

DOKTORSKI ŠTUDIJSKI PROGRAM III. STOPNJE GRAJENO OKOLJE

Doktorand: GAŠPER RAK

TOPOLOŠKA STRUKTURA VODNE GLADINE NA SOTOČJU PRI DEROČEM TOKU

Doktorska disertacija št.: 54/GO

WATER SURFACE TOPOLOGY OF SUPERCRITICAL CONFLUENCE FLOW

Doctoral thesis No.: 54/GO

Ljubljana, 4. september 2017



Mentor: prof. dr. Franci Steinman, UL FGG

Somentor: prof. dr. Marko Hočevar, UL FS

Poročevalci za oceno doktorske disertacije:

Izr. prof. dr. Dušan Žagar, UL FGG,

prof. dr. Renata Jecl, UM FGPA,

izr. prof. dr. Roman Klasinc, TU Graz, upok.

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani Gašper Rak, študent Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, z vpisno številko 26700162, avtor pisnega zaključnega dela študija z naslovom: Topološka struktura vodne gladine na sotočju pri deročem toku,

IZJAVLJAM,

1. da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;

2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;

3. da sem pridobil vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil;

4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil soglasje etične komisije;

5. da soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;

6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;

7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija;

8. da dovoljujem uporabo mojega rojstnega datuma v zapisu COBISS.

V: Ljubljani Datum: 17.8.2017

Podpis študenta:

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDV.	515 1.510 97.529 9.522 5(0/2)
UDK:	515.1:519.87:528.8:552.5(045)
Avtor:	mag. Gašper Rak
Mentor:	prof. dr. Franc Steinman
Somentor:	prof. dr. Marko Hočevar
Naslov:	Topološka struktura vodne gladine na sotočju pri deročem toku
Obseg in oprema:	112 str., 17 pregl., 78 sl., 84 en.
Ključne besede:	sotočje, deroči tok, eksperimentalno hidravlično modeliranje, topologija,
	stoječi valovi, lasersko skeniranje

IZVLEČEK

Z eksperimentalno raziskavo smo analizirali hidrodinamične razmere na območju asimetričnega pravokotnega sotočja pri deročih dotokih z višjimi vrednostmi Froudovih števil ($2 \le Fr \le 12$), pri katerih se pojavi dinamično, razpenjeno stoječe valovanje. Da bi fenomenološko določili sovisnosti med integralnimi parametri vodnih tokov in lastnostmi stoječega valovanja na območju sotočja, smo najprej izvedli meritve topografije vodne gladine za 168 kombinacij dveh tokov (scenarijev na sotočju). Za meritve prečnega poteka gladine smo uporabili lasersko skeniranje, ki kot sodobna brezkontaktna merilna tehnika omogoča meritve pojavov z veliko dinamiko ter prostorsko in časovno ločljivostjo. Kljub razširjenosti laserskega skeniranja pa to za zajem topografije gladine čiste vode, brez dodanih primesi, plovcev ipd., še ni bilo uporabljeno. Zaradi narave interakcije med laserskimi žarki in gladino vodnih teles smo v prvem delu raziskali, ali – in pod kakšnimi pogoji – je lasersko skeniranje uporabno za zajem topografije vodne gladine. S primerjavo teh meritev z referenčnimi vrednostmi drugačnih merilnih tehnik smo potrdili prvo hipotezo, da je – tako pri laboratorijskih kot tudi terenskih meritvah – mogoče z laserskim skeniranjem zelo natančno zajeti potek vodne gladine predvsem razburkanih, dvofaznih tokov z veliko vertikalno dinamiko, torej kompleksnejših hidravličnih pojavov, kjer so druge merilne metode manj uspešne oziroma neuporabne.

V drugem delu smo uporabili sistematične meritve vodne gladine po prerezih na območju sotočja pri vseh scenarijih za določitev srednjega poteka gladine in z izdelavo mrežnih modelov izdelali topografije stoječega valovanja. S tem smo pridobili pomembno podlago za analizo topologije sotočja. Rezultati so potrdili drugo hipotezo, da je mogoče zapisati fenomenološke zveze med vhodnimi, geometrijskimi in hidravličnimi parametri tokov ter glavnimi značilnostmi vodnih struktur, ki se pojavljajo na sotočjih pri deročem toku. Nove fenomenološko izpeljane enačbe, ki opisujejo prečni in vzdolžni potek gladin ter tudi višino fluktuacij, opišejo topologijo vodne gladine v ustrezni meri ter tako prinašajo informacije o procesih in njihovi magnitudi, ki so pomembne za inženirsko prakso.

UDC:	515.1:519.87:528.8:532.5(043)
Author:	Gašper Rak
Supervisor:	Prof. Franc Steinman, PhD
Co-advisor:	Prof. Marko Hočevar, PhD
Title:	Water surface topology of supercritical confluence flow
Notes:	112 p., 17 tab., 78 fig., 84 eq.
Key words:	confluence, supercritical flow, experimental hydraulic modeling, topology, standing waves, laser scanning

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

ABSTRACT

We used an experimental study to analyse the hydrodynamic conditions at an asymmetric right-angled confluence with incoming supercritical flow at higher Froude numbers ($2 \le Fr \le 12$), where dynamic, foamed standing waves form. For a phenomenological determination of the relations between the integral parameters of water flows and the characteristics of standing waves at the confluence area, we first measured water surface topographies for 168 combinations of two flows (i.e. scenarios at the confluence). Laser scanning was used to measure transversal water surface profiles, which, as a modern non-contact measurement method, allows for measurements of the phenomena with high dynamics as well as high spatial and temporal resolution. Despite its widespread use, laser scanning has not yet been used to acquire clean water topography, without any additional substances, floats, etc. Given the nature of interactions between laser beams and water body surfaces, we investigated, in the first part, the conditions under which laser scanning can be applied in water surface topography measurements. Comparing these measurements with the reference values of other measurement methods supported the first hypothesis that, both in laboratory and field measurements, laser scanning allows for a precise determination of water levels, particularly of turbulent, two-phase flows with high vertical fluctuations, i.e. complex hydraulic phenomena where other measurement methods are less successful or unsuited.

In the second part we used the systematically measured water surfaces in the individual cross-sections in the confluence area for all the scenarios for determining the water level's mean value, and by producing mesh models we constructed the topographies of standing waves. This provided an important basis for analysing confluence topography. The results supported the second hypothesis, i.e. that it is possible to record phenomenological relations between input, geometrical, and hydraulic flow parameters and the main characteristics of flow structures forming at confluences with incoming supercritical flows. The new, phenomenologically-derived equations modelling the formation of surfaces in the transversal and longitudinal directions and the fluctuation level describe the water surface topology to a satisfying degree, resulting in important information about the processes and their magnitude for engineering work.

ZAHVALA

Za pomoč, podporo, potrpežljivost, nasvete in namenjen čas pri nastajanju doktorske disertacije se iskreno zahvaljujem prof. dr. Franciju Steinmanu in somentorju prof. dr. Marku Hočevarju.

Za pomoč v laboratoriju, skrbno in kvalitetno izvedbo preiskuševališča ter pomoč pri meritvah se zahvaljujem Aljoši, Matjažu, Pavlu, Rajku in Urbanu.

Hvala tudi podjetju SICK za izposojo merilne opreme.

Velika hvala mojim najbližjim, staršem za podporo v vseh letih študija, predvsem pa Jakobu, Lenartu in Nasti, ki so občutili, da so bile, poleg vodnega toka na modelu, turbulentne tudi moje misli.

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE	I
IZJAVE	
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSK	A STRAN IN IZVLEČEKIII
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC	INFORMATION IV
ZAHVALA	V
KAZALO VSEBINE	VI
KAZALO SLIK	IX
KAZALO PREGLEDNIC	XIII
SEZNAM PRILOG	XIV
LIST OF FIGURES	XV
LIST OF TABLES	XIX
LIST OF APPENDICES	XX
OKRAJŠAVE	XXI
SIMBOLI	XXI
UPORABLJENI INDEKSI	XXII
1 UVOD	
1.1 Hipoteza in cilji disertacije	
1.2 Zgradba disertacije	
2 TEORETIČNA IZHODIŠČA	
2.1 Topografija in topologija površine	
2.2 Hidravlika sotočij odprtih vodotoko	v
2.2.1 Opredelitve, lastnosti in opis toka s	prosto gladino7
2.2.2 Režimi vodnega toka in prehodi m	ed njimi
2.2.3 Opredelitve in opis parametrov, ki	vplivajo na tokovne razmere na sotočjih 12
2.2.4 Procesi in pojavi v vodnem toku na	ı sotočjih14
2.2.5 Dvofazni tokovi	
2.3 Hidravlično modeliranje sotočja	
2.3.1 Postopki in procesi eksperimentaln	e hidravlike
2.3.2 Preizkuševališče, gonilne sile in dv	rofazni tokovi na T-sotočju 22
2.4 Merilne metode za določanje vodne	gladine in topografije gladine na sotočju
2.4.1 Merilne metode za določanje potek	a vodne gladine
2.4.2 Brezkontaktne merilne metode za o	loločanje poteka in dinamike vodne gladine
2.4.2.1 Lasersko skeniranje površin	
2.4.2.2 Računalniško podprte vizualiza	cijske merilne metode
2.5 Viri merilne negotovosti	

2.6	N	lultiregresijski fenomenološki modeli	35
2.7	P	rogramska oprema za podporo meritev in analize	36
2.8	Р	regled raziskav sotočij drugih avtorjev	37
2.	8.1	Zasnove eksperimentov raziskav sotočij	40
2.	.8.2	Primerjava merilnih metod pri raziskavah sotočja	41
2.	.8.3	Rezultati hidravličnih razmer na sotočju drugih avtorjev v primerjavi z našo raziskav	vo42
3	EK	SPERIMENTALNO DELO IN METODE	45
3.1	Me	ritve vodne gladine z laserskim skeniranjem	45
3.	1.1	Meritve gladin stoječe vode – verifikacija merilne metode	45
3.	1.2	Zasnova eksperimentalnega modela T-sotočja	47
3.	1.3	Opis scenarijev tokovnih razmer na preizkuševališču T-sotočja	52
3.	1.4	Terenske meritve spodnje vode na hidroelektrarni Doblar I	53
3.2	U	porabljena merilna in programska oprema	54
3.	.2.1	Distančniki za nastavitev globine tokov v obeh kanalih	55
3.	.2.2	Merilnika pretoka	55
3.	.2.3	Meritve gladine z ostnim merilom	57
3.	.2.4	Meritve s hitro kamero za določitev gladine z analizo slikovnih sekvenc	57
3.	.2.5	Meritve poteka gladine z laserskim skenerjem	59
3.	2.6	Meritve referenčnih vrednosti gladin na HE Doblar I s hitro kamero	61
3.	.2.7	Programska oprema za zajem in obdelavo meritev	61
3.3	Р	rimer obdelave merjenih veličin	62
3.	3.1	Analiza zaporednih sekvenc slik – posnetki s hitro kamero in merilom v vodnem	
to	ku		62
3.	.3.2	Obdelava meritev laserskega skeniranja	64
3.4	Si	istematika meritev hidravličnih razmer na preizkuševališču T-sotočja	68
4	RE	ZULTATI IN RAZPRAVA	69
4.1	P	reverjanje primernosti merilne metode za meritve topografije vodne gladine	69
4.	1.1	Meritve gladine čiste stoječe vode	69
4.	1.2	Meritve gladine stoječe vode z dodajanjem medija	71
4.	1.3	Meritve na eksperimentalni postaji sotočja pri deročem toku	77
4.	1.4	Ugotovitve o fluktuacijah vodne gladine	82
4.2	D	oločanje topografije vodne gladine na sotočju dveh vodotokov z deročim režimor	n84
4.	.2.1	Izdelava 3D-površine vodne gladine iz meritev gladine z laserskim skenerjem –	
to	pogr	afija	84
4.	.2.2	Strukture vodnega toka na sotočju pri deročem toku	87
4.3	Т	opološki opis razmer na sotočju pri deročem toku	90
4.	.3.1	Enačbe za opis glavnih karakteristik stoječih valov pri 90° sotočjih	91

4	.3.2	Primerjava rezultatov na T-sotočju z rezultati drugih avtorjev	
4.4	4 T	erenske meritve reprezentativne gladine spodnje vode HE Doblar	
4.	5 S	kupne ugotovitve in potrditev hipotez	100
4	.5.1	Uporabnost laserskega skeniranja za zajem topografije vodne gladine	100
4	.5.2	Določanje hidravličnih razmer na sotočju in topologije	101
4	.5.3	Nadaljnje delo	102
5	ZA	KLJUČEK	105
6	PO	VZETEK	108
7	SU	MMARY	111
VIR	RI IN	LITERATURA	114

KAZALO SLIK

Slika 1: Sotočja se pojavljajo tako na naravnih in reguliranih vodotokih kot tudi na različni vodni
infrastrukturi (sotočje hudournikov (levo), obcestne odvodnje (desno))1
Slika 2: Tokovne razmere pod prelivnimi polji pri normalnem obratovanju turbin HE – zaprta prelivna
polja (levo) in pri toku čez prelivno polje (desno)2
Slika 3: Primera topografije terena, prikazane z digitalnim modelom terena (DMT) kot podlaga za
hidrološke in hidravlične analize (Rak, 2006)5
Slika 4: Dve topološki prostorski strukturi, prva z določljivo usmerjenostjo in druga z nedoločljivo
usmerjenostjo (Kleinova steklenica)
Slika 5: Gladinske krivulje pri horizontalnem dnu
Slika 6: Vodni skok – prehod med deročim in mirnim režimom vodnega toka
Slika 7: Shema sotočja z osnovnimi veličinami, ki nastopajo v enačbah
Slika 8: Tipi dotoka s stranskega kanala v glavni kanal (prirejeno po Hager, 2010; slika 16.12, str.
425)
Slika 9: Značilnosti tokovnih razmer preko sotočja14
Slika 10: Stoječe valovanje in ozračen, dvofazni tok na sotočju pri deročem režimu dotokov (levo –
pogled gorvodno, desno – pogled dolvodno)
Slika 11: V odvisnosti od lastnosti stranskega dotoka se na steni nasproti stranskega kanala pojavi
kompaktni (slika levo) ali stenski val (slika desno)
Slika 12: Različni pojavi vodnega toka na sotočiu: vodni skok na obeh vejah tik pred sotočiem (a) –
levo), vodni skok na stranskem kanalu ((c) – sredina) in pojav sodčka na sotočju ((e), brez vodnega
skoka na obeh dotekajočih vejah – desno)
Slika 13: Različni tipi dvofaznega toka
Slika 14: Dvofazni tok na primeru vodnega skoka in mesto vstopanja zraka (Murzvn in Chanson.
2008)
Slika 15: Tokovne razmere pri pravokotnem sotočiu kanalov
Slika 16: Pojav dvofaznega toka na T-sotočju pri deročem toku (zrak preko proste gladine vstopa v
vodno telo)
Slika 17: Primeri klasičnih kontaktnih in brezkontaktnih merilnih metod za merienje gladine vode:
tlačna sonda (skrajno levo), ultrazvočni merilnik (drugi z leve), valovna oziroma uporovna sonda
(tretia z leve) in ostno merilo (desno)
Slika 18: Oblak točk (levo) meritev terena z melioracijskimi jarki z laserskim skenerjem in DMR.
izdelan iz podatkov laserskega skeniranja (Rak. 2006)
Slika 19: Vidno oziroma merieno polie 2D laserskega skeneria iz ene lokacije žarišča laseria
Slika 20: Različni tipi odboja glede na površino objekta: a) zrcalni odboj pri pravem kotu vpadnega
žarka, b) odboj na zrcalni površini pri vpadnem kotu, večiem od 0°, c) difuzni odboj
Slika 21: Meritev objekta, če je njegova velikost maniša od preseka laserskega žarka
Slika 22: Širienje laserskega žarka (levo) in razdalja med posameznimi točkami na merieni površini
pri različni kotni ločlijvosti (SICK, 2015)
Slika 23. Vpliv loma svetlobe pri prehodu svetlobnega žarka med zrakom in vodo na točnost meritve
31
Slika 24 [.] Shema zasnove meritev gladine v prečnem prerezu s hitro kamero 33
Slika 25: Obdelava sekvence slik za določitev konture vodne gladine vzdolž vodnega skoka v
steklenem kanalu. UL FGG
Slika 26: Tlorisni in narisni pogled stoječega valovanja na modelu Schwalt in Hager (1995 sl. 3a. b)
39

Slika 27: Preizkuševališče štirikrakega sotočja, kjer so bile želene tokovne razmere dosežene z
nagibanjem kanalov dotoka in odtoka do ± 5 %, dno sotočja pa je vedno horizontalno (Mignot et al.,
2011)
Slika 28: Meritve prečnega poteka gladine na sotočju s prizmo, montirano na čolniček (prirejeno po
Biron et al., 2002) in razdaljemerom Leica TC805
Slika 29: Shematski prikaz sotočia z vrisanimi lastnostmi geometrije, parametri stoječega valovanja in
glavna območia (B. C. D) po raziskavi Schwalt in Hager (Hager, 2010; slika 16.43, str. 456)
Slika 30: Sestava eksperimenta: steklena posoda z ostnim merilom, laserskim skeneriem in opremo za
vnihovanie mehurčkov
Slika 31: Vodna površina prekrita s tankim slojem milnice (levo) in detail meritve kote gladine z
ostnim merilom (deno)
Slika 32: Shema celotnega sistema
Slika 33: Shema merilne postaje
Slika 33. Shema preizkuševaličea T sotočja s prikazom robnih pogojev (vse dimenzije so v mm) 49
Slika 34. Shema preizkusevansea 1-sotoeja s prikazoni robini pogojev (vse umenzije so v min) 47
Slika 35. Hacha posoda z loputo za prinagajanje visine odprtja (H _{dotoka})
Slika 30: Nosinia konstrukcija z namesceno merinio opremo
Sinka 57: Maksimaine vrednosti parametrov, ki jin je bilo mogoće doseći pri različnih nastavlivan
Visine odprtja lopute na tiacni posodi
Slika 38: Meritve spodnje vode v odzracevalni komori HE Doblar I, kjer se pojavi dvofazni tok 54
Slika 39: Merilna oprema, uporabljena na preizkuševališću T-sotočja
Slíka 40: Na obeh dotočnih ceveh na preizkuševališče je bil pretok merjen z merilnikoma pretoka
ABB FlowMaster z nazivnim premerom 150 mm
Slika 41: Verifikacija merilnikov pretoka je bila izvedena s pravokotnim ostrorobim prelivom,
izdelanim po standardu ISO 1438:2008, montiranim na iztoku iz preizkuševališča
Slika 42: Referenčne meritve stoječe vode v posodi so bile izvedene z ostnim merilom
Slika 43: Določanje nivoja vodne gladine z analizo slik – uporaba hitre kamere in merila, potopljenega
v vodo
Slika 44: Lokacije prečnih prerezov, v katerih je bilo lasersko skeniranje verificirano z analizo slik
(vse dimenzije so v mm)
Slika 45: Meritve so bile izvedene z industrijskimi laserskimi skenerji LMS111 (levo), LMS400 (v
sredini) in LMS511 (desno) proizvajalca SICK AG
Slika 46: Potovanje impulzov laserja preko merjene površine na razdalji 540 mm (frekvenca
skeniranja 269.8 Hz in kotna ločljivost 0,2°, čas zajema posamezne slike je 50 μs), kjer je osvetljeni
del na posamezni sliki dolžine pribl. 16 mm
Slika 47: Prikaz nihanja gladine vode z zaporedjem slik s časovnim korakom 0,017 s (višina odprtja h1
$=$ h $_2=$ 20 mm, Fr $_1=$ 8,5 in Fr $_2=$ 5,6; kontrolni prerez 3 na sliki 44)
Slika 48: Osvetljena gladina vode ob merilu (levo) in izvrednoteni potek gladine vode z obdelavo slike
(desno)
Slika 49: Neobdelan oblak točk v polarnem koordinatnem sistemu, izmerjen z LMS400
Slika 50: Časovna vrsta meritev gladine stoječe vode pri kotu 0° (LMS511 (frekvenca snemanja 50 Hz
in kotna ločlijvost 0.33°) (meritev gladine stoječe vode, prekrite s tankim slojem milnice, globina vode
250 mm)
Slika 51: Frekvenčna analiza navpične meritve vodne gladine, ti, pri kotu 0°, z laserskim skeneriem
LMS511 (frekvenca snemania 50 Hz, kotna ločliivost 0.33°)
Slika 52: Točke znotraj kanala – izmerjene vrednosti pri odboju od razpršenih kanlije, mehurčkov oz
vodne gladine in dna kanala (scenarij: $h_1 = h_2 = 20 \text{ mm}$ $Fr_1 = 8.5 \text{ in } Fr_2 = 5.6 kontrolni presez 2 na$
sliki 44)
,

Slika 53: Filtrirane meritve z upoštevanjem jakosti odboja in potek gladine, določen s povprečenjem
meritev 6000 skenov (scenarij $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$; kontrolni prerez 3 na sliki 44). 67
Slika 54: Shematski prikaz sotočja z vrisanimi linijami merjenih prečnih prerezov (vse dimenzije so v
mm)68
Slika 55: Meritve gladine čiste stoječe vode z ostnim merilom (levo) in oblak točk meritev z laserskim
skenerjem LMS 511 (desno)70
Slika 56: Vpihovanje zračnih mehurčkov na dnu posode s stoječo vodo in meritve gladine z ostnim
merilom (levo) in oblak točk meritev z laserskim skenerjem LMS511 (desno)72
Slika 57: Gladina vode, prekrita s tankim slojem milnice z vidnim odsevom laserskega žarka (levo), in
surove ter obdelane meritve z laserskim skenerjem LMS400 (desno)74
Slika 58: Grafična primerjava meritev z laserskim skenerjem in ostnim merilom za primer tankega
sloja milnice na površini vode (s filtracijo z vrednostjo jakosti odboja in brez nje)76
Slika 59: Primerjava vrednosti, izmerjenih z LMS511, iste globine čiste vode in vode z dodatki76
Slika 60: Prečni poteki gladine v izbranem kontrolnem prerezu 2, izmerjeni pri različnih kombinacijah
frekvence skeniranja in kotne ločljivosti (laserski skener LMS511; scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,4$
in $Fr_2 = 6$)
Slika 61: Vodna gladina v vseh štirih kontrolnih prečnih prerezih, dobljena iz meritev z obema
laserskima skenerjema (brez in z filtriranjem meritev z jakostjo odboja) (scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, Fr ₁
$= 8,5 \text{ in } Fr_2 = 5,6).$
Slika 62: Večina meritev z LMS400 z vrednostjo jakosti odboja nad pragom leži znotraj nihanja vodne
gladine, določenega z analizo sekvence slik, posnetih s hitro kamero (scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 =$
8,5 in $Fr_2 = 5,6$; kontrolni prerez 2 na sliki 44)
Slika 63: Histogrami meritev vodne gladine v treh točkah, kjer smo upoštevali točke za pas širine 20
mm, prečno na kanal (upoštevanih 3000 skenov gladine) (scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 =$
5,6; kontrolni prerez 2 na sliki 44)
Slika 64: Primeri močno razgibane vodne gladine pri sotočju z nizko globino, a velikimi hitrostmi
dotokov
Slika 65: Oblaka točk dveh prečnih prerezov in odsek površine vodne gladine stoječega vala,
konstruirane z obdelavo meritev z laserskim skeniranjem (scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5.6$
5,6)
Slika 66: Stojeci val na sotocju pri derocem rezimu vodnega toka, konstruiran iz meritev z laserskim
skenerjem LMS400 (scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$)
Slika 6/: Sodcku podobna struktura vodnega toka, pri kateri se pod krovnim valom pojavljajo zračni $\delta = \frac{1}{2}$
Zepi (scenarij: $n_1 = n_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$)
Slika 68: izsek stojecega vala v dolzini 100 mm z vrisano povprecho gladino in ovojnicama gladin z $(a_{1}, a_{2}, a_{3}, a_{3}$
upostevanjem fluktuacij (scenarij: $n_1 = n_2 = 20$ mm, $FF_1 = 8,5$ m $FF_2 = 5,6$)
Slika 69! Oblike vodnega toka v glavnem kanalu glede na razmerje gloaine kolicine dotekajocin
10KOV
oziroma grbasti val (gradina): zgali dučanja taka v glavnom kanalu, stranski kanal je zajezon (dosno)
oznoma grodsti val (sredina), zgolj dušenje toka v gravnem kanaru, stranski kanar je zajezen (desno).
Slika 71: Raznoreditev pojavov na sotočju glede na razmerje gibalne količine toka no glavnem kanalu
in skuppe gibalne količine obeh dotokov
Slika 72: Pojav soděka ali grbastega vala na sotočiu in prikaz razmeria globin dotokov in višine konice
vala (scenarii: $h_1 - h_2 - 20$ mm Fr ₁ - 8.5 in Fr ₂ - 5.6)
Slika 73: Naris in tloris sotočia z vrisanimi glavnimi strukturami vodnega toka. za katere so podane
zveze z vhodnimi parametri
Slika 74. Primeriava med izmerienimi in izračunanimi vrednostmi višine orbastega vala na sotočiu 93
, i interjuvu neu izmerjenim m izručunumim vrćunostim visme groustega vala na sotočju75

Slika 75: Glavni greben vala C se vzpostavi vzdolž cone mešanja	94
Slika 76: Primerjava izračunanih vrednosti po enačbah določenih v tej disertaciji in Schwalt-Hager z	
merjenimi vrednostmi na preizkuševališču T-sotočja	97
Slika 77: Tokovne razmere v odzračevalni komori HE Doblar I, posnete z zaporednimi slikami s	
časovnim razmikom 0,1 s.	98
Slika 78: Prečni potek gladine spodnje vode v odzračevalni komori HE Doblar I v izbranem časovne	m
koraku meritve 6 iz preglednice 17.	98

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Maksimalne vrednosti pretoka in Froudovega števila pri različnih globinah dotoka	.51
Preglednica 2: Vrednosti vhodnih parametrov pri scenarijih z enako globino obeh tokov	.52
Preglednica 3: Vrednosti vhodnih parametrov pri scenarijih s spreminjanjem globine stranskega toka	a.
	.52
Preglednica 4: Vrednosti vhodnih parametrov pri scenarijih s spreminjanjem globine glavnega dotok	sa.
	.53
Preglednica 5: Verifikacija EM-merilnika pretoka na dovodu na glavni in stranski kanal s pravokotn	im
ostrorobim prelivom s širino preliva B/2 = 25 cm.	.56
Preglednica 6: Tehnične lastnosti laserskih skenerjev, uporabljenih za meritve	.59
Preglednica 7: Pregled analiziranih primerov	.69
Preglednica 8: Meritve gladine čiste mirne vode v stekleni posodi z laserskim skenerjem LMS400	.70
Preglednica 9: Meritve gladine čiste mirne vode v stekleni posodi z laserskim skenerjem LMS511	.70
Preglednica 10: Meritve gladine vode v stekleni posodi z laserskim skenerjem LMS400 za primer z	
vpihovanjem zraka, da mehurčki potujejo od dna posode proti gladini	.72
Preglednica 11: Meritve gladine vode v stekleni posodi z laserskim skenerjem LMS511 za primer z	
vpihovanjem zraka, da mehurčki potujejo od dna posode proti gladini	.73
Preglednica 12: Meritve gladine vode v stekleni posodi z laserskim skenerjem LMS400 za primer s	
tankim slojem milnice na vodni gladini	.75
Preglednica 13: Meritve gladine vode v stekleni posodi z laserskim skenerjem LMS511 za primer s	
tankim slojem milnice na vodni gladini	.75
Preglednica 14: Meritve iste globine stoječe vode pri različnih stanjih oziroma dodatkih	.77
Preglednica 15: Povprečne in maksimalne vrednosti globine, izmerjene z LMS511 v treh prerezih, p	ri
različnih kombinacijah frekvence skeniranja in kotne ločljivosti	.79
Preglednica 16: Večkratne meritve istega prereza z LMS511 pri istih nastavitvah. Vsak profil je bil j	pri
enaki konfiguraciji LMS511 posnet trikrat. Povprečna deviacija prikazuje raztros meritev pri	
posamezni kombinaciji	.79
Preglednica 17: Rezultati meritev spodnje vode v odzračevalni komori HE Doblar I	.99

SEZNAM PRILOG

Priloga A: Primerjava meritev gladin v izbranih točkah kontrolnih prerezov z obema laserskima skenerjema in analizo slik hitre kamere

Priloga B: Seznam vseh izmerjenih scenarijev z vrednostmi glavnih parametrov in veličin

Priloga C: Primeri konstruirane topografije vodne gladine vzdolž sotočja

Priloga D: Lastnosti stoječega valovanja na sotočju za pojav sodčka ali grbastega vala, določene iz meritev in izdelanih 3D mrežnih modelov

Priloga E: Fenomenološke enačbe za opis lastnosti stoječega valovanja na sotočju in primerjava merjenih vrednosti ter izračunanih vrednosti po naših enačbah in enačbah Schwalt-Hager

LIST OF FIGURES

Figure 1: Confluences occur both in natural and regulated rivers as well as in a variety of hydraulic
structures (torrent junction (left), road drainage (right)).
Figure 2: Flow conditions on the downstream side of the spillways in normal operation of HPP
turbines – spillways are closed (levo) and during high waters (right).
Figure 3: Examples of terrain topography using the digital terrain model (DTM) as the basis for
hydrological and hydraulic analyses (Rak, 2006).
Figure 4: Two topological spatial structures, the first one with determinable orientation, the second
one with a non-orientable surface (the Klein bottle)
Figure 5: Backwater curves for horizontal slope channels10
Figure 6: Hydraulic jump – transition between the supercritical and subcritical flow11
Figure 7: A drawing of a junction with the fundamental variables appearing in the equations12
Figure 8: Types of inflow in the main channel (adapted from Hager, 2010; fig. 16.12, p. 425)
Figure 9: Characteristics of flow conditions across a confluence.
Figure 10: Standing waves and the aerated, two-phase flow at the supercritical confluence flow (left –
upstream view, right – downstrem view)
Figure 11: Depending on the properties of the lateral incoming flow on the wall opposite the side
channel, a compact (figure left) or wall-type wave is formed (figure right)15
Figure 12: Different water flow phenomena at the confluence: hydraulic jump on both branches just
before the confluence ((a) – left), hydraulic jump at the side channel ((c) – middle) and barrel roll ((e),
without the hydraulic jump at both incoming branches – right)16
Figure 13: Different types of two-phase flow
Figure 14: Two-phase flow in the hydraulic jump and the location of air entrainment (Murzyn and
Chanson, 2008)
Figure 15: Flow conditions at a right-angled channel confluence
Figure 16. Phenomenon of the two-phase flow at the supercritical confluence flow (air is entrained
through free water surface).
Figure 17: Examples of conventional measurement methods: pressure probe (left), ultrasonic sensor
(2nd from the left), wave or resistance-type probe (3rd from the left), and point gauge (right)
Figure 18: Point cloud of measurements of a terrain with drainage ditches using a laser scanner and a
DTM generated from laser scanning data (Rak, 2006).
Figure 19: Field of view or field of measurements using a 2D laser scanner from one location of the
laser focal point
Figure 20: Different types of reflection corresponding to the object's surface: a) reflection at
perpendicular incident on the surface b), reflection on the mirror surface at an angle greater than 0
degrees, c) diffuse reflection
Figure 21: Measurement of an object when its surface is smaller than the spot of the laser beam29
Figure 22: Divergence of laser beam (left) and the distance between the measured points at various
angular resolutions (SICK, 2015)
Figure 23: The impact of light beam refraction at the air-water crossing on measurement accuracy31
Figure 24: A drawing of the recording set-up using a high-speed camera
Figure 25: Image sequence processing to determine the water surface outline along the hydraulic jump
in the glass channel, UL FGG.
Figure 26: Plan and side views of standing waves in the model of Schwalt and Hager (1995, fig. 3a, b)
Figure 27: Apparatus of the four-branch junction, where flow properties were obtained with an
inclination of the channels up to $\pm 5\%$ (Mignot et al., 2011)

Figure 28: Measurements of the transverse water surface profile with a reflector mounted on the raft
(adapted from Biron et al., 2002) and tachymeter Leica TC805
Figure 29: Schematic presentation of a junction with geometric properties, parameters of standing
waves and main areas (B, C, D) according to the study of Schwalt and Hager (Hager, 2010; fig. 16.43,
p. 456)
Figure 30: The experiment setup: a glass tank with a point gauge, laser scanner, and additional
equipment for injecting hubbles.
Figure 31: Water surface covered with a thin layer of soap foam (left) and a detail of a water level
measurement using a poing gauge (right) 47
Figure 32: Scheme of the entire system 48
Figure 32: Drawing of the measuring station 49
Figure 34: Schematics of the apparatus of the T-junction with boundary conditions (all dimensions are
in mm)
Figure 35: The pressure vessel with a flap for regulating the height of the inlet ist stream 50
Figure 36: The frame structure with the mounted measuring equipment
Figure 30. The maximum nonometer values that could be achieved at different setting of energing
Figure 57: The maximum parameter values that could be achieved at different setting of opening
Figure 29. Measurements of the teiluster level in the wort showher of UDD Debler Level are these
Figure 38: Measurements of the tailwater level in the vent chamber of HPP Doblar I, where two-phase
The second secon
Figure 39: Measuring equipment used on the 1-junction apparatus
Figure 40: At both inflow pipes to the experiment, the discharge was measured using the flowmeters
ABB FlowMaster with a nominal diameter of 150 mm
Figure 41: Verification of the flowmeter was carried out using a rectangular-notch, thin-plate weir
made according to the ISO 1438:2008 standard, mounted at the experiment outflow
Figure 42: Reference measuremenents of the standing water in the tank were taken with a point gauge.
Figure 43: Determination of the water level with image analysis – using a high-speed camera and a
ruler immersed in the water
Figure 44: Locations of the cross sections at which laser scanning was verified with image analysis (all
dimensions are in mm)
Figure 45: Measurements were carried out with industrial laser scanners LMS111 (left), LMS400 (in
the middle), and LMS511 (right) manufactured by SICK AG
Figure 46: Travelling of the laser across the measured surface at a distance of 540 mm (scanning
frequency is 269.8 Hz and angular resolution 0.2° , shutter speed of each frame is 5 µs), where each
illuminated part in an individual image is 16 mm long
Figure 47: Presentation of water level fluctuations with an image sequence with a time increment of
0.017 s (height of inlet $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8.5$ and $Fr_2 = 5.6$; control section 3 on Fig. 44)63
Figure 48: Illuminated water surface at the ruler (left) and the water surface profile extracted with
image post-processing (right)
Figure 49: Raw point cloud in a polar coordinate system measured using LMS400
Figure 50: Measurements of standing water surface at an angle of 0° in the time domain (scanning
frequency of 50 Hz and angular resolution 0.33°) (measurement of standing water surface covered
with a thin layer of soap foam, water depth 250 mm)65
Figure 51: Measurements of the water surface level at an angle of 0° in the frequency domain using
laser scanner LMS511 (scanning frequency of 50 Hz and angular resolution 0.33°)
Figure 52: Points inside the channel – measured values of reflection from water drops, bubbles, the
water surface and the channel bottom (scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Er_1 = 8.5$ and $Er_2 = 5.6$; control cross
water surface and the channel bottom (scenario $n_1 - n_2 - 20$ mm, $n_1 - n_2 - 5.0$, control cross
section 2 on Fig. 44)

Figure 53: Filtered measurements by taking into account the remission values of reflection and the water surface profile determined based on averaging measurements from 6000 scans (scenario $h_1 = h_2$ Figure 54: A drawing of the confluence with lines of the measured cross sections (all dimensions are Figure 55: Measurements of clear standing water with a point gauge (left) and a point cloud of measurements with a laser scanner LMS511 (right)......70 Figure 56: Injecting air bubbles at the bottom of the tank and measurements of the water surface with a point gauge (levo), and a point cloud of measurements with the LMS511 laser scanner (right)............72 Figure 57: Water surface covered with a thin layer of soap foam with visible reflection of the laser sheet (left) and raw and processed measurements using a laser scanner LMS400 (right)......74 Figure 58: Graphical comparison of measurements with a laser scanner and a point gauge for the case with a thin layer of soap foam on the water surface (with/without filtering with the remission value).76 Figure 59: A comparison of the measured values of the same water depth of clear water and water with Figure 60: Free-water-surface profiles in control cross section 2 measured by different combinations of scanning frequency and angular resolution (laser scanner LMS511; scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 =$ Figure 61: Free-water-surface profiles in all four control cross sections obtained by both laser scanners (without and with filtration of measurements with remission values) (scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 =$ Figure 62: Most of the LMS400 measurements with remission values above the threshold lie within the water surface fluctuation determined through analysis of the image sequence recorded with a highspeed camera (scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8.5$ and $Fr_2 = 5.6$; control cross section 2 on Fig. 44)...82 Figure 63: Histograms of measuments of water surface in three points, where we took into account the points from the slot with a width of 20 mm, transversal to the channel (3000 scans taken into account) Figure 64: Examples of strong dynamic water surface at a confluence with low depth but high velocity Figure 65: Point cloud of two cross sections and a section of the standing wave free-water surface, constructed with post-processing of the laser scanner measurements (scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 =$ Figure 66: Standing wave in supercritical confluence flow, constructed from measurements with laser Figure 67: Flow structure similar to barrel roll, where air pockets occur under an umbrella wave Figure 68: 100 mm long section of a standing wave with a plot of the average water surface and envelopes of the water surface by taking into account the fluctuation (scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 =$ Figure 69: Structures of the water flow in the main channel considering the momentum of the Figure 70: Flow patterns in a junction: hydraulic jumps in both incoming channels (left); barrel roll or humped wave (middle); choking of the main channel flow, while the side incoming flow is dammed Figure 71: Distribution of the phenomena at the junction according to the ratio of the flow momentum

