziskovalcev, ki se ukvarjajo z vizualizacijo (gre za strokovnjake s področja matematike in računalništva) je razvila mnogo metod za vizualizacijo toka, ki obsegajo vse od prikaza puščic in tokovnic do metod tekstur. Uporabo tekstur za vizualizacijo toka je 1991 vpeljal van Wijk, to pa sta nadgradila Cabral in Leedom (1993) z vpeljavo t.i. linijske integralne konvolucije (angl. line integral convolution, oz. LIC). Sledile so nadgradnje in variacije teh originalnih metod. Ena izmed teh izboljšav je numerični postopek, ki ga je predlagal van Wijk (2002). Gre za vizualizacijo 2D toka, pri kateri vse operacije potekajo na podlagi slik, zato je avtor zanjo skoval izraz vizualizacija toka na osnovi slik (angl. image based flow visualization, oz. IBFV). To metodo so Laramée in sod. (2004) označili za enega najhitrejših algoritmov za goste, 2D, nestalne predstavitve vektorskega polja. Kot rečeno je v disertaciji uporabljena metoda, ki so jo uporabili Bajcar in sod. (2009), opisana je v poglavju 2.2.4.

V nadaljevanju bo podrobneje predstavljena literatura na temo raziskav, ki za vizualizacijo toka uporabljajo vodikove mehurčke ter raziskav, kjer je vizualizacija uporabljena za analizo tokovnih razmer na območju bočnega preliva.

### 3.5.1 Raziskave, ki za vizualizacijo toka uporabljajo vodikove mehurčke

V eksperimentih, ki so predmet te disertacije, so bili v vlogi barvila za vizualizacijsko metodo uporabljeni z elektrolizo pridobljeni vodikovi mehurčki, zato sledi pregled raziskav, kjer so za vizualizacijo toka uporabili vodikove mehurčke.

Eno zgodnejših raziskav so izvedli Okamoto in sod. (1971), ki uvodoma poudarjajo, da se je dotlej za vizualizacijo vzorcev toka običajno uporabljalo barvila, dim in različne drobnozrnate delce, ki pa so namenjeni kvalitativni in ne kvantitativni analizi toka (v tekočinskem stroju in njegovih delih), še zlasti v primeru hitrih, prehodnih in razdeljenih tokov. Avtorji so preučevali, kako se vizualizacija z vodikovimi mehurčki obnese pri toku v sklenjenem cevovodu. Za ilustracijo so podali slike vrtničnega toka (pri  $Re = 10^4$  do  $10^5$ ) nad rebrastim odsekom cca. 80 cm dolgega prosojnega korita s presekom 5 x 5 cm, ki so ga vgradili med dve cevi premera 3 palce. Za katodo so uporabili platinasto žico, za anodo pa grafitno palico, ki je segala v tok. Vzorec tokovnic generiranih mehurčkov so dobili z uporabo pulzirajočega svetlobnega vira, sestavljenega iz rotirajočega perforiranega diska in jodove svetilke. Na podlagi vizualizacije so izračunali lokalne hitrosti v tokovnem polju.

Njihova raziskava se je osredotočila na analizo negotovosti, povezanih z vodikovimi mehurčki v vodnem toku. Obravnavali so: 1) zamik tokovnic zaradi vzgona, 2) dolžino pospeševanja vodikovih mehurčkov po ločitvi od žice, 3) vodno brazdo za žico, 4) centripetalno silo v ukrivljenem toku in 5) absorpcijski čas. Te analize so do določene mere relevantne tudi za naše eksperimente (čeprav smo delali v odprtem koritu, pri nižjih hitrostih in z drugačno izvedbo elektrod), zato so podrobneje predstavljene v poglavju o merilni tehniki. Poleg ugotovitev, ki se tičejo omenjenih negotovosti, so avtorji ugotovili, da so vizualizacijsko izmerjene hitrosti skladne z rezultati meritev s Pitotovo cevko in da je opazovanje difuzije mehurčkov uporabno za meritve difuzije turbulence vodnega toka.

Na to temo so Kuhn in sod. (2006) uporabili vizualizacijo z vodikovimi mehurčki za kvalitativno opazovanje vrtničnega obroča, ki so ga generirali tako, da so laminarni tok vode v prosojnem rezervoarju (večjem akvariju) speljali skozi okroglo odprtino v vodoravnem cilindru do območja z vodikovimi mehurčki. Za proizvodnjo slednjih so uporabili bakreno ploščo (anoda), tanko platinasto žico s premerom 0,2 mm in vir enosmerne električne napetosti 30 V, električni tok pa je znašal 0,2 A. Vodi so dodajali kuhinjsko sol (10 ml soli na 30 l vode), da so dobili ionsko raztopino. Za osvetlitev so uporabili 500 W svetilki, posnetke pa so fotografirali s strani. Z ostrenjem slike so imeli veliko težav.

Vizualizacija vodikovih mehurčkov je bila v povezavi s formiranjem vrtincev in procesi turbulence uporabljena v različnih študijah, od starejših bazičnih (Maxworthy, 1972) do novejših aplikativnih (Yang in sod., 2009). Med njimi so tudi bolj "eksotične" študije, kot denimo eksperimenti toka na modelih karotidne arterije, ki so bili narejeni iz pleksi stekla (Palmen in sod., 1994).

Z vidika izvedbe eksperimentov te disertacije so bile dragocene tudi ugotovitve Klemenčič (2010), v kateri je avtor obravnaval vizualizacijo tokovnega polja v vstopnem kanalu fizičnega modela črpališča s sesalnim zvonom in pri tem za osvetlitev in snemanje uporabil praktično enako opremo kot je bila uporabljena pri eksperimentih v okviru te disertacije. Klemenčič (2010) je za računalniško podporo uporabil komercialno programsko orodje Dynascan. Meril je obliko in dinamiko nastalih zračnih vrtincev v vodnem toku. Rezultate analize tokovnih razmer je prikazal kot intenzitete turbulence in kot konture intenzitete sivin posnetkov toka.

### 3.5.2 Raziskave bočnih prelivov z uporabo vizualizacije toka

Raziskave bočnih prelivov z uporabo vizualizacije toka so po pregledu literature sodeč redke in večinoma omejene na obravnavo površinskih hitrosti.

Yoshihisa in Ken'ichiro (2004) v povzetku svoje raziskave (dostopen je samo angleški povzetek, medtem ko je besedilo raziskave v japonsščini) pravita, da sta eksperimentalno raziskovala poplavne tokove ob bočnih prelivih v vodotoku s sestavljenim prerezom, pri čemer sta pozornost namenila predvsem vplivu orientacije in oblike preliva na vzorec toka. Vizualizacijo toka (verjetno le kvalitativno – glede na naslednje glavne zaključke) sta izvedla z vbrizgavanjem barvila in metode z oljnim filmom. Med drugim sta ugotovila, da v glavnem koritu na dolvodnem koncu preliva nastaja obsežna recirkulacijska cona.

Sem lahko pogojno štejemo tudi raziskavo Khorchani in Blanpain (2004), ki sta obravnavala bočne prelive v vlogi razbremenilnih objektov v sistemih kombiniranih kanalizacij in predlagala koncept monitoringa teh objektov z uporabo video tehnologije. Sicer nista uporabila vizualizacijskih metod, sta pa med drugim uporabila orodja za procesiranje slik, da sta določila potek vodne gladine in da sta slikovne podatke pretvorila v numerične podatke, primerne za nadaljnje modeliranje.

Bieri in sod. (2009) so LSPIV uporabili na fizičnem modelu ( $M = 1:50$ ) odseka reke Rhone, na katerem je bočni preliv uporabljen za uravnavanje prelivanja visokih vod v primeru večjih poplavnih dogodkov. Iz njihove skice postavitve eksperimenta je razvidno, da je bočni preliv nameščen pod precejšnjim kotom glede na os glavnega korita. Eksperimenti z LSPIV so bili namenjeni raziskavi in izboljšavi učinkovitosti numerično načrtovanega bočnega preliva, hkrati pa so preučili površinske hitrosti na sotočju reke in pritoka ter na območju jezbic. Avtorji so mnenja, da gibljivo modelno peščeno dno in transport suspendiranih sedimentov opravičujejo neinvazivno merjenje z LSPIV.

Roger in sod. (2009) so opozorili na prednosti t.i. hibridnega pristopa, pri katerem gre za kombiniranje fizičnega in numeričnega hidravličnega modeliranja. Eksperimentalno in numerično so modelirali širjenje vala iz akumulacije ob porušitvi prečne pregrade in propagacijo vala po poplavnem polju ob porušitvi rečnega visokovodnega nasipa. Slednje je v bistvu problem bočnega odlivanja iz glavnega korita. Meritve so izvedli na fizičnem modelu z glavnim koritom širine 1 m in stekleno poplavno površino 3 x 4 m. Mesto porušitve nasipa so modelirali z bočnim prelivom, opremljenim z zapornico. Stena glavnega korita je bila na odseku nasproti bočnega preliva steklena. Hitrosti toka so merili z metodo LDA, globine toka pa z ultrazvočnimi (UZ) senzorji. Anemometer so premikali pod stekleno ploščo, UZ senzorji pa so bili nameščeni na t.i. merilnem mostu, tj. premični traverzi nad modelno poplavno ravnico. Eksperimentalno določen koeficient pretoka so formulirali kot kubični polinom prelivne višine.

Za numerično modeliranje so uporabili dva modela, model končnih elementov (imenovan DGFlow) in model končnih volumnov (imenovan WOLF 2D). Oba modela temeljita na 2D globinsko-poprečnih enačbah ohranitve mase in gibalne količine, ki so znane kot enačbe plitvega toka (angl. shallow-water equations, SWE). Osnovna predpostavka pravi, da hitrosti, ki so normalne na smer glavnega toka, ostajajo majhne. Posledično je polje tlakov hidrostatično, kar lahko omejuje uporabnost SWE.

Skupno so izvedli štiri eksperimente, pri tem je začetni pretok v glavnem koritu znašal 150 do 200 l/s, začetne globine so bile 40 do 50 cm, višine pragu pa približno 15 do 30 cm. Avtorji so poudarili, da bi bilo potrebno v numeričnih modelih izboljšati predvsem vpliv Boussinesqovih koeficientov, saj se je pokazalo, da imajo znaten vpliv na tokovne razmere. V omenjeni raziskavi so o porazdelitvi teh koeficientov v glavnem le ugibali, nakazali pa so, da bi bilo treba problematiko raziskati z eksperimenti in 3D numeričnimi modeli.

### 3.6 Tabelarični povzetek pregleda pomembnejših raziskav

Iz pregleda literature je razvidno, da je bila problematika toka preko bočnega preliva doslej deležna precejšnje pozornosti. V naslednji preglednici (Preglednica 1) so povzete glavne značilnosti raziskav, pri katerih so bili robni pogoji eksperimentov podobni kot v tej disertaciji in so torej pomembnejše v smislu primerjave rezultatov. Vse navedene raziskave so bile izvedene na hidravličnih modelih s fiksnim dnom ali pa se sklicujejo na rezultate takih eksperimentov.

Preglednica 1: Glavne značilnosti raziskav, ki so relevantnejše za primerjavo s to disertacijo  
Table 1: Main features of investigations, relevant for comparison with present study

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
Borghesi 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
Ta disertacija	G	ostri	mirni	eksperimentalni

\* E = energijski pristop; G = pristop z gibalno količino. Označuje pristop, iz katerega avtor izhaja, ga uporablja ali preferira.

\*\* Kjer je poleg eksperimentalnega tipa naveden še numerični ali teoretični tip, je v delu uporabljen numerični izračun ali predlagan nov teoretični model, in sicer na osnovi lastnih (manjštevlnih) meritev ali na osnovi eksperimentov drugih avtorjev.

V pregledu literature je bilo prikazano, da za določitev  $C_d$  obstaja veliko enačb. Zaradi nazornosti so najrelevantnejše zbrane v preglednici 2, večinoma povzeti po Emiroglu in sod. (2011). Pri tem velja opozoriti, da Emiroglu in sod. (2011) kot enačbo Swamee in sod. (1994) navajajo izraz, ki se razlikuje od oblike v originalnem viru. V preglednici 2 je navedena originalna oblika enačbe Swamee in sod. (1994a).

Preglednica 2: Enačbe koeficienta pretoka za pravokotne ostrorobe bočne prelive  
 Table 2: Discharge coefficient equations for rectangular sharp-crested side weirs

Vir	Enačba za $C_d$
Nandesamoorthy in sod. (1972)	$C_d = 0,432 [(2 - Fr_1^2)/(1 + 2 Fr_1^2)]^{0,5}$
Subramanya in Awasthy (1972)	$C_d = 0,864 [(1 - Fr_1^2)/(2 + Fr_1^2)]^{0,5}$
Yu-Tech (1972)	$C_d = 0,623 - 0,222 Fr_1$
Ranga Raju in sod. (1979)	$C_d = 0,81 - 0,6 Fr_1$
Cheong (1991)	$C_d = 0,45 - 0,221 Fr_1^2$
Singh in sod. (1994a)	$C_d = 0,33 - 0,18 Fr_1 + 0,49 (p/h_1)$
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)	$C_d = 0,71 - 0,41 Fr_1 - 0,22 (p/h_1)$
Borghai in sod. (1999)	$C_d = 0,7 - 0,48 Fr_1 - 0,3 (p/h_1) + 0,06 (L/B)$
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)	$C_d = [0,836 + (-0,035 + 0,39 (p/h_1)^{12,69} + 0,158 (L/B)^{0,59} + 0,049 (L/h_1)^{0,42} + 0,244 Fr_1^{2,125})^{3,018}]^{5,36}$

Nazadnje še enkrat poudarimo, da so v raziskavah bočnih prelivov meritve hitrosti presenetljivo redke, njih izvedba pa je omejena na uporabo točkovnih kontaktnih metod (Pitotove cevke, akustični merilniki hitrosti). Tak pristop je za primere manjših bočnih prelivov (npr. fizični modeli, ki so pogosto dokaj majhnih dimenzij, a kljub temu izpolnjujejo kriterije modelne podobnosti med naravo in modelom) neuporaben, saj pri ozkem koritu in nizkih prelivnih višinah obstaja možnost, da meritev s kontaktnim instrumentom preveč vpliva na značilnosti toka v območju bočnega preliva.

## 4 EKSPERIMENTALNO DELO

### 4.1 Zasnova eksperimentalnega dela

Disertacija je izrazito eksperimentalno naravnana, sloni pa na meritvah na različnih fizičnih hidravličnih modelih. Eksperimentalno delo je potekalo v laboratoriju UL – FGG Katedre za mehaniko tekočin (v nadaljevanju KMTe) in na Inštitutu za hidravlične raziskave (v nadaljevanju Hidroinštitut) v Ljubljani, in sicer v naslednjih fazah:

1. testiranje uporabnosti vizualizacijske metode na obstoječih digitalnih posnetkih vodnega toka na fizičnem modelu bočnega vtočnega objekta (spodnji vtočno/iztočni objekt črpalne HE Avče),
2. poizkus izboljšave vnosa polutanta (z elektrolizo) na modelu bočnega preliva s široko krono (model razbremenilnega objekta v sklopu ureditve akumulacije HE Brežice),
3. preliminarni eksperimenti na ostrorobem bočnem prelivu v ozkem koritu,
4. končni eksperimenti na manjšem ostrorobem bočnem prelivu v ozkem koritu,
5. kontrola na večjem ostrorobem bočnem prelivu v širšem koritu.

### 4.2 Robni pogoji eksperimentov - primerjava z ostalimi avtorji

Glavnina eksperimentalnega dela disertacije je bila izvedena na fizičnih modelih bočnih prelivov v ozkem koritu. To bi utegnilo sprožiti pomisleke o ustreznosti oz. uporabnosti rezultatov, zato je bila izvedena še kontrola v širšem koritu, da bi se ugotovilo, ali ima merilo modela učinek na končne rezultate raziskav (t.i. "scale effect"). Meritve v širšem koritu so še dodatno zagotovile, da so bili glavni brezdimenzijski parametri raziskave primerljivi z vrednostmi, o katerih poročajo avtorji sorodnih raziskav (Preglednica 3), kar povečuje uporabnost rezultatov disertacije.

Preglednica 3: Robni pogoji raziskav, ki so relevantnejše za primerjavo z rezultati te disertacije  
Table 3: Boundary conditions of investigations, relevant for comparison with present study

Avtor	$B$ [cm]	$L$ [cm]	$p$ [cm]	$I_d$ [%]	$Q_1$ [l/s]	$B/L$ [-]	$Fr_1$ [-]	$Q_b/Q_1$ [-]
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	$\leq 220$	0,2-0,38	$\leq 1,2$	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	-
<b>Ta študija</b>	<b>14-30</b>	<b>10-100</b>	<b>7,5-20</b>	<b>0,05</b>	<b>3,3-34,6</b>	<b>0,3-1,4</b>	<b>0,23-0,41</b>	<b>0,12-0,76</b>

V zgornji preglednici je za razmerje  $B/L$  v tej študiji kot najmanjša vrednost upoštevana varianta preliva  $B = 30$  cm,  $L = 100$  cm, največja vrednost za  $B/L$  pa je izračunana iz variante  $B = 14$  cm,  $L = 10$  cm. Iz navedene primerjave parametrov je razvidno, da meritve v okviru disertacije pokrivajo razpon ključnih parametrov (tj. geometrijskih in hidravličnih robnih pogojev), ki je primerljiv z večino ostalih raziskav.

### 4.3 Opisi fizičnih modelov in izvedbe meritev

Opisi preizkuševališč oz. fizičnih modelov so podani za vsako fazo posebej. Prvi fazi sta služili predvsem preliminarni uporabi vizualizacijske metode, zato je opis preizkuševališč za ti dve fazi podan nekoliko manj podrobno kot za ostale faze, ki predstavljajo jedro eksperimentalnega dela disertacije.

#### 4.3.1 Model 1: Vtočni objekt črpalne HE Avče

Kljub temu, da je bila vizualizacijska metoda še v razvoju, smo jo uporabili v povezavi z rezultati raziskave na fizičnem hidravličnem modelu spodnjega vtočno-iztočnega objekta črpalne HE Avče. Model je bil zgrajen v merilu 1:28 na zunanji ploščadi Hidroinštituta na podlagi terenskih meritev in 1D matematičnega modela za račun nivojev gladin. Zajemal je vtočni objekt (usmerjevalni stebri, prag, plato in cevovod) ter pripadajoča odseka struge. Upoštevan je bil Froudov kriterij modelne podobnosti kot ga podaja Kobus (1980), modelno dno je bilo gibljivo (Slika 10).



Slika 10: Fizični hidravlični model vtočnega objekta: (a) pogled z desnega brega, (b) tloris  
Figure 10: Physical hydraulic model of the intake: (a) view from the right bank, (b) plan view

Na fizičnem modelu so bile analizirane hidravlične razmere za črpalne in turbinske režime obratovanja elektrarne in za različne hidravlične robne pogoje vodotoka, tj. dotoke in višine spodnje vode. Izmerjeni so bili nivoji gladin in v določeni meri tudi kote modelnega prodnega dna. Na območju zajetja so bile z ultrazvočnim merilnikom hitrosti (v nadaljevanju hitrostna sonda ADV) izmerjene povprečne lokalne hitrosti v dveh pravokotnih smereh v različnih točkah vzdolž treh profilov med stebri in vtokom v cevovod. Precejšen del končnih ugotovitev fizične modelne raziskave (Rodič in sod., 2006) je slonel na kvalitativnem opazovanju tokovnih struktur, ki jih je razkrilo dodajanje barvila, točkovno vnešenega v tok gorvodno od opazovanega območja.

S temo disertacije so te meritve povezane predvsem tako, da smo v okviru omenjene raziskave izmerili hitrosti toka z akustično sondo ADV, med drugim pa smo izvedli tudi kvalitativno analizo tokovnih razmer s pomočjo digitalnih video posnetkov obarvanega toka. Kot barvilo je bila uporabljena raztopina kalijevega permanganata (tj. hipermangan). Vizualizacijska metoda je bila uporabljena, da bi hitrostna polja določili na podlagi analize obstoječih video posnetkov. Poudariti velja, da so bili razpoložljivi filmi posneti že leta 2006 (fizični model je bil medtem seveda že odstranjen), tedanje nastavitve snemanja pa niso bile prilagojene leta 2010 uporabljeni vizualizacijski metodi, saj so bili filmi posneti z namenom zgolj kvalitativne analize tokovnic in premeščanja modelnih plavin. Ob



primerni selekciji posnetkov z vidika osvetljenosti, kontrasta in odsevov zaradi valovanja gladine se je vizualizacijska metoda izkazala za zelo uporabno in je omogočila izrazito nadgradnjo obstoječih modelnih rezultatov, kar je podrobneje obravnavano v Novak in sod. (2010).

#### 4.3.2 Model 2: Visokovodni razbremenilni objekt na spodnji Savi

Bolj tipičen bočni preliv je bil obravnavan na fizičnem modelu v laboratorijski dvorani Hidroinštituta, kot kaže slika 11. V okviru hidravličnih raziskav bodoče HE Brežice je bil zgrajen hidravlični model razbremenilnega objekta v merilu 1:50, na katerem so bile preizkušene različne variante geometrije, pri vseh pa je šlo v osnovi za bočni preliv s široko krono. Na ta način je bil modeliran razbremenilni objekt v nasipu akumulacije HE. Prečni prerez glavnega korita modela je bil v obliki polovice trapeza, stena nasproti bočnega preliva je bila vertikalna. Model je bil opremljen tudi z nizom desetih piezometrov za natančno meritev lokalnih globin.



Slika 11: Fizični model razbremenilnega objekta: (a) pogled z dolvodne strani, (b) ADV sonda na merilnem mostu

Figure 11: Physical model of the flood overflow structure: (a) view from downstream, (b) ADV probe mounted on a bed-profiler

Za potrebe disertacije smo najprej izvedli nekaj preliminarnih kvalitativnih analiz tokovnih razmer z vnosom barvila, tj. vodne raztopine hipermangana (Slika 12a), in za oceno razmer izvedli nekaj meritev lokalnih hitrosti z 2D in 3D ADV sondo. Pri tem smo uporabili obstoječ merilni most, ki je krmiljen preko vmesnika LabView. Uporabljena merilna oprema omogoča merjenje nivoja gladin (ultrazvočna sonda meri oddaljenost od merilnega mostu do gladine), suhega dna (laser) in lokalnih hitrosti toka (možni le analogni izhodi priključene ADV sonde). Na ta način smo za tedanjo konfiguracijo bočnega preliva ugotovili sledeče:

- bočno se odliva sorazmerno majhen del dotoka, in sicer samo iz tistega dela gorvodnega prereza, ki je blizu krone bočnega preliva (kot kaže slika 12a),
- lokalne hitrosti so neenakomerne, pri čemer so vzdolžne hitrosti reda velikosti 30 cm/s, vertikalne hitrosti pa so za en velikostni razred manjše in znašajo do 2 cm/s,
- na gorvodnem in dolvodnem koncu bočnega preliva prihaja do vrtinčenja (Slika 12b),
- globina toka nad široko krono in prelivnim hrptom je majhna, reda velikosti 2 cm, in kot taka neprimerna za uporabo običajne ADV sonde, ki posega v opazovani tok.



Slika 12: (a) Vizualizacija toka z barvilom, (b) vrtinci ob modelnem krilnem zidu (prikazan tudi bel okrogel plastični plovec)

Figure 12: (a) Flow visualization using dye, (b) vortices at model side walls (a float is shown also)

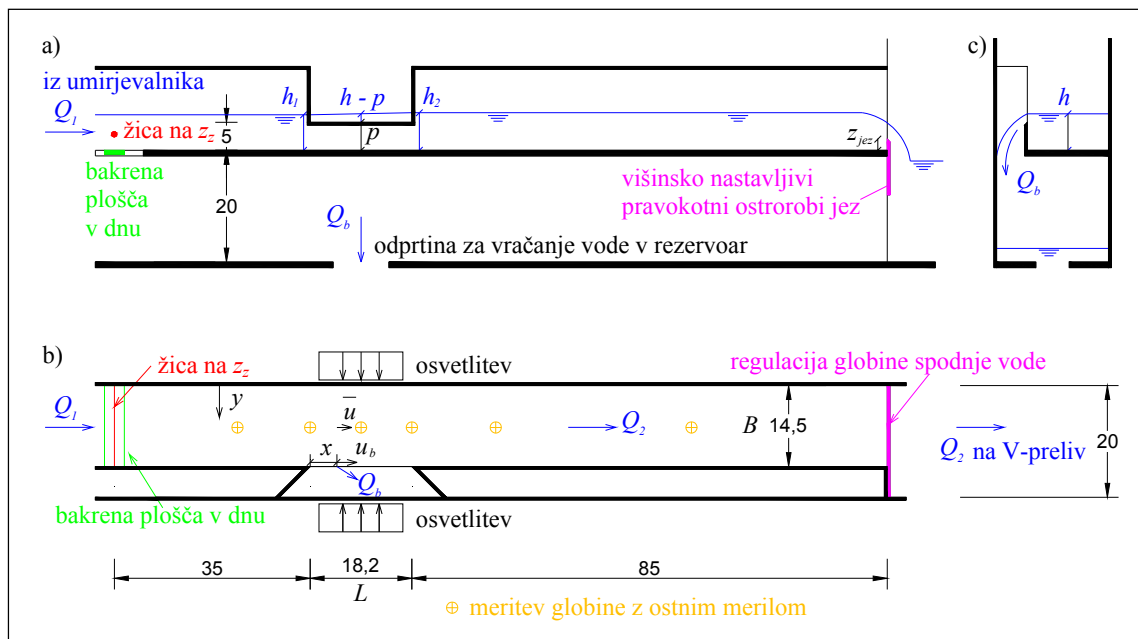
Eden od pomembnih ciljev je bil tudi izboljšati vnos sledila oz. barvila, tako da bi bilo slednje vneseno po celotni širini korita z minimalnim poseganjem v tok, in bi v polni meri izkoristili možnosti vizualizacijske metode. V ta namen smo poizkusili uporabiti elektrolizo, pri kateri so namesto barvila uporabljeni vodikovi mehurčki, ki se generirajo vzdolž elektrode, ki je priključena na enosmerno napetost in položena preko širine toka na izbrani globini glavnega korita. Žal se ta pristop z razpoložljivo opremo ni obnesel zaradi premajhne napetosti vira enosmerne električne napetosti in nizke prevodnosti vode v sistemu Hidroinštituta. V izogib težavam s prevodnostjo smo pri elektrolizi v ožjem koritu KMTe vodi iz vodovodnega omrežja dodajali sol, kot je opisano v naslednji točki. Taka rešitev bi bila v primeru Hidroinštituta povsem neprimerna, saj je tamkajšnji rezervoar približno stokrat večji in se deloma napaja tudi z deževnico, voda pa se večinoma pretaka tudi po obsežnih zunanjih betonskih modelih. Poleg tega je bil dani betonski model tudi z vidika zagotavljanja optičnega dostopa (kar je bistvena zahteva vizualizacijske metode) primeren le v zelo omejenem obsegu, saj v času izgradnje modela ni bilo predvideno, da bi se za meritve hitrostnih polj uporabile vizualizacijske metode.

Tudi merilni most se ni obnesel. Prvič, oba merilnika razdalj (ultrazvok in laser) sta se izkazala za premalo natančna, saj smo ugotovili odstopanja do  $\pm 5$  mm celo pri stoječi gladini. In drugič, krmiljeno pozicioniranje sonde ADV je okorno, zamudno in terja veliko pazljivost na lokacijah, ko je sonda blizu ostenja modela, vrednosti razpoložljivega analognega izhoda pa preveč poprečene, zato lokalnih hitrosti toka nismo merili. Ta merilni sistem bi bil s primerno optimizacijo nedvomno bistveno koristnejši, vendar to ni predmet te disertacije.

Poleti 2010 je bila konfiguracija modela razbremenilnega objekta zaradi tekočih projektov v Hidroinštitutu občutno spremenjena, kar je onemogočilo, da bi bile omenjene preliminarne ugotovitve nadgrajene s podrobnejšo raziskavo z vizualizacijsko metodo.

### 4.3.3 Model 3: Ostrorobi bočni preliv – preliminarni eksperimenti KMTe

V laboratoriju KMTe je bil v stekleni žleb širine 20 cm vgrajen ostrorobi bočni preliv iz pleksi stekla z dolžino krone  $L = 18,2$  cm in višino preliva  $p = 5$  cm, kot kaže slika 13.



Slika 13: Model KMTe – preliminarni: (a) vzdolžni prerez, (b) tloris, (c) prečni prerez na  $x/L = 0,5$ .  
Enote v cm.

Figure 13: Model KMTe – preliminary: (a) longitudinal section, (b) plan, (c) cross section at  $x/L = 0,5$ .  
Units in cm.

Zasnova modela je bila, tako v smislu geometrije kakor tudi pretokov, v največji meri pogojena z majhno širino razpoložljivega korita. Da bi bila širina opazovanega toka v glavnem koritu čim večja, je bil odtok preko bočnega preliva speljan namesto v vzporedno korito kar pod dno glavnega korita in neposredno v zbirni rezervoar. Regulacija globine vode dolvodno od bočnega preliva je bila izvedena z višinsko nastavljenim ostrorobim pravokotnim jezum (višina  $z_{jez}$ ). Dotok vode je v sklenjenem sistemu iz 3 m<sup>3</sup> rezervoarja zagotavljala nizkotlačna črpalka s kapaciteto 20 l/s, pri čemer je konfiguracija modela dopuščala, da je na model dotekalo do 9 l/s, in sicer preko manjšega umirjevalnika, merilnega preliva, cevovoda dolžine približno 3 m in umirjevalnika laboratorijskega žleba. Dotok  $Q_1$  se je reguliral z zasunom in izmeril na trikotnem 45° prelivu, pri čemer so bile prelivne višine  $H$  merjene v cilindru piezometra, pretoki pa izračunani po pripadajoči pretočni krivulji, dani z enačbo:

$$Q = 0,97864 \mu H^{5/2} \quad (74)$$

kjer je  $\mu$  prelivni koeficient, ki ima vrednost 0,60, saj gre za standardizirani merilni preliv, ki je bil dodatno umerjen volumetrično.

Odtok po glavnem koritu  $Q_2$  je bil merjen na trikotnem ostrorobem prelivu z vršnim kotom  $\alpha = 53^\circ 8'$ . Kljub na prvi pogled nenavadni vrednosti tega kota gre za eno od standardnih oblik (standard ISO 1438:2008), predpisanih z zvezo  $\tan(\alpha/2) = 1/2$ . V natočni del merilnega preliva  $Q_2$  so bile dodane prečne ovire (podobne potopnim stenam) za umirjanje toka. Prelivne višine  $Q_2$  so bile merjene z ostnim merilom. Kombinacija preliva  $Q_2$  in razpoložljivega steklenega korita ni bila povsem v skladu s standardom. Ker bi izpolnitev zahtev omenjenega standarda še dodatno zmanjšala že tako dokaj omejen razpon merjenih pretokov  $Q_2$ , je bila za omenjeni preliv eksperimentalno določena pretočna krivulja, s katero smo odčitke na predpisani lokaciji merilnega profila preliva  $Q_2$  (tj. približno 4 do 5  $h_{prel,max}$  gorvodno od preliva) povezali s pretoki  $Q_1$ , merjenimi na dotočnem merilnem prelivu. Med določanjem pretočne krivulje za preliv  $Q_2$  je bil bočni odtok onemogočen, tj.  $Q_b = 0$ .

Količine  $Q_b$  so bile med običajnim obratovanjem bočnega preliva iz vrednotene kot razlika  $Q_b = Q_1 - Q_2$ . Z drugim ostnim merilom so bile izmerjene tudi gladine na območju bočnega preliva, in sicer vzdolž osi glavnega korita. Natančnost odčitka z ostnimi merili znaša 0,1 mm.

Cilj izboljšanja vnosa sledila oz. prehod na vizualizacijo z uporabo z elektrolizo generiranih vodikovih mehurčkov je bil z uporabo manjšega in v celoti prosojnega modela dosežen, prav tako je bila izboljšana izvedba snemanja toka. Za različne hidravlične robne pogoje, tj. dotoka in globine spodnje vode, so bila na območju bočnega preliva hitrostna polja izmerjena v petih prečnih prerezih (gorvodno, na začetku krone, na sredini, na koncu krone in dolvodno), v štirih globinah (oznaka  $z_z$ ): 1 cm nad dnom, v višini  $z_z = p/2$ , v višini  $z_z = p$  (tj. v višini krone) in 0,5 cm pod gladino. Višino merilne ravnine je določala oddaljenost žičke  $z_z$  od dna glavnega korita, temu primerno pa je bila vsakokrat sproti prilagojena tudi pozicija osvetlitve, ki je zagotavljala, da je bil enakomerno osvetljen 5 mm visok sloj preko celotne širine korita.

Vzdolžni prerezi gladin so bili določeni predvsem iz odčitkov ostnih meril, v manjši meri pa tudi iz posnetih fotografij vertikalnih laserskih presečnih ravnin. Raziskan je bil tudi vpliv oddaljenosti in višine jezua dolvodno od bočnega preliva, kar je omogočilo preliminarno oblikovanje nove enačbe za določitev pretočnega koeficienta  $C_d$ . Ti preliminarni eksperimenti so bili v nadaljevanju obsežno nadgrajeni, tako v smislu razpona zajetih parametrov kakor tudi izvedbe meritev in analize, kot opisuje naslednja točka.

#### 4.3.4 Model 4: Ostrorobi bočni preliv – končni eksperimenti KMTe

V tej fazi raziskav so bile odpravljene pomanjkljivosti, ugotovljene na podlagi preliminarnih eksperimentov, poleg tega pa so bile izvedene tudi dodatne izboljšave.

Izvedene so bile naslednje spremembe:

- povečano število variant bočnih prelivov, tj. skupno šest variant geometrije bočnega preliva, in sicer (oznake imajo obliko L[cm]\_p[cm] in pomenijo: dolžina krone v cm\_ višina krone v cm): L10\_p7,5; L15\_p7,5; L15\_p10, L20\_p10, L20\_p12 in L25\_p12,
- večji razpon hidravličnih parametrov (pretoki, vodostaji dolvodnega odseka),
- odpravljene težave z delno oviranim bočnim odtokom (k temu je pripomoglo tudi to, da je bila odstranjena poševna ločilna stena na dolvodnem koncu bočnega preliva),
- odpravljene meritve s prenizkimi pretočnimi višinami vzdolž krone bočnega preliva. Tako je bila višina curka večja ali enaka 1,9 cm, kot so priporočili že Coleman in sod. (1923) in uporabili tudi Emiroglu in sod. (2011),
- potek gladin gorvodno in dolvodno od bočnega preliva preverjeno vzporeden dnu (in zato rezultati primerljivi z rezultati Emiroglu in sod., 2011),
- za vsako geometrijo bočnega preliva je izmerjenih več meritev hitrosti, in sicer v sedmih prečnih prerezih ( $x/L = -0,25; 0; 0,25; \dots 1,25$ ), na petih globinah ( $z_z = 1$  cm,  $z_z = p/3, 2p/3, p$ , in 0,5 cm pod gladino), za tri variante dotoka  $Q_I$  (izhodiščna varianta, maksimalni  $Q_I$  ob pogoju neoviranega  $Q_b$  in minimalni  $Q_I$  ob pogoju zadostne prelivne višine) in tri variante spodnje vode  $h_2$  (izhodiščna varianta, maksimalna  $h_2$  ob pogoju neoviranega  $Q_b$  in minimalna  $h_2$  ob pogoju zadostne prelivne višine),
- natančno umerjanje vizualizacijske metode (nastavitve numeričnega izračuna vektorskega polja hitrosti),
- upoštevane so korekcije velikosti pik (nastavitve "pixel size") za vse filme.

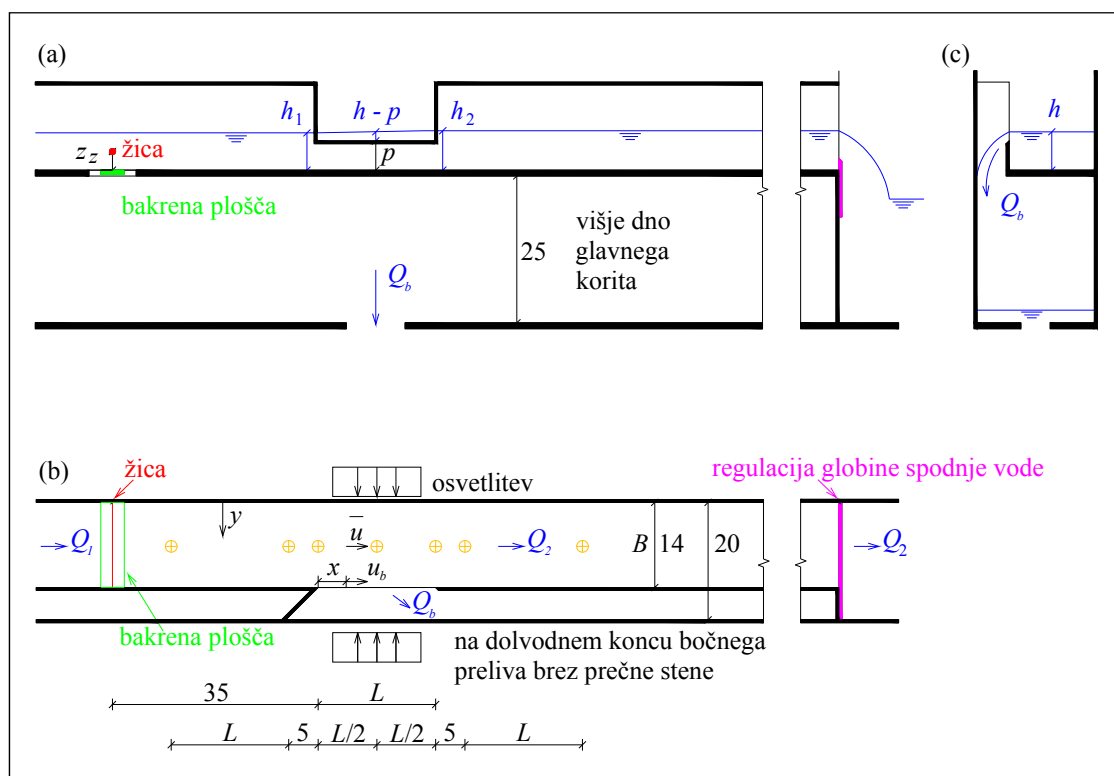
Dodatne izboljšave so bile:

- izboljšana osvetlitev (nova, prilagodljivejša stojala; ob prelivu osvetlitev pod rahlim naklonom),
- dno glavnega korita in stena bočnega preliva preplepljena s črno samolepilno folijo (izrezane reže na merjeni globini),

- dodajanje soli za izboljšanje električne prevodnosti vode,
- optimizirano nastavljanje pozicije žičke.

Navedene izboljšave so bile dosežene ob sorazmerno majhnih spremembah fizičnega modela. V primerjavi s preliminarno konfiguracijo so bile izvedene naslednje spremembe (Slika 14):

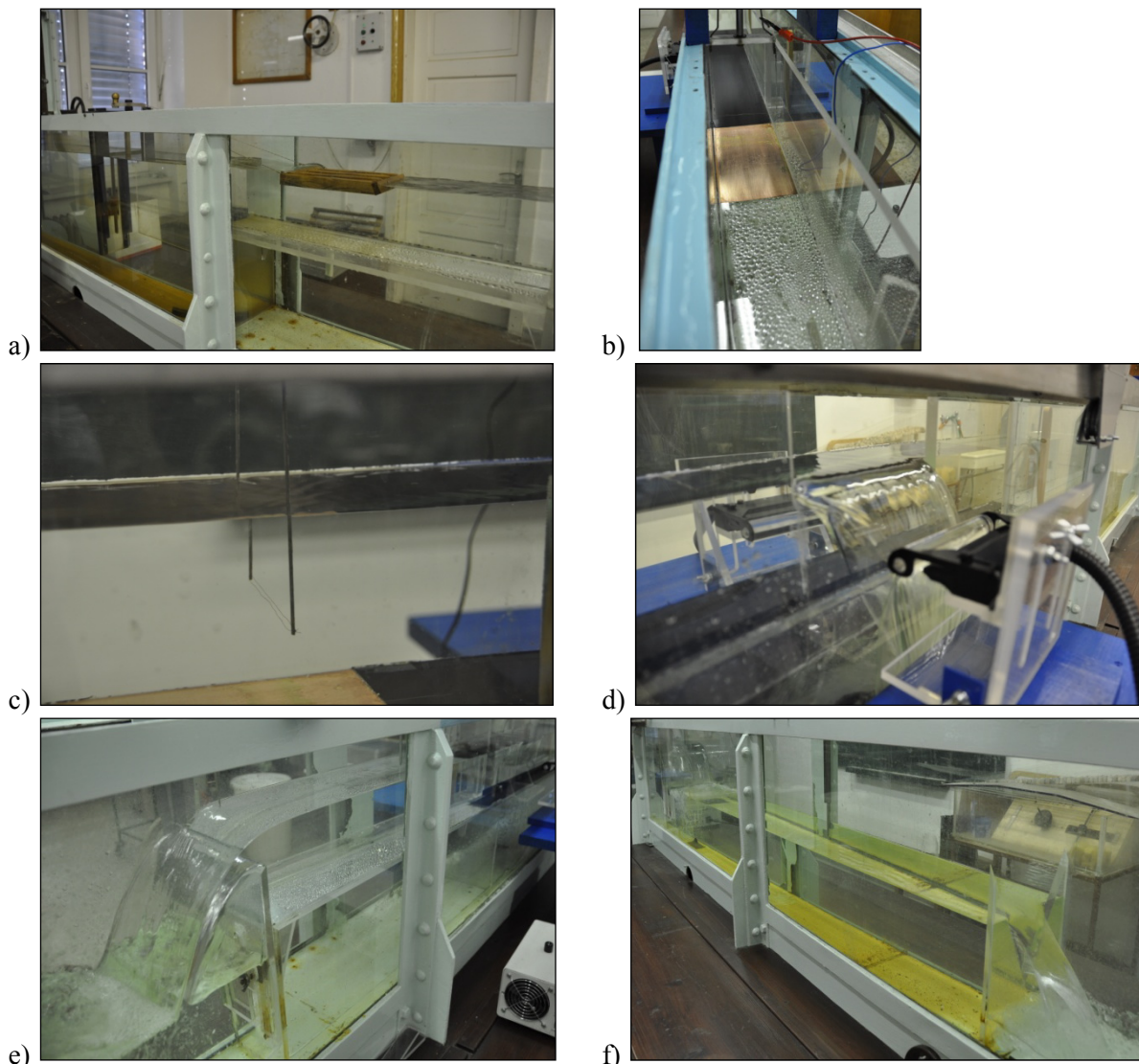
- odstranjena poševna ločilna stena na dolvodnem koncu bočnega preliva (gorvodna ločilna stena ima funkcijo bočne opore konstrukcije in ne vpliva na pretočne razmere),
- širina korita je bila zmanjšana za 0,5 cm, da bi se pridobilo dovolj prostora za nepotopljen bočni odliv  $Q_b$ ,
- različne variante geometrij bočnih prelivov so bile izrezane iz posameznih pleksi plošč, ki so se prilegale v ta namen izvedenemu utoru in se jih je enostavno menjavalo (za popolno tesnenje je bil rob take plošče oblepljen z lepilnim trakom),
- dno glavnega korita je bilo dodatno dvignjeno od dna steklenega žleba, da je bil odtok  $Q_2$  preko dolvodnega jezua nepotopljen tudi pri večjih prelivnih višinah toka preko spodnjega merilnega trikotnega preliva.



Slika 14: Model KMTe – končni: (a) tloris, (b) vzdolžni prerez, (c) prečni prerez na  $x/L = 0,5$ . Dimenzije v cm.

Figure 14: Model KMTe – final: (a) plan, (b) longitudinal section, (c) cross section at  $x/L = 0,5$ . Dimensions in cm.

Glavne značilnosti tipične variante bočnega preliva KMTe – končni prikazujejo fotografije na sliki 15. Merilna oprema je predstavljena kasneje, v točki 4.3.6.



Slika 15: Tipična varianta bočnega preliva KMTe – končni: (a) umirjevalni natočni del steklenega žleba, (b) bakrena plošča in merjeno območje bočnega preliva (pogled z gorvodne strani), (c) žička v toku (na dveh vertikalnih nosilcih), (d) tok preko bočnega preliva, (e) ostrorobi pravokotni jez za uravnavanje dolvodnega vodostaja, (f) ostrorobi trikotni merilni preliv za merjenje odtoka  $Q_2$

Figure 15: Typical variant of side weir KMTe – final: (a) stilling section at the upstream reach of the glass flume, (b) copper plate and measuring section, (c) wire on two vertical holders, (d) flow over side weir, (e) sharp-crested rectangular weir for tailwater regulation, (f) sharp-crested V-notch weir for measurement of outflow  $Q_2$

Tabelarični pregled ene izmed obravnavanih variant geometrije in izmerjenih glavnih hidravličnih parametrov v območju bočnih prelivov KMTe – končni je v preglednici 4. Podobna preglednica, ki vsebuje podatke za vse eksperimente KMTe – končni, je v prilogi A.

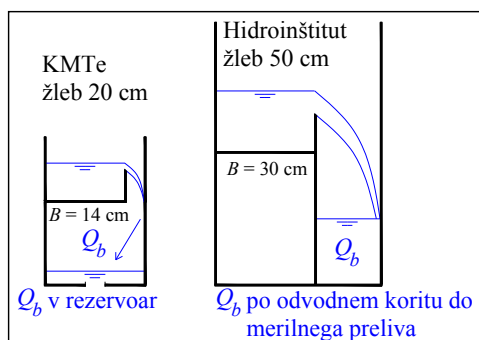
Preglednica 4: Glavni eksperimentalni parametri tipične variante KMTe – končni  
Table 4: Main experimental parameters for a typical variant of KMTe – final

Bočni preliv	Oznaka variante	$Q_1$ [l/s]	$z_{jez}$ [cm]	$Q_b$ [l/s]	$Q_b / Q_1$ [-]	$Fr_1$ [-]	$z_{jez} / p$ [-]	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$h - p$ [cm]
L = 20 cm, p = 10 cm	Q-	5,29	6,41	1,05	0,20	0,29	0,64	11,98	12,20	2,06
	Q-*	5,69	6,41	1,14	0,20	0,30	0,64	12,21	12,43	2,31
	var 0	6,01	6,41	1,29	0,22	0,31	0,64	12,44	12,60	2,45
	Q+*	6,34	6,41	1,39	0,22	0,33	0,64	12,42	12,78	2,61
	Q+	6,62	6,41	1,52	0,23	0,34	0,64	12,59	12,89	2,73
	Z-	6,02	5,80	0,98	0,16	0,33	0,58	11,96	12,26	2,13
	Z-*	6,02	6,11	1,14	0,19	0,32	0,61	12,15	12,44	2,30
	Z+*	6,03	6,81	1,50	0,25	0,31	0,68	12,57	12,85	2,70
	Z+	6,01	7,15	1,64	0,27	0,30	0,72	12,74	13,05	2,89

V zgornji preglednici je prelivna višina ( $h - p$ ) [cm] merjena na sredini dolžine preliva, tj. v prerezu  $x/L = 0,5$ . Izhodiščna varianta je označena z oznako "var 0". Iz oznak ostalih variant je moč razbrati, ali ima varianta glede na izhodiščno varianto povečan (+) ali zmanjšan (-) dotok, oz. višjo ali nižjo višino jezua za uravnavanje spodnje vode. V nadaljevanju obravnavana hitrostna polja so bila izmerjena za variante z oznakami: var 0, Q-, Q+, Z- in Z+, ne pa tudi za vmesne variante (z oznako \*), ki so bolj podobne izhodiščni. Pri določanju fenomenološke enačbe za koeficient preliva  $C_d$  (o tem več v rezultatih) so bile upoštevane opravljene meritve za vse variante.

#### 4.3.5 Model 5: Ostrorobi bočni preliv – kontrola v širšem koritu Hidroinštituta

V tej fazi raziskav se je v širšem koritu, pri večjih geometrijah bočnih prelivov in večjih pretokih, preveril morebitni vpliv sorazmerno ozkega korita na rezultate, pridobljene na "Modelu 4" (tam ima korito širino  $B = 14$  cm). Za razliko od eksperimentov v ožjem koritu KMTe, kjer je bil bočni odtok  $Q_b$  speljan neposredno v glavni rezervoar (tj. brez kanala za odvajanje  $Q_b$ ), je bil model ostrorobega bočnega preliva na Hidroinštitutu zgrajen tako, da je vzporedno z glavnim koritom širine 30 cm potekal odtočni kanal širine 19 cm, kot prikazuje naslednja shema (Slika 16).