Figure 72: Phemenomena of barrel roll or humped wave at the confluence, and illustration of the ratio
between the depth of the incoming flow and the wave peak height wave (scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, Fr_1
$= 8.5 \text{ and } Fr_2 = 5.6$)
Figure 73: Front and plan views of a junction with the main flow structures of water flow for which
relations with input parameters are given
Figure 74: Comparison between the measured and calculated values of height of the humped wave at
the confluence
Figure 75: The main ridge of wave C is established along the circulation zone
Figure 76: Comparison between the values calculated with equations determined in this dissertation
and Schwalt-Hager equations and measurements at the experiment of T-junction
Figure 77: Flow conditions in the vent chamber of HPP Doblar I, recorded as an image sequence with
a time interval 0.1 s
Figure 78: Transverse water surface profile in the vent chamber of HPP Doblar I in the selected time
step of measurement 6 from Table 17

LIST OF TABLES

Table 1: Maximum values of discharge and Froude numbers at different depths of incoming flows51
Table 2: The values of the input parameters in the scenarios with the same depths of the incoming
flows
Table 3: The values of the input parameters in the scenarios with various depths of the incoming flows
in the side channel
Table 4: The values of the input parameters in the scenarios with various depths of inflow in the main
channel53
Table 5: Verification of the EM flowmeter inflow pipe to the main and side channels using the
rectangular-notch, thin-plate weir with a width of $B/2 = 25$ cm
Table 6: Technical characteristics of the laser scanners used for measurements
Table 7: List of the analysed cases
Table 8: Measured water levels in a glass tank with laser scanner LMS400 for the case with clear
water70
Table 9: Measured water levels in a glass tank with laser scanner LMS511 for the case with clear
water70
Table 10: Measured water levels in the glass tank with laser scanner LMS400 for the case with air
injection so that bubbles travel up from the tank bottom to the surface72
Table 11: Measured water levels in the glass tank with laser scanner LMS511 for the case with air
injection so that bubbles travel up from the tank bottom to the surface73
Table 12: Measured water levels in the glass tank with laser scanner LMS400 for the case with a thin
layer of soap foam on the water surface75
Table 13: Measured water levels in the glass tank with laser scanner LMS511 for the case with a thin
layer of soap foam on the water surface75
Table 14: Measurements of depth of standing water for different states and additives77
Table 15: Average and maximum values of water depth measured with LMS511 in three cross-
sections, at different combinations of scanning frequency and angular resolution79
Table 16: Multiple measurements of the same profile with LMS511 with the same settings. Each
profile was scanned three times at each LMS511 configuration. Average deviation presents the
despersion of measurements for a particular combination
Table 17: Results of tailwater measurements in the vent chamber of HPP Doblar I

LIST OF APPENDICES

Appendix A: Comparison of water surface measurements in selected locations of control cross-sections with both laser scanners and image analysis of a high-speed camera

Appendix B: List of all measured scenarios with values of key parameters and variables

Appendix C: Examples of constructed water surface topography along the confluence

Appendix D: Properties of standing waves at a channel junction for the phenomenon of barrel roll or humped wave, obtained from measurements and created 3D mesh models

Appendix E: Phenomenological equations for the description of standing waves' properties, and comparison of measured values and calculated values with our and Schwalt-Hager equations

OKRAJŠAVE

določanje hitrostnega polja s sledenjem mehurčkov (BIV – bubble image velocimetry)
lasersko skeniranje z žarki različnih valovnih dolžin (Differential Absorption LIDAR)
digitalni model terena
digitalni model reliefa
hidroelektrarna
lasersko skeniranje (LIght Detection And Ranging)
nefelometrične enote motnosti
optične metode analize toka (angl. optical flow)
določanje hitrostnega polja s sledenjem delcev (PIV – particle image velocimetry)
čas preleta signala (angl. Time of Flight)
ultrazvočni (merilnik)

SIMBOLI

b	širina kanala [m]
d_{50}	petdeseti percentil premera zrna (50 % delcev vzorca ima manjši premer)
F	zunanje sile na obravnavano vodno telo [N]
Fr	Froudovo število [-]
Fr _d , Fr _m	Froudovo število pri deročem oz. mirnem toku [-]
F_{viz}	viskozne (tangencialne) sile [N]
8	težnostni pospešek [m/s²]
h	globina vode [m]
h_m, h_d	konjugirani globini pri mirnem in deročem toku [m]
Ι	naklon dna kanala [m/m]
I_E	naklon energijske črte kanala [m/m]
Re	Reynoldsovo število
l	karakteristična dolžina toka
L	brezdimenzijska dolžina
М	masa obravnavanega vodnega telesa [kg]
S	površina obravnavanega volumna ali površina pretočnega prereza [m²]
S_{krit}	pretočna površina pri kritičnem toku [m²]
Т	tlačne (normalne) sile [N]
V	obravnavani volumen [m³]
v	hitrost [m/s]
\vec{v}	vektor hitrosti [m/s]
V_m , V_d	hitrosti toka, ki ustrezata konjugiranima globinama pri mirnem oz. deročem toku [m/s]
We	Webrovo število
σ_{ii}	tenzor napetosti [N/m ²]
d_{kar}	karakteristična dolžina
n	lomni količnik medija
n_g	Manningov koeficient hrapavosti
n_q	razmerje pretokov [-]
0	omočeni obod [m]
p_i	sila hidrostatičnega tlaka [Pa]
p^*	parameter neenakomernega odboja od bočne stene
Q	pretok $[m^3/s]$

и	merilna negotovost (standard ISO1438:2008) [-]
Δx_h	horizontalna razdalja med navidezno izmerjeno točko in gladino [m]
Δy_v	vertikalna razdalja med navidezno izmerjeno točko in gladino [m]
Ζ	brezdimenzijska višina [-]
γ	utežni faktor pri enačbah Taylorja
δ	kot strižne plasti na sotočju oz. kot mešanja [°]
Δ	funkcija kota (enačbe Schwalt-Hager)
Θ	kot sotočja [°]
κ	koeficient površinske napetosti [N/m]
λ	modelno merilo dolžin
μ	dinamični koeficient viskoznosti [<u>kg</u> /(<u>ms</u>)]
θ	kinematični koeficient viskoznosti <u>[kg/(ms)</u>]
ρ	gostota medija [kg/m³]
σ	specifična teža [N/m³]

UPORABLJENI INDEKSI

a	začetek vala
B, C, D	območja stoječega valovanja na sotočju
Ε	(dolvodni) konec
d	deroči tok
g	glavni kanal
h	horizontalna komponenta
kar	karakterističen
krit	kritičen
т	mirni tok
meh	mehurček
M	maksimalna vrednost
0	glavni kanal (Schwalt in Hager)
S	glavni kanal
t	tekočina
V	vertikalna komponenta
z	stranski kanal (Schwalt in Hager)
<i>x</i> , <i>y</i> , <i>z</i>	smeri kartezičnega koordinatnega sistema
1, 2, 3	glavno korito gorvodno od sotočja, stransko korito od gorvodno sotočja oz. korito dolvodno od sotočja

1 UVOD

Poznavanje razmer na sotočjih ima za uporabnike in načrtovalce posegov v prostor široko uporabnost, saj se sotočja pojavljajo tako na vodotokih (naravna in umetna rečna korita, hudourniki itd.) kot tudi na številnih objektih in vodni infrastrukturi (ribje steze, čistilne naprave, odvodnja površinskih voda z utrjenih površin itd.) (slika 1). Prav tako je izrednega pomena tudi poznavanje topografije vodne gladine na območju sotočja. Predvsem pri večjih hitrostih tokov lahko na sotočju nastaja stoječe valovanje, ki s svojo višino bistveno presega povprečne vrednosti nivojev gladin dotokov ali toka vode dolvodno od sotočja po umiritvi valovanja.



Slika 1: Sotočja se pojavljajo tako na naravnih in reguliranih vodotokih kot tudi na različni vodni infrastrukturi (sotočje hudournikov (levo), obcestne odvodnje (desno)). Figure 1: Confluences occur both in natural and regulated rivers as well as in a variety of hydraulic structures (torrent junction (left), road drainage (right)).

Poznavanje takšnih pojavov je pomembno pri določanju varnostnega nadvišanja, ki ga je treba upoštevati pri načrtovanju vzdolžnih objektov ob vodotoku (npr. obrežne utrditve) in prečnih objektov, kot so prepusti in mostovi, ki bi bili takšnemu valovanju lahko izpostavljeni. Pri določitvi velikosti varnostnega nadvišanja je treba poleg negotovosti vhodnih podatkov in računske metode ter energijskega nivoja vodnega toka upoštevati tudi valovanje, ki ga lahko povzročajo različni viri motenj vodnega toka. Izrazito motnjo tokovnih razmer predstavlja tudi stekanje dveh tokov, pri čemer se oblikuje območje mešanja in bolj ali manj kompleksna, nestacionarna topografija vodne gladine. V hidravličnih analizah se za načrtovanje objektov – predvsem takšnih, ki so neposredno ob strugi vodotoka, oziroma takšnih, ki potekajo prečno na strugo –, večinoma uporabljajo eno-, največ pa dvodimenzionalni hidravlični modeli. Takšen pristop – glede na to, da v strugi vodotokov prevladuje komponenta hitrosti vodnega toka v smeri rečne struge – sicer izpolnjuje večino zahtev današnje inženirske prakse, pomanjkljivost pa se pokaže v posebnih primerih hidrotehnike, med katere sodi tudi sotočje dveh ali več vodotokov.

Zahtevnost pri sotočjih dodatno poveča pojav deročega toka. Gre za izrazito tridimenzionalni vodni pojav, pri čemer se oblikuje časovno spremenljiva struktura vodnega toka v prečni in vzdolžni smeri, ki je z eno- oz. dvodimenzionalnim modelom, s predpostavljenim upoštevanjem povprečne hitrosti in nivoja vodne gladine preko celega prereza oz. globinsko povprečene vrednosti hitrosti vodnega toka, ni mogoče zadovoljivo opisati oziroma zajeti v analize. Natančnejši opis poteka gladin dobimo s tridimenzionalnimi numeričnimi modeli, ki pa se v širši inženirski praksi za izdelavo hidravličnih izračunov v fazi načrtovanja objektov še ne uporabljajo v večji meri, saj so prekompleksni za uporabo, le v redkih primerih pa so na voljo tudi podatki, ki bi omogočili tudi umerjanje oziroma preverjanje

izračunov. Le ob kakovostno izvedenih postopkih umerjanja in verifikacije pa 3D numerični modeli lahko dajejo zanesljive rezultate za projektiranje oziroma obratovanje hidrotehničnih objektov. V praksi (predvsem na hudourniških vodotokih) so objekti pogosto poddimenzionirani, spremljajoči procesi, ki poslabšujejo funkcionalnost vodnih zgradb, pa niso dovolj upoštevani. V takšnih primerih so zato pomembne meritve, v naravi ali v laboratoriju, saj z njimi pridobimo nove informacije in znanja o pojavih in procesih.

Tokovnih razmer pri stoječih valovih na sotočjih ni mogoče dovolj natančno opisati s preprostimi hidravličnimi zakonitostmi. Povezave med integralnimi parametri in srednjimi vrednostmi toka ter fluktuacijami parametrov, pridobljenih na podlagi eksperimentalnih meritev, zato prinašajo fenomenološke zveze, ki so pomembne informacije za inženirsko delo.

Podroben pregled objavljenih raziskav pokaže, da so tokovne razmere na sotočju pogosto raziskovane, tako eksperimentalno kot numerično, pri tem pa prevladujejo raziskave pri mirnem režimu vodnega toka oziroma pri deročem toku z nižjim Froudovim številom (Fr ≤ 2), ki zaradi dušenja toka kot posledice motnje na sotočju, prehaja večinoma v mirni režim že pred stičiščem obeh dotokov. Ker na podlagi dostopne literature lahko sklepamo, da tokovne razmere pri pravokotnem sotočju in deročem toku večjih vrednosti ($Fr \ge 2$) še niso bile obravnavane, je jedro te disertacije obsegalo eksperimentalno modeliranje asimetričnega sotočja (primarni in sekundarni/dotočni kanal) pri deročem toku (Froudova števila do 12), kjer sta tako sama struktura toka (turbulenca) kakor tudi potek gladine v prečni smeri izrazito kompleksnejša kot pri mirnem režimu vodnega toka. V dosedanjih raziskavah sotočij je bilo najslabše raziskano prav področje prečnega poteka gladin. Eden od razlogov za to je zagotovo tudi neprimernost klasičnih merilnih metod (piezometri, ultrazvočni merilniki višin gladin, ostno merilo itd.), ki merijo spremenljivke toka točkovno, le redko z veliko frekvenco odčitkov, posegajo v vodni tok oziroma odpovejo pri dvofaznem toku in ne omogočajo izvedbe dinamičnih meritev z veliko prostorsko ločljivostjo. Pri sotočjih vodotokov z deročim tokom prihaja tudi do časovno spremenljivega poteka vodne gladine, te dinamike pa s klasičnimi meritvami ni mogoče zadovoljivo zajeti. Raziskali smo uporabnost nekaterih novejših merilnih metod, uveljavljenih na drugih področjih oz. na drugih primerih vodnih zgradb, kot sta računalniško podprta vizualizacijska metoda in metoda z laserskim skeniranjem v vidnem in bližnjem infrardečem spektru svetlobe.



Slika 2: Tokovne razmere pod prelivnimi polji pri normalnem obratovanju turbin HE – zaprta prelivna polja (levo) in pri toku čez prelivno polje (desno).

Figure 2: Flow conditions on the downstream side of the spillways in normal operation of HPP turbines – spillways are closed (levo) and during high waters (right).

Manko merilnih metod za zajem prečnega poteka gladine se kaže tudi pri drugih inženirskih problemih, npr. pri meritvah spodnje vode pod prelivnimi polji (slika 2), poteku vodne gladine preko stopničastih prelivov ali preko vodnega skoka. S potrditvijo zanesljivosti preverjenih merilnih metod za zajem variabilnih topografskih struktur vodne gladine bi se odprla tudi nova področja uporabe v praksi.

1.1 Hipoteza in cilji disertacije

Temeljit pregled literature dobro pokaže usmerjenost večine preteklih raziskav na področju analize tokovnih razmer na sotočju na primere z mirnim režimom vodnega toka. Pojavnost takšnih sotočij je v praksi sicer večja, a se pri večji dinamiki deročega toka pojavijo večji problemi. Ob sicer razmeroma geometrijsko enostavni zasnovi izvedbe meritev v laboratoriju postane glavni razlog za skopo število izvedenih eksperimentov sotočja pri deročem režimu neprimernost običajno uporabljenih merilnih metod za zajem lastnosti toka na sotočju. Poglavitni cilj raziskave je bil zato razširitev znanja o uporabnosti novejših merilnih metod in potrditev prve hipoteze, ki se nanaša na merilne pristope, ki bi omogočali brezkontaktne meritve časovno in prostorsko spremenljivih topografskih struktur vodne gladine in s tem količinsko opredelitev njihovih značilnosti.

Hipoteza 1:

»Izbrana(-e) merilna(-e) metoda(-e), ki na območju obravnave ne posega(-jo) v tok, omogoča(-jo) natančnejšo določitev poteka gladin in njihove časovne ter prostorske dinamike na območju sotočja kanalov z deročim režimom toka. Zaradi kompleksnih topoloških struktur vodne gladine in njene časovne spremenljivosti na sotočju bodo opravljene meritve dopolnile védenje o parametrih toka, ki jih z običajnimi kontaktnimi merilnimi metodami ni mogoče zabeležiti.«

Uspešna izvedba meritev pojava stoječega valovanja na sotočju bi podala podlago za preverjanje druge hipoteze, v kateri predpostavljamo, da je mogoče topologije struktur vodne gladine zapisati z zvezo z integralnimi parametri, ki opisujejo lastnosti toka (razmerje v sistemu dotekajočih pretokov, Froudova števila, geometrijski parametri itd.).

Hipoteza 2:

»Iz novo zasnovanih, brezkontaktnih meritev poteka gladin pri različnih scenarijih tokovnih razmer na sotočju dveh deročih tokov (s stopnjo ali brez) bo mogoče določiti relacije med integralnimi parametri in parametri, ki opisujejo prečni in vzdolžni potek gladin ter njihove fluktuacije na območju sotočij.«

Cilji raziskovalnega dela, ki je temeljilo na eksperimentalnem modeliranju, z inovativno uporabo sodobnih merilnih metod, so bili tako naslednji:

- Izmeriti topografijo vodne gladine deročega toka pri različnih tokovnih razmerah na sotočjih z uporabo brezkontaktnih merilnih metod z veliko prostorsko in časovno ločljivostjo, ki je zaradi kompleksnih topoloških struktur vodne gladine na sotočju gladin s klasičnimi kontaktnimi merilnimi metodami sicer ni mogoče opisati.
- Opraviti karakterizacijo topologije vodne gladine na sotočjih pri deročem režimu vodnega toka z določitvijo povezav med integralnimi parametri toka in parametri, ki opisujejo prečni in vzdolžni potek gladin (višina in položaj stoječega vala, višina gladin zaradi prečnega vzklona na zunanjem robu primarnega rečnega korita itd.) ter njihove fluktuacije na območju sotočij.

 Oceniti, kako bi kvalitativne kot tudi kvantitativne povezave med posameznimi hidravličnimi in geometrijskimi parametri dveh stekajočih se vodotokov lahko prispevale pomembne informacije za inženirsko prakso na področju načrtovanja prečnih in vzdolžnih objektov na območju sotočja.

Pri opredelitvi hipotez še ni bila znana topologija gladine na sotočju. Zato smo razmišljali še o možnosti, pri kateri bi s stopnjo (pragom) na stranskem dotoku zagotovili večjo dinamiko na območju stekanja dveh tokov. Kmalu po izvedbi prvih meritev pa se je pokazalo, da se dovolj dinamično nihanje gladine na sotočju ustvarja že brez stopnje. Ker je bilo s tem mogoče preveriti zastavljene hipoteze, dodatnih meritev za primere s stopnjo ni bilo treba izvajati. Analize vpliva stopnje na tokovne razmere tako ostajajo izziv za naslednje raziskave.

1.2 Zgradba disertacije

Postavljeni hipotezi in zastavljeni cilji, podani v prejšnjem poglavju, narekujejo vsebinske sklope disertacije, ki so potrebni za poznavanje problematike, teoretičnih podlag, zasnovo in izdelavo eksperimenta, izvedbo meritev itd. S predstavitvijo problematike in namena preteklih raziskav, teoretičnih izhodišč in stanja znanosti na področju opravljenih raziskav, s prikazom dosedanjih rešitev obravnavane problematike in z opisom manjkajočih/šibkih področij raziskav podajamo motive za izbrano temo disertacije.

Z opisom eksperimentalnega dela s poudarkom na inovativnosti uporabljenih merilnih tehnik za določanje prečnega in vzdolžnega poteka gladin na sotočjih pri različnih geometrijskih in robnih pogojih, z verifikacijo primernosti uporabljene merilne metode in s prikazom novih znanj, tj. z ugotovljenimi povezavami med vhodnimi parametri in topografijo vodne gladine na območju sotočij pri deročem režimu toka, pa podajamo sintezo opravljenih raziskav in dobljenih ugotovitev, veljavnosti podanih hipotez ter tudi izvirni prispevek k znanosti. Ker vsako raziskovalno delo odpira tudi nova področja in vprašanja, podajamo tudi predloge za nadaljnje raziskave in izboljšave.

2 TEORETIČNA IZHODIŠČA

Uvodoma podajamo teoretična izhodišča, ki so bila pri nastajanju disertacije pomembna za razumevanje in analizo obravnavane problematike, zasnovo eksperimenta in izvedbo meritev ter tudi za podajanje in interpretacijo rezultatov. Kratkemu opisu terminov, vezanih na opis površine oziroma ploskev v prostoru, sledijo poglavja, ki podrobneje podajajo znanja hidravlike toka pri deročem režimu in pojavu dvofaznega toka, zakonitosti eksperimentalnega hidravličnega modeliranja, opis merilne opreme in fizikalno ozadje njenega delovanja ter opis preteklih raziskav.

2.1 Topografija in topologija površine

V eksperimentalnem delu disertacije smo pri različnih scenarijih posneli površino razgibane, dinamično spremenljive gladine oziroma krajše: topografijo vodne gladine vzdolž sotočja. Končni rezultat opravljenih meritev in obdelav je zapis topologije sotočja, ki ob dani topografiji doda še opis tokovnih razmer in pojavov v povezavi z lastnostmi dotokov oziroma vhodnimi parametri. V besedilu uporabljamo izraza topografija in topologija, torej termina, ki se v praksi pogosto zamenjujeta, zato je smiselno, da ju podrobneje opredelimo.

Pojem topografija izvira iz geografije oziroma geodezije in predstavlja natančen opis prostora, pri čemer gre lahko za opis naravne entitete (grebeni, doline itd.) kakor tudi za grajeno okolje (cestno telo, objekti itd.). Topologija je veja matematike, ki se ukvarja z zapisom značilnosti elementov prostora s podajanjem ali opredelitvijo povezljivosti, zaporednosti in logičnih sosedskih odnosov med grafičnimi elementi. S topologijo je prostorski objekt sicer definiran oziroma opisan brez podanih absolutnih vrednosti koordinat (Šumrada, 2005b).

Topografija podaja opis ali oris prostora, zato se izraz najpogosteje uporablja kot geografski pojem in se prednostno nanaša na fizično-geografske značilnosti, tj. značilnosti zemeljskega površja. Poznavanje topografskih značilnosti prostora (npr. značilnosti reliefa ali terena) pa je pomembna podatkovna podlaga za druga področja, ki temeljijo na prostorskih analizah (npr. hidrologija, okoljske znanosti) (slika 3). Izraz se torej večinoma uporablja za opis zemeljskega površja, a tudi v izrazoslovju drugih strok za natančen opis izbrane površine (npr. strojništvo, medicina).



Slika 3: Primera topografije terena, prikazane z digitalnim modelom terena (DMT) kot podlaga za hidrološke in hidravlične analize (Rak, 2006).

Figure 3: Examples of terrain topography using the digital terrain model (DTM) as the basis for hydrological and hydraulic analyses (Rak, 2006).

Pri topografiji je vsaka točka površja (terena) v prostoru natančno določena z absolutno lokacijo, njej pa so (lahko) podani tudi posamezni atributi. Nasprotno pa atributi pri topologiji niso podani, se pa lahko, pri ustrezno organiziranih podatkih geometrije, v večini primerov izpeljejo. Če na primer poznamo izohipse terena, lahko konstruiramo padnice, ki pokažejo smer površinskega odtoka vode. Topologija, kot veja geometrije, proučuje lego, sestavo in odnose med elementi prostora, pri čemer lahko uporabimo vektorsko (točka–linija–ploskev) ali rastrsko obliko zapisa. Ker gre pri topologiji za matematični zapis elementov prostora, njihove lastnosti niso podane s točno določenimi koordinatami. Topologija dovoljuje različne operacije, npr. transformacije, rotacije, posplošitve, pri čemer struktura sosedskih odnosov ne sme biti podrta. Z oglišči, segmenti, robovi, obodnimi poligoni, ploskvami, lupino in telesi lahko opišemo prostorsko topologijo geometrijsko opredeljivih teles (Šumrada, 2005a). Z zaporedjem oglišč in določitvijo normale na kateri koli delček ploskve je večino analitično določljivih ploskev mogoče tudi nedvoumno orientirati. Obstajajo pa tudi posebnosti – matematično opisljivi elementi, ki pa so enostranski, z neusmerjeno ploskvijo in nedoločljivo orientacijo (npr. Möbiusov svitek in Kleinova steklenica). Na sliki 4 je prikazana Kleinova steklenica, ki je brezroba, enostranska ploskev, ki pa s prebodom lastne površine krši nekatera matematična načela.





Figure 4: Two topological spatial structures, the first one with determinable orientation, the second one with a non-orientable surface (the Klein bottle).

Kot bomo videli v nadaljevanju, se na sotočju dveh tokov pojavijo tudi razmere z več prostimi gladinami vode nad istim območjem (kot je npr. sodček pri deskanju na valovih).

2.2 Hidravlika sotočij odprtih vodotokov

Najprej bomo prikazali za nadaljnjo obdelavo nujna znanja o toku s prosto gladino in kdaj se pojavi deroči tok. Nato bomo opisali tokovne razmere na sotočjih, ki so tridimenzionalne in v naravi običajno trifazne (voda, zrak, sedimenti) ter jih s sedanjim znanjem še vedno ni mogoče splošno zapisati v matematični obliki hidravličnih zakonitosti. To še posebej velja za hidravlične razmere na sotočju dveh dotokov pri deročem režimu toka. Za razumevanje procesov, ki pri tem nastajajo, je treba poznati teorijo hidravlike odprtih vodotokov, režime vodnega toka in prehode med njimi, ozračevanje vodnih teles, lastnosti in posebnosti dvofaznega toka itd. Opis znanj, ki so podlaga za opravljeno raziskavo, podajamo v nadaljevanju.

2.2.1 Opredelitve, lastnosti in opis toka s prosto gladino

O toku s prosto gladino govorimo, kadar na površino gibajočega vodnega telesa deluje atmosferski pritisk, vzrok gibanja pa so težnostne ali vztrajnostne sile. Lastnosti toka ni mogoče preprosto opisati, saj se spreminjajo tako po času kot kraju, pri tem pa so pretok, globina, naklon dna in proste gladine med seboj odvisni (Chow, 1958). Pri enakomernem padcu struge oziroma kanala (I = konst., torej tudi pri horizontalnem dnu, I = 0) lahko upoštevamo hidrostatično porazdelitev tlakov po vertikali. Enačbe, ki opisujejo osnovne zakone, kot so zakon o ohranitvi mase in energije, so izpeljane in natančno dokumentirane v večini knjig, ki podajajo teorijo hidravlike oz. mehanike tekočin, zato jih tu ne ponavljamo. Podajamo le zakon o ohranitvi gibalne količine, ki se navadno uporablja pri obravnavi hitrih hidravličnih sprememb (velike energijske izgube, vodni skok, valovi s strmim čelom itd.). Podajamo tudi nekatere druge lastnosti toka s prosto gladino in opredelitve, ki so pomembne pri obravnavi tokovnih razmer na sotočju.

<u>Zakon o ohranitvi gibalne količine</u>

Na sotočju se pri mirnem režimu pojavljajo izrazite 3D tokovne razmere, vendar so vertikalne komponente hitrosti za velikostni razred manjše in jih lahko zanemarimo, kar omogoča analizo z 2D-tokom. Pri deročem toku pa vertikalna komponenta hitrosti ni zanemarljiva. Zaradi velike kinetične energije toka so prisotne močne turbulence in vrtinčenja toka, kar povzroči energijske izgube znotraj vodnega telesa, ki so neprimerno večje od trenjskih na ostenju struge. Torej imajo tokovne razmere vse lastnosti toka, pri opisu katerega se navadno uporablja enačba gibalne količine. Za izpeljavo enačbe gibalne količine lahko uporabimo Newtonov zakon gibanja (povzeto po Chanson, 1999):

$$\sum \vec{F} = \frac{D}{Dt} (M * \vec{v}) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\iiint_{V} \rho \vec{v} dV \right) + \iint_{S} \rho \vec{v} \vec{v} d\vec{S}$$
(1)

kjer je:

$\sum F$	\rightarrow vsota vseh zunanjih sil na obravnavano vodno telo
М	→ masa obravnavanega vodnega telesa
v	\rightarrow hitrost
ρ	→ gostota medija (predpostavimo, da je nespremenljiva)
$\frac{D}{Dt}$	→ materialni odvod
V	\rightarrow obravnavani volumen
S	\rightarrow površina obravnavanega volumna

Na obravnavano vodno telo delujejo površinske (npr. tlak, strig) in volumske sile (npr. težnost). Za neskončno majhen delček vode tako lahko zapišemo:

$$\frac{D(\rho v_i)}{Dt} = \left(\frac{\partial(\rho v_i)}{\partial t} + \sum_j v_j \frac{\partial(\rho v_i)}{\partial x_j}\right) = \rho F_{V_i} + \sum_j \frac{\partial\sigma_{ij}}{\partial x_j}$$
(2)

kjer je:

- $v_i \rightarrow \text{hitrost v smeri } "i"$
- $F_V \rightarrow$ rezultanta volumskih sil
- $\sigma_{ii} \rightarrow$ tenzor napetosti
- $i, j \rightarrow$ smeri kartezičnega koordinatnega sistema

Če volumske sile izvirajo iz skalarnega potenciala *H*, lahko zapišemo $\vec{F}_V = -gradH$. Pri tem na obravnavani volumen delujejo še tlačne in viskozne sile. Tako dobimo:

$$\frac{D(\rho v)}{Dt} = \rho \vec{F}_V - gradT + \vec{F}_{viz}$$
(3)

kjer je:

 $T \rightarrow$ tlačne (normalne) sile

 $F_{viz} \rightarrow$ vsota viskoznih (tangencialnih) sil

Ob upoštevanju tridimenzijskega prostora, opisanega s kartezičnim koordinatnim sistemom, lahko zapišemo enačbe za posamezne smeri:

$$\left(\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial t} + \sum_j v_j \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x_j}\right) = \rho F_{V_x} - \frac{\partial T}{\partial x} + F_{viz_x}$$
(4)

$$\left(\frac{\partial(\rho v_{y})}{\partial t} + \sum_{j} v_{j} \frac{\partial(\rho v_{y})}{\partial y_{j}}\right) = \rho F_{V_{y}} - \frac{\partial T}{\partial y} + F_{viz_{y}}$$
(5)

$$\left(\frac{\partial(\rho v_z)}{\partial t} + \sum_j v_j \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial x_j}\right) = \rho F_{V_x} - \frac{\partial T}{\partial z} + F_{viz_z}$$
(6)

Leve strani enačb predstavljajo vsoto prevzete gibalne količine in specifično gibalno količino v posamezni smeri, desne strani pa vsoto sil, ki na obravnavani volumen delujejo. Pri sotočju dveh dotokov v mirnem režimu, kjer se pojavlja enofazni tok – gre torej za homogen ene snovi (vode) –, predpostavimo, da lahko gostoto vode upoštevamo kot konstantno in jo lahko tako izpostavimo pri zgornjih enačbah. V primeru tokov v deročem režimu na mestu sotočja ali ob vodnem skoku, če prihaja do zajezitev enega ali obeh dotokov, pa prihaja do močno turbulentnega toka in vstopanja zraka v vodno telo. Ker ob tem nastaja mešanica vode in zraka, tj. pojav dvofaznega toka, pa se gostota spreminja tako po času kot tudi krajevno, zato postanejo te enačbe, ki upoštevajo deleže faz, bolj kompleksne.

2.2.2 Režimi vodnega toka in prehodi med njimi

Posebnost toka s prosto gladino je, da se pri tem pojavljajo različni režimi (mirni, kritični in deroči), ki lahko na krajših ali daljših odsekih prehajajo iz enega v drugega. Pri tem velja, da se pri razpoložljivi energiji prereza (E = konst.) in pri danem pretoku Q lahko pojavlja kritična globina oziroma dve konjugirani globini vodnega toka, ki ju opišeta enačbi (Steinman, 2010):

$$h_m = \frac{\frac{v_d^2}{2g}}{2} + \sqrt{\frac{\left(\frac{v_d^2}{2g}\right)^2}{4} + \frac{v_d^2}{2g} * h_d}$$
(7)

globina za mirni tok:

globina za deroči tok:

$$h_{d} = \frac{\frac{v_{m}^{2}}{2g}}{2} + \sqrt{\frac{\left(\frac{v_{m}^{2}}{2g}\right)^{2}}{4} + \frac{v_{m}^{2}}{2g} * h_{m}}$$
(8)

in pogoj za nastop kritičnih količin v vodnem toku, iz katerega lahko izračunamo še kritično globino (Steinman, 2010):

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{S_{krit}^3}{B_{krit}} \tag{9}$$

kjer je:

 h_{krit} \rightarrow kritična globina kot f (oblike prereza) h_m in v_m \rightarrow globina oziroma hitrost pri mirnem režimu h_d in v_d \rightarrow globina oziroma hitrost pri deročem režimu B \rightarrow širina gladine pri kritičnem toku

Režim toka s prosto gladino opišemo z brezdimenzijskim Froudovim številom (Fr):

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gd_{kar}}} \propto \sqrt{\frac{vztrajnostne sile}{težnostne sile}}$$
(10)

kjer je:

v → hitrost toka
d_{kar} → karakteristična dolžina; pri širokih strugah privzamemo, da je ta enaka globini vode
h

Kritični tok se pojavlja, če pri danem pretoku razpoložljiva energija ravno še zadošča za njegovo prevajanje. V praksi le redko najdemo primer, ko je globina normalnega toka točno enaka kritični globini. Kritični tok pa se vedno pojavlja pri spremembah režima, pri prehodu med mirnim in deročim režimom, ki se pojavi pri določenih spremembah nivelete dna, na prelivnih poljih, prostih prelivih itd.

Glede na vrednost Fr tok delimo:

Fr < 1 → mirni režim vodnega toka Fr = 1 → kritični tok Fr > 1 → deroči režim vodnega toka

Prehode med posameznimi režimi opišemo z družinami gladinskih krivulj (Steinman, 2010), ki zajemajo razmere na prehodu, glede na lokalne spremembe (naklon, hrapavost itd.). Prehod med mirnim in deročim tokom za prakso ni posebej zanimiv in ga lahko opišemo z gladinskimi krivuljami glede na naklon dna (gladinske krivulje M2, S2, H2). Zaradi pozitivnih in negativnih posledic ter kompleksnih tokovnih razmer pa je predvsem prehod iz deročega v mirni režim, ki se zgodi v obliki posebnega pojava, t. i. vodnega skoka, predmet številnih hidravličnih raziskav (slika 6). Kot kasneje podajamo pri opisu raziskav drugih avtorjev, je pri bazičnih eksperimentalnih raziskavah sotočij, zaradi zahtevne izvedbe detajlov na mestu sotočja, najpogosteje uporabljeno vodoravno dno kanalov oziroma dno sotočja. Pri tem je za zagotavljanje želenih tokovnih razmer (hitrost, globina, dotoki) vtok urejen z iztokom izpod zapornice ali kot iztok iz tlačne posode. Vzdolž toka prihaja večinoma le do prehoda iz deročega v mirni režim, izjemoma tudi iz mirnega v kritični tok.

Za horizontalno dno lahko razmere opišemo z gladinskimi krivuljami iz skupine H (slika 5).



Slika 5: Gladinske krivulje pri horizontalnem dnu. Figure 5: Backwater curves for horizontal slope channels.

Za lažje razumevanje spreminjanja gladin vzdolž toka najprej zapišimo Froudovo število v naslednji obliki:

$$Fr^2 = \frac{Q^2 B}{gS^3} \tag{11}$$

kjer je:

B → širino kanala na gladini
S → površina pretočnega prereza

in padec oziroma naklon energijske črte:

$$I_E = \frac{n_g^2 Q^2 O^{4/3}}{S^{10/3}} \tag{12}$$

kjer je:

 $n_s \rightarrow$ Manningov koeficient hrapavosti $O \rightarrow$ omočeni obod

Z združitvijo enačb 11 in 12 dobimo enačbo spremembe globine vzdolž toka (Steinman, 2010):

$$\frac{dh}{dx} = \frac{I_0 - \frac{n_g^2 Q^2 O^{4/3}}{S^{10/3}}}{1 - \frac{Q^2 b}{g S^3}}$$
(13)

kjer je:

 $I_0 \rightarrow$ vzdolžni padec ali naklon dna kanala (pri horizontalnem dnu kanala je $I_0 = 0$)

Iz enačbe vidimo, da deroči tok porablja del energije zaradi trenja z ostenjem in napetosti na stiku vodne gladine in ozračja, zato postaja počasnejši. Zaradi zmanjšane hitrosti toka lahko ob upoštevanju kontinuitete in energijske krivulje ugotovimo, da se globina povečuje, gladina pa polagoma približuje kritični globini. S povečevanjem globine toka, ki poteka po gladinski krivulji H3, se povečuje tudi pretočni prerez, hitrost in Froudovo število pa se zmanjšujeta. Pri pripravi eksperimenta je torej zelo pomembna uporaba materialov, ki zmanjšujejo vpliv ostenja (steklo) kanala, in natančna izdelava, ki na lokalnih motnjah (stikih) ne dovoljuje odlepljanja dotekajočega curka od ostenja. Pri ugodnih razmerah je naklon krivulje v osrednjem delu zelo položen. Hkrati pa mora biti na preizkuševališču odsek med vtokom in sotočjem dovolj kratek, da dvig gladine lahko zanemarimo. Sicer pa je mogoče globino vode (višino gladine) v prerezu tik pred vodnim skokom tudi dovolj natančno izmeriti.
Poseben prehod tokovnih razmer se pojavlja pri sotočjih pri mirnem režimu vodnega toka, in sicer po krivulji H2. Na območju sotočja tokovnice tudi pri mirnem režimu vodnega toka ne morejo slediti ostenju, zaradi česar se pojavi zožitev pretočnega prereza in s tem podoben pojav kot pri toku preko širokega praga. Zmanjšani pretočni prerez pri istem skupnem pretoku zahteva večje hitrosti toka. Pri tem se gladina zniža po krivulji H2, tok pa pri tem lahko preide v kritični režim. Podrobneje je tematiko v svoji raziskavi obdelal Hager (1989b).

Tokovne razmere na območju vodnega skoka so izrazito tridimenzionalne, zato so bile v preteklih raziskavah obravnavane le povezave med gorvodnimi in dolvodnimi lastnostmi toka ter energijskimi izgubami vzdolž vodnega skoka. Za vodni skok sicer vedno velja, da je globina dolvodno večja od konjugirane globine dotoka, tj. gorvodno od vodnega skoka (slika 6). Na podlagi zakona o ohranitvi mase in gibalne količine dobimo povezavo med konjugiranima globinama vode gorvodno in dolvodno (Chanson, 1999):

$$\frac{h_m}{h_d} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + 8Fr_d^2} - 1 \right)$$
(14)

kjer je:

 h_d

→ globina deročega toka

 $h_m \rightarrow$ konjugirana globina mirnega toka



Slika 6: Vodni skok – prehod med deročim in mirnim režimom vodnega toka. Figure 6: Hydraulic jump – transition between the supercritical and subcritical flow.

Fr_d je Froudovo število toka gorvodno od vodnega skoka. Prav tako je mogoče ob znani vrednosti Froudovega števila toka gorvodno od vodnega skoka izračunati Froudovo število toka dolvodno od vodnega skoka (Fr_m) (Chanson, 1999):

$$Fr_m = \frac{2^{\frac{3}{2}} * Fr_d}{\left(\sqrt{1 + 8Fr_d^2} - 1\right)^{\frac{3}{2}}}$$
(15)

Ob tem ob upoštevanju energijske enačbe dobimo brezdimenzijsko obliko enačbe za izračun disipacije energije vzdolž vodnega skoka (Chanson, 1999):

$$\frac{\Delta E}{h_d} = \frac{\left(\sqrt{1 + 8Fr_d^2} - 3\right)^3}{16 * \left(\sqrt{1 + 8Fr_d^2} - 1\right)}$$
(16)

Disipacija na odseku vodnega skoka je navadno velika, je pa odvisna od tokovnih razmer gorvodno. Z večanjem Froudovega števila na gorvodnem odseku se spreminja vrsta vodnega skoka in količina disipirane energije glede na energijo dotoka. Pri prehodu deročega toka s Fr > 4,5 v mirni režim prihaja do stabilnega vodnega skoka in disipacije energije do 75 % (Steinman, 2010), sicer pa je disipacija manjša:

Fr_{dotoka} = 1,0–1,7 ni vodnega skoka,
Fr_{dotoka} = 1,7–2,5 slaboten vodni skok (disipacija le do 15 %),
Fr_{dotoka} = 2,5–4,5 oscilirajoči vodni skok (disipacija od 20 % do 45 %),
Fr_{dotoka} = 4,5–9,0 stabilen, učinkovit vodni skok (disipacija od 45 % do 75 %).

V disertaciji stopnje disipacije nismo obravnavali, saj to ni v neposredni povezavi s hipotezama. Izmerjene tokovne razmere pa bi lahko v nadaljevanju služile tudi za analizo stopnje disipacije.

2.2.3 Opredelitve in opis parametrov, ki vplivajo na tokovne razmere na sotočjih

Ob združitvi dveh tokov na območju sotočja v skupni kanal nastajajo kompleksne tokovne razmere, ki so odvisne od geometrijskih in hidravličnih lastnosti sotočja. Geometrijske lastnosti sotočja so oblika in naklon gorvodnega in dolvodnega korita, kot med posameznimi kraki, prečnih presekov korit, morebitna stopnja na dnu sekundarnega korita na mestu sotočja itd. Med hidravlične lastnosti sotočja pa lahko uvrščamo režim toka v dotočnih odsekih, pretoke v glavnem in stranskem dotočnem kanalu itd. (Chow, 1959; Sharifipou et al., 2015). Zaradi širokega nabora tako geometrijskih kot hidravličnih parametrov, ki vplivajo na tokovne razmere, lahko pojav razumemo kot kompleksen, ki ga ni mogoče posploševati, večina raziskav pa še vedno temelji na fizičnih oziroma laboratorijskih modelih. Na spodnji sliki prikazujemo, v nadaljevanju pa opisujemo parametre, ki vplivajo na tokovne razmere, njihove oznake pa so uporabljene tudi kasneje, pri opisu pojavov na sotočju in pri opisu preteklih raziskav (poglavje 2.8).



Slika 7: Shema sotočja z osnovnimi veličinami, ki nastopajo v enačbah. Figure 7: A drawing of a junction with the fundamental variables appearing in the equations.

Lastnosti toka v vseh treh krakih narekujejo tokovne razmere na sotočju, pri čemer so lastnosti toka v posamezni veji odvisne od pretoka in geometrije kanala. Pretoka, širine kanalov in globine dotokov neposredno določajo hitrosti oziroma Froudova števila ter gibalne količine na gorvodnih vejah. Poleg dimenzij dovodnih kanalov, ki ob pretoku narekujejo lastnosti toka gorvodno od sotočja, je glavni geometrijski parameter, ki vpliva na procese in pojave na območju sotočja, kot, pod katerim se dotoka združita v odtočni kanal. Pri tem je lahko sotočje simetrično ali asimetrično. Pri simetričnem je kot med osjo dolvodnega kanala in posamezno vejo enak za oba gorvodna kanala, tj. v obliki črke Y. Pri asimetričnem pa se stranski kanal priklopi na glavni kanal pod poljubnim kotom, glavni kanal gorvodno in odvodni kanal pa imata isto smer, a ne nujno tudi isto širino.

Poleg lastnosti toka v dotočnih vejah in odtočnem kanalu na tokovne razmere na sotočju pomembno vplivajo tudi razmerja posameznih parametrov obeh gorvodnih vej. Razmerja hitrosti, širin kanalov in višine dotokov na območju dotoka prinašajo energijo in gibalno količino posameznega dotoka. Kot bomo prikazali v nadaljevanju, pa so, predvsem pri deročem režimu dotokov, procesi in pojavi na sotočju odvisni prav od razmerja gibalne količine.

Geometrijski parameter, ki je tudi povezan z gibalno količino oziroma vpliva na rezultanto sil impulzov na križanju dveh vodnih curkov, je tudi izvedba stika med glavnim in stranskim kanalom. Ta je lahko izveden s stopnjo (slika 8) ali brez nje, izvedba pa vpliva na obliko izlivanja stranskega kanala in s tem tako na obliko pojavov na gladini vzdolž sotočja kot tudi na 3D tokovno sliko. Tokovna slika je pomembna predvsem pri naravnih vodotokih, saj narekuje območja usedanja in odlaganja ter tudi odnašanja materiala, kar tudi vpliva na potek gladine. Večina raziskav je bila opravljena pri sotočju brez stopnje. Na sliki 8 so za primer stopnje na prehodu prikazani načini izlivanja s stranskega v glavni kanal. Pri sotočju s stopnjo so možni vsi štirje načini, pri sotočju brez stopnje pa le a) ali b).



A) ODRINJENI GLAVNI TOK

B) ZAJEZENI STRANSKI TOK

C) PROSTI PRELIV V GLAVNI TOK D) CUREK V STENO, NATO ODLIV V GLAVNI TOK

Slika 8: Tipi dotoka s stranskega kanala v glavni kanal (prirejeno po Hager, 2010; slika 16.12, str. 425). Figure 8: Types of inflow in the main channel (adapted from Hager, 2010; fig. 16.12, p. 425).

Pri varianti na sliki 8a je gibalna količina iz stranskega kanala sicer dovolj velika, da vpliva na prečne tokove v glavnem kanalu in dvig gladine ob steni nasproti dotoka, sicer pa razmere v glavnem kanalu vplivajo na tokovne razmere po stranskem kanalu gorvodno, iztok je namreč potopljen. Varianta 8b prikazuje primer, kjer stranski tok zdrsne, kot pri prelivu, pod tok v glavnem kanalu, do disipacije energije pa pri tem prihaja pri toku skozi vodno telo v glavnem kanalu, kjer prihaja do vrtinčenja in na steni nasproti stranskega kanala. Pri variantah 8c in 8d stranski tok ne vpliva na tokovne razmere neposredno prek sile curka, temveč le s povečanjem pretoka. Energija oziroma gibalna količina pri 8c se disipira v vodnem telesu glavnega kanala (glavni tok deluje kot vodna blazina). Pri 8d se energija disipira na steni nasproti dotoka, po kateri prihaja do odliva vode v tok po glavnem kanalu.

2.2.4 Procesi in pojavi v vodnem toku na sotočjih

Kompleksnost pojavov na sotočju narašča predvsem z naraščanjem energije, ki jo prinašata oba dotoka, in se izraža s hitrostjo oziroma Froudovim številom dotokov. Manjši energiji oziroma gibalni količini pri mirnem režimu vodnega toka povzročata le mešanje obeh dotokov in manjšo razgibanost vodne gladine, zato lahko razmere še vedno dovolj dobro opišemo v dvodimenzijskem prostoru. Potek gladine je pri tem večinoma brez izrazite vertikalne dinamike. Na sliki 9 ob točki A prihaja do začetka stika obeh dotokov, v dolvodni smeri pa se oblikuje motnja gladine, vzdolž katere se, zaradi različnih hitrosti obeh tokov, pojavlja strižna plast, posledično pa se, zaradi interakcije med obema tokoma, oblikuje tudi mešanje obeh tokov. V odvisnosti od razmerja gibalne količine stranskega in glavnega dotoka se združeni tok zaradi bočnega sunka dotočnega kanala v glavnem kanalu premakne proti steni nasproti stranskega dotoka, kjer gladina narašča (Weber et al., 2001). Pri tem tik dolvodno od sotočja, na strani stranskega dotoka, nastaja območje z zajeto vodo, kjer se oblikuje povratni tok in vrtinčenje. Zaradi gibalne količine stranskega toka prihaja do prečnega odklona glavnega toka stran od stene dolvodno od sotočja, kasneje pa se zaradi prečnega zanihanja vodne mase dolvodno pojavi prečno (dušeno) nihanje. Na območju odmika od stene se ustvari območje zmanjšanega tlaka, nižjih hitrosti, nastanka vrtincev in pogosto še povratnega toka. Dimenzije območja se spreminjajo v odvisnosti od gibalnih količin dotokov in hrapavosti ostenja (Best in Reid, 1984). Med območjem vrtinčenja in steno nasproti sotočja se oblikuje kontrakcija toka, ki pa mora po zakonu o ohranitvi mase še vedno prevajati skupni pretok, zato se, kljub povišani gladini vode, pojavljajo tudi povečane hitrosti. V posebnih primerih, ko se zaradi bočne zožitve pretočnega prereza delno zajezi tok gorvodno, se tudi na območju kontrakcije toka vzpostavi prehodni kritični tok (angl. transcritical flow) (Hager, 1989b).



Slika 9: Značilnosti tokovnih razmer preko sotočja. Figure 9: Characteristics of flow conditions across a confluence.

V primerjavi z mirnim režimom se pri deročem toku, poleg kompleksne turbulentne tokovne slike, oblikuje tudi stoječe valovanje, katerega oblika je odvisna predvsem od razmerja gibalne količine obeh dotokov in geometrije sotočja. Ob točki A enako prihaja do začetnega stika dotokov (če ni vpliva dolvodnih razmer, tj. zajezitve dotokov in pojava vodnega skoka), ki sta karakterizirana z globino in hitrostjo vode, pri tem pa se prične ustvarjati motnja v toku v obliki cone mešanja ali krovnega vala preko sotočja. Ta se širi v dolvodni smeri z začetnim kotom θ in se uklanja vse bolj v smeri toka dolvodnega kanala. Val se pomika proti steni nasproti sotočja in se od nje odbije. Posledica odboja sta bočni, stenski val ob steni nasproti stranskega dotoka in dolvodni bočni val, ki se ponovno kot odboj

ustvari na strani dotoka. Dolvodno sicer še vedno prihaja do brazdenja gladine vode med obema stenama (angl. shock waves), ti pojavi pa s stališča obravnave stoječega valovanja niso več zanimivi, saj so neprimerno manjši in njihove višine ne odstopajo bistveno od srednje višine toka dolvodno. Primer stoječega valovanja je prikazan tudi na sliki 10.



Slika 10: Stoječe valovanje in ozračen, dvofazni tok na sotočju pri deročem režimu dotokov (levo – pogled gorvodno, desno – pogled dolvodno).

Figure 10: Standing waves and the aerated, two-phase flow at the supercritical confluence flow (left – upstream view, right – downstrem view).

Krovni val, ki nastane na območju sotočja, je odvisen od lastnosti tokov na dotoku in morebitnega vpliva dolvodnega odseka. Pri majhnih Froudovih številih je greben položnejši, z ravnim vrhom, medtem ko je pri večjih Froudovih številih vrh bolj usločen in strm. Pri večjih hitrostih oziroma prevračanju slojev vode v vodno telo vstopa zraka, kar je najbolj izrazito na točki loma vala (Schwalt in Hager, 1995). Tako kot višina vala tudi količina zraka, ki vstopa v vodno telo, narašča z večanjem Froudovega števila dotokov (Hager, 2010). Predvsem v odvisnosti od prečne komponente sile curka stranskega dotoka se lahko ob steni na nasprotni strani oblikuje kompakten ali stenski val (slika 11).



Slika 11: V odvisnosti od lastnosti stranskega dotoka se na steni nasproti stranskega kanala pojavi kompaktni (slika levo) ali stenski val (slika desno).

Figure 11: Depending on the properties of the lateral incoming flow on the wall opposite the side channel, a compact (figure left) or wall-type wave is formed (figure right).

Pri pojavu stenskega vala na steni nasproti stranskega kanala je lahko njegova krona celo višja od krovnega vala preko sotočja, saj se kinetična energija toka ob steni delno pretvarja v potencialno. Vodna masa se ob tem dviga po stenah kanala, vpliv valovanja seže dlje dolvodno, pri tem pa lahko zaradi turbulentnega toka zrak še dodatno vstopa v vodno telo. Kompaktni val je težji od razpenjenega toka, zato ne dosega večjih višin, njegov dolvodni vpliv je krajši; ker ni vstopanja zraka, lahko ob steni predpostavimo hidrostatično porazdelitev tlakov. Zaradi dušenja nihanja vodne mase in disipacije energije se višina valov ob stenah, kot posledica odboja med stenami v dolvodni smeri, hitro znižuje, pojavljajo pa se le še valovi kompaktnega enofaznega tipa. Dolvodno od sotočja tudi prečna komponenta hitrosti hitro upade, posledično pa se vse bolj manjša tudi količina vodne mase, ki pri tem potuje prečno od stene do stene (Schwalt in Hager, 1995). Glede na vhodne parametre in razmere v odvodnem kanalu lahko pojave na območju sotočja dveh dotokov v deročem režimu v grobem razdelimo v pet skupin (nekateri primeri so prikazani na sliki 12):

- a) Pojav vodnega skoka ali popolne zajezitve v enem kanalu ali obeh kanalih pred sotočjem, pri čemer se na območju sotočja oziroma kontrakcije toka ohranja mirni režim ali pa se pojavi prehodni kritični tok (slika 12, levo);
- b) Prehod v mirni režim z vodnim skokom na odseku tik pred sotočjem, na katerem prihaja do močno turbulentnega toka na območju sotočja;
- c) Pri bistveno večji gibalni količini v glavnem kanalu se na območju sotočja pojavi le dušenje toka v glavnem kanalu, a se ohranja deroči tok, na stranskem kanalu pa prihaja do zajezitve toka (vodni skok je pri tem lahko bližje ali dlje od sotočja) (slika 12, sredina);
- d) Pri sotočjih pod manjšim kotom je možno tudi obratno, torej da je zajezen glavni kanal, deroči tok iz stranskega kanala pa se preko sotočja ohranja in nadaljuje dolvodno, kjer se pojavlja njegovo dušenje (pri 90° sotočju takšen tok ni mogoč in se deroči tok lahko ohranja le v glavnem kanalu);
- e) Deroči tok obeh dotokov se združeno nadaljuje preko sotočja in tudi dolvodno od sotočja kot deroči tok, pri čemer se na območju sotočja oblikuje močno razpenjen tok in stoječe valovanje v obliki grbastega vala ali sodčka, ki po višini močno presega globini toka na dotokih in tudi v odvodnem kanalu (slika 12, desno).

Na spodnjih slikah prikazujemo nekaj zanimivejših primerov tokovnih razmer na sotočju (z večjo prostorsko in časovno dinamiko).



Slika 12: Različni pojavi vodnega toka na sotočju: vodni skok na obeh vejah tik pred sotočjem (a) – levo), vodni skok na stranskem kanalu ((c) – sredina) in pojav sodčka na sotočju ((e), brez vodnega skoka na obeh dotekajočih vejah – desno).

Figure 12: Different water flow phenomena at the confluence: hydraulic jump on both branches just before the confluence ((a) - left), hydraulic jump at the side channel ((c) - middle) and barrel roll ((e), without the hydraulic jump at both incoming branches – right).

Za našo raziskavo primera a) in c) nista zanimiva, saj je vodni skok v posamičnem kanalu že precej raziskan. Zato smo večino naših raziskav usmerili v primer d), kjer ni pojava vodnega skoka v dotočnih vejah.

2.2.5 Dvofazni tokovi

O dvo- ali večfaznem toku govorimo, kadar gre znotraj obravnavanega volumna za istočasno gibanje dveh ali več medijev, bodisi z različnimi fizikalnimi lastnostmi (npr. voda in nafta), različnimi agregatnimi stanji (plini, kapljevine, trdi delci) ali enak medij z različnimi kemijskimi lastnostmi. Tako lastnosti toka posameznega medija kot tudi fizikalne lastnosti medija samega vplivajo na lastnosti gibanja drugega medija. Pri eksperimentalnem delu je bila kot medij uporabljena čista voda, zato bomo v nadaljevanju opisali le dvofazni tok kombinacije vode in zraka, ki pri obravnavanih pojavih vstopa na sotočju v vodno telo.

Vzrok za pojav dvofaznega toka vode in zraka je pri hidrodinamiki različen (vpihovanje zraka v vodno telo, kavitacija itd.). Pri hidravličnih pojavih, kjer se v vrhnji plasti pojavlja močno turbulenten in vrtinčen tok, pa prihaja do vstopanja zraka preko proste gladine in vzgonskih sil mehurčkov zraka, kar povzroča dodatne motnje v toku. V osnovi vrste dvofaznega toka razdelimo v osem skupin, ki so prikazane na spodnji sliki 13 (Steinman, 1983).



Slika 13: Različni tipi dvofaznega toka. Figure 13: Different types of two-phase flow.

Na sotočju pri deročem režimu vodnega toka, ne glede na vrsto pojava, ki so opisane zgoraj (vodni skok, krovni val itd.), prihaja do izrazitega vstopanja zraka v vodno telo zaradi večjih hitrosti na gladini in posledično do pojava dvofaznega toka, kar ustvarja še kompleksnejše hidravlične razmere. Ob upoštevanju vzorcev toka s slike 13 lahko ugotovimo, da se pri sotočju večinoma pojavlja predvsem kombinacija kapljevina–mehurčasti in mehurčasti tok, zaradi škropljenja pa tudi deljeni–kapljičasti tok v prostoru nad oblikovano (razpenjeno) gladino. Pri pojavu s krovnim valom na sotočju pa se odsekoma pojavljajo tudi prehodi med posameznimi oblikami dvofaznega toka.

Eno od serij meritve smo izvedli tudi v stoječi vodi z vpihovanjem zraka na dnu posode. Zato smo si ogledali tudi značilnosti razvoja in obnašanja zračnih mehurčkov v stoječem vodnem telesu, kar narekujejo fizikalne lastnosti tekočine in plina, kot so dinamična viskoznost, gostota in površinska napetost, pri vertikalnem gibanju pa tudi vzgon. Na dvigovanje mehurčkov poleg velikosti mehurčka, ki se ob dviganju povečuje, vpliva tudi njegova potovalna hitrost in z njo naraščajoči upor (Pfister in Chanson, 2014). Z razvojem enačb na podlagi brezdimenzijskega Reynoldsovega, Froudovega in Webrovega števila lahko dobro opišemo gibanje mehurčkov v stoječi vodi. V naši nalogi pa se z

dinamiko dvofaznih tokov nismo podrobneje ukvarjali, zato te lastnosti pri fenomenih dvofaznih tokovih večjih hitrosti niso analizirane in izpeljave niso podane.

Poleg zgoraj naštetih parametrov, ki vplivajo na gibanje mehurčkov v stoječem vodnem telesu, so vplivni parametri pri dvofaznem toku večjih hitrosti tudi dinamična viskoznost obeh medijev (vode in zraka), globina in hitrost toka, debelina mejne plasti in karakteristična hitrost turbulentnega toka. Posamezne parametre prikazujemo na primeru vodnega skoka (slika 14), kjer avtorji navajajo, da se pojav dvofaznega toka začne pojavljati pri Fr > 1,3 (Chanson, 1997; Murzyn et al., 2007).



Slika 14: Dvofazni tok na primeru vodnega skoka in mesto vstopanja zraka (Murzyn in Chanson, 2008). Figure 14: Two-phase flow in the hydraulic jump and the location of air entrainment (Murzyn and Chanson, 2008).

Vodni skok je že bil predmet številnih raziskav v laboratorijih, pri čemer so bile opravljene tudi raziskave merjenja in določanja količine zračnega deleža v vodnem telesu glede na vhodne parametre. Raziskave so pokazale velik vpliv velikosti preizkuševališča, ki je običajno izdelano v izbranem modelnem merilu. Meritve so pokazale velik vpliv modelnega merila na oblikovanje in strukture dvofaznega toka, zato je prenos rezultatov z modela pogosto vprašljiv. Na tokovne razmere preko vodnega skoka ne vpliva širina kanala, saj so tokovne lastnosti vodnega skoka pri enakih parametrih dotoka podobne ne glede na širino kanala (Murzyn in Chanson, 2008).

2.3 Hidravlično modeliranje sotočja

Pregled raziskav pokaže, da zaradi kompleksnosti strukture vodnega toka na sotočjih in pomanjkanja kakovostnih podatkov za umerjanje in verifikacijo numeričnih modelov današnje 3D numerično modeliranje še ne daje povsem zadovoljivih rezultatov. Kadar so cilj raziskav detajlne tokovne razmere, procesi erozije, transport in odlaganje sedimentov na območju sotočja, dvo- in večfazni tokovi ter drugi pojavi, ki so neposredno odvisni od tokovnega polja, se še vedno uporabljajo fizični modeli. Tudi pri fizičnih modelih pa se postavlja vprašanje ustreznosti prenosa rezultatov v naravo. V disertaciji smo uporabili eksperimentalni pristop k preverjanju veljavnosti hipotez. Zato preizkuševališče ni »pomanjšan model« kakšnega primera iz prakse. Torej tudi problema prenosa rezultatov v naravo ni bilo treba obravnavati.

2.3.1 Postopki in procesi eksperimentalne hidravlike

Procese na preizkuševališču in eksperimentalne metode ter merilno opremo podrobno opisujejo avtorji modelnih raziskav. Na kratko bomo povzeli teorijo hidravličnega modeliranja, saj ti opisi veljajo tudi za naše preizkuševališče. Pomembna pa je razlika – naše analize so usmerjene v preverjanje hipotez, in ne v raziskave izbranega (modela) objekta iz prakse.

Za popolno posnemanje tokovnih razmer, stanja toka in drugih procesov pri obravnavanem pojavu v naravi je na modelu treba doseči geometrijsko, kinematično in dinamično podobnost, kar pa je v praksi, razen pri izvedbi prototipnega modela, neizvedljivo. Za modeliranje se izbere najbolj relevantno razmerje sil, učinki merila zaradi ostalih razmerji sil pa morajo biti minimalni ali zanemarljivi (Kobus, 1980; Novak et al., 2010). Glavne značilnosti modelne podobnosti so naslednje:

- <u>Geometrijska podobnost modela</u>: Vse dolžinske mere so za izbrani faktor λ (navadno) manjše kot na prototipu. Glede na faktor λ modelne dolžine so površine in volumni pomanjšani za faktor λ² oz. λ³, koti pri tem ostajajo enaki kot v naravi oziroma prototipu. Mogoče je sicer uporabiti tudi distorzirani model (različna faktorja λ za posamezne dimenzije dolžin/višin), vendar se s tem zmanjša možno področje raziskave.
- <u>Kinematična podobnost modela</u>: Dosežena je ob pravilnem posnemanju gibanja tekočine, doseganju konstantnega razmerja časa, hitrosti, pospeškov in pretokov, pri tem pa ni nujna tudi geometrijska podobnost. Če je dosežena tudi geometrijska podobnost modela, model pravilno opisuje tudi poti posameznih elementov medija (Rodič, 2016).
- <u>Dinamična podobnost modela</u>: Ob kinematični podobnosti je dosežena tudi dinamična, če je pri tem zagotovljeno tudi konstantno razmerje vplivnih sil. Kinematična podobnost pri tem ni nujno potrebna. Dinamična podobnost ni mogoča, če je modelna tekočina enaka kot na prototipu in je λ ≠ 1.

Pri izvedbi modelnih raziskav sicer lahko dosežemo zelo dobro aproksimacijo pojava. Kljub dejstvu, da se neželenim vplivom modelnega merila ni mogoče izogniti, pa je ob izbiri primernega modelnega merila njegove vplive mogoče minimalizirati, včasih tudi zanemariti (Heller, 2011). Ob dobrem poznavanju obravnavanega pojava, glavnih vplivnih sil in modelne podobnosti, ki jo skušamo doseči, je mogoče izbrati najprimernejši zakon modelne podobnosti. Področje uporabnosti posameznega modelnega zakona narekujejo predvsem prevladujoče gonilne sile, ki jim je vodno telo izpostavljeno. Podrobnosti modelnih zakonov in brezdimenzijskih števil, ki opisujejo povezave vplivnih sil, so podane v knjigah o hidravličnem modeliranju (npr. Kobus, 1980), tu pa povzemamo le nekatere, ki se navadno uporabljajo pri eksperimentalnih raziskavah odprtih vodotokov.

Froudov zakon modelne podobnosti

Froudovo število (Fr), ki opisuje razmerje vztrajnostnih in težnostnih sil, se navadno uporablja pri modeliranju toka s prosto gladino, ki ga povzroča komponenta sile teže v smeri padca struge. Vpliv viskoznih, kapilarnih in površinskih napetosti je običajno (če modeli niso miniature) mogoče zanemariti, ob upoštevanju geometrijske podobnosti in podobnosti robnih pogojev je v takšnih primerih mogoče doseči tudi podobnost trenjskih sil (Novak et al., 2010).

Froudovo število
$$\rightarrow Fr = \sqrt{\frac{\rho v^2 l^2}{\rho g l^3}} = \frac{v}{\sqrt{gl}} = \frac{vztrajnostne sile}{težnostne sile}$$
 (17)

Pri tem \sqrt{gh} predstavlja hitrost potovanja gravitacijskega vala, *l* karakteristično dolžino toka in *v* hitrost toka vode. Ob večanju Froudovega števila se zmanjšuje vpliv težnostnih sil in veča vpliv kinetike toka, in obratno, ob majhnem Fr je vpliv težnostnih sil prevladujoč. Upoštevanje Froudovega modelnega zakona predstavlja najmanj zahtevno modeliranje, saj se ob uporabi vode kot medija na modelu pojavljajo manjše hitrosti in tlaki kot v naravi ali na prototipu (Novak et al., 2010). Ker Froudovo število podaja informacijo o hitrosti gibanja motnje v toku, se uporablja tudi kot merilo za režim vodnega toka.

Reynoldsov zakon modelne podobnosti

Reynoldsovo število (*Re*) podaja razmerje med vztrajnostnimi in viskoznimi silami, torej je enakost *Re* na modelu in v naravi pomembna v primerih, kjer na tokovne razmere prevladujoče vpliva viskoznost. Reynoldsov zakon modelne podobnosti se upošteva pri modeliranju primerov laminarnega toka, gibanju telesa na globini, pri kateri ni pojava površinskih valov, itd. Pri upoštevanju Reynoldsovega zakona modelne podobnosti je treba zagotoviti tudi geometrijsko podobnost in enakost *Re* števila.

$$Reynoldsovo\ število\ \rightarrow\ Re = \frac{\rho v^2 l^2}{\mu v l} = \frac{\rho v l}{\mu} = \frac{v l}{\vartheta} = \frac{v z trajnostne\ sile}{sile\ viskoznosti}$$
(18)

kjer μ predstavlja dinamični koeficient viskoznosti ($\mu = \vartheta/\rho$) in ϑ kinematični koeficient viskoznosti, ρ pa gostoto medija. Pri upoštevanju Reynoldsovega zakona modelne podobnosti in uporabi enakega medija na modelu kot v naravi ali na prototipu največ težav povzroča zagotavljanje ustrezne hitrosti toka. Če je na modelu in v naravi uporabljen isti medij, velja, da je razmerje gostote in viskoznosti medija model–narava enako 1. Iz tega sledi, da je pri pomanjšanem modelu treba zagotavljati hitrosti, ki so za faktor modelnega merila večje od hitrosti v naravi.

Lastnosti, ki jih opisuje Reynoldsovo število, je treba analizirati tudi pri pojavu dvofaznega toka. Na vzdolžnem prikazu vodnega skoka (slika 14) je mogoče videti strižno plast, ki se oblikuje dolvodno od točke vstopanja zraka med zgornjo plastjo z izrazito dvofaznim, razpenjenim tokom in spodnjo plastjo, ki jo predstavlja še homogeni vodni curek. V strižni plasti in zgornjem razpenjenem toku z naraščanjem vsebnosti zraka vztrajnostne sile izgubljajo vpliv, vse bolj pa prevladuje vpliv viskoznih sil in delno površinskih napetosti.

Webrov zakon modelne podobnosti

Enakost Webrovega števila je treba zagotoviti pri modelnih raziskavah, kjer želimo simulirati pojav s prevladujočimi površinskimi napetostmi. V naravnem okolju je Webrovo število veliko in vpliv površinske napetosti zanemarljivo majhen, kar pa ni nujno tudi na modelu, predvsem če gre za manjše laboratorijske modele s plitvo vodo (Kabus, 1980).

Webrovo število
$$\rightarrow We = \frac{\rho v^2 l^2}{\kappa l} = \frac{v^2 \rho l}{\kappa} = \frac{vz trajnostne sile}{sila površinske napetosti}$$
 (19)

kjer je κ koeficient površinske napetosti.

Ob upoštevanju vseh treh, zgoraj opisanih brezdimenzijskih števil (*Fr, Re, We*) in na podlagi številnih poskusov o gibanju zračnega mehurčka pri različnih pogojih in različnih tekočinah sta Habermann in Morton (1954) izpeljala enačbo povezave hitrosti gibanja in dimenzije mehurčkov. Pri mešanici zraka

in vode lahko težo oziroma gostoto zraka (plina) v mehurčku zanemarimo, torej za posamezni mehurček velja:

$$Fr_m = \frac{v_m}{\sqrt{gl_{meh}}} \quad (20) \qquad \qquad Re_m = \frac{v_{meh} l_{meh}}{\vartheta_t} \quad (21) \qquad \qquad We_m = \frac{\rho_t \ v_{meh}^2 l_{meh}}{\kappa_t} \quad (22)$$

kjer vrednosti z indeksom *t* veljajo za tekočino, z *meh* za mehurček (plin), ϑ_t je kinematični koeficient viskoznosti tekočine in κ_t koeficient površinske napetosti tekočine.

$$\check{\text{Ce zapišemo}} \quad \frac{We_{meh}}{Fr_{meh}^2} = \frac{l^2 \rho_t g}{\kappa_t} \quad (23) \qquad \text{in} \quad \frac{\sqrt[3]{Fr_{meh}^2 Re_{meh}^4}}{We_{meh}} = \frac{\kappa_t}{\rho_t \sqrt[3]{g \vartheta^4}}, \tag{24}$$

lahko odvisnost hitrosti potovanja in velikosti mehurčkov zapišemo v obliki:

$$\frac{v_{meh} \, l_{meh}}{\vartheta_t} = f\left[\frac{\rho_t l_{meh} g}{\kappa_t}, \frac{\kappa_t}{\rho_t \sqrt[3]{g \, \vartheta^4}}\right]$$
(25)

V takšni analizi lahko uporabimo nov brezdimenzijski parameter Mortonovo število, ki je opredeljeno z zgornjimi brezdimenzijskimi števili (*Fr, Re, We*) v obliki:

$$M = \frac{We^3}{Fr^2 Re^4} = \frac{g\vartheta^4}{\rho \kappa_t^3}$$
(26)

Pri dvigovanju se mehurčki (npr. zaradi vzgona) lahko deformirajo. Pri kakšnem volumnu mehurčka pride do deformacije, je odvisno od lastnosti tekočine in Mortonovega števila. Visoke vrednosti Mortonovega števila ($M = 10^{-2}$) odraža velik upornostni koeficient in obratno, majhne vrednosti ($M = 10^{-11}$) odražajo manjše vrednosti upornostnega koeficienta. Končna hitrost mehurčka je določena tudi z uporom v mediju in gibanja plina znotraj mehurčka. V praksi se izkaže, da je hitrost dvigovanja mehurčkov v velikostnem razredu premera od 1 do 20 mm konstantna, poveča pa se pri premeru mehurčkov nad 20 mm (Pfister in Chanson, 2014).

Pri turbulentnem toku, kjer prihaja do samoozračevanja in s tem do mešanice vode in zračnih mehurčkov, površinska napetost vpliva na manj učinkovito odzračevanje vodnih mehurčkov iz vodnega telesa. Kot rezultat dobimo v območju pod kritično vrednostjo Webrovega števila (We < 100) na modelu izmerjene nižje gladine, kot bi se pojavile v naravi pri podobnih pogojih (Peakall in Warburton, 1996). Vrednost Webrovega števila v naravi je navadno zelo velika, kar kaže na majhen vpliv površinskih napetosti, če je le globina vode na obravnavanem območju dovolj velika. Poleg težave pri simuliranju dvofaznega toka se težave s površinsko napetostjo pojavljajo predvsem pri raziskavah obsežnejših poplavnih območij, kjer na robovih poplavljanja ob majhnih hitrostih pogosto dobimo tudi majhne globine toka. Vplivu površinskih napetosti se na fizičnih modelih lahko delno izognemo z distorziranim modelom (večje globine in hitrosti vode ter padci modela), pri čemer je treba upoštevati, da takšen model žal ne kaže več podobnosti tokovnih razmer (npr. tokovne razmere pri objektih). Z uporabo distorziranega modela se je mogoče tudi izogniti potrebi po tehnološko nemogoči izvedbi zelo gladkega ostenja modela in doseganju tokovnih razmer v hidravlično hrapavem režimu (Kobus, 1980).

Nekatere raziskave so s pomočjo brezdimenzijskih števil Fr, Re in We in iz njih izpeljanega Mortonovega števila podale mejne vrednosti Re in We, ki jih je treba zagotoviti pri hidravličnih eksperimentih, da je še mogoče zanemariti vpliv modelnega merila ob nepravilno upoštevanih vplivih površinske napetosti in viskoznosti. Pri tokovih v kanalu s $5 \le Fr \le 15$ naj bi bile, ob istem mediju na modelu in prototipu, vrednosti Re od $2*10^5$ do $3*10^5$ in We^{0,5} od 110 do 170 (Chanson in Chachereau, 2013; Pfister in Chanson, 2014). Te vrednosti smo upoštevali pri zasnovi našega preizkuševališča.

Naj spomnimo – v našem primeru gre za bazično raziskavo, preizkuševališče ni (pomanjšan) model nekega prototipa. Zakoni modelne podobnosti so prikazani le zato, ker dobro prikažejo vplivne parametre pri obravnavi gonilnih sil.