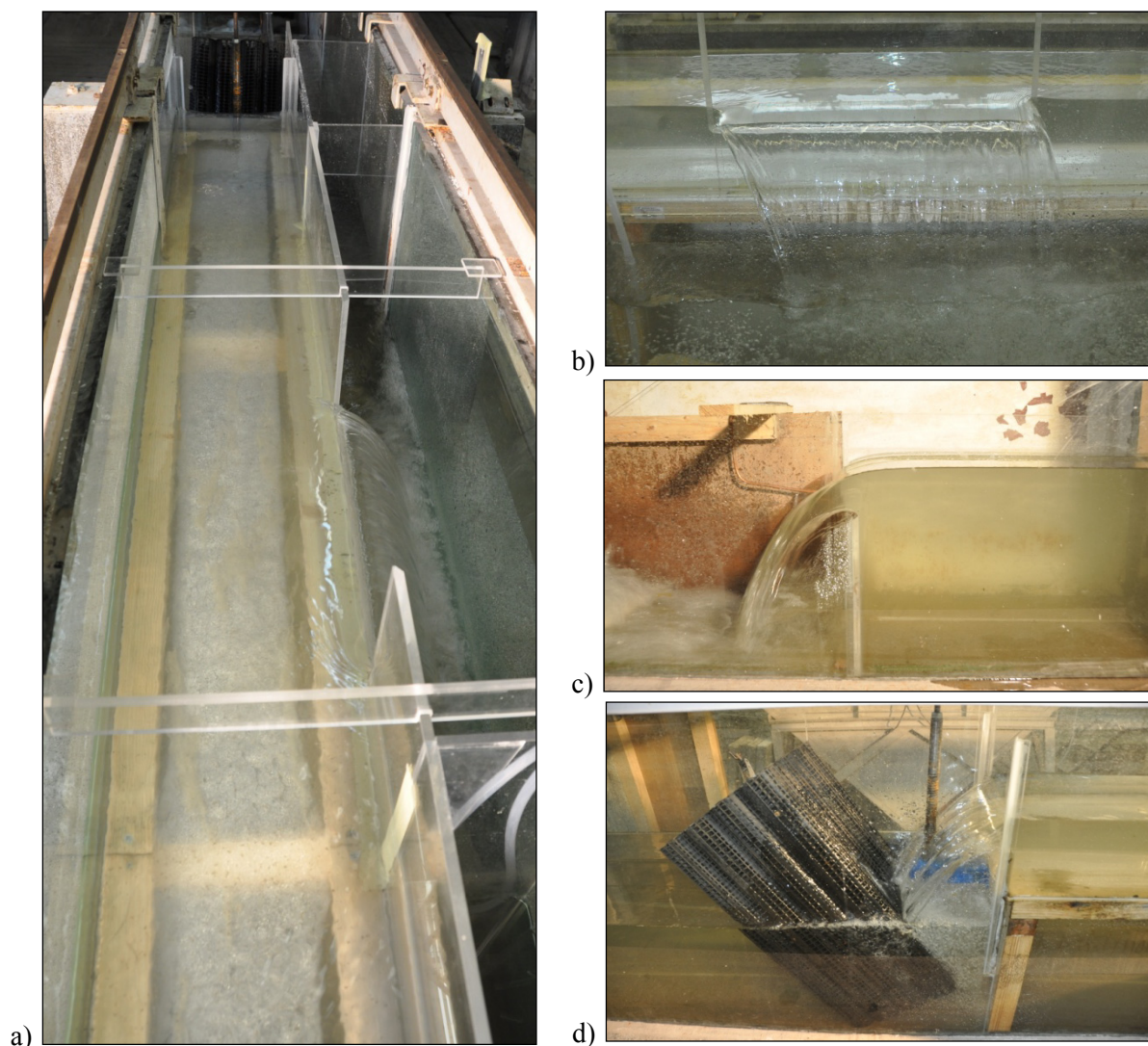


Slika 16: Odvajanje bočnega odtoka  $Q_b$  na prelivih v ožjem in širšem koritu  
Figure 16: Side weir overflow  $Q_b$  in narrower and wider channel

Globina spodnje vode je bila tudi tokrat uravnavana z višinsko nastavljivim ostrorobim pravokotnim jezom. Dotok vode je zagotavljala nizekotlačna črpalka 50 l/s, voda pa je do bočnega preliva pritekala preko glavnega umirjevalnika, merilnega preliva, cevovoda dolžine približno 30 m in umirjevalnika laboratorijskega žleba. Dotok  $Q_1$  se je reguliral z zasunom in meril na trikotnem  $90^\circ$  prelivu, na podlagi tabelarično podane pretočne krivulje preliva. Odtok po glavnem koritu  $Q_2$  in bočni odtok  $Q_b$  sta bila merjena na pravokotnih ostrorobih prelivih polne širine (tj. brez bočne kontrakcije), pri čemer so bile prelivne višine v predpisanem merilnem profilu merjene s pomočjo piezometrov. V natočnem delu

obeh merilnih prelivov so bili za zagotavljanje enakomernih natočnih hitrosti in umirjene gladine nameščene posebne plastične perforirane cevi za umirjanje toka (Slika 17d). Oba merilna preliva sta bila opremljena še z bakrenima cevkama, s katerima je bilo zagotovljeno ustrezno ozračenje curka za vse merjene  $Q_2$  in  $Q_b$ . Omenjena postavitev prelivov (z umirjevalniki toka in cevkama za ozračenje) je še sprejemljiva po standardu ISO 1438:2008 in je optimum, ki smo ga lahko dosegli glede na zahtevano konfiguracijo modela, ciljan razpon merjenih parametrov in razpoložljive kapacitete laboratorija.

Z drugim ostnim merilom so bile izmerjene tudi gladine na območju bočnega preliva, in sicer vzdolž osi glavnega korita in vzdolž krone bočnega preliva. Tudi v tem primeru je bila natančnost odčitkov z ostnimi merili enaka 0,1 mm.



Slika 17: Večji model bočnega preliva: (a) glavni in odtočni kanal, (b) razmere vzdolž krone bočnega preliva, (c) ozračen preliv za merjenje  $Q_2$  (podobno tudi za  $Q_b$ , v ozadju), (d) umirjevalniki toka pod jezom za uravnavanje spodnje vode

Figure 17: Larger model of the side weir: (a) main and lateral channel, (b) conditions along the side weir's crest, (c) aerated weir for measurement of  $Q_2$  (similarly for  $Q_b$ , in the background), (d) flow straighteners downstream of the weir for tailwater regulation

Za različne dotoke in globine spodnje vode se je izkazalo, da vsota  $Q_2$  in  $Q_b$ , izračunanih po standardu ISO 1438:2008 na podlagi merjenih prelivnih višin, znaša v povprečju 97 % vrednosti dotoka  $Q_1$ ,



odčitane na sistemu Hidroinštututa iz obstoječih tabel. Slednje je bilo namenjeno odpravi morebitne grobe napake pri meritvah.

Podrobnosti izračuna pretokov so predstavljene v nadaljevanju te točke. Izračun pretokov preko ostrorobnih pravokotnih merilnih prelivov  $Q_2$  in  $Q_b$  je potekal po enačbah iz standarda ISO 1438:2008. Za nepotopljene prelive brez bočne kontrakcije standard priporoča uporabo Rehbockove enačbe za neovirani pretok preko preliva polne širine (ang. "modular discharge equation for full-width weirs"). Preliv  $Q_b$  sicer ne izpolnjuje predpisane širine curka  $b$  pri maksimalni prelivni višini ( $b \geq 30$  cm), toda za take primere standard dopušča uporabo Kindsvater-Carter enačbe, ki po standardu velja za vsa razmerja  $b/B$ , kjer je  $B$  širina korita,  $b$  pa širina preliva:

$$Q = 2/3 \cdot C_d \cdot \sqrt{2g} \cdot b_e \cdot h_e^{3/2} \quad (75)$$

kjer so:

$C_d$	koeficient pretoka,
$b_e$	efektivna širina,
$h_e$	efektivna prelivna višina.

Efektivna širina in efektivna prelivna višina sta definirani kot  $b_e = b + k_b$  in  $h_e = h + k_h$ , kjer sta  $k_b$  in  $k_h$  eksperimentalno določena veličini, ki kompenzirata skupni vpliv viskoznosti in površinske napetosti. Za  $b/B = 1$  standard navaja  $k_b = -0,9$  mm in  $k_h = 1$  mm. Pretočni koeficient  $C_d$  je podan kot funkcija razmerij širin  $b/B$  in višin  $h/p$ , in sicer za  $b/B = 1$  takole:

$$C_d = 0,602 + 0,075 \cdot h/p \quad (76)$$

Standard predpisuje naslednje omejitve za uporabo Kindsvater-Carter formule:

- $h/p \leq 2,5$ ,
- $h \geq 0,03$  m,
- $b \geq 0,15$  m,
- $p \geq 0,10$  m,
- $(B - b)/2 = 0$  (preliv brez kontrakcije) ali  $(B - b)/2 \geq 0,10$  m (preliv z bočno kontrakcijo).

Uporabljeni preliv za merjenje  $Q_b$  vse te omejitve izpolnjuje, zato so pretoki izmerjeni z merilno negotovostjo  $\pm 1$  % skladno s standardom.

Preliv za merjenje  $Q_2$  je zadosti širok, da lahko uporabimo Rehbockovo formulo:

$$Q = 2/3 \cdot C_d \sqrt{2g} \cdot b \cdot h_{1e}^{3/2} \quad (77)$$

v kateri je:

$$C_d = 0,602 + 0,083 \cdot h_1/p \quad (78)$$

Efektivna višina  $h_{1e}$  je podana kot  $h_{1e} = h_1 + 0,0012$ , pri čemer je  $h_1$  prelivna višina v merilnem profilu. Standard predpisuje naslednje omejitve za uporabo Rehbockove formule:

- $h_1/p \leq 4$ ,
- $h_1$  mora biti med 0,03 in 1,0 m,
- $b \geq 0,30$  m,
- $p \geq 0,06$  m.

Razvidno je, da preliv  $Q_2$  izpolnjuje te zahteve.

Pomembno je poudariti, da je v dodatku (Technical Corrigendum 1) standarda ISO 1438:2008 navedeno naslednje: Če je maksimalna merjena prelivna višina omejena na  $(2/3)p$ , se za vse tipe

prelivov lahko uporabi umirjevalnike toka, da se zmanjša efektivna dolžina natočnega dela korita na vrednosti  $B + 3h_{max}$  za trikotne in pravokotne prelive ter na vrednost  $B + 5h_{max}$  za prelive brez bočne kontrakcije.

V našem primeru je višina praga pravokotnih merilnih prelivov enaka  $p = 24$  cm, prelivne višine pa ne presegajo  $2/3p = 16$  cm (ki bi npr. v primeru preliva  $Q_2$  pomenili pretok 37,6 l/s). Odtod sledi, da so po standardu umirjevalniki toka lahko nameščeni najmanj  $30 \text{ cm} + 5 \cdot 16 \text{ cm} = 110$  cm gorvodno od krone omenjenih prelivov, in to je bilo pri izvedbi upoštevano.

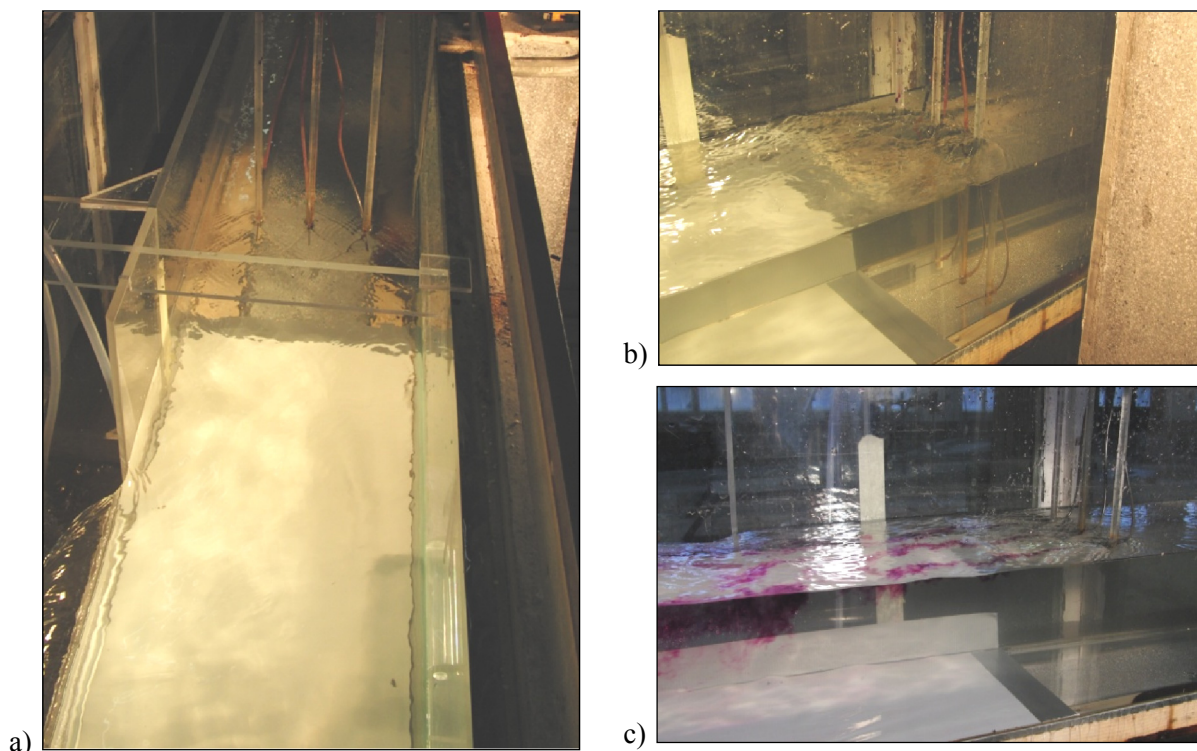
Tabelarni pregled eksperimentalnih parametrov tipične variante bočnih prelivov v širšem koritu je podan v preglednici 5, razširjena preglednica, ki podaja podatke o vseh merjenih variantah v širšem koritu pa je v prilogi A.

Preglednica 5: Glavni eksperimentalni parametri tipične variante bočnega preliva v širšem koritu  
Table 5: Main experimental parameters for a typical variant in wider main channel

Preliv	Oznaka variante	$Q_1$ [l/s]	$z_{jez}$ [cm]	$Q_b$ [l/s]	$Q_b / Q_1$ [-]	$Fr_1$ [-]	$z_{jez} / p$ [-]	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$h - p$ [cm]
$L = 75 \text{ cm}, p = 14 \text{ cm}$	Q28_a	27,90	8,15	10,01	0,36	0,41	0,58	17,41	18,30	3,73
	Q28_b	27,90	10,87	14,30	0,51	0,38	0,77	18,42	19,41	4,84
	Q28_c	27,90	12,73	16,96	0,61	0,36	0,90	19,05	19,93	5,46
	Q25_a	25,00	10,02	11,49	0,46	0,36	0,71	17,74	18,62	4,07
	Q25_b	25,20	12,85	15,89	0,63	0,33	0,91	18,87	19,52	5,10
	Q25_c	25,18	15,19	19,01	0,76	0,31	1,08	19,52	20,20	5,81
	Q22_a	22,00	10,12	9,95	0,45	0,32	0,72	17,46	18,13	3,67
	Q22_b	22,20	13,00	14,14	0,64	0,30	0,92	18,50	19,09	4,74
	Q22_c	22,10	14,88	16,35	0,74	0,28	1,06	19,04	19,43	5,23

V zgornji preglednici oznaka variante pomeni dotok [l/s] in delež bočnega odtoka, pri čemer je najmanjše razmerje  $Q_b/Q_1$  označeno z "a", največje pa z oznako "c". V primerjavi s preglednico 4 je iz zgornje preglednice razvidno, da so bile v širšem koritu raziskane variante z večjimi dotoki, večjimi deleži bočnega prelivanja in večjimi razmerji  $z_{jez}/p$ .

Da bi preverili izmerjena hitrostna polja bočnih prelivov v ožjem koritu (varianete KMTe) so bila hitrostna polja izmerjena z vizualizacijsko metodo tudi v širšem koritu za varianto  $L = 50$  cm,  $p = 12$  cm, Q20\_b. Zaradi izrazito večjih pretokov, širšega glavnega korita in prešibkega vira enosmerne napetosti (tudi zaradi slabše prevodnosti vode, ki ji nismo mogli dodajati soli) v raziskavi ostrorobih bočnih prelivov na Hidroinštitutu hitrostnih polj nismo merili s snemanjem premikanja vodikovih mehurčkov, pač pa je bila kot barvilo uporabljena vodna raztopina kalijevega permanganata. Barvilo je bilo dozirano skozi tri injekcijske igle, s stalnim dotokom barvila, na konstantni razdalji 30 cm gorvodno od bočnega preliva, kot kaže slika 18:



Slika 18: Injiciranje barvila gorvodno od bočnega preliva: (a) pogled protitočno, (b) injekcije na dnu, (c) barvilo potuje v (sorazmerno) tankem sloju. Na dnu glavnega korita bela folija.  
Figure 18: Injection of dye upstream of the side weir: (a) view upstream, (b) needles over main channel bed, (c) dye flows in (relative) thin layer. White surface of main channel bed.

Hitrostna polja so bila izmerjena v petih horizontalnih ravninah na višinah  $z_z$  od dna glavnega korita:  $z_z = 1$  cm,  $z_z = p/3$ ,  $z_z = 2p/3$ ,  $z_z = p$  in  $z_z = h$ . Za zagotavljanje boljšega kontrasta je bilo dno korita vzdolž bočnega preliva po celotni širini oblepljeno z belo folijo. Barvilo je potovalo v sprejemljivo tankem sloju približno do  $x/L = 0,5$ . Za lokacije  $x/L > 0,5$  so izmerjena hitrostna polja nekoliko bolj poprečena zaradi disperzije barvila po širšem sloju, a to nima prevelikega vpliva pri določitvi glavnih značilnosti tamkajšnje tokovne slike. Pri daljših bočnih prelivih (varianete  $L = 75$  cm in  $L = 100$  cm), kjer nastopajo večji dotoki (do 35 l/s) je bila disperzija barvila že izrazitejša, vpliv potopljenih nosilcev cevok in igel na tokovno sliko pa tudi večji, zato za te variante prelivov niso bile opravljene meritve hitrostnih polj.

#### 4.3.6 Merilna tehnika - instrumenti

V tej točki so predstavljene glavne značilnosti merilne opreme, uporabljene na modelih 1 do 5. V vseh primerih so bile, poleg ostalih meritev, ključnega pomena meritve višin gladin, izvedene z običajnimi ostnimi merili. Le-ta so bila nameščena na premičnih nosilcih nad tokom ali pa nad cilindri piezometrov. V prvem primeru je zaradi valovanja gladine (tipično okoli  $\pm 1$  mm) treba narediti več odčitkov (vsaj tri), v drugem primeru pa je nihanje gladine manjše ( $\pm 0,5$  mm) in je vsak odčitek bližje pravi vrednosti. Natančnost odčitavanj je v obeh primerih enaka 0,1 mm.

##### 4.3.6.1 Merilna oprema na modelu vtočnega objekta

Za merjenje pretokov je bil uporabljen trikotni merilni preliv in elektromagnetni merilnik pretoka. Lokalne hitrosti toka so bile izmerjene z 2D ADV sondo, ki ima naslednje glavne tehnične karakteristike (SonTek/YSI, 2011):

- frekvenca vzorčenja: 0,1 do 25 Hz,
- volumen vzorčenja:  $0,25 \text{ cm}^3$ ,
- razdalja do volumna vzorčenja: 10 cm,
- ločljivost: 0,01 cm/s,
- prednastavljena hitrostna območja: do 3,10, 30, 100, oz. do 250 cm/s,
- natančnost: 1 % merjene hitrosti, oz. 0,25 cm/s.

#### 4.3.6.2 Merilna oprema na modelu visokovodnega razbremenilnega objekta

Za merjenje dotoka na model je bila uporabljena merilna zaslonka, nameščena na dotočni cevi premera 250 mm, za merjenje bočnega odtoka pa trikotni merilni preliv z vršnim kotom  $\alpha = 90^\circ$ . Posebnost tega modela je bila uporaba merilnega mostu, pri katerem se po dveh vzdolžnih in prečnem nosilcu premika računalniško krmiljen merilni nosilec z ultrazvočnim in laserskim merilnikom razdalj. Na nosilec se lahko opsijsko priključi tudi hitrostno sondo ADV, kot je prikazano na sliki 12b. Ultrazvočni merilnik razdalj Honeywell 947 se uporablja za določanje višin gladin, laserski merilnik razdalj Welotec OWLF 4060 pa za določanje višin suhega dna. Značilnosti odjemnikov so naslednje:

##### a) UZ merilnik razdalj

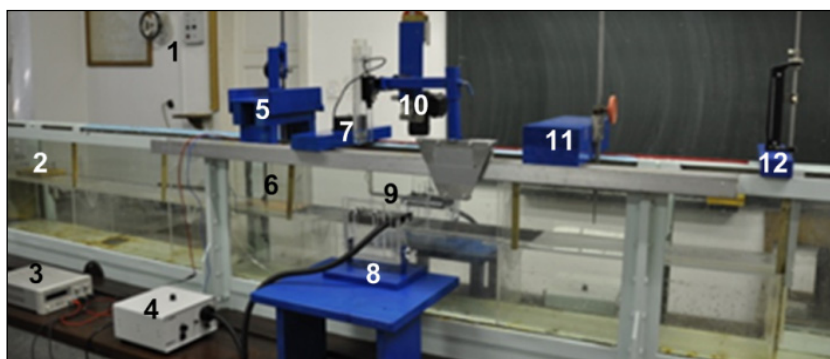
- merilno območje: 100 do 600 mm,
- frekvenca oscilacije: 300 kHz,
- odzivni čas: 50 ms,
- analogni izhod: 0 do 10 V (DC),
- kemično odporna konstrukcija, kompenzacija vpliva temperature.

##### b) laserski merilnik razdalj:

- izvor svetlobe: rdeč laser, 675 nm,
- merilno območje: 100 do 600 mm,
- ločljivost: 0,03 do 0,6 mm,
- odzivni čas: 0,9 ms.

#### 4.3.6.3 Merilna oprema na modelih ostrorobega bočnega preliva KMTe

Bočni prelive KMTe so bili opremljeni z merilno opremo, ki je označena na sliki 19:



Slika 19: Merilna oprema na modelu KMTe  
Figure 19: Measuring equipment at model KMTe

Na zgornji sliki številke označujejo naslednje: (1) meritev dotoka - trikotni preliv, (2) umirjevalni del steklenega korita, (3) nastavljivi vir enosmerne napetosti, (4) svetlobni vir z nastavljivo jakostjo, (5) višinsko nastavljanje pozicije žičke, (6) žička na višini  $z_z$ , (7) laser, uporabljen za fotografiranje vzdolžnih prevez gladine, (8) nosilec z optičnim kablom in ravninsko lečo z nastavljivim ostrenjem,

(9) krona bočnega preliva, (10) digitalna kamera, (11) ostno merilo na tračnicah za merjenje globine toka, (12) ostno merilo za merjenje višine dolvodnega jezua  $z_{jez}$ .

Vsi kosi merilne opreme so premeščani po potrebi na ustrezne merilne lokacije (prereze).

Bistvene karakteristike navedene elektronske opreme so sledeče:

- vir enosmerne napetosti: izhodna napetost 2 x 27 V,
- laser Roithner Lasertechnik: zelena svetloba, izvedba "solid state", maksimalna izhodna moč 100 mW pri 530 – 532 nm,
- digitalna kamera Casio EX-F1: ločljivost pri snemanju 300 fps znaša 512 x 384 pik. (Casio, 2008).

#### 4.3.6.4 Merilna oprema na modelih ostrorobega bočnega preliva v Hidroinštitutu

Pri teh variantah je bilo uporabljeno barvilo, ne pa elektroliza, zato je bilo uporabljene manj merilne opreme, in sicer: nosilec z injekcijskimi iglami za vnos barvila (Slika 19), osvetlitev (reflektorji 500W), ravninske leče in hitra kamera, pritrjena na posebnem nosilcu.

#### 4.3.7 Merilna tehnika – programska oprema

Eksperimenti so bili v pretežni meri računalniško podprti. V različnih fazah raziskav je bila uporabljena naslednja programska oprema:

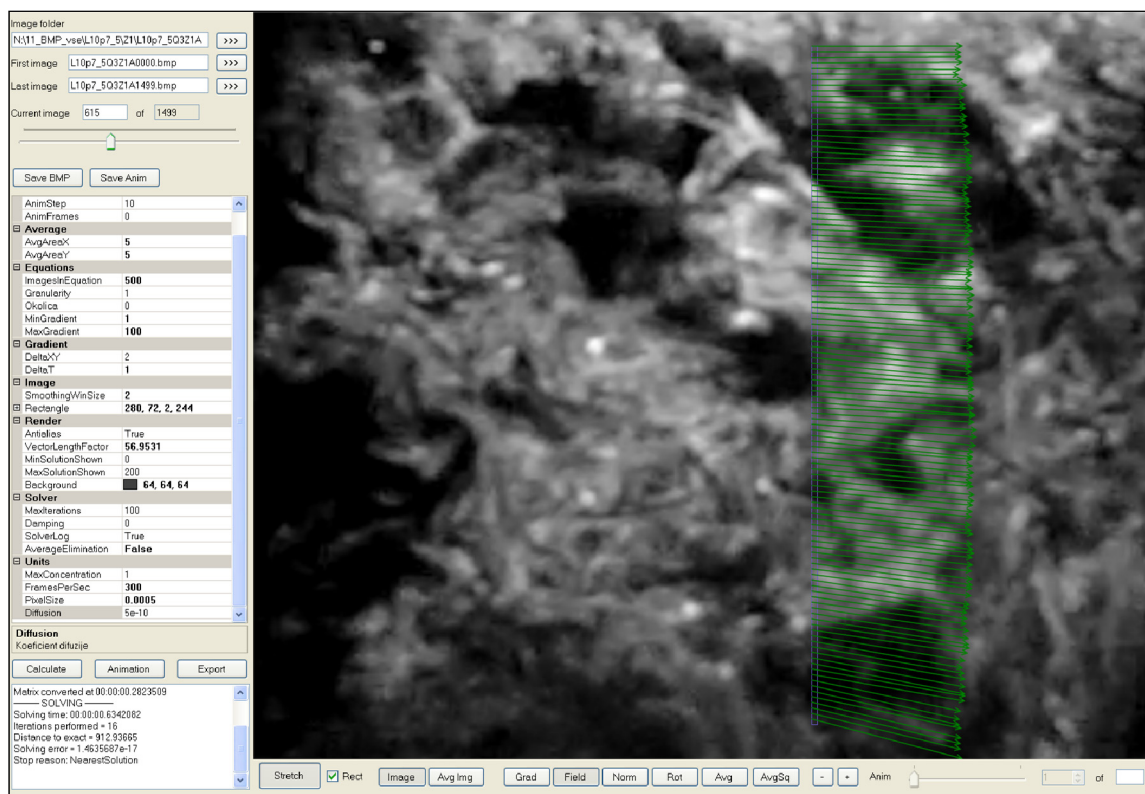
- LabView 7.0 - za krmiljenje merilnega mostu,
- Bink RAD Video Tools (free-ware) - za pretvorbo filmov v posamezne posnetke,
- Matlab za pretvorbo posnetkov v črno bele slike, za račun in prikaz hitrostnih polj ter za določitev vzdolžnega poteka gladin.

LabView je razširjeno programsko orodje, ki temelji na grafičnem objektnem programiranju in je uspešno uporabljeno v zelo številnih aplikacijah iz industrije, tehnike in raziskovalnega področja. V disertaciji je bil LabView uporabljen le kot uporabniški vmesnik za upravljanje z merilnim mostom, krmiljenje katerega so za potrebe Hidroinštituta sprogramirali leta 2006 na Fakulteti za strojništvo Univerze v Mariboru, zato o tem programskem paketu ne podajam podrobnosti.

Ključnega pomena za določitev hitrostnih polj z uporabo vizualizacijske metode je na Matlab-u temelječe programsko orodje (Bajcar in sod., 2009), ki se še izboljšuje in bo dopolnjeno tudi s predlogi za izboljšave, izhajajočimi iz te disertacije in dela v okviru tekočega raziskovalnega projekta ARRS. Omenjeno orodje omogoča numerični izračun 2D vektorskega polja hitrosti, kot je opisano v točki 2.2.4. Kot primer je podan pregled glavnih nastavitev, ki jih uporabnik lahko prilagaja ob vsakokratnem zagonu numeričnega izračuna (Slika 20).

Na sliki 20 so v zgornjem levem vogalu podatki o uporabljenem zaporedju posnetkov, v spodnjem levem vogalu pa podatki o poteku računa. Vmes je okno za izbiro različnih parametrov, od katerih so glavni naslednji:

- dolžina sekvence zaporednih posnetkov,
- velikost okna na posnetkih za računanje hitrosti,
- gostota mreže (število vozlišč), za katero bodo izračunane vrednosti hitrostnega polja,
- uporabljena frekvenca snemanja [slik/s],
- velikost piksla [m].



Slika 20: Uporabniški vmesnik aplikacije za izračun vektorskega polja hitrosti  
Figure 20: User interface of application for calculation of vector velocity field

Izračunano vektorsko polje hitrosti (tj. rezultat numeričnega reševanja sistema enačb), prikazano v glavnem oknu vmesnika, je seveda odvisno od izbire vrednosti vsakega posameznega parametra, zato je ključnega pomena, da se to orodje – podobno kot vse merilne instrumente – ustrezno umeri.

Poudariti pa velja, da to ne pomeni, da je številne parametre vizualizacijske metode treba vedno znova prilagajati posameznemu obravnavanemu problemu! Metoda za različne tokove in polutante v splošnem daje zanesljive rezultate, če je opazovano okno tako veliko, da med dvema zaporednima slikama v oknu ne pride do izgube informacij (velikost okna mora biti večja od premika opazovane strukture na dveh zaporednih posnetkih). Podrobnejšo študijo vpliva nastavitve vizualizacijske metode je opravil Prhavic (2010). V okviru disertacije je bila za račun hitrostnih polj globlje v toku dosledno upoštevana korigirana velikost pike zaradi vpliva projekcije posnetkov.

#### 4.4 Umerjanje

V tej točki je opisano, kako je potekalo umerjanje instrumentov in določanje ustreznih nastavitve vizualizacijske metode.

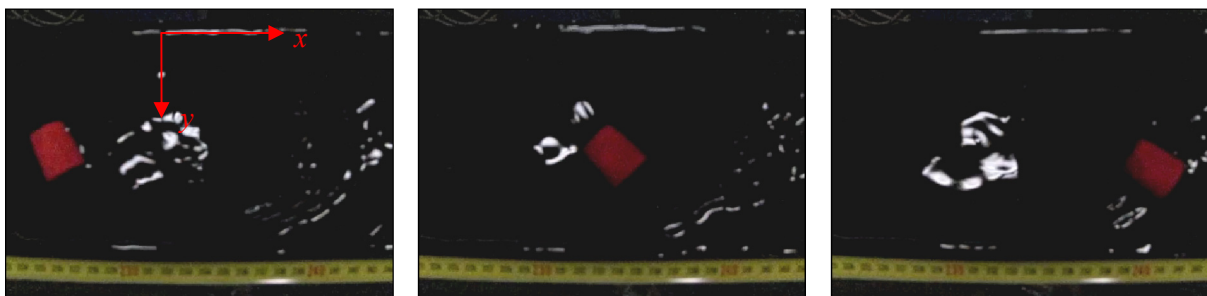
##### 4.4.1 Umerjanje instrumentov

Uporabljena akustična hitrostna sonda ADV je bila tovarniško umerjena in teh nastavitve nismo spreminjali. Ultrazvočni (UZ) in laserski merilnik razdalj na merilnem mostu sem umeril s prilagajanjem enačbe za izvednotenje razdalje iz njunega analognega izhodnega signala. UZ merilnik je bil umerjen na znano razdaljo do stoječe gladine (v vedru), laserski merilnik pa na znano razdaljo do suhega, gladkega in ravnega dna. UZ merilnik je kljub umerjanju celo za stoječo gladino dajal izmerke z odstopanji do  $\pm 5$  mm, kar je za obravnavo tokovnih razmer na bočnem prelivu, kjer je npr. vzdolž  $L$

= 100 cm dolge krone preliva razlika v nivoju gladine  $h_2 - h_1$  enaka približno 1 cm, neprimerno, zato UZ merilnik nazadnje ni bil uporabljen.

#### 4.4.2 Določanje nastavitev vizualizacijske metode

Za določanje nastavitev vizualizacijske metode sem uporabil posnetke premikanja plovcev različnih oblik in materialov, npr. tanek plastičen krog (podoben tistemu na sliki 12b) ali prirezan valj iz plute (Slika 21).



Slika 21: Snemanje potovanja plovca. Prikazana je vsaka 50. slika filma.

Figure 21: Recording of float's trajectory. Figure shows every 50th image of the film.

Umeritveni odseki toka so bili različni. Iz izmerjenih razdalj in znanega časa (št. posnetkov v filmu in frekvenca snemanja) se določi vzdolžno in prečno komponento poprečne hitrosti potovanja plovca, nato pa se nastavitve vizualizacijske metode ponastavi, da se doseže enako izračunano poprečno vrednost. Za določitev hitrostnih polj na območju bočnih prelivov KMTe je bil uporabljen umeritveni test na geometriji L25\_p12, pri izhodiščni varianti dotoka in višine dolvodnega jezua. Uporabljen je bil plutovinast prirezan zamašek, snemal pa sem površinske hitrosti v odseku gorvodno od bočnega preliva. V nadaljevanju je podan kratek izračun.

##### a) Izračun hitrosti plovca:

- Iz posnetkov odčitam pozicijo vodilnega vogala plovca :  
Št. posnetka 820/1409:  $(X,Y) = (137,197)$  [piksel]  
Št. posnetka 920/1409:  $(X,Y) = (466,207)$  [piksel]
- Čas: med odčitkoma lokacije je poteklo 100 slik. Pri frekvenci 300 slik/s to pomeni  $t = 1/3$  s.
- Razdalje: Iz posnetka metra, nameščenega tik nad gladino, razberem, da 10 cm razdalja pomeni 245 pik. Torej je velikost ene pike 0,000408 m. Plovec se je v opazovanem odseku premaknil za 329 pik v vzdolžni smeri in 10 pik v prečni smeri.
- Poprečna hitrost:  $u_{plovec} = 329 \cdot 0,000408 \text{ m} : (1/3) \text{ s} = 0,403 \text{ m/s} = 40,3 \text{ cm/s}$   
 $v_{plovec} = 10 \cdot 0,000408 \text{ m} : (1/3) \text{ s} = 0,012 \text{ m/s} = 1,2 \text{ cm/s}$

b) Pripadajoči rezultati vizualizacijske metode so podani v preglednici 6. Navedene vrednosti so poprečne hitrosti v posameznih zaporedjih 500 slik (tj. izbrana izhodiščna slika in predhodnih ter kasnejših 250 slik) znotraj 5 s trajajočega filma, posnetega s frekvenco 300 posnetkov na sekundo.

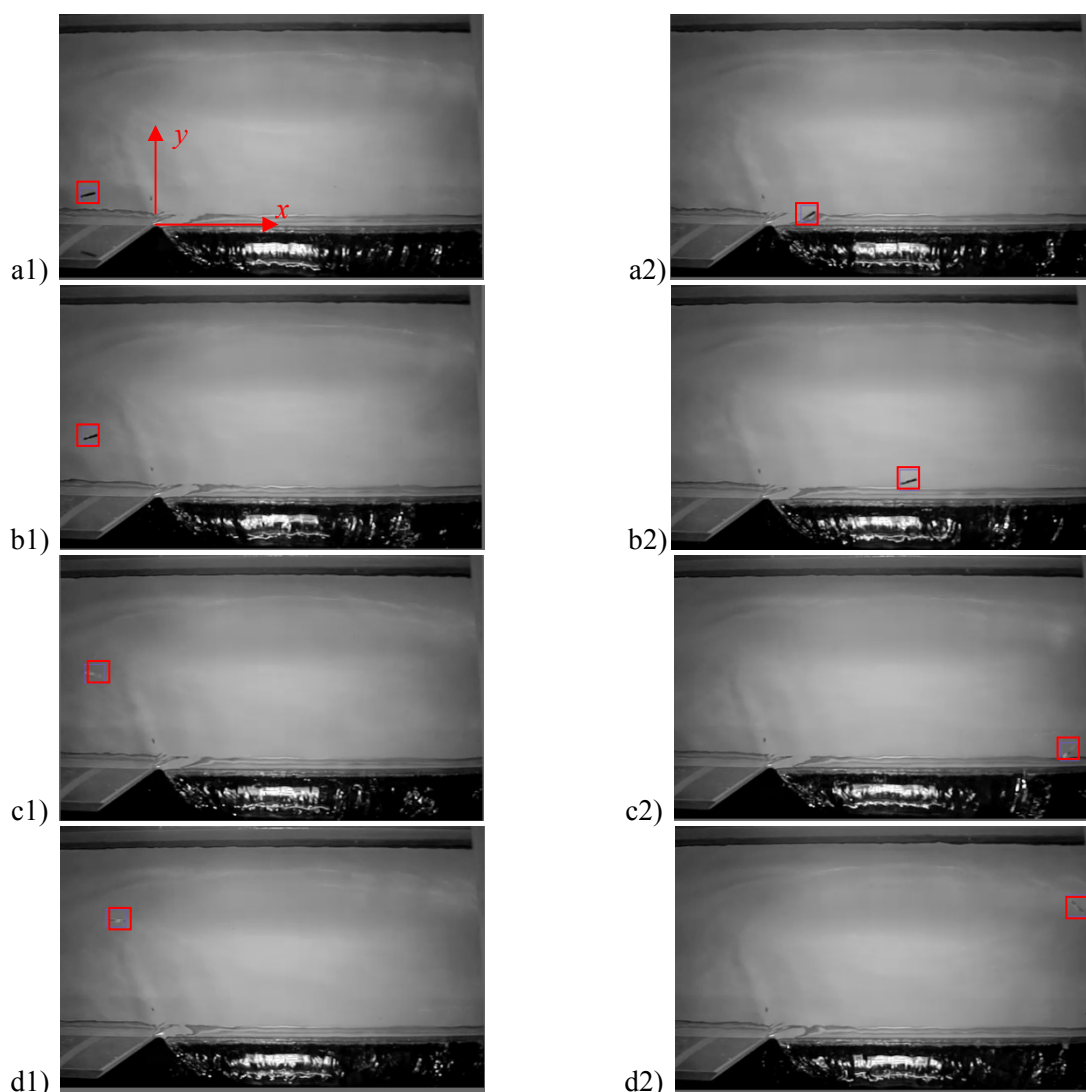
Preglednica 6: Umerjanje nastavitev vizualizacijske metode

Table 6: Calibration of visualization method settings

Zap. št. izhodiščne slike	251	751	1248	Poprečje [cm/s]
Izračunana poprečna $u$ [cm/s]	41,16	40,81	39,72	40,6
Izračunana poprečna $v$ [cm/s]	1,7	1,2	1,4	1,4
Stand.devijacija STDEV	0,018	0,013	0,015	0,015

Iz zgornje preglednice je razvidno, da za umeritveni primer razmerje med izmerjenimi in izračunanimi hitrostmi znaša 0,993 za vzdolžno smer in 0,857 za prečno smer, pri čemer so prečne hitrosti izrazito manjše od vzdolžnih. Standardna deviacija izračunanih poprečnih hitrosti v opazovanem oknu se giblje od 0,013 do 0,018, kar so dovolj nizke vrednosti, da hitrosti plovca lahko upravičeno primerjamo s poprečnimi hitrostmi toka.

Na modelih KMTe umerjene nastavitve so se izkazale za primerne tudi pri snemanju hitrostnih polj v širšem koritu – seveda z upoštevanjem večje velikosti pike (zaradi drugačnih dimenzij modela) in večjega koeficienta difuzivnosti (zaradi uporabe hipermangana namesto vodikovih mehurčkov). Naslednja zaporedja slik, pridobljena tekom umerjanja na bočnih prelivih v širšem koritu, že razkrivajo glavne poteze opazovanih hitrostnih polj (Slika 22):



Slika 22: Bočni prelivi v širšem koritu: (a)  $y/B \approx 0$ , (b)  $y/B \approx 1/3$ , (c)  $y/B \approx 1/2$ , (d)  $y/B \approx 2/3$   
Figure 22: Side weir in wider main channel: (a)  $y/B \approx 0$ , (b)  $y/B \approx 1/3$ , (c)  $y/B \approx 1/2$ , (d)  $y/B \approx 2/3$

Izračunane poprečne hitrosti papirnatih plovcev, označenih z rdečimi okvirčki na sliki 22, so naslednje: (a)  $u = 39,2$  cm/s,  $v = 5,5$  cm/s; (b)  $u = 36,6$  cm/s,  $v = 8,0$  cm/s; (c)  $u = 32,8$  cm/s,  $v = 6,6$  cm/s; (d)  $u = 30,0$  cm/s,  $v = 0,1$  cm/s. Hitrosti  $v$  kažejo v smeri  $-y$  prikazanega koordinatnega sistema.



#### 4.5 Merilna negotovost vizualizacijske metode

Pri obravnavi merilne negotovosti vizualizacijske metode velja že uvodoma poudariti, da metoda kot taka ni neke vrste "metoda vodikovih mehurčkov" in torej ni vezana na uporabo elektrolize. Vodikovi mehurčki so bili v tej disertaciji uporabljeni kot najprimernejši polutant za glavno raziskavo, sama metoda pa je učinkovita tudi ob uporabi različnih drugih polutantov, npr. barvil ali delcev. To je bilo nenazadnje tudi pokazano na modelu 1 (kot barvilo je bila uporabljena raztopina hipermangana) in pri umerjanju z delci (oz. plovcji).

Negotovosti, ki spremljajo uporabo vodikovih mehurčkov za vizualizacijo toka, so raziskovali že Okamoto in sod. (1971). Njihovi poskusi so bili v marsičem različni od naših: vizualizirali so tok v zaprtem cevovodu, v opazovanem odseku s premerom 3 palcev so bile hitrosti toka celo do 6 m/s, za katodo so uporabili platinasto žico (sicer enakega premera 0,5 mm kot mi bakreno žico), za anodo pa grafitno palčko (mi bakreno ploščo). Pri snemanju so uporabili pulzirajoči vir svetlobe, mi pa osvetlitev brez utripanja, ker to zahteva uporabljena vizualizacijska metoda. Kljub temu lahko privzamemo, da njihove ugotovitve o uporabnosti "metode z vodikovimi mehurčki", kot so jo poimenovali, v splošnem veljajo tudi za naš primer. Negotovosti, ki jih prinaša uporaba vodikovih mehurčkov, so razvrstili na naslednje možne vplive oz. vzroke:

- premik tokovnic zaradi vzgona,
- vstopna dolžina pospeševanja mehurčkov,
- brazda, ki nastane za žico v toku,
- centripetalna sila v krivini,
- čas razpada mehurčka zaradi absorpcije.

Eno ključnih vprašanj je, kolikšna je primerna velikost mehurčkov, da njihovo premikanje pravilno sledi premikanju toka. Na generiranje in velikost mehurčkov vplivajo: jakost vira enosmerne električne napetosti, oddaljenost in premer elektrod, električna prevodnost vode (ki je odvisna od temperature vode, njene kinematične viskoznosti in vsebnosti delcev) in hitrost vodnega toka. Premer mehurčka je primerljiv s premerom žice (Tropea in sod., 2007). Ne da bi se spuščali v podrobnosti navedimo nekaj praktičnih ugotovitev Okamoto in sod. (1971):

- primeren premer mehurčkov znaša 0,06 do 0,15 mm,
- pri tem je vzgonska hitrost enaka 0,2 do 1,5 cm/s,
- za proizvodnjo mehurčkov je potrebna napetost do 100 V. Tudi Dargahi (1997) to vrednost navaja kot optimalno, lahko pa je manjša, če se toku dodaja NaOH (približno 0,5 g / l).

Tudi mi smo uporabili žičko premera 0,5 mm. Vodi smo dodajali navadno kuhinjsko sol (približno 1 kg/m<sup>3</sup> vode) in mehurčke generirali z napetostjo do 55 V, kolikor je znašala kapaciteta razpoložljivega vira napetosti, pri čemer je bila regulirana tako, da je med elektrodama pri vseh meritvah tekel tok okoli 0,7 A. Temu primerno je bila pri maksimalni višini žičke  $z_z$  napetost maksimalna, za meritve bližje dnu pa ustrezno manjša.

Da bi minimizirali problematiko zgoraj navedenih petih negotovosti, smo v sklopu preliminarnih eksperimentov optimizirali pozicijo žičke (oddaljenost od gorvodnega konca bočnega preliva je bila konstantna), izbrali najprimernejše nastavitve kamere (frekvenca posnetkov, ločljivost, fokus) in osvetlitve ter računskih parametrov vizualizacijske metode. Žička je sicer povzročala manjšo motnjo v toku vode, kar se je održalo v lokalni spremembi poteka gladine, vendar pa je ta vpliv hitro izzvenel, vsekakor gorvodno od začetka bočnega preliva. Poleg tega so bile meritve gladin in pretokov izvedene tako, da je bila tedaj žička dvignjena izven toka.

Kljub opaženi manjši razpršitvi vodikovih mehurčkov v vertikalni smeri (zaradi vzgona) lahko upravičeno govorimo o 2D značaju tokovnih razmer. Pri fotografiranju laserske presečne ravnine tik ob steni bočnega preliva se je v nekaterih primerih sicer pokazalo, da v vodi raztopljeni mehurčki na tem delu potujejo tudi v vertikalni smeri (in nato čez bočni preliv), vendar to očitno velja le za razmere tik ob ostenju.

Z navedenimi ukrepi za optimizacijo meritev se vodikovi mehurčki v večini primerov niso razblinili niti pri snemanju površinskih hitrosti dolvodno od bočnega preliva. Omenjeni odsek bi bil lahko problematičen zaradi maksimalne višine  $z_z$  in torej minimalnega električnega toka med elektrodama, ter zaradi maksimalne oddaljenosti merilne ravnine od žice.

V nasprotju s pričakovanji se je izkazalo, da so bili za merjenje hitrostnih polj okoli dolvodnega konca bočnega preliva veliko bolj problematični valovi, ki nastajajo ob dolvodnem vogalu bočnega preliva in v kombinaciji z gladinskim odbleskom kvarijo rezultate vizualizacijske metode za vse opazovane globine v tem prečnem prerezu. V primeru tako neuporabnih posnetkov so bile hitrosti ocenjene na podlagi izračunanih vrednosti v sosednjih prečnih prerezih, v splošnem pa je bilo neuporabnih posnetkov sorazmerno zelo malo. To in standardne deviacije izračunanih hitrosti so prikazane na primeru v poglavju 5.

#### 4.6 Primer poročila o merilni negotovosti izmerjenega pretoka

Kot primer izračuna merilne negotovosti si oglejmo rezultate za trikotni ostrorobi preliv za merjenje  $Q_2$  za variante modelov KMTe. Za račun pretoka vzamemo merjene vrednosti za izhodiščno varianto dotoka in višine spodnje vode za bočni preliv  $B = 14$  cm,  $L = 20$  cm,  $p = 10$  cm (oznaka B14\_L20\_p10), ki je podrobneje predstavljena v naslednjem poglavju. Določitev merilne negotovosti z vsemi oznakami vred (oznaka  $u$  v tem kontekstu pomeni merilno negotovost, ne hitrosti) sledi primeru, prikazanem v ISO 1438:2008, str. 25 – 28.

##### a) Značilnosti merilnega preliva

Značilnosti merilnega preliva so naslednje:

- Širina natočnega korita je 20 cm.
- Višina ničle trikotnega preliva je 8,77 cm nad dnom.
- Za preliv velja  $\tan(\alpha/2) = 1/2$ . Izvedba preliva je po oceni taka, da velja  $\alpha = 53^\circ 8' \pm 0,5^\circ = 53,13^\circ \pm 0,5^\circ$ .
- Meritev gladin (prelivnih višin) se izvaja približno 45 cm gorvodno od preliva. Izmerjena prelivna višina znaša 13,18 cm. Upoštevajoč natančnost odčitkov ostnega merila (0,1 mm) in valovanja gladine ( $\pm 1,5$  mm) ocenjujem, da je prelivna višina izmerjena z merilno negotovostjo  $13,18 \pm 0,16$  cm.

##### b) Izračun pretoka

Za trikotni preliv, ki ima vršni kot med  $20^\circ$  in  $100^\circ$ , omenjeni ISO standard priporoča za izračun pretoka uporabo Kindsvater-Shen enačbe:

$$Q_t = C_d \cdot \frac{8}{15} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot \sqrt{2g} \cdot h_e^{5/2} \quad (79)$$

kjer je pretočni koeficient  $C_d$  za  $\alpha = 53^\circ 8'$  približno  $C_d = 0,578$  (po ISO 1438:2008 Slika 9, str. 20), efektivna višina  $h_e$  pa je definirana z enačbo  $h_e = h + k_h$ , kjer je  $k_h$  eksperimentalno določena veličina, podana v metrih, ki kompenzira skupni učinek viskoznosti in površinske napetosti ter za obravnavani kot znaša  $k_h = 1,2$  mm (po ISO 1438:2008 Slika 10, str. 22). Iz zgornje enačbe sledi  $Q_t = 4,41$  l/s.

##### c) Izračun merilne negotovosti izmerjenega pretoka

- Upoštevana metoda evaluacije: merilna negotovost tipa B.
- Vrednosti standardnih negotovosti so:
  - Merilna negotovost pretočnega koeficienta trikotnega preliva (oznaka  $C_d$ ) je za vse oblike trikotnega preliva enaka  $u^*(C_d) = 0,50$  % (po ISO 1438:2008 Preglednica 2).
  - Predpostavimo trikotno verjetnostno porazdelitev, zato velja:

$$u[\tan(\alpha/2)] = \frac{1}{\sqrt{6}} \left[ \frac{\tan(53,63^\circ/2) - \tan(52,63^\circ/2)}{2} \right] = 0,0022$$

Odtod sledi:

$$u^*[\tan(\alpha/2)] = u[\tan(\alpha/2)] / \tan(\alpha/2) = 0,0022 / 0,5 = 0,0044 = 0,44 \%$$

- Merilna negotovost efektivne višine  $u^*(h_e)$  znaša  $0,16 \text{ cm} / 13,18 \text{ cm} = 0,012 = 1,2 \%$ .