2.3.2 Preizkuševališče, gonilne sile in dvofazni tokovi na T-sotočju

Pri eksperimentalnih raziskavah sotočij pri deročem režimu vodnega toka je navadno cilj določanje tokovnih razmer v odvisnosti od vhodnih parametrov, pri čemer skušamo zanemariti trenjske sile z izvedbo modelov iz hidravlično gladkih materialov (navadno in akrilno steklo) in natančno izvedbo stikov. Z uporabo gladkih materialov skušamo v največji možni meri zagotoviti hidravlično gladek režim toka in s tem zmanjšati vpliv ostenja na tokovne razmere, predvsem na dotočnem delu med vtokom na model in samim sotočjem oziroma mestom pojava motnje (npr. vodni skok že na dotočnem delu). Tokovne razmere so navadno določene z geometrijo vtoka in kanala ter pretokom, pri tem pa mora biti razdalja odseka pred merilnim območjem takšna, da se lahko razvije stalni enakomerni tok. Pri sotočjih manjših kotov se, zaradi dotoka iz stranskega kanala, tok v glavnem kanalu uklanja proti steni nasproti dotoka, kljub temu pa prihaja do zajezitve enega ali drugega dotoka kasneje kot pri pravokotnem sotočju. Pri slednjem se tokovnice glavnega toka, zaradi prečne usmeritve toka iz stranskega kanala, bistveno bolj uklanjajo proti steni, s čimer se močno zmanjša pretočni prerez, hkrati pa se na območju turbulentnega mešanja pojavlja velika disipacija energije. V obeh primerih je posledica pojav vodnega skoka ali celo zajezitve v enem od obeh ali celo v obeh dotočnih kanalih, in to pogosteje kot pri sotočjih manjših kotov. Po navedbah nekaterih avtorjev naj bi se pri pravokotnem sotočju vodni skok v obeh vejah pojavil celo vedno, vendar pa je bilo v naši raziskavi pokazano, da temu ni tako. Deroči tok stranskega dotoka se sicer preko sotočja ne ohranja, če je glavni dotok zajezen, lahko pa se ohranja v posebnih primerih, kjer se oba dotoka ohranjata v deročem režimu, na območju sotočja pa se oblikuje grbasti val (slika 12, desno). Zaradi stika tokov pod pravim kotom je dinamika in disipacija energije na območju sotočja večja kot pri manjših kotih sotočij, posledično pa se dolvodno pojavlja sekundarno valovanje in brazdenje gladine v manjši meri in tudi na krajši razdalji. Glede na sliko 9 so na spodnji sliki (slika 15) prikazane tokovne razmere za pravokotno sotočje.



Slika 15: Tokovne razmere pri pravokotnem sotočju kanalov. Figure 15: Flow conditions at a right-angled channel confluence.

Na dotočnem delu prevladujejo vztrajnostne sile dotoka. Pri pojavu vodnega skoka v enem ali obeh dotočnih kanalih oziroma s pričetkom sotočja (ne glede na to, ali gre za dušeni tok ali pojav sodčka) se začne oblikovati dvofazni tok, ki je lahko v obliki kapljavinasto-mehurčastega dvofaznega toka. Pri tem se oblikuje plast toka pri dnu, ki začasno še ohranja prevladujočo vzdolžno komponento hitrosti, pri čemer prevladujejo vztrajnostne sile, in zgornja izrazito turbulentna plast, v katero ob veliki dinamiki gladine vstopa zrak. V zgornjem sloju vse bolj prevladuje vpliv viskoznih in površinskih sil na tokovne razmere. V vmesnem sloju se oblikuje strižna plast, kjer prihaja do razvoja in razpada mehurčkov, v dolvodni smeri debelina plasti po višini narašča, s tem pa tudi višina razpenjenega, dvofaznega toka.



POGLED V DOLVODNI BMERI POGLED V GORVODNI BMERI Slika 16: Pojav dvofaznega toka na T-sotočju pri deročem toku (zrak preko proste gladine vstopa v vodno telo).

Figure 16. Phenomenon of the two-phase flow at the supercritical confluence flow (air is entrained through free water surface).

Kot smo omenili, je poseben primer pojava na območju sotočja krovni val v obliki sodčka ali grbastega vala (tip e), glej opis pojavov na sotočju v poglavju 2.1.4), kar je razvidno iz slike 16. Pri tem se, glede na gibalno količino obeh dotokov in njunega medsebojnega kota, oblikuje stoječi val in pojav prehodnega dvofaznega toka (slika 13). Zaradi močnih impulzov dotokov tokovnice niso več le 2D, temveč se vzdolž linije stika obeh dotokov pri tem vzpostavijo turbulentne 3D-strukture vodnega toka.

Čeprav se na sotočju vodni skok pojavlja le pri določenih scenarijih, pa je pomembna raziskava tega hidravličnega pojava, ki sta jo pri enakih Froudovih in Reynoldsovih številih ter različnih modelnih merilih izvedla Murzyna in Chanson (2008). Ugotovitev, da modelno merilo pomembno vpliva na delež in oblikovanje zračnih mehurčkov ter njihovo uhajanje iz vodnega telesa, je namreč mogoče privzeti tudi pri modelnih raziskavah sotočij. Dinamično podobnost je tako na modelnih raziskavah mogoče dobiti le pri modelnem merilu 1 : 1. Eksperimentalne raziskave tako dajejo možnost natančnega poznavanja lastnosti vodnega toka na sotočju in s tem določanja dimenzij in potrebne pretočne sposobnosti kanalov glede na pričakovane vhodne parametre. Ker pa na širšem območju sotočja na lastnosti toka pomembno vplivajo tako vztrajnostne sile kot tudi viskozne sile in površinska napetost, veljavnosti rezultatov ob upoštevanju zakonov modelne podobnosti ni mogoče posploševati ali jih prenašati na primere drugih dimenzij in robnih pogojev. Vsaka modelna raziskava tako predstavlja prototipni pristop.

2.4 Merilne metode za določanje vodne gladine in topografije gladine na sotočju

Značilnosti odtočnih razmer pri kompleksih primerih (npr. vodni skok, tok preko hidravličnih objektov, razcepi in sotočja) so v laboratoriju pogosto predmet raziskav (Mignot et al., 2008; Meftah et al., 2010; Gupta et al., 2013; Nania et al., 2014; Pinto Coelho, 2015). Pri tem se izvajajo meritve glavnih hidravličnih veličin, kot so pretok, posamezne komponente hitrosti in globina vodnega toka. Za meritve hitrosti danes že prevladujejo brezkontaktne merilne metode, saj naprave ne posegajo v vodni tok in tako ne spreminjajo tokovnih razmer. Temeljijo predvsem na tehnikah obdelave slik, kot so določanje hitrostnega polja s sledenjem delcev (angl. PIV - particle image velocimetry) (npr. Amador et al., 2006), določanje hitrostnega polja s sledenjem mehurčkov (angl. BIV - bubble image velocimetry) (npr. Rivillas-Ospina et al., 2012), metode optičnega toka (angl. OF – optical flow) (npr. Bung in Velero, 2016), in računalniško podprta vizualizacijska metoda, ki temelji na advekcijsko-difuzijskih enačbah (angl. computer-aided visualization method based on the advection-diffusion equation) (Müller et al., 2015). Za merjenje gladin pa se še vedno najpogosteje uporabljajo klasične – večinoma kontaktne – merilne metode. Klasičnih merilnih metod pri našem eksperimentu nismo uporabili za meritve, temveč delno za verifikacijo zanesljivosti rezultatov brezkontaktnih metod. Zato podajamo njihov opis le na kratko, pri tem pa smo poudarili njihove prednosti in slabosti pri toku s prosto gladino ter s tem glavne vzroke za vpeljavo novejših merilnih metod v hidravlične raziskave.

2.4.1 Merilne metode za določanje poteka vodne gladine

Razlog, da klasične merilne metode še vedno prevladujejo tako v laboratorijskih kot terenskih meritvah, je predvsem v tem, da je z njimi preverjeno mogoče doseči natančne rezultate v večini primerov tokovnih razmer. Pri tem se najpogosteje uporabljajo uporovne sonde, piezometri, ostno merilo, ultrazvočna tipala itd. (slika 17).



Slika 17: Primeri klasičnih kontaktnih in brezkontaktnih merilnih metod za merjenje gladine vode: tlačna sonda (skrajno levo), ultrazvočni merilnik (drugi z leve), valovna oziroma uporovna sonda (tretja z leve) in ostno merilo (desno).

Figure 17: Examples of conventional measurement methods: pressure probe (left), ultrasonic sensor (2nd from the left), wave or resistance-type probe (3rd from the left), and point gauge (right).

Uporovne ali valovne sonde delujejo po načelu merjenja električnega toka med dvema vzporednima palicama, ki sta potopljeni v vodo. Tok, ki steče med obema palicama, je sorazmeren z globino potopitve, pri čemer je mogoče doseči merilno negotovost, manjšo od ± 1 mm (Shepherd, 1997; Mignot, 2008). Seveda pa to velja za vodno telo z mirno gladino vode. V primeru škropljenja, penjenja oziroma

pojava dvofaznega toka je merilna negotovost uporovne sonde večja oziroma ne deluje po podani zvezi med električnim tokom in globino vode. Ker je sonda postavljena neposredno v vodnem toku, se težave oziroma napake pri meritvah prav tako pojavijo tudi v primeru velikih horizontalnih hitrosti toka prečno na potopljeni palici, saj se ob sondi pojavi zastojna točka in s tem dvig gladine. Meritev tako lahko pokaže koto gladine med energijskim nivojem in dejansko gladino vode na odseku. Dodatno pozornost je treba posvetiti vlažnosti zraka, ki lahko moti del občutljivega senzorja, ki je nad vodno gladino. Preprečiti moramo tudi kakršne koli premike (vibriranja) sonde med meritvijo, kar je predvsem pri tokovih večjih hitrosti ali pri turbulentnem toku navadno težko (Hambrice in Hopper, 2004).

Enako merilno negotovost kot pri uporovni sondi $(\pm 1 \text{ mm})$ je mogoče doseči tudi s piezometrom ali ostnim merilom. Pri meritvah s piezometrom se globina vode oziroma hidrostatični tlak določi z meritvijo višine vodnega stolpca v vertikalni cevki, ki je preko gibljivega dela povezana z mestom na modelu, kjer želimo meritev izvajati. Pri ostnem merilu je kovinska palica z ostro konico pritrjena na merilno skalo. Palico počasi dvigamo ali spuščamo, tako da se konica ravno dotika gladine vode. Merilec nato ročno odčita vrednost na merilni skali, kar predstavlja razdaljo med ničelno točko na napravi in vodno gladino. Za absolutno vrednost gladine pa moramo poznati oddaljenost ničelne točke od dna objekta (Hughes, 1993).

Obe metodi se še vedno zelo pogosto uporabljata v laboratorijskih raziskavah (npr. Hughes, 1993; Ramamurthy et al., 2007; Pinto Coelho, 2015; Müller et al., 2015). Prednost merjenja globine vodnega toka, predvsem pri ostnem merilu, je, da je postopek merjenja enostaven in pregleden, rezultati pa razmeroma natančni. Pomanjkljivosti se kažejo predvsem v omejenosti pri izvedbi zveznih meritev po prerezu, časovno sprejemljive so le meritve v posameznih točkah (Bahner, 1997). Prav tako metoda ne omogoča meritev globine vode pri hitro spremenljivih vrednostih nivojev in tudi ne pri dvofaznem toku. Podobno velja tudi za piezometre in tlačne sonde, kjer dodatno merilno negotovost lahko povzročajo spremembe gostote vode ob spremembi temperature in predvsem pri pojavu dvofaznega toka.

Odzivnost oziroma hitrost vzorčenja je slabost tudi ultrazvočnih tipal, kljub temu pa se pogosto uporabljajo tako v laboratorijskih (npr. Bung, 2013; Nobrega et al., 2014) kot tudi terenskih meritvah (npr. Blenkinsopp et al., 2010). Delovanje ultrazvočnih merilnikov je razmeroma enostavno. Senzor predstavlja hkrati oddajnik in sprejemnik. Deluje na principu merjenja časa potovanja zvočnega signala od oddajnika do ovire in nazaj do sprejemnika. Na podlagi znane hitrosti potovanja zvoka lahko natančno določimo razdaljo. Največja prednost te merilne naprave je, da pri meritvah ni potreben stik z medijem, zato nimamo težav z mašenjem in korozijo, vzdrževanje pa je minimalno. Z razmeroma nizko ceno in $\pm 0,25$ % merilno negotovostjo glede na gornjo mejo merilnega območja se naprava izkaže kot dokaj natančna (Higginson, 2005). Predvsem pri močno razgibani vodni gladini lahko prihaja do večjih odstopanj tudi zaradi velikosti merilnega snopa, ki se širi do oddaljene gladine, saj se upošteva povprečna vrednost oziroma zgolj odboj ob prvem stiku z gladino.

Slabost vseh omenjenih metod, s katerimi se izvajajo točkovne meritve, ki je v nadaljevanju tudi vodila k iskanju novih merilnih metod, je tudi nemoč izvedbe meritev s hkratno veliko prostorsko in časovno ločljivostjo sočasno oziroma vsaj v dovolj majhnih časovno sprejemljivih intervalih. To je predvsem pomembno pri kompleksni vodni gladini z veliko dinamiko in v primerih, kjer je cilj zajem stanja in dinamike gladine celotnega prečnega prereza ali meritve (povprečja in dinamike) topografije na območju (tj. ploskvi) obravnave.

2.4.2 Brezkontaktne merilne metode za določanje poteka in dinamike vodne gladine

Brezkontaktne merilne metode se tudi v hidrotehniki vse pogosteje uporabljajo tako pri terenskih kot tudi pri laboratorijskih meritvah. Pri iskanju merilne metode, ki bi teoretično omogočala zajem topografije kompleksne, nestacionarne vodne gladine v minimalnem času v merilnem (prečnem, vzdolžnem) prerezu ali na območju sotočja, sta po teoretičnih lastnostih izstopali lasersko skeniranje in računalniško podprta vizualizacija. Obe metodi sta bili v nekaterih raziskavah že uporabljeni tudi za meritve vodne gladine, ne pa tudi za primere z veliko dinamiko vodne gladine, kot se pojavlja na območju sotočja pri deročem režimu in za razpenjen vodni tok. V nadaljevanju sta splošno opisani obe metodi, zaradi specifičnosti meritev laserskega skeniranja vodne gladine pa je podrobneje opisano tudi fizikalno ozadje.

2.4.2.1 Lasersko skeniranje površin

Začetki tehnologije LIDAR (LIght Detection And Ranging) oziroma laserskega skeniranja segajo v 60. in 70. leta prejšnjega stoletja, ko se je ta tehnologija uporabljala predvsem za vojaške namene in pri raziskovalnih projektih NASA. NASA je tehnologijo poskušala uporabljati na primer za meritve lastnosti ozračja, oceanov, ne pa prednostno za zajem topografije terena (Baltsavias, 1999). Ker je bila tehnologija LIDAR še v fazi razvoja, predvsem pa zaradi v tistem obdobju še ne dovolj razvite računalniške opreme, ki je potrebna za zajem, shranjevanje in predvsem za obdelavo velikih količin podatkov, ki pri tem nastajajo, so to tehnologijo do 90. let prejšnjega stoletja uporabljale le raziskovalne ustanove. Z razvojem tehnologije do stopnje, ki je omogočala proizvodnjo komercialnih laserskih skenerjev, ter vzporednim razvojem strojne in programske opreme za shranjevanje in obdelavo podatkov pa je tehnologija hitro pridobivala na veljavi in široki uporabnosti. Tako danes tehnologija LIDAR velja za eno najbolj široko uporabljenih metod daljinskega zaznavanja (Wang et al., 2009). Robustnost in vsestranska uporabnost se kaže na številnih, med seboj povsem tujih področjih znanosti. Zaradi svoje hitrosti, majhne merilne negotovosti in učinkovitosti tako skeniranje iz zraka kot tudi terestrične meritve vse pogosteje zamenjuje klasične geodetske merilne metode (npr. Chen, 2016; Wang, 2016), omogoča zajem podatkov za potrebe arheoloških raziskav (npr. Bruckmann, 2014; Prufer et al., 2015; Risbol et al., 2015), detajlne rekonstrukcije objektov (npr. Ren, 2011; Hällström, 2008; Awrangjeba, 2014; Zhang, 2015), z zahtevnimi algoritmi pa omogoča obdelavo surovih oblakov podatkov v kmetijstvu, gozdarstvu (npr. Means et al., 2000; Palace et al., 2016; Kelbe et al., 2016) in geomorfologiji (Brudu in Lague, 2012).

Predvsem pri zajemu podatkov o topografiji vodna telesa navadno močno vplivajo na uspešnost in natančnost meritev (ni odboja oziroma ni jasno, ali je do odboja prišlo na gladini, suspendiranih delcih oz. na dnu). Zaradi težav in napak pri meritvah topografije na območju vodnih teles se pri pripravi digitalnih modelov reliefa (DMR), npr. za potrebe hidravličnega modeliranja (slika 18), uporablja kombinacija filtriranih LIDAR-podatkov terena okolice vodnih teles in batimetrija, zajeta z ultrazvočnimi senzorji (Mandlburger, 2009). Za zajem podatkov batimetrije se uporabljajo tudi laserski skenerji s kombinacijo infrardečih in modro-zelenih žarkov (DIAL – Differential Absorption LIDAR). Medtem ko je disipacija infrardečih žarkov v vodnem telesu velika, pa modro-zeleni žarki v primeru bistre mirne vode prodrejo globlje skozi vodno telo in se odbijejo šele na dnu morja ali vodotoka.



Slika 18: Oblak točk (levo) meritev terena z melioracijskimi jarki z laserskim skenerjem in DMR, izdelan iz podatkov laserskega skeniranja (Rak, 2006).

Figure 18: Point cloud of measurements of a terrain with drainage ditches using a laser scanner and a DTM generated from laser scanning data (Rak, 2006).

Ob poznavanju lastnosti in delovanja uporabljene merilne metode laserskega skenerja in pravilni interpretaciji meritev lasersko skeniranje lahko uporabljamo tudi za zajem profilov vodne gladine. V zadnjih letih so tako že bili objavljeni rezultati nekaterih raziskav. Blenkinsopp et al. (2010) so laserski skener uporabili za meritve časovno spremenljivega poteka vodne gladine na območju izteka valov na obalo (angl. swash zone). Na območju izteka valov na obalo prihaja do penjenja vodne površine, kar poveča difuznost odboja in možnost/uspešnost meritev z laserskim skenerjem. Rezultati kažejo dobro ujemanje z meritvami z ultrazvočnimi tipali. Nekateri avtorji so metodo uporabili tudi za meritve v laboratoriju, in sicer za meritve časovno spremenljivega poteka vodne gladine pri valovanju (Blenkinsopp et al., 2012; Allis et al., 2011; Streicher et al., 2013). Pri tem so vse raziskovalne skupine uporabile dodatek za povečanje kalnosti vode in s tem poskušale izboljšati odbojnost, povečati število odbitih signalov in tako tudi število dejanskih meritev na območju vodne gladine. Podrobneje rezultate in ugotovitve opisujemo v podpoglavju o posebnostih pri meritvah vodne gladine (2.4.2.1.2).

2.4.2.1.1 Delovanje laserskih skenerjev

Laserski skener je merilnik razdalje, ki deluje, enako kot radarski ali ultrazvočni merilnik, na principu merjenja časa preleta (angl. Time of Fligth (ToF)) od oddajnika do merjene površine (in po odboju) še nazaj. V osi merilnika je nameščen izvor in sprejemnik svetlobe, pri čemer proti merjeni površini v posamezni meritvi laserski skener med minimalno in maksimalno vrednostjo kotnega razpona s korakom, določenim s kotno ločljivost, oddaja svetlobne impulze. Pulzirajoči laserski žarek je v vidni ali bližnji infrardeči svetlobi valovne dolžine. Na stiku s površino se del svetlobe absorbira, del razprši v okolico in del odbije nazaj proti sprejemniku. Razdaljo med ničelno točko laserskega skenerja in oviro (merjene površine) se ob poznavanju hitrosti potovanja svetlobe izračuna iz časa potovanja svetlobe do ovire in nazaj. Ne glede na to, ali gre za 1D, 2D ali 3D laserski skener, je princip delovanja enak. Za zajem 2D- ali 3D-podatkov je v notranjosti laserskega skenerja nameščeno zrcalo, ki se vrti okoli ene (2D) ali dveh (3D) osi in v kratkih intervalih odklanja laserski žarek ter v nastavljene smeri usmerja laserski snop v obliki pahljače, s tem pa omogoča zajem širšega območja oziroma večje količine točk (Blenkinsopp et al., 2012). Rešitev za zajem topografije terena, objektov in podobno so že pred časom na področju geodezije našli v laserskem skeniranju, pri čemer se uporabljajo predvsem 3D-skenerji. Skenerji, ki za zajem podatkov potrebujejo nekaj minut, so primerni predvsem za zajem podatkov stacionarnih objektov, medtem ko so za zajem hitro časovno spremenljive površine manj primerni.

Pri izvedbi meritev za potrebe disertacije, kjer je bil cilj zajem dinamike vodne gladine z veliko prostorsko in časovno ločljivostjo, so bili uporabljeni 2D-skenerji, ki sicer omogočajo le meritve v izbrani ravnini, vendar pa se te meritve izvajajo z veliko frekvenco in kotno ločljivostjo. 2D laserski skener meritve razdalje zabeleži v polarnem koordinatnem sistemu (zapis je tako sestavljen iz razdalje (L) in kota (ϕ)). Pri skeniranju iz istega žarišča se lahko pojavijo območja, katerih površine laser zaradi prestreženega žarka z neko oviro ne more zaznati (slika 19). Ker se meritve izvajajo v polarnem koordinatnem sistemu, mrtva območja naraščajo z večanjem horizontalne oddaljenostjo od izvora žarkov. Zato si pomagamo z združevanjem meritev iz različnih merilnih mest, postavljenih tako, da ustrezno izmerimo željene površine.



Slika 19: Vidno oziroma merjeno polje 2D laserskega skenerja iz ene lokacije žarišča laserja. Figure 19: Field of view or field of measurements using a 2D laser scanner from one location of the laser focal point.

Od večine površin se laserski žarek razprši v različne smeri (slika 20, desno). Jakost odboja je odvisna od vrste in barve površine. Svetlejše površine odbijajo laserski žarek bolj kot temnejše, površina pa je od merilnika lahko na večji razdalji. Intenziteta odboja od svetle, bele površine je blizu 100 %, jakost odboja od temne površine pa le okoli 2,4 % (SICK, 2015). Na zelo grobih površinah se del energije izgubi tudi na račun senc.



Slika 20: Različni tipi odboja glede na površino objekta: a) zrcalni odboj pri pravem kotu vpadnega žarka, b) odboj na zrcalni površini pri vpadnem kotu, večjem od 0°, c) difuzni odboj

Figure 20: Different types of reflection corresponding to the object's surface: a) reflection at perpendicular incident on the surface b), reflection on the mirror surface at an angle greater than 0 degrees, c) diffuse reflection.

Optimalni odboj nastane takrat, ko je vpadni kot žarka pravokoten na površino. Če je vpadni kot manjši, pride do izgub energije odbitega žarka in s tem zmanjšanja največje razdalje merjenja, s katere še pride do povratnega signala. Ko je intenziteta odbitega žarka enaka 100 %, pomeni, da ni prišlo do razpršenega odboja, pač pa se je odboj izvršil v eni sami smeri pod enakim kotom glede na površino, kot je vpadal (slika 20, levo in na sredini). Rezultat je visoka intenziteta odboja. Če imamo za površino zrcalo, se laserski žarek skoraj v celoti odbije.

Laserski skener istočasno odda en žarek, katerega snop se na poti širi z nekim kotom, ki je odvisen od optike v merilni napravi. Zato pride do zmanjšane energije odbitega signala tudi pri objektih, katerih dimenzije so manjše kot površina snopa žarka na oddaljenosti merjenega objekta (slika 21). Jakost odboja pa je pri tem sorazmerna z razmerjem velikosti odbojne površine in preseka snopa. Lastnost zmanjšane energije povratnega signala zaradi majhnosti zadetega objekta je kasneje, ko filtriramo podatke, pomemben podatek. Če je odboj prešibak, ni nujno, da odbita svetloba doseže sprejemnik, torej v takšnem primeru objekt oziroma ovira ne bo zaznana.



Slika 21: Meritev objekta, če je njegova velikost manjša od preseka laserskega žarka. Figure 21: Measurement of an object when its surface is smaller than the spot of the laser beam.

Merilni doseg laserskega skenerja je predvsem odvisen od tehničnih lastnosti naprave. Poleg tega pa na doseg vplivajo tudi lastnosti površine objekta. Pri enakem laserskem skenerju na primer lahko objekt s 3 % sposobnostjo odboja vpadle svetlobe ostane nezaznaven, hkrati pa se posname objekt s sposobnostjo odboja, večjo od 95 %, na oddaljenosti npr. 80 m. Na doseg seveda vplivajo tudi vplivi iz okolice, kot so megla, prah in dež, ki ob nazivni sposobnosti odboja objekta zmanjšajo maksimalno razdaljo do merilnika (SICK, 2015). Z večanjem razdalje med merilnikom in merjeno točko se povečuje premer snopa žarka, posledično pa tudi premer odtisa žarka na merjeni površini. Z večanjem oddaljenosti se povečuje tudi medsebojna razdalja merjenih točk na objektu. Ta je odvisna od izbrane kotne ločljivosti (slika 22).



Slika 22: Širjenje laserskega žarka (levo) in razdalja med posameznimi točkami na merjeni površini pri različni kotni ločljivosti (SICK, 2015).

Figure 22: Divergence of laser beam (left) and the distance between the measured points at various angular resolutions (SICK, 2015).

Poleg nazivne merilne negotovosti laserskega skenerja je torej točnost meritev odvisna tudi od kombinacije kotne ločljivosti in frekvence snemanja, izbrane pri meritvah. Z višjo frekvenco in bolj fino kotno ločljivostjo laserski skener opravi večje število meritev, vendar pa so lahko meritve – zaradi večje negotovosti oddajanja signala v željenem koraku kotne ločljivosti – slabše kakovosti v primerjavi z izbiro grobe kotne ločljivosti in manjše frekvence snemanja. Zaznavanje podatkov z nazivno kakovostjo meritev lahko z gotovostjo izvedemo šele takrat, ko je vidna površina skenerja vsaj trikratna vrednost kotne resolucije, ki pa je odvisna od razdalje od izvora laserskega žarka (ničelne točke). Merilna negotovost meritev se po podatkih proizvajalca zmanjša pri skeniranju objekta (ploskve), ki se v času meritve pod senzorjem premika ali spreminja obliko (SICK, 2015).

V spektroskopiji ali spektralni analizi signalov se za jakost odboja uporablja tudi izrazi remisija (angl. remission). Ta termin opisuje jakost odboja ali sevanja elektromagnetnega valovanja v infrardečem, vidnem in rentgenskem spektru (Kuzmany, 2009). Pri laserskem skeniranju se z remisijo označuje energija, ki jo ima povratni signal (angl. »re-emit« – odboj).

2.4.2.1.2 Posebnosti pri meritvah vodne gladine

Na gladini čiste vode večinoma prihaja do zrcalnega odboja, tj. pod enakim kotom, kot je kot vpadnega žarka (slika 20). Zaradi narave vodne gladine do odboja, ki se vrne na laserski skener, pride le, če laserski žarek zadene vodno gladino pod pravim kotom oziroma kotom 0° (v optiki je ta kot merjen kot odklon od normale na ravnino). V primeru zrcalnega odboja pri žarku, ki zadene vodno površino pod večjim kotom, prihaja do odboja pod enakim kotom v smeri stran od laserskega skenerja, zaradi česar ni odboja, ki bi ga sprejemnik lahko prejel. Do nepovratnega signala lahko pride tudi zaradi popolne disipacije energije žarka pri stiku z objektom ali potovanju skozi vodno telo. Laserski skener pa lahko prejme povratni signal v primeru, če žarek zadene delec (suspendirani delci, mehurčki, dno) na oz. v vodnem telesu (slika 23). Ker prihaja pri čisti vodi do uspešnih meritev zgolj pri kotu 0°, so, kot je bilo omenjeno zgoraj, v preteklosti avtorji poskušali odbojnost in razpon kota uspešnih meritev povečati s povečanjem kalnosti vode. Za povečanje so uporabljali kaolinit oziroma magnezijev prah. Kaolinit je sestav več vrst glinenih delcev z razmeroma veliko gostoto ($\rho = 2650 \text{ kg/m}^3$, $d_{50} = 20 \mu \text{m}$), zaradi česar pri uporabi za povečanje kalnosti prihaja do težav zaradi razmeroma hitrega usedanja delcev in s tem zelo omejenega časovnega okna za izvedbo meritev. Ob usedanju delcev in s tem ob zmanjšanju delcev v vrhnji plasti vodnega telesa meritve pokažejo vse bolj podcenjene vrednosti kote vodne gladine. Magnezijev prah z gostoto $\rho = 1738$ kg/m³ ima sicer nekoliko boljše karakteristike lebdenja, vendar pa se pri njem pojavljajo težave z zlepljanjem delcev v grude, ki se usedajo ipd. Zaradi tega lahko magnezijev prah uporabimo zgoli enkrat. Ker laserski skenerji delujejo na principu merjenja časa potovanja svetlobe, je merodajno, da se kalnost določa s nefelometrično metodo. Ta metoda deluje na principu merjenja razpršene svetlobe, ki jo izražamo z NTU – nefelometrične enote motnosti (angl. Nephelometric Turbidity Unit). Avtorji ugotavljajo, da je ob povečani kalnosti na 40 NTU mogoče laserske skenerje uspešno uporabljati za meritve do kota 55° (Allis et al., 2011). Za primerjavo naj omenimo, da po standardu Svetovne zdravstvene organizacije kalnost pitne vode zaradi vsebnosti delcev ne sme presegati vrednosti 1 NTU (WHO, 2006). Pri odboju na delcih v vodnem telesu je pomembno, da pride do zadostne odbite energije, da odboj doseže laserski skener (SICK, 2015). Energija odboja je odvisna od vrste površine delcev oziroma tudi od disipacije energije pri potovanju skozi medij (v našem primeru voda).



Slika 23: Vpliv loma svetlobe pri prehodu svetlobnega žarka med zrakom in vodo na točnost meritve. Figure 23: The impact of light beam refraction at the air-water crossing on measurement accuracy.

Pri dodajanju delcev za povečanje odbojnosti je pri opisu rezultatov in oceni merilne negotovosti ter virov napak treba omeniti tudi, da se lahko dodatne razlike pri takšnih meritvah vodne gladine pojavijo zaradi loma svetlobnih žarkov. Odstopanje bi se pri meritvah popolnoma vodoravne gladine vode pokazalo z rahlo usločenostjo gladine navzgor. Nekateri avtorji so že poskušali oceniti ta odstopanja in razvijali metode za korekcijo merjenih vrednosti (Tamari et al., 2011; Smith et al., 2011). Kadar pride do odboja pod vodno gladino (delec, mehurček itd.), prihaja zaradi loma svetlobe pri prehodu iz enega v drug medij tako do odstopanja pri izmerjeni dolžini kot tudi pri izračunanih vrednostih koordinat. Razlike med izmerjenimi in dejanskimi razdaljami se večajo z večanjem kota vpadle svetlobe in merjene površine. Podrobneje je postopek za določitev popravka predvsem zanimiv pri meritvah razmeroma mirne vodne gladine in širokih kotov (meritve valovanja na daljših odsekih), opisan v članku skupine Smith in sod. (2011), bistvene lastnosti pojava pa so prikazana na sliki 23. Pri valovni dolžini infrardeče svetlobe, kot je npr. uporabljena pri našem laserskem skenerju LMS511 (905 nm), je lomni količnik vode n_{vode} = 1,32699 (Daimon in Masumura, 2007).

Smith in sod. so za korekcijo izmerjenih vrednosti podali naslednje enačbe:

$$\Delta X_{\nu} = \sin \theta_1 * L * \frac{n_2}{n_1} \tag{27}$$

$$\Delta Y_{\nu} = \cos \theta_1 * L * \frac{n_2}{n_1} \tag{28}$$

Dejanske koordinate pa tako lahko določimo:

$$X_{T} = X - \Delta X_{v} = X - \sin \theta_{1} * L * \frac{n_{2}}{n_{1}}$$
⁽²⁹⁾

$$Y_T = Y - \Delta Y_v = Y - \cos \theta_1 * L * \frac{n_2}{n_1}$$
(30)

Pri čemer je:

- L → razdalja potovanja žarka skozi vodno telo [m]
- $\theta_1 \rightarrow$ vpadni kot laserskega žarka na gladino [°]
- $n_1 \rightarrow \text{lomni količnik za zrak [-]}$
- $n_2 \rightarrow$ lomni količnik za vodo [-]

- $X, Y \rightarrow$ navidezno izmerjene koordinate [m]
- $X_T, Y_T \rightarrow$ dejanske koordinate vodne gladine v smeri laserskega žarka [m]

S tehničnimi lastnostmi laserskega skenerja in določeno kotno ločljivostjo je za posamezno meritev iz zapisa kot θ_1 vedno lahko določljiv. Pri ravni vodni gladini je ob upoštevanju manjše hitrosti svetlobe v vodi in navidezne usločenosti gladine, kot jo kažejo meritve, mogoče predvideti potrebne korekcije. Za določitev razdalje L je tako potreben povraten iterativni pristop, pri čemer se pri znani motnosti vode upošteva konstantna vrednost L. Absolutno ali efektivno razliko pri izmeri vertikalne razdalje do gladine ΔY_v lahko določimo kot funkcijo razdalje potovanja žarka skozi vodno telo:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N} (\Delta \overline{y_{v}}(L) - \Delta y_{vi}(L))^{2}}{N}}$$
(31)

Pri čemer je:

- $N \rightarrow$ število vseh meritev [-]
- $\Delta y_{\nu} \rightarrow$ povprečna vertikalna razdalja med navidezno izmerjeno točko in gladino vseh meritev [m]
- $\Delta y_{vi} \rightarrow$ vertikalna razdalja (i-te meritve) med navidezno izmerjeno točko in gladino [m]

Kljub uspešnim meritvam nekaterih avtorjev, ki so s svojimi poskusi potrdili uporabnost metode ob dodajanju delcev za izboljšanje odbojnosti, pa je treba poudariti, da je pri eksperimentalni hidravliki, zaradi občutljivih elementov preizkuševališč, kot so črpalke in merilna oprema neposredno na cevovodih ter velikih količin vode v sistemu, dodajanje delcev pogosto nemogoče. Pri pregledu nam dostopne literature nismo zasledili, da bi bilo lasersko skeniranje uporabljeno na primerih s čisto vodo v laboratorijskih ali terenskih meritvah. Zato je pomemben del naše raziskave preveritev delovanja laserskega skeniranja pri merjenju gladine čiste vode in merilna negotovost, ki jo je pri tem mogoče doseči.

2.4.2.2 Računalniško podprte vizualizacijske merilne metode

Računalniško podprte tehnike obdelave slik in video posnetkov prevladujejo predvsem pri določanju hitrostnih polj. Glavne metode smo omenili že zgoraj. Prav tako pa je z obdelavo slik mogoče določiti tudi potek gladine vode. Pri tem se navadno uporabljajo hitre kamere in močni viri svetlobe. Za meritve polne 3D-topografije vodne gladine se uporablja pristop z več kamerami (fotogrametrija), pri čimer pa morajo biti vodnemu telesu dodani plavači (Ergenzinger in DeJong, 1996; Ferreira et al., 2017). Pristop je primeren za meritve vodne gladine po globini slike, torej 3D. Pri meritvah se vodno telo presvetli v tanki ravnini, ki določi merjeni prerez, s čimer se zmanjša tudi svetlobna prenasičenost slike. Meritve so tako sicer omejene na posamezni prerez, kljub temu pa je treba poudariti, da dajejo lahko tudi algoritmi za obdelavo slik ene kamere in določanje poteka gladine s povprečenjem dobre rezultate le v primeru analize po prerezih. Na spodnji sliki shematsko prikazujemo način snemanja s kombinacijo osvetlitve in hitro kamero. Glede na metodo z laserskim skeniranjem je priprava na meritve, umerjanje in izvedba meritev s hitro kamero bolj zahtevna.



Slika 24: Shema zasnove meritev gladine v prečnem prerezu s hitro kamero. Figure 24: A drawing of the recording set-up using a high-speed camera.

V primeru mirne gladine čiste vode večina svetlobe prodre skozi vodno telo, zato je pas osvetlitve na gladini razmeroma slabo viden. Pri penjenju ali dvofaznem toku na površini pa prihaja do močnega sipanja svetlobe, pri čemer je vzdolž presvetlitvene ravnine lepo viden pas gladine (slika 24). Z algoritmi za obdelavo slik je nato mogoče določiti prečni potek gladine. Podobno kot za izvedbo meritev velja tudi za algoritme za obdelavo slik. Ti so glede na algoritme za obdelavo meritev laserskega skeniranja praviloma bistveno bolj zahtevni, merilna metoda pa zato manj robustna. Na sliki 25 so prikazani trije koraki obdelave slike in določitev poteka vodne gladine preko vodnega skoka.



Slika 25: Obdelava sekvence slik za določitev konture vodne gladine vzdolž vodnega skoka v steklenem kanalu, UL FGG.

Figure 25: Image sequence processing to determine the water surface outline along the hydraulic jump in the glass channel, UL FGG.

Ker snemanje pravokotno na vertikalno ravnino osvetlitve navadno ni mogoče (stena korita ali del vodnega telesa zastira pogled na želeno mesto meritev, kamere ni mogoče postaviti neposredno v oz. nad vodno telo itd.), se snemanje izvaja pod določenim kotom. Pri enakih nastavitvah kamere in osvetlitve, kot so kasneje uporabljene za snemanje vodne gladine, je treba tudi izvesti posnetke, ki služijo za prostorsko umerjanje kamere. Rezultat obdelave slik so namreč indeksi slikovnih točk, ki opisujejo potek gladine. Poleg poznavanja velikosti slikovne točke glede na dimenzije merjenega objekta je pri snemanju pod kotom treba upoštevati tudi projekcijo na ravnino osvetlitve. Z umerjevalnim postopkom, pri katerem se upošteva velikost slikovne točke in projekcija, je mogoče določiti globino vode ali koto (višino) vode.