- Skupna merilna negotovost izmerjenega pretoka znaša:

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

$$u_c^*(Q) = \sqrt{0,50^2 + 0,44^2 + 2,5 \cdot 1,2^2} [\%]$$

$$u_c^*(Q) = 2 \%$$

#### d) Izjava o meritvah pretoka

Konvencionalna opredelitev pretoka po ISO 1438:2008 se na podlagi zgoraj izračunanih vrednosti glasi: Pretok znaša 4,41 l/s z merilno negotovostjo 2 % pri 95 % pragu zaupanja s faktorjem  $k = 2$ .

### 4.7 Ocena merilne negotovosti izmerjenih hitrosti

Meritve hitrosti so bile izvedene z metodo, ki ni standardizirana, zato lahko merilno negotovost teh meritev ocenimo le na ne povsem standardizirani način.

Po analogiji s točko 4.6 lahko predpostavimo, da je merilna negotovost meritev hitrosti sestavljena iz negotovosti meritev razdalj  $x$  in  $y$  ter časa  $t$ , podobno kot je merilna negotovost meritev pretoka sestavljena iz negotovosti meritev globin, kota in pretočnega koeficienta. Če se omejimo na poprečne vzdolžne hitrosti  $\bar{u}$ , lahko zanje zapišemo skupno merilno negotovost  $u_c^*(\bar{u})$  kot :

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

Pri ocenjevanju negotovosti meritve razdalj in časa lahko uporabimo posnetke potovanja plovcev in posnetke za določevanje korigirane velikosti pik, kot je pokazano kasneje v poglavju 5.3. Negotovost meritve časa  $u^*(t)$  bi lahko zanemarili, saj je časovni korak med dvema zaporednima slikama zelo kratek (1/300 s) in zanesljivo definiran z nastavljenimi frekvenco snemanja slik, kljub temu pa privzemimo, da je za tipično obravnavano zaporedje 500 slik merilna negotovost  $u^*(t)$  enaka:  $u^*(t) = 1/500 = 0,002 = 0,2 \%$ .

Pri določanju negotovosti meritev razdalj  $u^*(x)$  gre v bistvu za negotovost določitve velikosti posamezne pike, kar je podrobneje predstavljeno v nadaljevanju pri obravnavi faktorjev korekcije zaradi projekcije snemanja (Preglednica 14). Za potrebe tukajšnje ocene predpostavimo, da so razdalje tudi za nižje  $z_z$  odčitane do 2 mm natančno. Za tipični primer z dolžino krone  $L = 20 \text{ cm}$  bi bila torej standardna negotovost lahko  $u^*(x) = 2 \text{ mm} / 20 \text{ cm} = 0,001 = 1\%$ . Upoštevajoč še negotovost določitve (in izvedbe)  $L$ , lahko zaokrožimo na  $u^*(x) = 2 \%$ . Skupno merilno negotovost izmerjenih hitrosti torej lahko ocenimo kot vrednost:

$$u_c^*(\bar{u}) = \sqrt{u^*(t)^2 + u^*(x)^2} = \sqrt{0,2^2 + 2^2} [\%] \cong 2\%$$

## 5 REZULTATI MERITEV

Za dokaz teze disertacije je bilo treba opraviti obsežne meritve. V nadaljevanju je opisano, kako je potekal postopek obdelave meritev, s pomočjo katerega so bili dobljeni podatki za dokaz teze. Ker gre za serijo meritev, je v nadaljevanju podan le tipični primer rezultatov meritev, in sicer v dveh sklopih: v prvem je govora o globinah toka in pretokih, v drugem pa o hitrostnih poljih. Rezultati, potrebni za formuliranje nove enačbe za koeficient pretoka bočnega preliva  $C_d$ , so obravnavani v poglavju 7.

Čeprav so eksperimenti potekali na pestrem naboru fizičnih modelov, je bila glavnina dela opravljenega na ostrorobih bočnih prelivih KMTe. Med rezultate te raziskave so vključene samo meritve končnih raziskav, saj so te, za razliko od preliminarnih eksperimentov, zadostile vsem pogojem, na osnovi katerih jih lahko primerjamo z raziskavami drugih avtorjev. Iz teh variant izvirajo vsi ključni rezultati in bistveni zaključki, zato te bočne prelive lahko smatramo kot merodajne za dokaz teze te disertacije.

V nadaljevanju je kot primer rezultatov eksperimentov prikazana varianta bočnega preliva z  $B = 14$  cm,  $L = 20$  cm,  $p = 10$  cm, in sicer z izhodiščno kombinacijo dotoka in višine spodnje vode (v nadaljevanju oznaka B14\_L20\_p10\_var0). Ta preliv ima izmed šestih variant geometrij bočnih prelivov KMTe približno poprečne dimenzije geometrijskih parametrov. Rezultati meritev vseh ostalih variant eksperimentov so zbrani v prilogah.

### 5.1 Merjene veličine

Po vgradnji bočnega preliva, katerega značilne dimenzije določata  $L$  in  $p$ , so bile izmerjene veličine, ki določajo potek dna glavnega korita (Preglednica 7). Te meritve so bile izvedene na suhem modelu, brez toka vode.

Preglednica 7: Višina dna glavnega korita, izmerjena z ostnim merilom

Table 7: Main channel bed elevation measured with a point gauge

lokacija	oznaka (indeks)	[cm] od gorvodnega konca preliva	odčitek dna ostno merilo [cm]	padec dna [-]
natok	NAT	-50	31,62	$I_d = 0,08 \text{ cm}/150 \text{ cm} = 0,00053$
zgornja voda	ZV	-25	31,58	
pred prelivom	1*	-5	31,55	
preliv gorvodno	1	0	31,54	
sredina preliva	$L/2$	10	31,53	
preliv dolvodno	2	20	31,51	
za prelivom	2*	25	31,52	
spodnja voda	SV	45	31,57	
odtok	ODT	100	31,54	
dolvodni jez	$z_{jez}$	120	višina $z_{jez}$	

Po zaključku teh merjenj so bile z ostnimi merili za različne kombinacije dotoka in višine spodnje vode izmerjene še globine oz. prelivne višine toka (primer v preglednici 8):

- prelivna višina na dotočnem trikotnem merilnem prelivu,
- prelivna višina na odtočnem trikotnem merilnem prelivu,
- višina krone jezu  $z_{jez}$  za regulacijo spodnje vode,
- potek gladin v osi glavnega korita – ostno merilo,
- potek gladin v različnih vertikalnih presečnih ravninah, vzporednih osi glavnega korita – fotografitiranje (Slika 23).

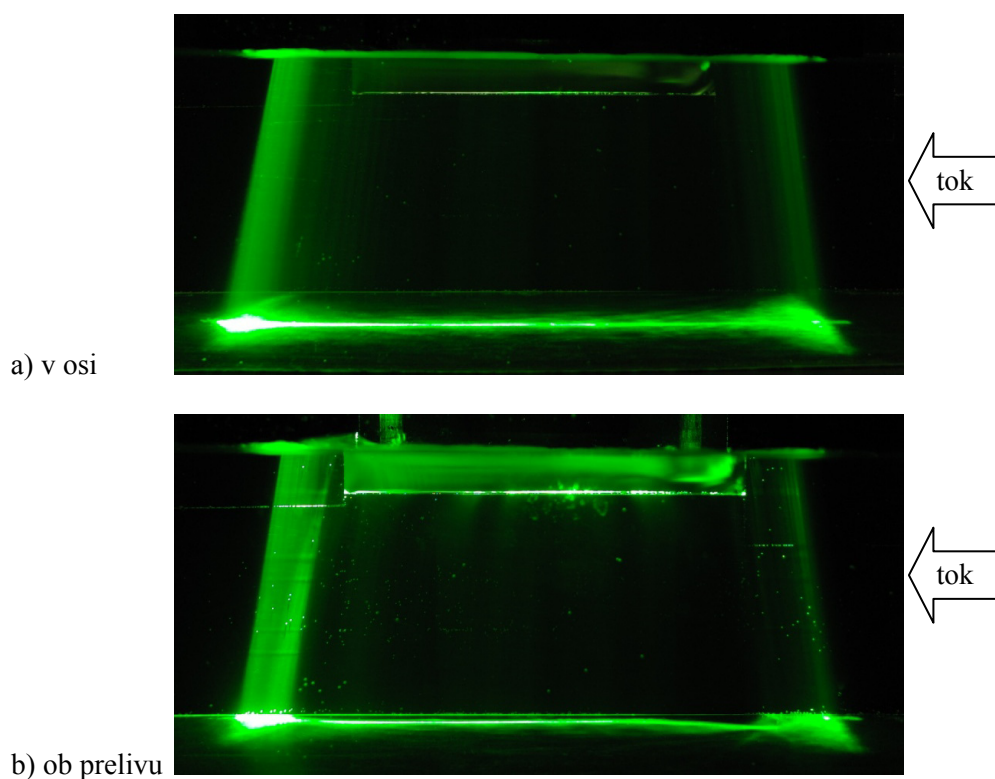
Preglednica 8: Merjene prelivne višine in globine za primer B14\_L20\_p10

Table 8: Measured overflow depths and water surface elevations for case B14\_L20\_p10

var.	$h_{prel}(Q_1)$ [cm]	$z_{jez}$ [cm]	$h_{prel}(Q_2)$ [cm]	odčitki gladin z ostnim merilom [cm]								
				odtok	SV	2*	2	L/2	1	1*	ZV	natok
Q-	15,20	6,41	28,81	43,81	43,79	43,71	43,71	43,59	43,52	43,54	43,50	43,50
Q-*	15,65	6,41	29,14	44,01	44,00	43,95	43,94	43,84	43,75	43,73	43,65	43,70
0	16,00	6,41	29,32	44,20	44,20	44,11	44,11	43,98	43,98	43,87	43,82	43,83
Q+*	16,35	6,41	29,57	44,31	44,33	44,30	44,29	44,14	43,96	43,98	43,99	43,96
Q+	16,63	6,41	29,73	44,43	44,44	44,36	44,40	44,26	44,13	44,14	44,10	44,12
Z-	16,01	5,80	29,67	43,77	43,82	43,71	43,77	43,66	43,50	43,57	43,53	43,55
Z-*	16,01	6,11	29,49	44,01	43,98	43,91	43,95	43,83	43,69	43,72	43,67	43,69
0	16,00	6,41	29,32	44,20	44,20	44,11	44,11	43,98	43,98	43,87	43,82	43,83
Z+*	16,02	6,81	29,11	44,43	44,46	44,38	44,36	44,23	44,11	44,14	44,14	44,09
Z+	16,00	7,15	28,95	44,62	44,62	44,56	44,56	44,42	44,28	44,30	44,37	44,31

Op.: V zgornji preglednici je izhodiščna varianta (oznaka "0") namenoma zapisana v dveh vrsticah, saj je izhodiščna tako po pretoku, kakor tudi po višini spodnje vode.

Kot bo pokazano v naslednji točki, so bile gladine gorvodno in dolvodno od bočnega preliva vzporedne dnu, pri čemer so bile dolvodne globine do 5 mm večje od gorvodnih, vzdolž bočnega preliva pa so enakomerno naraščale – oboje je v skladu s teorijo oz. primerljivi raziskavami (npr. Emiroglu in sod, 2011). Tak potek gladin potrjujejo tudi posnetki lasersko generiranih vertikalnih presečnih ravnin (Slika 24), in pomeni, da je bil gorvodno in dolvodno od bočnega preliva vzpostavljen stalni enakomerni tok.



Slika 23: Fotografija lasersko osvetljene presečne ravnine. Tok od desne proti levi, krona bočnega preliva v ozadju. (a) Presek vzdolž osi glavnega korita, (b) presek vzdolž bočnega preliva.

Figure 23: Photo of a laser induced vertical plane. Flow from right to left, crest of the side weir crest in the background. (a) Section along main channel axis, (b) section near the side weir.

## 5.2 Izvrednotene globine in pretoki

Na podlagi izmerjenih višin so bile izvrednotene naslednje veličine (Preglednici 9 in 10):

- dotok  $Q_1 = f(h_{prel,1})$ ,
- odtok  $Q_2 = f(h_{prel,2})$ ,
- bočno prelivanje  $Q_b = Q_1 - Q_2$ ,
- delež bočnega odtoka  $\Phi_b = Q_b/Q_1$ ,
- globine toka oz. vzdolžni poteki gladin (Slika 24),
- brezdimenzijska razmerja (npr.  $Fr_1, p/h_1$ ), ki najpogosteje nastopajo v enačbah pretočnega koeficienta  $C_d$  (Preglednica 10),
- vrednosti pretočnega koeficienta  $C_d$ , izračunane po enačbah različnih avtorjev (poglavje 7).

Preglednica 9: Glavne izvrednotene hidravlične veličine za primer B14\_L20\_p10

Table 9: Main calculated hydraulic quantities for case B14\_L20\_p10

var.	prag jez	pretoki [l/s]			$Q_b/Q_1$	globine [cm]								
	$z_{jez}$ [cm]	$Q_1$	$Q_2$	$Q_b$		$h_{ODT}$	$h_{SV}$	$h_{2*}$	$h_2$	$h_p$	$h_1$	$h_{1*}$	$h_{ZV}$	$h_{NAT}$
Q-	6,41	5,29	4,24	1,05	0,20	12,27	12,22	12,19	12,20	12,06	11,98	11,99	11,92	11,88
Q-*	6,41	5,69	4,55	1,14	0,20	12,47	12,43	12,43	12,43	12,31	12,21	12,18	12,07	12,08
var 0	6,41	6,01	4,72	1,29	0,22	12,66	12,63	12,59	12,60	12,45	12,44	12,32	12,24	12,21
Q+*	6,41	6,34	4,95	1,39	0,22	12,77	12,76	12,78	12,78	12,61	12,42	12,43	12,41	12,34
Q+	6,41	6,62	5,10	1,52	0,23	12,89	12,87	12,84	12,89	12,73	12,59	12,59	12,52	12,50
Z-	5,80	6,02	5,04	0,98	0,16	12,23	12,25	12,19	12,26	12,13	11,96	12,02	11,95	11,93
Z-*	6,11	6,02	4,88	1,14	0,19	12,47	12,41	12,39	12,44	12,30	12,15	12,17	12,09	12,07
var 0	6,41	6,01	4,72	1,29	0,22	12,66	12,63	12,59	12,60	12,45	12,44	12,32	12,24	12,21
Z+*	6,81	6,03	4,52	1,50	0,25	12,89	12,89	12,86	12,85	12,70	12,57	12,59	12,56	12,47
Z+	7,15	6,01	4,37	1,64	0,27	13,08	13,05	13,04	13,05	12,89	12,74	12,75	12,79	12,69

Op.: V zgornji preglednici je izhodiščna varianta (oznaka "0") namenoma zapisana v dveh vrsticah, saj je izhodiščna tako po pretoku, kakor tudi po višini spodnje vode.

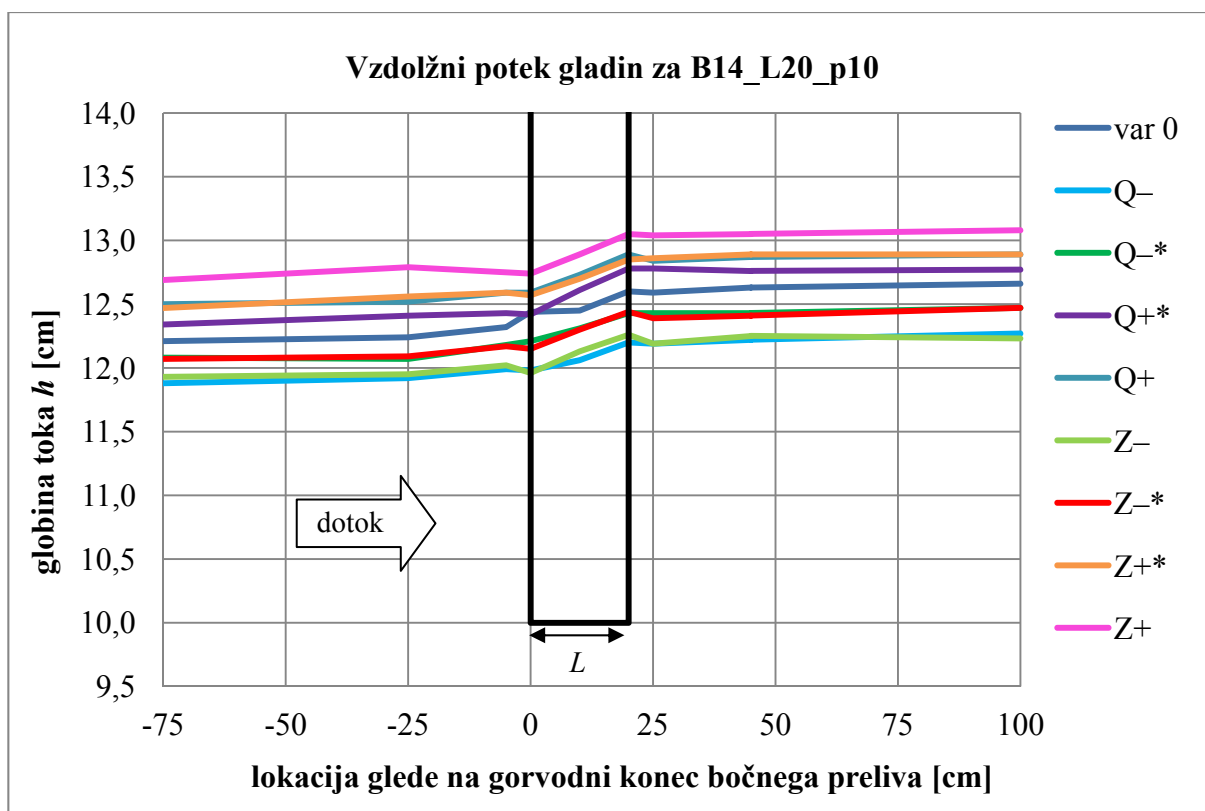
Preglednica 10: Izvrednotene vrednosti  $Fr_1, p/h_1$  in  $h-p$  za primer B14\_L20\_p10

Table 10: Calculated values  $Fr_1, p/h_1$  and  $h-p$  for case B14\_L20\_p10

var.	$Fr_1$	$p/h_1$	$h-p$ [cm]				
			$x=0$	$x=0,25L$	$x=0,5L$	$x=0,75L$	$x=L$
Q-	0,29	0,835	1,98	2,02	2,06	2,13	2,20
Q-*	0,30	0,819	2,21	2,26	2,31	2,37	2,43
0	0,31	0,804	2,44	2,45	2,45	2,53	2,60
Q+*	0,33	0,805	2,42	2,52	2,61	2,70	2,78
Q+	0,34	0,794	2,59	2,66	2,73	2,81	2,89
Z-	0,33	0,836	1,96	2,05	2,13	2,20	2,26
Z-*	0,32	0,823	2,15	2,23	2,30	2,37	2,44
0	0,31	0,804	2,44	2,45	2,45	2,53	2,60
Z+*	0,31	0,796	2,57	2,64	2,70	2,78	2,85
Z+	0,30	0,785	2,74	2,82	2,89	2,97	3,05

Op.: V zgornji preglednici je izhodiščna varianta (oznaka "0") namenoma zapisana v dveh vrsticah, saj je izhodiščna tako po pretoku, kakor tudi po višini spodnje vode.

Vzdolžni poteki gladin (primer je prikazan na sliki 24) so bili določeni na podlagi meritev višin gladine z ostnim merilom. Iz fotografij lasersko osvetljenih presečnih vertikalnih ravnin pa so bili poteki gladin določeni na podlagi posebnega Matlab programa, ki analizira vrednosti odtenkov barve v posameznih pikslih posnete fotografije in potek gladine izračuna kot linijo med različno obarvanima območjima fotografije. Tako dobljeni rezultati so bili uporabljeni za kontrolo, tj. za izločanje grobih napak pri meritvah poteka gladine.



Slika 24: Vz dolžni pre rez gladine za različne dotoke in višine spodnje vode – preliv B14\_L20\_p10  
Figure 24: Longitudinal section of water surface for various inflows and tailwater levels

Na podlagi iz vrednotenih globin in pretokov bo v nadaljevanju določena vrednost pretočnega koeficienta  $C_d$ . Izboljšana določitev tega koeficienta s pomočjo opisanega merilnega postopka pa je eden od ciljev naloge, kar je opisano v poglavju 7.

### 5.3 Iz vrednotenje lokalnih hitrosti iz posnetega hitrostnega polja

Hitrostna polja so bila iz vrednotena z vizualizacijsko metodo iz posnetkov toka, posnetih s hitro kamero. Na podlagi izračunanih hitrostnih polj sta bila določena še koeficienta neenakomerne porazdelitve hitrosti in specifična energija prečnega prereza:

- Coriolisov koeficient  $\alpha_C$ ,
- Boussinesquov koeficient  $\alpha_B$ ,
- položaj energijske črte, tj. specifična energija prereza  $E = h + \alpha_C \bar{u}^2/2g$ .

Postopek za iz vrednotenje zgoraj navedenih veličin je predstavljen v nadaljevanju.

Po izvedbi meritev vzdolžnega poteka gladin so bili za iste hidravlične robne pogoje posneti še filmi premikanja z elektrolizo generiranih vodikovih mehurčkov za pet različnih višin žičke  $z_z$ . Oznake pripadajočih merilnih ravnin so A,B,C,D in E, za vsako merilno ravnino  $z_z$  pa so posneti po trije snemalni kadri: odsek gorvodno, bočni preliv in odsek dolvodno. Posneti filmi (trajanje 5 s, frekvenca

300 posnetkov/s), so bili pretvorjeni v zaporedje 1500 posameznih slik (format bmp) z uporabo aplikacije Bink RAD Video Tools, nato pa z uporabo posebnega Matlab programa še v enako število črno-belih slik. Zaporedja teh slik je uporabilo tudi drugo programsko orodje, ki predstavlja jedro vizualizacijske metode in ki numerično izračuna vektorje hitrosti za vsak piksel izbranega okna.

Najprimernejše nastavitve snemanja in izračuna hitrostnih polj so bile določene v procesu preliminarnih eksperimentov in umerjanja merilne metode. Ena od nastavitvev z največjim vplivom je velikost piksla. Pri izvrednotenju hitrosti je program računal z velikostjo pik 0,0005 m, nato pa je bilo treba dobljene vrednosti korigirati, kot je opisano v nadaljevanju.

Za izhodiščne slike so izbrane slike št. 251, 751 in 1248 kot posnetki v sredini merilnega vzorca, saj je za vsako od teh v sistem enačb zajetih 500 zaporednih slik. Hitrostna polja so bila torej izračunana posebej za vsako kombinacijo izhodiščne slike in predhodnih ter sledečih 250 slik. Račun hitrosti po širini korita je bil izveden ločeno od računa hitrosti na pripadajoči lokaciji nad oz. ob kroni bočnega preliva. Za hitrosti, razporejene prečno po širini korita, je bilo uporabljeno računsko okno širine dveh pik. Višina omenjenega okna je segala skoraj od stene bočnega preliva do nasprotne stene, saj tik ob stenah posnetki ne zagotavljajo nedvoumne kvantifikacije. Za hitrosti nad oz. ob kroni pa so dimenzije računskega okna po potrebi (npr. zaradi odbleska na gladini, vpliva valov) prilagojene, večinoma pa je bilo izbrano okno z dimenzijami približno 10 x 10 pik.

Za analizo so bile upošteevane vrednosti, ki jih program izračuna kot poprečne znotraj obravnavanega območja (tj. uporabniško določenega opazovalnega okna) na določeni globini  $z_z$  in lokaciji  $x/L$ . To območje je bilo za hitrosti  $u$  in  $v$  v glavnem koritu na prečni liniji po širini korita, pripadajoči komponenti hitrosti bočnega toka  $u_b$  in  $v_b$  pa sta bili dobljeni na majhnem kvadratu v bližini krone bočnega preliva – seveda na ustreznih  $z_z$  in  $x/L$ . Iz treh zaporedij slik se za posamezno  $z_z$  in posamezno lokacijo  $x/L$  lahko določi niz treh skalarnih vrednosti  $u$  in  $v$ , ter za  $z_z \geq p$  in  $0 \leq x/L \leq 1$  še niz treh skalarnih vrednosti  $u_b$  in  $v_b$ . Nizi treh skalarnih vrednosti so uporabljeni za izračun poprečne hitrosti na posamezni globini. Preglednica 11 podaja izvrednotene vrednosti, v njej pa so poprečja posameznih nizov treh skalarnih vrednosti prikazana odebeljeno.

Poprečne hitrosti na posameznih globinah glavnega korita (tj. odebeljeno prikazane vrednosti  $u$  in  $v$  iz preglednice 11) ter pripadajoče hitrosti nad krono bočnega preliva ( $u_b$  in  $v_b$ ) so zbrane v preglednici 12. Poleg poprečenih hitrosti so pod oznako "vel." v Preglednici 12 navedene tudi skalarni vrednosti tako dobljenih vektorjev poprečnih hitrosti na posamezni ravnini  $z_z$ . Vrednosti "vel." so v merilni ravnini za 2D hitrosti v glavnem koritu, kakor tudi za hitrosti nad krono bočnega preliva, izračunane po enačbi:

$$vel_i = \sqrt{u_i^2 + v_i^2} \quad (80)$$

Poudariti velja, da je v nekaterih primerih pravilno kvantifikacijo oteževalo odlepljanje toka na gorvodnem koncu bočnega preliva in valovanje na dolvodnem koncu bočnega preliva. V takih primerih smo predpostavili, da  $u_b$  in  $v_b$  za profil  $x/L = 0$  lahko aproksimiramo z vrednostmi, ki jih program izračuna za okno, ki je locirano nad krono, a rahlo dolvodno, recimo na  $x/L \leq 0,1$ . Podobno smo predpostavili, da  $u_b$  in  $v_b$  za profil  $x/L = 1$  lahko aproksimiramo z vrednostmi, ki jih program izračuna za okno, ki je locirano nad krono, a rahlo gorvodno, približno na  $x/L = 0,9$ .

Iz preglednice 11 je razvidno, da so izračunane komponente hitrosti  $v$  na merilnih ravninah bližje dnu ponekod kazale rahlo proč od bočnega preliva (negativne vrednosti v oklepajih). Ker so te vrednosti zelo blizu ničle, gre verjetno le za merilno negotovost, zato so bili za te vrednosti v nadaljevanju predpostavljeni pozitivni predznaki. Nadalje je iz preglednice 11 razvidno, da je bilo neuporabnih posnetkov (oznaka "neup.") izredno malo, večinoma je šlo za posnetke ob dnu dolvodno od bočnega preliva. V takih primerih so bile vrednosti komponent hitrosti predpostavljene glede na ostale v neposredni okolici.





Preglednica 13: Standardne deviacije za nize treh skalarnih poprečenih vrednosti lokalnih hitrosti  
Table 13: Values of standard deviation for sets of three scalar averaged local velocities

$x/L$	-0,25		0		0,25		0,50		0,75		1		1,25		poprečna STDEV
	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	
A	0,4	0,7	0,7	0,5	1,0	0,3	0,8	0,2	1,0	0,3	0,8	0,5	0,8	0,3	0,6
	$u_b$	$v_b$	$u_b$	$v_b$	$u_b$	$v_b$	$u_b$	$v_b$	$u_b$	$v_b$	$u_b$	$v_b$	$u_b$	$v_b$	
			0,3	0,4	0,5	0,8	0,4	0,9	0,4	0,8	1,3	0,7			0,6
B	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	
	0,6	0,5	0,6	0,3	0,6	0,2	0,6	0,2	0,5	0,2	0,2	0,5	0,7	0,3	0,4
	$u_b$	$v_b$	$u_b$	$v_b$	$u_b$	$v_b$	$u_b$	$v_b$	$u_b$	$v_b$	$u_b$	$v_b$	$u_b$	$v_b$	
		0,9	0,4	1,2	0,6	0,2	0,6	0,5	0,3	0,7	0,8			0,6	
C	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	
	0,3	0,3	0,3	0,4	0,6	0,2	0,7	0,4	0,2	0,2	2,2	0,7	0,9	0,6	0,6
D	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	
	1,2	0,4	0,4		0,8	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0	1,1		1,8		0,6
E	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	$u$	$v$	
	0,3	0,2	0,6		0,2		0,6		0,8		1,4	0,1			0,5

Poprečne vrednosti lokalnih hitrosti, kot jih prikazuje preglednica 12, smo pomnožili z izmerjenimi faktorji korekcije velikosti pike, s katerimi se korigira vpliv projekcije snemanja. Ti faktorji so bili določeni posebej za vzdolžno in posebej za prečno smer, in sicer po naslednjem principu: Če v območju bočnega preliva osvetlimo tanko horizontalno ravnino na višini  $z_z < p$ , lahko določimo dimenzije osvetljenega pravokotnika, ki ima dimenzije  $L \times B$ , čeprav ima zaradi vpliva projekcije manjši obseg (v pikah) kot ga ima pri večjih  $z_z$ . Dolžino osvetljenih stranic takega pravokotnika lahko primerjamo z znanima dimenzijama  $L$  oz.  $B$ , in tako določimo, kolikšna je velikost pike na posamezni opazovani ravnini, ter to velikost primerjamo s prednastavljeno vrednostjo velikosti pike.

Za dani primer B14\_L20\_p10\_var0 so ti korekcijski faktorji navedeni v preglednici 14. Korigirane vrednosti pik so v splošnem za vse variante geometrij znašale od 0,0004 m do 0,0006 m, in sicer v odvisnosti od pozicije kamere.

Preglednica 14: Korekcija velikosti pik  
Table 14: Correction of pixel size

	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

Poprečne hitrosti posameznega prečnega prereza v glavnem koritu ali nad krono bočnega preliva so bile iz tako korigiranih vrednosti izračunane kot aritmetična sredina hitrosti v pripadajočih merilnih ravninah. Tako so bile za poprečne hitrosti v glavnem koritu upoštevane vrednosti iz ravnin A do E, za hitrosti nad bočnim prelivom pa so bile upoštevane vrednosti iz ravnin A in B.

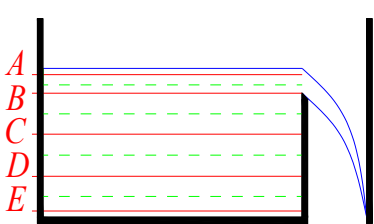
Ob predpostavki, da so izmerjene hitrosti v posamezni ravnini  $z_z$  značilne za nek pripadajoči del prečnega prereza, tj. pravokotnik širine  $B$  in višine  $\Delta z_i$ , je bilo preverjeno, koliko se poprečna hitrost v posameznem prečnem prerezu glavnega korita spremeni, če se upošteva dejstvo, da merilne ravnine niso povsem enakomerno porazdeljene po vsej globini toka in da zato obstaja možnost, da poprečna

hitrost prereza dejansko ni povsem enaka aritmetični sredini pripadajočih hitrosti v vseh petih ravninah. Gre torej za neke vrste ponderiranje, pri katerem predpostavimo, da so izmerjene hitrosti v ravninah  $z_z$  značilne za pripadajoče dele prečnega prereza (Preglednica 15):

Preglednica 15: Predpostavljene višine  $\Delta z_i$  pripadajočega dela prečnega prereza

Table 15: Assumed heights  $\Delta z_i$  of corresponding part of the cross section

merite v v ravnini	oddaljenost od dna $z_z$	višina $\Delta z_i$ pripadajočega dela prečnega prereza	
		poprečje	ponderiranje
A	$h_1 - 0,5$ cm	$h / 5$	$2/3 (h - p)$
B	$p$	$h / 5$	$(h - p)/3 + p/6$
C	$2/3 p$	$h / 5$	$p/3$
D	$1/3 p$	$h / 5$	$p/3$
E	0,5 cm	$h / 5$	$p/6$



Op.: Na shemi ob preglednici so meje pripadajočih delov prereza označene črtkano.

To upoštevajoč se ponderirana poprečna hitrost prečnega prereza lahko izračuna po enačbi:

$$u_{ponder.} = \frac{1}{\sum_i \Delta z_i} \cdot \sum_i u_i \Delta z_i, \quad i = A, B, \dots, E \quad (81)$$

Korigirane hitrosti, njihova poprečja in ponderirana poprečja so za dani primer prikazani v preglednici 16. Ponovimo, da so hitrosti  $u$  in  $v$  poprečne vrednosti komponent vektorjev hitrosti, gosto razporejenih po širini glavnega korita (vsaka posamezna pika posnete slike je prijemališče posameznega vektorja hitrosti) na posamezni merilni ravnini. Podobno velja za hitrosti  $u_b$  in  $v_b$ , le da v njihovem primeru opazovano območje ne sega preko širine korita, temveč je omejeno na manjša merilna okna v območju nad nivojem krone bočnega preliva.

Preglednica 16: Korigirane hitrosti, njihova poprečja in ponderirana poprečja

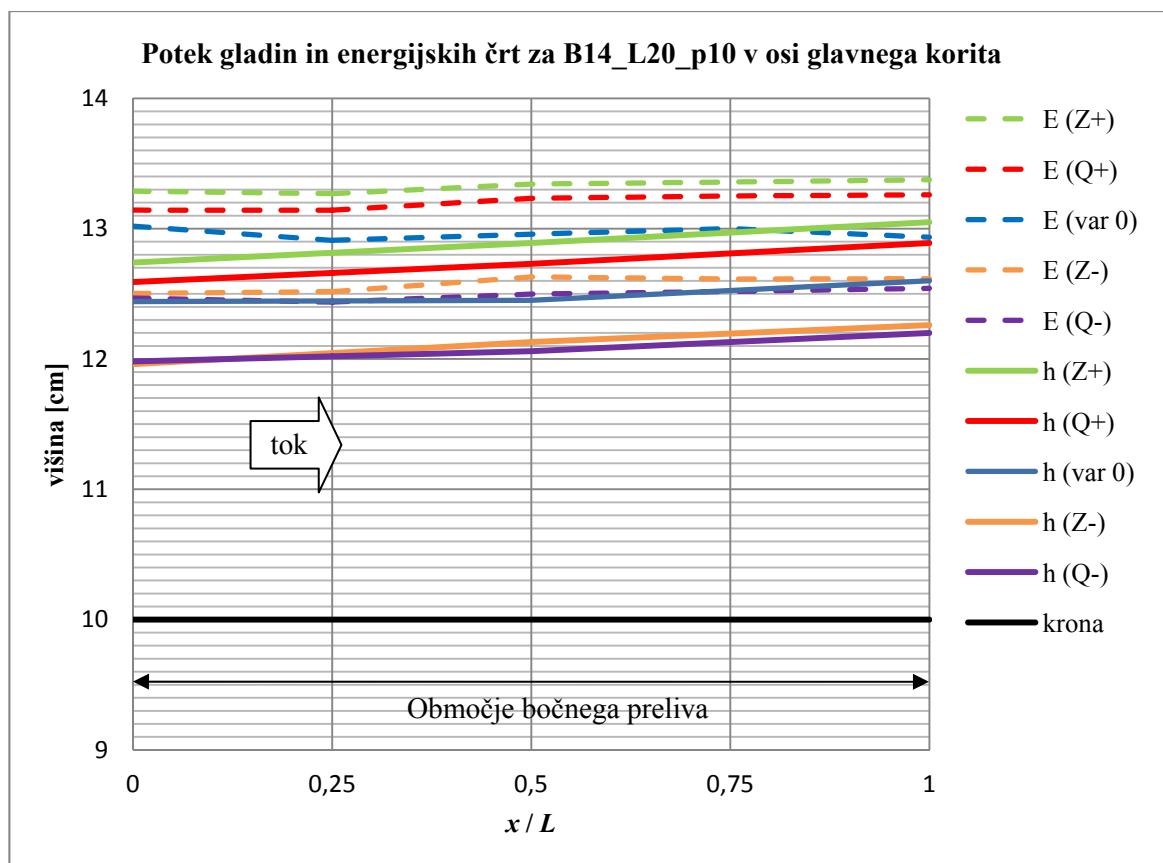
Table 16: Corrected velocities, their averages and pondered average values

$x/L$	-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			
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.	$u_b$	$v_b$	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						

Iz preglednice 16 je razvidno, da ima ponderiranje zanemarljiv vpliv, saj se tako dobljene ponderirane poprečne hitrosti (vrstica z oznako "ponder.") razlikujejo od običajnih poprečnih hitrosti kvečjemu za 0,1 cm/s, kar znaša približno 0,3 %.

## 5.4 Potek energijske črte

Na podlagi izmerjenih vrednosti za potek dna v osi glavnega korita, globin  $h$  vzdolž osi, poprečnih hitrosti prečnih prerezov  $\bar{u}$  in vrednosti Coriolisovega koeficienta  $\alpha_C$  se lahko iz enačbe (1) za specifično energijo določi potek energijske črte v osi glavnega korita. Za primer B14\_L20\_p10 so ti poteki prikazani na sliki 25:



Slika 25: Potek gladin in energijskih črt vzdolž osi glavnega korita za primer B14\_L20\_p10  
Figure 25: Longitudinal profile of water surface and E-line along main channel for case B14\_L20\_p10

Iz slike 25, ki se osredotoča le na območje bočnega preliva, je razvidno, da za različne hidravlične robne pogoje pri mirnem režimu toka gladina v osi glavnega korita vzdolž bočnega preliva narašča, energijska črta pa ostaja praktično horizontalna, saj razlika med višino energijske črte na obeh koncih bočnega preliva znaša do 1 mm, kar je glede na gladko korito iz pleksi stekla pričakovano. Energijska črta je torej vzporedna dnu glavnega korita, ki ima minimalen padec.

Na omenjeni sliki se v nekaterih primerih energijske črte sicer celo minimalno vzpenjajo, tako da je nivo energijske črte na gorvodnem robu bočnega preliva ( $x/L = 0$ ) za največ 1 mm nižji kot na dolvodnem koncu ( $x/L = 1$ ), vendar tak rezultat nima fizikalnega smisla in je očitno posledica merilne negotovosti. Ta nelogičnost je na  $x/L = 1$  lahko posledica lokalnega stoječega valovanja, ki rahlo vpliva tako na meritve globin, kakor tudi na meritve hitrosti.

Vzporednost energijske črte z dnom je skladna s predpostavko, da v območju bočnega preliva od energijskih izgub nastopajo samo trenjske, tj. bočno odlivanje ne povzroča dodatnih lokalnih izgub, kot to upravičeno predpostavlja energijski pristop obravnave bočnih prelivov. Kljub ugotovljeni veljavnosti te predpostavke pa je v nadaljevanju pokazano, da so hitrostna polja v območju bočnega preliva neenakomerna, kar je v skladu s predpostavko pristopa z gibalno količino.

## 6 HITROSTNA POLJA

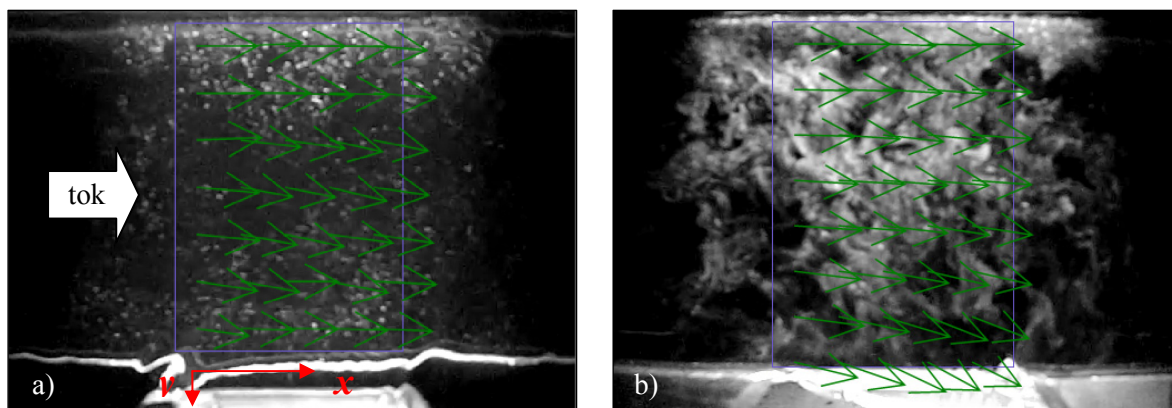
To poglavje podaja glavne rezultate meritev hitrostnih polj v območju bočnega preliva. Gre za neenakomerna vektorska polja, ki jih lahko prikažemo na različne načine (Slika 26 do 31), odvisno od vidika, ki ga želimo poudariti:

- hitrostno polje v posamezni merilni ravnini – splošne značilnosti (Slika 26 in 27),
- spreminjanje vzdolžnih komponent hitrosti po širini glavnega korita (Slika 28),
- porazdelitev vzdolžnih hitrosti po globini – upadanje pretoka v glavnem koritu vzdolž bočnega preliva (Slika 29),
- spreminjanje razmerja  $\bar{u}_b/\bar{u}$  v območju bočnega preliva – primerjava z drugimi avtorji, opredelitev primernosti ali energijskega pristopa ali pristopa z gibalno količino (Slika 30),
- spreminjanje razmerja  $v_b/u_b$  v območju bočnega preliva – odklon bočnega curka (Slika 31),
- spreminjanje koeficientov  $\alpha_C$  in  $\alpha_B$  – primerjava z drugimi avtorji, opredelitev glede primernosti pristopa (Preglednica 17).

V nadaljevanju so zgoraj navedeni rezultati prikazani večinoma za primer bočnega preliva B14\_L20\_p10.

### 6.1 Hitrostna polja v posamezni merilni ravnini

Da bi potrdili hipotezo disertacije so bila hitrostna polja izmerjena pri različnih variantah geometrije in različnih kombinacijah dotoka  $Q_1$  ter spodnje vode  $h_2$ . Rezultati potrjujejo, da so izmerjena hitrostna polja neenakomerna. Tipično hitrostno polje na območju bočnega preliva prikazuje slika 26, na kateri so hitrostni vektorji, kot jih izračuna vizualizacijska metoda. Oba rezultata na sliki 26 sta točno taka, kot ju prikaže uporabniški vmesnik programa – seveda z izjemo pomožne oznake koordinatnega sistema in smeri toka. Zaradi nazornosti je izbran prikaz vektorjev na medsebojni oddaljenosti 40 x 40 pik. Poudariti velja, da je tokovna slika pri večjih bočnih prelivih zelo podobna, kar bo prikazano v nadaljevanju.



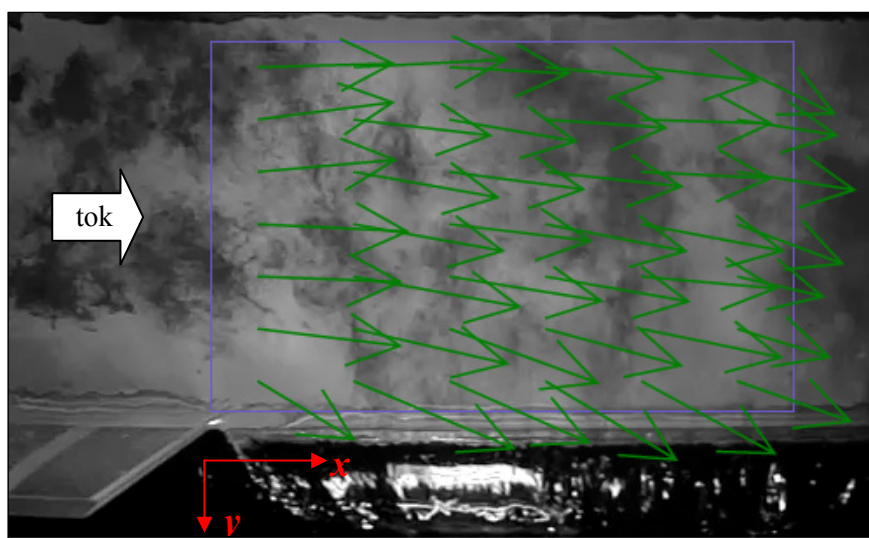
Slika 26: Tipično hitrostno polje v območju bočnega preliva, primer L10\_p7,5. (a) Merilna ravnina blizu dna glavnega korita ( $z_z = 1/3 p = 2,5$  cm), (b) merilna ravnina tik pod gladino ( $z_z = h - 0,5$  cm  $\approx 9,5$  cm).

Figure 26: Typical velocity field at side weir, case L10\_p7,5. (a) Observed plane near the main channel bed ( $z_z = 1/3 p = 2,5$  cm), (b) observed plane at the water surface ( $z_z = h - 0,5$  cm  $\approx 9,5$  cm).

V skladu s pričakovanji so vektorji hitrosti v ravninah pod nivojem krone bočnega preliva ( $z_z < p$ ) vzporedni vzdolžni osi glavnega korita, saj na teh globinah še ne prihaja do vpliva bočnega prelivanja. Vektorji hitrosti v višje ležečih ravninah ( $z_z \geq p$ ) se zaradi bočnega prelivanja usmerijo proti bočnemu

prelivu in blizu krone se njihova velikost poveča, saj je tam tok pospešen. Vzdolžne hitrosti se manjšajo z razdaljo od gladine navzdol, kakor tudi v smeri  $x$ , saj se pretok zaradi odlivanja zmanjšuje. Na gornodnem koncu bočnega preliva ( $x/L = 0$ ) lahko nastopi rahlo odlepljanje toka, na dolvodnem koncu bočnega preliva ( $x/L = 1$ ) pa se oblikujejo stoječi valovi, katerih obseg in amplituda sta odvisna od pretoka in višine spodnje vode. Dolvodno od bočnega preliva, ob steni, ki leži nasproti prelivne krone, se ob dnu glavnega korita oblikuje območje znatno nižjih hitrosti. Na omenjenem območju lahko ob zelo visoki poziciji dolvodnega jezua pride do rahlega vrtnčenja, ki je posledica izrazitega bočnega prelivanja. Curek bočnega odtoka se v splošnem vzdolž krone čedalje bolj odmika od vzdolžne osi glavnega korita, kar potrjuje tudi večanje razmerja komponent hitrosti  $v_b/u_b$  vzdolž krone, kot je prikazano kasneje.

Te trende potrjujejo merjenja hitrostnih polj na večjih fizičnih modelih, s širšim glavnim koritom in večjimi pretoki. Na naslednji sliki (Slika 27) so prikazani vektorji hitrosti za območje  $x/L \leq 0,75$  bočnega preliva B30\_L50\_p12 (var. Q20\_b), in sicer za opazovano ravnino v višini krone, tj.  $z_z = p$ .



Slika 27: Vektorji hitrosti v višini krone bočnega preliva L50\_p12. Kot barvilo je uporabljena vodna raztopina hipermangana (temno obarvane tokovne strukture na belem dnu glavnega korita).  
Figure 27: Velocity vectors in the plane  $z_z = p$  at the side weir L50\_p12. Aqueous solution of potassium permanganate used as a dye (dark coloured flow structures against white main channel bed).

Iz slike 27 je razvidno, da se hitrostni vektorji usmerjajo proti bočnemu prelivu in so v bližini krone bočnega preliva večji zaradi pospešitve toka, ter da so na dolvodnem robu prikazanega izbranega merilnega okna manjši kot na gornodnem koncu. Smer curka bočnega odtoka je na lokacijah  $x/L > 0,25$  odklonjena od osi glavnega korita za približno konstanten kot.

Treba je poudariti, da slika sicer prikazuje celotno širino glavnega korita, ne pa tudi celotne dolžine bočnega preliva. Prikazano je območje, za katerega ocenjujemo, da so rezultati izmerjenih hitrostnih polj veljavni. Izkazalo se je namreč, da se raztopina hipermangana, injecirana skozi tri cevke 30 cm gorvodno od  $x/L = 0$  (tj. zato da cevke ne vplivajo preveč na tokovno sliko), celo pri sorazmerno nizkih hitrostih (okoli 20 cm/s) vzdolž bočnega preliva postopoma razširi iz curka širine približno 1 mm na 5 do 10 cm visok sloj, kar v prerezih  $x/L > 0,75$  onemogoča natančno kvantifikacijo hitrostnih polj z uporabo obravnavane vizualizacijske metode.

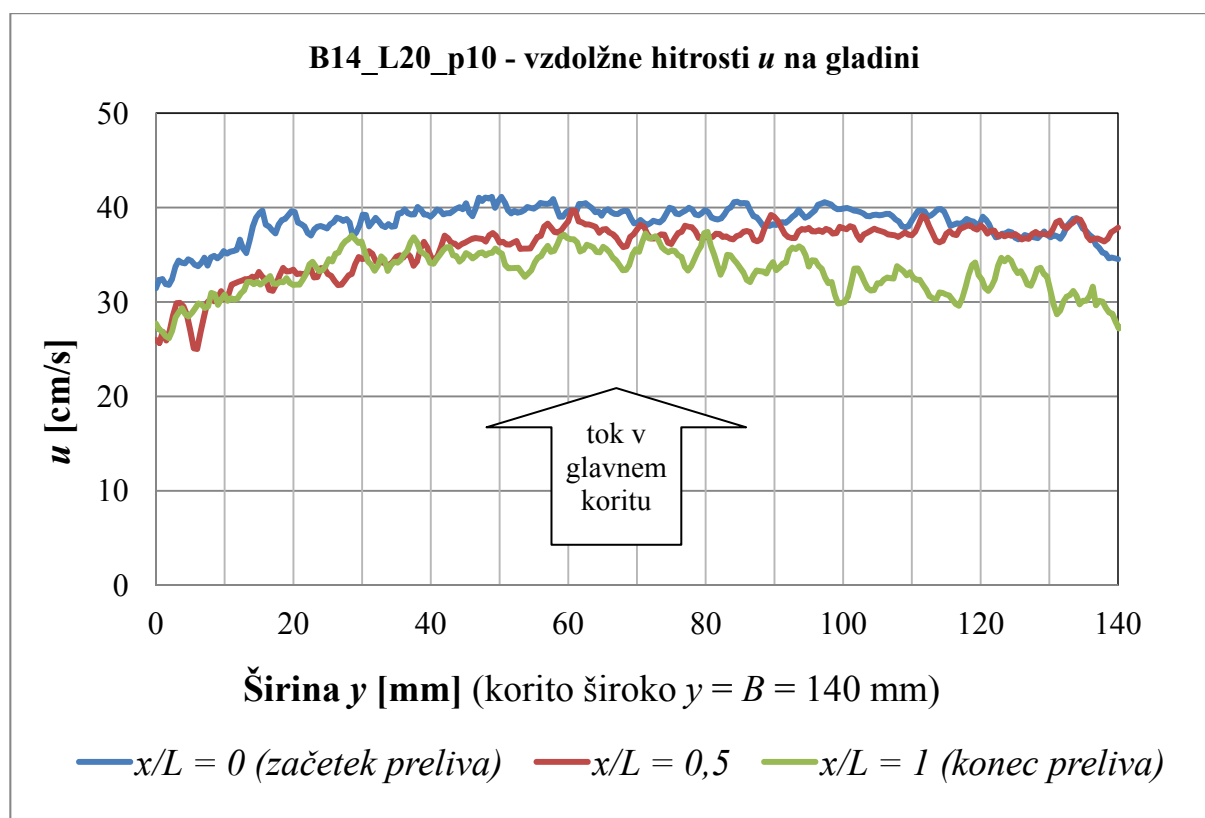
V zvezi s problematiko barvila naj ponovimo, da generiranje vodikovih mehurčkov z razpoložljivo opremo v širšem koritu ni bilo izvedljivo, po drugi strani pa bi opazovani tok tudi sloj mehurčkov verjetno podobno razpršil, še zlasti če bi merili primere z večjimi vzdolžnimi hitrostmi.

Zaradi opisanih težav so bila hitrostna polja v širšem koritu obravnavana v manjšem obsegu od načrtovanega, rezultati pa služijo le kot kontrola splošnih značilnosti, ugotovljenih na modelih KMTe. Poudarimo pa, da to za obravnavane primere bočnih prelivov v širšem koritu ne zmanjšuje pomena in uporabnosti izmerjenih vrednosti globin in pretokov, ki so ključne za formulacijo nove fenomenološke enačbe za  $C_d$ , kot bo opisano v poglavju 7.

V raziskavah bočnih prelivov drugih avtorjev so hitrostna polja merjena sorazmerno redko, in če že, potem točkovno in kontaktno. Redki objavljeni prikazi rezultatov izmerjenih hitrosti so omejeni na:

- prikaz izotah posameznih (maloštevilnih) prečnih prereзов, v El-Khashab in Smith (1976), Rosier (2007),
- diagrami spreminjanja vzdolžnih hitrosti po širini korita, v Hager in Volkart (1986), Lee in Holley (2002),
- (dokaj enostavna) 3D shema, v Hager (1987).

V tej disertaciji so hitrostna polja izmerjena brezkontaktno v posameznih horizontalnih ravninah in zato jih je kot taka tudi najprimerneje predstaviti. Priprava rezultatov za prikaz v obliki izotah v vertikalnih presečnih ravninah zahteva zamudno dodatno obdelavo izmerjenih vrednosti, ki poleg tega ni najbolj racionalna, saj je npr. vertikalni prerez z izo-linijami vzdolžnih komponent hitrosti manj informativen kot prikaz vektorjev hitrosti, na katerem so seveda zajete tudi prečne komponente hitrosti. Glede na to se pri eventualnem omejevanju na posamezno hitrostno komponento zdi bolj smiselno uporabiti grafe, kakršne sta uporabila tudi Lee in Holley (2002), in so za tipični primer analiziranih meritev te disertacije podani na sliki 28:

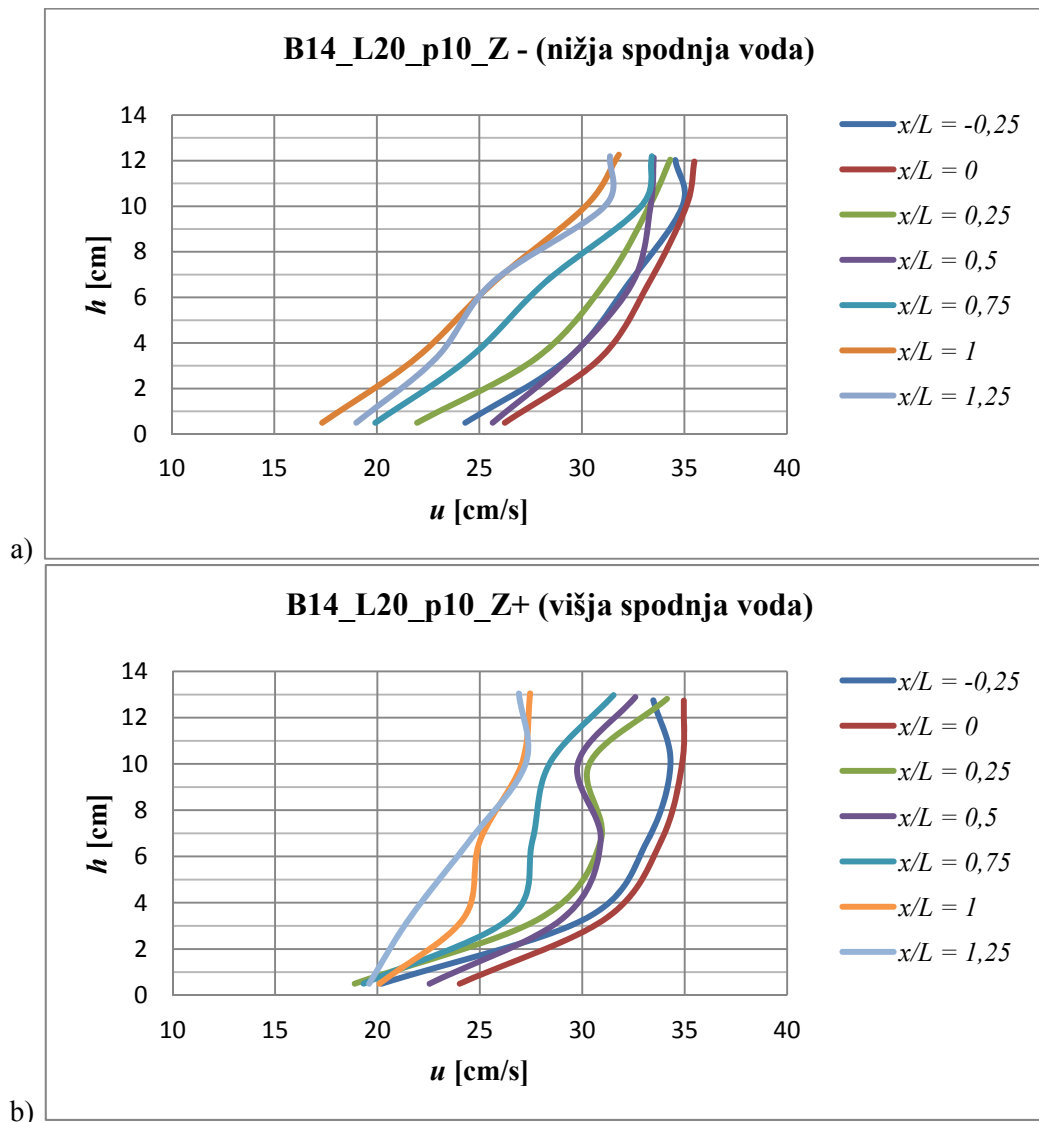


Slika 28: Spreminjanje vzdolžnih hitrosti po širini glavnega korita za primer B14\_L20\_p10  
Figure 28: Longitudinal velocities over the width of the main channel for case B14\_L20\_p10

Slika 28 je narejena iz rezultatov vizualizacijske metode (izhodna datoteka slednje je zapisana v formatu txt) hitro in brez dodatnih obdelav. Vsak od grafov sestoji iz 280 vrednosti  $u(y)$ , saj je na opazovani liniji, ki sega preko širine glavnega korita, izračunanih 280 vektorjev hitrosti. Ponovimo, da poprečne vrednosti  $u$  posameznega grafa  $u(y)$  predstavlja posamezno vrednost  $u$  iz preglednice 11.

## 6.2 Porazdelitev hitrosti po globini

Eden od običajnejših načinov prikaza izmerjenih hitrosti je prikaz vertikalne porazdelitve hitrosti v različnih prečnih prerezih glavnega korita (Slika 29):



Slika 29: Vertikalni profil vzdolžnih hitrosti  $u$  v glavnem koritu: (a) Primer B14\_L20\_p10\_Z+ (tj. višja spodnja voda), (b) primer B14\_L20\_p10\_Z- (tj. nižja spodnja voda)

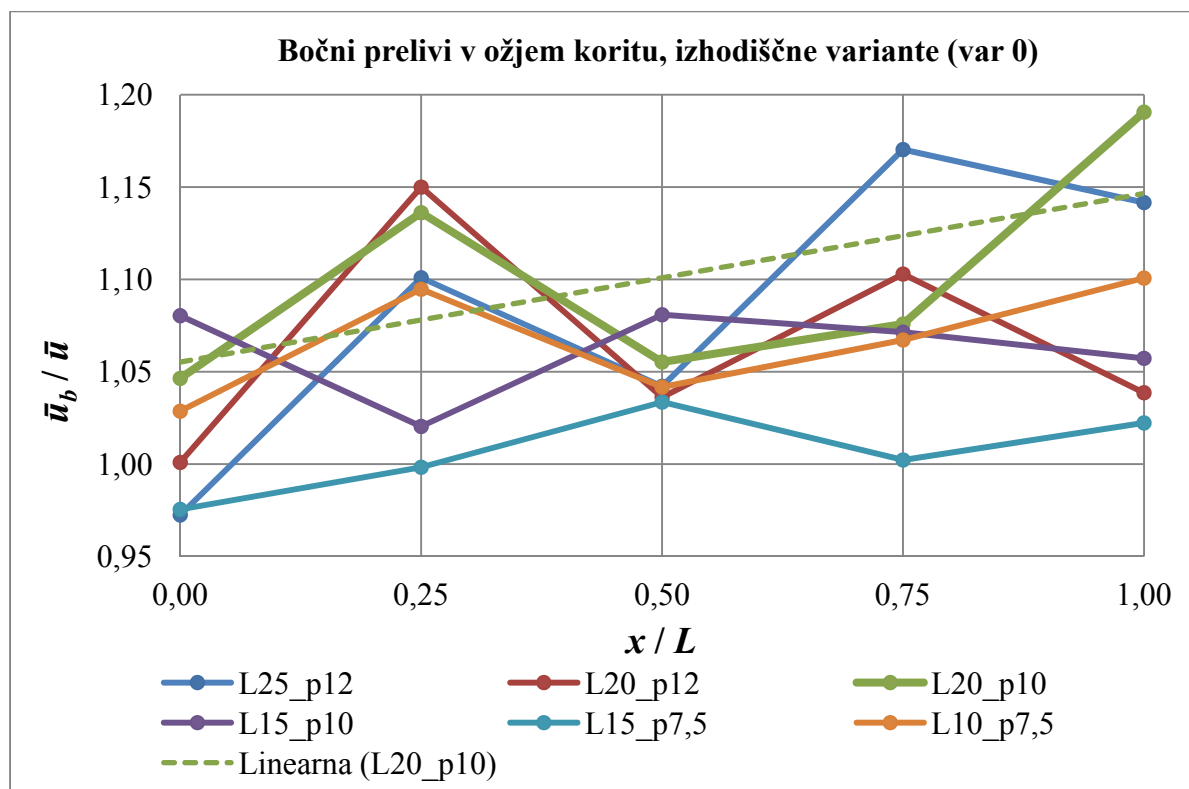
Figure 29: Vertical profile of longitudinal velocities  $u$  in the main channel: (a) Case B14\_L20\_p10\_Z+ (higher tailwater level), (b) case B14\_L20\_p10\_Z- (lower tailwater level)

Razvidno je, da vzdolžne hitrosti padajo v smeri  $x$  (tj. z večanjem  $x/L$ ), kakor tudi od gladine proti dnu. Krivulje  $u(z)$  imajo približno parabolično obliko, kakršna je značilna za ravne odseke toka s prosto gladino. Največje vzdolžne hitrosti so na gorvodnem koncu bočnega preliva, tj. v prečnem prerezu  $x/L = 0$ , kjer očitno pričetek prelivanja povzroči pospešitev toka, saj so hitrosti v prerezu  $x/L = 0$  večje kot v gorvodnem  $x/L = -0,25$ . Višja spodnja voda (oznaka Z+) povzroči dvig gladine vzdolž bočnega preliva glede na primer z nižjo spodnjo vodo (oznaka Z-). Nadalje višja spodnja voda z vplivom zajezbe povzroči zmanjšanje  $u$ , ki je izrazitejša na območju nad višino krone preliva (za dani primer na sliki  $z \geq 10$  cm). Na sliki 29 je možno razbrati tudi globino toka, in sicer iz vrednosti  $z$ , do katere sega posamezni profil vzdolžnih hitrosti  $u$ . Ob ostenju nastopi mejna plast, kjer meritve niso bile izvajane.



### 6.3 Razmerje vzdolžne komponente hitrosti bočnega odtoka in poprečne hitrosti toka v glavnem koritu

Za primerjavo z rezultati drugih avtorjev in za opredelitev glede primernosti energijskega pristopa, oz. pristopa z gibalno količino je ključnega pomena določitev vrednosti razmerja  $\bar{u}_b/\bar{u}$  v območju bočnega preliva. Tipičen primer spreminjanja tega razmerja vzdolž bočnega preliva je prikazan na naslednji sliki (Slika 30). Zaradi nazornosti so na abscisi vrednosti  $x/L$  (tj. lokacija vzdolž bočnega preliva), in ne npr.  $h/p$ , saj so slednje funkcija lokacije  $x/L$ , kajti z naraščanjem  $x/L$  se za posamezno varianto geometrije bočnega preliva in hidravličnih robnih pogojev pri mirnem režimu toka povečuje tudi  $h/p$ .



Slika 30: Spreminjanje razmerja hitrosti  $\bar{u}_b/\bar{u}$  vzdolž bočnega preliva za izhodiščne variante dotoka in spodnje vode (oznaka var 0) za različne dimenzije bočnih prelivov v ožjem koritu  
Figure 30: Variation of ratio  $\bar{u}_b/\bar{u}$  along the side weir for variants "var 0" in narrower channel

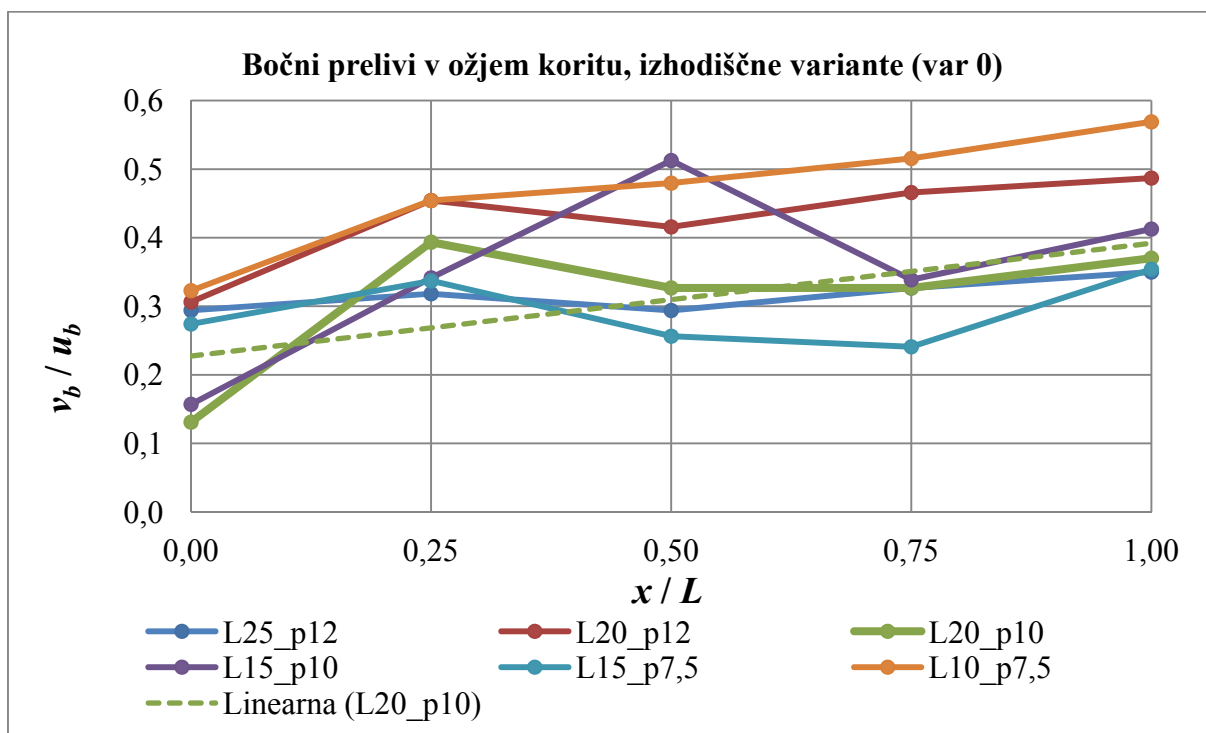
Iz slike 30 je razvidno, da vrednosti razmerja  $\bar{u}_b/\bar{u}$  v veliki večini primerov presegajo vrednost 1, in da rezultati izkazujejo trend naraščanja  $\bar{u}_b/\bar{u}$  vzdolž krone bočnega preliva. V prečnem prerezu na gorvodnem koncu bočnega preliva ( $x/L = 0$ ) ta razmerja znašajo od 0,95 do 1,08, na dolvodnem koncu bočnega preliva ( $x/L = 1$ ) pa od 1,03 do 1,19. Izmerjeno naraščanje  $\bar{u}_b/\bar{u}$  vzdolž krone bočnega preliva je torej v nasprotju s predpostavko  $\bar{u}_b = \bar{u}$ , ki jo uporablja energijski pristop, in skladen s predpostavko  $\bar{u}_b > \bar{u}$ , ki jo uporablja pristop z gibalno količino.

Izmerjena neenakomernost hitrostnih polj, ki se povečuje vzdolž bočnega preliva, je skladna z ugotovitvami El-Khashaba in Smitha (1976), na katere se sklicujejo tudi May in sod. (2003). Poudariti pa je treba, da so slednji pri oblikovanju svojega postopka za dimenzioniranje predpostavili zvezo  $\bar{u}_b/\bar{u} = \text{konst.} = 1,84$ , medtem ko za vse naše meritve velja, da se to razmerje v območju bočnega preliva spreminja in znaša  $\bar{u}_b/\bar{u} \leq 1,25$  (z izjemo ene same meritve, in sicer za primer B14\_L20\_p10\_Z-, kjer je izmerjena vrednosti v prečnem prerezu  $x/L = 1$  segala do 1,30).

Opravljenе meritve so dale pomemben rezultat: predpostavka  $\bar{u}_b = \bar{u}$  pri energijskem pristopu ni ustrežna, prav tako pa je tudi predlagana konstantna vrednost  $\bar{u}_b/\bar{u} = 1,84$  prevelika.

## 6.4 Usmerjenost curka bočnega odtoka

Ko je govora o razmerjih hitrosti, lahko vsaj na kratko omenimo še meritve razmerij  $v_b/u_b$ , tj. razmerja korigiranih hitrosti toka, ki se preliva preko bočnega preliva. Te hitrosti so s kontaktnimi merilniki hitrosti težko merljive, vizualizacijska metoda pa je tu pokazala svoje prednosti, saj omogoča natančno ovrednotenje. Razmerje  $v_b/u_b$  je dejansko tangens smeri bočnega curka. Meritve so pokazale, da se kot odklona bočnega curka od vzdolžne osi glavnega korita (in torej tudi od linije krone bočnega preliva) z naraščanjem  $x/L$  povečuje (Slika 31). To je skladno s pričakovanji in z rezultati iz literature.



Slika 31: Spreminjanje razmerja hitrosti  $v_b/u_b$  vzdolž bočnega preliva

Figure 31: Variation of ratio  $v_b/u_b$  along the side weir

Iz slike 31 je razvidno, da je trend razmerja  $v_b/u_b$  naraščajoč. Kot odklona bočnega curka od smeri  $x$  se začne povečevati takoj za gorvodnim robom bočnega preliva in se hitro povečuje do lokacije  $x/L = 0,25$ , nato pa se hitrost naraščanja  $v_b/u_b$  zmanjša in v večini primerov ustali.

## 6.5 Vrednosti Boussinesqovega in Coriolisovega koeficienta

Iz rezultirajočih korigiranih hitrosti (Preglednica 16) se lahko izračuna še vrednosti Boussinesqovega koeficienta  $\alpha_B$  in Coriolisovega koeficienta  $\alpha_C$  (Preglednica 17).

Iz preglednice 17 je razvidno, da so vrednosti vseh koeficientov  $\alpha_B$  in  $\alpha_C$  večje od ena, kar pomeni, da je porazdelitev hitrosti neenakomerna. V območju prikazanega tipičnega primera bočnega preliva vrednosti  $\alpha_C$  znašajo od 1,02 do 1,08, vrednosti  $\alpha_B$  pa so pričakovano manjše in znašajo od 1,01 do 1,03. Meritve nadalje kažejo, da so vrednosti koeficientov  $\alpha_B$  in  $\alpha_C$  v prečnih prerezih, ki so 0,25  $L$  gorvodno oz. dolvodno od bočnega preliva, praktično enake vrednostim  $\alpha_B$  in  $\alpha_C$  za prereze  $x/L = 0$ , oz.  $x/L = 1$ .

Preglednica 17: Izračunani koeficienti  $\alpha_B$  in  $\alpha_C$  za primer B14\_L20\_p10 – vzorčni prikazTable 17: Calculated values of coefficients  $\alpha_B$  and  $\alpha_C$  for case B14\_L20\_p10

	$x/L$	$h-p$	$x/L$	$h-p$	$x/L$	$h-p$	$x/L$	$h-p$	$x/L$	$h-p$	$x/L$	$h-p$	$x/L$	$h-p$
$p$ [cm]	-0,25	[cm]	0	[cm]	0,25	[cm]	0,50	[cm]	0,75	[cm]	1	[cm]	1,25	[cm]
10		2,32		2,44		2,45		2,45		2,53		2,60		2,59
$\Delta z_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^2 \Delta A_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^2 \Delta A_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^2 \Delta A_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^2 \Delta A_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^2 \Delta A_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^2 \Delta A_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^2 \Delta A_i$
$2/3(h-p)$	1,55	26409,80	1,63	31197,00	1,63	28606,20	1,63	27277,28	1,68	26871,06	1,73	23520,09	1,73	23526,44
$(h-p)/3 + p/6$	2,44	37542,62	2,48	41507,17	2,48	37350,65	2,48	35939,00	2,51	34945,15	2,53	23863,82	2,53	27409,81
$p/3$	3,33	43435,79	3,33	56313,00	3,33	44359,93	3,33	49126,55	3,33	46617,56	3,33	31833,27	3,33	31912,01
$p/3$	3,33	38150,62	3,33	49892,72	3,33	32465,74	3,33	43877,01	3,33	38930,18	3,33	22769,80	3,33	27733,02
$p/6$	1,67	10692,12	1,67	15828,79	1,67	9079,38	1,67	14953,23	1,67	13769,30	1,67	9660,04	1,67	9333,33
	$\alpha_B$	1,02		1,01		1,03		1,01		1,01		1,02		1,01
$\Delta z_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^3 \Delta A_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^3 \Delta A_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^3 \Delta A_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^3 \Delta A_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^3 \Delta A_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^3 \Delta A_i$	$\Delta z_i$ [cm]	$u_i^3 \Delta A_i$
$2/3(h-p)$	1,55	922327,83	1,63	1154664,89	1,63	1012820,17	1,63	942106,88	1,68	907357,07	1,73	732239,88	1,73	733949,45
$(h-p)/3 + p/6$	2,44	1244594,88	2,48	1435141,85	2,48	1224648,47	2,48	1155493,18	2,51	1102360,53	2,53	619013,11	2,53	762491,10
$p/3$	3,33	1325159,83	3,33	1956183,76	3,33	1367675,13	3,33	1593936,52	3,33	1473400,83	3,33	831416,04	3,33	834502,98
$p/3$	3,33	1090809,71	3,33	1631369,45	3,33	856317,19	3,33	1345402,21	3,33	1124413,84	3,33	502962,42	3,33	676071,08
$p/6$	1,67	228879,69	1,67	412271,19	1,67	179100,04	1,67	378542,03	1,67	334487,07	1,67	196553,14	1,67	186666,67
	$\alpha_C$	1,05		1,03		1,08		1,02		1,02		1,05		1,04

Izmerjene vrednosti  $\alpha_C$  so v splošnem skladne z enačbo Hagerja (1982), tj. z enačbo (63), ki jo je privzel tudi Venutelli (2008). V preglednici 18 je primerjava med vrednostmi koeficientov  $\alpha_C$  na gorvodnem in dolvodnem koncu bočnega preliva B14\_L20\_p10, izračunanimi po Hagerjevem modelu in iz naših meritev hitrosti:

Preglednica 18: Primerjava izmerjenih  $\alpha_C$  in vrednosti po Hagerjevem modeluTable 18: Comparison of measured  $\alpha_C$  and values according to Hager's model

	Hagerjev model		naši rezultati		razlika [%]	
var.	$\alpha_{C,1}$	$\alpha_{C,2}$	$\alpha_{C,1}$	$\alpha_{C,2}$	$\alpha_{C,1}$	$\alpha_{C,2}$
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	hitrostna polja niso bila merjena			
Q+*	1,03	1,05				
Z-*	1,02	1,04				
Z+*	1,03	1,07				

Izmerjene vrednosti  $\alpha_B$  so izrazito nižje od predpostavke May in sod. (2003), ki so privzeli konstantno vrednost  $\alpha_B = 1,23$ . Tako visoki vrednosti  $\alpha_B$  bi ustrezala vrednost  $\alpha_C = 1,66$  (kot je bilo razloženo v poglavju 3.3). Tolikšna vrednost koeficienta  $\alpha_B$  je po naši oceni previsoka. Nenazadnje je tudi Hager (1983) ugotovil, da se  $\alpha_B$  lahko aproksimira z vrednostjo 1, kar je bilo potrjeno z našimi meritvami.

## 7 NOVA ENAČBA PRETOČNEGA KOEFICIENTA BOČNEGA PRELIVA

Kot je bilo že povedano, je bil glavni cilj dosedanjih raziskav bočnih prelivov največkrat določitev enačbe pretočnega koeficienta  $C_d$  za dimenzioniranje takih prelivov v praksi. To je bil tudi eden od ciljev te disertacije. V tem poglavju predstavljena nova enačba koeficienta pretoka sicer ni povsem neposredno razvidna iz naslova disertacije, a prinaša najbolj izrazit izvorni prispevek disertacije k znanosti.

### 7.1 Utemeljitev potrebe po določitvi nove enačbe

Kar uvodoma poudarimo, da za določitev (nove) enačbe za  $C_d$  načeloma ni treba izvesti tako obsežnih in tako natančnih meritev hitrostnih polj kot je bilo pokazano v prejšnjih poglavjih. V skladu z zahtevano enostavnostjo in uporabnostjo za dimenzioniranje objektov v praksi so enačbe za  $C_d$  v splošnem zasnovane tako, da so vrednosti  $C_d$  bolj kot od hitrostnih polj odvisne od bistveno hitreje določljivih geometrijskih parametrov preliva (dolžina, višina praga itd.). Kot bo pokazano v nadaljevanju, je enačbo za  $C_d$  možno formulirati tudi brez členov, ki bi bili povezani s parametri toka, vendar to ne pomeni, da raziskava hitrostnih polj v območju bočnega preliva nima uporabne vrednosti. Prav nasprotno! V prejšnjem poglavju obravnavani parametri, povezani s hitrostmi (tj.  $\bar{u}_b/\bar{u}$ ,  $\alpha_B$ ,  $\alpha_C$ ) nastopajo posredno v enačbah za izračun poteka gladin (in s tem prelivnih višin!) vzdolž bočnega preliva, pa tudi v samih enačbah za  $C_d$  je pogosto vključeno Froudovo število, ki v svoji definiciji vsebuje lastnosti toka.

Nadalje velja poudariti še to, da v primeru bočnih prelivov vsaka enačba za  $C_d$  predstavlja zvezo, ki naj kar se da dobro opiše ugotovitve meritev oz. opazovanj, vendar to še ne pomeni, da je taka enačba za  $C_d$  točna za vsako kombinacijo parametrov preliva. Tok preko bočnega preliva je kompleksen hidravlični problem, odvisen od cele vrste parametrov, ki jih enačbe za  $C_d$  različnih avtorjev upoštevajo različno uspešno. Večina enačb za  $C_d$  bočnih prelivov praviloma velja za dokaj ozek razpon parametrov, primerjava med enačbami različnih avtorjev pa pokaže, da dajejo za iste vhodne podatke izrazito različne vrednosti  $C_d$ ! Primer tega prikazuje naslednja preglednica izračunanih  $C_d$  za primer preliva B14\_L20\_p10 (Preglednica 19):

Preglednica 19: Vrednosti koeficientov  $C_d$  po različnih avtorjih – upoštevani rezultati meritev s preliva B14\_20\_p10

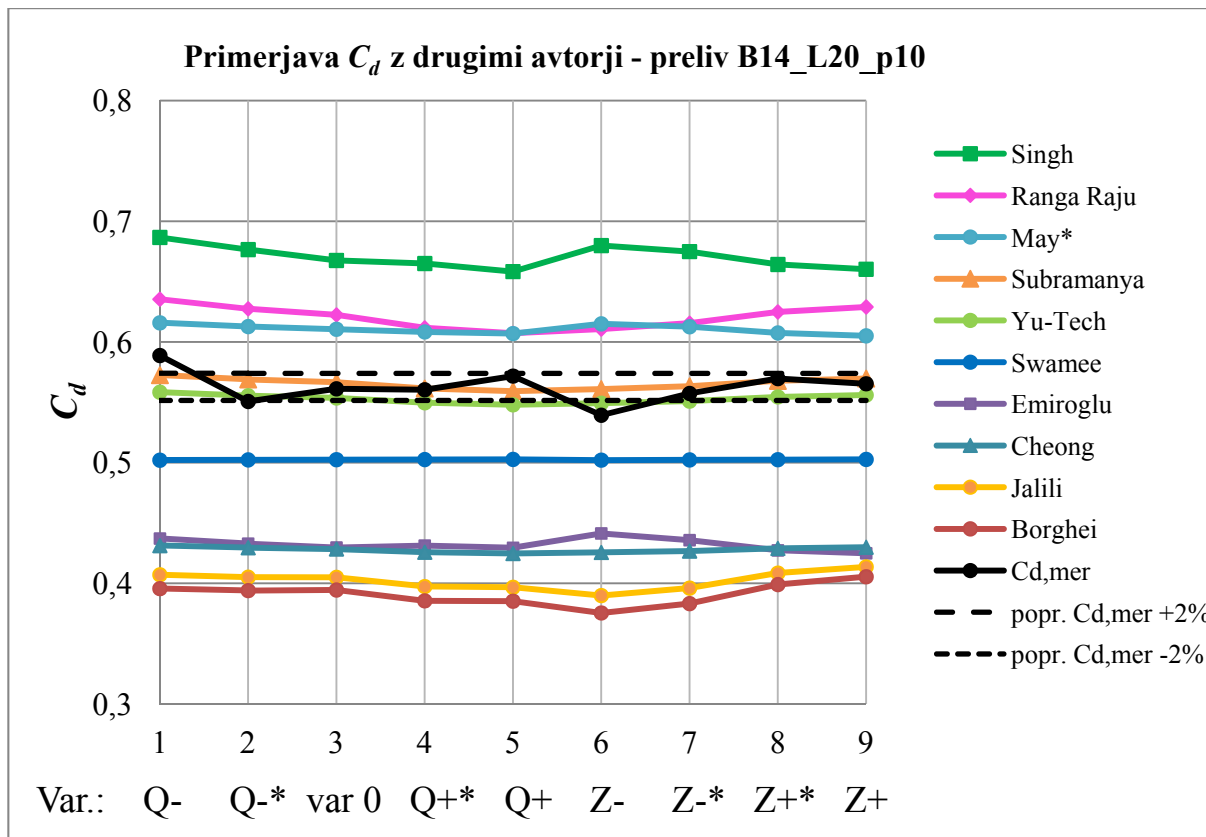
Table 19: Values of  $C_d$  by various authors – considered are results of experiments from B14\_L20\_p10

$C_d$ za ostrorobi pravokotni bočni preliv po različnih avtorjih - preliv B14_L20_p10												
var.	Subramanya	Yu-Tech	Ranga Raju	Hager	Cheong	Singh	Jalili	Borghei	Swamee	Emiroglu	May*	$C_{d,mer}$
1 Q-	0,57	0,56	0,64	0,47	0,43	0,69	0,41	0,40	0,50	0,44	0,62	0,59
2 Q-*	0,57	0,56	0,63	0,46	0,43	0,68	0,41	0,39	0,50	0,43	0,61	0,55
3 0	0,57	0,55	0,62	0,46	0,43	0,67	0,41	0,39	0,50	0,43	0,61	0,56
4 Q+*	0,56	0,55	0,61	0,46	0,43	0,67	0,40	0,39	0,50	0,43	0,61	0,56
5 Q+	0,56	0,55	0,61	0,46	0,42	0,66	0,40	0,39	0,50	0,43	0,61	0,57
6 Z-	0,56	0,55	0,61	0,46	0,43	0,68	0,39	0,38	0,50	0,44	0,62	0,54
7 Z-*	0,56	0,55	0,62	0,46	0,43	0,67	0,40	0,38	0,50	0,44	0,61	0,56
8 Z+*	0,57	0,55	0,62	0,46	0,43	0,66	0,41	0,40	0,50	0,43	0,61	0,57
9 Z+	0,57	0,56	0,63	0,47	0,43	0,66	0,41	0,41	0,50	0,42	0,61	0,57

Op.: May\* pomeni, da gre za vrednost  $C_{DS}$  iz enačbe (65), ki pa je zaradi primerjave pomnožena s 1,06 (glej enačbo 9).

Stolpec  $C_{d,mer}$  je izračunan po enačbi (6), v kateri upoštevamo vrednost  $h$  v členu  $(h-p)$  kot poprečne izmerjenih globin  $h_1^*$ ,  $h_1$ ,  $h_{L/2}$ ,  $h_2$  in  $h_2^*$ , pri čemer so te vrednosti izmerjene v osi glavnega korita tik pred gorvodnim koncem bočnega preliva, na gorvodnem koncu bočnega preliva, na sredini dolžine krone, na dolvodnem koncu bočnega preliva in tik za dolvodnim koncem bočnega preliva. Vrednosti

iz preglednice 19 so grafično prikazane na sliki 32, kjer je vrisana še poprečna vrednost od  $C_{d,mer}$  z merilno negotovostjo  $\pm 2\%$ . Na sliki 32 so na abscisi zaporedne številke variant iz preglednice 19.



Slika 32: Izmerjeni  $C_d$  v primerjavi z vrednostmi, izračunanimi po različnih enačbah  
Figure 32: Measured  $C_d$  compared with values, calculated from various equations

Op.: V legendi grafov so navedeni le prvi avtorji posameznih raziskav. May\* pomeni, da gre za enačbo za  $C_{DS}$ , pomnoženo s 1,06 (glej enačbo 9).

Za vrednosti  $C_d$  iz preglednice 19, izračunane po enačbah različnih avtorjev za iste parametre preliva, za katere so bili dobljeni rezultati naših meritev, očitno velja sledeče:

- vrednosti  $C_d$  so za isto geometrijo bočnega preliva in za različne dotoke ter obravnavane vplive spodnje vode večinoma konstantne,
- vrednosti  $C_d$  večine avtorjev se razlikujejo od  $C_{d,mer}$ , ki so izračunane iz merjenih veličin po splošni enačbi,
- vrednosti  $C_d$  po enačbah različnih avtorjev se gibljejo od 0,38 do 0,71 – kar je za potrebe dimenzioniranja objektov za izgradnjo seveda izrazito prevelika razlika. O podobnih in celo večjih razlikah poročajo tudi Emiroglu in sod. (2011), ki pokažejo, da enačbe istih avtorjev, kot jih navaja preglednica 19, dajejo za  $L/B = 0,3$  vrednosti  $C_d$  v razponu od 0,17 do 0,83!
- Iz ugotovitev Emiroglu in sod. (2011) je razvidno, da najmanjše vrednosti koeficientov  $C_d$  daje enačba Borghei in sod. (1999), kar je pokazala tudi naša analiza.

Zanimivo je, da so Borghei in sod. (1999) edini, ki v enačbi za  $C_d$  bočnega preliva upoštevajo tudi vpliv  $L/B$  (podobno kot v nadaljevanju naša raziskava), in da njihove ugotovitve, tako kot to velja tudi za Swamee in sod. (1994), sodijo med novejšje objave s tega področja.

Takšne razlike med avtorji so vzrok, da je eden od pomembnih ciljev te disertacije oblikovanje nove enačbe za  $C_d$ , za katero naj velja:

- je enostavna, česar npr. za enačbo Emiroglu in sod. (2011) ne moremo reči,

- je uporabna za podoben razpon brezdimenzijskih parametrov bočnega preliva, kot so navedeni pri drugih raziskavah, in dodatno velja tudi za sorazmerno ozka korita, kakršna doslej še niso bila raziskana, pa so dodana na podlagi naših raziskav,
- v njej je, v brezdimenzijskih členih, zajet tudi vpliv oddaljenosti in višine dolvodnega jezua za uravnavanje vpliva spodnje vode, kar so doslej deloma upoštevali le May in sod. (2003), pa še to le posredno, tj. preko predpostavke, da načrtovalec bočnega preliva pozna globino spodnje vode.

Na podlagi naših raziskav je kot nov prispevek k znanosti v nadaljevanju predstavljena nova enačba za  $C_d$ , ki izpolnjuje zgoraj navedene kriterije, je uporabna tako za manjše bočne prelive (npr. za razdeljevanje uporabnikom vode v namakalnih sistemih), kakor tudi v primerih večjih bočnih prelivov, ki so sorazmerno blizu dolvodnega jezua, kot je npr. predvideno v eni od variant v aktualnem projektu razbremenilnega objekta in pregrade HE na spodnji Savi.

## 7.2 Določitev nove enačbe za koeficient pretoka bočnega preliva

Novo fenomenološko enačbo za  $C_d$  smo določili z uporabo brezdimenzijske analize, ki je opisana v poglavju 2.4, izhajali pa smo iz naslednjega potenčnega zakona:

$$C_{d,mer} = K \left( \frac{h_{zV}}{p} \right)^\gamma \left( \frac{h_z}{p} \right)^\delta \left( \frac{z_{jez}}{p} \right)^\varepsilon \left( \frac{L}{L_{jez}} \right)^\zeta \left( \frac{B}{L} \right)^\eta \quad (82)$$

kjer so:

$K$  iskana (neznana) konstanta,

$\gamma, \dots, \eta$  iskani (neznani) eksponenti,

$h_{zV}$  globina dotoka, merjena v osi glavnega korita gorvodno, izven območja vpliva bočnega preliva,

$z_{jez}$  višina praga dolvodnega jezua za uravnavanje višine spodnje vode,

$L_{jez}$  oddaljenost dolvodnega jezua od dolvodnega konca bočnega preliva,

$B, L, p$  že znane geometrijske lastnosti preliva.

Med iskanjem optimalne oblike nove enačbe za  $C_d$  se je izkazalo, da v njej lahko nastopajo tudi drugačni in manjštevlni brezdimenzijski členi, pri čemer se nabor izmerjenih parametrov s tako enačbo opiše podobno uspešno. Navedeni nastavek je bil namenoma izbran tako, da v brezdimenzijskih členih enačbe (82) nastopajo veličine, ki opredeljujejo glavne geometrijske in hidravlične značilnosti bočnega preliva, *hkrati* pa so primerne za dimenzioniranje bočnega preliva z vnaprej znanimi chodnimi podatki.

V predpostavljenem nastavku so neznanke  $K$  in eksponenti  $\gamma$  do  $\eta$ , ki nastopajo ob brezdimenzijskih razmerjih merjenih vrednosti v oklepajih. Ko vstavimo izmerjene vrednosti, dobimo sistem nelinearnih enačb za  $\gamma$  do  $\eta$ . V nadaljevanju izvedemo logaritmiranje (ln), da dobimo sistem linearnih enačb za  $\gamma$  do  $\eta$ , ki je v splošnem lažje rešljiv od nelinearnega sistema. Tako dobimo matrični sistem  $\mathbf{AX} = \mathbf{b}$ , kjer je  $\mathbf{A}$  matrika naravnih logaritmov posameznih razmerij izmerjenih veličin in konstante  $K$ , na desni strani pa je  $\mathbf{b}$  matrika naravnih logaritmov vrednosti  $C_{d,mer}$ . Rezultat z Matlab orodjem izvedenega postopka so poleg izračunanih neznank tudi vrednosti  $C_{d,rač}$ , ki so za dane izmerjene vrednosti in izračunane neznanke kar najbolj podobne  $C_{d,mer}$ .

Vseh izmerjenih variant parametrov bočnega preliva je 81 (Preglednica 20). V sistem enačb je za doseganje boljše korelacije med  $C_{d,mer}$  in  $C_{d,rač}$  zajetih 60 variant, pri čemer vsaka prinaša svojo enačbo v sistem enačb. Izločanje variant je potekalo za vsak bočni preliv posebej, in sicer tako, da so bile izločene variante, katerih vrednosti  $C_{d,mer}$  so opazno odstopale od poprečnih  $C_{d,mer}$  za posamezni preliv. Tak pristop podpira tudi dejstvo, da enačbe vseh avtorjev dajejo za variante na posameznem bočnem prelivu vrednosti  $C_d$  z majhnim standardnim odklonom. Pri večini prelivov je bila tako izločena le po

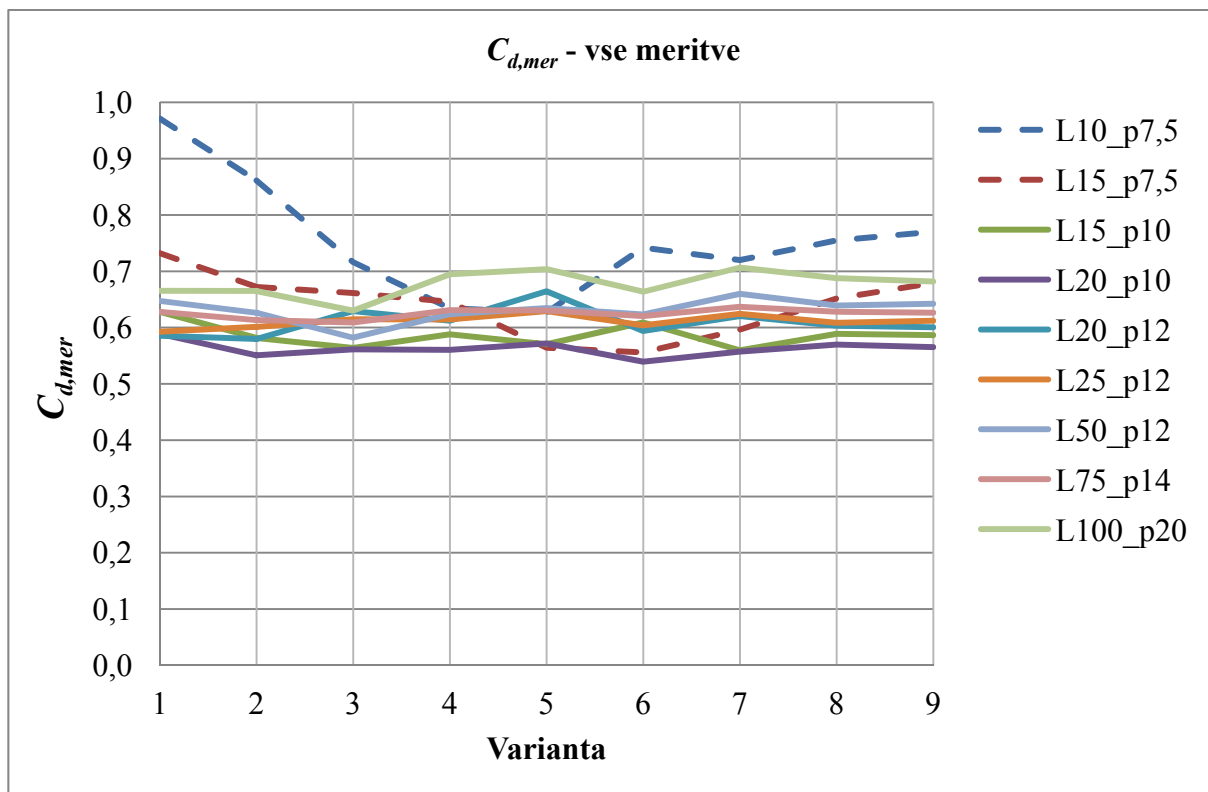
ena varianta, izrazitejša selekcija pa je bila potrebna pri prelivih L10\_p7,5 in L15\_p7,5. Od skupno 21 izločenih variant jih je kar 15 pripadalo omenjenima prelivoma.

Preglednica 20: Vrednosti  $C_{d,mer}$  za vse izmerjene variante  
Table 20: Values  $C_{d,mer}$  for all measured variants

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

Iz preglednice 20 je razvidno, da največji standardni deviaciji vrednosti  $C_{d,mer}$  nastopata pri najmanjših dveh bočnih prelivih (tj. pri prelivu L10\_p7,5 in L15\_p7,5), kjer znašata 0,107 oz. 0,057, medtem ko se pri ostalih prelivih vrednosti STDEV gibljejo od 0,009 do 0,026. Med meritvami na najmanjših dveh bočnih prelivih k znatnemu raztrosu vrednosti  $C_{d,mer}$  največ prispevata varianti Q- in Q+ (torej vpliv spreminjanja dotoka).

Preglednica 20 je grafično predstavljena na sliki 33. Iz slike 33 je razvidno, da je odstopanje od konstantne vrednosti  $C_{d,mer}$  največje pri bočnih prelivih L10\_p7,5 in L15\_p7,5. Ker gre za najmanjša izmed obravnavanih fizičnih modelov bočnih prelivov, je možno, da to nakazuje učinek merila oz. neko še neraziskano posebnost kratkih in nizkih bočnih prelivov.



Slika 33: Vrednosti  $C_{d,mer}$  vseh eksperimentov (variante parametrov preliva po preglednici 20)  
Figure 33: Values  $C_{d,mer}$  from all experiments (variants of parameters according to Table 20)

Ko izvedemo izločitev variant, je velikost matrike  $A$  enaka  $60 \times 6$ . Sistem se reši numerično, z Matlab orodjem, po Gaussovi metodi. Iz dobljenega linearnega sistema enačb dobimo naslednje vrednosti neznanek v enačbi (82):  $\gamma = 1,2672$ ;  $\delta = -1,588$ ;  $\varepsilon = 0,0374$ ;  $\zeta = 0,1867$ ;  $\eta = 0,2265$  in  $K = 0,9738$ .

Nova enačba za pretočni koeficient ostrorobega pravokotnega bočnega preliva v mirnem režimu toka se torej glasi:

$$C_d = 0,9738 \left(\frac{h_{zV}}{p}\right)^{1,2672} \left(\frac{h_2}{p}\right)^{-1,588} \left(\frac{z_{jez}}{p}\right)^{0,0374} \left(\frac{L}{L_{jez}}\right)^{0,1867} \left(\frac{B}{L}\right)^{0,2265} \quad (83)$$

V členu  $h_{zV}/p$  je posredno zajet vpliv dotočnih razmer, v členu  $h_2/p$  pa vpliv razmer na dolvodnem koncu, ki so pri mirnem režimu toka ključnega pomena. Člena  $z_{jez}/p$  in  $L/L_{jez}$  podajata spodnji robni pogoj, tj. vpliv višine in oddaljenosti jezua dolvodno od bočnega preliva. V členu  $B/L$  je upoštevan vpliv širine glavnega korita. Preostale značilnosti, ki jih omenjeni členi ne zajamejo dovolj dobro, so podane s konstanto  $K$ .

### 7.3 Ovrednotenje nove enačbe za koeficient pretoka bočnega preliva

Enačba (83) je bila po opisanem postopku dobljena z upoštevanjem precej obsežnega nabora meritev, za variante različno velikih ostrorobih pravokotnih bočnih prelivov, tako za ozka, kakor tudi širša glavna korita, in za različne kombinacije dotoka ter višine spodnje vode pri mirnem režimu toka.

Vrednosti konstante  $K$  in eksponentov  $\gamma$  do  $\eta$  so istega velikostnega reda, vse med  $-1,6$  in  $1,3$  - kar je podobno vrednostim konstante  $2/3$  in eksponenta  $3/2$  v splošni enačbi bočnih pravokotnih prelivov (enačba (6) za specifični pretok) in v standardizirani enačbi za pretok preko merilnega čelnega pravokotnega preliva (enačba (77) po Rehbocku). Nadalje je pomembno tudi to, da je konstanta  $K$ , ki je v vlogi korekcijskega faktorja, praktično enaka 1. Vse navedeno je dober pokazatelj, da predlagana nova enačba dobro opisuje trende oz. zakonitosti, ki jih izkazujejo rezultati meritev.