2.5 Viri merilne negotovosti

Merilna negotovosti izhaja iz negotovosti pri umerjanju instrumentov, negotovosti pri zajemu podatkov, negotovosti obdelave podatkov ali negotovosti same merilne metode (ISO, 2005; Bergelj, 2000). Določena, izračunana ali ocenjena merilna negotovost, ki se ji tako ni mogoče popolnoma izogniti, podaja kakovost meritev ali rezultatov (Bell, 1999). Cilj disertacije pri merilni metodi je bil zato preveriti merilno metodo na novem področju uporabe in določiti povezave med vhodnimi parametri ter glavnimi (predvsem dimenzijskimi) značilnostmi toka na sotočju. Pri tem lahko ocenitev merilne negotovosti razdelimo na dva dela, in sicer na oceno merilne negotovosti merilne metode pri meritvah vodne gladine ter merilne negotovosti končnih rezultatov. Medtem ko gre pri prvi za neposredne meritve vodne gladine in merilno negotovost lahko neodvisno določimo, pa je treba pri oceni merilne negotovosti končnih rezultatov upoštevati tako merilno negotovost neposredno merjenih veličin kot tudi preračunanih parametrov in določitve delovne točke sotočja. Tako se na primer karakteristike stoječega valovanja na sotočju v veliki meri spreminjajo v odvisnosti od lastnosti toka, podane s Froudovim številom, ki je podan kot funkcija neposredno merjenih neodvisnih veličin, ki določajo geometrijo (širino kanala, višino odprtja lopute na vtoku v model) in pretoka.

Pri verifikaciji merilne metode so bili uporabljeni laserski skenerji, za katere je proizvajalec sicer podal nazivno merilno negotovost, določeno v skladu s standardom ISO 17123-1:2014. Postopek je opravljen za meritve trdnih teles s specifičnimi lastnostmi merjene površine, ki vplivajo na odbojnost laserskih žarkov. Pri meritvah vodne gladine pa gre za nov, nestandardizirani pristop, pri čemer je možno le oceniti merilno negotovost in utemeljiti (ne)ustreznost merilne metode. Pri tem je treba poudariti, da merilna negotovost, ki izhaja iz uporabljene merilne metode, lahko pomembno vpliva na končne rezultate in lahko bistveno presega negotovost, ki izvira iz umerjanja merilnikov, zajema in obdelave meritev (ISO, 2005). Zaradi specifičnosti delovanja uporabljene merilne metode laserskega skeniranja pri zajemu gladine vodnih teles smo temu namenili posebno pozornost.

Določanje merilne negotovosti končnih rezultatov je kombinacija ocenjene merilne negotovosti merilne metode za zajem vodne gladine in merilne negotovosti vhodnih parametrov, ki jo lahko določimo po standardu za področje hidrometrije (ISO 1438:2008). Ker standard uporablja *u* kot oznako za merilno negotovost (angl. uncertainty), takšno oznako uporabljamo tudi v nadaljevanju.

Prikaz izračuna skupne merilne negotovosti lahko podamo na primeru Froudovega števila, ki je, kot omenjeno, izraženo kot funkcija neodvisnih spremenljivk in ga lahko izračunamo kot $Fr = v/(gh)^{0,5}$, pri čemer je g konstanta, globina vode h neodvisno merjena veličina, hitrost vode v pa določena na podlagi pretoka, geometrije kanala in višine odprtja na vtoku. Tako jo lahko izračunamo kot v = Q/(bh). Pri skupni negotovosti določitve Froudovega števila u(Fr) moramo upoštevati negotovost vseh neodvisnih spremenljivk. V primeru Froudovega števila to lahko zapišemo kot občutljivost Fr na majhno spremembo (označeno z Δ) obeh geometrijskih veličin in pretoka:

$$\Delta Fr = \frac{\partial Fr}{\partial h} \Delta h + \frac{\partial Fr}{\partial b} \Delta b + \frac{\partial Fr}{\partial Q} \Delta Q$$
(32)

pri čemer $\frac{\partial Fr}{\partial h}$, $\frac{\partial Fr}{\partial b}$, $\frac{\partial Fr}{\partial Q}$ predstavljajo koeficiente občutljivosti in tako velja:

$$\frac{\Delta Fr}{Fr} = \frac{\Delta h}{h} + \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta Q}{Q}$$
(33)

 $\frac{\Delta Fr}{Fr}$, $\frac{\Delta h}{h}$, $\frac{\Delta b}{b}$, $\frac{\Delta Q}{Q}$ predstavljajo brezdimenzijske vrednosti standardne negotovosti, ki jih lahko zapišemo $u_c^*(Fr)$, $u^*(h)$, $u^*(b)$ in $u^*(Q)$. Ker gre pri zapisu Froudovega števila za zapis medsebojno neodvisnih spremenljivk, negotovost določitve Froudovega števila lahko zapišemo:

$$u_c^*(Fr) = \sqrt{2 * u^*(h)^2 + u^*(b)^2 + u^*(Q)^2}$$
(34)

V tem primeru je enačbo razmeroma preprosto uporabiti, saj se nanaša na same neodvisne spremenljivke. Pri meritvi vodne gladine pa bo postopek zahtevnejši.

2.6 Multiregresijski fenomenološki modeli

Rezultat eksperimentalnega modeliranja ali meritev fenomenov v naravi so pogosto empirične enačbe oziroma modeli, ki opisujejo obnašanje pojavov v odvisnosti od vplivnih parametrov. Sisteme povezav med vhodnimi parametri in opazovanimi pojavi imenujemo tudi fenomenološki modeli, ki veljajo kot zakonitosti za realni sistem pri vplivnih parametrih z vrednostmi v določenem razponu. Fenomenološke modele je mogoče zapisati v brezdimenzijski obliki, s čimer lahko s teorijo podobnosti veljavo obnašanja pojava še dodatno razširimo. Pri zapisu zveze odvisne spremenljivke od neodvisnih, regresijskih spremenljivk je mogoče uporabiti več načinov, kot so npr. različne drevesne strukture in multiregresijska analiza.

Oblikovanje fenomenološkega modela v brezdimenzijski obliki zahteva zapis kvantitativnih razmerij med fizikalnimi parametri, ki vplivajo na pojave. Z dimenzijsko analizo lahko določimo razmerje poljubnih fizikalnih veličin, fizikalni pojav pa zapišemo kot povezavo z razmerji fizikalnih veličin, ki pri tem nastopajo (Zlokarnik, 1991). Hkrati dimenzijska analiza izpolni tudi cilj neodvisnosti od merskega sistema in pogoj dimenzijske homogenosti, torej sta obe strani enačbi iste dimenzije oziroma sta brez nje. V dimenzijsko analizo je mogoče vključiti tudi Buckinghamov Π -teorem, s čimer se zmanjša število spremenljivk v sistemu enačb. Število razmerij med *n* fizikalnimi veličinami je tako mogoče zmanjšati na m = n-r medsebojno neodvisnih brezdimenzijskih števil. Pri tem r predstavlja število vhodnih parametrov ali neodvisnih spremenljivk.

Torej velja, če je pojav odvisen od n nedeljivih, fizikalnih veličin x_k , ga zapišemo:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \tag{35}$$

in lahko z Buckinghamovim Π-teoremom število zgornjih zvez zmanjšamo na:

$$\phi(\Pi_m) = 0 \tag{36}$$

pri tem *m* teče od 1 do *n-r*, Π_m pa predstavljajo brezdimenzijska števila, odvisna od merjenih, neodvisnih spremenljivk.

Oblika fenomonološkega modela je lahko zelo različna. Pri pojavih, kjer natančen vpliv neodvisnih spremenljivk ni znan, pri tem pa se te spreminjajo zvezno, se pogosto uporablja potenčni model. Ta se pogosto uporablja tudi v primerih, katerih podrobnosti o vplivu vhodnih parametrov na obnašanje fenomena niso poznane, potrebni pa so hitri pokazatelji zakonitosti. Odvisnost fenomena od brezdimenzijskih števil pri tem zapišemo:

$$\Psi = K * \Pi_1^{\beta_1} * \Pi_2^{\beta_2} * \dots * \Pi_m^{\beta_m}$$
(37)

Ker je odvisnost fenomena zapisana kot produkt konstante *K*, ki zajema nepoznani(-e) vpliv(-e) na pojav, in brezdimenzijskih števil, kjer eksponenti β_m kažejo na pomembnost vpliva posameznega člena, lahko izraz z logaritmiranjem pretvorimo v linearno obliko (Seber et al., 2003):

$$ln\Psi = lnK + \beta_1 * ln\Pi_1 + \dots + \beta_m * ln\Pi_m$$
(38)

Iz nabora izvedenih meritev fizikalnega pojava pri različnih vrednostih neodvisnih spremenljivk na ta način dobimo sistem linearnih enačb, pri čemer je število enačb enako številu izmerjenih scenarijev. Ker pa je število izmerjenih scenarijev navadno bistveno večje od števila neodvisnih spremenljivk ali določenih brezdimenzijskih števil, je sistem enačb predoločen. Zaradi negotovosti meritev in nepoznavanja vseh vplivnih parametrov vrednosti konstante *K* in eksponentov β_m pri rešitvah posameznih enačb niso enoznačno določene, zato se njihove vrednosti za končno opredeljeni fenomenološki model določijo s statističnimi metodami, na primer z metodo najmanjših kvadratov. S končnim fenomenološkim modelom ob vnosu neodvisnih spremenljivk, določenih pri posameznem scenariju, ne dobimo povsem enakih vrednosti, kot so bile izmerjene, temveč te bolj ali manj odstopajo. Ali fenomenološki model v zadostni meri posnema fizikalni pojav ali pa so z njimi izračunane vrednosti preveč ali nepravilno razpršene, je mogoče preveriti z različnimi merili signifikantnosti (npr. s hitestom). Ustreznost fenomenoloških enačb je bila v disertaciji podana z determinacijskim koeficientom R².

2.7 Programska oprema za podporo meritev in analize

Jedro dela v sklopu disertacije je večinoma eksperimentalne narave, kljub temu pa so bili vsi postopki zajema podatkov, njihove obdelave in prikazi rezultatov računalniško podprti. Podan je le kratek opis programske opreme, ki je bila vključena v bistvene postopke, in sicer:

- Sopas testiranje, nastavljanje merilne opreme SICK in zajem podatkov z laserskim skeniranjem,
- LabView -zajem in prikaz rezultatov laserskega skeniranja,
- Matlab obdelava, analiza in prikaz rezultatov ter analiza slik.

Sopas je programsko orodje za podporo pri delu s celotno paleto naprav proizvajalca SICK. Prek grafičnega vmesnika je mogoče opraviti zagon, testiranje in nastavljanje posamezne naprave ter sinhronizacijo sistema več naprav. Ker gre večinoma za naprave v industrijski rabi, se način vzorčenja in zajem podatkov večinoma prilagaja potrebam uporabnika. Sopas zato ni prilagojen zajemu podatkov oziroma je ta omejen na opravila, ki so potrebna za testne meritve. Za krmiljenje naprav lahko uporabniki razvijajo svoja orodja, spisana v poljubnih programskih jezikih in programskih orodjih, komunikacija z napravami SICK pa se uredi skladno s proizvajalčevimi protokoli.

Za zajem in prikaz rezultatov laserskega skeniranja smo uporabili uporabniški vmesnik, ki smo ga razvili v programskem okolju LabView proizvajalca National Instruments. Na grafičnem objektnem modeliranju zasnovano orodje je eno najpogosteje uporabljenih programskih orodij za razvoj lastnih uporabniških vmesnikov pri delu z merilno opremo, ne glede na področje raziskav ali industrijske rabe.

Vse obdelave surovih podatkov iz oblakov točk laserskega skeniranja kot tudi posnetki hitre kamere pri vizualizacijskih metodah so bili obdelani v programskem orodju Matlab, ki ga razvija podjetje

MathWorks, Inc. Program temelji na izvajanju matričnih operacij, reševanju sistemov diferencialnih enačb z različnimi numeričnimi shemami itd. Poleg močnega matematičnega orodja je program tudi učinkovito orodje za prikaz rezultatov v grafični in animacijski obliki. Ob številnih vgrajenih funkcijah so uporabniku na voljo knjižnice orodij drugih avtorjev oziroma je mogoče nove funkcije razviti samostojno. S pomočjo tega orodja so bili izvrednoteni tudi parametri novih enačb.

2.8 Pregled raziskav sotočij drugih avtorjev

Prve raziskave tokovnih razmer na sotočju je v letu 1944 izvedel E. H. Taylor in z uporabo zakona o ohranitvi gibalne količine za mirni režim toka razvil enodimenzionalni model za določitev razmerja globin gorvodno in dolvodno od sotočja (Taylor, 1944). Pri tem je preučil različne primere sotočij dveh horizontalnih kanalov enakih širin. Pri določitvi razmerja globin je upošteval naslednje predpostavke: pretok se iz 1. in 2. kanala združi v 3. kanal, katerega os je nadaljevanje osi 1. kanala; tok v kanalih je vzporeden s stenami kanala, hitrostni profil pa je tik nad in pod sotočjem enakomeren; v primerjavi z ostalimi silami lahko silo trenja ob stene kanala zanemarimo; globini v dotočnem kanalu sta tik nad sotočjem enaki. Na podlagi predpostavk in uporabe zakona o ohranitvi gibalne enačbe je za sotočje, če sledimo pri toku vode od 1. do 3. kanala, Taylor oblikoval naslednjo enačbo – oceno razmerja gorvodne in dolvodne globine (Taylor, 1944):

$$k_2 = \frac{n_q^2 (n_h^2 - 1)}{4n_h^2 (2n_q - n_q^2 (1 + \cos\theta) + n_h - 1)}$$
(39)

$$k_2 = \frac{v_2^2}{2gh_2}$$
 (40) $n_q = \frac{Q_2}{Q_3}$ (41) $n_h = \frac{h_a}{h_b}$ (42)

kjer je v₂ hitrost kanala 2, h₂ globina v kanalu 2, h_a globina pred sotočjem, h_b gladina za sotočjem, θ pa kot med kanaloma. Enačba 39 je bila pridobljena na podlagi poskusov pri sotočjih, kjer stranski kanal vpada pod kotoma 45° in 135°. Pri kotu 45° rezultati, izračunani po Taylorjevi enačbi, kažejo dobro ujemanje z meritvami na modelu, medtem ko pri kotu 135° ustreznost enačbe ni bila povsem potrjena (Taylor, 1944). Na podlagi eksperimentov je Taylor podal ugotovitev, da poljubnemu kotu sotočja θ lahko pripišemo pripadajoče brezdimenzijske vrednosti Q₂/Q₃, h₃/h₂, h₁/h₂ in k₃ = v₃²/2gh₃.

Avtorji kasnejših raziskav so obravnavali tako mirni kot deroči režim toka na območju sotočij (Behlke in Pritchett, 1966; Greated, 1968; Modi et al., 1981; Best, 1984; Hager, 1989a; Hager, 1989b). Pri tem so raziskovali tokovne razmere na sotočju zaradi različnih Froudovih številih v gorvodnih in dolvodnih odsekih (vejah) sistema, pri različnih kotih med osjo primarnega in sekundarnega korita, za simetrična in asimetrična sotočja. Pri tem so določali hitrostna polja, območje mešanja tokov, tokovne razmere pri sotočjih s stopnjo v dnu sekundarnega korita in brez nje in podobno. Webber in Greated (1966) sta razvila način za teoretično določanje tokovnih vzorcev pri mirnem toku na sotočjih, s katero sta za 90stopinjski kot sotočja lahko določila zastojno točko in ocenila relativne izgube energije na območju sotočja. Z meritvami na svojem modelu pa sta tudi preverila veljavnost enačb pri sotočjih s kotom 30°, 60° in 90°, ki jih je podal Taylor in so navedene zgoraj (Coelho, 2015). Njuno metodo sta nadgradila Lin in Soong (1979), ki sta energijske izgube ločila na trenjske izgube in izgube zaradi vrtinčenja. Christodoulou (1993) je za primer pravokotnega korita pri 17° in 90° kotu sotočja analiziral pogoje za pojav vodnega skoka na sotočju. Pri tem je bil v stranskem kanalu upoštevan dotok mirnega toka, v glavnem pa šibak deroči tok (Fr \leq 2). Kljub temu da je bil tok na sotočju tridimenzionalen, kar še posebej velja v primeru deročega toka, ki ga je Christodoulou upošteval v glavnem kanalu, je nekatere ključne lastnosti toka prevzel z enodimenzionalnim pristopom. Ob zanemarjanju trenja je podal enačbo gibalne količine (povzeto po Christodoulou, 1993):

$$p_1b_1 + \rho Q_1v_1 + p_2b_2\cos\theta + \rho Q_2v_2\cos\theta - p^*b_2\cos\theta = p_3b_3 + \rho Q_3v_3$$
(43)

$$b_3 = \mu b_1$$
 (44) $\mu \le 1$ $p_i = 0.5\sigma h_i^2$ (45)

kjer je v_i povprečna hitrost vode v posameznem prerezu, p_i sila hidrostatičnega tlaka na enoto širine kanala, σ specifična teža vode, ρ gostota vode, p* dejanski tlak ob steni, zaradi vpliva glavnega toka na steno bočnega kanala, θ kot sotočja, μ koeficient kontrakcije, b_{1,2} širina dotočnih kanalov in b₃ širina pretočnega prereza na mestu kontrakcije.

Kadar je gladina vode od stranskega kanala pa do preseka 3-3 ravna in horizontalna, velja $p^* = p_2$, tlak s strani pa lahko zanemarimo (predpostavka Taylor, 1944). Bolj verjetna pa je razlaga, da parameter p^* zaseda vrednosti med p_2 in p_3 , tako da velja:

$$p^* = (1 - \gamma)p_2 + \gamma p_3 \tag{46}$$

Pri tem predstavlja γ utežni faktor vrednosti $0 \le \gamma \le 1$, odvisen predvsem od geometrije sotočja pa tudi od režima toka. Vrednost $\gamma = 0$ ustreza preprostemu primeru $p^* = p_2$. Z uporabo p^* in p_2 v enačbi 43, upoštevanjem kontinuitete $Q_3 = Q_1 + Q_2$ in vpeljavo Froudovega števila (i = 1, 2, 3) je izpeljal naslednjo enačbo:

$$Fr_i^2 = \frac{v_i^2}{gh_i} = \frac{Q_i^2}{gb_i^2 h_i^3}$$
(47)

$$1 + \frac{1}{2F_1^2} + \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{4/3} \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^{1/3} \left(\frac{Fr_2}{F_1}\right)^{2/3} \cos\theta \left(1 + \frac{\gamma}{2Fr_2^2}\right) \\ = \left(1 + \frac{Q_2}{Q_1}\right)^{4/3} \left(\frac{Fr_3}{F_1}\right)^{2/3} \left(1 + \frac{1}{2Fr_3^2} + \frac{\gamma}{2Fr_3^2}\frac{b_2}{b_1}\cos\theta\right) \frac{1}{\sqrt[3]{\mu}}$$
(48)

V primeru nastopa vodnega skoka se na lokaciji kontrakcije toka pojavi kritični tok (Fr = 1), dolvodno pa preide v mirni režim. Če na sotočju ne pride do vodnega skoka, se deroči tok dolvodno ohrani ($Fr_3 >$ 1). Najmanjše vrednosti desne strani zgornjih enačb dobimo ob kateri koli vrednosti Q_3 , ko imamo kritični tok. Ob predpostavki, da se vodni skok pojavi na mestu zožitve pretočnega prereza, in posledični predpostavki $Fr_3 = 1$ dobimo naslednje enačbe:

$$\left(1 + \frac{Q_2}{Q_1}\right)^{4/3} - a_2 \left(\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{4/3} \ge a_1 \tag{49}$$

$$a_{1} = \frac{(1+2Fr_{1}^{2})\mu^{1/3}}{Fr_{1}^{4/3}\left(3+\gamma\cos\theta\frac{b_{2}}{b_{1}}\right)} \quad (50) \qquad \qquad a_{2} = \frac{2\left(Fr_{2}^{2}\frac{b_{1}}{b_{2}}\right)^{1/3}\mu^{1/3}\left(1+\frac{\gamma}{2Fr_{2}^{2}}\right)\cos\theta}{\left(3+\gamma\cos\theta\frac{b_{2}}{b_{1}}\right)} \quad (51)$$

Pri znanih vhodnih pogojih lahko določimo Q_2/Q_1 in ugotovimo, ali bo prišlo do vodnega skoka v glavnem kanalu. Pri pravokotnem sotočju je $\theta = 90^\circ$, torej je $cos\theta = 0$ in posledično enako tudi $a_2 = 0$. Pri upoštevanju zgornjih enačb za a_1 in a_2 pa nepomembni parametri postanejo tudi Fr_2 , b_2/b_1 in γ . Ob predpostavki, da je približek $\mu^{1/3} \approx 1$ za vrednost $F_1 = 1,75$, dobimo na podlagi zgornje enačbe $a_1 = 1,126$. Tako dobimo enačbo, ki predstavlja razmerje pretokov, pri katerem nastopi vodni skok:

$$\left(1 + \frac{Q_2}{Q_1}\right)^{4/3} \ge 1,126 \rightarrow \frac{Q_2}{Q_1} \ge 0,093$$
 (52)

Rezultati so pokazali, da zahtevano razmerje Q_2/Q_1 , da se oblikuje vodni skok, narašča skoraj linearno s Fr₁.

Pomembno delo na področju topologije vodne gladine na sotočju predstavlja raziskava Schwalt in Hager (1995), zato jo podrobneje predstavljamo v poglavju 2.8.3. Na podlagi obsežnega nabora scenarijev z dotoki v izrazito deročem režimu toka (Fr ≤ 12) sta za karakterizacijo stoječih valov na sotočju razvila enačbe za brezdimenzijski zapis srednjih vrednosti. Njune enačbe opisujejo povezave med dotočnimi parametri in karakteristikami valov na sotočju na podlagi eksperimentalnega modeliranja sotočja. Kanali so imeli horizontalno dno in pri tem na stiku primarnega in sekundarnega kanala ni bilo stopnje, s kotom sotočja 30° in 60° .



Slika 26: Tlorisni in narisni pogled stoječega valovanja na modelu Schwalt in Hager (1995, sl. 3a, b). Figure 26: Plan and side views of standing waves in the model of Schwalt and Hager (1995, fig. 3a, b).

Do konca prejšnjega stoletja so raziskave večinoma izvajali na fizičnih modelih z uporabo klasičnih merilnih metod ali pa s pomočjo poenostavljenih numeričnih modelov, ki toka ne obravnavajo v vseh treh smereh (torej ne kot 3D hidravlični modeli). Zaradi časovne dinamike (fluktuacij) hitrosti vodnega toka in razgibane vodne gladine s standardnimi eksperimentalnimi metodami ni bilo mogoče izmeriti kompleksnega hitrostnega polja oz. prečnega poteka gladin na obravnavanem območju sotočja, pri poenostavljenih (npr. 2D) numeričnih modelih pa so bile uporabljene po globini povprečene vrednosti po numeričnih celicah, kar je še sprejemljivo pri mirnem režimu toka. Pomembno delo predstavlja raziskava Weber in sod. (2001), ki za 90° sotočja z razmeroma veliko prostorsko ločljivostjo, za nekatere testne primere pa so bili s klasičnimi meritvami (ostno merilo) izmerjeni tudi poteki gladin. Rezultati meritev hitrostnega polja so prosto dostopni, zato so dragoceni za umerjanje in validacijo 3D numeričnih modelov (Weber et al., 2001).

Z razvojem računalništva in visoko zmogljivih hidravličnih numeričnih modelov se je v zadnjem desetletju numerično modeliranje veliko uporabljalo v raziskavah tokovnih razmer na sotočjih. Eno- in dvodimenzionalni numerični izračuni (npr. Kesserwani et al., 2007; Ghostine et al., 2010) sicer kažejo dobro ujemanje povprečnih vrednosti v posameznih kontrolnih prerezih, hkrati pa se je tudi izkazalo, da tudi 3D hidravličnih modeli ne dajejo zadovoljivega opisa poteka gladin v prečni smeri, če pri tem ni natančno podan tudi potek vodne gladine na robnem pogoju. Z natančnim opisom vodne gladine prečno

po strugi pa je mogoče povečati tudi korelacijo ostalih parametrov toka (Bradbrook et al., 2000; Biron et al., 2002). V zadnjem obdobju so se raziskave večinoma osredotočale na meritve hitrostnega polja in lastnosti turbulentnega toka, ki povzročajo spreminjanje batimetrije in premeščanje sedimentov (Biron et al., 2002; Constantinescu et al., 2012; Sharifipoura et al., 2015).

Kljub pomembnosti poznavanja prečnega poteka gladin pa je topologija vodne gladine na sotočju slabo raziskana. Glavne strukture vodnega toka, ki jih ni mogoče določiti na podlagi hitrostnega polja in brez detajlnih meritev poteka gladin prečno na smer toka, so: pas mešanja tokov, prečna lokacija in višina stoječih valov ter potek gladine vode na strani pritoka dolvodno od sotočja, kjer prihaja do vrtinčenja oz. povratnih tokov (Biron et al., 2002). Poznavanje teh struktur je bistveno, kar je pokazala tudi analiza vpliva dviga gladine na zunanji strani krivin oz. analiza sekundarnih tokov prečno na os vodotoka, ki vpliva na razporeditev strižnih sil ob ostenju in posledično na premeščanje sedimentov ter oblikovanje rečne morfologije (Dietrich in Smith, 1983; Dietrich, 1987).

2.8.1 Zasnove eksperimentov raziskav sotočij

Večina preteklih raziskav je pri zasnovi preizkuševališča sotočja izbrala horizontalno dno. To velja tako za eksperimentalne raziskave tokovnih razmer pri mirnem režimu vodnega toka (Taylor, 1944; Weber et al., 2001) kot tudi pri deročem režimu dotokov (Schwalt in Hager, 1995). Zagotavljanje ustreznih tokovnih razmer s spreminjanjem naklona primarnega in sekundarnega kanala namreč narekuje izvedbo zahtevnih detajlov in veliko dodatnega dela na modelu za pripravo drugačnih naklonov po želenih scenarijih. Ob spreminjanju naklonov dna je razmeroma zahtevno ohranjanje ustreznosti geometrijske lastnosti detajlov na samem stiku obeh kanalov.

Želene pretoke in tokovne razmere na dotokih so avtorji raziskav zagotavljali s kontroliranim vodenjem črpalk s frekvenčnim regulatorjem in izvedbo vtoka preko satovja za umiritev mirnega toka (npr. Weber et al., 2001). V raziskavi Schwalt in Hager (1995) pa je bil vtok v deročem režimu na preizkuševališče izveden z iztokom izpod zapornice ter skozi usmerjevalnike toka. Zagotavljanje deročega režima toka na sotočju s spremenljivim naklonom kanalov dotokov kot tudi kanalov od sotočja dolvodnih je izvedel le Mignot s svojo skupino (2008), ki je raziskovala vzorce tokovnih razmer na križišču dveh obcestnih kanalet (slika 27).



Slika 27: Preizkuševališče štirikrakega sotočja, kjer so bile želene tokovne razmere dosežene z nagibanjem kanalov dotoka in odtoka do ± 5 %, dno sotočja pa je vedno horizontalno (Mignot et al., 2011). Figure 27: Apparatus of the four-branch junction, where flow properties were obtained with an inclination of the channels up to ± 5 % (Mignot et al., 2011).

Z naklonom kanalov do ± 5 % so lahko zagotavljali Froudova števila dotokov do Fr $\leq 4,3$. Pri tem pa je treba poudariti, da je bilo dno na območju samega sotočja horizontalno. Spremenljivi nakloni na

dotočnih kanalih lahko na stiku s horizontalnim območjem sotočja dodatno vplivajo na same tokovne razmere oziroma na potek gladine. Na spodnji sliki je prikazan model skupine Mignot (2011).

Pri izbiri dimenzij preizkuševališča so na eni strani vedno omejitveni dejavniki, kot so razpoložljivi prostor laboratorija, zagotavljanje ciljnih vrednosti pretokov s črpalnim sistemom, po drugi strani pa je treba v največji možni meri zmanjšati vpliv velikosti, tj. vpliv sil, ki v praksi niso prevladujoče, na majhnem preizkuševališču s spremenljivimi globinami toka pa dobijo večji vpliv. Večina eksperimentalnih raziskav je bila izdelana na preizkuševališčih s širino kanala med 20 in 50 cm, dolžine pa so variirale glede na vrsto izvedbe dotoka in dolžino želenega območja obravnave. Pri raziskavi Mignot in sod. (2008; 2011), kjer so bile lastnosti toka dosežene s spreminjanjem naklonov kanalov, je bila razdalja med vtokom in sotočjem 2 m, s čimer je bilo zagotovljeno, da se je razvil stalni enakomerni tok pri ciljnem režimu. Nasprotno so se pri modelih s horizontalnim dnom uporabljali dotočni kanali razmeroma kratkih dolžin, s čimer se je zmanjšal vpliv trenjskih izgub in s tem naraščanje globine toka po gladinski krivulji H3. Vpliv trenjskih izgub so poskušali zmanjšati oziroma ga je bilo mogoče zanemariti z uporabo plošč večjih dimenzij (da je bilo čim manj montažnih stikov) iz kaljenega in/ali akrilnega stekla. Po velikosti izvedenega preizkuševališča izstopa eksperimentalna postaja Weber in sod., ki so izdelali preizkuševališče dolžine skoraj 25 m in širine 0,91 m. Ker so se izvajale le simulacije mirnega toka pri analiziranih globinah toka, potrebni pretoki vode niso bili posebej veliki (skupni pretok obeh dotokov je bil $Q \le 170$ l/s).

2.8.2 Primerjava merilnih metod pri raziskavah sotočja

V preteklih raziskavah so se za merjenje gladine vode oziroma globine vodnega toka večinoma uporabljale klasične merilne metode, kot so piezometri, uporovne sonde in ostna merila. Torej so se meritve izvajale predvsem točkovno. Potek gladine preko celotnih prečnih prerezov oziroma iz njih sestavljene topografije pa sta poskušali določiti le dve raziskovalni skupini. Ergenzinger in De Jong (1996) sta za zajem topografije uporabila fotogrametrijo, Biron in sod. pa razdaljemer in čolniček s prizmo (2002).

Ergenzinger in De Jong sta fotogrametrijo uporabila za zajem topografije vodne gladine mirnega toka naravnega vodotoka, pri čemer so bili po površini vode potreseni plavači, za kar so bile uporabljene žogice za namizni tenis. Prostorska ločljivost sicer ni podana, ob upoštevanju velikosti žogice, ki znaša med 38 in 40 mm, pa je seveda odvisna predvsem od števila žogic na enoto površine. Prav tako tudi ni podana merilna negotovost določanja izmere pri metodi topografije. Iz opisa lahko razberemo, da metoda sicer daje dobre rezultate, kljub temu pa je njena uporabnost omejena na razmeroma preproste primere v naravi, ob uporabi manjših plavačev pogojno tudi za laboratorijske poskuse. Zaradi potrebnega dodajanja plavačev metoda ni primerna za uporabo na odprtih vodotokih večjih dimenzij, pogojno pa je primerna za nekatere primere vodne infrastrukture. Zaradi pomembnega vpliva lastnosti vodnega toka je za uspešno izvedene meritve potrebna homogena in zvezna pokritost površine z plavači, kar pa je razmeroma težko doseči v primerih z že nekoliko bolj razburkanim vodnim tokom in še težje ob močnejši dinamiki vodne površine. Kljub osebnemu stiku z avtorjem članka ni bilo mogoče dobiti dodatnih podrobnosti o meritvah, ki jih je izvajala tretja oseba.

Metoda, ki so jo uporabili Biron in sod. (2002), je primerna le za meritve na odprtih vodotokih. Uporabljen je čolniček s prizmo, katere gibanje je spremljano z brežine z razdaljemerom. Gibanje čolnička narekuje dinamika vrhnje plasti vodotoka, je pa v času meritev podvržen še številnim motnjam okolice (npr. veter, valovanje, motnja v toku zaradi stika plavača/čolnička z vodo, nagib čolnička), kar dodatno vpliva na vsakokratni lokalni potek vodne gladine in s tem na merilno negotovost. Vpliva tudi

z obdelavo meritev ni mogoče povsem izločiti oziroma korigirati. Avtorji sicer navajajo merilno negotovost, manjšo od ± 1 mm, kar lahko velja za merilno negotovost meritve uporabljenega razdaljemera, ne pa tudi dejanske merilne negotovosti pri določitvi višine gladine vode. Metoda v primerih velike dinamike vodne gladine ni uporabna kot tudi ne za meritve za laboratorijske potrebe. Na spodnji sliki je shematsko prikazan uporabljeni čolniček in vrsta razdaljemera.



Slika 28: Meritve prečnega poteka gladine na sotočju s prizmo, montirano na čolniček (prirejeno po Biron et al., 2002) in razdaljemerom Leica TC805.

Figure 28: Measurements of the transverse water surface profile with a reflector mounted on the raft (adapted from Biron et al., 2002) and tachymeter Leica TC805.

Pri obeh metodah sicer ne gre za kontaktno metodo meritev, kljub temu pa je bilo potrebno bodisi dodajanje dodatnega medija (plavači) bodisi je v stiku z vodnim telesom čolniček s prizmo. Na ta način pri obeh metodah nekoliko posegamo v gladino vodnega toka in (lahko) dobimo tudi spremenjene tokovne razmere.

2.8.3 Rezultati hidravličnih razmer na sotočju drugih avtorjev v primerjavi z našo raziskavo

Pri zasnovi našega preizkuševališča smo žal lahko upoštevali le rezultate in ugotovitve iz raziskave Schwalt in Hager (1995) ter jih kasneje uporabili tudi za primerjavo z našimi rezultati. Druge raziskave tokovnih razmer pri visokih vrednostih Froudovega števila so večinoma omejene na pojav in analize vodnega skoka, le zgoraj omenjena raziskava pa je obravnavala scenarije tokovnih razmer na sotočju pri višjih Froudovih številih (Fr \leq 12). Prav tako sta avtorja podala tudi povezave med vhodnimi parametri in lastnostmi stoječih valov za sotočja manjših kotov. Zaradi večjega števila fenomenoloških enačb, ki sta jih določila Schwalt in Hager (1995), te tu niso v celoti navedene.

V nadaljevanju so podane enačbe (Schwalt in Hager, 1995) o tistih lastnostih stoječih valov na sotočju, ki jih je mogoče (vsaj v grobem) uporabiti za primerjave z enačbami, ki so bile izpeljane tudi za pravokotno sotočje v sklopu naše raziskave. Na sliki 29 prikazujemo sotočje z oznakami, ki sta jih Schwalt in Hager uporabila pri podajanju enačb. Da bi bile primerjave rezultatov obojih raziskav preglednejše, smo oznake teh avtorjev v kar največji meri uporabili tudi v naših enačbah.



Slika 29: Shematski prikaz sotočja z vrisanimi lastnostmi geometrije, parametri stoječega valovanja in glavna območja (B, C, D) po raziskavi Schwalt in Hager (Hager, 2010; slika 16.43, str. 456). Figure 29: Schematic presentation of a junction with geometric properties, parameters of standing waves and main areas (B, C, D) according to the study of Schwalt and Hager (Hager, 2010; fig. 16.43, p. 456).

 $x \rightarrow$ koordinata vzdolž toka

 $\theta \rightarrow$ kot vala na stiku tokov

 $Y \rightarrow$ razmerje globin

 $\beta \rightarrow$ razmerje širin

 $\Delta \rightarrow$ funkcija kota

 $\delta \rightarrow kot sotočja$

Pri podajanju enačb so uporabljeni naslednji simboli:

- $v \rightarrow$ hitrost toka
- b → širina kanala
- Fr → Froudovo število
- f \rightarrow določitveni parameter Froudovega števila
- $h \rightarrow$ globina toka
- $L \rightarrow$ brezdimenzijska dolžina
- $Z \rightarrow$ brezdimenzijska višina

Indeksi:

$a \rightarrow$ začetek vala	$M \rightarrow$ maksimalna vrednost
$B \rightarrow val B$	o \rightarrow glavni kanal
$C \rightarrow val C$	z ightarrow stranski kanal
$P \rightarrow$ točka sotočja	

In izpeljane veličine:

$$Fr_{o} = \frac{v_{o}}{\sqrt{gh_{o}}} (53) \qquad Fr_{z} = \frac{v_{z}}{\sqrt{gh_{z}}} (54) \qquad Y = \frac{h_{o}}{h_{z}} (55)$$

$$\beta = \frac{b_{z}}{b_{o}} (56) \qquad \bar{h} = \sqrt{h_{o}h_{z}} (57) \qquad \bar{b} = \sqrt{b_{o}b_{z}} (58)$$

$$\Delta = 0,55 + 0,05\delta^{\circ} (59) \qquad f = \frac{2Fr_{o}Fr_{z}}{Fr_{o} + Fr_{z}} (60)$$

Glavne lastnosti stoječih valov na treh območjih opisujejo naslednje enačbe:

• Lokacija maksimalne višine vala C:

$$L_{MC} = \frac{x_{MC} - x_P}{\bar{h}\cos\theta} = 4,3(f-2) \tag{61}$$

• Maksimalna višina vala C:

$$Z_{MC} = \frac{h_{MC}}{\bar{h}} - 1 = 1 + 0.25(f\sin\delta)^2$$
(62)

• Lokacija maksimalne višine vala B:

$$L_{MB} = \frac{x_{MB} - x_P}{b_o} = 1,65 L_{aB}$$
(63)

Pri čemer je:

$$L_{aB} = \frac{x_{aB} - x_P}{b_o} = \frac{1}{\Delta} \frac{Fr_o}{F_z^{1/3}} Y^{2/3}$$
(64)

• Maksimalna višina vala B:

$$Z_{MB} = \frac{h_{MB}}{\bar{h}} - 1 = 0.25f^2 \tag{65}$$

Raziskave hidravličnih razmer na sotočju drugih avtorjev so bile pri našem delu sicer pomembne za širše poznavanje problematike, niso pa služile kot stanje tehnike, ki bi jih naša raziskava nadgradila. Kot omenjeno, je bila večina raziskav omejena na razmere pri mirnem režimu vodnega toka, raziskave, ki so vključevale deroči režim, pa so se osredotočile na nižja Froudova števila (Fr ≤ 2) oziroma je bila tudi zasnova preizkuševališča bistveno drugačna (štirikrako sotočje s tokom s Fr $\leq 4,5$).

3 EKSPERIMENTALNO DELO IN METODE

Eksperimentalno delo je v celoti potekalo v hidravličnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Pri tem smo raziskovalno delo razdelili na dva sklopa. Prvi sklop je bil namenjen verifikaciji merilne metode merjenja gladine z laserskim skenerjem, ki je bila do sedaj na področju vodarstva redko uporabljena, za zajem topografije vodne gladine pa le izjemoma. Z izkušnjami iz prvega sklopa smo v drugem delu pristopili k zajemu topografije vodne gladine na preizkuševališču T-sotočja pri deročem režimu vodnega toka. Podatke topografije smo v nadaljevanju uporabili za določitev topologije – povezav med integralnimi parametri in značilnostmi grebenov stoječih valov (višina in položaj stoječega vala, višina gladin zaradi prečnega vzklona na zunanjem robu primarnega rečnega korita itd.) ter razponom fluktuacij v teh točkah. Za potrditev uporabnosti merilne metode v širši inženirski praksi za zajem topografije vodne gladine smo lasersko skeniranje še dodatno preizkusili pri meritvah spodnje vode v odzračevalni komori na iztoku iz turbine HE Doblar I.

3.1 Meritve vodne gladine z laserskim skeniranjem

Kot je razvidno iz literature, je bilo, kljub sicer širokemu spektru področij uporabnosti, lasersko skeniranje v preteklosti za meritve poteka vodne gladine v laboratorijskih raziskavah uporabljeno le v dveh raziskavah. Tako skupina Blenkinsoppa kakor tudi skupina Allisa (Blenkinsopp et al., 2012; Allis et al., 2011), ki sta metodo že uporabili v laboratoriju, sta svoji raziskavi meritev valovanja opravili v zaprti posodi in pri tem uporabili delce za povečanje motnosti in s tem izboljšanje odbojnosti ter povečali število uspešnih meritev. Ker so bile pri naši raziskavi cilj meritve gladine na območju sotočja, kjer je bil v pogonu zaključen tokokrog z veliko skupne količine vode in črpalkami ter drugimi občutljivimi elementi sistema, dodajanje kakršnih koli delcev za izboljšanje odbojnosti ni bilo mogoče. Prvi sklop meritev smo zato namenili preizkusu delovanja merilne metode pri čisti vodi oziroma ob dodajanju samorazgradljivih barvil, ki bi jih bilo mogoče uporabiti tudi na sistemu z večjo količino vode in občutljivimi elementi.

3.1.1 Meritve gladin stoječe vode – verifikacija merilne metode

Zaradi specifičnosti delovanja merilne metode na vodnih telesih so se v prvi fazi verifikacije merilne metode s posameznim skenerjem opravile meritve v posodi s stoječo vodo, kjer je bilo mogoče natančno določiti referenčni nivo vodne gladine in kontrolirano dozirati različne medije za spremembo stanja vodnega telesa oziroma za izboljšanje odboja. Meritve smo opravili za različne pogoje vodnega telesa, in sicer za: mirno, čisto vodo; čisto vodo z vpihovanjem zračnih mehurčkov na dnu posode; s tankim slojem milnice na vodni površini; z biološkima barviloma in dodatno tudi z uporabo plavačev. Referenčne meritve so bile opravljene z ostnim merilom z merilno negotovostjo $\pm 0,1$ mm za mirno vodo, oziroma ± 1 mm v primeru z vpihovanjem mehurčkov in v primeru s slojem milnice na površini (slika 30). Ničlišče za merjenje z ostnim merilom v vertikalni smeri je bilo dno umirjevalne posode, meritve pa so bile pri različnih primerih opravljene za 10 nivojev.



Slika 30: Sestava eksperimenta: steklena posoda z ostnim merilom, laserskim skenerjem in opremo za vpihovanje mehurčkov.



Pri meritvah z zračnimi mehurčki v vodnem telesu se je zrak vpihovalo na dnu posode. Na ta način smo dosegli, da so bili mehurčki v celotnem vodnem stolpcu. Za dovajanje zraka smo uporabili zračno črpalko, za čim bolj enakomerno strukturo zračnih mehurčkov pa smo na mestu vpiha uporabili perforirane elemente iz umetnega luknjičastega kamna. Pretok zraka je bil konstanten (5 l/min), merjen z rotametrom. Koncentracija mehurčkov je bila tako razmeroma majhna (skupni volumen posode je bil pribl. 40 l), in sicer z namenom, da mehurčki, ki priplavajo na površje, ne bi popolnoma prekrili vodne površine na območju meritev (slika 30). Na območju sotočja vodotokov, ki smo ga obravnavali v drugem sklopu, prihaja do vstopanja zraka v vodno telo prek gladine, kljub temu pa se, zaradi izrazito turbulentnih tokovnih razmer, mehurčki pojavljajo tudi globlje v vodi, pri tem pa se njihova koncentracija zelo razlikuje glede na vhodne parametre toka.

Ker z vpihovanjem zračnih mehurčkov, kot je bilo opisano zgoraj, ni mogoče doseči enakomerne porazdelitve mehurčkov po celotni gladini vode, smo v ta namen pri naslednjem koraku uporabili tanek sloj milnice. Pri meritvah s tankim slojem milnice na vodni površini smo dosegli, da so bili mehurčki povezani v sloj kot pri močno aeriranem vodnem toku (slika 31), z razliko, da pod gladino ni bilo mehurčkov. Pri izrazito dvofaznem toku se v vrhnji plasti ali celo v celotnem vodnem stolpcu pojavlja zmes zračnih mehurčkov, vode in vodnih kapljic. Opne številnih mehurčkov in vodnih kapljic v vrhnji plasti povzročajo močno sipanje vpadle svetlobe in preprečujejo njeno prodiranje v globlje plasti.


Slika 31: Vodna površina, prekrita s tankim slojem milnice (levo), in detajl meritve kote gladine z ostnim merilom (deno).

Figure 31: Water surface covered with a thin layer of soap foam (left) and a detail of a water level measurement using a poing gauge (right).

Z dodajanjem barvil smo, glede na primer s čisto vodo, skušali povečati odbojnost laserskih žarkov in s tem povečati število uspešnih meritev ter razpon kotov, pri katerih bi še prišlo do odboja. Pri tem smo uporabili biorazgradljivi barvili 0,1 % metiloranž ($C_{14}H_{14}N_3NaO_3S$) in 0,4 % timolftalein ($C_{28}H_{30}O_4$). Pri izbiri barvil je bilo eno od glavnih meril sposobnost samorazgradnje, saj bi bilo takšno barvilo primerno oziroma sprejemljivo tudi za dodajanje v sistem preizkuševališča T-sotočja z zaprtim tokokrogom. Pri tem gre na eni strani za velik volumen vodne mase, predvsem pa so v sistem vključeni na kemijske snovi, delce itd. občutljivi elementi, kot so črpalke, tesnila in merilniki pretoka.

Za primer s plavači je bil uporabljen polietilenski granulat, s komercialnim imenom Borealis HE9621PH3-01. S premerom zrn 2 do 3 mm in gostoto 964 kg/m³ ima granulat lastnosti, kot jih priporoča strokovna literatura (Kobus, 1980). Zaradi skupne količine vode v sistemu (pribl. 60 m³) takšni plavači sicer ne bi bili primerni za uporabo na preizkuševališču T-sotočja, smo pa na ta način pridobili vpogled v delovanje merilne metode, ki bi ga lahko uporabili drugje. Gostota plavačev na vodni gladini je bila majhna, saj pri pojavih, kjer ima lasersko skeniranje prednost pred ostalimi merilnimi metodami (razburkana vodna gladina), v praksi ni mogoče doseči velike in predvsem enakomerne gostote pokritosti gladine z delci.

Pri vseh primerih je bilo dno posode od skenerja oddaljeno 1150 mm pri LMS400 oziroma 940 mm pri LMS511. Razpon meritev globin je obsegal vrednosti med 0 in 300 mm, s čimer smo dosegli, da so bile vse meritve izvedene znotraj merilnega območja skenerja. Zaradi odzivnega časa laserskega skenerja je pomembno tudi, da merjena površina ni preblizu naprave.

3.1.2 Zasnova eksperimentalnega modela T-sotočja

Da bi bilo bile meritve primerljive s preteklimi raziskavami in bi omogočale njihovo nadgradnjo, smo preizkuševališče zasnovali podobno kot drugi avtorji Kot je razvidno iz raziskav s podobno tematiko, so bila preizkuševališča zasnovana s širino primarnega in sekundarnega kanala med 0,2 in 0,5 m. Za zmanjšanje vpliva ostenja na tokovne razmere in s tem natančnejše določanje karakteristik valov na sotočju smo preizkuševališče izdelali z dolžino glavnega kanala 6 m in širino 0,5 m. Stranski kanal je bil enake širine in dolžine, tj. 1 m. Da bi na obeh vejah pred sotočjem dosegli enake pogoje, je bil začetek

sotočja na glavnem kanalu prav tako 1 m dolvodno od vtoka (tj. od iztoka iz tlačne posode). Pri pripravi hipoteze smo nameravali preizkuševališče dopolniti s stopnjo na prehodu stranskega kanala v glavnega in s tem povečati število vplivnih parametrov ter število obravnavanih scenarijev. Pri izvedbi meritev se je izkazalo, da lahko tudi pri izvedbi brez stopnje dosežemo dovolj raznoliko dinamiko pojavov na sotočju, poleg tega bi bilo to preoblikovanje razmeroma zapleteno. Stopnje v eksperiment tako nismo vključili, zato to ostaja izziv za naslednje raziskave.



Slika 32: Shema celotnega sistema. Figure 32: Scheme of the entire system.

Ker so bile razmere na sotočju pri deročem toku v preteklih študijah podrobneje analizirane predvsem pri manjših, ostrih kotih med vejama, smo v našem primeru izbrali preizkuševališče s kotom sotočja 90°. Celotno ostenje kanala smo izdelali iz steklenih plošč z minimalnim številom skrbno izdelanih stikov, s čimer se je v največji meri zmanjšala hidravlična hrapavost in možnost odlepljenja tokovnic oziroma vpliv ostenja na tokovne razmere.



Figure 33: Drawing of the measuring station.

Dolžina posameznih dotočnih vej sistema je takšna, da pri nobenem od predvidenih scenarijev (glej točko 3.1.3) na iztoku iz tlačnih posod nismo zaznali gorvodnega vpliva sotočja (t. i. zajezne gladinske krivulje). Hkrati je bila razdalja med vtokom in točko na dolvodnem kanalu, do katere seže vpliv razmer na sotočju, dovolj velika, da se na dotoku lahko polno razvije deroči stalni enakomerni tok in so mogoče meritve karakteristik dotočnih tokov. Dotok iz umirjevalnega bazena v posamezno tlačno posodo oziroma na kanal smo speljali z ločenima cevema (slika 32). Za regulacijo pretoka na preizkuševališče smo vsak vod opremili z zasunom, elektromagnetnim merilnikom pretoka in umirjevalno tlačno posodo z natočnim usmerjevalnikom (slika 33). Na dolvodnem koncu glavnega kanala je bil omogočen prost odtok (slika 34). S prostim odtokom iz kanala, ki je bil dovolj oddaljen od samega sotočja, smo dosegli, da razmere na spodnjem robu niso vplivale na razmere na sotočju oziroma na odseku, kjer so se izvajale meritve. Prek zbirne posode na iztoku iz preizkuševališča se voda vrača v rezervoar in na črpališče hidravličnega laboratorija. Tako je vzpostavljen zaključen obtok vode.



Slika 34: Shema preizkuševališča T-sotočja s prikazom robnih pogojev (vse dimenzije so v mm). Figure 34: Schematics of the apparatus of the T-junction with boundary conditions (all dimensions are in mm).

Za čim boljšo izvedbo meritev in predvsem za zagotavljanje pravilnega delovanja detajlov tlačne posode in stikov na sotočju, doseganje želenih hitrosti vodnega toka in s tem Froudovega števila je bilo dno vseh korit horizontalno, brez spreminjanja nagiba primarnega in sekundarnega (dotočnega) kanala. Serija meritev s spreminjanjem naklona enega, drugega ali obeh odsekov tako ostane izziv za naslednje raziskave. Želene razmere na dotočnih kanalih in na samem sotočju smo zagotovili s kontroliranim vtokom na preizkuševališče preko tlačnih posod, pri katerih je bilo omogočeno spreminjanje višine odprtja (slika 35). Višina odprtja je bila nastavljiva/določena na $\pm 0,1$ mm natančno. Zaradi kratke razdalje med iztokom iz posode in pričetkom mešanja dveh tokov na sotočju lahko prevzamemo, da je višina odprtja enaka debelini dotočnega curka, višini dotoka ali globini toka. V nadaljevanju je u izraz globina toka, merjena od dna do (lokalne) gladine.



Slika 35: Tlačna posoda z loputo za prilagajanje višine odprtja (H_{dotoka}). Figure 35: The pressure vessel with a flap for regulating the height of the inlet jet stream.

Preizkuševališče je bilo opremljeno z nosilno konstrukcijo tirnic, po katerih se je lahko premikal merilni most za montažo različne merilne in dodatne opreme ter z mehanizmom, ki je omogočal ponovljivost meritev v izbranih prečnih prerezih z natančnim lociranjem nameščene merilne opreme (Slika 36). Konstrukcija za namestitev merilne opreme je bila ločeno pritrjena na podnožje, s čimer smo preprečili prenašanje vibracij steklenega dela na merilno opremo in s tem dodatni vir negotovosti meritev.



Slika 36: Nosilna konstrukcija z nameščeno merilno opremo. Figure 36: The frame structure with the mounted measuring equipment.

Konstantni nivo razpoložljive energije v umirjevalnem bazenu je pri različnem odprtju lopute na tlačni posodi na vtoku na preizkuševališče zagotavljal stalni dotok, zaradi nastavljive velikosti odprtine pa različne vrednosti vhodnih parametrov toka. Na mejne vrednosti vhodnih parametrov toka so vplivale tudi energijske izgube na dovodnem cevovodu, ki so bile predvsem odvisne od pretoka (hitrosti) vode in s tem linijskih in lokalnih energijskih izgub. Kot je prikazano na spodnjem grafikonu, je bilo pri majhnih globinah dotoka (1 cm) - kljub razmeroma majhnemu maksimalnemu pretoku – mogoče doseči Froudova števila tudi preko 20, medtem ko je maksimalno Froudovo število pri odprtju 5 cm – kljub bistveno večjemu maksimalnemu pretoku, a večji porabi energije na dotoku –, že padlo pod vrednost Fr < 4 (preglednica 1 in slika 37).

globina dotoka H _g =H _s [mm]	maksimalni doseženi pretok [m ³ /s]	maksimalni doseženi pretok [l/s]	maksimalna hitrost [m/s]	maksimalno Froudovo število
10	0,04	35	7,00	22,35
20	0,05	48	4,81	10,85
30	0,06	56	3,76	6,93
40	0,06	62	3,10	4,94
50	0,07	65	2,61	3,73
60	0,07	67	2,24	2,92

Preglednica 1: Maksimalne vrednosti pretoka in Froudovega števila pri različnih globinah dotoka. Table 1: Maximum values of discharge and Froude numbers at different depths of incoming flows.

Maksimalne vrednosti vhodnih parametrov preizkuševališča so podane tudi v preglednici 1. Vrednosti bo mogoče pri nadaljevanju raziskav povišati s povečanjem razpoložljivega energijskega potenciala, kar bi bilo mogoče izvesti z direktnim priklopom cevovoda iz črpalke, prek zasuna in elektromagnetnega merilnika pretoka na tlačno posodo z vtokom na preizkuševališče, konstanten pretok pa zagotavljati z regulatorjem frekvence črpalke.



Slika 37: Maksimalne vrednosti parametrov, ki jih je bilo mogoče doseči pri različnih nastavitvah višine odprtja lopute na tlačni posodi.

Figure 37: The maximum parameter values that could be achieved at different setting of opening heights of the pressure vessel flap.

Vrednosti, razvidne iz preglednice 1 in slike 37, predstavljajo mejne vrednosti pri opredelitvi nabora scenarijev opravljenih meritev. Zasnova in opis scenarijev sta podana v naslednjem podpoglavju.

3.1.3 Opis scenarijev tokovnih razmer na preizkuševališču T-sotočja

Pri scenarijih analiziranih tokovnih razmer na preizkuševališču T-sotočja z meritvami topografije, s pomočjo katerih bi bilo mogoče v nadaljevanju opredeliti in izmeriti glavne strukture vodnega toka na sotočjih in njihove glavne značilnosti pri deročem režimu, so izhodišče predstavljale pretekle raziskave na tem področju. Iz pregleda literature lahko sklepamo, da sta po tokovnih parametrih primerljivo raziskavo opravila le Schwalt in Hager (1995), ostale raziskave pa so bile omejene na deroči tok pri nižjih vrednostih Froudovih števil. Schwalt in Hager sta izvedla meritve pri deročem toku s $Fr \leq 12$, pri tem pa sta se omejila na sotočja z manjšimi koti med osmi obeh dotočnih kanalov. Zato sta avtorja raziskave tako tudi veljavnost svojih rezultatov omejila na sotočja pri kotih, manjših od 60°. Razpon vrednosti Froudovih števil pri našem eksperimentu je dosegel podobne vrednosti, kot smo omenili pri opisu preizkuševališča, pa je bilo modelirano pravokotno sotočje.

Geometrijske lastnosti preizkuševališča in hidravlične zmožnosti sistema so narekovale območje kombiniranja vrednosti parametrov, ki jih je bilo mogoče spreminjati. Pri fiksni širini dotočnih kanalov so se tako kot geometrijski parameter na posamezni tlačni posodi spreminjale višine odprtja in s tem količina dotokov. Pri izbranih globinah dotokov so se s pomočjo izmerjenega pretoka lahko določale še lastnosti toka med vtokom in sotočjem (hitrost in Froudovo število).

Scenarije lahko razdelimo v tri sklope. V prvem so se lastnosti toka spreminjale pri enakih globinah obeh dotokov. Zaradi možnosti zagotavljanja dovolj visokih Froudovih števil so bile pri tem višine tokov med 10 in 30 mm. Kot je razvidno iz slike 35 in preglednice 1, pri višini odprtja lopute na tlačni posodi nad 30 mm največja dosegljiva Froudova števila že padejo pod 5, kar zaradi slabljenja energije dotokov pri 90° sotočju ne omogoča več razpona za analize ciljnih tokovnih razmer. Razponi vrednosti nastavljivih parametrov, upoštevanih v merjenih scenarijih, so podani v preglednici 2.

Lav	se 2. The values of the input parameters in the scenarios with the same depuis of the medining not								
		$h_1 = h_2 = 10 mm$	$h_1 = h_2 = 15 mm$	$h_1 = h_2 = 20 mm$	$h_1 = h_2 = 25 mm$	$h_1 = h_2 = 30 mm$			
	Fr – glavni kanal	4–12	4–12	4–10	4–9	4–7			
	Fr – stranski kanal	2–12	2–12	2–9	2–8	2–7			
	Število primerov	15	26	22	16	22	Skupaj: 101		

Preglednica 2: Vrednosti vhodnih parametrov pri scenarijih z enako globino obeh tokov. Table 2: The values of the input parameters in the scenarios with the same depths of the incoming flows.

V drugem sklopu smo poleg tokovnih razmer obeh dotokov spreminjali globino stranskega toka v razmerju z višino toka v glavnem kanalu (preglednica 3). Pri enakih lastnostih toka dotokov (hitrost, Froudovo število) in njuni različni višini je mogoče analizirati vpliv razmerja gibalne količine dotokov na strukturo vodnega toka na sotočju.

Preglednica 3: Vrednosti vhodnih parametrov pri scenarijih s spreminjanjem globine stranskega toka. Table 3: The values of the input parameters in the scenarios with various depths of the incoming flows in the side channel.

	$h_I = 30 mm$	$h_I = 30 mm$	$h_I = 30 mm$	
	$h_2=10 mm$	$h_2=20 mm$	$h_2=30 mm$	
Fr – glavni kanal	3–7	4–12	1–7	
Fr –stranski kanal	1–12	3–7	2–7	
Število primerov	17	14	22	Skupaj: 53

Po analogiji z drugim sklopom smo v tretjem sklopu raziskav spreminjali globino toka po glavnem kanalu. Analizirani scenariji so podani v preglednici 4.

Preglednica 4: Vrednosti vhodnih parametrov pri scenarijih s spreminjanjem globine glavnega dotoka. Table 4: The values of the input parameters in the scenarios with various depths of inflow in the main channel.

	$h_l = 10 mm$	$h_1 = 20 mm$	$h_1 = 30 mm$	
	$h_2=30 mm$	$h_2=30 mm$	$h_2=30 mm$	
Fr – glavni kanal	1–12	1–11	1–7	
Fr – stranski kanal	3–7	3–7	2–7	
Število primerov	17	18	22	Skupaj: 57

Kot omenjeno, je bil iztok iz preizkuševališča omogočen kot prost odtok iz glavnega kanala. Vpliva spodnjega robnega pogoja tako nismo analizirali. Preko tokovnih razmer in energijskih izgub na sotočju se je dolvodno vzpostavila konjugirana globina toka v mirnem režimu oziroma povečana globina deročega toka, pri tem pa je bil odtok iz kanala dovolj oddaljen od območja meritev, da te niso bile pod vplivom spodnjega robnega pogoja.

Seznam vseh scenarijev, katerih topografija je bila zajeta vzdolž sotočja, je podan v prilogi B. Za posamezni scenarij so podani tudi ključni parametri in veličine.

3.1.4 Terenske meritve spodnje vode na hidroelektrarni Doblar I

Namen terenskih meritev je bil predvsem verifikacija merilne metode tudi za širšo inženirsko prakso, kjer dajejo druge merilne metode le delno zadovoljive rezultate. Takšen primer so tudi meritve spodnje vode pri pretakanju preko HE objektov. Zgolj meritev v eni točki dolvodno od pregrade (npr. v zatišni legi, če obstaja) ne vsebuje dovolj sporočilnosti, da bi z meritvami lahko izvrednotili dejanske razmere (npr. pretoke po prelivnih poljih). Razmere dolvodno od pregrado oz. na manevriranje z zapornicami (da se višina vode pred pregrado ne dvigne nad omejitev).

V primeru merjenja gladine spodnje vode na HE pri visokih vodah je problem izrazito specifičen in se močno razlikuje od običajnih meritev vodostajev na vodotokih. Prav tako so natančne meritve spodnje vode pomembne pri obratovanju strojnice HE. Moč hidroelektrarne je poleg izkoristka turbine in pretoka odvisna tudi od razpoložljive višinske razlike med gladino vode na gorvodni strani HE in nivojem proste gladine na iztoku. Ob znanem pretoku in natančno izmerjenem nivoju vode na gorvodni strani je za določitev izkoristka turbine potrebna še natančna meritev spodnje vode. Ker na iztoku iz turbine navadno prihaja do turbulentnega toka, je natančnost meritve spodnje vode pogosto vprašljiva. Poleg tega sme vodna turbina delovati zgolj pri dovolj velikem padcu in jo mora operater ob visokih vodah izključiti. Meritve na HE Doblar I niso bile izvedene pod prelivnimi polji, temveč v odzračevalni komori agregata II, kjer se prav tako pojavlja gladina vode z veliko dinamiko, hkrati pa je bilo mogoče rezultate verificirati z meritvami z drugimi merilnimi metodami.



Slika 38: Meritve spodnje vode v odzračevalni komori HE Doblar I, kjer se pojavi dvofazni tok. Figure 38: Measurements of the tailwater level in the vent chamber of HPP Doblar I, where two-phase flow occurs.

Odzračevalna komora je neposredno dolvodno od sesalne cevi, njena funkcija pa je odvajanje zraka, s čimer se preprečuje nastanek zračnih žepov in s tem zmanjšana pretočna sposobnost odvodnega rova (slika 38). Zaradi postavitve ob koncu sesalne cevi odzračevalna komora predstavlja najboljše mogoče mesto za meritve spodnje vode (Hočevar et al., 2014).

Za primerjavo meritev z laserskim skenerjem smo, poleg meritev s tlačno sondo, dodatno izvedli še snemanje nihanja vodne gladine z industrijsko kamero. Podrobneje meritve s kamero opisujemo v poglavju 3.2.6.

3.2 Uporabljena merilna in programska oprema

Merilna oprema, ki smo jo uporabili v hidravličnem laboratoriju in terenskih meritvah, se deli na regulacijski del, namenjen nastavitvam preizkuševališča in zagotavljanju ter spremljanju želenih vhodnih parametrov, in del, ki je namenjen merjenju veličin samih pojavov. Na sliki 39 je na preizkuševališču sotočja prikazano jedro merilne opreme, uporabljene pri meritvah na T-sotočju. Z njo so bili nastavljeni vhodni parametri pri posameznem scenariju, po ustalitvi tokovnih razmer pa je bila zajeta topografija vodne gladine na območju raziskav.



Slika 39: Merilna oprema, uporabljena na preizkuševališču T-sotočja. Figure 39: Measuring equipment used on the T-junction apparatus.

3.2.1 Distančniki za nastavitev globine tokov v obeh kanalih

Lastnosti toka na dotočnem delu obeh vej preizkuševališča T-sotočja je pri nastavljenem oz. izbranem pretoku narekovala globina toka, ki je bila določena z višino odprtja lopute na iztoku iz tlačne posode na preizkuševališče. Kot edini parameter, s katerim se je spreminjala geometrija dotočnega deročega toka, se je določala z največjo možno natančnostjo. V ta namen so bili za posamezne izbrane višine odprtij, predvidenih v naboru scenarijev, izdelani distančniki z natančnostjo ±0,01 mm.

3.2.2 Merilnika pretoka

Poleg globine tokov iz obeh tlačnih posod je bil edini merjeni oziroma neposredno nastavljivi parameter pretok v posamezni dovodni cevi. Iz obeh podatkov in ob znani konstantni širini korita sta bila lahko računsko določena povprečna hitrost toka in Froudovo število. Pretoke smo merili z elektromagnetnima merilnikoma pretoka ABB FlowMaster DN150 (slika 40).



Slika 40: Na obeh dotočnih ceveh na preizkuševališče je bil pretok merjen z merilnikoma pretoka ABB FlowMaster z nazivnim premerom 150 mm.

Figure 40: At both inflow pipes to the experiment, the discharge was measured using the flowmeters ABB FlowMaster with a nominal diameter of 150 mm.

Nazivna merilna negotovost pri standardni kalibraciji v območju meritev je $\pm 0,4$ % (ABB, 2014). Ker je bila natančnost in zanesljivost merilnika pretoka ključnega pomena za opis posameznega scenarija, smo pred začetkom meritev izvedli verifikacijo merilne negotovosti obeh merilnikov pretoka s pravokotnim ostrorobim prelivom, izdelanim v skladu s standardom ISO 1438:2008 (slika 41), ki ob natančni izvedbi omogoča meritve z merilno negotovostjo, manjšo od ± 1 %, v celotnem razponu merilnega območja. Dimenzije ostrorobega preliva so bile izbrane glede na zahteve standarda in želenih vrednosti pretokov. Izbrana je bila izvedba s širino prelivne krone 250 mm, tj. polovice širine kanala (500 mm). Ostrorobi preliv je bil montiran povsem na konec modela, na mestu siceršnjega prostega odtoka. Na ta način smo – tako za dotok iz glavnega kanala kot tudi iz stranske veje preizkuševališča – zagotovili razvoj stalnega enakomernega toka, brez vpliva motenj tokovnic na mestu sotočja, in hkrati tudi meritve gladine na več kot trikratni razdalji višine preliva gorvodno od preliva.





Slika 41: Verifikacija merilnikov pretoka je bila izvedena s pravokotnim ostrorobim prelivom, izdelanim po standardu ISO 1438:2008, montiranim na iztoku iz preizkuševališča.

Figure 41: Verification of the flowmeter was carried out using a rectangular-notch, thin-plate weir made according to the ISO 1438:2008 standard, mounted at the experiment outflow.

Za oba merilnika, tj. na dovodu na glavni oziroma stranski kanal, so bile opravljene meritve pri več pretokih (10 oziroma 9). Vse meritve in primerjava izmerjenih pretokov EM-merilnikov ter standardiziranega ostrorobega preliva so podane v preglednici 5.

Preglednica 5: Verifikacija EM-merilnika	pretoka na	dovodu na	glavni ir	ı stranski	kanal s	s pravokotnim
ostrorobim prelivom s širino preliva B/2 = 2	25 cm.					

Table 5: Verification of the EM flowmeter inflow pipe to the main and side channels using the rectangular
notch, thin-plate weir with a width of $B/2 = 25$ cm.

EM	EM-merilnik pretoka na dovodu na glavni kanal					EM-merilnik pretoka na dovodu na stranski kanal							
meritev	H _{izmerjena} [mm]	H _{preliv} [mm]	Q _{preliv} [l/s]	Q _{ЕМ} [l/s]	Q _{ЕМ} [m ³ /h]	Razlika [%]	meritev	H _{izmerjena} [mm]	H _{preliv} [mm]	Q _{preliv} [l/s]	Q _{ЕМ} [l/s]	Q _{ЕМ} [m³/h]	Razlika [%]
1	181,2	36	3,06	3,11	11,2	1,64	1	182,2	37	3,19	3,22	11,58	0,86
2	187,5	42,3	3,90	3,94	14,2	1,18	2	191,2	46	4,42	4,40	15,85	-0,41
3	195,9	50,7	5,12	5,18	18,65	1,27	3	199,3	54,1	5,64	5,56	20	-1,48
4	206,3	61,1	6,77	6,75	24,3	-0,26	4	220,4	75,2	9,24	9,13	32,85	-1,25
5	218,6	73,4	8,91	8,88	31,95	-0,41	5	235,1	89,9	12,08	11,90	42,85	-1,46
6	236,4	91,2	12,34	12,40	44,65	0,49	6	250,2	105	15,25	15,15	54,55	-0,61
7	252,2	107	15,68	15,72	56,6	0,24	7	266,3	121,1	18,88	18,83	67,8	-0,27
8	261,6	116,4	17,80	17,72	63,8	-0,41	8	276,8	131,6	21,39	21,36	76,9	-0,15
9	276,9	131,7	21,42	21,33	76,8	-0,39	9	287,9	142,7	24,16	24,08	86,7	-0,30
10	289,7	144,5	24,61	24,68	88,85	0,27							

Ker je bila verifikacija izvedena na T-modelu pri mirnem režimu vodnega toka, so bili večinoma preverjeni nižji pretoki, kot so bili kasneje uporabljeni pri obravnavanih scenarijih deročega toka. Pretoki so bili tako na spodnjem delu merilnega območja merilnikov, zato se predvsem pri nižjih pretokih v preglednici 5 kaže nekoliko večja razlika, vendar pa je ta še vedno manjša, kot jo navaja proizvajalec. Merilna negotovost pri pretokih skozi uporabljeni merilnik med 3,2 in 42 m³/h znaša ± 2 % (ABB, 2014). Ob upoštevanju rezultatov meritev verifikacije in primerjave s proizvajalčevo nazivno

merilno negotovost smo privzeli, da dejanska merilna negotovost v območju meritev pretokov, simuliranih pri raziskovanih scenarijih, na T-modelu znaša $\pm 0,4$ % trenutne merjene vrednosti pretoka.

3.2.3 Meritve gladine z ostnim merilom

Pri verifikaciji posameznega skenerja pri meritvah stoječe vode v posodi so bile referenčne vrednosti nivoja vodne gladine opravljene s preprosto, a natančno klasično merilno metodo – ostnim merilom z nonijem.



Slika 42: Referenčne meritve stoječe vode v posodi so bile izvedene z ostnim merilom. Figure 42: Reference measuremenents of the standing water in the tank were taken with a point gauge.

Ostno merilo sodi med dotikalne metode, kar pa pri stoječi vodni gladini ne vpliva na merilno negotovost meritev. Pri tem lahko pri določanju prave vrednosti v primeru čiste, stoječe vode oziroma pri dodanih barvilih upoštevamo merilno negotovost ± 0.1 mm, za primera z mehurčki in slojem milnice, kjer je na gladini sloj mehurčkov, pa ± 1 mm. Na zgornji sliki (slika 42) je prikazano ostno merilo pritrjeno na posodo, v kateri smo izvajali meritve stoječe vode.

3.2.4 Meritve s hitro kamero za določitev gladine z analizo slikovnih sekvenc

Drugi del verifikacije laserskih skenerjev smo opravili na preizkuševališču T-sotočja pri izbranem scenariju z različno dinamiko vodne gladine. Ker večina uveljavljenih merilnih metod (UV-tipala, ostno merilo, uporovna sonda ipd.) v primerih toka z močno vertikalno dinamiko vodne gladine in pojavu dvofaznega toka ne daje zadovoljivih rezultatov, smo za določitev referenčnih vrednosti gladine analizirali slikovne sekvence. Nihanje vodne gladine smo snemali s hitro kamero, v vodni tok pa postavili tanko kovinsko letvico z merilom, katerega vpliv pri danih tokovnih razmerah lahko zanemarimo (slika 43). Vodna gladina tik ob merilu je bila, zaradi lažje kasnejše obdelave slik, predvsem pa zaradi večje ločljivosti, osvetljena z laserskim snopom. Za osvetlitev smo uporabili laser z močjo 5 mW in valovno dolžino med 400 in 710 nm. Pri snemanju smo uporabili hitro kamero Casio EX-F1, ki omogoča snemanje s frekvenco do 300 slik na sekundo. Snemanje vodne gladine smo izvedli pri frekvenci 60 slik na sekundo in z ločljivostjo 1920 × 1080 slikovnih točk. Posnemanje v vsaki točki za vsak scenarij je potekalo v trajanju 10 s. Video posnetke smo nato obdelali z algoritmom za določitev srednje vrednosti in fluktuacij v programskem okolju Matlab, kot je predstavljeno v podpoglavju 3.3.1. Pri meritvah je bila kamera pritrjena na stojalu ob preizkuševališču.



Slika 43: Določanje nivoja vodne gladine z analizo slik – uporaba hitre kamere in merila, potopljenega v vodo.

Figure 43: Determination of the water level with image analysis – using a high-speed camera and a ruler immersed in the water.

Lokacije prerezov na območju sotočja, v katerih smo izvedli referenčne meritve z analizo slik, so prikazane na sliki 44. Prečni prerezi so bili 300, 800, 1300 in 1800 mm dolvodno od pričetka sotočja. Meritve smo izvedli za primer, ko na sotočje dotekata toka z isto globino na obeh vejah (20 mm), vendar z različnima Froudovima številoma, na glavnem kanalu Fr = 8,5 oziroma Fr = 5,6 na stranskem kanalu.



---- Kontrolni prečni prerezi, merjeni tudi z analizo slik

Slika 44: Lokacije prečnih prerezov, v katerih je bilo lasersko skeniranje verificirano z analizo slik (vse dimenzije so v mm).

Figure 44: Locations of the cross sections at which laser scanning was verified with image analysis (all dimensions are in mm).

3.2.5 Meritve poteka gladine z laserskim skenerjem

V celotni sklop meritev z laserskim skenerjem so bile vključene tri naprave, vse namenjene industrijski uporabi. Uporabljeni so bili laserski skenerji proizvajalca SICK AG, in sicer LMS111, LMS400 in LMS511 (slika 45). Za ugotovitev širše uporabnosti, tako za laboratorijske kot tudi terenske meritve, so bili uporabljeni laserski skenerji z različnimi lastnostmi (doseg merjenih objektov, merilna negotovost, valovna dolžina laserskih žarkov itd.). Glavne tehnične lastnosti uporabljenih laserskih skenerjev so podane v razpredelnici 6.

	Frekvenca	Razpon	Kotna	Delovno	Sistematična	Naključna	Valovna	Promor locorskogo spopo		
	skeniranja	meritev	ločljivost	območja	napaka	napaka	dolžina			
	[Hz]	[°]	[°]	[m]	[mm]	[mm]	[nm]	[IIIII]		
LMS111	25 ali 50	270	0,25 in 0,5	0,5–50	±30	±12	905	razdalja*0,015 rad + 8		
LMS400	270-500	70	0,1–1,0	0,7–3	±4	±3	650	1–2		
LMS511	25-100	190	0,16–1,0	0-80	±25	±6	905	razdalja*0,011 rad + 13		

Preglednica 6: Tehnične lastnosti laserskih skenerjev, uporabljenih za meritve. Table 6: Technical characteristics of the laser scanners used for measurements.