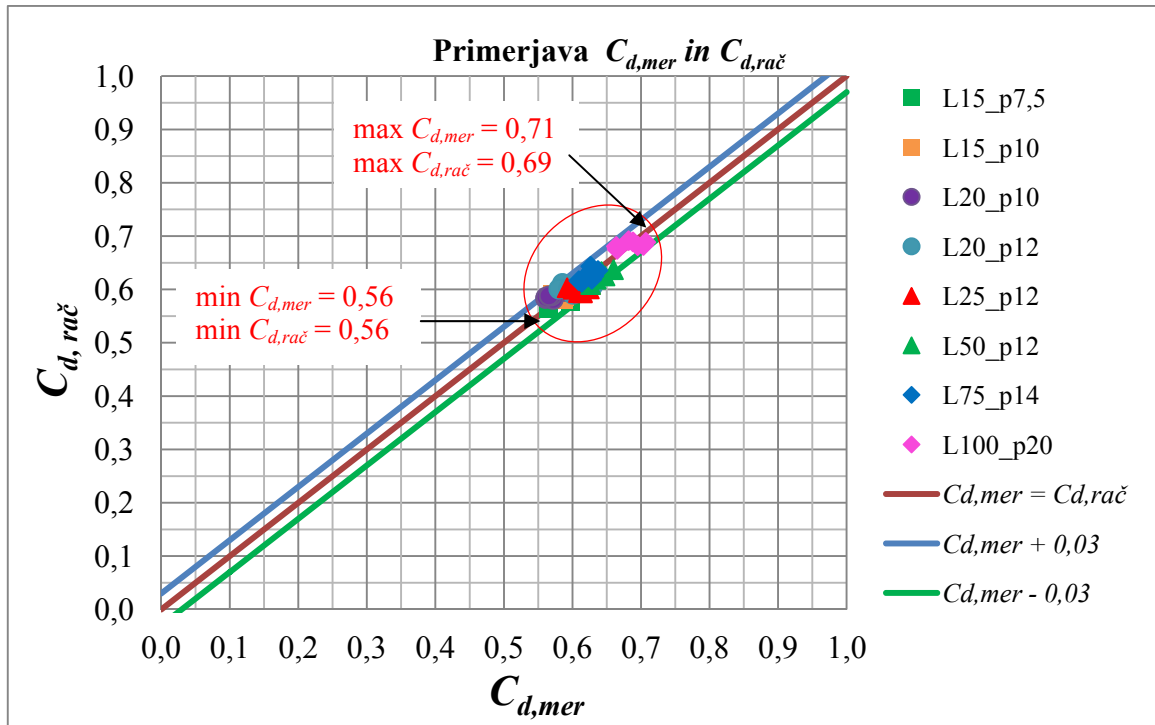
Predlagana nova enačba se od enačb  $C_d$  drugih avtorjev (Preglednica 2) razlikuje predvsem v naslednjem:

- $C_d$  je podan kot produkt, ne pa kot vsota oz. razlika posameznih členov, odšteti od neke konstante, določene v procesu iskanja enačbe, ki najbolje opiše rezultate meritev,
- enačba ne vključuje vrednosti Froudovega števila  $Fr_1$ , podobno kot velja za enačbo Swamee in sod. (1994) ter enačbo May in sod. (2003),
- v enačbi je upoštevana oddaljenost in višina dolvodnega jezua, torej je zajet vpliv dolvodnih razmer.

Nova enačba je po obliki še najbolj podobna enačbi avtorjev May in sod. (2003), ki se tudi precej razlikuje od zgradbe enačb ostalih avtorjev (Preglednica 2), a se po vrednosti koeficienta  $C_d$  nekoliko razlikuje od rezultatov naših meritev.

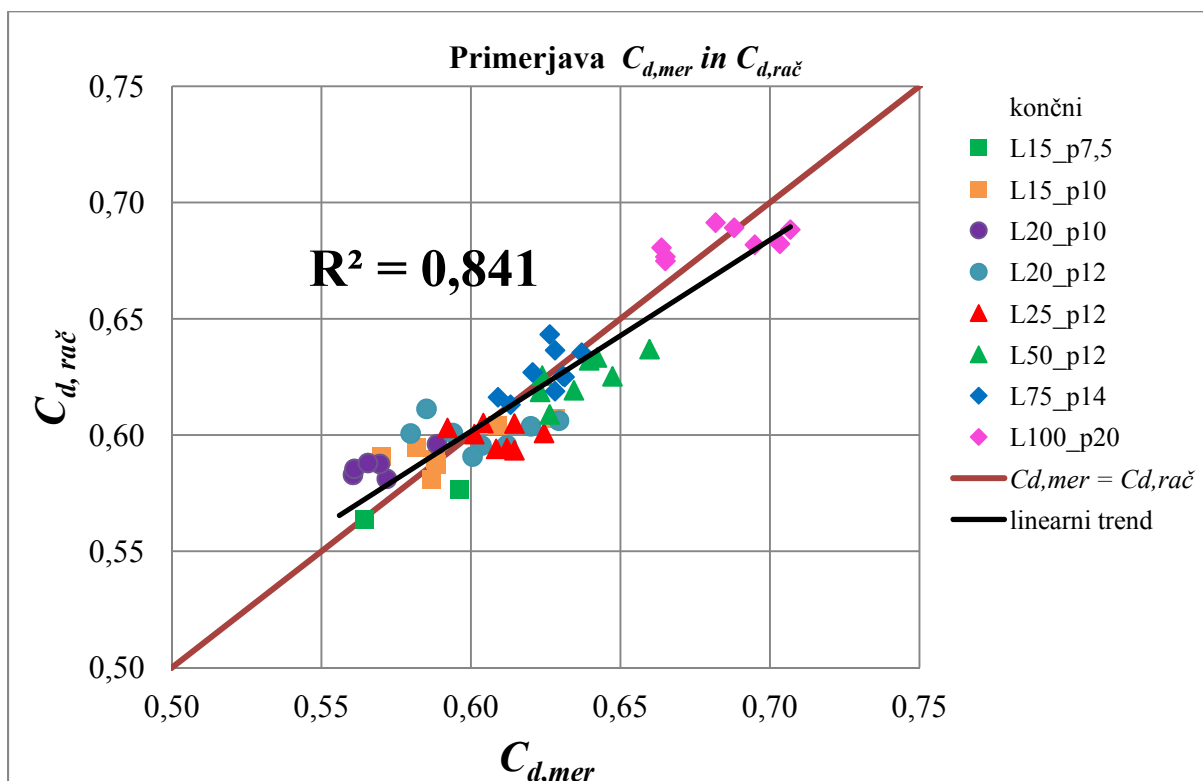
Za upoštevan nabor 60 variant znašajo absolutne razlike med  $C_{d,mer}$  in  $C_{d,rač}$  od 0 do 0,03, tako da so odstopanja znotraj  $\pm 5$  % poprečne vrednosti, če se upošteva, da je poprečna vrednost  $C_{d,mer}$  približno 0,6 (Slika 34).





Slika 34: Primerjava med  $C_{d,mer}$  in  $C_{d,rač}$  z vzporednicama, ki določata območje odstopanja  $C_d \pm 0,03$ .  
Figure 34: Comparison between  $C_{d,mer}$  and  $C_{d,rač}$  with parallel lines indicating area of  $C_d \pm 0,03$ .

Korelacija med  $C_{d,mer}$  in  $C_{d,rač}$  je zadovoljiva, saj korelacijski faktor  $R^2$  za linearno trendno črto vseh upoštevanih variant znaša  $R^2 = 0,841$  (Slika 35):



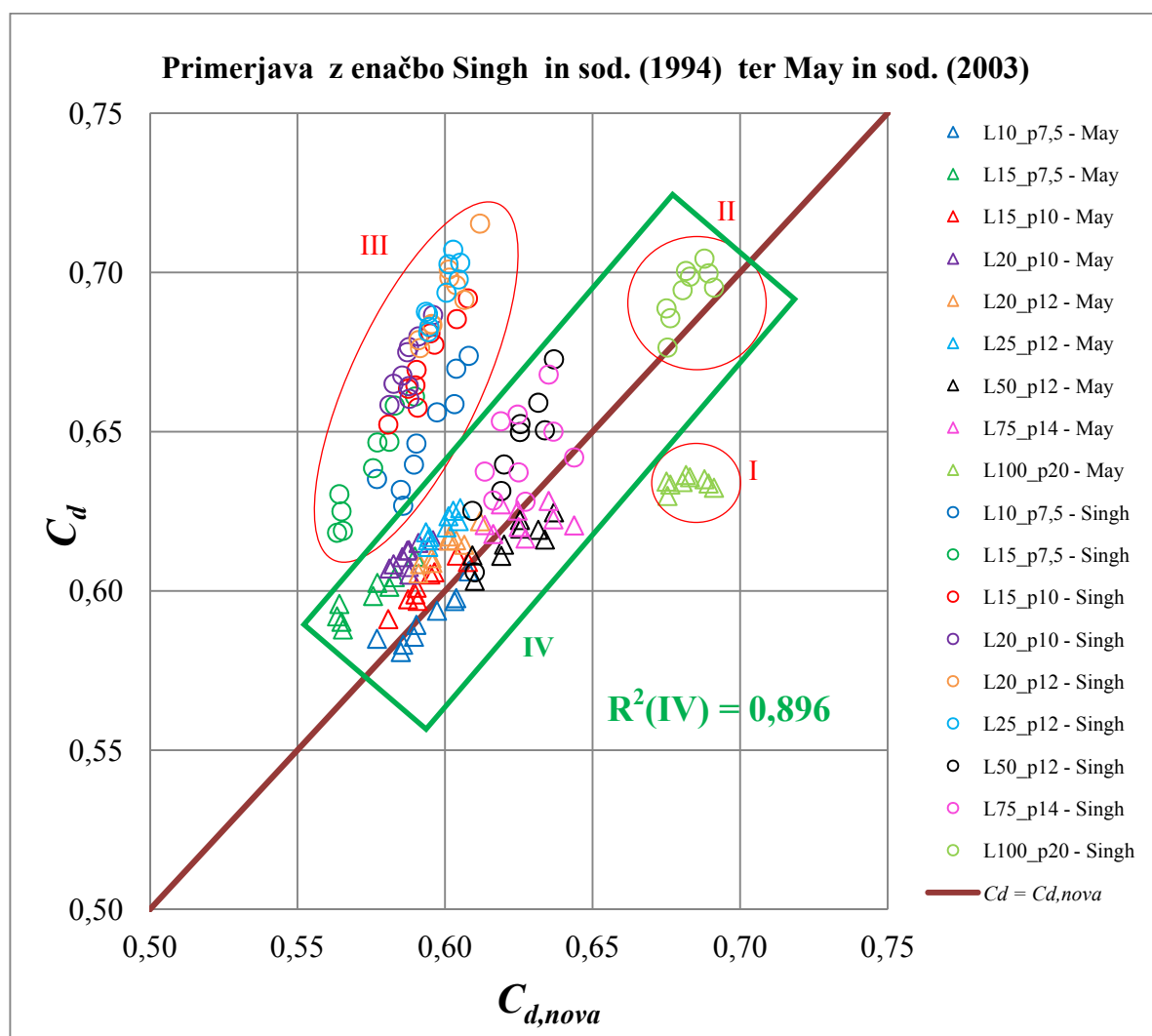
Slika 35: Podrobnejša primerjava med  $C_{d,mer}$  in  $C_{d,rač}$  v območju upoštevanih variant  
Figure 35: Detailed comparison between  $C_{d,mer}$  and  $C_{d,rač}$  in the range of included variants

Iz preglednice 21 je razvidno, da imajo vrednosti  $C_{d,nova}$  standardni odklon, ki je manjši kot pri  $C_{d,mer}$  in je primerljiv z vrednostmi STDEV pri ostalih avtorjih.

Preglednica 21: Primerjava  $C_{d,nova}$  z vrednostmi  $C_d$  po drugih avtorjih – za vse opravljene meritve  
Table 21: Comparison between  $C_{d,nova}$  and values  $C_d$  by other authors – for all measured variants

$C_d$	Subramanya	Yu-Tech	Ranga Raju	Cheong	Singh	Jalili	Borghei	Swamee	Emiroglu	May $C_d^*$	$C_{d,mer}$	$C_{d,nova}$
min	0,54	0,53	0,56	0,41	0,61	0,36	0,34	0,70	0,39	0,58	0,54	0,56
maks	0,59	0,57	0,67	0,44	0,72	0,46	0,54	0,72	0,67	0,64	0,97	0,69
poprečje	0,57	0,56	0,63	0,43	0,67	0,41	0,42	0,71	0,46	0,61	0,63	0,61
STDEV	0,010	0,008	0,021	0,005	0,026	0,017	0,045	0,006	0,073	0,014	0,068	0,031

Po novi enačbi (83) izračunani pretočni koeficienti  $C_{d,nova}$  se za vse prelive, razen za varianto B30\_L100\_p20, najbolje ujemajo z vrednostmi, ki jih za iste rezultate meritev dobimo po enačbi (65) avtorjev May in sod. (2003), kar daje našim rezultatom pomembno potrditev, saj so omenjeni avtorji objavili monografijo o dimenzioniranju bočnih prelivov. Za preliv B30\_L100\_p20 pa se  $C_{d,nova}$  najbolje ujemajo z vrednostmi, dobljenimi po enačbi (57), avtorjev Singh in sod. (1994). To je prikazano na sliki 36, podrobnejša primerjava po posameznih bočnih prelivih pa je v prilogah.



Slika 36: Primerjava  $C_{d,nova}$  in  $C_d$  po Singh in sod. (1994) ter May in sod. (2003) za vse meritve  
Figure 36: Comparison between  $C_{d,nova}$  and  $C_d$  by Singh et al. (1994) and May et al. (2003) for all measurements

Iz označenega območja "I" na sliki 36 je razvidno, da za preliv L100\_p20 enačba May in sod. (2003) daje vrednosti, ki so opazno nižje od vrednosti  $C_{d,nova}$ . Poudariti velja, da zgradba enačbe po May in sod. (2003) omejuje najvišjo vrednost  $C_{DS}$  oz.  $C_d$  na 0,65 oz.  $0,65 \cdot 1,06 = 0,69$ , kar pa je lahko doseženo le v primeru, če je vsaj eden izmed členov  $L$ ,  $p$ ,  $h_2$  ali  $h_{2,pr}$  enak nič. Toda enačba omenjenih avtorjev je bila izpeljana na podlagi rezultatov drugih študij za  $p > 0$ , za ostale parametre pa ni smiselno, da bi bili enaki nič.

Omenjeno odstopanje območja "I" od premice  $C_{d,nova} = C_d$  bi sicer lahko pripisali tudi možnosti, da so za L100\_p20 vrednosti  $C_{d,mer}$  nekoliko previsoke oz. posledica slabše izvedbe meritev, saj za ta preliv znašajo  $C_{d,nova}$  v poprečju 0,68, za podoben preliv L75\_p14 pa v poprečju 0,62. Vendar pa taki razlagi nasprotuje ugotovitev, da se  $C_{d,nova}$  za L100\_p20 zelo dobro ujema z vrednostmi po enačbi Singh in sod. (1994), kar je na sliki 36 označeno z območjem "II".

Iz slike 36 je razvidno, da se vrednosti  $C_d$  po enačbi Singh in sod. (1994) za prelive v širšem koritu opazno razlikujejo od vrednosti za prelive v ožjem koritu (območje z oznako "III"), in da so vrednosti za širše korito izrazito bližje premici  $C_d = C_{d,nova}$ . Verjetno je to posledica dejstva, da enačba omenjenih avtorjev ne vključuje člena  $B/L$  in se v tem pogledu torej razlikuje od naše nove enačbe.

Na podlagi zgornje analize lahko ugotovimo, da je nova enačba (83) veljavna za razpon parametrov vseh merjenih variant od preliva B14\_L10\_p7,5 do preliva B30\_L100\_p20 (območje "IV" na sliki 36). Korelacija med  $C_{d,nova}$  in  $C_d$  po May in sod. (2003) oz. Singh in sod. (1994) je za območje "IV" dovolj visoka, saj za to območje znaša  $R^2 = 0,896$ . Uporaba nove enačbe je načeloma možna tudi za dimenzioniranje ali analizo bočnih prelivov, ki so večji od variante B30\_L100\_p20, ob pogoju, da gre za ostrorobe pravokotne bočne prelive v pravokotnem glavnem koritu v mirnem režimu toka, in če so brezdimenzijski parametri toka in geometrije obravnavanega primera večjega bočnega preliva znotraj razponov, ki so dani v preglednici 22:

Preglednica 22: Parametri bočnega preliva, za katere velja nova enačba pretočnega koeficienta  $C_d$   
Table 22: Parameters of side weirs which define the range of validity of the proposed  $C_d$  equation

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

Iz primerjave s preglednico 3 (poglavje 4) je razvidno, da so razponi vrednosti iz preglednice 22 sicer manjši od območja veljavnosti enačbe May in sod. (2003), ki velja za  $B/L = 0,21$  do 3,  $Fr_1 < 1$  in  $Q_b/Q_l$  od 0,08 do 1, a kljub temu dovolj veliki, da so primerni za uporabo v praksi.

## 8 ZAKLJUČKI IN NADALJNJE DELO

Na koncu povzemamo ključne ugotovitve o veljavnosti postavljene hipoteze in natančno opišemo izvirnost ter relevantnost prispevka k znanstvenemu področju. Ker so raziskave opozorile še na nekatere možne analize, so podane tudi usmeritve za nadaljnje raziskovalno delo, ki bo logično nadaljevanje te disertacije.

### 8.1 Povzetek ključnih ugotovitev

V uvodu disertacije je bila postavljena teza, da so porazdelitve hitrosti v območju bočnega preliva izrazito neenakomerne in da je hitrosti možno zelo natančno kvantificirati z vizualizacijsko metodo, ki praktično ne posega v tok. Poleg izvedbe nekontaktnih meritev je bil nadalje postavljen cilj, da se preveri ustreznost obstoječih enačb koeficienta pretoka in se jih po potrebi dopolni z novimi ugotovitvami. Teza je na podlagi obsežnega eksperimentalnega dela potrjena, izvirni prispevek k znanosti pa predstavlja tudi nova, fenomenološka enačba pretočnega koeficienta bočnega preliva, formulirana z dimenzijsko analizo rezultatov meritev.

V literaturi so podrobni rezultati meritev hitrosti v območju bočnih prelivov le redko objavljeni, vsi objavljeni pa so pridobljeni s točkovnimi kontaktnimi merilniki hitrosti na fizičnih modelih s precej širokimi glavnimi koriti. V okviru disertacije so bile na fizičnih modelih ostrorobih pravokotnih bočnih prelivov za mirni režim toka kot prvi primer v svetu izmerjena hitrostna polja v območju bočnega preliva z uporabo računalniško podprte neinvazivne vizualizacijske metode, ki temelji na numeričnem reševanju adveksijsko-difuzijske enačbe.

Uporabljena vizualizacijska metoda je učinkovito orodje za hitro in natančno kvantifikacijo hitrostnih polj na celotni posamezni merilni ravnini, kar je bistvena pridobitev v primerjavi z običajnimi kontaktnimi točkovnimi meritvami ali zgolj kvalitativnim določanjem značilnosti toka. Pomemben prispevek uporabljene metode je nekontaktna določitev vektorskega polja hitrosti z veliko prostorsko in časovno ločljivostjo, saj vektorje hitrosti izvrednoti za vsak piksel izbranega območja posamezne slike, pri čemer je gibanje struktur barvila v toku posneto s frekvenco 300 slik/s. S primerno osvetlitvijo opazovanega območja in z ustreznim umerjanjem daje metoda zanesljive in natančne rezultate tudi ob uporabi različnih barvil oz. sledil (npr. vodna raztopina hipermangana, z elektrolizo generirani vodikovi mehurčki). Pomembna prednost uporabljene metode je nenazadnje tudi ta, da omogoča izvrednotenje hitrostnih polj tudi za primere toka z majhno globino oz. prelivno višino, ki so na fizičnih modelih hidravličnih laboratorijev lahko kar pogosti. Pri tem velja poudariti, da majhne globine obravnavanega toka onemogočajo ali bistveno otežujejo pravilno uporabo široko uporabljenih običajnih merilnikov lokalnih hitrosti.

Rezultati eksperimentov kažejo, da je porazdelitev hitrosti v območju bočnega preliva izrazito neenakomerna. To se odraža tako v izvrednotenih različnih razmerjih komponent hitrosti, kakor tudi v Coriolisovem in Boussinesqovem koeficientu za različne prečne prereze vzdolž bočnega preliva. Meritve dokazujejo, da neenakomernost toka (podana na različne načine) narašča vzdolž bočnega preliva, kar je skladno z ugotovitvami tistih raziskav iz literature, ki zagovarjajo pristop izračuna prelivne količine z gibalno količino, in nasprotuje uporabi ene od bistvenih predpostavk energijskega pristopa.

Izmerjena neenakomerna porazdelitev hitrosti in izvrednoteni parametri toka dokazujejo hipotezo disertacije in potrjujejo ustreznost pristopa z gibalno količino. Izvrednotene velikosti specifične energije kažejo, da vzdolž bočnega preliva od energijskih izgub nastopajo le izgube zaradi trenja, kar pa potrjuje osnovno predpostavko energijskega pristopa reševanja enačbe toka preko bočnega preliva. Iz podrobne analize meritev je izšel še drugi pomemben prispevek k znanosti – na podlagi brezdimenzijske analize izmerjenih vrednosti globin in dimenzij bočnega preliva je z meritvami na različno velikih modelih formulirana nova fenomenološka enačba pretočnega koeficienta bočnega

preliva. Za razliko od v literaturi obstoječih enačb z vsotnimi nastavki je bil pri eksperimentalnem modeliranju uporabljen potenčni nastavek. Nova enačba velja *tudi* za ozka korita, ki jih ostali avtorji niso obravnavali, hkrati pa jo je možno uporabiti tudi za dimenzioniranje ali analizo večjih bočnih prelivov, katerih parametri so znotraj dokaj širokega razpona brezdimenzijskih parametrov, ki podajajo glavne značilnosti geometrije bočnega preliva in hidravličnih robnih pogojev. Nova enačba je dokaj enostavna za rabo v praksi, saj za izračun pretočnega koeficienta zahteva le znane dimenzije preliva in osnovne parametre dotoka. Za razliko od enačb ostalih avtorjev, v katerih so glavni vplivni parametri večinoma le tisti, ki nastopajo na gorvodnem koncu bočnega preliva, naša enačba vključuje tudi vpliv dolvodnega robnega pogoja, in sicer oddaljenost in višino dolvodnega jezua za uravnavanje poteka gladine v odvodnem delu glavnega korita. Ta izboljšava je pomembna za dimenzioniranje bočnih prelivov, saj dolvodne razmere predstavljajo pomemben robni pogoj, še zlasti v primerih, kjer je bočni preliv predviden v bližini gibljivega dolvodnega jezua z gibljivo hidromehansko opremo.

## 8.2 Nadaljnje delo

Izkušnje iz opravljenih meritev v okviru te disertacije omogočajo tudi izboljšavo uporabniškega vmesnika vizualizacijske metode, tako da bo to orodje še uporabnejše na področju hidravličnih fizičnih modelov. Predlagane glavne izboljšave vključujejo možnost definiranja več različnih opazovanih območij slik hkrati in izboljššan prikaz rezultirajočih 2D vektorskih polj hitrosti. Rezultati meritev te disertacije bodo uporabljeni za nadaljevanje raziskav v aktualnem raziskovalnem projektu z naslovom *Razvoj računalniško podprte vizualizacijske metode za diagnostiko hitrostnih polj na področju hidrodinamskih sistemov*, ki ga financira ARRS. Opravljeni eksperimenti bodo tudi zelo dobro izhodišče za umerjanje bodočih 2D ali 3D numeričnih modelov za simuliranje toka preko bočnih prelivov.

Nadaljnje raziskave bi lahko vodile vsaj v naslednje smeri: (1) obravnava hitrostnih polj in posebnih tokovnih struktur (odlepljanje toka, vrtinci, zastoje in recirkulacijske cone) za različne primere bočnih prelivov s široko krono, kakršni npr. nastopajo pri prelivanju protipoplavnih nasipov, (2) vizualizacijska analiza hidravličnih značilnosti plitvih tokov, npr. na vertikalno distorziranih fizičnih modelih vodotokov s poplavnimi območji, (3) razširitev uporabnosti vizualizacijske metode na fizične modele večjih dimenzij, na industrijske aplikacije (npr. cevovodi, kavitacija, različni fluidi) in meritve lokalnih tokovnih razmer v naravi.

Uvodoma je bila postavljena teza, da je porazdelitev hitrosti v območju bočnega preliva izrazito neenakomerna in da je hitrostna polja možno natančno kvantificirati z nekontaktno vizualizacijsko metodo. V tezi sta bila nadalje predvidena izboljšava pretočnih enačb in opis posebnih topoloških struktur. Na različnih fizičnih modelih izvedene meritve vektorjev hitrosti, globin in pretokov v območju bočnega preliva so potrdile in kvantificirale tezo o neenakomernosti hitrostnih polj. Veliko število izmerjenih kombinacij prelivnih parametrov pa je omogočilo, da so bili rezultati meritev uporabljeni za oblikovanje nove fenomenološke enačbe pretočnega koeficienta. Posebne topološke strukture (vrtinci, cone toka) v obravnavanem razponu geometrijskih in hidravličnih parametrov bočnih prelivov niso bile izrazite oz. opažene, bi pa nadaljnje delo morda lahko obravnavalo odlepljanje toka na gorvodnem in pojav stoječih valov na dolvodnem koncu bočnega preliva.

Del rezultatov te disertacije je predstavljenih v članku z naslovom *Study of velocity field at model sideweir using visualization method*, ki je bil objavljen v SCI reviji Journal of Hydraulic Research letnik 50, št. 1, str. 129-133 (2012) in je v on-line obliki dostopen na spletnih straneh založbe Taylor & Francis od vključno 2.2.2012.

(Povezava do članka: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00221686.2011.648766>)

Izvedbo doktorske disertacije so omogočili Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem (KMTe) UL FGG, Inštitut za hidravlične raziskave in Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije (ARRS).

## 9 POVZETEK

Bočni prelivi so hidrotehnični objekti, pri katerih se s projektno dokumentacijo določen del pretoka iz glavnega korita odliva bočno preko krone preliva v odtočno korito ali na poplavno ravnico. Bočni prelivi služijo kot odvzemni ali kot razbremenilni objekti in nastopajo predvsem v namakalnih, kanalizacijskih in protipoplavnih sistemih ter v hidroenergetiki.

Kljub dokaj enostavni geometriji različnih oblik bočnih prelivov predstavlja tok preko takega preliva kar kompleksen hidravlični problem. Gre za prostorsko spremenljivi tok s pojemajočim pretokom, ki se ga v literaturi obravnava enodimenzijsko, in sicer z energijskim pristopom ali s pristopom z gibalno količino, ki se razlikujeta v predpostavkah glede porazdelitve hitrosti toka vzdolž bočnega preliva. Večina raziskav se osredotoča le na določitev skupnega bočnega odtoka, oz. na določanje enačb prelivnega koeficienta. Hitrostna polja so bila doslej dokaj slabo raziskana, za sorazmerno redko izvedene meritve lokalnih hitrosti pa so se uporabljali instrumenti, ki posegajo v tok. Slednji za določitev hitrostnih polj vzdolž bočnih prelivov v ožjih koritih, kakršni lahko nastopajo tudi na manjših fizičnih hidravličnih modelih, niso primerni, saj zlasti pri nižjih prelivnih višinah preveč posegajo v tokovne razmere.

V okviru disertacije je bilo opravljeno obsežno eksperimentalno delo na različnih fizičnih modelih pravokotnih ostrorobih bočnih prelivov v mirnem režimu toka. Teza, da so porazdelitve hitrosti v območju bočnega preliva izrazito neenakomerne in da je hitrosti možno zelo natančno kvantificirati z vizualizacijsko metodo, ki praktično ne posega v tok, je potrjena. Z uporabo vizualizacijske metode so bila izmerjena hitrostna polja v posameznih horizontalnih ravninah obravnavanega vodnega toka. Za analizo so bili uporabljeni zaporedni filmski posnetki premikanja v tok vnesenega polutanta, tj. delcev, barvila, ali z elektrolizo generiranih vodikovih mehurčkov. Za snemanje teh filmov je bila uporabljena hitra kamera. Numerični izračun komponent vektorjev hitrosti v območju bočnega preliva je bil izveden z veliko prostorsko in časovno ločljivostjo.

Tezo potrjujejo izmerjena oz. izvrednotena različna razmerja komponent hitrosti, kakor tudi na podlagi meritev izračunane vrednosti Coriolisovega in Boussinesqovega koeficienta za različne prečne prereze vzdolž bočnih prelivov. Razmerja vzdolžne komponente hitrosti toka preko bočnega preliva in poprečne hitrosti v pripadajočem prečnem prerezu glavnega korita se za različne dimenzije bočnih prelivov in različne kombinacije dotoka ter višine spodnje vode gibljejo v območju od 1 do 1,25, pri čemer je bil ugotovljen trend naraščanja tega razmerja vzdolž bočnega preliva. Podoben trend izkazujejo tudi vrednosti Coriolisovega in manj izrazito tudi Boussinesqovega koeficienta, pri čemer prvi znašajo od 1 do 1,15, slednji pa od 1 do 1,05. Izmerjene hitrosti kažejo na to, da je za reševanje enačbe toka preko bočnega preliva primernejši pristop z gibalno količino, hkrati pa izvrednotene velikosti specifične energije vodnega toka kažejo, da vzdolž bočnega preliva od energijskih izgub nastopajo le izgube zaradi trenja.

Poleg tega je bil izpolnjen tudi cilj, da se na podlagi meritev dopolni obstoječe pretočne enačbe. Natančne meritve, ki so novost v svetovnem merilu, so omogočile ne le dopolnitev obstoječih enačb, temveč izdelavo nove enačbe. Prispevek k znanosti tako predstavlja tudi nova, fenomenološka enačba za koeficient pretoka bočnega preliva, oblikovana na podlagi dimenzijske analize, oz. eksperimentalnega modeliranja. Za razliko od drugih avtorjev je bil uporabljen potenčni nastavek, v katerem so neznanke eksponenti izbranih brezdimenzijskih razmerij na modelu izmerjenih veličin, po logaritmiranju dobljen sistem enačb pa se je reševal numerično.

Za zagotavljanje zadovoljive korelacije nove enačbe z 81 variantami prelivov je bilo iz sistema sicer treba izločiti del vseh izmerjenih variant, predvsem vrednosti z dveh manjših bočnih prelivov, kjer se verjetno poznajo še drugi vplivi. Vendar se vrednosti pretočnega koeficienta po novi enačbi tudi za kratke in nizke bočne prelive dobro ujemajo z vrednostmi, dobljenimi po enačbah dveh relevantnejših študij. Nova enačba dobro opisuje značilnosti obravnavanega toka, je preprosta za uporabo in veljavna za dokaj širok razpon glavnih brezdimenzijskih parametrov, ki podajajo geometrijske in hidravlične značilnosti toka preko ostrorobih tankostenskih bočnih prelivov v mirnem režimu toka.

## 10 SUMMARY

Side weirs are hydro-technical structures with a certain part of discharge from the main channel spilling laterally over the weir's crest into the draining channel or onto a flood plain. Side weirs are employed as intakes or flood protection structures and are used in irrigation, sewer, flood-protection systems and in relation to hydro power plants.

Despite a fairly simple geometry of various shapes of side weirs the flow over such a weir presents quite complex hydraulic problem. This is a case of spatially-varied flow with decreasing discharge, in literature considered with one-dimensional approaches, i.e. energy and momentum approach, which differ in assumptions regarding velocity distributions along the side weir. Most of the studies focus on determination of overall spill flow or equations of discharge coefficient. Velocity fields so far remained rather under-investigated, with infrequent measurements of local velocities performed with the employment of contact probes. The latter are not suitable for determination of velocity fields along the side weirs in narrower channels which can be used at smaller physical hydraulic models, as they can disturb the observed flow conditions too much - especially at smaller overflow depths.

An extensive experimental work has been done within this dissertation, covering measurements at various physical models of sharp-crested rectangular side weirs. The thesis that velocity distributions at side weir are significantly non-uniform and that velocities can be very precisely quantified using a non-invasive visualization method has been confirmed. This visualization method was employed to measure velocity fields in separate horizontal planes of the observed water flow. The analysis employed sequences of images from high-speed films of movement of introduced pollutant, i.e. particles, dye or electrolysis-generated hydrogen bubbles. The numerical calculation of components of velocity vectors at side weir was completed with great spatial and time resolution.

Aforementioned thesis has been confirmed on the basis of various measured or calculated ratios of velocity components, as well as with values of Coriolis and Boussinesq coefficient for various cross sections along the side weirs. Relations between longitudinal component of velocity of spill flow and average velocity in the corresponding cross section of the main channel are for various combinations of the inflow and the tailwater level in the range from 1 to 1,25. The values of this relation tend to increase along the side weir. A similar trend was observed for Coriolis and to a lesser degree for Boussinesq coefficient, with their values ranging from 1 to 1,15 and from 1 to 1,05 respectively.

Measured velocities indicate that the momentum approach is more suitable, while the determined specific energy values indicate that along the side weir only friction losses are present.

Moreover, a goal of complementing the existing discharge coefficient equations has been achieved. Precise measurements, which represent a novelty, allowed not only the modification of existing equations, but formulation of a new one. As an additional contribution to science a new phenomenological equation for side weir discharge coefficient has been formulated on the basis of dimensional analysis. In contrast to other authors, a power-law formulation has been used, with exponents of selected non-dimensional ratios of measured quantities as unknowns. After the logarithms were formulated, the resulting system of equation has been solved numerically.

To obtain a satisfactory correlation of new equation with 81 variants of side weirs, a part of measured data had to be eliminated from the system, especially the values from smaller two side weirs – however, even for such weirs the values of discharge coefficient calculated from the new equation are in agreement with the values from equation by two of more relevant studies. Designed new equation describes features of the observed flow well, it is simple to use and is valid for a fairly wide range of main non-dimensional parameters that give geometrical and hydraulic characteristic of flow over sharp-crested side weirs in subcritical regime.

## VIRI

Agaccioglu, H., Yüksel, Y. 1998. Side –Weir Flow in Curved Channels. *J. Irrig. Drain. Eng.* 123, 3: 163–175.

Aider, J. L., Westfreid, J. E. 1995. Visualizations and PDF of the fluctuations of a passive scalar in a turbulent Goertler flow. *Experimental and Numerical Flow Visualization* 218: 123–130.

Al-Khatib, I., Göğüş, M. 1999. Momentum and Kinetic Energy Coefficients in Symmetrical Rectangular Compound Cross Section Flumes. *Turkish J. Eng. Env. Sci.* 23, 3: 187-197.  
<http://journals.tubitak.gov.tr/engineering/issues/muh-99-23-3/muh-23-3-5-97072.pdf>  
(Pridobljeno 1.9.2011)

Baek, K. O., Seo, I. W., Jeong, S. J. 2006. Evaluation of Dispersion Coefficients in Meandering Channels from Transient Tracer Tests. *J. Hydraul. Eng.* 132, 10: 1021–1032.

Bajcar, T., Širok, B., Eberlinc, M. 2009. Quantification of Flow Kinematics Using Computer–Aided Visualization. *SV - JME* 55, 4: 215–223.

Baud, O., Hager, W.H., Minor, H.–E. 2005. Toward Nonintrusive Flood Discharge Measurement. *J. Hydraul. Eng.* 131, 12: 1032–1035.

Bergelj, F. 2002. Meritve – 1.del. 4.izdaja. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko: 155 str.

Bieri, M., Jenzer, J., Kantoush, S. A., Boillat, J.– L. 2009. Large scale particle image velocimetry applications for complex free surface flows in river and dam engineering.  
[ftp://ftp.hamburg.baw.de/pub/Kfki/Bib/2009\\_IAHR\\_33rd/html/pdf/10824.pdf](ftp://ftp.hamburg.baw.de/pub/Kfki/Bib/2009_IAHR_33rd/html/pdf/10824.pdf) (Pridobljeno 20.4.2011)

Boes, R. (ur.) 2011. Jahresbericht 2010 - Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie. Zürich, ETH Swiss Federal Institute of Technology: str. 30–32 in 43–44.

Borghei, S. M., Jalili, M. R., Ghodsian, M. 1999. Discharge coefficient for sharp-crested side weir in subcritical flow. *J. Hydraul. Eng.* 125, 10: 1051–1056.

Burt, D., Corton, M., Hetherington, D., Balmforth, D. 2004. Multiphase Modeling and the Prediction of Retention Efficiency in a Side Weir CSO.  
[http://ascelibrary.org/proceedings/resource/2/ascecp/112/40644/72\\_1?isAuthorized=no](http://ascelibrary.org/proceedings/resource/2/ascecp/112/40644/72_1?isAuthorized=no) (Pridobljeno 27.4.2011)

Cabral, B., Leedom, L. C. 1993. Imaging vector fields using line integral convolution.  
<http://www8.cs.umu.se/kurser/TDBD13/VT00/extra/p263-cabral.pdf> (Pridobljeno 20.4.2011)

Casio Computer Co., Ltd. 2008. Casio Digital Camera EX-F1 User's Guide.

Clemmens, A. J. 2005. Discussion of "Transition Effects in Flow Over Side Weirs" by Yilmaz Muslu, Ebubekir Yüksel, and Hasan Tozlu. *J. Irrig. Drain. Eng.* 131, 7: 392.

Cverle, A. 2009. Analiza hidravličnih razmer pri bočnih prelivih. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Študij vodarstva in komunalnega inženirstva: 117 f.

Das, A. 1997. Spatially varied flow over an embankment side weir. *J. Irrig. Drain. Eng.* 123, 4: 314–317.



- Del Giudice, G., Hager, W. H. 1999. Sewer Sideweir with Throttling Pipe. *J. Irrig. Drain. Eng.* 125, 5: 298–306.
- Dufresne, M., Vazquez, J., Terfous, A., Ghenaim, A., Poulet, J.-B. 2007. Three-dimensional flow measurements and CFD modelling in a storm-water tank.  
[http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/25418/1147\\_317dufresne.pdf?sequence=1](http://documents.irevues.inist.fr/bitstream/handle/2042/25418/1147_317dufresne.pdf?sequence=1)  
(Pridobljeno 20.4.2011)
- El-Khashab, A., Smith, K. V. H. 1976. Experimental investigation of flow over side weirs. *J. Hydr. Div.* 102, 9: 1255–1268.
- Emiroglu, M. E., Agaccioglu, H., Kaya, N. 2011. Discharging capacity of rectangular side weirs in straight open channels. *Flow Meas. Instrum.* 22, 4: 319–330.
- Farhadi Rad, S., Jalili Ghazizadeh, M. R., Attari, J. 2011. Water Surface Profile and Hydraulic Jump along a Side Weir. 34<sup>th</sup> IAHR World Congress – Balance and Uncertainty, 26 June –1 July, Brisbane, Australia, str. 2281 – 2288.
- Fujita, I. 2002. Review of Flow visualization, edited by A. J. Smits and T. T. Lim. *J. Hydr. Eng.*, 128, 2: 247–248.
- Fujita, I., Muste, M., Kruger, A. 1998. Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *JHR* 36, 3: 397–414.
- Gad-el-Hak, M. 2000. Flow control – passive, active, and reactive flow management. Cambridge, Cambridge University Press, 421 str.
- Gisonni, C., Hager, W. H. 1997. Short Sewer Sideweir. *J. Irrig. Drain. Eng.* 123, 5: 354–363.
- Hager, W.H. 1982. Die Hydraulik von Verteilkanälen, Teil 1-2, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, No. 55–56. Zürich
- Hager, W.H. 1983. Open channel hydraulics of flows with increasing discharge, *JHR* 21(3), 177–193.
- Hager, W.H. 1987. Lateral outflow over side wiers. *J. Hydraul. Eng.* 113, 4: 491–504.  
[http://www.hach.ulg.ac.be/cms/system/files/Hager\\_1987.pdf](http://www.hach.ulg.ac.be/cms/system/files/Hager_1987.pdf) (Pridobljeno 15.11.2011)
- Hager, W. H., Volkart, P. U. 1986. Distribution channels. *J. Hydr. Eng.* 112, 10: 935–952.
- Hu, H., Saga, T., Kobayashi, T., Taniguchi, N. 2004. Analysis of a Turbulent Jet Mixing Flow by Using a PIV-PLIF Combined System. *Journal of Visualization* 7, 1: 33–42.  
<http://www.springerlink.com/content/g6311556360xu2k5/fulltext.pdf> (Pridobljeno 8.11.2011)
- Inštitut za hidravlične raziskave, UL FGG KMTe, IBE, d.d. 2011. Hidravlična modelna raziskava visokovodnih razbremenilnikov. Poročilo. Ljubljana, Inštitut za hidravlične raziskave: 80 str.
- ISO 1438:2008 (E). Hydrometry – Open channel flow measurement using thin-plate weirs: 59 str.
- Jalili, M. R. in Borghei, S. M. 1996. Discussion: Discharge coefficient of rectangular side weirs. *J. Irrig. Drain. Eng.* 122, 3–4: 132.
- Jeglič, A. 1977. Procesna merilna tehnika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko: 182 str.

Kadota, A., Suzuki, K., Rummel, A. C., Weitbrecht, V., Jirka, G. H. (online) Shallow flow visualization and coherent structures around a single groyne.  
[http://www.dicat.unige.it/rummel/pubs/Kadota\\_Venice07.pdf](http://www.dicat.unige.it/rummel/pubs/Kadota_Venice07.pdf) (Pridobljeno 8.11.2011)

Kesserwani, G., Vazquez, J., Riviere, N., Liang, Q., Travin, G., Mose, R. 2010. New Approach for Predicting Flow Bifurcation at Right-Angled Open-Channel Junction. *J. Hydr. Eng.* 136, 9: 662–668.

Khan, I. M., Simons, R. R., Grass, A. J. 2007. Vertical diffusion of pollution from line source near a wall. *JHR* 45, 3: 365–369.

Khorchani, M., Blanpain, O. 2004. Free surface measurement of flow over side weirs using the video monitoring concept. *Flow Measurement and Instrumentation* 15, 2: 111–117.  
[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6V38-49W2NHR-1&\\_user=4776866&\\_coverDate=04%2F30%2F2004&\\_rdoc=1&\\_fmt=high&\\_orig=gateway&\\_origin=gateway&\\_sort=d&\\_docanchor=&view=c&\\_searchStrId=1727381658&\\_rerunOrigin=google&\\_acct=C000033658&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=4776866&md5=7eb865b40f7e791384310e4050a291ab&searchtype=a](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V38-49W2NHR-1&_user=4776866&_coverDate=04%2F30%2F2004&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1727381658&_rerunOrigin=google&_acct=C000033658&_version=1&_urlVersion=0&_userid=4776866&md5=7eb865b40f7e791384310e4050a291ab&searchtype=a) (Pridobljeno 8.11.2011)

Khorchani, M., Blanpain, O. 2005. Development of a discharge equation for side weirs using artificial networks.  
<http://www.iwaponline.com/jh/007/0031/0070031.pdf> (Pridobljeno 22.4.2011)

Kirkup, L., Frenkel, B. 2006. Introduction to the GUM (International Guidelines for calculating and expressing uncertainty in measurement).  
[http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=gum%20standard&source=web&cd=2&sqi=2&ved=0CDoQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.cambridge.org%2Fresources%2F0521844282%2F4427\\_IntroGUMv2.ppt&ei=VymtTqWWAs6a-gab4dn0Dw&usg=AFQjCNHHS00DkF-tA-4N4eRDWoF2L68erQ&cad=rja](http://www.google.si/url?sa=t&rct=j&q=gum%20standard&source=web&cd=2&sqi=2&ved=0CDoQFjAB&url=http%3A%2F%2Fwww.cambridge.org%2Fresources%2F0521844282%2F4427_IntroGUMv2.ppt&ei=VymtTqWWAs6a-gab4dn0Dw&usg=AFQjCNHHS00DkF-tA-4N4eRDWoF2L68erQ&cad=rja) (Pridobljeno 30.10.2011)

Klemenčič, U. 2010. Vizualizacija tokovnega polja v vstopnem kanalu črpališča. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 50 f.

Kline, S.J. 1969. Film Notes for Flow Visualization – National Committee for Fluid Mechanics Films, Stanford University. (online)  
<http://web.mit.edu/hml/ncfmf/05FV.pdf> (Pridobljeno 26.8.2011)

Kobus, H. (ur.) 1980. Hydraulic Modelling. Hamburg idr., Verlag Paul Parey, Pitman: 323 str.

Kuhn, C., Harrison, T., Mansfield, R., Lilevjen, J., Ostoich, C. 2006. Vortex Ring Using Hydrogen Bubble Visualization Technique – MCEN 5228: Flow Visualization. (online)  
<http://www.colorado.edu/MCEN/flowvis/galleries/2006/assignment6/Group4.pdf>  
(Pridobljeno 8.11.2011)

Kumar, C.P., Pathak, S.K. 1987. Triangular side weirs. *J. Irrig. Drain. Eng.* 113, 1: 98–105.

Lee, K. – L. in Holley, E. R. 2002. Physical modeling for side-channel weirs. CRWR Online Report 02-2, Center for Research in Water Resources, The University of Texas at Austin (online)  
<http://www.crwr.utexas.edu/reports/pdf/2002/rpt02-02.pdf> (Pridobljeno 8.11.2011)

Lukowicz, J. V., Köngeter, J. 1999. Coherent structures in compound open-channel flows: experimental investigation using DPIV. (online)  
<http://www.iahr.org/membersonly/grazproceedings99/pdf/D053.pdf> (Pridobljeno 20.4.2011)

MaFiRaWiki (online). Gibalna količina. [http://wiki.fmf.uni-lj.si/wiki/Gibalna\\_koli%C4%8Dina](http://wiki.fmf.uni-lj.si/wiki/Gibalna_koli%C4%8Dina)  
(Pridobljeno 15.11.2011)

- Mathews, J. H., Kurtis, K. F. 2004. Numerical Methods Using Matlab, 4<sup>th</sup> Edition, Upper Saddle River, Prentice Hall: 696 str.
- Maxworthy, T. 1972. The structure and stability of vortex rings.  
<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=372289> (Pridobljeno 22.4.2011)
- May, R.W.P., Bromwich, B.C., Gasowski, Y., Rickard, C.E. 2003. Hydraulic design of side weirs. London, Thomas Telford: 126 str.
- McEnroe, M. 1995. Discussion of "Subcritical Flow Over Rectangular Side Weir" by Swamme et al. J. Irrig. Drain. Eng. 120, 1: 309.
- McComb, W. D. 1996. The Physics of Fluid Turbulence. Oxford, Oxford Engineering Science, Clarendon Press: 602 str.
- Meselhe, E. A., Peeva, T., Muste, M. 2004. Large Scale Particle Image Velocimetry for Low Velocity and Shallow Water Flows. J. Hydr. Eng., 130, 9: 937–940.
- Mikola, L., Golob, M. 2001. Meritve: merilne metode in laboratorijske vaje – 1.ponatis. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko: 213 str.
- Muslu, Y. 2001. Numerical analysis for lateral weir flow. J. Irrig. Drain. Eng. 127, 4: 246–253.
- Muslu, Y. 2002. Lateral Weir Flow Model using a Curve Fitting Analysis. J. Hydr. Eng., 128, 7: 712–715.
- Muslu, Y., Tozlu, H., Yüksel, E. 2003. Effect of Lateral Water Surface Profile on side Weir Discharge. J. Irrig. Drain. Eng. 129, 5: 371–375.
- Muslu, Y., Yüksel, E., Tozlu, H., 2004. Transition Effects in Flow Over Side Weirs. J. Irrig. Drain. Eng. 130, 1: 92–95.
- Nezu, I., Nakayama, T. 1997. Space–time correlation structures of horizontal coherent vortices in compound open–channel flows by using particle–tracking velocimetry. JHR 35, 2: 191–208.
- Novak, G., Bajcar, T., Rodič, P. 2010. Določitev hitrostnega polja na območju vtočnega objekta z vizualizacijsko metodo. V: Širok, B. in Eberlinc, M. (ur.) Zbornik del 10. Kuhljevi dnevi, Tehnološki park Ljubljana, 23. September 2010. Ljubljana, Slovensko društvo za mehaniko: str. 135–142.
- Novak, G., Steinman, F., Bajcar, T. 2011. Raziskava tokovnih razmer na bočnem prelivu z uporabo vizualizacijske metode. V: Širok, B. in Eberlinc, M. (ur.) Zbornik del 11. Kuhljevi dnevi, Grad Jable, Mengeš, 22. September 2011. Ljubljana, Slovensko društvo za mehaniko: str. 163–170. <http://193.2.78.22/lvts/sdm/zbornik/ZbornikKD2011.pdf> (Pridobljeno 8.11.2011)
- Obropta, C. C., Hires, R. I. 2007. Simulations of Dye Releases off the Coast of New Jersey: development and Validation of an Ocean Outfall Mixing Model. J. Hydr. Eng. 133, 2: 173–185.
- Oertel, M., Carvalho, R. F., Janssen, R. H. A. 2011. Flow over rectangular side weir in an open channel and resulting discharge coefficients. Proceedings of the 34<sup>th</sup> IAHR World Congress – Balance and Uncertainty, 26 June – 1 July, Brisbane, Australia. Brisbane, Engineers Australia: str. 3675–3681.
- Okamoto, Y., Hanawa, J., Kameoka, T. 1971. Visualization Techniques of Closed Conduit Flows by Hydrogen Bubble Methods. Bulletin of the JSM E 14, 76: 1088–1094.

<http://ci.nii.ac.jp/naid/110002360507/> (Pridobljeno 8.11.2011)

Palmen D. E. M., van de Vosee, F. N., Janssen, J. D., van Dongen, M. E. H. 1994. Analysis of the flow in stenosed carotid artery bifurcation models – Hydrogen-bubble visualisation. Abstract. *Journal of Biomechanics* 27, 5: 581–590. (online)

[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6T82-4C00H07-R9&\\_user=4776866&\\_coverDate=05%2F31%2F1994&\\_rdoc=1&\\_fmt=high&\\_orig=gateway&\\_origin=gateway&\\_sort=d&\\_docanchor=&view=c&\\_searchStrId=1727226670&\\_rerunOrigin=scholar.google&\\_acct=C000033658&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=4776866&md5=da126ca16a8c345bd8fad0a16a56e10d&searchtype=a](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6T82-4C00H07-R9&_user=4776866&_coverDate=05%2F31%2F1994&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1727226670&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000033658&_version=1&_urlVersion=0&_userid=4776866&md5=da126ca16a8c345bd8fad0a16a56e10d&searchtype=a) (Pridobljeno 22.4.2011)

Pinheiro, A., Silva, I. N. 1999. Discharge coefficient of side weirs. Experimental study and comparative analysis of different formulas. (online)

<http://www.iahr.org/membersonly/grazproceedings99/doc/000/000/069.htm> (3.5.2011)

Pogačnik, N. 2005. Vizualizacija pri hidravličnem modeliranju odprtih vodotokov. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 91 f.

Prhavec, P. 2010. Adveksijska vizualizacijska metoda. Diplomski naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 59 f.

Rak, G., Müller, M., Šantl, S., Steinman, F. 2011. Uporaba hibridnega hidravličnega modeliranja pri načrtovanju bodoče HE Brežice. 22. Mišičev vodarski dan 2011, Maribor, 06. december. Zbornik referatov. Maribor, Vodnogospodarski biro: str. 193–202.

Ramamurthy, A. S., Qu, J., Vo, D. 2006. Nonlinear PLS method for side weir flows. *J. Irrig. Drain. Eng.* 132, 5: 486–489.

Ramamurthy, A. S., Udoyara, S. T., Carballada, L. B. 1986. Lateral Weirs in Trapezoidal Channels. *J. Irrig. Drain. Eng.* 112, 2: 130–137.

Reungoat, D., Riviere, N. Faure, J.P. 2007. 3C PIV and PLIF Measurement in Turbulent Mixing, *Journal of Visualization* 10, 1: 99–110.

Rodič, P., Banovec, P., Novak, G., Bombač, M., Mlačnik, J. 2006. Hidravlična modelna raziskava spodnjega vtočno-iztočnega objekta in zgornjega vtočnega objekta ČHE Avče; Poročilo hidravlične modelne raziskave spodnjega vtočno-iztočnega objekta. = Hydraulic model research of the lower intake and the upper intake of the pumped storage power plant Avče; Final report of the hydraulic model research of the lower intake. Ljubljana, Inštitut za hidravlične raziskave: 15 str.

Roger, S., Dewals, B. J., Erpicum, S., Schwanenberg, D., Schüttrumpf, H., Köngeter, J., Piroton, M. 2009. Experimental and numerical investigations of dike-break induced flows. *JHR* 47, 3: 349–359.

Rosier, B. 2007. Interaction of side weir overflow with bed-load transport and bed morphology in a channel. Thesis, Lausanne, Ecole Polytechnique Federale De Lausanne, Suisse: 421 str.

[http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2007/3872/EPFL\\_TH3872.pdf](http://biblion.epfl.ch/EPFL/theses/2007/3872/EPFL_TH3872.pdf) (Pridobljeno 3.5.2011)

Sanjou, M., Nezu, I. 2009. Turbulence structure and coherent motion in meandering compound open-channel flows. *JHR* 47, 5: 598–610.

Seber, G. A. F., Lee, A. J. 2003. *Linear Regression Analysis*. Hoboken, John Wiley & Sons: 544 str.

Simoens, S., Ayrault, M. 1994. Concentration flux measurements of a scalar quantity in turbulent flows. *Experiments in Fluids*, 16: 273–281.

Singh, R., Satyanarayana, T. 1994. Automated field irrigation system using side weirs. *J. Irrig. Drain. Eng.* 120,1: 48–59.

Singh, R., Manivannan, D., Satyanarayana, T. 1994. Discharge coefficient of rectangular side weirs. *J. Irrig. Drain. Eng.* 120,4: 814–819.

Sleigh, A., Noakes, C. 2009. An Introduction To Fluid Mechanics: CIVE 1400 – Notes For the Level 1 Lecture Course in Fluid Mechanics. University of Leeds. (online)  
<http://www.efm.leeds.ac.uk/CIVE/CIVE1400/PDF/Notes/section3.pdf> (Pridobljeno 2.11.2011)

Smits, A.J. (ur.), Lim, T.T. (ur.) 2000. Flow visualization – techniques and examples. London, Imperial college Press: 396 str.

Solar, M. 2001. Meritve v elektroniki – 1. Izdaja. Maribor, Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko: str. 15–26.

SonTek/YSI, Inc. 2011. ADV Brochures (online)  
<http://www.sontek.com/pdf/brochures/adv.pdf> (Pridobljeno 11.11.2011)

Steiner, R. J. 1984. Geschiebeabwehr bei einer Wasserfassung mit Hilfe einer Kragschwelle. Dissertation. Graz, Technischen Universität in Graz: 127 f.

Steinman, F. 2010. Hidravlika – 2. Ponatis. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za mehaniko tekočin z laboratorijem: 294 str.

Strnad, J. (ur.). 1981. Leksikoni Cankarjeve založbe – Fizika. Druga, popravljena izdaja. Cankarjeva založba, Ljubljana: 257 str.

Swamee, P. K., Pathak, S. K., Mohan, M., Agrawal, S. K., Ali, M. S. 1994a. Subcritical flow over rectangular side weir. *J. Irrig. Drain. Eng.* 120, 1: 212–217.

Swamee, P. K., Pathak, S. K., Ali, M. S. 1994b. Side–weir analysis using elementary discharge coefficient. *J. Irrig. Drain. Eng.* 120, 4: 742–755.

Širok, B., Blagojević, B., Bajcar, T., Trenc, F. 2003. Simultaneous study of pressure pulsation and structural fluctuations of a cavitated vortex core in the draft tube of a Francis turbine. *JHR* 41, 4: 541–548.

Širok, B., Bajcar, T., Dular, M. 2002. Reverse flow phenomenon in a rotating diffuser. *Journal of Flow Visualization and Image Processing* 9: 2–3: 193–210.

Širok, B., Potočar, E., Novak, M. 2000. Analysis of the flow kinematics behind a pulsating adaptive airfoil using computer-aided visualisation. *SV – JME* 46, 6: 330–341.

Tropea, C. (ur.), Yarin, A. L. (ur.), Foss, J. F. (ur.) 2007. Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics. Berlin, Springer–Verlag: 1557 str.

US Army Corps of Engineers (USACE) – Hydrologic Engineering Center 2010. HEC-RAS River Analysis System Version 4.1 – Hydraulic Reference Manual. (online)  
[http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documents/HEC-RAS\\_4.1\\_Reference\\_Manual.pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documents/HEC-RAS_4.1_Reference_Manual.pdf) (Pridobljeno 26.10.2011)

Uyumaz, A. 1992. Side weir in triangular channel. *J. Irrig. Drain. Eng.* 118, 6: 965–970.

- Uyumaz, A. 1997. Side weir in U-shaped channels. *J. Hydr. Eng.* 123, 7: 639-646.
- Uyumaz, A., Muslu, Y. 1985. Flow over side weirs in circular channels. *J. Hydr. Eng.* 111, 1: 144-160.
- Uyumaz, A., Smith, R. H. 1991. Design procedure for flow over side weirs. *J. Irrig. Drain. Eng.* 117, 1: 79-90.
- van Wijk, J. J. 2002. Image Based Flow Visualization. (online)  
<http://www.win.tue.nl/~vanwijk/ibfv/> (Pridobljeno 20.4.2011)
- Venutelli, M. 2008. Method of Solution of Nonuniform Flow with the Presence of Rectangular Side Weir. *J. Irrig. Drain. Eng.* 134, 6: 840-846.
- Vošnjak, S., Mlačnik, M. 2007. Optimizacija vtoka v dovodni kanal HE Soteska s pomočjo matematičnega modela. Poročilo. Ljubljana, Inštitut za hidravlične raziskave: 49 str.
- Wahl, T. L. 2000. Analyzing ADV Data Using WinADV. 2000 Joint Conference on Water Resources Engineering and Water Resources Planning & Management July 30 – August 2, 2000 – Minneapolis, Minnesota (online)  
[http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics\\_lab/pubs/PAP/PAP-0840.pdf](http://www.usbr.gov/pmts/hydraulics_lab/pubs/PAP/PAP-0840.pdf) (Pridobljeno 25.10.2011)
- Weitbrech, W., Kühn, G., Jirka, G. H. 2002. Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13: 237-245.
- Yang, B., Gao, F., Jeng, D. – S. 2009. Experimental study of vortex-induced vibrations of a cylinder near a rigid plane boundary in steady flow. (online)  
<http://www.springerlink.com/content/d16324x317t50230/fulltext.pdf> (Pridobljeno 22.4.2011)
- Yoshihisa, K., Ken'ichiro, M. 2004. Flow Visualization of Flow around an Oblique Weir in a Compound Open Channel. (online)  
<http://sciencelinks.jp/j-east/article/200423/000020042304A0712023.php> (Pridobljeno 20.4.2011)
- Yüksel, E. 2004. Effect of specific energy variation on lateral overflows. *Flow Measurement and Instrumentation* 15: 259-269.  
[http://www.sciencedirect.com/science?\\_ob=ArticleURL&\\_udi=B6V38-4DCMHMS-1&\\_user=4776866&\\_coverDate=12%2F31%2F2004&\\_rdoc=1&\\_fmt=high&\\_orig=gateway&\\_origin=gateway&\\_sort=d&\\_docanchor=&view=c&\\_searchStrId=1738725929&\\_rerunOrigin=scholar.google&\\_acct=C000033658&\\_version=1&\\_urlVersion=0&\\_userid=4776866&md5=640b6c85e3131b6810921dbae618e786&searchtype=a](http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6V38-4DCMHMS-1&_user=4776866&_coverDate=12%2F31%2F2004&_rdoc=1&_fmt=high&_orig=gateway&_origin=gateway&_sort=d&_docanchor=&view=c&_searchStrId=1738725929&_rerunOrigin=scholar.google&_acct=C000033658&_version=1&_urlVersion=0&_userid=4776866&md5=640b6c85e3131b6810921dbae618e786&searchtype=a) (Pridobljeno 3.5.2011)
- Zlokarnik, M. 1991. Dimensional analysis and scale-up in chemical engineering. Berlin, Springer-Verlag: 176 str.

Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA A: GLAVNI PARAMETRI EKSPERIMENTOV  
ANNEX A: MAIN EXPERIMENTAL PARAMETERS

Priloga A.1: Glavni parametri eksperimentov in oznake variant v ožjem koritu  
Annex A.1: Main experimental parameters and variants notation in narrower channel

	Bočni preliv	Oznaka variante	$Q_l$ [l/s]	$z_{jez}$ [cm]	$Q_b$ [l/s]	$Q_b / Q_l$ [-]	$Fr_1$ [-]	$z_{jez} / p$ [-]	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$h - p$ [cm]
A	$L = 10 \text{ cm}, p = 7,5 \text{ cm}$	Q-	3,31	5,29	0,84	0,25	0,26	0,71	9,52	9,59	2,05
		Q-*	3,68	5,29	0,88	0,24	0,27	0,71	9,79	9,81	2,28
		var 0	3,97	5,29	0,84	0,21	0,29	0,71	9,99	10,07	2,49
		Q+*	4,38	5,30	0,85	0,19	0,31	0,71	10,20	10,34	2,72
		Q+	4,71	5,30	0,92	0,20	0,32	0,71	10,36	10,46	2,93
		Z-	3,97	4,22	0,46	0,12	0,33	0,56	9,12	9,16	1,63
		Z-*	3,95	4,83	0,65	0,17	0,30	0,64	9,59	9,64	2,11
		Z+*	3,95	5,71	1,02	0,26	0,28	0,76	10,23	10,30	2,73
		Z+	3,96	6,12	1,22	0,31	0,26	0,82	10,52	10,61	3,05
B	$L = 15 \text{ cm}, p = 7,5 \text{ cm}$	Q-	3,82	5,28	1,09	0,28	0,29	0,70	9,66	9,84	2,24
		Q-*	4,19	5,28	1,14	0,27	0,31	0,70	9,87	10,04	2,44
		var 0	4,52	5,28	1,24	0,27	0,33	0,70	10,01	10,24	2,60
		Q+*	4,94	5,28	1,32	0,27	0,35	0,70	10,11	10,42	2,76
		Q+	5,30	5,28	1,34	0,25	0,36	0,70	10,41	10,71	3,05
		Z-	4,50	4,21	0,63	0,14	0,36	0,56	9,27	9,44	1,90
		Z-*	4,49	4,90	0,95	0,21	0,34	0,65	9,74	9,96	2,37
		Z+*	4,50	6,20	1,65	0,37	0,30	0,83	10,53	10,84	3,20
		Z+	4,50	6,57	1,87	0,42	0,29	0,88	10,77	11,03	3,39
C	$L = 15 \text{ cm}, p = 10 \text{ cm}$	Q-	4,54	6,90	0,89	0,20	0,25	0,69	12,06	12,21	2,19
		Q-*	4,99	6,90	0,96	0,19	0,26	0,69	12,30	12,48	2,44
		var 0	5,45	6,91	1,09	0,20	0,28	0,69	12,58	12,78	2,67
		Q+*	5,73	6,90	1,22	0,21	0,29	0,69	12,67	12,94	2,79
		Q+	6,06	6,90	1,29	0,21	0,30	0,69	12,84	13,10	2,90
		Z-	5,42	6,00	0,78	0,14	0,30	0,60	11,98	12,08	2,01
		Z-*	5,45	6,36	0,89	0,16	0,29	0,64	12,27	12,43	2,35
		Z+*	5,45	7,37	1,32	0,24	0,27	0,74	12,82	13,06	2,94
		Z+	5,46	8,10	1,65	0,30	0,26	0,81	13,30	13,57	3,42
D	$L = 20 \text{ cm}, p = 10 \text{ cm}$	Q-	5,29	6,41	1,05	0,20	0,29	0,64	11,98	12,20	2,06
		Q-*	5,69	6,41	1,14	0,20	0,30	0,64	12,21	12,43	2,31
		var 0	6,01	6,41	1,29	0,22	0,31	0,64	12,44	12,60	2,45
		Q+*	6,34	6,41	1,39	0,22	0,33	0,64	12,42	12,78	2,61
		Q+	6,62	6,41	1,52	0,23	0,34	0,64	12,59	12,89	2,73
		Z-	6,02	5,80	0,98	0,16	0,33	0,58	11,96	12,26	2,13
		Z-*	6,02	6,11	1,14	0,19	0,32	0,61	12,15	12,44	2,30
		Z+*	6,03	6,81	1,50	0,25	0,31	0,68	12,57	12,85	2,70
		Z+	6,01	7,15	1,64	0,27	0,30	0,72	12,74	13,05	2,89

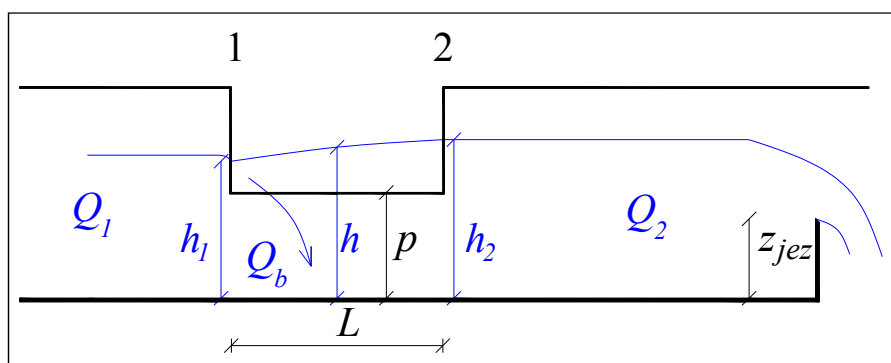
se nadaljuje...



... nadaljevanje Priloge A.1: Glavni parametri eksperimentov in oznake variant v ožjem koritu  
... continued Annex A.1: Main experimental parameters and variants notation in narrower channel

	Preliv	Oznaka variante	$Q_1$ [l/s]	$z_{jez}$ [cm]	$Q_b$ [l/s]	$Q_b / Q_1$ [-]	$Fr_1$ [-]	$z_{jez} / p$ [-]	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$h - p$ [cm]
E	$L = 20 \text{ cm}, p = 12 \text{ cm}$	Q-	5,45	8,10	0,83	0,15	0,25	0,68	13,69	13,88	1,80
		Q-*	6,14	8,10	1,10	0,18	0,27	0,68	14,04	14,32	2,16
		var 0	6,62	8,10	1,35	0,20	0,28	0,68	14,28	14,42	2,37
		Q+*	7,07	8,10	1,51	0,21	0,29	0,68	14,46	14,76	2,59
		Q+	7,59	8,10	1,83	0,24	0,31	0,68	14,63	14,92	2,79
		Z-	6,68	7,19	1,06	0,16	0,29	0,60	13,97	14,22	2,11
		Z-*	6,64	7,78	1,19	0,18	0,29	0,65	14,08	14,31	2,18
		Z+*	6,66	8,37	1,63	0,24	0,27	0,70	14,61	14,89	2,72
		Z+	6,61	8,83	1,85	0,28	0,26	0,74	14,84	15,18	2,99
F	$L = 25 \text{ cm}, p = 12 \text{ cm}$	Q-	6,34	7,33	1,09	0,17	0,28	0,61	13,73	13,96	1,87
		Q-*	6,59	7,33	1,21	0,18	0,29	0,61	13,83	14,09	1,93
		var 0	6,94	7,33	1,36	0,20	0,31	0,61	13,91	14,21	2,05
		Q+*	7,45	7,33	1,61	0,22	0,32	0,61	14,17	14,50	2,31
		Q+	7,83	7,33	1,79	0,23	0,33	0,61	14,25	14,63	2,47
		Z-	6,94	6,78	1,07	0,15	0,31	0,57	13,70	13,90	1,79
		Z-*	6,91	7,70	1,52	0,22	0,30	0,64	14,09	14,37	2,18
		Z+*	6,96	8,28	1,82	0,26	0,29	0,69	14,36	14,72	2,54
		Z+	6,94	8,76	2,07	0,30	0,28	0,73	14,62	14,91	2,78

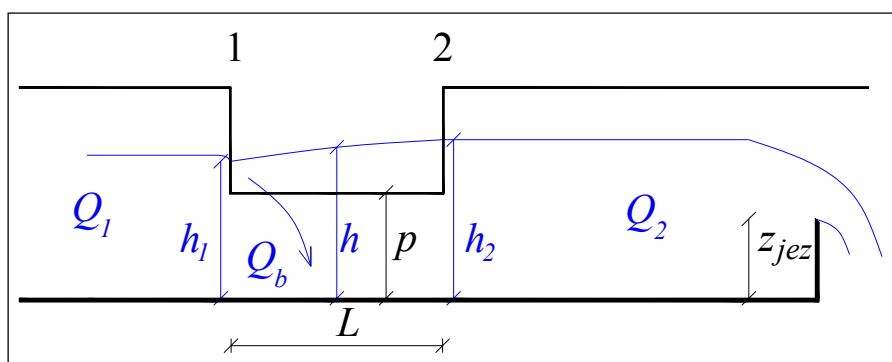
Op.: Oznaka variante nakazuje, v čem se varianta razlikuje od izhodiščne (oznaka var 0): Q pomeni drugačen dotok (+ večji, - manjši), oznaka Z pa pomeni drugačno višino spodnje vode (+ večja, - manjša).



Priloga A.2: Glavni parametri eksperimentov in oznake variant v širšem koritu  
 Annex A.2: Main experimental parameters and variants notation in wider channel

	Preliv	Oznaka variante	$Q_1$ [l/s]	$z_{\text{jez}}$ [cm]	$Q_b$ [l/s]	$Q_b / Q_1$ [-]	$Fr_1$ [-]	$z_{\text{jez}} / p$ [-]	$h_1$ [cm]	$h_2$ [cm]	$h - p$ [cm]
G	$L = 50 \text{ cm}, p = 12 \text{ cm}$	Q20 a	20,00	6,95	6,04	0,30	0,37	0,59	14,98	15,39	3,46
		Q20 b	19,85	10,21	9,99	0,50	0,32	0,87	16,41	16,94	4,92
		Q20 c	18,75	13,57	13,49	0,72	0,26	1,15	17,88	18,22	6,29
		Q17 a	17,10	8,49	6,67	0,39	0,30	0,72	15,34	15,74	3,74
		Q17 b	17,20	10,14	8,68	0,50	0,29	0,86	16,01	16,44	4,42
		Q17 c	17,10	11,58	10,19	0,60	0,27	0,98	16,51	16,96	5,00
		Q14 a	14,25	8,70	5,46	0,38	0,27	0,74	14,80	15,09	3,17
		Q14 b	14,25	10,08	7,03	0,49	0,25	0,85	15,46	15,79	3,82
		Q14 c	14,05	11,68	8,45	0,60	0,23	0,99	15,94	16,21	4,33
H	$L = 75 \text{ cm}, p = 14 \text{ cm}$	Q28 a	27,90	8,15	10,01	0,36	0,41	0,58	17,41	18,30	3,73
		Q28 b	27,90	10,87	14,30	0,51	0,38	0,77	18,42	19,41	4,84
		Q28 c	27,90	12,73	16,96	0,61	0,36	0,90	19,05	19,93	5,46
		Q25 a	25,00	10,02	11,49	0,46	0,36	0,71	17,74	18,62	4,07
		Q25 b	25,20	12,85	15,89	0,63	0,33	0,91	18,87	19,52	5,10
		Q25 c	25,18	15,19	19,01	0,76	0,31	1,08	19,52	20,20	5,81
		Q22 a	22,00	10,12	9,95	0,45	0,32	0,72	17,46	18,13	3,67
		Q22 b	22,20	13,00	14,14	0,64	0,30	0,92	18,50	19,09	4,74
		Q22 c	22,10	14,88	16,35	0,74	0,28	1,06	19,04	19,43	5,23
I	$L = 100 \text{ cm}, p = 20 \text{ cm}$	Q35 a	34,60	12,80	14,82	0,43	0,33	0,64	23,36	24,16	3,81
		Q35 b	34,60	13,63	16,23	0,47	0,32	0,68	23,58	24,34	4,06
		Q35 c	34,55	15,79	19,38	0,56	0,31	0,79	24,27	25,05	4,78
		Q30 a	30,20	13,73	13,43	0,44	0,29	0,69	23,07	23,78	3,48
		Q30 b	30,20	14,21	14,57	0,48	0,29	0,71	23,19	23,91	3,66
		Q30 c	30,20	15,12	15,29	0,51	0,28	0,76	23,48	24,19	3,92
		Q25 a	25,30	16,81	15,41	0,61	0,24	0,84	23,37	24,02	3,80
		Q25 b	25,30	17,85	16,66	0,66	0,23	0,90	23,68	24,27	4,07
		Q25 c	25,20	19,10	18,39	0,73	0,23	0,96	24,00	24,53	4,41

Op.: Oznaka variante pomeni vrednost dotoka  $Q_1$  v [l/s] in deleža bočnega odlivanja  $Q_b$  (ki je seveda odvisen od višine dolvodnega jezua za uravnavanje višine spodnje vode): oznaka a pomeni najmanjši merjeni  $Q_b$ , oznaka c pa največji merjeni  $Q_b$ .



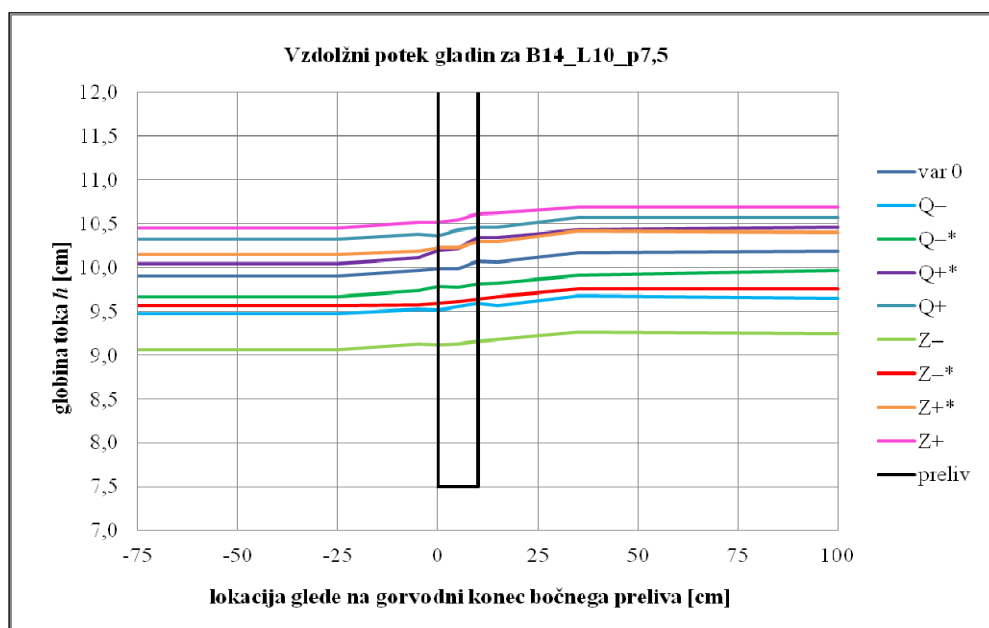
Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA B: IZMERJENE GLOBINE IN PRETOKI  
ANNEX B: MEASURED FLOW DEPTHS AND DISCHARGES

Priloga B.1: Izmerjene globine in pretoki za varianto  $B = 14$  cm,  $L = 10$  cm,  $p = 7,5$  cm  
Annex B.1: Measured flow depths and discharges for variant  $B = 14$  cm,  $L = 10$  cm,  $p = 7,5$  cm

lokacija	oznaka (indeks)	od gorv. konca preliva [cm]	odčitek dna ostno merilo [cm]
natok	NAT	-75	31,58
zgornja voda	ZV	-25	31,58
pred prelivom	1*	-5	31,55
preliv gorv.	1	0	31,55
sredina preliva	p	5	31,59
preliv dolv.	2	10	31,61
za prelivom	2*	15	31,61
spodnja voda	SV	35	31,54
odtok	ODT	100	31,53
dolvodni jez	$z_{jez}$	120	

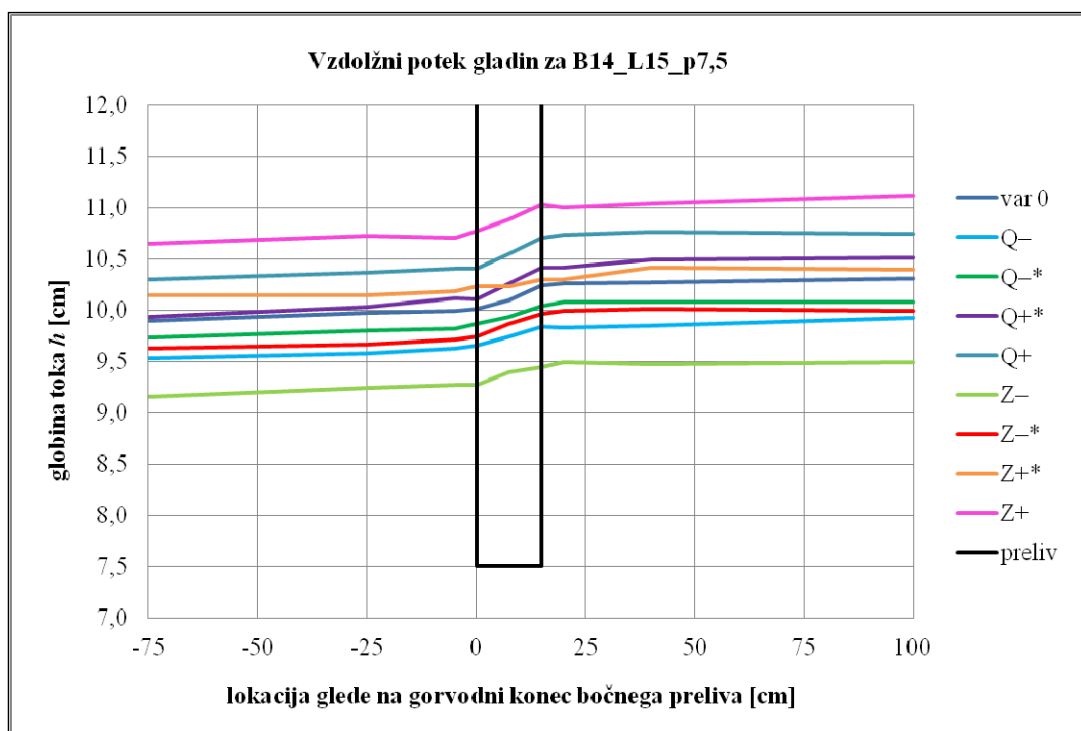
var.	prag jezua $z_{jez}$ [cm]	pretoki [l/s]			$Q_b/Q_1$	globine [cm]								
		$Q_1$	$Q_2$	$Q_b$		$h_{ODT}$	$h_{SV}$	$h_{2^*}$	$h_2$	$h_p$	$h_1$	$h_{1^*}$	$h_{ZV}$	$h_{NAT}$
Q-	5,29	3,31	2,47	0,84	0,25	9,65	9,68	9,56	9,59	9,55	9,52	9,53	9,48	9,48
Q-*	5,29	3,68	2,80	0,88	0,24	9,97	9,91	9,82	9,81	9,78	9,79	9,74	9,67	9,67
var 0	5,29	3,97	3,12	0,84	0,21	10,19	10,17	10,06	10,07	9,99	9,99	9,97	9,90	9,90
Q+*	5,30	4,38	3,53	0,85	0,19	10,46	10,43	10,34	10,34	10,22	10,20	10,11	10,05	10,05
Q+	5,30	4,71	3,79	0,92	0,20	10,57	10,57	10,46	10,46	10,43	10,36	10,38	10,32	10,32
Z-	4,22	3,97	3,51	0,46	0,12	9,25	9,27	9,18	9,16	9,13	9,12	9,13	9,06	9,06
Z-*	4,83	3,95	3,29	0,65	0,17	9,76	9,76	9,67	9,64	9,61	9,59	9,57	9,56	9,56
var 0	5,29	3,97	3,12	0,84	0,21	10,19	10,17	10,06	10,07	9,99	9,99	9,97	9,90	9,90
Z+*	5,71	3,95	2,93	1,02	0,26	10,40	10,42	10,30	10,30	10,23	10,23	10,19	10,15	10,15
Z+	6,12	3,96	2,74	1,22	0,31	10,69	10,69	10,62	10,61	10,55	10,52	10,52	10,45	10,45



Priloga B.2: Izmerjene globine in pretoki za varianto  $B = 14 \text{ cm}$ ,  $L = 15 \text{ cm}$ ,  $p = 7,5 \text{ cm}$ Annex B.2: Measured flow depths and discharges for variant  $B = 14 \text{ cm}$ ,  $L = 15 \text{ cm}$ ,  $p = 7,5 \text{ cm}$ 

lokacija	oznaka (indeks)	od gorv. konca preliva [cm]	odčitek dna ostno merilo [cm]
natok	NAT	-50	31,62
zgornja voda	ZV	-25	31,56
pred prelivom	1*	-5	31,55
preliv gorv.	1	0	31,55
sredina preliva	p	7,5	31,52
preliv dolv.	2	15	31,52
za prelivom	2*	20	31,51
spodnja voda	SV	40	31,54
odtok	ODT	100	31,52
dolvodni jez	$z_{jez}$	120	

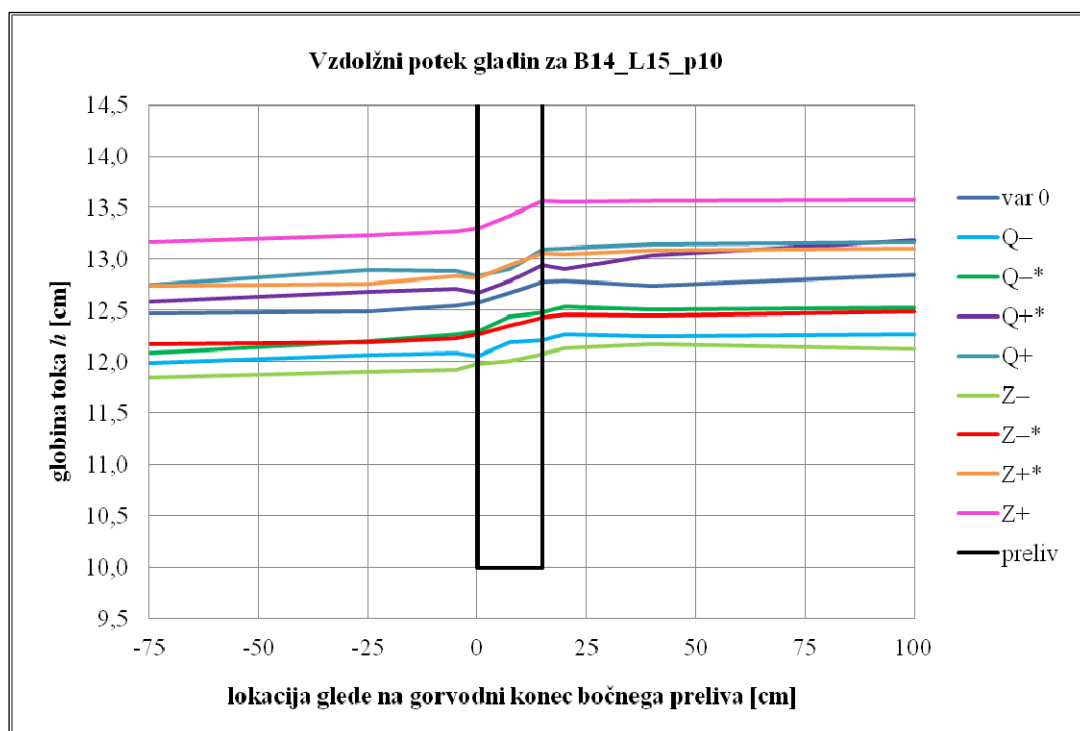
var.	prag jezu $z_{jez}$ [cm]	pretoki [l/s]			$Q_b/Q_1$	globine [cm]								
		$Q_1$	$Q_2$	$Q_b$		$h_{ODT}$	$h_{SV}$	$h_{2*}$	$h_2$	$h_p$	$h_1$	$h_{1*}$	$h_{ZV}$	$h_{NAT}$
Q-	5,28	3,82	2,73	1,09	0,28	9,93	9,85	9,83	9,84	9,74	9,66	9,63	9,58	9,53
Q-*	5,28	4,19	3,05	1,14	0,27	10,08	10,08	10,08	10,04	9,94	9,87	9,82	9,80	9,73
var 0	5,28	4,52	3,28	1,24	0,27	10,31	10,27	10,26	10,24	10,10	10,01	9,99	9,97	9,90
Q+*	5,28	4,94	3,63	1,32	0,27	10,51	10,49	10,42	10,42	10,26	10,11	10,12	10,03	9,94
Q+	5,28	5,30	3,96	1,34	0,25	10,74	10,76	10,73	10,71	10,55	10,41	10,41	10,37	10,30
Z-	4,21	4,50	3,87	0,63	0,14	9,49	9,47	9,49	9,44	9,40	9,27	9,27	9,24	9,16
Z-*	4,90	4,49	3,54	0,95	0,21	9,99	10,01	9,99	9,96	9,87	9,74	9,71	9,67	9,63
var 0	5,28	4,52	3,28	1,24	0,27	10,31	10,27	10,26	10,24	10,10	10,01	9,99	9,97	9,90
Z+*	6,20	4,50	2,85	1,65	0,37	10,89	10,85	10,85	10,84	10,70	10,53	10,55	10,50	10,45
Z+	6,57	4,50	2,64	1,87	0,42	11,12	11,04	11,00	11,03	10,89	10,77	10,71	10,72	10,65



Priloga B.3: Izmerjene globine in pretoki za varianto  $B = 14 \text{ cm}$ ,  $L = 15 \text{ cm}$ ,  $p = 10 \text{ cm}$   
Annex B.3: Measured flow depths and discharges for variant  $B = 14 \text{ cm}$ ,  $L = 15 \text{ cm}$ ,  $p = 10 \text{ cm}$

lokacija	oznaka (indeks)	od gorv. konca preliva [cm]	odčitek dna ostno merilo [cm]
natok	NAT	-50	31,62
zgornja voda	ZV	-25	31,56
pred prelivom	1*	-5	31,55
preliv gorv.	1	0	31,55
sredina preliva	p	7,5	31,52
preliv dolv.	2	15	31,52
za prelivom	2*	20	31,51
spodnja voda	SV	40	31,54
odtok	ODT	100	31,52
dolvodni jez	$z_{\text{jez}}$	120	

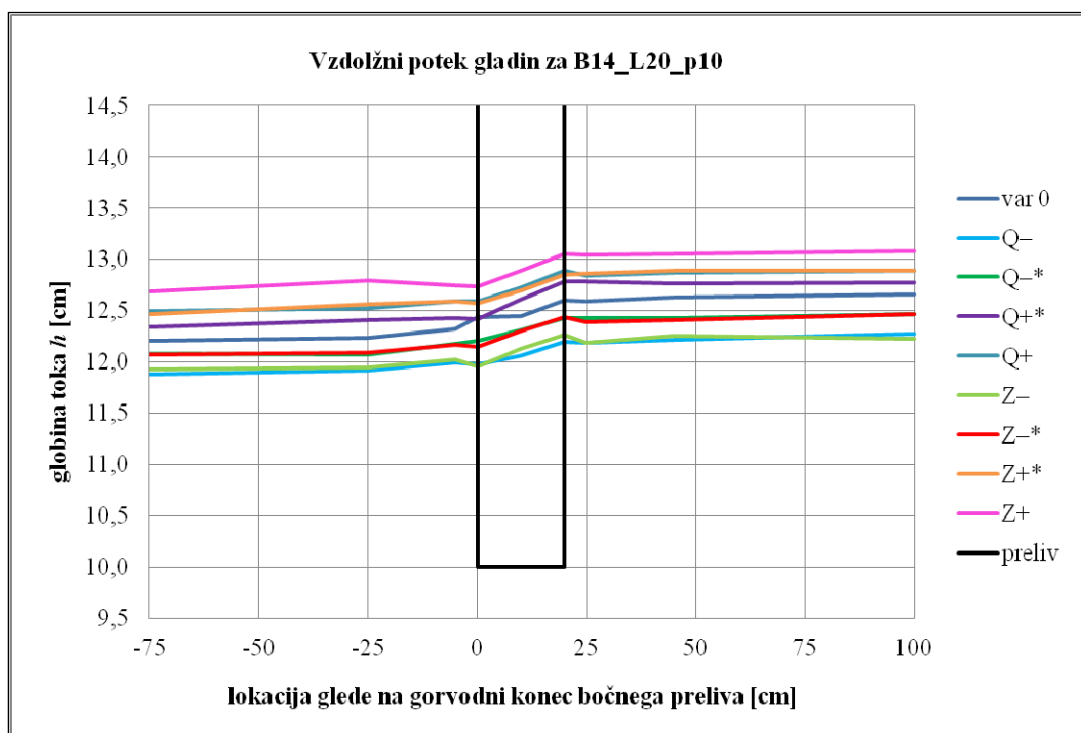
var.	prag jez	pretoki [l/s]			$Q_b/Q_1$	globine [cm]								
	$z_{\text{jez}}$ [cm]	$Q_1$	$Q_2$	$Q_b$		$h_{ODT}$	$h_{SV}$	$h_{2^*}$	$h_2$	$h_p$	$h_1$	$h_{1^*}$	$h_{ZV}$	$h_{NAT}$
Q-	6,90	4,54	3,65	0,89	0,20	12,27	12,25	12,27	12,21	12,19	12,06	12,09	12,07	11,99
Q-*	6,90	4,99	4,03	0,96	0,19	12,53	12,51	12,54	12,48	12,44	12,30	12,27	12,20	12,09
var 0	6,91	5,45	4,35	1,09	0,20	12,85	12,74	12,79	12,78	12,67	12,58	12,55	12,49	12,47
Q+*	6,90	5,73	4,51	1,22	0,21	13,18	13,04	12,90	12,94	12,79	12,67	12,71	12,68	12,59
Q+	6,90	6,06	4,77	1,29	0,21	13,16	13,14	13,11	13,10	12,90	12,84	12,88	12,89	12,75
Z-	6,00	5,42	4,64	0,78	0,14	12,12	12,17	12,13	12,08	12,01	11,98	11,92	11,90	11,84
Z-*	6,36	5,45	4,56	0,89	0,16	12,49	12,45	12,46	12,43	12,35	12,27	12,23	12,19	12,17
var 0	6,91	5,45	4,35	1,09	0,20	12,85	12,74	12,79	12,78	12,67	12,58	12,55	12,49	12,47
Z+*	7,37	5,45	4,13	1,32	0,24	13,11	13,09	13,05	13,06	12,94	12,82	12,84	12,76	12,74
Z+	8,10	5,46	3,81	1,65	0,30	13,58	13,57	13,56	13,57	13,42	13,30	13,27	13,23	13,16



Priloga B.4: Izmerjene globine in pretoki za varianto  $B = 14 \text{ cm}$ ,  $L = 20 \text{ cm}$ ,  $p = 10 \text{ cm}$ Annex B.4: Measured flow depths and discharges for variant  $B = 14 \text{ cm}$ ,  $L = 20 \text{ cm}$ ,  $p = 10 \text{ cm}$ 

lokacija	oznaka (indeks)	od gorv. konca preliva [cm]	odčitek dna ostno merilo [cm]
natok	NAT	-50	31,62
zgornja voda	ZV	-25	31,58
pred prelivom	1*	-5	31,55
preliv gorv.	1	0	31,54
sredina preliva	p	10	31,53
preliv dolv.	2	20	31,51
za prelivom	2*	25	31,52
spodnja voda	SV	45	31,57
odtok	ODT	100	31,54
dolvodni jez	$z_{jez}$	120	

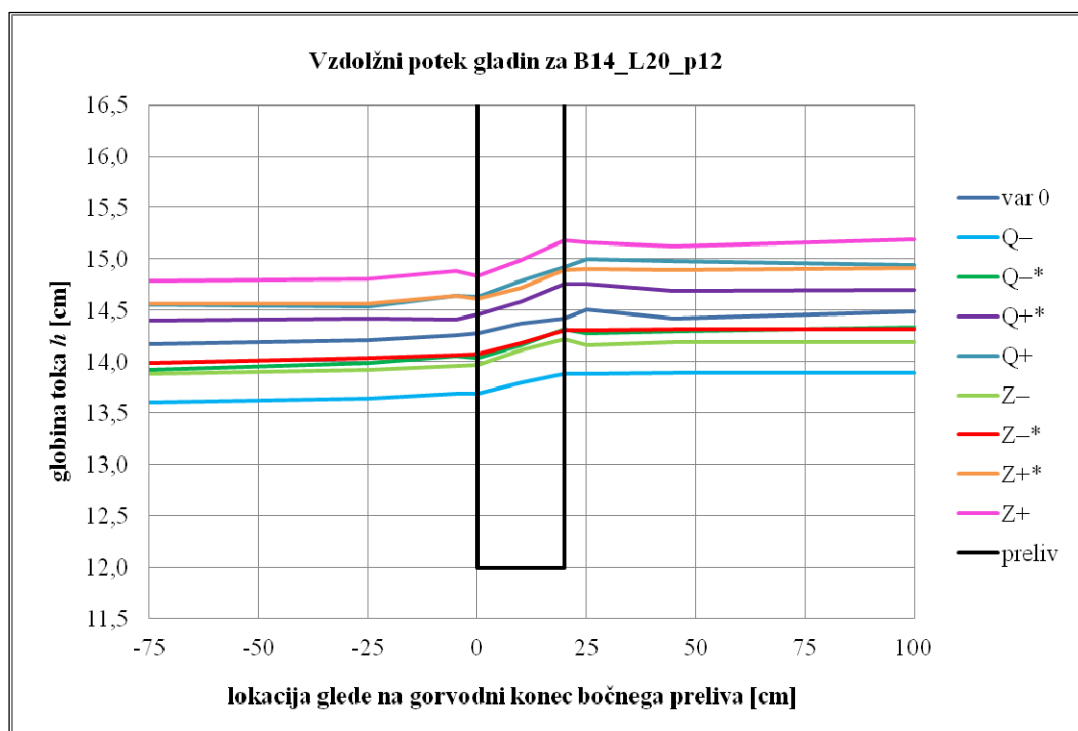
var.	prag jezu $z_{jez}$ [cm]	pretoki [l/s]			$Q_b/Q_1$	globine [cm]								
		$Q_1$	$Q_2$	$Q_b$		$h_{ODT}$	$h_{SV}$	$h_{2^*}$	$h_2$	$h_p$	$h_1$	$h_{1^*}$	$h_{ZV}$	$h_{NAT}$
Q-	6,41	5,29	4,24	1,05	0,20	12,27	12,22	12,19	12,20	12,06	11,98	11,99	11,92	11,88
Q-*	6,41	5,69	4,55	1,14	0,20	12,47	12,43	12,43	12,43	12,31	12,21	12,18	12,07	12,08
var 0	6,41	6,01	4,72	1,29	0,22	12,66	12,63	12,59	12,60	12,45	12,44	12,32	12,24	12,21
Q+*	6,41	6,34	4,95	1,39	0,22	12,77	12,76	12,78	12,78	12,61	12,42	12,43	12,41	12,34
Q+	6,41	6,62	5,10	1,52	0,23	12,89	12,87	12,84	12,89	12,73	12,59	12,59	12,52	12,50
Z-	5,80	6,02	5,04	0,98	0,16	12,23	12,25	12,19	12,26	12,13	11,96	12,02	11,95	11,93
Z-*	6,11	6,02	4,88	1,14	0,19	12,47	12,41	12,39	12,44	12,30	12,15	12,17	12,09	12,07
var 0	6,41	6,01	4,72	1,29	0,22	12,66	12,63	12,59	12,60	12,45	12,44	12,32	12,24	12,21
Z+*	6,81	6,03	4,52	1,50	0,25	12,89	12,89	12,86	12,85	12,70	12,57	12,59	12,56	12,47
Z+	7,15	6,01	4,37	1,64	0,27	13,08	13,05	13,04	13,05	12,89	12,74	12,75	12,79	12,69



Priloga B.5: Izmerjene globine in pretoki za varianto  $B = 14 \text{ cm}$ ,  $L = 20 \text{ cm}$ ,  $p = 12 \text{ cm}$   
Annex B.5: Measured flow depths and discharges for variant  $B = 14 \text{ cm}$ ,  $L = 20 \text{ cm}$ ,  $p = 12 \text{ cm}$

lokacija	oznaka (indeks)	od gorv. konca preliva [cm]	odčitek dna ostno merilo [cm]
natok	NAT	-50	31,62
zgornja voda	ZV	-25	31,58
pred prelivom	1*	-5	31,55
preliv gorv.	1	0	31,54
sredina preliva	p	10	31,53
preliv dolv.	2	20	31,51
za prelivom	2*	25	31,52
spodnja voda	SV	45	31,57
odtok	ODT	100	31,54
dolvodni jez	$z_{\text{jez}}$	120	

var.	prag jezua $z_{\text{jez}}$ [cm]	pretoki [l/s]			$Q_b/Q_1$	globine [cm]								
		$Q_1$	$Q_2$	$Q_b$		$h_{ODT}$	$h_{SV}$	$h_{2^*}$	$h_2$	$h_p$	$h_1$	$h_{1^*}$	$h_{ZV}$	$h_{NAT}$
Q-	8,10	5,45	4,63	0,83	0,15	13,89	13,89	13,88	13,88	13,80	13,69	13,69	13,64	13,60
Q-*	8,10	6,14	5,04	1,10	0,18	14,34	14,30	14,28	14,32	14,16	14,04	14,06	13,99	13,92
var 0	8,10	6,62	5,27	1,35	0,20	14,49	14,42	14,51	14,42	14,37	14,28	14,26	14,21	14,17
Q+*	8,10	7,07	5,56	1,51	0,21	14,70	14,69	14,76	14,76	14,59	14,46	14,41	14,42	14,40
Q+	8,10	7,59	5,75	1,83	0,24	14,94	14,98	15,00	14,92	14,79	14,63	14,64	14,54	14,56
Z-	7,19	6,68	5,63	1,06	0,16	14,19	14,19	14,16	14,22	14,11	13,97	13,96	13,92	13,88
Z-*	7,78	6,64	5,45	1,19	0,18	14,32	14,32	14,31	14,31	14,18	14,08	14,07	14,04	13,99
var 0	8,10	6,62	5,27	1,35	0,20	14,49	14,42	14,51	14,42	14,37	14,28	14,26	14,21	14,17
Z+*	8,37	6,66	5,03	1,63	0,24	14,91	14,89	14,90	14,89	14,72	14,61	14,64	14,57	14,57
Z+	8,83	6,61	4,76	1,85	0,28	15,19	15,12	15,16	15,18	14,99	14,84	14,88	14,81	14,79