Slika 45: Meritve so bile izvedene z industrijskimi laserskimi skenerji LMS111 (levo), LMS400 (v sredini) in LMS511 (desno) proizvajalca SICK AG.

Figure 45: Measurements were carried out with industrial laser scanners LMS111 (left), LMS400 (in the middle), and LMS511 (right) manufactured by SICK AG.

Kot je razvidno iz preglednice o tehničnih lastnosti uporabljenih skenerjev, je bistvena razlika v območju meritev in točnosti merilnega instrumenta. Pri laserskih skenerjih LMS111 in LMS511 nazivni podatki o točnosti merilnega instrumenta veljajo za območje meritev, kot so bile opravljene v sklopu eksperimenta (oddaljenost objektov do 10 m). Medtem ko sta laserska skenerja LMS111 in LMS511 namenjena tudi zunanji uporabi in merjenju objektov na večjih razdaljah, je LMS400 namenjen predvsem za notranjo uporabo, kjer razdalje ne presegajo 7 m. Temu sorazmerne so tudi sistematične in naključne napake, ki so bistveno manjše pri LMS400. Glede na to, da je v raziskavi šlo večinoma za laboratorijske meritve, v odzračevalni komori HE Doblar pa so bile merjene razdalje tudi le do 10 metrov, delovno območje ni predstavljalo omejitvenega faktorja, pomembno pa bi napaka meritev lahko vplivala na rezultate. Pomembna razlika je tudi pri frekvenci skeniranja. Medtem ko ima LMS111 najmanjši izbor kombinacij frekvence skeniranja (25 ali 50 Hz) in kotne ločljivosti (0,25° in 0,5°), ima LMS511 možnost izbire frekvence skeniranja 25–100 Hz in kotne ločljivosti 0,1667° do 1,0°, LMS400 pa med 270 in 500 Hz in kotni ločljivosti od 0,1° do 1,0°. Pri tem niso mogoče vse kombinacije. Z večanjem frekvence snemanja se zmanjšuje možnost izbire večje kotne ločljivosti. Pri LMS511 je pri

frekvenci 100 Hz največja možna kotna ločljivost 0,67°. Pri LMS400 je pri kotni ločljivosti 0,2° mogoče nazivno stopnjo merilne točnosti doseči tudi še pri 290 Hz oziroma 500Hz pri kotni ločljivosti 0,4°.

Za meritev z LMS400, ki uporablja vidni spekter svetlobe, je na sliki 46 prikazano potovanje svetlobnega signala (laserskega žarka). Pri snemanju je bila uporabljena hitra kamera s časom odprtosti zaslonke 50 μ s (20.000 slik na sekundo), frekvenca skeniranja pri kotni ločljivosti 0,2° pa je bila 269,8 Hz. Pas osvetlitve na posamezni sliki prikazuje osvetljenost petih svetlobnih impulzov laserskega skenerja. Pri upoštevanju razdalje merjene ravne površine na oddaljenosti 540 mm na prikazanem primeru laserski skener v času odprtosti zaslonke opravi meritve v razponu 1° in pri tem izmeri 5 točk na merilnem odseku dolžine 16 mm.



17.11.2016 7:46:17 -1692.6[ms] 000000006 HiSpec 4 Fastec 816x82 @ 18900fps 50µs IOs: D1:0

Slika 46: Potovanje impulzov laserja preko merjene površine na razdalji 540 mm (frekvenca skeniranja 269.8 Hz in kotna ločljivost 0,2°, čas zajema posamezne slike je 50 µs), kjer je osvetljeni del na posamezni sliki dolžine pribl. 16 mm.

Figure 46: Travelling of the laser across the measured surface at a distance of 540 mm (scanning frequency is 269.8 Hz and angular resolution 0.2° , shutter speed of each frame is 5 µs), where each illuminated part in an individual image is 16 mm long.

Kot bo kasneje predstavljeno v rezultatih, je bilo pri določanju vodne površine s povprečenjem merjenih vrednosti za kompleksen primer prečnega poteka gladine boljše rezultate mogoče doseči pri večji kotni ločljivosti. Tehnične lastnosti laserskih skenerjev LMS111 in LMS511 so zelo podobne, delujeta pri enaki valovni dolžini, zato je točnost meritev odvisna predvsem od sistematičnih in naključnih napak. Laserska skenerja LMS400 in LMS511 je za čas meritev v laboratoriju posodil distributer merilne opreme SICK za Slovenijo. Ker v času meritev na HE Doblar I omenjena laserska skenerja nista bili na voljo, smo uporabili lastni laserski skener LMS111. Pri tem glavni cilj ni bila dosežena točnost, temveč

predvsem potrditev uporabnosti merilne metode v praksi in prikaz njenih prednosti pred ostalimi merilnimi metodami ter meritev višine spodnje vode.

Poleg naključnih napak se pri vseh treh laserskih skenerjih pojavlja tudi sistematična napaka. Za preprečitev vnosa sistematične napake v točnost meritev oziroma za zmanjšanje njenega vpliva smo pred vsakim sklopom meritev izvedli meritev testnega polja na znani razdalji.

Pri laboratorijskih meritvah gladine v posodi s stoječo vodo in pri testnih meritvah v izbranih prečnih prerezih na območju meritev na preizkuševališču smo v sklopu verifikacije na obeh skenerjih uporabili različne kombinacije frekvence snemanja in kotne ločljivosti. Iz analize rezultatov meritev pa je bil nato izbran najprimernejši laserski skener in tudi njegove nastavitve za zajem topografije vodne gladine pri celotnem naboru scenarijev. Pri tem je bil izbran laserski skener LMS400 s frekvenco snemanja 269,8 Hz in kotno ločljivostjo 0,2°. Skupno število izmerjenih profilov gladine vode na posamezni lokaciji je bilo 6000. Žarišče laserskega skenerja je bilo oddaljeno 1150 mm od dna posode pri meritvah stoječe vode oziroma 1155 mm od dna preizkuševališča pri meritvah scenarijev.

Pri meritvah spodnje vode HE Doblar v odzračevalni komori je laserski skener LMS111 deloval s kotno ločljivostjo 0,5° in frekvenco 50 Hz. Pri meritvah posamezne delovne točke, ki je trajala 5 minut, je laserski skener posnel 15000 zaporednih profilov višine vode.

Uporabljeni laserski skenerji lahko za posamezni oddani signal sprejmejo do tri njegove odboje. Ker gre pri pojavu, kot smo ga obravnavali v našem primeru, pri drugem in tretjem povratnem signalu istega oddanega signala večinoma za odboj od dna, od mehurčkov globlje v vodnem telesu ali celo za odboj preko več ploskev pred vrnitvijo na sprejemnik, smo pri meritvah upoštevali le prvi dobljeni povratni signal. Za posamezni odboj, ki ga je laserski skener prejel, je bila zabeležena tudi jakost odboja.

3.2.6 Meritve referenčnih vrednosti gladin na HE Doblar I s hitro kamero

Podobno kot referenčne meritve na preizkuševališču T-sotočja pri deročem toku smo tudi kontrolo meritev v odzračevalni komori HE Doblar I opravili z industrijsko RGB-kamero. Vrednosti vodostajev smo na podlagi video posnetkov nato odčitali z merilne skale, izrisane na stenah odzračevalne komore. Kote so bile umerjene iz reperja, postavljenega v odzračevalni komori na višini tlačne sonde SENG-a in Turboinštituta. Reper je bil postavljen na Rsc1 = 102.248 m n. v. Za zagotovitev zadostne osvetljenosti, potrebne za snemanje s hitro kamero, je bila na drogu poleg kamere in laserskega skenerja vgrajena tudi LED-luč s tremi moduli 7 x CREE XM-L U2 z visoko svetilnostjo z DC-napajalnikom. Uporabljena je bila hitra kamera Basler acA1300-30gc z objektivom C mount 5 mm megapixel proizvajalca Computar in ločljivostjo 1294 točk × 964 točk. Zaslonka in gorišče sta bila nastavljena predhodno in se med meritvijo nista spreminjali. Kamera je bila vgrajena v vodoodporno ohišje. Mesto vgradnje kamere je prikazano na sliki 38 desno, in je poleg LED-luči.

3.2.7 Programska oprema za zajem in obdelavo meritev

V različnih programskih okoljih so bile spisane programske kode za komunikacijo z merilno opremo, zajem in obdelavo podatkov. Pri tem sta bili uporabljeni predvsem programski okolji National Instruments LabView za komunikacijo z laserskimi skenerji in hitro kamero ter Matlab za kasnejše obdelave podatkov.

• Uporabniški vmesniki LabView

Osnovni uporabniški vmesnik za komunikacijo z laserskim skenerjem LMS111 je bil razvit na platformi LabView. Za opravljanje meritev je bil program nadgrajen za zajem meritev tudi z LMS400 in LMS511. Predvsem pri LMS400 so se, zaradi visokih frekvenc skeniranja in velike količine podatkov, pojavile težave z zapisovanjem in shranjevanjem merjenih podatkov na računalnik, zato je bila dodatno opravljena optimizacija komunikacije zelo pomembna. Program je deloval tako, da je ustrezno nastavitvam na laserskem skenerju skonfiguriral vmesnik TCP/IP, poslal telegram skenerju za začetek merjenja, potem pa je v rednih časovnih intervalih z vmesnika TCP/IP bral zaporedne telegrame, ki so vsebovali informacijo o oddaljenostih in jakosti odboja za vsak merjeni kot.

Prav tako je bil v LabView okolju izdelan tudi vmesnik za posnemanje in analizo slik meritev z industrijsko s hitro kamero na HE Doblar I. Program je omogočal komunikacijo s kamero prek vmesnika TCP/IP, konfiguracijo kamere, nastavitev vseh parametrov delovanja kamere, branje zaporednih slik in shranjevanje na disk.

• Programske kode Matlab

V programskem okolju Matlab smo spisali lastno programsko kodo za branje podatkovnih nizov meritev z laserskim skenerjem, njihovo filtriranje, obdelavo, analizo, prikaz in shranjevanje. Rezultati obdelav z ustreznimi algoritmi razmeroma obsežnih nizov podatkov v obliki oblakov točk so bili predstavljeni v obliki poteka gladin v prečnih prerezih kot konstrukcije 3D mrežnih modelov topografije in numeričnih vrednosti izvrednotenih glavnih značilnosti grebenov stoječih valov.

Matlab programska koda je bila uporabljena tudi za obdelavo posnetkov s hitro kamero in iz njih za določanje višine vode na posamezni sliki posnetka, kot tudi njene srednje vrednosti ter nihanja. Algoritem za določanje višine vode na posamezni sliki je deloval na podlagi razlik v jakosti sivih odtenkov. Algoritem je v vsakem stolpcu matrike slike določil slikovno točko z najvišjo binarno vrednostjo sivine. Z linijo, ki povezuje točke najvišjih vrednosti v zaporednih stolpcih, je opisan potek gladine na posamezni sliki.

3.3 Primer obdelave merjenih veličin

Za lažje razumevanje izvrednotenja veličin, izmerjenih s posamezno merilno metodo, v nadaljevanju podajamo opise obdelav, ocenili pa smo tudi njihovo merilno negotovost. Pri tem je poudarek na merilni metodi z analizo slik in laserskim skenerjem. Pri obeh merilnih metodah so namreč potrebne obdelave surovih podatkov s algoritmi, razvitimi v ta namen.

3.3.1 Analiza zaporednih sekvenc slik – posnetki s hitro kamero in merilom v vodnem toku

Kot je bilo omenjeno v podpoglavju 3.2.4, so bili za določanje referenčnih vrednosti pri verifikaciji meritev z laserskim skenerjem na preizkuševališču uporabljeni video posnetki s hitro kamero, s frekvenco snemanja 60 slik na sekundo. Na spodnji sliki (slika 47) je prikazanih šest zaporednih slik, posnetih s časovnih korakom 0,017 s, iz katerih je vsaj delno razvidna dinamika nihanja gladine.



Slika 47: Prikaz nihanja gladine vode z zaporedjem slik s časovnim korakom 0,017 s (višina odprtja $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$; kontrolni prerez 3 na sliki 44). Figure 47: Presentation of water level fluctuations with an image sequence with a time increment of 0.017 s

(height of inlet $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8.5$ and $Fr_2 = 5.6$; control section 3 on Fig. 44).

Posnetki dolžine 10 s so bili pri obdelavi najprej razbiti na posamezne slike, te pa pretvorjene iz barvnih v črno-bele. Namen pretvorbe v slike z 8-bitno sivo barvno skalo je odstranitev barvne nasičenosti in lažja nadaljnja obdelava. Z 8-bitno sivo barvno skalo je vrednost posamezne slikovne točke zapisana z vrednostjo sivega odtenka med 0 in 255 (tj. 2⁸). Ker je bila gladina vode ob merilu osvetljena z ozkim laserskim snopom, je bilo z algoritmom za iskanje robov (angl. edge detection) oziroma v našem primeru najsvetlejše slikovne točke v posamezni vertikali slikovnih točk mogoče določiti koto višine vode na posamezni sliki (slika 48). Ker daje algoritem le lokacijo iskane slikovne točke znotraj slike, ne pa direktno vrednosti kote gladine vode, smo izvedli kalibracijo. Kalibracija je bila vezana na vrednosti na merilu, potopljenem v vodni tok. Opisani postopek je algoritem ponovil za vse slike posameznega posnetka in s povprečenjem določil končno srednjo vrednost.



Slika 48: Osvetljena gladina vode ob merilu (levo) in izvrednoteni potek gladine vode z obdelavo slike (desno).

Figure 48: Illuminated water surface at the ruler (left) and the water surface profile extracted with image post-processing (right).

Slika 48 prikazuje v črno-belo skalo pretvorjeno sliko in detajl ob merilu končno obdelane slike z izvrednoteno gladino vode. Pri obdelavi slik je bil uporabljen algoritem, ki deluje na osnovi slikovne točke, zato je tudi natančnost določitve vrednosti kote vodne gladine vezana na velikost slikovne točke. Pri izbranih nastavitvah kamere je dimenzija slikovne točke med 0,1 in 0,2 mm (odvisno od oddaljenosti med kamero in merilom v toku).

V sklopu verifikacije z analizo slik so bile merjene globine vode med 50 in 350 mm. Zaradi možnih virov odstopanj – kot sta debelina snopa laserske osvetlitve (približno 1 mm) in sipanje svetlobe na vodni gladini, razlik pri izvrednotenju vrednosti z uporabljenimi algoritmi, zamikov med ravnino osvetlitve in merilom v vodnem toku in kota snemanja – je bila skupna merilna negotovost merjenja višine za mehurčasti tok ocenjena na ± 10 mm, kar ob merjenih globinah predstavlja odstopanja do 15 %.

3.3.2 Obdelava meritev laserskega skeniranja

Surovi podatki laserskega skeniranja so bili v našem primeru zabeleženi v obliki 2D-oblaka točk v polarnem koordinatnem sistemu, in sicer s korakom, določenim s kotno ločljivostjo oddajanja svetlobnih signalov. Na sliki 49 je kot primer prikazan celotni oblak točk za skupno 6000 skenov v izbranem prerezu. Število izmerjenih vrednosti v posamezni meritvi merjene površine obsega produkt števila skenov, kotnega razpona meritev in kotne ločljivosti. Za prikazani primer pri frekvenci skeniranja 269,8 Hz, s kotno ločljivostjo 0,2° in kotnim razponom 70° torej znaša število merjenih točk 350 v posameznem skenu oziroma pri 6000 skenih posamezne meritve skupno 2.100.000 v celotnem oblaku točk.



Slika 49: Neobdelan oblak točk v polarnem koordinatnem sistemu, izmerjen z LMS400. Figure 49: Raw point cloud in a polar coordinate system measured using LMS400.

Za primer meritve stoječe vode s tankim slojem milnice na gladini je na sliki 50 na časovni osi prikazano nihanje izmerjene vrednosti kote gladine vode z laserskim skenerjem LMS511. Frekvenčna analiza in pretvorba podatkov v izbrani točki iz časovnega merila na frekvenčno je bila opravljena z uporabo Fourierove vrste v programskem orodju Matlab. Iz časovne vrste meritev gladine izbranega primera s stoječo vodo je razvidno, da je nihanje meritev v razponu $\pm(5-10)$ mm. Ker je bila meritev opravljena pri stoječi vodi, hkrati pa tudi ni bilo zunanjega vira nihanja (opreme, stojala), je nihanje vrednosti posledica naključne napake laserskega skenerja, ki pa je približno enaka nazivni vrednosti (± 6 mm). Razlog za majhno nihanje vrednosti je tudi kratka razdalja med merilnikom in merjeno površino.



Slika 50: Časovna vrsta meritev gladine stoječe vode pri kotu 0° (LMS511 (frekvenca snemanja 50 Hz in kotna ločljivost 0,33°) (meritev gladine stoječe vode, prekrite s tankim slojem milnice, globina vode 250 mm).

Figure 50: Measurements of standing water surface at an angle of 0° in the time domain (scanning frequency of 50 Hz and angular resolution 0.33°) (measurement of standing water surface covered with a thin layer of soap foam, water depth 250 mm).

Z obdelavo surovega signala je bila odstranjena srednja vrednost in morebitni linearni trendi frekvenčnih nihanj, ki bi se lahko pojavili zaradi neodvisnih virov (npr. spreminjanje temperature elektronike laserskega skenerja). Niz meritev s slike 50, pretvorjen na frekvenčno os, je prikazan na sliki 51.



Slika 51: Frekvenčna analiza navpične meritve vodne gladine, tj. pri kotu 0°, z laserskim skenerjem LMS511 (frekvenca snemanja 50 Hz, kotna ločljivost 0,33°).

Figure 51: Measurements of the water surface level at an angle of 0° in the frequency domain using laser scanner LMS511 (scanning frequency of 50 Hz and angular resolution 0.33°).

Vrh amplitude pri frekvenci 0 Hz je enak 0,9, pri ostalih frekvencah pa je amplituda pod 0,3. Iz frekvenčne analize je razvidno, da ni opaziti izrazitih frekvenčnih nihanj, nihanje vrednosti pa predstavlja naključno motnjo v signalu. Tako je mogoče ugotoviti, kot ugotavljajo tudi drugi avtorji (Trošt, 2014), da je za določitev prave srednje vrednosti kote gladine vode potreben daljši niz podatkov.

V prvem delu obdelave surovega oblaka točk so bili podatki izmerjenih razdalj pretvorjeni v kartezični koordinatni sistem, hkrati pa so se tudi izločile točke, ki so predstavljale meritve objektov zunaj kanala oziroma posode pri verifikaciji merilne metode. S filtracijo točk na podlagi izmerjene razdalje oziroma izračunanih koordinat v kartezičnem koordinatnem sistemu smo izločili tudi meritve povratnih odbojev preko več ploskev. Pri odboju preko več ploskev sicer še vedno sprejemnik laserskega skenerja dobi povratni signal, vendar pa je zaradi časa potovanja signala pri tem izvrednotena večja razdalja, ki pa več ne ustreza izračunanim vrednostim koordinat znotraj obravnavanega območja, v našem primeru znotraj kanala. Na sliki 52 je prikazan oblak točk znotraj kanala, pri čemer so točke že zapisane v kartezičnem koordinatnem sistemu, še vedno pa so jasno vidne linije v smeri oddanih signalov (laserskih žarkov).



Slika 52: Točke znotraj kanala – izmerjene vrednosti pri odboju od razpršenih kapljic, mehurčkov oz. vodne gladine in dna kanala (scenarij: $h_1 = h_2 = 20 \text{ mm}$, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$; kontrolni prerez 2 na sliki 44). Figure 52: Points inside the channel – measured values of reflection from water drops, bubbles, the water surface and the channel bottom (scenario $h_1 = h_2 = 20 \text{ mm}$, $Fr_1 = 8.5$ and $Fr_2 = 5.6$; control cross section 2 on Fig. 44).

Poleg izmerjene razdalje za posamezni oddani signal je bila zajeta tudi intenziteta odboja. Na podlagi intenzitete odboja je bilo mogoče pri obdelavi izločati meritve na kapljicah ali mehurčkih, globlje potopljenih v vodnem telesu. Te meritve so imele zaradi sipanja svetlobe in disipacije energije pri potovanju skozi vodo namreč bistveno manjšo jakost povratnega signala. Pri meritvah stoječe vode smo določili tudi vrednost praga za filtriranje meritev glede na jakost odboja. Za vrednost praga smo izbrali vrednost, ki je omogočala izločitev meritev z odbojem globlje v vodi in od manjših kapljic v zraku, še vedno pa je bila večina točk upoštevana v izračunu srednje vrednosti. Razpon mogočih vrednosti jakosti odboja pri meritvah z LMS400, ki je bil v postopku verifikacije izbran za vse meritve topografije na območju sotočja, znaša med 0 (jakost odboja z 0 % energije oziroma odboja ni) in 255 (jakost signala se ohranja v celoti – 100 %). Izbrana je bila vrednost praga 10, določena pri meritvah stoječe vode. Vrednost praga je bila nato verificirana še pri meritvah v izbranih prerezih na območju sotočja. Pri tem so bile referenčne vrednosti nivojev vode določene z analizo fotografij s hitro kamero Casio (postopek analize slik je opisan v poglavju 3.2.4). S potrditvijo primernosti vrednosti praga se je ta ohranjala pri vseh nadaljnjih meritvah. Pri laserskem skenerju LMS511 je razpon mogočih vrednosti jakosti odboja enak, zaradi uporabljene drugačne valovne dolžine svetlobe pa prihaja do drugačne disipacije energije signalov, prav tako drugačna –večja – je tudi velikost pike. Za vrednost praga za LMS511 je bila izbrana vrednost 160. Pri meritvah gladine spodnje vode HE Doblar v odzračevalni komori, kjer je bil uporabljen laserski skener LMS111, filtriranje z jakostjo odboja ni bilo uporabljeno, saj predhodno v laboratoriju vrednosti praga nismo določili. Prav tako pa so bile meritve spodnje vode na HE Doblar izvedene na večji razdalji (pribl. 7 m), zaradi česar je bil premer snopa laserskega žarka na gladini in v bližini gladine že precej velik (pribl. 100 mm). Zaradi majhne površine kapljic ima odboj premajhno jakost, da bi dosegel sprejemnik laserskega skenerja.

Na sliki 53 je prikazan isti oblak točk kot na sliki 50, izločene so le vrednosti z vrednostjo jakosti odboja pod pragom, tj. z zelo šibkim signalom. Iz primerjave obeh slik je jasno razvidno, da so na ta način izločene predvsem točke z odbojem na delcih globlje v vodnem telesu oziroma odboji na kapljicah škropljenja v zraku.



Slika 53: Filtrirane meritve z upoštevanjem jakosti odboja in potek gladine, določen s povprečenjem meritev 6000 skenov (scenarij $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$; kontrolni prerez 3 na sliki 44). Figure 53: Filtered measurements by taking into account the remission values of reflection and the water surface profile determined based on averaging measurements from 6000 scans (scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8.5$ and $Fr_2 = 5.6$; control cross section 2 on Fig. 44).

Na podlagi filtriranih podatkov so bile v naslednjem koraku v koraku 5 mm vzdolž osi prečno na kanal določene kote vodne gladine. To je omogočalo nadaljnje povprečenje po vertikali in s tem določanje

srednje vrednosti nivoja vodne gladine. Na sliki 53 je za scenarij z višino odprtja $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$ s črtkano črto prikazan tudi prečni potek povprečenih vrednosti gladine v kontrolnem prerezu 2 (sliki 44), kot je bil določen na podlagi upoštevanih meritev.

3.4 Sistematika meritev hidravličnih razmer na preizkuševališču T-sotočja

Na podlagi pridobljenega vedenja o delovanju laserskih skenerjev in točnosti meritev iz prvega sklopa meritev smo v drugem delu eksperimenta opravili meritve za zajem kompleksnega, nestacionarnega poteka gladine na območju sotočja. Za vse predvidene scenarije tokovnih razmer iz poglavja 3.1.3 smo opravili meritve prečnega poteka gladin, in sicer v prerezih, kot so prikazani na spodnji sliki.



Slika 54: Shematski prikaz sotočja z vrisanimi linijami merjenih prečnih prerezov (vse dimenzije so v mm). Figure 54: A drawing of the confluence with lines of the measured cross sections (all dimensions are in mm).

Za zajem topografije celotnih stoječih valov na sotočju so bile meritve izvedene v prečnih prerezih na medsebojni oddaljenosti 100 mm. Ker pri večjih vpadnih kotih žarkov prihaja do večje disipacije energije žarkov in zmanjšanja števila povratnih signalov ter tudi večjih razlik zaradi loma poti žarkov na vodni gladini, smo meritve izvedli v dveh vzporednih vzdolžnih linijah. Na sliki 54 sta s 1. in 2. linijo skeniranja označeni središčni osi laserskega skenerja v vseh merjenih prerezih. S takšnim načinom snemanja se je predvsem izboljšala kakovost meritev ob stenah in na mestih, na katerih je prihajalo do velikega loma (gradienta višin) topografije vodne gladine. Takšne spremembe topografije bi ob snemanju v eni sami liniji za laserski skener lahko povzročile mrtve kote, torej z meritvami ne bi zajeli celotnega prečnega prereza. Tokovne razmere v obeh dotekajočih vejah gorvodno od sotočja so bile določene z višino odprtja lopute na tlačni posodi, zato so se merjeni prerezi pričeli na samem sotočju. Konec območja meritev pa se je nahajal 2 m dolvodno od pričetka sotočja. S snemanjem v dveh linijah in 100-milimetrski medsebojni razdalji med prerezi je bilo pri zajetju topografije vodne gladine posameznega scenarija izmerjenih 42 prerezov.

4 REZULTATI IN RAZPRAVA

Rezultati analiz obsežnih meritev, opisani v nadaljevanju, prikazujejo uspešno uporabo izbrane merilne metode. Laserski skener smo namestili nad vodno gladino in zato na območju obravnavane ne posega v vodni tok, ne spreminja tokovnih razmer in omogoča zajem dejanske kompleksne, nestacionarne topografije vodne gladine pri hidravličnih pojavih. Iz analize topografij stoječega valovanja na območju sotočja pri deročem toku vseh izmerjenih scenarijev pa so bile določene povezave med geometrijskimi lastnostmi sotočja, parametri tokovnih razmer na dotokih in značilnimi lastnostmi vodnih struktur vzdolž sotočja.

4.1 Preverjanje primernosti merilne metode za meritve topografije vodne gladine

Objavljene raziskave drugih avtorjev, kjer je bilo lasersko skeniranje že uporabljeno za zajem profilov vodne gladine, pri podajanju rezultatov ne opisujejo ugotovitev, iz katerih bi bilo mogoče natančneje razbrati mehanizem delovanja merilne metode oziroma področja hidravličnih procesov, pri katerih bi metoda dala zadovoljive rezultate. Zaradi posebnosti izbrane merilne metode pri merjenju vodnih teles smo prvi sklop meritev namenili poglobitvi razumevanja delovanja, da bi lahko nova dognanja v drugem delu uporabili za interpretacijo in ovrednotenje rezultatov meritev pri zahtevnejših primerih uporabe. V nadaljevanju smo najprej podali rezultate meritev višine gladine stoječe, čiste vode oziroma stoječe vode z dodajanjem različnih medijev (npr. vpihovanje zraka, milnica) (preglednica 7). Primerjava – z natančno določitvijo referenčnih vrednosti z ostnim merilom – nam je omogočila tudi oceniti odstopanje merilne metode pri posameznem primeru. Postopek meritev opisujemo v poglavju 3.1.1, v spodnji preglednici pa povzemamo obravnavane primeri s stoječo vodo.

	Čista vada	Injicirani	Milnica na	Barvilo	Barvilo	Dlavači
	Cista voua	mehurčki	gladini	timolftalein	metiloranž	Flavael
Ostno merilo	\checkmark	✓	✓	\checkmark	\checkmark	~
LMS400	✓	~	✓	×	×	×
LMS511	✓	✓	✓	√	✓	√

Preglednica 7: Pregled analiziranih primerov. Table 7: List of the analysed cases.

4.1.1 Meritve gladine čiste stoječe vode

Rezultati meritev gladine čiste vode so prikazani na sliki 55. Meritve gladine čiste vode brez mehurčkov oziroma dodanega sloja mehurčkov milnice pokažejo, da za laserski žarek vodna gladina deluje kot zrcalna površina. Na gladini pride do odboja žarka pod enakim kotom, kot jo žarek zadene, delno pa žarek prodre v samo vodno telo. Ker prihaja na gladini do odboja pod kotom, ki je enak vpadnemu, skener dobi povratni signal le pri oddanem žarku, ki ga pošlje pod kotom 0° oziroma zelo blizu temu kotu (±1°)). Pod ostalimi koti se signal od vodne gladine odbije v smeri stran od senzorja in zato sprejemnik povratnega signala ne zazna. Če se ta kljub temu pojavi, gre za odboj preko več površin v soseščini. V tem primeru pa sta potovalni čas in posledično izmerjena razdalja veliko večja in zato nesmiselna. Pri laserskem skenerju LMS400, ki deluje s krajšo valovno dolžino, ki nekoliko bolje prodre v vodno telo (Pope in Fry, 1997), se pojavlja velik šum pri izmerjenih vrednostih. Izmerjene vrednosti obeh laserskih skenerjev kažejo na veliko odstopanje od dejanskega stanja in s tem na slabo uporabnost merilne metode za merjenje razdalje do gladine čiste mirne vode. Slika 55 prikazuje odčitavanje gladine čiste, stoječe vode z ostnim merilom in meritve z laserskim skenerjem. Na sliki desno je viden oblak surovih točk, kjer je gostota točk sicer velika, so pa omejene na kot okoli 0°. Prikaz je za meritve z LMS511, kjer se snop širi z oddaljenostjo, pri merjenih razdaljah je na gladini premer snopa okoli 25

mm, zato so v tem razponu (±25 mm) tudi uspešne meritve, tj. pride do povratnega signala. Do odboja prihaja tudi od sten posode.



Slika 55: Meritve gladine čiste stoječe vode z ostnim merilom (levo) in oblak točk meritev z laserskim skenerjem LMS 511 (desno).

Figure 55: Measurements of clear standing water with a point gauge (left) and a point cloud of measurements with a laser scanner LMS511 (right).

Rezultati skeniranja z vsakim od skenerjev so podani v samostojni preglednici. V preglednici 8 so podani rezultati laserskega skenerja LMS400 in v preglednici 9 rezultati meritev skenerja LMS511. Primerjava rezultatov sicer kaže, da daje LMS511 nekoliko boljše rezultate, treba pa je poudariti, da so meritve s prikazano merilno negotovostjo prav tako omejene na kot 0° in torej niso primerne za zajem profila preko celotne gladine merjenega vodnega telesa. Standardna deviacija predstavlja raztros izmerjenih vrednosti gladine vode neposredno pod laserskim skenerjem.

Preglednica 8: Meritve gladine čiste mirne vode v
stekleni posodi z laserskim skenerjem LMS400.Preglednica 9: Meritve gladine čiste mirne vode v
stekleni posodi z laserskim skenerjem LMS511.

Table 8: Measured water levels in a glass tank withlaser scanner LMS400 for the case with clearwater.

	Čista voda								
Globina vode									
	Brez korekcije								
Ostno merilo	Laserski skener	Standardna deviacija	Napaka						
	[mm]							
246,3	61	20	-185,3						
220,5	114	20,5	-106,5						
203,2	110	27	-93,2						
178,1	146	4,5	-32,1						
150,5	31	5	-119,5						
124,8	60	4	-64,8						
99,3	40	7	-59,3						
75,1	20	3,5	-55,1						
48,3	56	2,5	7,7						
23,9	47	2,5	23,1						
Povprečno	e vrednosti	9,65	-68,5						

Preglednica 9: Meritve gladine čiste mirne vode v stekleni posodi z laserskim skenerjem LMS511. Table 9: Measured water levels in a glass tank with laser scanner LMS511 for the case with clear water.

	Čista voda									
	Globina vode									
	Brez korekcije									
Ostno merilo	Laserski skener	Standardna deviacija	Napaka							
	l	mm]								
246,9	279	3,5	32,1							
222,9	255	3	32,1							
202,6	235	3	32,4							
177,5	208	3,5	30,5							
154	183	3,5	29							
130	157	3,5	27							
104,9	130	4	25,1							
81,1	104	4	22,9							
53,6	75	4	21,4							
28,7	48	3,5	19,3							
Povprečn	e vrednosti	3,55	27,18							

V tem primeru niso podane vrednosti z upoštevanjem jakosti odboja. Na vodni gladini pride do ustreznega odboja žarka v območju sprejemnika le pri posameznih točkah blizu 0°, v primeru pa, ko do odboja pride, gre za zrcalni odboj, pri katerem se jakost signala večinoma ohranja. Odstopanje meritev pri mirni, čisti vodi bi bilo sicer lahko sprejemljivo za meritve gladin vodnih teles v naravi, vendar pa je treba upoštevati, da dajejo nekatere druge merilne metode, kot so ultrazvočni merilniki in tlačne sonde, pri mirni vodni gladini še vedno veliko boljše rezultate, čeprav je tudi njihova uporaba omejena na meritve v točki nad oziroma pod senzorjem. Meritve gladine v nekem prerezu bi torej zahtevale premikanje v veliko merilnih točk.

4.1.2 Meritve gladine stoječe vode z dodajanjem medija

Ker so rezultati meritev gladin mirne, čiste vode pokazali razmeroma slabo uporabnost testirane merilne metode, so se vodnemu telesu naknadno dodajali mediji, ki bi lahko povečali število uspešnih meritev. Hkrati bi meritve gladine vodnega telesa za različne primere dodanih medijev lahko kazale na možna področja ali procese v vodnih telesih, kjer bi bila merilna metoda lahko uporabna za zajem topografije širšega območja vodne gladine.

Najprej smo poskusili izboljšati merilne rezultate s tem, da smo na dnu posode vpihovali zračne mehurčke (slika 56, levo). Koncentracija mehurčkov je bila razmeroma majhna da mehurčki, ki priplavajo na površino, ne bi prekrili celotne površine in tako preprečili globljega prodiranja laserskih žarkov. Rezultati meritev pri vpihovanju mehurčkov so za izbrani nivo vodne gladine prikazani na sliki 56, desno. Z vpihovanjem mehurčkov v vodno telo se število odbojev poveča, saj prihaja do odboja tako na vodni gladini, na konveksni in konkavni strani opne mehurčkov na vodni gladini in tudi na mehurčkih pod vodno gladino. Do povratnega signala prihaja tudi v primeru odboja prek več mehurčkov. V tem primeru je izmerjena razdalja večja, lahko tudi nesmiselna (večja od razdalje od laserskega skenerja do dna). Jakost odboja je v primeru večkratnega odboja praviloma majhna, saj prihaja do disipacije energije žarka vzdolž celotne poti. Pri vpihovanju mehurčkov se poveča tudi razpon kotov, pod katerimi pride do povratnega signala na sprejemnik laserskega skenerja. Iz slike 56, desno, je razvidno tudi, da laserski žarek najgloblje prodre tik pod laserskim skenerjem, saj se, v primerjavi z večjimi koti vpadnih žarkov, najmanj energije izgubi pri stiku z vodno gladino pri kotu blizu 0°, prav tako se tudi navidezna gostota mehurčkov veča z večanjem vpadnega kota. Večina mehurčkov je bila manjša od 10 mm. Glede na naravo turbulentnega, dvofaznega toka na sotočju deročih tokov kot ciljnega pojava meritev in nenatančnega poznavanja mesta odboja laserskega žarka pri dvofaznem toku (konveksna ali konkavna stran mehurčka ali kapljice itd.) je bila merilna negotovost, ki smo jo želeli doseči, manjša od ±5 mm pri mirni vodi in manjša od $\pm 10-15$ mm pri meritvah stoječega valovanja na preizkuševališču sotočja. Pri mirni vodi velikost premera snopa neposredno ne vpliva na merilno negotovost meritev, se pa pri večjem premeru snopa povečajo možnosti odboja že na mehurčkih na površini vodnega telesa.



Slika 56: Vpihovanje zračnih mehurčkov na dnu posode s stoječo vodo in meritve gladine z ostnim merilom (levo) in oblak točk meritev z laserskim skenerjem LMS511 (desno). Figure 56: Injecting air bubbles at the bottom of the tank and measurements of the water surface with a

Figure 56: Injecting air bubbles at the bottom of the tank and measurements of the water surface with a point gauge (levo), and a point cloud of measurements with the LMS511 laser scanner (right).

V preglednicah 10 in 11 so ločeno podane meritve za posamezni laserski skener. Kljub povečanemu število uspešnih meritev pa se napaka meritev pri LMS400 praktično ohranja (preglednica 10, stolpec 4), pri LMS511 pa celo poveča (preglednica 11, stolpec 4). Treba je poudariti, da rezultati meritev z obema laserskima skenerjema kažejo prenizke gladine vode. Pri določanju srednje izmerjene vrednosti nivoja gladine so namreč upoštevane vse meritve s prejetim odbojem, torej tudi tiste, pri katerih je prišlo do odboja pod vodno gladino. Pri čisti vodi pa odboja pod vodno gladino ni, saj ni bilo ne delcev ne mehurčkov ali drugega medija, ki bi odseval vpadlo svetlobo. Dodatno je treba upoštevati, da se pri odbojih od globlje potopljenih mehurčkov potovalni čas poveča zaradi manjše hitrosti potovanja svetlobe skozi vodno telo v primerjavi z zrakom. Hitrost svetlobe v vodi je namreč do 25 % nižja kot v zraku. Ker laserski skener meri čas med oddajo signala in njegovim povratkom do sprejemnika, to dodatno prispeva k večji izmerjeni razdalji in s tem nižji globini/gladini.