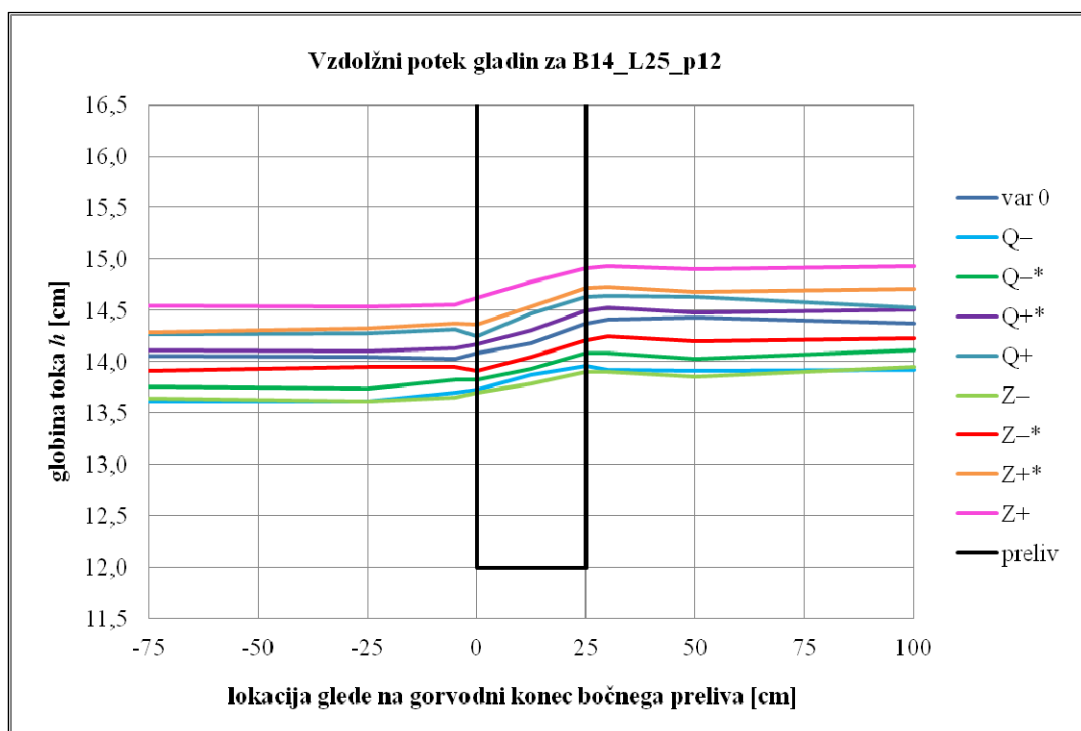




Priloga B.6: Izmerjene globine in pretoki za varianto  $B = 14 \text{ cm}$ ,  $L = 25 \text{ cm}$ ,  $p = 12 \text{ cm}$ Annex B.6: Measured flow depths and discharges for variant  $B = 14 \text{ cm}$ ,  $L = 25 \text{ cm}$ ,  $p = 12 \text{ cm}$ 

lokacija	oznaka (indeks)	od gorv. konca preliva [cm]	odčitek dna ostno merilo [cm]
natok	NAT	-75	31,59
zgornja voda	ZV	-25	31,58
pred prelivom	1*	-5	31,55
preliv gorv.	1	0	31,55
sredina preliva	p	12,5	31,53
preliv dolv.	2	25	31,50
za prelivom	2*	30	31,50
spodnja voda	SV	50	31,55
odtok	ODT	100	31,53
dolvodni jez	$z_{jez}$	120	

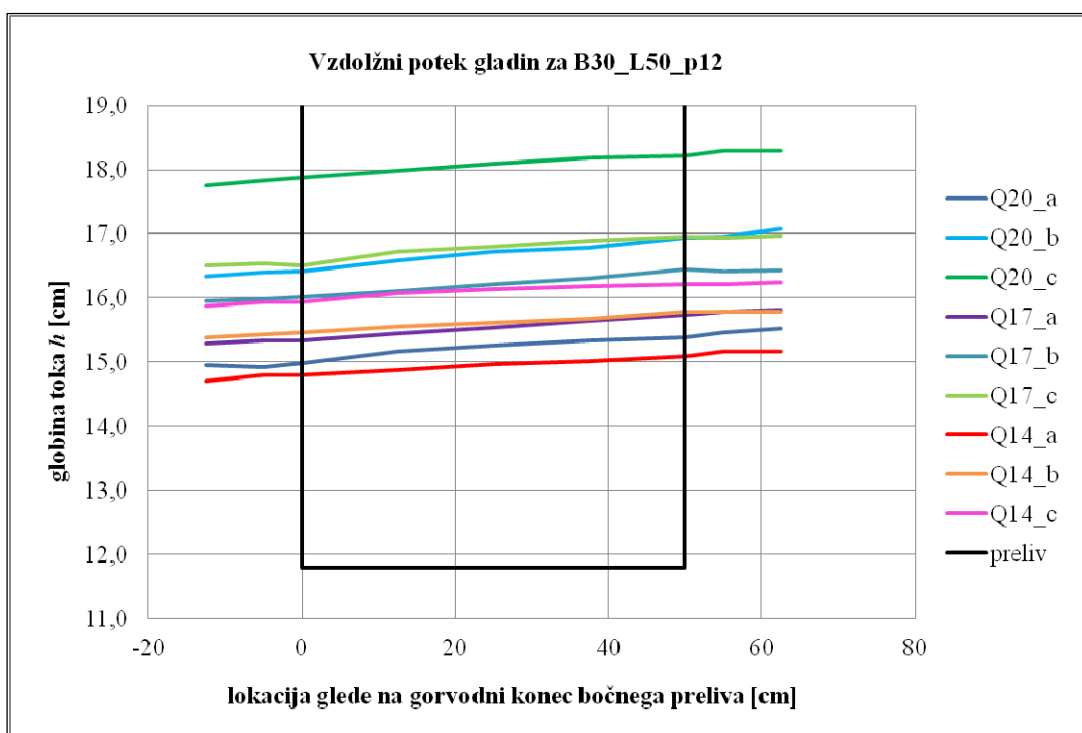
var.	prag jezu $z_{jez}$ [cm]	pretoki [l/s]			$Q_b/Q_1$	globine [cm]								
		$Q_1$	$Q_2$	$Q_b$		$h_{ODT}$	$h_{SV}$	$h_{2^*}$	$h_2$	$h_p$	$h_1$	$h_{1^*}$	$h_{ZV}$	$h_{NAT}$
Q-	7,33	6,34	5,25	1,09	0,17	13,92	13,91	13,92	13,96	13,87	13,73	13,70	13,61	13,61
Q-*	7,33	6,59	5,38	1,21	0,18	14,11	14,03	14,09	14,09	13,93	13,83	13,83	13,74	13,76
var 0	7,33	6,94	5,59	1,36	0,20	14,23	14,20	14,25	14,21	14,05	13,91	13,95	13,95	13,91
Q+*	7,33	7,45	5,84	1,61	0,22	14,51	14,48	14,53	14,50	14,31	14,17	14,13	14,10	14,11
Q+	7,33	7,83	6,03	1,79	0,23	14,53	14,63	14,64	14,63	14,47	14,25	14,32	14,28	14,27
Z-	6,78	6,94	5,87	1,07	0,15	13,95	13,85	13,90	13,90	13,79	13,70	13,65	13,61	13,64
Z-*	7,33	6,94	5,59	1,36	0,20	14,23	14,20	14,25	14,21	14,05	13,91	13,95	13,95	13,91
var 0	7,70	6,91	5,39	1,52	0,22	14,37	14,43	14,41	14,37	14,18	14,09	14,03	14,05	14,06
Z+*	8,28	6,96	5,13	1,82	0,26	14,71	14,68	14,73	14,72	14,54	14,36	14,37	14,33	14,29
Z+	8,76	6,94	4,86	2,07	0,30	14,93	14,90	14,93	14,91	14,78	14,62	14,56	14,54	14,55



Priloga B.7: Izmerjene globine in pretoki za varianto  $B = 30 \text{ cm}$ ,  $L = 50 \text{ cm}$ ,  $p = 12 \text{ cm}$   
 Annex B.7: Measured flow depths and discharges for variant  $B = 30 \text{ cm}$ ,  $L = 50 \text{ cm}$ ,  $p = 12 \text{ cm}$

lokacija	oznaka	cm od gorv.	odčitek ostno merilo [cm]	
	(indeks)	konca preliva	dno	krona
zgornja voda	<i>gor</i>	-12,5	5,64	
pred prelivom	<i>1*</i>	-5	5,61	
$x/L = 0$	<i>1</i>	0	5,59	17,35
$x/L = 0,25$	$x/L = 0,25$	12,5	5,56	17,35
$x/L = 0,50$	<i>p</i>	25	5,58	17,35
$x/L = 0,75$	$x/L = 0,75$	37,5	5,59	17,36
$x/L = 1$	<i>2</i>	50	5,59	17,35
za prelivom	<i>2*</i>	55	5,59	
spodnja voda	<i>dol</i>	62,5	5,57	
dolvodni jez	<i>z<sub>jez</sub></i>	185	5,50	

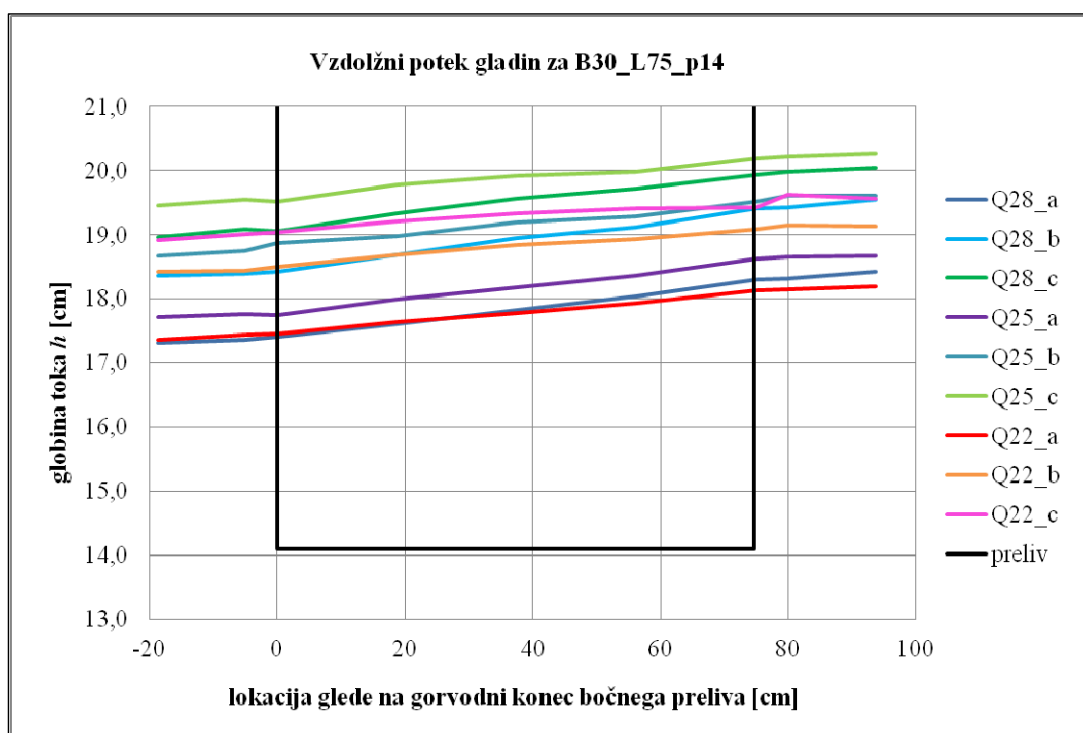
var.	prag jez	pretoki [l/s]			$Q_b/Q_1$	globine [cm]								
	$z_{jez}$ [cm]	$Q_1$	$Q_2$	$Q_b$		$h_{gor}$	$h_{1*}$	$h_1$	$h_{x/L=0,25}$	$h_p$	$h_{x/L=0,75}$	$h_2$	$h_{2*}$	$h_{dol}$
Q20_a	6,95	20,00	13,96	6,04	0,30	14,95	14,92	14,98	15,17	15,26	15,34	15,39	15,46	15,52
Q20_b	10,21	19,85	9,86	9,99	0,50	16,33	16,40	16,41	16,59	16,72	16,79	16,94	16,96	17,07
Q20_c	13,57	18,75	5,26	13,49	0,72	17,76	17,83	17,88	17,98	18,09	18,19	18,22	18,29	18,29
Q17_a	8,49	17,10	10,43	6,67	0,39	15,29	15,33	15,34	15,44	15,54	15,64	15,74	15,78	15,81
Q17_b	10,14	17,20	8,52	8,68	0,50	15,95	15,98	16,01	16,11	16,22	16,31	16,44	16,41	16,43
Q17_c	11,58	17,10	6,91	10,19	0,60	16,50	16,54	16,51	16,73	16,80	16,89	16,96	16,94	16,97
Q14_a	8,70	14,25	8,79	5,46	0,38	14,70	14,79	14,80	14,87	14,97	15,01	15,09	15,16	15,17
Q14_b	10,08	14,25	7,22	7,03	0,49	15,39	15,43	15,46	15,55	15,62	15,67	15,79	15,78	15,79
Q14_c	11,68	14,05	5,60	8,45	0,60	15,88	15,93	15,94	16,08	16,13	16,18	16,21	16,21	16,25



Priloga B.8: Izmerjene globine in pretoki za varianto  $B = 30$  cm,  $L = 75$  cm,  $p = 14$  cmAnnex B.8: Measured flow depths and discharges for variant  $B = 30$  cm,  $L = 75$  cm,  $p = 14$  cm

lokacija	oznaka (indeks)	cm od gorv. konca preliva	odčitek ostno merilo [cm]	
			dno	krona
zgornja voda	<i>gor</i>	-18,7	5,68	
pred prelivom	<i>l*</i>	-5	5,60	
$x/L = 0$	<i>l</i>	0	5,59	19,70
$x/L = 0,25$	$x/L = 0,25$	18,7	5,57	19,69
$x/L = 0,50$	<i>p</i>	37,4	5,58	19,70
$x/L = 0,75$	$x/L = 0,75$	56,1	5,59	19,71
$x/L = 1$	<i>2</i>	75	5,55	19,73
za prelivom	<i>2*</i>	80	5,54	
spodnja voda	<i>dol</i>	93,7	5,53	
dolvodni jez	<i>z<sub>jez</sub></i>	185	5,50	

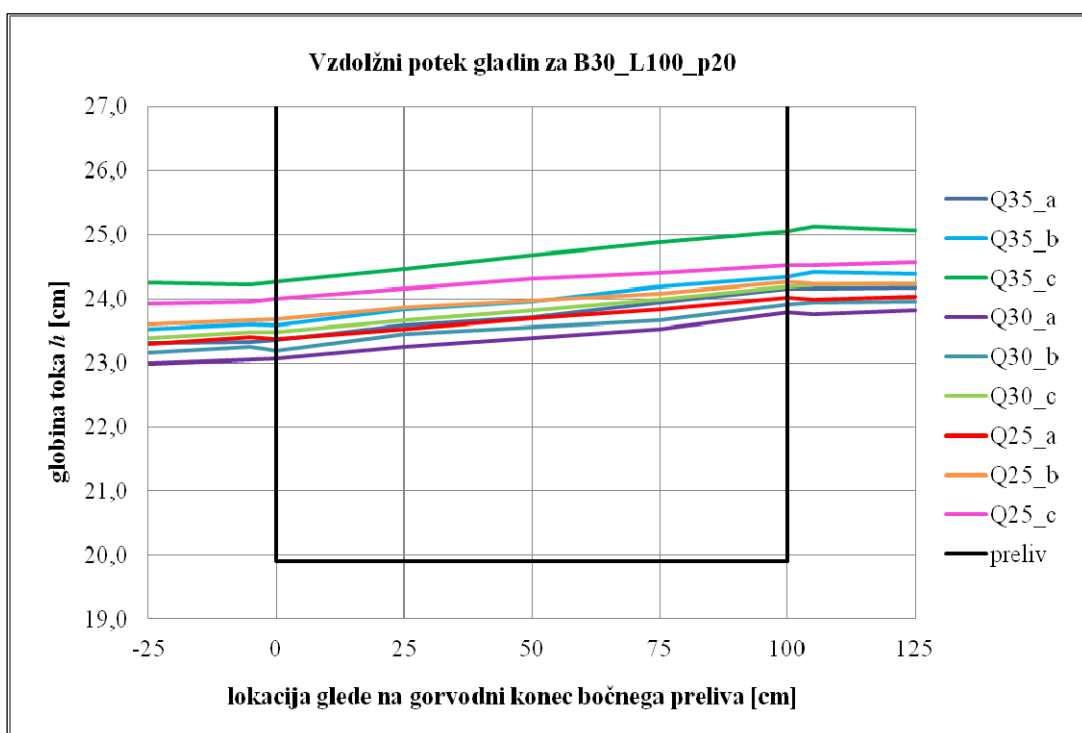
var.	prag jez	pretoki [l/s]			$Q_b/Q_1$	globine [cm]								
		$z_{jez}$ [cm]	$Q_1$	$Q_2$		$Q_b$	$h_{gor}$	$h_{l*}$	$h_l$	$h_{x/L=0,25}$	$h_p$	$h_{x/L=0,75}$	$h_2$	$h_{2*}$
Q28_a	8,15	27,90	17,89	10,01	0,36	17,32	17,36	17,41	17,61	17,83	18,04	18,30	18,31	18,42
Q28_b	10,87	27,90	13,60	14,30	0,51	18,36	18,40	18,42	18,69	18,94	19,12	19,41	19,43	19,54
Q28_c	12,73	27,90	10,94	16,96	0,61	18,96	19,08	19,05	19,33	19,56	19,72	19,93	19,98	20,04
Q25_a	10,02	25,00	13,51	11,49	0,46	17,72	17,76	17,74	17,99	18,17	18,36	18,62	18,65	18,67
Q25_b	12,85	25,20	9,31	15,89	0,63	18,67	18,75	18,87	18,98	19,20	19,28	19,52	19,61	19,61
Q25_c	15,19	25,18	6,16	19,01	0,76	19,45	19,54	19,52	19,78	19,91	19,98	20,20	20,22	20,27
Q22_a	10,12	22,00	12,05	9,95	0,45	17,36	17,44	17,46	17,64	17,77	17,93	18,13	18,14	18,20
Q22_b	13,00	22,20	8,06	14,14	0,64	18,42	18,44	18,50	18,68	18,84	18,93	19,09	19,15	19,13
Q22_c	14,88	22,10	5,75	16,35	0,74	18,92	19,01	19,04	19,21	19,33	19,41	19,43	19,62	19,57



Priloga B.9: Izmerjene globine in pretoki za varianto  $B = 30$  cm,  $L = 100$  cm,  $p = 20$  cm  
Annex B.9: Measured flow depths and discharges for variant  $B = 30$  cm,  $L = 100$  cm,  $p = 20$  cm

lokacija	oznaka	cm od gorv.	odčitek ostno merilo [cm]	
	(indeks)	konca preliva	dno	krona
zgornja voda	<i>gor</i>	-25	5,80	
pred prelivom	<i>1*</i>	-5	5,73	
$x/L = 0$	<i>1</i>	0	5,73	25,54
$x/L = 0,25$	$x/L = 0,25$	25	5,72	25,58
$x/L = 0,50$	<i>p</i>	50	5,74	25,58
$x/L = 0,75$	$x/L = 0,75$	75	5,70	25,56
$x/L = 1$	<i>2</i>	100	5,66	25,58
za prelivom	<i>2*</i>	105	5,66	
spodnja voda	<i>dol</i>	125	5,65	
dolvodni jez	<i>z jez</i>	185	5,67	

var.	prag jez	$z_{jez}$ [cm]	pretoki [l/s]			$Q_b/Q_l$	globine [cm]								
			$Q_1$	$Q_2$	$Q_b$		$h_{gor}$	$h_{1*}$	$h_1$	$h_{x/L=0,25}$	$h_p$	$h_{x/L=0,75}$	$h_2$	$h_{2*}$	$h_{dol}$
Q35_a	12,80	34,60	19,78	14,82	0,43	23,31	23,32	23,36	23,59	23,71	23,94	24,16	24,15	24,17	
Q35_b	13,63	34,60	18,37	16,23	0,47	23,52	23,60	23,58	23,83	23,96	24,19	24,34	24,42	24,39	
Q35_c	15,79	34,55	15,17	19,38	0,56	24,25	24,22	24,27	24,47	24,68	24,88	25,05	25,12	25,06	
Q30_a	13,73	30,20	16,77	13,43	0,44	22,98	23,05	23,07	23,24	23,38	23,53	23,78	23,75	23,82	
Q30_b	14,21	30,20	15,63	14,57	0,48	23,15	23,25	23,19	23,44	23,56	23,66	23,91	23,94	23,95	
Q30_c	15,12	30,20	14,91	15,29	0,51	23,38	23,48	23,48	23,66	23,82	23,99	24,19	24,22	24,23	
Q25_a	16,81	25,30	9,89	15,41	0,61	23,30	23,40	23,37	23,53	23,70	23,83	24,02	23,99	24,04	
Q25_b	17,85	25,30	8,64	16,66	0,66	23,60	23,67	23,68	23,86	23,97	24,08	24,27	24,24	24,24	
Q25_c	19,10	25,20	6,81	18,39	0,73	23,92	23,96	24,00	24,16	24,31	24,40	24,53	24,53	24,57	



Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA C: POPREČNE HITROSTI V POSAMEZNIH MERILNIH RAVNINAH  
 ANNEX C: AVERAGE VELOCITIES AT MEASURED PLANES

Priloga C.1: Preliv  $B = 14$  cm,  $L = 10$  cm,  $p = 7,5$  cm

Annex C.1: Weir  $B = 14$  cm,  $L = 10$  cm,  $p = 7,5$  cm

a) varianta "var 0" (tj. izhodiščna dotok in višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			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	28,8	1,6	28,8	31,3	2,1	31,4	31,9	3,7	32,1	30,9	4,3	31,2	29,9	4,4	30,2	28,0	2,8	28,2	25,7	1,4	25,7
B	28,3	1,3	28,3	31,4	1,8	31,5	31,7	3,4	31,9	30,8	3,8	31,0	29,7	3,6	30,0	28,2	2,0	28,3	25,4	1,2	25,4
C	23,1	1,3	23,2	28,2	2,5	28,3	27,9	2,2	28,0	26,6	2,4	26,7	24,8	2,0	24,9	24,3	1,7	24,3	18,8	0,2	18,8
D	28,1	0,4	28,1	30,2	1,2	30,3	30,2	1,6	30,3	28,7	1,2	28,7	26,5	1,2	26,5	25,9	0,7	25,9	22,9	0,3	22,9
E	19,6	0,8	19,6	23,0	1,8	23,1	23,1	1,1	23,1	22,3	1,0	22,4	20,5	0,6	20,5	17,0	0,0	17,0	17,0	0,0	17,0
poprečje	25,6	1,1	25,6	28,8	1,9	28,9	29,0	2,4	29,1	27,9	2,6	28,0	26,3	2,4	26,4	24,7	1,4	24,7	21,9	0,6	22,0
ponder.	25,9			29,2			29,3			28,2			26,6			25,2			22,1		

$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)		
$z_z$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$
A	32,0	8,5	33,1	32,1	15,7	35,8	29,4	13,4	32,4	28,7	16,7	33,2	27,7	15,5	31,8
B	28,1	10,7	30,1	32,1	13,5	34,8	29,2	14,7	32,7	28,0	12,6	30,7	27,8	16,1	32,1
poprečje	30,1	9,6	31,6	32,1	14,6	35,3	29,3	14,1	32,6	28,4	14,6	32,0	27,8	15,8	32,0

b) varianta "Q+" (tj. povečan dotok, izhodiščna višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			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	32,6	1,9	32,7	35,5	2,6	35,5	35,8	3,5	35,9	35,0	4,8	35,4	34,3	5,3	34,7	31,8	3,6	32,0	27,9	1,3	27,9
B	30,9	2,0	31,0	33,7	2,5	33,8	33,5	3,6	33,7	33,0	3,8	33,2	31,3	3,6	31,5	29,4	1,8	29,5	25,1	0,7	25,1
C	29,3	0,5	29,4	31,9	1,7	31,9	32,8	1,4	32,8	30,5	2,0	30,6	28,0	2,3	28,1	24,4	1,0	24,5	23,0	0,5	23,0
D	31,9	0,7	32,0	32,7	1,3	32,7	32,8	1,4	32,8	30,8	1,4	30,9	28,1	0,4	28,1	27,2	0,2	27,2	23,0	0,3	23,0
E	25,0	0,5	25,0	25,1	1,3	25,1	24,6	1,0	24,7	22,9	0,6	22,9	20,1	0,5	20,1	19,4	0,2	19,4	19,0	0,0	19,0
poprečje	30,0	1,2	30,0	31,8	1,9	31,8	31,9	2,2	32,0	30,5	2,5	30,6	28,4	2,4	28,5	26,4	1,4	26,5	23,6	0,5	23,6
ponder.	30,4			32,3			32,5			31,1			29,0			26,9			23,9		

$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)		
$z_z$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$
A	32,9	6,2	33,5	36,6	12,0	38,5	34,9	17,7	39,1	33,1	16,8	37,1	30,7	14,9	34,1
B	30,6	12,4	33,1	31,4	8,7	32,6	29,6	8,4	30,8	29,5	8,5	30,7	29,0	10,0	30,7
poprečje	31,8	9,3	33,3	34,0	10,3	35,5	32,2	13,1	34,9	31,3	12,6	33,9	29,8	12,5	32,4



Priloga C.2: Preliv  $B = 14$  cm,  $L = 15$  cm,  $p = 7,5$  cm

Annex C.2: Weir  $B = 14$  cm,  $L = 15$  cm,  $p = 7,5$  cm

a) varianta "var 0" (tj. izhodiščna dotok in višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			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	36,6	1,1	36,6	37,8	1,8	37,9	36,7	4,5	37,0	32,6	5,2	33,0	33,0	5,0	33,4	32,5	2,8	32,6	29,4	0,3	29,4
B	35,1	1,0	35,1	37,2	2,0	37,3	33,9	3,2	34,0	30,9	3,7	31,1	30,9	3,3	31,0	29,2	1,4	29,2	28,4	0,5	28,4
C	34,8	1,1	34,8	38,0	1,4	38,0	36,0	2,6	36,1	33,0	2,9	33,1	33,7	3,0	33,9	29,2	1,2	29,3	26,8	0,9	26,8
D	32,0	0,1	32,0	34,3	0,4	34,3	32,6	2,0	32,6	28,2	2,1	28,3	26,9	1,5	27,0	25,6	0,7	25,6	24,5	0,9	24,5
E	23,7	0,4	23,7	31,1	0,5	31,1	28,5	0,9	28,5	26,7	0,0	26,7	22,1	2,5	22,3	21,9	0,8	21,9	18,9	0,5	18,9
poprečje	32,4	0,7	32,4	35,7	1,2	35,7	33,5	2,6	33,7	30,3	2,8	30,5	29,3	3,1	29,5	27,7	1,4	27,7	25,6	0,6	25,6
ponder.	33,1			36,0			33,9			30,5			29,9			28,0			26,1		

$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)		
$z_z$	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.
A	37,5	9,1	38,5	34,2	14,8	37,2	31,3	10,8	33,1	29,9	9,8	31,5	28,8	10,9	30,8
B	32,8	10,1	34,3	33,5	8,1	34,5	31,8	5,3	32,2	30,0	4,7	30,4	28,5	9,4	30,0
poprečje	35,1	9,6	36,4	33,9	11,4	35,9	31,6	8,1	32,7	30,0	7,2	30,9	28,6	10,1	30,4

b) varianta "Q+" (tj. povečan dotok, izhodiščna višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			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	41,6	0,8	41,6	45,2	1,3	45,2	39,1	3,5	39,3	40,1	5,8	40,5	40,6	5,7	41,0	38,4	1,9	38,5	35,9	0,9	36,0
B	41,9	1,6	41,9	45,3	2,2	45,4	42,9	4,6	43,1	40,0	6,8	40,6	39,8	4,7	40,1	36,3	1,5	36,3	33,4	0,4	33,4
C	36,0	0,6	36,0	40,1	1,6	40,2	37,2	3,3	37,4	34,6	3,4	34,7	33,7	2,8	33,8	29,0	0,9	29,0	28,2	0,7	28,2
D	32,7	0,6	32,7	36,1	0,6	36,1	33,3	1,9	33,3	29,5	1,6	29,5	29,9	1,6	30,0	23,8	0,1	23,8	24,3	0,3	24,3
E	26,6	0,6	26,6	30,2	1,0	30,2	27,8	0,6	27,8	26,0	0,5	26,0	22,4	1,7	22,5	21,0	0,0	21,0	20,0	0,0	20,0
poprečje	35,7	0,9	35,8	39,4	1,4	39,4	36,1	2,8	36,2	34,0	3,6	34,3	33,3	3,3	33,5	29,7	0,9	29,7	28,4	0,4	28,4
ponder.	36,4			40,0			36,7			34,6			34,2			30,3			29,0		

$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)		
$z_z$	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.
A	44,7	7,9	45,4	37,8	17,4	41,6	39,0	15,7	42,0	37,5	16,8	41,1	36,6	14,8	39,5
B	42,8	13,3	44,8	39,4	12,9	41,4	38,9	13,7	41,2	37,1	16,0	40,4	36,0	14,5	38,8
poprečje	43,7	10,6	45,1	38,6	15,1	41,5	38,9	14,7	41,6	37,3	16,4	40,8	36,3	14,6	39,1



c) varianta "Q-" (tj., zmanjšan dotok, izhodiščna višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			1,25			
	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	
A	33,3	1,4	33,3	38,2	1,5	38,2	38,3	2,9	38,4	36,7	3,7	36,9	33,2	2,8	33,3	33,1	1,4	33,1	31,0	0,6	31,0	
B	35,1	1,0	35,1	37,9	1,7	38,0	37,0	3,4	37,2	33,4	3,2	33,5	33,5	3,6	33,7	32,4	1,8	32,4	29,6	0,1	29,6	
C	31,1	1,0	31,2	33,3	1,5	33,4	32,3	2,3	32,4	29,3	2,5	29,4	29,4	2,3	29,5	29,3	1,6	29,4	26,6	0,3	26,6	
D	30,7	0,4	30,7	32,5	0,9	32,5	30,2	1,8	30,3	27,7	2,1	27,8	27,2	1,7	27,2	27,8	1,0	27,8	25,0	0,0	25,0	
E	20,3	0,7	20,3	26,5	0,6	26,5	25,8	0,9	25,8	23,4	0,0	23,4	20,4	1,9	20,4	20,3	1,2	20,3	20,0	0,3	20,0	
poprečje	30,1	0,9	30,1	33,7	1,2	33,7	32,7	2,3	32,8	30,1	2,3	30,2	28,7	2,5	28,8	28,6	1,4	28,6	26,4	0,3	26,4	
ponder.	30,8			33,9			32,8			30,1			29,1			29,0			26,6			
	$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)								
	$z_z$	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.			
	A	37,5	9,8	38,7	38,6	10,9	40,2	35,4	10,2	36,8	31,1	11,1	33,0	31,3	11,0	33,1						
	B	37,8	9,9	39,1	36,8	10,6	38,3	33,1	10,0	34,6	30,2	12,0	32,5	28,6	11,3	30,7						
	poprečje	37,7	9,8	38,9	37,7	10,8	39,2	34,2	10,1	35,7	30,6	11,5	32,7	29,9	11,2	31,9						

d) varianta "Z+" (tj. izhodiščni dotok, povečana višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			1,25			
	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	
A	36,0	1,4	36,0	37,1	2,8	37,2	36,2	6,0	36,7	32,5	6,5	33,2	30,4	6,9	31,2	29,1	4,1	29,4	28,4	1,2	28,5	
B	32,6	1,5	32,6	33,7	2,8	33,9	31,7	4,7	32,1	28,4	4,5	28,7	27,2	6,3	27,9	25,8	2,9	26,0	24,1	1,6	24,1	
C	28,9	1,1	29,0	31,0	2,3	31,1	29,6	4,1	29,8	26,8	3,7	27,1	23,4	4,2	23,8	25,3	3,3	25,5	23,6	1,0	23,6	
D	25,8	0,6	25,8	27,0	1,1	27,0	25,8	2,6	26,0	23,9	1,4	23,9	21,5	2,2	21,6	22,8	1,9	22,9	18,9	0,7	18,9	
E	26,6	0,8	26,6	27,7	0,6	27,7	25,0	0,9	25,0	23,0	1,0	23,0	21,3	2,2	21,4	19,5	1,8	19,6	17,5	0,5	17,5	
poprečje	30,0	1,1	30,0	31,3	1,9	31,4	29,7	3,7	29,9	26,9	3,4	27,2	24,7	4,3	25,2	24,5	2,8	24,7	22,5	1,0	22,5	
ponder.	30,1			31,5			30,0			27,2			25,0			25,0			23,0			
	$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)								
	$z_z$	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.			
	A	38,5	10,7	39,9	37,1	15,2	40,1	30,5	19,5	36,3	28,0	16,1	32,3	27,3	10,2	29,1						
	B	31,6	8,6	32,7	29,8	8,6	31,0	27,3	8,4	28,6	27,0	8,0	28,2	26,0	8,0	27,2						
	poprečje	35,0	9,7	36,3	33,5	11,9	35,6	28,9	14,0	32,4	27,5	12,1	30,2	26,6	9,1	28,2						

e) varianta "Z-" (tj. izhodiščni dotok, znižana višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			1,25			
	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	
A	36,7	0,8	36,7	38,4	1,0	38,4	37,0	2,1	37,1	34,6	3,6	34,8	34,6	3,1	34,7	32,1	1,0	32,1	30,9	0,3	30,9	
B	35,7	0,8	35,7	37,2	1,1	37,2	35,5	1,9	35,6	34,5	3,0	34,6	34,6	2,6	34,7	32,3	0,8	32,3	30,8	0,1	30,8	
C	33,2	0,9	33,3	34,7	1,0	34,7	33,8	1,7	33,9	29,8	2,2	29,9	32,0	1,6	32,0	27,5	1,0	27,5	24,9	0,7	24,9	
D	28,6	0,3	28,6	30,0	0,9	30,0	29,8	1,5	29,9	25,0	1,6	25,1	25,6	0,7	25,6	23,6	0,5	23,6	23,4	0,5	23,4	
E	22,1	0,7	22,1	24,6	0,5	24,6	23,8	0,4	23,8	20,6	3,3	20,9	20,4	1,9	20,5	20,0	0,3	20,0	19,0	0,3	19,0	
poprečje	31,3	0,7	31,3	33,0	0,9	33,0	32,0	1,5	32,0	28,9	2,7	29,1	29,4	2,0	29,5	27,1	0,7	27,1	25,8	0,4	25,8	
ponder.	31,4			33,0			32,2			28,9			29,6			27,0			25,8			
	$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)								
	$z_z$	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.			
	A	35,2	6,4	35,8	32,9	5,8	33,4	31,2	10,7	33,0	31,2	9,2	32,6	30,0	9,0	31,3						
	B	31,8	3,1	32,0	30,6	5,7	31,1	30,4	8,0	31,4	30,3	6,2	31,0	29,0	6,0	29,6						
	poprečje	33,5	4,8	33,9	31,7	5,7	32,3	30,8	9,3	32,2	30,8	7,7	31,8	29,5	7,5	30,5						

Priloga C.3: Preliv  $B = 14$  cm,  $L = 15$  cm,  $p = 10$  cm

Annex C.3: Weir  $B = 14$  cm,  $L = 15$  cm,  $p = 10$  cm

a) varianta "var 0" (tj. izhodiščna dotok in višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			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	32,8	0,6	32,8	36,3	1,0	36,3	34,2	3,3	34,4	32,5	5,1	32,9	33,1	4,7	33,5	32,9	3,4	33,1	28,7	0,9	28,7
B	32,7	1,3	32,7	36,5	2,0	36,6	34,6	3,8	34,8	30,1	5,9	30,6	30,6	2,9	30,7	29,8	2,3	29,9	29,2	0,5	29,2
C	32,3	0,8	32,3	35,2	1,8	35,2	34,0	2,3	34,1	31,4	2,8	31,5	29,7	2,5	29,8	30,0	1,5	30,1	26,5	1,3	26,5
D	29,3	0,1	29,3	32,3	0,7	32,3	31,5	1,1	31,5	26,3	1,3	26,3	26,7	0,5	26,7	26,3	0,5	26,3	20,6	0,9	20,6
E	25,0	0,5	25,0	28,6	0,2	28,6	27,8	0,3	27,8	22,6	0,8	22,6	24,1	2,3	24,2	22,8	0,3	22,8	21,5	0,0	21,5
poprečje	30,4	0,7	30,4	33,8	1,2	33,8	32,4	2,2	32,5	28,6	3,2	28,8	28,8	2,6	29,0	28,4	1,6	28,4	25,3	0,7	25,3
ponder.	30,7			34,0			32,7			28,8			28,8			28,5			25,2		

$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)		
$z_z$	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.
A	37,7	6,3	38,2	35,4	11,7	37,3	32,8	16,8	36,9	32,9	12,0	35,1	31,5	12,6	33,9
B	35,7	5,3	36,1	31,3	11,0	33,1	29,4	15,1	33,0	28,9	9,0	30,2	28,7	12,2	31,2
poprečje	36,7	5,8	37,2	33,3	11,4	35,2	31,1	15,9	34,9	30,9	10,5	32,6	30,1	12,4	32,6

b) varianta "Q+" (tj. povečan dotok, izhodiščna višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			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	35,9	1,3	35,9	37,7	2,3	37,8	33,8	5,1	34,2	33,1	6,1	33,6	32,9	6,1	33,4	32,0	3,5	32,2	28,5	1,3	28,5
B	34,5	1,4	34,5	36,8	2,3	36,8	34,2	4,4	34,5	33,1	5,4	33,6	32,7	5,4	33,2	28,5	3,0	28,7	26,9	2,0	27,0
C	33,7	1,0	33,7	37,5	1,5	37,6	35,9	2,7	36,0	32,7	2,7	32,8	31,1	2,3	31,1	28,4	1,1	28,5	28,2	1,8	28,2
D	34,1	0,3	34,1	38,0	0,6	38,0	37,4	1,4	37,4	34,1	1,7	34,1	31,5	0,5	31,5	28,8	0,4	28,8	28,1	0,3	28,1
E	26,9	0,5	26,9	30,0	0,2	30,0	28,3	0,5	28,3	24,8	0,3	24,8	25,0	0,8	25,0	24,0	0,3	24,0	23,0	0,1	23,0
poprečje	33,0	0,9	33,0	36,0	1,4	36,0	33,9	2,8	34,1	31,5	3,2	31,8	30,6	3,0	30,8	28,3	1,7	28,4	26,9	1,1	27,0
ponder.	33,4			36,5			34,6			32,2			31,0			28,5			27,3		

$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)		
$z_z$	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.
A	34,1	15,6	37,5	34,1	15,8	37,6	32,6	14,4	35,6	32,6	9,5	34,0	31,8	9,6	33,2
B	34,4	11,3	36,2	33,5	10,3	35,1	32,2	10,8	34,0	34,0	7,4	34,8	31,6	8,3	32,6
poprečje	34,2	13,5	36,8	33,8	13,1	36,3	32,4	12,6	34,8	33,3	8,5	34,4	31,7	9,0	32,9

c) varianta "Q-" (tj., zmanjšan dotok, izhodiščna višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

x/L	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			1,25		
	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.
A	30,3	1,5	30,4	32,6	2,2	32,7	32,1	4,3	32,4	29,5	4,4	29,8	30,0	4,3	30,3	28,7	2,9	28,8	27,4	0,9	27,4
B	31,5	1,0	31,5	33,6	1,7	33,7	32,0	3,6	32,2	27,9	3,9	28,2	28,9	3,7	29,1	28,4	1,9	28,5	25,8	0,2	25,8
C	31,6	1,0	31,6	34,3	1,5	34,3	33,5	2,0	33,6	31,1	2,3	31,2	30,0	2,2	30,1	30,8	1,7	30,8	27,1	0,7	27,1
D	28,9	0,3	28,9	31,6	0,7	31,6	30,4	1,0	30,4	28,5	0,9	28,5	27,7	0,8	27,7	29,4	1,1	29,4	27,5	0,3	27,5
E	27,2	0,2	27,2	27,2	0,5	27,2	27,0	0,5	27,0	25,0	0,5	25,0	20,6	0,5	20,6	22,0	0,3	22,0	21,5	0,2	21,5
poprečje	29,9	0,8	29,9	31,9	1,3	31,9	31,0	2,3	31,1	28,4	2,4	28,5	27,5	2,3	27,6	27,9	1,6	27,9	25,8	0,4	25,8
ponder.	30,1			32,2			31,3			28,7			27,9			28,5			26,2		
x/L	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			1,25		
z <sub>z</sub>	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.
A	32,2	9,4	33,5	32,9	10,8	34,6	29,9	11,1	31,9	29,3	8,4	30,5	28,6	10,3	30,4						
B	32,3	11,4	34,2	32,5	12,3	34,7	27,5	9,2	29,0	29,2	8,5	30,4	27,5	9,1	29,0						
poprečje	32,2	10,4	33,9	32,7	11,6	34,7	28,7	10,2	30,4	29,2	8,4	30,4	28,1	9,7	29,7						

d) varianta "Z+" (tj. izhodiščni dotok, povečana višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

x/L	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			1,25		
	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.
A	34,6	1,4	34,7	34,8	2,5	34,9	33,7	5,8	34,2	30,0	7,1	30,8	28,9	6,7	29,6	26,3	4,7	26,8	24,8	1,6	24,8
B	33,0	1,1	33,1	33,3	2,9	33,4	32,1	5,6	32,6	29,9	7,3	30,8	27,7	7,1	28,6	27,2	4,0	27,5	26,3	1,9	26,4
C	32,9	1,0	33,0	32,5	1,8	32,5	29,9	3,6	30,1	28,9	3,4	29,1	28,5	2,7	28,7	28,1	2,1	28,2	26,0	1,1	26,0
D	27,2	0,5	27,2	28,0	0,8	28,0	26,9	1,7	27,0	24,8	1,1	24,8	24,8	1,3	24,8	24,5	0,9	24,5	23,6	0,3	23,6
E	23,6	0,8	23,6	24,6	0,5	24,6	25,0	1,0	25,0	23,0	0,8	23,0	21,0	1,0	21,0	19,1	0,6	19,1	15,9	0,5	15,9
poprečje	30,3	1,0	30,3	30,6	1,7	30,7	29,5	3,5	29,8	27,3	3,9	27,7	26,2	3,8	26,5	25,0	2,5	25,2	23,3	1,1	23,3
ponder.	30,6			30,9			29,6			27,5			26,5			25,6			24,0		
x/L	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			1,25		
z <sub>z</sub>	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.
A	34,5	7,0	35,2	34,5	15,0	37,6	28,8	17,0	33,4	27,2	11,3	29,4	26,3	11,1	28,6						
B	30,8	15,5	34,5	32,1	10,9	33,9	31,4	17,2	35,8	26,9	12,9	29,8	26,0	12,0	28,6						
poprečje	32,6	11,2	34,8	33,3	13,0	35,8	30,1	17,1	34,6	27,0	12,1	29,6	26,2	11,5	28,6						

e) varianta "Z-" (tj. izhodiščni dotok, znižana višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

x/L	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			1,25		
	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.	u	v	vel.
A	35,8	1,1	35,8	37,1	1,5	37,1	36,3	3,3	36,4	37,1	4,0	37,3	37,6	3,6	37,7	36,3	2,4	36,4	35,4	0,7	35,4
B	36,5	1,1	36,5	36,8	1,8	36,8	35,6	3,6	35,8	34,4	3,7	34,6	34,0	3,6	34,1	31,8	2,5	31,9	32,5	0,9	32,5
C	31,8	0,3	31,8	33,3	1,1	33,3	32,5	1,5	32,6	31,5	2,2	31,6	29,3	2,0	29,3	26,0	1,3	26,0	24,8	0,6	24,8
D	28,8	0,6	28,8	30,4	0,6	30,4	28,4	0,9	28,4	25,4	1,3	25,4	25,6	0,7	25,6	21,6	0,7	21,6	24,5	0,6	24,5
E	23,6	0,3	23,6	24,8	0,7	24,8	22,3	1,2	22,4	19,5	0,0	19,5	17,9	0,0	17,9	17,5	0,0	17,5	17,0	0,0	17,0
poprečje	31,3	0,7	31,3	32,5	1,1	32,5	31,0	2,1	31,1	29,6	2,2	29,7	28,9	2,0	28,9	26,6	1,4	26,7	26,8	0,6	26,8
ponder.	31,1			32,4			31,0			29,3			28,5			25,9			26,4		
x/L	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			1,25		
z <sub>z</sub>	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.	u <sub>b</sub>	v <sub>b</sub>	vel.
A	31,6	10,4	33,3	33,5	11,3	35,4	35,5	7,4	36,3	35,2	7,2	36,0	34,3	6,2	34,8						
B	36,7	7,4	37,4	35,8	8,3	36,7	33,1	9,8	34,5	31,5	7,5	32,4	28,8	7,4	29,7						
poprečje	34,2	8,9	35,4	34,6	9,8	36,0	34,3	8,6	35,4	33,4	7,4	34,2	31,5	6,8	32,3						

Priloga C.4: Preliv  $B = 14$  cm,  $L = 20$  cm,  $p = 10$  cm

Annex C.4: Weir  $B = 14$  cm,  $L = 20$  cm,  $p = 10$  cm

a) varianta "var 0" (tj. izhodiščna dotok in višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			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	0,5	22,1	24,4	0,3	24,4
E	21,4	1,0	21,4	26,0	0,3	26,0	19,7	0,3	19,7	25,3	0,0	25,3	24,3	0,1	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		

$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)		
$z_z$	$u_b$	$v_b$	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

b) varianta "Q+" (tj. povečan dotok, izhodiščna višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			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	0,9	34,9	36,3	1,4	36,3	34,6	4,8	34,9	34,1	5,2	34,5	33,2	5,2	33,6	31,2	2,2	31,3	30,1	0,7	30,1
B	33,7	1,0	33,7	35,1	1,8	35,1	33,6	4,1	33,9	33,1	5,1	33,5	32,0	5,1	32,4	28,1	3,1	28,3	28,1	0,5	28,1
C	31,6	1,6	31,6	34,0	1,8	34,0	30,8	2,3	30,9	31,7	2,2	31,8	28,7	1,7	28,7	26,9	0,8	26,9	26,4	0,4	26,4
D	29,1	0,0	29,1	30,4	0,7	30,4	28,3	1,1	28,3	30,2	0,4	30,2	27,8	0,2	27,8	25,0	0,2	25,0	22,4	0,3	22,4
E	21,2	1,0	21,3	24,8	0,7	24,8	19,7	2,1	19,8	24,8	0,5	24,8	20,3	0,6	20,3	20,0	0,2	20,0	19,0	0,2	19,0
poprečje	30,1	0,9	30,1	32,1	1,3	32,1	29,4	2,9	29,6	30,8	2,7	31,0	28,4	2,6	28,6	26,2	1,3	26,3	25,2	0,4	25,2
ponder.	30,4			32,4			29,8			31,0			28,7			26,4			25,3		

$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)		
$z_z$	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.
A	33,4	10,2	35,0	33,0	12,1	35,2	33,4	12,2	35,5	32,6	11,5	34,5	31,7	13,8	34,6
B	32,2	10,4	33,9	31,6	12,1	33,9	32,2	13,0	34,7	31,1	12,4	33,4	28,0	12,7	30,7
poprečje	32,8	10,3	34,4	32,3	12,1	34,5	32,8	12,6	35,1	31,8	11,9	34,0	29,8	13,3	32,6



Priloga C.5: Preliv  $B = 14$  cm,  $L = 20$  cm,  $p = 12$  cm

Annex C.5: Weir  $B = 14$  cm,  $L = 20$  cm,  $p = 12$  cm

a) varianta "var 0" (tj. izhodiščna dotok in višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			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	33,6	1,1	33,6	34,6	2,2	34,7	31,4	4,5	31,7	30,5	5,2	30,9	28,7	5,1	29,1	26,9	3,6	27,2	27,0	1,0	27,0
B	33,0	1,3	33,0	33,6	2,2	33,7	31,7	5,0	32,1	32,0	4,1	32,2	30,7	4,9	31,1	25,3	4,4	25,7	26,5	1,5	26,5
C	32,0	1,1	32,0	34,0	1,5	34,1	23,1	1,6	23,1	32,2	2,3	32,3	29,0	1,8	29,1	24,5	0,4	24,5	24,9	0,3	24,9
D	27,9	0,7	27,9	30,9	0,9	30,9	21,4	1,3	21,4	29,0	0,8	29,0	24,9	0,4	24,9	21,9	0,3	21,9	19,9	0,2	19,9
E	22,2	0,3	22,2	24,3	0,0	24,3	17,3	0,8	17,3	23,5	0,1	23,5	17,0	0,4	17,0	16,7	2,1	16,9	16,1	0,6	16,1
poprečje	29,7	0,9	29,7	31,5	1,4	31,5	25,0	2,7	25,1	29,4	2,5	29,6	26,1	2,5	26,2	23,1	2,2	23,2	22,9	0,7	22,9
ponder.	29,8			31,8			24,4			29,9			26,5			23,1			22,9		
$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)								
$z_z$	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.			
A	31,4	10,9	33,3	31,1	14,8	34,4	29,7	13,9	32,8	28,4	16,5	32,8	25,0	14,8	29,0						
B	32,2	8,5	33,3	33,5	14,5	36,5	32,3	11,7	34,3	30,1	10,5	31,8	23,1	8,8	24,7						
poprečje	31,8	9,7	33,3	32,3	14,6	35,5	31,0	12,8	33,5	29,2	13,5	32,3	24,0	11,8	26,9						

b) varianta "Q+" (tj. povečan dotok, izhodiščna višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			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	35,2	1,6	35,2	36,8	2,9	36,9	35,0	4,1	35,3	33,7	5,1	34,1	32,7	5,9	33,2	29,8	3,7	30,0	30,2	1,3	30,2
B	33,9	1,6	33,9	34,4	2,6	34,5	34,0	4,9	34,4	33,4	5,6	33,8	32,2	6,3	32,9	26,8	2,7	26,9	28,2	1,2	28,3
C	30,4	1,2	30,4	32,9	1,9	32,9	31,0	2,6	31,1	31,2	2,9	31,4	29,3	2,4	29,4	24,8	1,5	24,9	24,9	0,4	24,9
D	25,8	0,3	25,8	30,3	0,3	30,3	26,8	0,9	26,8	29,1	1,0	29,1	25,9	0,5	25,9	23,7	0,5	23,7	20,3	1,1	20,3
E	20,0	0,2	20,0	20,0	0,2	20,0	18,1	1,2	18,2	18,8	0,4	18,8	16,5	0,3	16,5	15,5	0,2	15,5	16,0	0,5	16,0
poprečje	29,1	1,0	29,1	30,9	1,6	30,9	29,0	2,8	29,1	29,2	3,0	29,4	27,3	3,1	27,6	24,1	1,7	24,2	23,9	0,9	24,0
ponder.	29,0			31,2			29,2			29,7			27,7			24,3			23,9		
$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)								
$z_z$	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.			
A	34,9	12,4	37,0	34,9	14,8	37,9	34,9	14,7	37,9	34,2	15,5	37,5	31,8	14,1	34,8						
B	35,8	9,0	36,9	35,5	14,4	38,3	33,2	14,0	36,0	32,0	14,1	35,0	28,6	15,7	32,7						
poprečje	35,3	10,7	37,0	35,2	14,6	38,1	34,1	14,3	37,0	33,1	14,8	36,3	30,2	14,9	33,7						



Priloga C.6: Preliv  $B = 14$  cm,  $L = 25$  cm,  $p = 12$  cm

Annex C.6: Weir  $B = 14$  cm,  $L = 25$  cm,  $p = 12$  cm

a) varianta "var 0" (tj. izhodiščna dotok in višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			1,25		
	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.
$z_z$																					
A	39,4	1,7	39,5	40,3	1,9	40,4	36,0	3,6	36,2	36,1	4,1	36,4	33,8	3,9	34,0	33,2	3,4	33,4	30,2	0,3	30,2
B	39,8	1,4	39,8	40,0	1,6	40,0	36,7	2,9	36,8	37,3	3,1	37,4	34,8	3,2	35,0	31,2	2,8	31,3	30,6	0,7	30,6
C	37,2	1,6	37,2	37,7	2,2	37,7	35,4	2,2	35,5	36,4	2,4	36,5	33,1	1,7	33,1	29,4	1,5	29,5	27,1	1,1	27,1
D	30,6	0,1	30,6	33,4	0,6	33,5	30,2	1,6	30,3	31,9	0,5	31,9	20,6	0,3	20,6	24,8	0,7	24,8	22,2	0,3	22,2
E	26,4	0,2	26,4	26,8	0,0	26,8	20,8	0,8	20,8	25,2	0,0	25,2	19,9	0,0	19,9	17,3	0,4	17,3	15,9	0,3	15,9
poprečje	34,7	1,0	34,7	35,6	1,3	35,7	31,8	2,2	31,9	33,4	2,0	33,5	28,4	1,8	28,5	27,2	1,8	27,3	25,2	0,5	25,2
ponder.	34,4			35,6			32,1			33,7			28,1			27,2			25,1		

$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)		
$z_z$	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.
A	34,0	9,3	35,2	34,1	13,1	36,6	33,6	11,0	35,4	30,6	12,5	33,1	33,1	12,1	35,3
B	35,2	11,1	36,9	36,6	9,2	37,8	36,5	9,5	37,7	35,1	8,6	36,1	28,9	9,7	30,5
poprečje	34,6	10,2	36,1	35,4	11,2	37,2	35,1	10,3	36,6	32,9	10,5	34,6	31,0	10,9	32,9

b) varianta "Q+" (tj. povečan dotok, izhodiščna višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			1,25		
	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.	$u$	$v$	vel.
$z_z$																					
A	39,7	1,7	39,7	43,0	2,3	43,1	37,5	3,5	37,7	39,3	4,5	39,6	37,6	4,7	37,9	34,6	3,7	34,8	32,5	0,7	32,5
B	39,7	1,7	39,8	39,9	2,5	39,9	34,7	3,7	34,9	36,6	4,3	36,9	34,7	4,3	35,0	31,7	1,0	31,7	31,5	0,7	31,5
C	36,7	0,8	36,7	38,6	2,1	38,7	36,4	1,8	36,4	36,6	1,9	36,7	33,6	1,5	33,7	28,2	0,9	28,2	26,3	0,2	26,3
D	30,4	0,2	30,4	32,4	0,2	32,4	29,9	0,4	29,9	32,0	0,5	32,0	28,6	0,1	28,6	26,4	1,2	26,4	25,5	0,1	25,5
E	25,0	0,0	25,0	26,0	0,0	26,0	20,2	0,7	20,2	25,9	0,0	25,9	21,1	0,3	21,1	21,0	0,0	21,0	20,0	0,0	20,0
poprečje	34,3	0,9	34,3	36,0	1,4	36,0	31,7	2,0	31,8	34,1	2,3	34,2	31,1	2,2	31,3	28,4	1,4	28,4	27,1	0,3	27,1
ponder.	34,2			35,8			32,1			34,2			31,2			28,2			27,0		

$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)		
$z_z$	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.	$u_b$	$v_b$	vel.
A	37,9	10,4	39,3	36,6	14,0	39,2	37,7	11,3	39,4	36,4	12,3	38,4	33,1	13,9	35,9
B	41,0	7,7	41,7	36,0	12,4	38,1	37,9	10,8	39,4	36,5	11,4	38,2	31,7	9,7	33,1
poprečje	39,4	9,1	40,5	36,3	13,2	38,6	37,8	11,1	39,4	36,4	11,8	38,3	32,4	11,8	34,5



c) varianta "Q-" (tj., zmanjšan dotok, izhodiščna višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			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	37,5	1,1	37,5	38,2	1,9	38,3	35,2	2,5	35,3	35,3	4,1	35,6	33,3	4,0	33,5	32,9	2,9	33,0	29,9	0,9	29,9
B	37,7	1,5	37,7	38,3	1,9	38,3	36,4	2,8	36,5	35,9	3,7	36,1	34,0	3,8	34,2	30,4	3,1	30,5	29,2	1,3	29,2
C	35,1	1,0	35,1	36,3	1,4	36,3	34,0	1,9	34,1	34,3	1,9	34,4	31,4	1,5	31,4	28,3	1,2	28,3	26,6	0,7	26,6
D	30,0	0,5	30,0	31,4	1,4	31,5	28,7	0,6	28,7	31,0	0,5	31,0	25,5	0,1	25,5	23,9	0,3	23,9	23,0	0,5	23,0
E	24,2	1,9	24,3	24,6	1,5	24,7	22,7	1,1	22,8	24,5	0,7	24,5	22,2	0,5	22,2	22,2	0,2	22,2	21,5	0,3	21,5
poprečje	32,9	1,2	32,9	33,8	1,6	33,8	31,4	1,8	31,5	32,2	2,2	32,3	29,3	2,0	29,4	27,5	1,5	27,6	26,0	0,7	26,0
ponder.	32,7			33,7			31,4			32,3			29,0			27,0			25,6		

$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)		
$z_z$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$
A	37,6	6,9	38,2	34,8	9,4	36,1	35,5	8,6	36,5	34,7	9,8	36,1	32,1	8,1	33,2
B	37,2	6,7	37,8	36,6	5,5	37,0	35,7	8,4	36,6	35,3	9,5	36,6	35,3	6,5	35,9
poprečje	37,4	6,8	38,0	35,7	7,4	36,5	35,6	8,5	36,6	35,0	9,7	36,3	33,7	7,3	34,5

d) varianta "Z+" (tj. izhodiščni dotok, povečana višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			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	40,9	1,0	40,9	42,0	2,0	42,1	36,0	4,8	36,3	35,8	5,3	36,2	33,1	5,3	33,6	28,4	4,5	28,7	29,4	1,8	29,5
B	38,9	0,7	38,9	40,7	1,9	40,7	35,0	4,9	35,3	34,1	6,0	34,6	31,4	5,9	32,0	27,6	4,5	28,0	27,6	1,3	27,6
C	34,3	1,1	34,3	36,2	1,8	36,2	33,0	2,7	33,1	32,5	2,7	32,6	30,1	2,3	30,2	26,5	1,7	26,5	25,3	1,3	25,4
D	30,5	0,1	30,5	30,1	0,1	30,1	23,6	0,3	23,6	26,6	0,2	26,6	22,1	0,0	22,1	20,4	0,2	20,4	20,0	0,5	20,0
E	20,4	0,8	20,5	21,6	0,4	21,6	19,9	0,8	19,9	23,6	0,7	23,6	17,7	0,0	17,7	18,0	0,1	18,0	17,5	0,1	17,5
poprečje	33,0	0,7	33,0	34,1	1,2	34,2	29,5	2,7	29,6	30,5	3,0	30,7	26,9	2,7	27,1	24,2	2,2	24,3	24,0	1,0	24,0
ponder.	33,0			34,1			29,4			30,4			26,9			24,2			23,8		

$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)		
$z_z$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$
A	41,8	2,7	41,9	35,4	12,8	37,7	33,8	7,9	34,7	33,7	11,7	35,7	28,9	11,3	31,0
B	36,6	8,6	37,6	33,9	12,6	36,2	34,6	13,9	37,3	31,2	13,9	34,1	31,2	14,5	34,5
poprečje	39,2	5,7	39,7	34,7	12,7	36,9	34,2	10,9	36,0	32,5	12,8	34,9	30,1	12,9	32,7

e) varianta "Z-" (tj. izhodiščni dotok, znižana višina spodnje vode), hitrosti v [cm/s]:

$x/L$	-0,25			0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)			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	43,3	1,2	43,3	44,4	1,6	44,4	40,0	2,3	40,1	39,3	3,7	39,5	38,8	4,0	39,0	35,1	2,0	35,1	35,4	1,1	35,4
B	41,2	1,3	41,2	41,4	1,8	41,4	37,3	2,0	37,4	39,8	2,9	39,9	38,7	2,8	38,8	34,4	1,9	34,4	33,0	0,7	33,0
C	37,5	0,8	37,5	38,4	1,4	38,4	35,8	1,6	35,8	36,6	1,6	36,7	35,4	1,2	35,4	28,5	0,4	28,5	32,1	1,9	32,2
D	31,5	0,1	31,5	31,9	0,5	31,9	31,0	0,2	31,0	31,5	0,2	31,5	28,2	1,3	28,2	27,5	0,5	27,5	27,0	1,0	27,0
E	25,2	0,3	25,2	25,1	0,3	25,1	24,6	0,2	24,6	24,4	0,2	24,4	19,8	0,2	19,8	19,3	0,2	19,3	19,5	0,1	19,5
poprečje	35,7	0,8	35,8	36,2	1,1	36,3	33,8	1,2	33,8	34,3	1,7	34,4	32,2	1,9	32,2	28,9	1,0	29,0	29,4	1,0	29,4
ponder.	35,1			35,6			33,4			34,2			32,0			28,6			29,3		

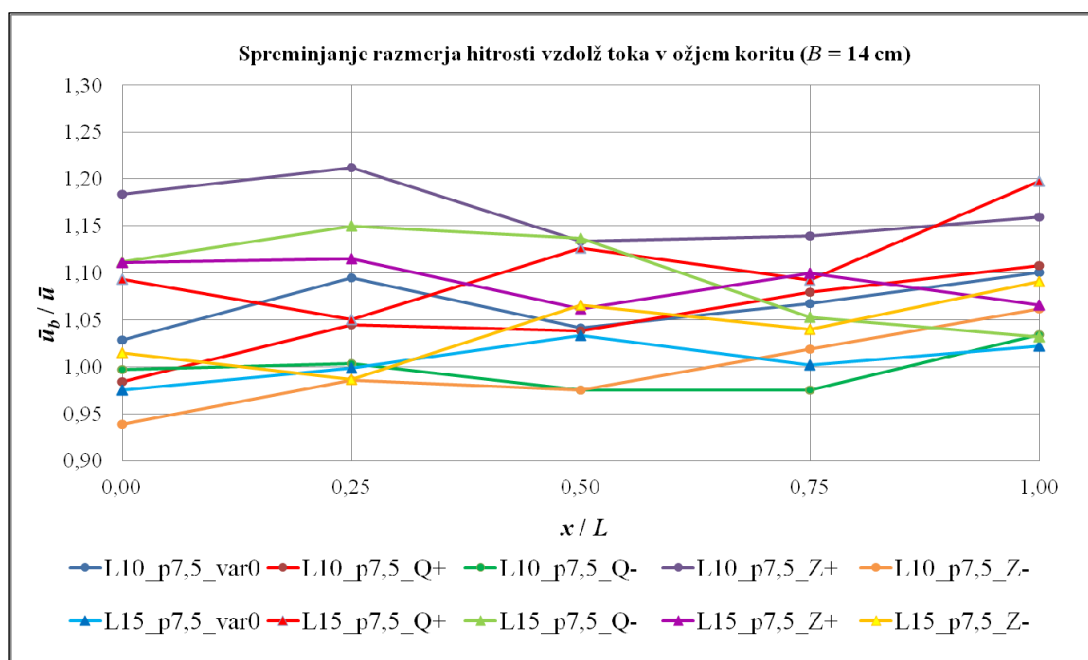
$x/L$	0 (odlepljanje)			0,25			0,50			0,75			1 (pojav valov)		
$z_z$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$	$u_b$	$v_b$	$vel.$
A	38,7	6,5	39,3	38,6	9,2	39,6	39,6	7,9	40,4	40,4	7,9	41,1	38,3	9,7	39,6
B	37,7	6,7	38,3	36,7	7,8	37,5	38,8	8,3	39,7	37,6	8,0	38,5	35,7	9,9	37,0
poprečje	38,2	6,6	38,8	37,6	8,5	38,6	39,2	8,1	40,0	39,0	7,9	39,8	37,0	9,8	38,3

PRILOGA D: RAZMERJA HITROSTI  $\bar{u}_b/\bar{u}$  TER VREDNOSTI KOEFICIENTOV  $\alpha_C$  IN  $\alpha_B$   
ANNEX D: VELOCITI RATIO  $\bar{u}_b/\bar{u}$  AND VALUES OF COEFFICIENTS  $\alpha_C$  AND  $\alpha_B$

Priloga D.1: Preliv  $B = 14$  cm,  $L = 10$  cm,  $p = 7,5$  cm in preliv  $B = 14$  cm,  $L = 15$  cm,  $p = 7,5$  cm  
Annex D.1: Weir  $B = 14$  cm,  $L = 10$  cm,  $p = 7,5$  cm and weir  $B = 14$  cm,  $L = 15$  cm,  $p = 7,5$  cm

L10_p7,5	$x/L$	$h/p$	$\bar{u}_b/\bar{u}$	$\alpha_C$	$\alpha_B$
var0	0	1,332	1,029	1,02	1,01
	0,25	1,332	1,095	1,03	1,01
	0,5	1,332	1,042	1,03	1,01
	0,75	1,337	1,067	1,04	1,01
	1	1,343	1,101	1,05	1,02
Q+	0	1,381	0,984	1,02	1,01
	0,25	1,386	1,045	1,03	1,01
	0,5	1,391	1,038	1,04	1,01
	0,75	1,393	1,079	1,06	1,02
	1	1,395	1,107	1,06	1,02
Q-	0	1,269	0,997	1,03	1,01
	0,25	1,271	1,004	1,02	1,01
	0,5	1,273	0,976	1,02	1,01
	0,75	1,276	0,975	1,02	1,01
	1	1,279	1,034	1,04	1,01
Z+	0	1,403	1,184	1,08	1,03
	0,25	1,405	1,212	1,06	1,02
	0,5	1,407	1,134	1,05	1,02
	0,75	1,411	1,139	1,06	1,02
	1	1,415	1,159	1,06	1,02
Z-	0	1,216	0,939	1,02	1,01
	0,25	1,217	0,985	1,01	1,00
	0,5	1,217	0,975	1,02	1,01
	0,75	1,219	1,019	1,04	1,01
	1	1,221	1,062	1,04	1,01

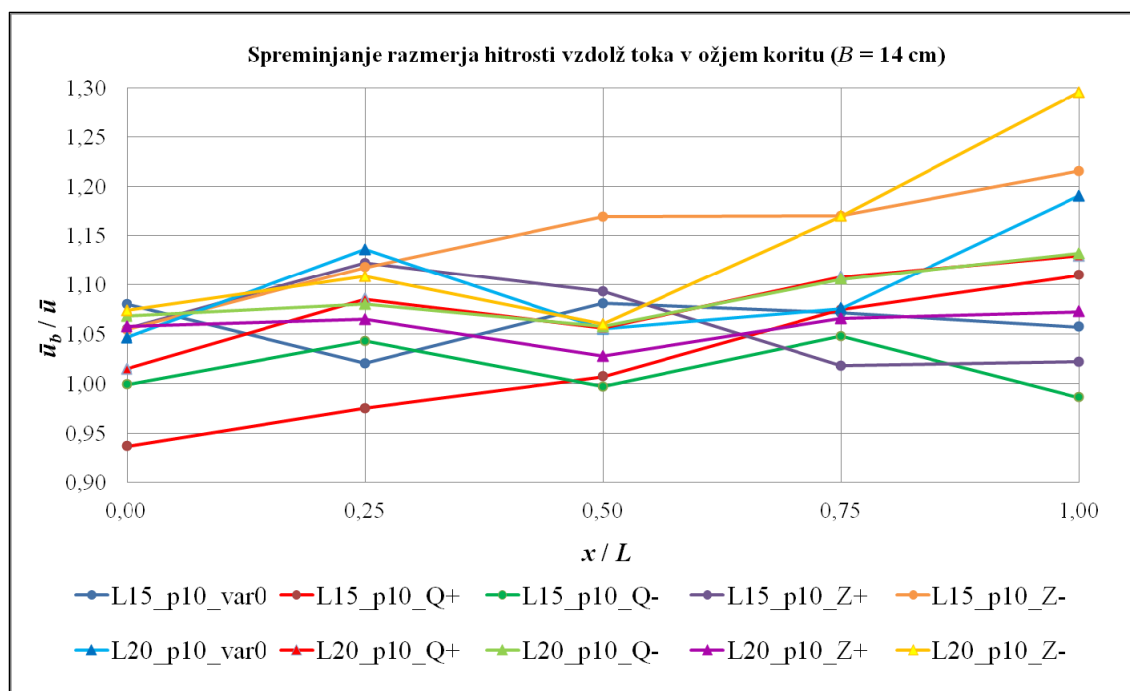
L15_p7,5	$x/L$	$h/p$	$\bar{u}_b/\bar{u}$	$\alpha_C$	$\alpha_B$
var0	0	1,335	0,976	1,01	1,00
	0,25	1,341	0,998	1,02	1,01
	0,5	1,347	1,034	1,02	1,01
	0,75	1,356	1,002	1,05	1,02
	1	1,365	1,022	1,04	1,01
Q+	0	1,388	1,093	1,05	1,02
	0,25	1,397	1,050	1,05	1,02
	0,5	1,407	1,126	1,07	1,02
	0,75	1,417	1,092	1,09	1,03
	1	1,428	1,198	1,13	1,04
Q-	0	1,288	1,111	1,04	1,01
	0,25	1,293	1,150	1,05	1,02
	0,5	1,299	1,137	1,05	1,02
	0,75	1,305	1,053	1,06	1,02
	1	1,312	1,032	1,05	1,02
Z+	0	1,436	1,111	1,04	1,01
	0,25	1,444	1,115	1,05	1,02
	0,5	1,452	1,062	1,04	1,01
	0,75	1,461	1,099	1,06	1,02
	1	1,471	1,065	1,04	1,01
Z-	0	1,236	1,014	1,05	1,02
	0,25	1,245	0,987	1,05	1,02
	0,5	1,253	1,066	1,08	1,03
	0,75	1,256	1,040	1,08	1,03
	1	1,259	1,091	1,08	1,03



Priloga D.2: Preliv  $B = 14$  cm,  $L = 15$  cm,  $p = 10$  cm in preliv  $B = 14$  cm,  $L = 20$  cm,  $p = 10$  cm  
Annex D.2: Weir  $B = 14$  cm,  $L = 15$  cm,  $p = 10$  cm and weir  $B = 14$  cm,  $L = 20$  cm,  $p = 10$  cm

L15_p10	$x/L$	$h/p$	$\bar{u}_b/\bar{u}$	$\alpha_C$	$\alpha_B$
var0	0	1,258	1,080	1,02	1,01
	0,25	1,263	1,020	1,01	1,00
	0,5	1,267	1,081	1,04	1,01
	0,75	1,273	1,071	1,03	1,01
	1	1,278	1,057	1,03	1,01
Q+	0	1,284	0,937	1,01	1,00
	0,25	1,287	0,975	1,02	1,01
	0,5	1,290	1,007	1,02	1,01
	0,75	1,300	1,075	1,02	1,01
	1	1,310	1,110	1,02	1,01
Q-	0	1,206	0,999	1,01	1,00
	0,25	1,213	1,043	1,01	1,00
	0,5	1,219	0,997	1,01	1,00
	0,75	1,220	1,048	1,03	1,01
	1	1,221	0,986	1,03	1,01
Z+	0	1,330	1,055	1,03	1,01
	0,25	1,336	1,123	1,03	1,01
	0,5	1,342	1,093	1,03	1,01
	0,75	1,350	1,018	1,03	1,01
	1	1,357	1,022	1,03	1,01
Z-	0	1,198	1,054	1,04	1,01
	0,25	1,200	1,118	1,06	1,02
	0,5	1,201	1,170	1,10	1,04
	0,75	1,205	1,170	1,12	1,04
	1	1,208	1,215	1,16	1,05

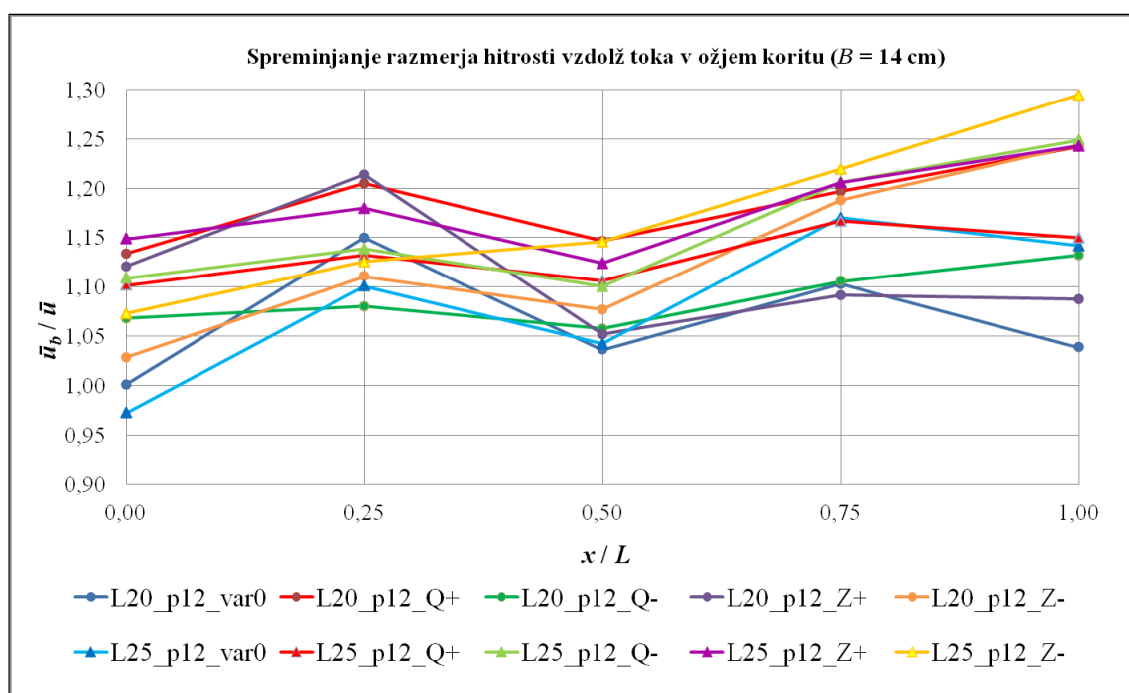
L20_p10	$x/L$	$h/p$	$\bar{u}_b/\bar{u}$	$\alpha_C$	$\alpha_B$
var0	0	1,244	1,046	1,03	1,01
	0,25	1,245	1,136	1,08	1,03
	0,5	1,245	1,055	1,02	1,01
	0,75	1,253	1,076	1,02	1,01
	1	1,260	1,191	1,05	1,02
Q+	0	1,259	1,015	1,04	1,01
	0,25	1,266	1,086	1,07	1,02
	0,5	1,273	1,056	1,02	1,01
	0,75	1,281	1,108	1,05	1,02
	1	1,289	1,130	1,04	1,01
Q-	0	1,198	1,068	1,04	1,01
	0,25	1,202	1,080	1,03	1,01
	0,5	1,206	1,058	1,02	1,01
	0,75	1,213	1,106	1,05	1,02
	1	1,220	1,132	1,05	1,02
Z+	0	1,274	1,058	1,03	1,01
	0,25	1,282	1,065	1,06	1,02
	0,5	1,289	1,028	1,03	1,01
	0,75	1,297	1,066	1,04	1,02
	1	1,305	1,073	1,02	1,01
Z-	0	1,196	1,074	1,02	1,01
	0,25	1,205	1,109	1,05	1,02
	0,5	1,213	1,060	1,02	1,01
	0,75	1,220	1,170	1,08	1,03
	1	1,226	1,295	1,10	1,03



Priloga D.3: Preliv  $B = 14$  cm,  $L = 20$  cm,  $p = 12$  cm in preliv  $B = 14$  cm,  $L = 25$  cm,  $p = 12$  cm  
 Annex D.3: Weir  $B = 14$  cm,  $L = 20$  cm,  $p = 12$  cm and weir  $B = 14$  cm,  $L = 25$  cm,  $p = 12$  cm

L20_p12	$x / L$	$h / p$	$\bar{u}_b / \bar{u}$	$\alpha_C$	$\alpha_B$
var0	0	1,190	1,001	1,03	1,01
	0,25	1,194	1,150	1,13	1,04
	0,5	1,198	1,036	1,03	1,01
	0,75	1,200	1,103	1,08	1,03
	1	1,202	1,039	1,05	1,02
Q+	0	1,219	1,134	1,07	1,02
	0,25	1,226	1,205	1,09	1,03
	0,5	1,233	1,147	1,07	1,02
	0,75	1,238	1,197	1,09	1,03
	1	1,243	1,242	1,08	1,03
Q-	0	1,141	1,026	1,03	1,01
	0,25	1,145	1,116	1,04	1,01
	0,5	1,150	1,083	1,02	1,01
	0,75	1,153	1,087	1,04	1,01
	1	1,157	1,108	1,04	1,01
Z+	0	1,237	1,121	1,06	1,02
	0,25	1,243	1,214	1,07	1,02
	0,5	1,249	1,052	1,04	1,01
	0,75	1,257	1,092	1,04	1,02
	1	1,265	1,088	1,06	1,02
Z-	0	1,164	1,029	1,04	1,01
	0,25	1,170	1,111	1,06	1,02
	0,5	1,176	1,077	1,03	1,01
	0,75	1,180	1,188	1,06	1,02
	1	1,185	1,244	1,03	1,01

L25_p12	$x / L$	$h / p$	$\bar{u}_b / \bar{u}$	$\alpha_C$	$\alpha_B$
var0	0	1,159	0,972	1,04	1,02
	0,25	1,165	1,101	1,08	1,03
	0,5	1,171	1,042	1,04	1,01
	0,75	1,178	1,170	1,17	1,06
	1	1,184	1,142	1,09	1,03
Q+	0	1,188	1,102	1,06	1,02
	0,25	1,197	1,132	1,08	1,03
	0,5	1,206	1,106	1,04	1,01
	0,75	1,213	1,167	1,07	1,03
	1	1,219	1,150	1,06	1,02
Q-	0	1,144	1,109	1,05	1,02
	0,25	1,150	1,138	1,06	1,02
	0,5	1,156	1,101	1,04	1,01
	0,75	1,160	1,206	1,06	1,02
	1	1,163	1,249	1,05	1,02
Z+	0	1,218	1,149	1,11	1,04
	0,25	1,225	1,180	1,12	1,04
	0,5	1,232	1,124	1,06	1,02
	0,75	1,237	1,206	1,12	1,04
	1	1,243	1,243	1,08	1,03
Z-	0	1,142	1,073	1,08	1,03
	0,25	1,145	1,126	1,05	1,02
	0,5	1,149	1,146	1,06	1,02
	0,75	1,154	1,220	1,12	1,04
	1	1,158	1,295	1,08	1,03



Ta stran je namenoma prazna.

PRILOGA E: KOEFICIENTI PRETOKA  $C_d$   
ANNEX E: DISCHARGE COEFFICIENTS  $C_d$

Priloga E.1: Tabelarična primerjava  $C_d$  za posamezne bočne prelive  
Annex E.1: Tables with comparison of  $C_d$  for single side weirs

pretočni koeficient $C_d$ po različnih avtorjih - preliv B14_L10_p7,5													
var.	Subramanya	Yu-Tech	Ranga Raju	Cheong	Singh	Jalili	Borghei	Swamee	Emiroglu	May $C_{DS}$	May $C_d$	$C_{d,mer}$	$C_{d,nova}$
Q-	0,58	0,57	0,66	0,44	0,67	0,43	0,38	0,50	0,40	0,56	0,60	0,97	0,60
Q-*	0,58	0,56	0,65	0,43	0,66	0,43	0,38	0,50	0,40	0,56	0,59	0,86	0,60
var 0	0,57	0,56	0,64	0,43	0,65	0,43	0,38	0,50	0,39	0,56	0,59	0,72	0,59
Q+*	0,57	0,55	0,63	0,43	0,64	0,42	0,38	0,50	0,39	0,55	0,59	0,63	0,58
Q+	0,56	0,55	0,62	0,43	0,63	0,42	0,37	0,50	0,39	0,55	0,58	0,63	0,59
Z-	0,56	0,55	0,61	0,43	0,67	0,39	0,34	0,50	0,40	0,57	0,61	0,74	0,61
Z-*	0,57	0,56	0,63	0,43	0,66	0,41	0,36	0,50	0,40	0,56	0,60	0,72	0,60
var 0	0,57	0,56	0,64	0,43	0,65	0,43	0,38	0,50	0,39	0,56	0,59	0,72	0,59
Z+*	0,58	0,56	0,64	0,43	0,64	0,44	0,39	0,50	0,39	0,55	0,59	0,75	0,59
Z+	0,58	0,56	0,65	0,43	0,63	0,44	0,40	0,50	0,39	0,55	0,58	0,77	0,58
povpr.	0,57	0,56	0,64	0,43	0,65	0,42	0,38	0,50	0,40	0,56	0,59	0,71	0,59
STDEV	0,006	0,005	0,014	0,003	0,016	0,014	0,017	0,001	0,003	0,007	0,008	0,102	0,010

pretočni koeficient $C_d$ po različnih avtorjih - preliv B14_L15_p7,5													
var.	Subramanya	Yu-Tech	Ranga Raju	Cheong	Singh	Jalili	Borghei	Swamee	Emiroglu	May $C_{DS}$	May $C_d^*$	$C_{d,mer}$	$C_{d,nova}$
Q-	0,57	0,56	0,64	0,43	0,66	0,42	0,39	0,50	0,41	0,57	0,60	0,73	0,58
Q-*	0,57	0,55	0,63	0,43	0,65	0,42	0,39	0,50	0,41	0,57	0,60	0,67	0,58
var 0	0,56	0,55	0,61	0,43	0,64	0,41	0,38	0,50	0,41	0,56	0,60	0,66	0,58
Q+*	0,56	0,55	0,60	0,42	0,63	0,40	0,37	0,50	0,41	0,56	0,60	0,65	0,56
Q+	0,55	0,54	0,59	0,42	0,62	0,40	0,38	0,50	0,41	0,56	0,59	0,56	0,56
Z-	0,55	0,54	0,59	0,42	0,66	0,38	0,35	0,50	0,42	0,58	0,61	0,56	0,59
Z-*	0,56	0,55	0,61	0,42	0,65	0,40	0,37	0,50	0,41	0,57	0,60	0,60	0,58
var 0	0,56	0,55	0,61	0,43	0,64	0,41	0,38	0,50	0,41	0,56	0,60	0,66	0,58
Z+*	0,57	0,56	0,63	0,43	0,62	0,43	0,41	0,50	0,41	0,56	0,59	0,65	0,56
Z+	0,57	0,56	0,64	0,43	0,62	0,44	0,42	0,50	0,40	0,55	0,59	0,68	0,57
povpr.	0,56	0,55	0,61	0,43	0,64	0,41	0,38	0,50	0,41	0,56	0,60	0,64	0,57
STDEV	0,008	0,006	0,016	0,004	0,015	0,015	0,019	0,001	0,004	0,007	0,007	0,055	0,009

pretočni koeficient $C_d$ po različnih avtorjih - preliv B14_L15_p10													
var.	Subramanya	Yu-Tech	Ranga Raju	Cheong	Singh	Jalili	Borghei	Swamee	Emiroglu	May $C_{DS}$	May $C_d^*$	$C_{d,mer}$	$C_{d,nova}$
Q-	0,58	0,57	0,66	0,44	0,69	0,43	0,40	0,50	0,41	0,57	0,61	0,63	0,61
Q-*	0,58	0,56	0,65	0,43	0,68	0,42	0,39	0,50	0,41	0,57	0,61	0,58	0,60
var 0	0,58	0,56	0,64	0,43	0,67	0,42	0,39	0,50	0,41	0,57	0,60	0,56	0,59
Q+*	0,57	0,56	0,64	0,43	0,66	0,42	0,39	0,50	0,41	0,57	0,60	0,59	0,59
Q+	0,57	0,56	0,63	0,43	0,66	0,42	0,39	0,50	0,41	0,56	0,60	0,57	0,59
Z-	0,57	0,56	0,63	0,43	0,69	0,40	0,37	0,50	0,42	0,58	0,61	0,61	0,60
Z-*	0,57	0,56	0,64	0,43	0,68	0,41	0,38	0,50	0,41	0,57	0,61	0,56	0,60
var 0	0,58	0,56	0,64	0,43	0,67	0,42	0,39	0,50	0,41	0,57	0,60	0,56	0,59
Z+*	0,58	0,56	0,65	0,43	0,66	0,43	0,40	0,50	0,41	0,56	0,60	0,59	0,59
Z+	0,58	0,57	0,66	0,44	0,65	0,44	0,42	0,50	0,40	0,56	0,59	0,59	0,58
povpr.	0,58	0,56	0,64	0,43	0,67	0,42	0,39	0,50	0,41	0,57	0,60	0,58	0,59
STDEV	0,004	0,004	0,011	0,002	0,013	0,010	0,012	0,000	0,004	0,006	0,006	0,022	0,008

pretočni koeficient $C_d$ po različnih avtorjih - preliv B14_L20_p10													
var.	Subramanya	Yu-Tech	Ranga Raju	Cheong	Singh	Jalili	Borghei	Swamee	Emiroglu	May $C_{DS}$	May $C_{d}^*$	$C_{d,mer}$	$C_{d,nova}$
Q-	0,57	0,56	0,64	0,43	0,69	0,41	0,40	0,50	0,44	0,58	0,62	0,59	0,60
Q-*	0,57	0,56	0,63	0,43	0,68	0,41	0,39	0,50	0,43	0,58	0,61	0,55	0,59
var 0	0,57	0,55	0,62	0,43	0,67	0,41	0,39	0,50	0,43	0,58	0,61	0,56	0,59
Q+*	0,56	0,55	0,61	0,43	0,67	0,40	0,39	0,50	0,43	0,57	0,61	0,56	0,58
Q+	0,56	0,55	0,61	0,42	0,66	0,40	0,39	0,50	0,43	0,57	0,61	0,57	0,58
Z-	0,56	0,55	0,61	0,43	0,68	0,39	0,38	0,50	0,44	0,58	0,62	0,54	0,59
Z-*	0,56	0,55	0,62	0,43	0,67	0,40	0,38	0,50	0,44	0,58	0,61	0,56	0,59
var 0	0,57	0,55	0,62	0,43	0,67	0,41	0,39	0,50	0,43	0,58	0,61	0,56	0,59
Z+*	0,57	0,55	0,62	0,43	0,66	0,41	0,40	0,50	0,43	0,57	0,61	0,57	0,59
Z+	0,57	0,56	0,63	0,43	0,66	0,41	0,41	0,50	0,42	0,57	0,61	0,57	0,59
povpr.	0,57	0,55	0,62	0,43	0,67	0,40	0,39	0,50	0,43	0,58	0,61	0,56	0,59
STDEV	0,004	0,003	0,009	0,002	0,009	0,007	0,009	0,000	0,005	0,003	0,004	0,013	0,004

pretočni koeficient $C_d$ po različnih avtorjih - preliv B14_L20_p12													
var.	Subramanya	Yu-Tech	Ranga Raju	Cheong	Singh	Jalili	Borghei	Swamee	Emiroglu	May $C_{DS}$	May $C_{d}^*$	$C_{d,mer}$	$C_{d,nova}$
Q-	0,58	0,57	0,66	0,44	0,72	0,42	0,40	0,50	0,45	0,59	0,62	0,59	0,61
Q-*	0,58	0,56	0,65	0,43	0,70	0,41	0,40	0,50	0,44	0,58	0,62	0,58	0,60
var 0	0,58	0,56	0,64	0,43	0,69	0,41	0,40	0,50	0,44	0,58	0,61	0,63	0,61
Q+*	0,57	0,56	0,63	0,43	0,68	0,41	0,40	0,50	0,43	0,58	0,61	0,61	0,60
Q+	0,57	0,55	0,62	0,43	0,68	0,40	0,39	0,50	0,43	0,57	0,61	0,66	0,59
Z-	0,57	0,56	0,63	0,43	0,70	0,40	0,39	0,50	0,45	0,58	0,62	0,59	0,60
Z-*	0,57	0,56	0,64	0,43	0,70	0,41	0,39	0,50	0,44	0,58	0,62	0,62	0,60
var 0	0,58	0,56	0,64	0,43	0,69	0,41	0,40	0,50	0,44	0,58	0,61	0,63	0,61
Z+*	0,58	0,56	0,65	0,43	0,68	0,42	0,41	0,50	0,43	0,57	0,61	0,60	0,60
Z+	0,58	0,56	0,65	0,43	0,68	0,42	0,42	0,50	0,42	0,57	0,61	0,60	0,59
povpr.	0,58	0,56	0,64	0,43	0,69	0,41	0,40	0,50	0,44	0,58	0,61	0,61	0,60
STDEV	0,005	0,004	0,011	0,002	0,012	0,007	0,009	0,000	0,009	0,005	0,005	0,025	0,007

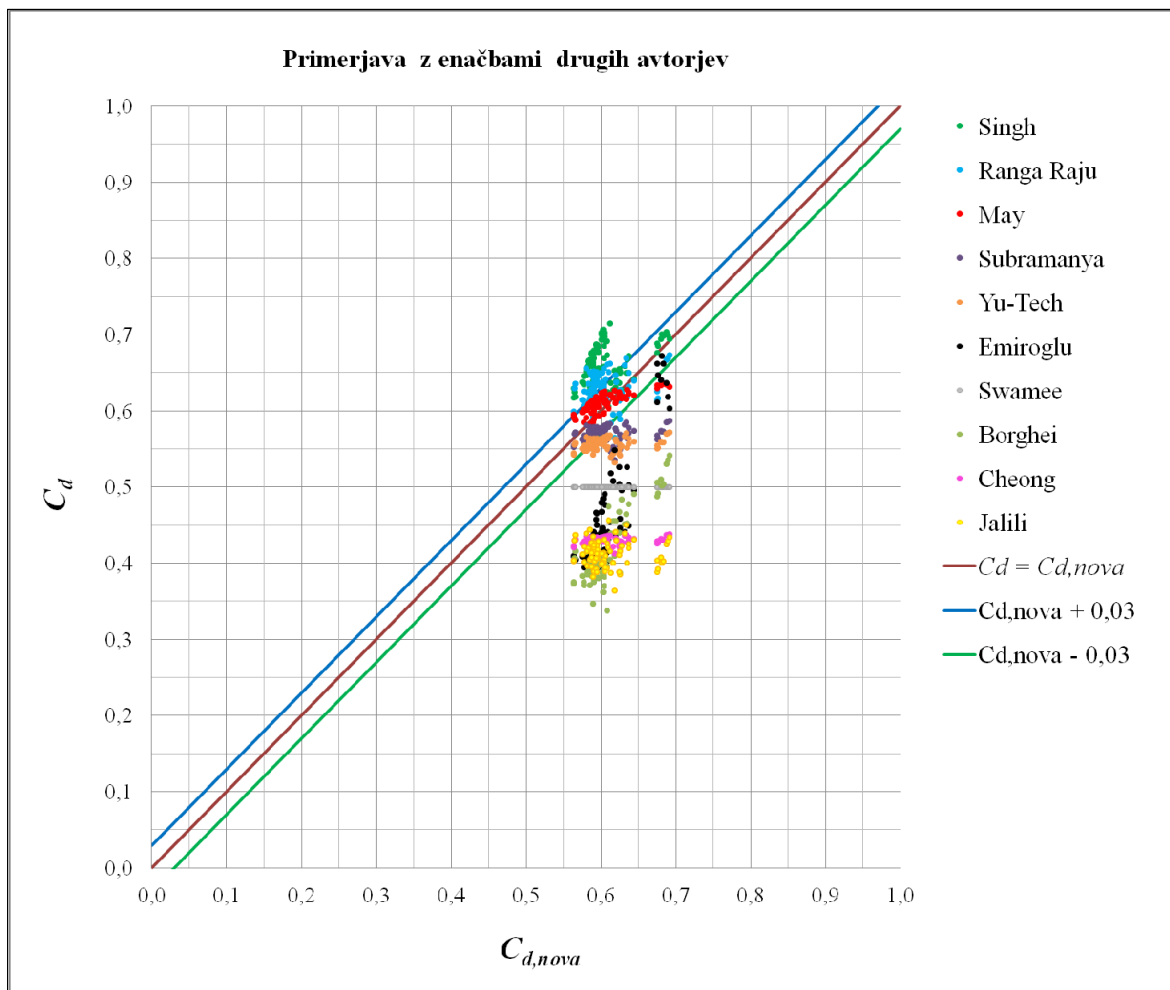
pretočni koeficient $C_d$ po različnih avtorjih - preliv B14_L25_p12													
var.	Subramanya	Yu-Tech	Ranga Raju	Cheong	Singh	Jalili	Borghei	Swamee	Emiroglu	May $C_{DS}$	May $C_{d}^*$	$C_{d,mer}$	$C_{d,nova}$
Q-	0,57	0,56	0,64	0,43	0,71	0,40	0,41	0,50	0,49	0,59	0,63	0,59	0,60
Q-*	0,57	0,56	0,63	0,43	0,70	0,40	0,41	0,50	0,48	0,59	0,62	0,60	0,60
var 0	0,57	0,56	0,63	0,43	0,70	0,40	0,40	0,50	0,48	0,59	0,62	0,61	0,60
Q+*	0,56	0,55	0,62	0,43	0,69	0,39	0,40	0,50	0,47	0,58	0,62	0,61	0,59
Q+	0,56	0,55	0,61	0,43	0,68	0,39	0,40	0,50	0,47	0,58	0,62	0,63	0,59
Z-	0,57	0,55	0,62	0,43	0,70	0,39	0,39	0,50	0,49	0,59	0,63	0,60	0,61
Z-*	0,57	0,56	0,63	0,43	0,70	0,40	0,40	0,50	0,48	0,59	0,62	0,61	0,60
var 0	0,57	0,56	0,63	0,43	0,69	0,40	0,41	0,50	0,47	0,58	0,62	0,62	0,60
Z+*	0,57	0,56	0,64	0,43	0,69	0,41	0,42	0,50	0,46	0,58	0,62	0,61	0,59
Z+	0,57	0,56	0,64	0,43	0,68	0,41	0,43	0,50	0,45	0,58	0,61	0,61	0,59
povpr.	0,57	0,56	0,63	0,43	0,69	0,40	0,41	0,50	0,47	0,59	0,62	0,61	0,60
STDEV	0,004	0,003	0,009	0,002	0,009	0,008	0,009	0,000	0,013	0,004	0,004	0,011	0,005

pretočni koeficient $C_d$ po različnih avtorjih - preliv B30_L50_p12													
var.	Subramanya	Yu-Tech	Ranga Raju	Cheong	Singh	Jalili	Borghei	Swamee	Emiroglu	May $C_{DS}$	May $C_d^*$	$C_{d,mer}$	$C_{d,nova}$
Q20_a	0,55	0,54	0,59	0,42	0,65	0,39	0,39	0,50	0,46	0,59	0,62	0,65	0,63
Q20_b	0,57	0,55	0,62	0,43	0,63	0,42	0,43	0,50	0,44	0,58	0,61	0,63	0,61
Q20_c	0,58	0,56	0,65	0,43	0,61	0,46	0,48	0,51	0,43	0,57	0,60	0,58	0,61
Q17_a	0,57	0,56	0,63	0,43	0,65	0,42	0,42	0,50	0,45	0,58	0,62	0,62	0,63
Q17_b	0,57	0,56	0,64	0,43	0,64	0,43	0,44	0,50	0,44	0,58	0,61	0,63	0,62
Q17_c	0,58	0,56	0,65	0,43	0,63	0,44	0,46	0,50	0,44	0,58	0,61	0,62	0,62
Q14_a	0,58	0,56	0,65	0,43	0,67	0,43	0,43	0,50	0,45	0,59	0,62	0,66	0,64
Q14_b	0,58	0,57	0,66	0,44	0,66	0,44	0,45	0,50	0,44	0,58	0,62	0,64	0,63
Q14_c	0,59	0,57	0,67	0,44	0,65	0,45	0,47	0,50	0,44	0,58	0,62	0,64	0,63
povpr.	0,57	0,56	0,64	0,43	0,64	0,43	0,44	0,50	0,44	0,58	0,62	0,63	0,62
STDEV	0,011	0,009	0,024	0,005	0,020	0,021	0,026	0,001	0,008	0,006	0,007	0,022	0,010

pretočni koeficient $C_d$ po različnih avtorjih - preliv B30_L75_p14													
var.	Subramanya	Yu-Tech	Ranga Raju	Cheong	Singh	Jalili	Borghei	Swamee	Emiroglu	May $C_{DS}$	May $C_d^*$	$C_{d,mer}$	$C_{d,nova}$
Q28_a	0,54	0,53	0,56	0,41	0,65	0,36	0,41	0,50	0,55	0,59	0,63	0,63	0,62
Q28_b	0,55	0,54	0,58	0,42	0,64	0,39	0,44	0,50	0,52	0,59	0,62	0,61	0,61
Q28_c	0,55	0,54	0,60	0,42	0,63	0,40	0,46	0,50	0,51	0,58	0,62	0,61	0,62
Q25_a	0,55	0,54	0,60	0,42	0,66	0,39	0,44	0,50	0,53	0,59	0,63	0,63	0,62
Q25_b	0,56	0,55	0,61	0,43	0,64	0,41	0,47	0,50	0,50	0,58	0,62	0,63	0,62
Q25_c	0,57	0,55	0,62	0,43	0,63	0,42	0,48	0,50	0,50	0,58	0,62	0,62	0,63
Q22_a	0,56	0,55	0,62	0,43	0,67	0,40	0,45	0,50	0,53	0,59	0,63	0,64	0,64
Q22_b	0,57	0,56	0,63	0,43	0,65	0,42	0,48	0,50	0,50	0,59	0,62	0,63	0,64
Q22_c	0,57	0,56	0,64	0,43	0,64	0,43	0,49	0,50	0,50	0,59	0,62	0,63	0,64
povpr.	0,56	0,55	0,61	0,42	0,64	0,40	0,46	0,50	0,51	0,59	0,62	0,62	0,63
STDEV	0,012	0,009	0,024	0,006	0,013	0,021	0,026	0,001	0,017	0,004	0,004	0,009	0,010

pretočni koeficient $C_d$ po različnih avtorjih - preliv B30_L100_p20													
var.	Subramanya	Yu-Tech	Ranga Raju	Cheong	Singh	Jalili	Borghei	Swamee	Emiroglu	May $C_{DS}$	May $C_d^*$	$C_{d,mer}$	$C_{d,nova}$
Q35_a	0,56	0,55	0,61	0,43	0,69	0,39	0,49	0,50	0,66	0,60	0,63	0,67	0,68
Q35_b	0,56	0,55	0,62	0,43	0,69	0,39	0,49	0,50	0,65	0,60	0,63	0,66	0,68
Q35_c	0,57	0,55	0,63	0,43	0,68	0,40	0,51	0,50	0,61	0,59	0,63	0,63	0,68
Q30_a	0,57	0,56	0,64	0,43	0,70	0,40	0,50	0,50	0,67	0,60	0,64	0,69	0,68
Q30_b	0,57	0,56	0,64	0,43	0,70	0,40	0,50	0,50	0,66	0,60	0,64	0,70	0,68
Q30_c	0,57	0,56	0,64	0,43	0,69	0,41	0,51	0,50	0,64	0,60	0,63	0,66	0,68
Q25_a	0,59	0,57	0,67	0,44	0,70	0,42	0,53	0,50	0,64	0,60	0,64	0,71	0,69
Q25_b	0,59	0,57	0,67	0,44	0,70	0,43	0,54	0,50	0,62	0,60	0,63	0,69	0,69
Q25_c	0,59	0,57	0,67	0,44	0,70	0,43	0,54	0,50	0,60	0,60	0,63	0,68	0,69
povpr.	0,57	0,56	0,64	0,43	0,69	0,41	0,51	0,50	0,64	0,60	0,63	0,68	0,68
STDEV	0,009	0,008	0,023	0,005	0,009	0,016	0,019	0,000	0,024	0,002	0,002	0,024	0,006



Priloga E.2: Grafična primerjava  $C_d$  za vse merjene bočne prelive  
Annex E.1: Graphical comparison of  $C_d$  for all measured side weirs

Op.: Iz raztrosa točk je razvidno, da so za enake vhodne podatke vrednosti  $C_d$  po enačbah različnih avtorjev zelo različne, kar je bilo obravnavano v poglavju 7.