Preglednica 10: Meritve gladine vode v stekleni posodi z laserskim skenerjem LMS400 za primer z vpihovanjem zraka, da mehurčki potujejo od dna posode proti gladini.

Table 10: Measured water levels in the glass tank with laser scanner LMS400 for the case with air injection so that bubbles travel up from the tank bottom to the surface.

Mehurčki zraka, vpihani na dnu posode, ki potujejo proti gladini									
Globina vode									
		Brez filtriranja		Filtrira	Filtriranje meritev z vrednostjo jakosti odboja				
Ostno merilo	Laserski skener	Standardna deviacija	Napaka	Laserski skener	Standardna deviacija	Napaka			
		•	[mm]		•				
250	123	50	-127	183	48	-67			
225	124	42	-101	161	45	-64			
201	96	36	-105	137	39	-64			
174	84	33	-90	112	33	-62			
147	71	25	-76	93	27	-54			
123	65	19	-58	77	17	-46			
97	48	15	-49	56	15	-41			
72	38	11.5	-34	45	13	-27			
53	29	8	-24	35	7	-18			
39	25	6.5	-14	27	5.5	-12			
Povprečn	Povprečne vrednosti 24.6 -67.5 24.9 -45.5								

Preglednica 11: Meritve gladine vode v stekleni posodi z laserskim skenerjem LMS511 za primer z vpihovanjem zraka, da mehurčki potujejo od dna posode proti gladini.

Table 11: Measured water levels in the glass tank with laser scanner LMS511 for the case with air injection so that bubbles travel up from the tank bottom to the surface.

Mehurčki, vpihani na dnu posode									
Globina vode									
		Brez korekcije		Filtriranje meritev z vrednostjo jakosti odboja					
Ostno merilo	Laserski skener	Standardna deviacija	Napaka	Laserski skener	Standardna deviacija	Napaka			
			[mm]						
256	223	29	-33	225	28	-31			
232	190	33	-42	191	32	-41			
209	157	35	-52	160	34	-49			
185	131	36	-54	138	33	-47			
163	113	34	-50	117	33	-46			
139	80	27	-59	90	25	-49			
115	51	24	-64	66	24	-49			
93	38	16	-55	46	14	-47			
71	35	11	-36	37	11	-34			
47	17	10	-30	20	10	-27			
Povprečn	e vrednosti	25,5	-47,5		24,4	-41,2			

Laserski žarek je ob prehodu vodne gladine in pri potovanju skozi vodno telo izgubil del energije, kar je omogočalo filtracijo meritev z upoštevanjem jakosti odbitega signala. Prag jakosti signala je bil s poskušanjem določen kot vrednost, ki je omogočala izločitev meritev z odbojem globlje v vodi, ne pa tudi v bližini dejanske gladine, kar omogoča, da je bila večina točk še vedno upoštevana v izračunu srednje vrednosti. Določena vrednost praga jakosti odboja za posamezni skener se je kot konstanta ohranjala za vse ostale testne meritve, s čimer je bilo mogoče verificirati njeno ustreznost. Kot je razvidno iz primerjave vrednosti v stolpcih 4 in 7 v preglednicah 10 in 11, se srednje vrednosti, določene iz filtriranega oblaka točk, približajo referenčnim vrednostim, izmerjenim z ostnim merilom. Z nižanjem globine vode v posodi se globina potopljenih mehurčkov, od katerih sprejemnik še zazna odbiti signal, zmanjšuje. Hkrati se, zaradi konstantne količine vpihajočih mehurčkov, povečuje njihova gostota, kar povečuje število odbojev v območju gladine. Oboje prispeva k zmanjšanju odstopanja meritev, saj vrednosti izmer na mehurčkih globlje v vodi izgubljajo vpliv. Enak pojav meritev se pokaže pri obeh uporabljenih laserskih skenerjih. Pri LMS511 se, zaradi upoštevanja odbojev meritev na mehurčkih pod vodno gladino, odstopanje glede na gladko gladino mirne vode sicer poveča (primerjava vrednosti v 4. stolpcu preglednice 10 in 4. oz. 7. stolpca preglednice 11). Hkrati se poveča tudi razpon kotov vpadnih žarkov, pri katerih prihaja do zaznanega odboja. S filtriranjem meritev na podlagi jakosti odbitega signal se vrednosti približajo referenčnim, še vedno pa se tudi na mehurčkih pod vodno gladino pojavljajo odboji z jakostjo odboja nad vrednostjo praga, kar znižuje višino izmerjene vodne gladine. Nekoliko manjšo napako meritev oziroma višje gladine pri LMS511 glede na LMS400 lahko pripišemo daljši valovni dolžini uporabljene svetlobe. Pri signalih daljše valovne dolžine svetlobe je, zaradi večje disipacije energije laserskega žarka pri potovanju skozi vodno telo do mehurčka in nazaj, delež uspešnih meritev iz vrhnjega sloja večji. Delno lahko manjšo merilno negotovost pripišemo merilni napaki laserskega skenerja, ki daje (gledano primer brez mehurčkov – preglednica 10) previsoke gladine.

Meritve pri majhnih globinah vode z vpihovanjem mehurčkov na dnu kažejo na to, da se merilna negotovost bistveno zmanjša s povečanjem gostote mehurčkov. Za zagotavljanje večje koncentracije mehurčkov v celotnem vodnem stolpcu bi bila potrebna zračna črpalka z bistveno večjim pretokom zraka. Z večanjem količine vpiha zraka pa bi se ustvaril dvofazni tok in s tem težave z nemirno gladino in drugačna struktura opazovanega stanja v posodi, npr. z velikimi mehurji na površini, ki poslabšajo točnost določanja referenčnih vrednosti.

Učinek povečane koncentracije mehurčkov v vrhnji plasti smo skušali posnemati s tankim slojem milnice. Poskušali smo doseči čim tanjši sloj milnice, ki bi tudi še omogočal prehod signala v nižje plasti vode, kjer pa sicer mehurčkov ni bilo. Te je sicer mogoče doseči z dodatnim vpihovanjem zraka, vendar pa se pri tem hitro in neenakomerno povečuje količina pene na gladini. Enako debelino in gostoto milnice smo poskušali vzdrževati pri vseh desetih merjenih nivojih gladine (slika 57), tj. pri različnih razdaljah do skenerja.



Slika 57: Gladina vode, prekrita s tankim slojem milnice z vidnim odsevom laserskega žarka (levo), in surove ter obdelane meritve z laserskim skenerjem LMS400 (desno). Figure 57: Water surface covered with a thin layer of soap foam with visible reflection of the laser sheet (left) and raw and processed measurements using a laser scanner LMS400 (right).

V preglednicah 12 in 13 so ločeno podane meritve vodnega telesa, prekritega s tankim slojem milnice, za posamezni laserski skener. Pri meritvah s tankim slojem milnice na površini oba laserska skenerja dajeta zelo podobne meritve v primerjavi z referenčnimi. Kot je razvidno iz slike 57, pride do odboja na mehurčkih preko celotnega merjenega prečnega prereza. Ker prihaja do odboja le s površine vodnega telesa, je za natančnost meritev merodajna merilna negotovost laserskega skenerja in debelina sloja milnice. Manjša merilna negotovost laserskega skenerja LMS400 omogoča, da se že brez filtracije meritev doseže točnost izmerjenega položaja gladine nekaj milimetrov (preglednica 12, stolpec 4). Pri LMS511 je izvrednotena povprečna merilna negotovost, brez upoštevanja jakosti odboja, pribl. ±10 mm (preglednica 13, stolpec 4).

Preglednica 12: Meritve gladine vode v stekleni posodi z laserskim skenerjem LMS400 za primer s tankim slojem milnice na vodni gladini.

Table 12: Measured water levels in the glass tank with laser scanner LMS400 for the case with a thin layer of soap foam on the water surface.

Sloj milnice na gladini									
Globina vode									
		Brez filtriranja		Filtriranje meritev z vrednostjo jakosti odboja					
Ostno merilo	Laserski skener	Standardna deviacija	Napaka	Laserski skener	Standardna deviacija	Napaka			
			[mm]						
250	245	4,5	-5,3	250	3	-0,3			
224	219	4	-4,6	223	3	-0,6			
200	196	5	-3,5	200	3,5	0,5			
177	172	172 4		175	3	-1,5			
152	148	148 4		149	3	-3,2			
127	121	4,5	-6,1	125	3	-2,1			
102	98	3,5	-4	101	3	-1			
79	75	3,5	-3,6	78	3	-0,6			
54	49	4	-5,3	51	4	-2,3			
30	27	3,5	-2,5	30	2,8	0.5			
Povprečn	e vrednosti	4,4	-4,0		3,13	-1,1			

Preglednica 13: Meritve gladine vode v stekleni posodi z laserskim skenerjem LMS511 za primer s tankim slojem milnice na vodni gladini.

Table 13: Measured water levels in the glass tank with laser scanner LMS511 for the case with a thin layer of soap foam on the water surface.

Sloj milnice na gladini									
Globina vode									
		Brez filtriranja		Filtriranje meritev z vrednostjo jakosti odboja					
Ostno merilo	Laserski skener	Standardna deviacija	Napaka	Laserski skener	Standardna deviacija	Napaka			
			[mm]						
256	253	3,5	-2,5	254	3	-1,5			
230	224	3	-6,3	226	3	-4,3			
207	204	3,5	-2,6	206	3	-0,6			
190	178 3,5		-11,9	179	3	-10,9			
155	142	3	-13,1	144	2,5	-11,1			
140	124	3	-15,5	126	3	-13,5			
117	99	3,5	-18,2	100	3,5	-17,2			
94	76	3,5	-17,6	78	3,5	-15,6			
77	62	3,5	-15	67	3,5	-10			
48	34	3,5	-13,9	37	3	-10,9			
Povprečne vrednosti		3,4	-11,7		3,1	-9,6			

Ugotovljeno je bilo, da se z upoštevanjem jakosti odboja merilna negotovost zmanjša. Pri LMS400 rezultati kažejo odstopanje ± 3 mm, kar je celo manjše od nazivne merilne negotovosti laserskega skenerja. Podobno se izkaže tudi pri LMS511, kjer je odstopanje ± 10 mm. Večinoma dajeta oba laserska skenerja nižje gladine od dejanskih. Delno to lahko pripišemo nevedenju, kje prihaja do odboja signala – na konkavni ali konveksni strani opne mehurčkov. Po teoriji odboja, sipanja in loma svetlobe na mehurčkih je mogoče oboje. Prav tako lahko prihaja do večkratnega odboja signala na opnah majhnih mehurčkov. Je pa rezultat realno možen, saj ne daje previsokih gladin. Na sliki 58 je tudi grafični prikaz primerjav meritev z obema laserskima skenerjema in s filtracijo meritev oziroma brez nje. Prav tako je izrisana linija popolnega ujemanja, ni pa izrisano območje merilne negotovosti ostnega merila. Zaradi razpona merjenih vrednosti je merilna negotovost ($\pm 0,1$ mm) praktično v debelini črte popolnega ujemanja.



Slika 58: Grafična primerjava meritev z laserskim skenerjem in ostnim merilom za primer tankega sloja milnice na površini vode (s filtracijo z vrednostjo jakosti odboja in brez nje). Figure 58: Graphical comparison of measurements with a laser scanner and a point gauge for the case with

Figure 58: Graphical comparison of measurements with a laser scanner and a point gauge for the case with a thin layer of soap foam on the water surface (with/without filtering with the remission value).

Pri opisu primerov, obravnavanih v postopku verifikacije merilne metode, so bile navedene tudi meritve gladine vodnega telesa z dodajanjem barvil in plavačev. Rezultati meritev z dodajanjem barvil niso pokazali nikakršnega izboljšanja v primerjavi s čisto vodo in zato v tem besedilu niso samostojno podani niti podrobneje obravnavani. Enako velja tudi za plavače, kjer je bila iz razlogov, opisanih v prejšnjih poglavjih, preverjena ustreznost meritve gladine, če je bila dodana majhna koncentracija plavačev na gladini vode. Za primerjavo vseh obravnavanih stanj stoječe vode so na sliki 59 in v preglednici 14 podane vrednosti iste globine vode.



Slika 59: Primerjava vrednosti, izmerjenih z LMS511, iste globine čiste vode in vode z dodatki. Figure 59: A comparison of the measured values of the same water depth of clear water and water with additives (LMS511).

	Čista voda	Mehurčki	Oranžno barvilo	Modro barvilo	Plavači	Milnica	
Izmerjena globina vode	[mm]	64	13	66	66	67	55
Razlika [LMS–ostno merilo]	[mm]	6,8	-44,2	8,8	8,8	9,8	-2,2
Referenčna vrednost globine vode (ostno merilo)	[mm]	57,2					

Preglednica 14: Meritve iste globine stoječe vode pri različnih stanjih oziroma dodatkih. Table 14: Measurements of depth of standing water for different states and additives.

Kot je bilo že ugotovljeno, dajejo najboljše rezultate meritve s tankim slojem milnice. Primeri s čisto vodo, z dodanimi barvili in plavači dajejo zelo podobne in nenatančne rezultate, meritve pa so, razen pri plavačih, ki so razporejeni na širšem območju gladine, omejene zgolj na točko neposredno pod laserskim skenerjem (kot 0°). V primeru vpihovanja mehurčkov dobimo, zaradi odboja na mehurčkih pod vodno gladino, izrazito podcenjeno (tj. nižjo) globino vede.

Iz meritev stoječe vode lahko sklepamo, da je uporaba laserskega skeniranja za meritev nivojev gladin omejena na posebne primere. Kljub temu pa jo je ob primernih pogojih mogoče uporabljati tudi za laboratorijske meritve, in to celo brez dodajanja delcev za izboljšanje odbojnosti od gladine. Merilne negotovosti ni mogoče natančno opredeliti, saj je precej odvisna od gostote mešanice vode in zraka v vrhnji plasti. Je pa iz rezultatov jasno razvidno, da je uporaba laserskega skeniranja možna predvsem pri močno aeriranih tokovih, torej ravno v primerih, kjer so druge merilne metode manj uspešne. Pri ozračenih oziroma dvofaznih tokovih se namreč pojavlja močno razgibana vodna gladina s hitro dinamiko. V hidrotehniki so takšni primeri prehod deročega tok v mirni režim prek vodnega skoka, tok preko stopničastih prelivov ipd. (npr. Zindovic et al., 2016). Dvofazni tok s kompleksno topografijo vodne gladine in z veliko vertikalno dinamiko se pojavlja tudi pri naši raziskavi na območju sotočij pri deročem toku. Primer sotočja je bil v nadaljevanju tudi uporabljen za dodatne meritve za preveritev primernosti merilne metode za zajem prečnega poteka gladine pri dvofaznem toku in s tem za potrditev teze o primernosti te merilne metode, potrjene na podlagi meritev stoječe vode.

4.1.3 Meritve na eksperimentalni postaji sotočja pri deročem toku

Meritve gladin stoječe vode so pokazale, da je mogoče metodo uspešno uporabiti pri močneje ozračenih (aeriranih) tokovih. V posodi s stoječo vodo smo dosegli kontrolirane pogoje, a brez vpliva mehurčkov na vertikalno dinamiko gladine. Za potrditev primernosti merilne metode za zajem topografije vodne gladine pri turbulentnih dvofaznih tokovih smo metodo preizkusili še na preizkuševališču T-sotočja za en scenarij dotokov v deročem režimu. Opis preizkuševališča je podan v poglavju 3.1.2. Enako kot na primerih s stoječo vodo so se meritve izvedle z obema laserskima skenerjema, in sicer v štirih kontrolnih prerezih (slika 44). Pri izbiri prerezov je bil pogoj, da se v merjenih prerezih pojavlja različno intenziven dvofazni tok in različna vertikalna dinamika vodne gladine. Rezultati, ki so podani v nadaljevanju tega podpoglavja, prikazujejo meritve pri scenariju z enako globino dotoka na obeh vejah (20 mm), s pretokom na glavnem kanalu 37,6 l/s in 25 l/s na stranskem dotoku. Pri danih geometrijskih pogojih in pretoku na glavnem kanalu znaša Froudovo število Fr = 8,5 oziroma Fr = 5,6 na stranskem kanalu. Meritve na sotočju za potrebe verifikacije so bile izvedene ločeno od sistematičnih meritev celotnega nabora scenarijev. Scenarij iz meritve verifikacije pa je najbližje scenariju 58. Postopek meritve je opisan v poglavju 3.2.5.

Pred izvedbo nabora meritev pri turbulentnem dvofaznem toku za verifikacijo laserske merilne metode s primerjavo z rezultati metode z analizo slik hitre kamere smo z obema laserskima skenerjema ločeno opravili še testne meritve pri različnih nastavitvah, da bi ugotovili, kakšen vpliv bi lahko imele kombinacije različnih frekvenc snemanja in kotne ločljivosti. Cilj je bil ugotoviti vpliv različnih

nastavitev na izvrednoteni potek gladine. Pri stoječi vodi zaradi ravne gladine vode takšen test ne bi imel enake sporočilnosti kot pri močno razgibani gladini. Pri LMS511 je bila pri možnih nastavitvah frekvence snemanja (25, 35, 50, 70 in 100 Hz) uporabljena največja pripadajoča kotna ločljivost (0,16; 0,25; 0,33; 0,5 oziroma 0,67°). Kot omenjeno pri opisu merilne opreme, se z večanjem frekvence snemanja manjša največja možna kotna ločljivost. Pri LMS400 je bil vpliv različne kotne ločljivosti preverjen pri frekvenci snemanja 269,8 Hz. Preverjene kotne ločljivosti so bile 0,1; 0,2; 0,36 in 0,8°. Pri meritvah z različnimi kombinacijami frekvence snemanja in kotne ločljivosti so bili uporabljeni prečni prerezi 1, 2 in 4 iz slike 44. Pri prvem prerezu je bil polno razvit turbulenten dvofazni tok z veliko vertikalno dinamiko vodne gladine (tudi do \pm 50 mm), pri drugem je bila vertikalna dinamika vodne gladine že nekoliko manjša (do \pm 30 mm), pri četrtem prerezu pa je bilo dinamike le še okoli \pm 15 mm. Pri tem tretjega prečnega prereza nismo merili, saj je razlika v dinamiki toka med tretjim in četrtim prerezom majhna.

Na sliki 60 je prikazan primer za prečni potek gladine v prerezu 2, izmerjen z različnimi nastavitvami. Srednja vrednost poteka vodne gladine na sliki 60 je bila določena na podlagi večkratnega skeniranja istega prereza z različnimi nastavitvami laserskega skenerja. Razvidno je, da ima kombinacija frekvence snemanja in kotne ločljivosti večinoma zanemarljivo majhen vpliv. Kjer pa se odstopanje pojavi, to ni istoznačno v točkah preko celotnega prereza. Do enakega pojava prihaja tudi pri ostalih prečnih prerezih, zato so te obdelave shranjene v arhivu, da ne povečujejo obsega te naloge. Zaradi preglednosti slike primerjava z referenčnimi vrednostmi, določenimi z analizo slik hitre kamere, na tem mestu ni podana, je pa prikazana kasneje.



Slika 60: Prečni poteki gladine v izbranem kontrolnem prerezu 2, izmerjeni pri različnih kombinacijah frekvence skeniranja in kotne ločljivosti (laserski skener LMS511; scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,4$ in $Fr_2 = 6$).

Figure 60: Free-water-surface profiles in control cross section 2 measured by different combinations of scanning frequency and angular resolution (laser scanner LMS511; scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8.4$ and $Fr_2 = 6$).

Za isti prerez so v spodnji preglednici podane tudi vrednosti srednje in maksimalne vrednosti izmerjene globine vode, in sicer za vse tri merjene prereze in pet kombinacij merilne frekvence in kotne ločljivosti. Pri LMS511 so maksimalna odstopanja od skupne izračunane vrednosti ± 3 mm.

Preglednica 15: Povprečne in maksimalne vrednosti globine, izmerjene z LMS511 v treh prerezih, pri različnih kombinacijah frekvence skeniranja in kotne ločljivosti.

Table 15: Average and maximum values of water depth measured with LMS511 in three cross-sections, at different combinations of scanning frequency and angular resolution.

		PP1		PP2		PP4	
		(zelo razburkano)		(sreanje ra	izburkano)	(manj razburkano)	
frekvenca	kotna	povprečna	maksimalna	povprečna	maksimalna	povprečna	maksimalna
snemanja	ločljivost	globina	globina	globina	globina	globina	globina
[Hz]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[<i>mm</i>]	[<i>mm</i>]
25	0,1667	204,6	280,1	55,3	121	51,2	102,4
35	0,25	209,5	277,4	55,6	121,7	50,9	102
50	0,33333	210,3	278,9	56,8	122,1	53,1	104,8
75	0,5	210,6	279	56,9	122,9	53,5	105,3
100	0,6667	209,8 277,6		55,4	120,3	52,7	103,5
		208,96	278,6	56	121,6	52,28	103,6

Iz večkratnega skeniranja istega prereza z istimi nastavitvami laserskega skenerja je mogoče ugotoviti tudi ponovljivosti rezultatov meritev (preglednica 16). Na sotočju se sicer pojavljajo stoječi valovi z veliko vertikalno dinamiko, kljub temu pa se pri izvrednotenju srednje vrednosti poteka gladine v posameznem prečnem prerezu s povprečenjem celotnega oblaka točk meritev izkaže isti potek prečne razgibanosti vodne gladine (slika 60). Pri določitvi vrednosti za vse kombinacije nastavitev frekvence snemanja in kotne ločljivosti, ki so podane v preglednici 16, je bilo uporabljeno enako število izmerkov.

Preglednica 16: Večkratne meritve istega prereza z LMS511 pri istih nastavitvah. Vsak profil je bil pri enaki konfiguraciji LMS511 posnet trikrat. Povprečna deviacija prikazuje raztros meritev pri posamezni kombinaciji.

Table 16: Multiple measurements of the same profile with LMS511 with the same settings. Each profile was scanned three times at each LMS511 configuration. Average deviation presents the despersion of measurements for a particular combination.

		PP1		PP2		PP4	
		(zelo razburkano)		(srednje r	azburkano)	(manj razburkano)	
frekvenca	kotna	povprečna	maksimalna	povprečna	maksimalna	povprečna	maksimalna
snemanja	ločljivost	deviacija	deviacija	deviacija	deviacija	deviacija	deviacija
[Hz]	[°]	[<i>mm</i>]	[<i>mm</i>]	[<i>mm</i>]	[mm]	[<i>mm</i>]	[<i>mm</i>]
25	0,1667	4,1	23	0,57	2,2	0,41	0,83
35	0,25	1,3	3,6	0,78	2,4	0,34	0,85
50	0,33333	0,59	1,7	0,3	0,66	0,28	0,78
75	0,5	1,8	8,4	0,26	0,74	0,31	0,66
100	0,6667	0,56	2,5	0,33	0,82	0,28	1

Pri meritvah z LMS400 je bilo ugotovljeno, da je nekoliko boljše rezultate mogoče izmeriti pri večji kotni ločljivosti. Glede na to, da v vrhnjem sloju vodnega telesa ni zvezne gostote mehurčkov, pa je pri meritvi pomembnejše, da imamo pri posameznem skenu prereza več uspešnih meritev (večja kotna ločljivost, več meritev na enoto dolžine). Prav tako je iz priporočil proizvajalca merilne opreme razvidno, da se zanesljivost meritev z večanjem frekvence snemanja manjša (SICK, 2016).

Večjo občutljivost na število uspešnih meritev pri neenakomerni gostoti mehurčkov zaznamo pri LMS400, kjer je premer laserskega snopa signala bistveno manjši. Pri merjenih razdaljah snop pri LMS400 ohranja premer 1–2 mm, pri LMS511 pa se snop razširi na premer med 20 in 25 mm. Večji premer snopa sicer daje večje možnosti odboja na mehurčkih, hkrati pa se na ta način pri meritvah lahko izgubijo detajli močno razgibane vodne gladine (izrazite spremembe vertikalnega poteka gladine). Takšen primer je razviden iz slike 61 za prerez 1, kjer laserski skener LMS511 slabše opiše prelom

stoječega vala. Na podlagi opravljenih meritev smo se odločili, da bo pri nadaljnjih meritvah v postopku verifikacije pri tem laserskem skenerju uporabljena kombinacija z merilno frekvenco 50 Hz in kotno ločljivostjo 0,33°, pri LMS400 pa merilna frekvenca 269,8 Hz in kotna ločljivost 0,2°.

Primerjava izmerjenih prerezov prečnih potekov vodne gladine na štirih izbranih lokacijah (slika 44) z obema laserskima skenerjema pokaže, da oba pravilno orišeta prečni potek gladine. Za vse štiri lokacije in oba laserska skenerja so izmerjeni prečni prerezi prikazani na sliki 61. Gladine oziroma globine, izvrednotene iz surovih podatkov, kjer so upoštevane vse meritve, predvsem na lokacijah z manjšo gostoto dvofaznega toka v vrhnji plasti, so tudi do 30 mm nižje od referenčnih vrednosti, določenih z analizo slik hitre kamere. Vzrok za prenizke gladine so predvsem odboji na globlje v toku potopljenih mehurčkih. Podobno kot pri posodi z mirno gladino daje LMS400, zaradi manjše merilne negotovosti, boljše rezultate. Treba pa je poudariti, da k višjim gladinam, določenim z analizo slik hitre kamere, lahko prispevajo nepopolna jasnost slik, debelina snopa osvetlitve, sipanje svetlobe na vodni gladini in uporabljen algoritem za izvrednotenje višine vodne gladine (ocenjena merilna negotovost analize slik hitre kamere (±10 mm)).

Sekvence slik hitre kamere tudi kažejo veliko vertikalno dinamiko vodne gladine. Pri vseh štirih prerezih na sliki 61 je nihanje gladine prikazano z intervalom odstopanja od srednje vrednosti. Na mestih oziroma odsekih z največjim nihanjem gladine se pojavljajo odstopanja od srednje vrednosti tudi do ± 50 mm.





Slika 61: Vodna gladina v vseh štirih kontrolnih prečnih prerezih, dobljena iz meritev z obema laserskima skenerjema (brez in z filtriranjem meritev z jakostjo odboja) (scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$).

Figure 61: Free-water-surface profiles in all four control cross sections obtained by both laser scanners (without and with filtration of measurements with remission values) (scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8.5$ and $Fr_2 = 5.6$).

S filtriranjem celotnega oblaka točk glede na izmerjeno jakost odbitega signala, določenim na umirjevalni posodi, je ujemanje gladine, določene z LMS400, in srednjih vrednosti, določenih z analizo slik hitre kamere, zelo dobro. Pri prečnih prerezih z veliko vertikalno dinamiko so odstopanja meritev z laserskim skenerjem glede na referenčne vrednosti maksimalno ±15 mm, večinoma pa, predvsem na mestih z nekoliko manjšo vertikalno dinamiko, pod ±5 mm. Tudi pri meritvah LMS511 so s filtracijo točk gladine bližje referenčnim, kljub temu pa je ujemanje slabše kot pri meritvah z LMS400. Filtrirane meritve z LMS 511 še vedno izkazujejo prenizke gladine. V povprečju so nivoji gladine oziroma izvrednotene globine za pribl. 25 mm podcenjene. Poleg slabše merilne negotovosti ima LMS511 bistveno večji premer snopa laserskega žarka na mestu, kjer signal zadene površino (pri merjenih razdaljah do 25 mm), kar pri močno razgibani vodni gladini prav tako lahko vpliva na točnost meritev. Vse primerjave vrednosti gladin v kontrolnih točkah v vseh štirih prerezih, določenih z obema laserskima skenerjema, s filtracijo in brez, ter odstopanja od referenčnih vrednosti so podane v prilogi A. Povprečno odstopanje laserskega skenerja LMS400, izračunano iz primerjave povprečnih gladin,

določenih iz filtriranega oblaka točk, in gladin, določenih z analizo slik, znaša -2 mm s standardno deviacijo ± 4 mm. Kljub temu pa ob upoštevanju nazivne merilne negotovosti laserskega skenerja (± 3 mm), dinamične narave pojava in merjenega medija, pa tudi ocenjene merilne negotovosti metode z analizo slik hitre kamere, ocenjujemo, da so gladine na mestih z manjšo vertikalno dinamiko vodne gladine izmerjene z merilno negotovostjo ±5 mm, na mestih z veliko dinamiko vodne gladine pa ± 10 mm. Kot omenjeno, je merilna negotovost laserskega skenerja LMS511 večja, odstopanje meritev pa vedno negativno, tj. laserski skener sistematično daje prevelike izmerjene razdalje od skenerja in s tem nižje gladine/globine od dejanskih. Pozitivne vrednosti razlik med gladinami, izmerjenimi z LMS511, in gladinami, določenimi z analizo slik pri prečnem prerezu 1, so posledica slabega zaznavanja izrazitega preloma prečnega poteka gladine vode. Zaradi razširitve snopa prihaja do prvega odboja na zgornjem delu stoječega vala. Rezultati meritev, namenjenih verifikaciji merilne metode, in ugotovitve o delovanju posameznega laserskega skenerja so narekovali izbor naprave za zajem topografije vodne gladine vseh predvidenih scenarijev. V nadaljevanju je bil za izvajanje meritve uporabljen le laserski skener LMS400. Pri opisu delovanja metode pri vodnih telesih je bilo razloženo tudi odstopanje, ki nastaja zaradi loma svetlobnih žarkov na prehodu med različnimi mediji (poglavje 2.4.1.1.2). Ker so bile vse meritve pri našem eksperimentu pri majhnih kotih (ozek pas meritev), bi maksimalne korekcije (po prej omenjenih avtorjih) znašale le okoli ± 0.3 mm. Vrednosti so bistveno manjše, kot je bila naša ocena merilne negotovosti meritev, zato korekcije v nadaljnjih analizah niso bile potrebne, tj. niso bile upoštevane.

4.1.4 Ugotovitve o fluktuacijah vodne gladine

S primerjavo filtriranega oblaka točk na podlagi jakosti odboja in razpona nihanja gladine, določenega z analizo slik hitre kamere, je mogoče ugotoviti tudi, da je z meritvami z laserskim skenerjem, poleg natančnega poteka profila srednjih vrednosti, mogoče razmeroma dobro določiti tudi fluktuacije vodne gladine. Na sliki 62 je z modrimi točkami prikazan celotni oblak točk, z zelenimi pa oblak točk po filtriranju. Ugotovimo lahko, da pas zeleno obarvanih točk skoraj v celoti sovpada z ovojnico nihanja gladine, določene z analizo slik hitre kamere.



Slika 62: Večina meritev z LMS400 z vrednostjo jakosti odboja nad pragom leži znotraj nihanja vodne gladine, določenega z analizo sekvence slik, posnetih s hitro kamero (scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$; kontrolni prerez 2 na sliki 44).

Figure 62: Most of the LMS400 measurements with remission values above the threshold lie within the water surface fluctuation determined through analysis of the image sequence recorded with a high-speed camera (scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8.5$ and $Fr_2 = 5.6$; control cross section 2 on Fig. 44).
Na sliki 63 je prikazana analiza gostote točk v vertikalnih prerezih, kjer so bile opravljene tudi meritve s hitro kamero. Za preglednejši prikaz so podane le razmere v treh točkah, kjer smo upoštevali točke za pas širine 20 mm in za oblak filtriranih točk. Referenčne vrednosti so bile določene z analizo slik hitre kamere. Histogrami izvrednotenih vrednosti globin kažejo, da razporeditev izmerjenih vrednosti razmeroma dobro ustreza normalni porazdelitvi okoli določene srednje vrednosti gladine (slika 63). Pri srednjem pasu meritev, neposredno pod laserskih skenerjem, se pojavlja nekoliko večje število izmer v ozkem pasu vrhnje plasti, pri levem in desnem pasu pa so izmere enakomerno razporejene okoli srednje vrednosti, kar lahko pripišemo nihanju vodne gladine. Pri bolj oddaljenih točkah, tj. pri večjem kotu meritev, je namreč prodiranje svetlobnih signalov v vodo manjše kot neposredno pod merilnikom.



Slika 63: Histogrami meritev vodne gladine v treh točkah, kjer smo upoštevali točke za pas širine 20 mm, prečno na kanal (upoštevanih 3000 skenov gladine) (scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$; kontrolni prerez 2 na sliki 44).

Figure 63: Histograms of measuments of water surface in three points, where we took into account the points from the slot with a width of 20 mm, transversal to the channel (3000 scans taken into account) (scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8.5$ and $Fr_2 = 5.6$; control cross section 2 on Fig. 44).

V vseh treh pasovih je opaziti majhno število meritev z večjim odstopanjem (angl. outliers). Ker je filtriranje oblaka točk izvedeno s fiksno vrednostjo praga jakosti odboja, namreč ne moremo povsem izločiti odbojev na potopljenih mehurčkih ali na večjih vodnih kapljicah, ki se pojavljajo nad oblikovano gladino ob škropljenju zaradi močno razpenjenega toka.

4.2 Določanje topografije vodne gladine na sotočju dveh vodotokov z deročim režimom

Pri sotočju dveh ali več vodnih tokov se že pri majhnih hitrostih ob sicer razmeroma mirni vodni gladini pojavlja vrtinčenje in izrazito 3D tokovne razmere. Pri deročem toku pa se poleg strukture toka dodatno pojavlja tudi kompleksnejša topografija vodne gladine (časovno in prostorsko). Na spodnjih slikah so kot primer prikazani pojav izrazitega dvofaznega toka na območju sotočja dveh tokov pri deročem režimu in primeri izrazito razgibane vodne gladine.



Slika 64: Primeri močno razgibane vodne gladine pri sotočju z nizko globino, a velikimi hitrostmi dotokov. Figure 64: Examples of strong dynamic water surface at a confluence with low depth but high velocity of inflows.

V dosedanjih raziskavah, objavljenih v nam dostopni literaturi (npr. Schwalt in Hager, 1995; Mignot, 2008), so bile za merjenje dinamične (razpenjene) vodne gladine uporabljene manj primerne merilne metode (npr. uporovna tipala, ostno merilo), zato je razumljivo, da celovit zajem, tudi (v primerjavi z našim primerom) manj kompleksne, nestacionarne topografije vodne gladine, ni bil izveden.

Rezultati, podani v zgornjih poglavjih, potrjujejo uporabnost laserskega skeniranja za meritve časovno spremenljivega poteka vodne gladine, katere dinamike sicer s klasičnimi meritvami ni mogoče zadovoljivo zajeti. Dodatna prednost našega merilnega postopka pa je, da lahko meritve izvedemo še z veliko časovno in prostorsko ločljivostjo.

4.2.1 Izdelava 3D-površine vodne gladine iz meritev gladine z laserskim skenerjem – topografija

Na podlagi obdelave podatkov in ugotovljene majhne merilne negotovosti v kontrolnih prerezih smo za vse scenarije, opisane v poglavju 3.1.3, izvedli še meritve topografije na obravnavanem območju, ki obsega najbolj razgibani del vodne gladine vzdolž območja sotočja. Iz srednjega poteka gladine v posameznih prerezih na območju meritev, kot je bilo prikazano v poglavju 3.3.2, je bila konstruirana razgibana ploskev izmerjene topografije vodne gladine celotnega območja, predstavljena iz ploskvic v obliki 3D mrežnih modelov (slika 65).



Slika 65: Oblaka točk dveh prečnih prerezov in odsek površine vodne gladine stoječega vala, konstruirane z obdelavo meritev z laserskim skeniranjem (scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$). Figure 65: Point cloud of two cross sections and a section of the standing wave free-water surface, constructed with post-processing of the laser scanner measurements (scenario: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8.5$ and $Fr_2 = 5.6$).

Na sliki 65 so prikazane tudi vertikalne porazdelitve filtriranih izmerjenih odbojev v dveh sosednjih prerezih in na merilnem območju konstruirani mrežni model gladinske ploskve, na podlagi srednjih vrednosti gladine. Določitev fluktuacij vodne gladine na podlagi meritev z laserskim skenerjem je prikazana v podpoglavju 4.1.4. Iz slike fluktuacij, ki je razvidna iz filtriranega oblaka točk posameznega prereza, je razvidno, da se največja nihanja gladine pojavljajo ob stenah kanala (točki 1 oz. 2), zaradi prečne dinamike vodnega toka in ob samem vrhu grebena stoječega vala (točka 3).



Slika 66: Stoječi val na sotočju pri deročem režimu vodnega toka, konstruiran iz meritev z laserskim skenerjem LMS400 (scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$). Figure 66: Standing wave in supercritical confluence flow, constructed from measurements with laser scanner LMS400 (scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8.5$ and $Fr_2 = 5.6$).

Sestava 3D mrežnega modela celotnega območja obravnave omogoča natančen opis topografije vodne gladine na sotočju in s tem nadaljnje možnosti obdelave ter analize oblike stoječih valov glede na vhodne parametre. Na zgornji sliki (slika 66) je prikazana 3D-topografija za primer z isto globino toka na obeh vejah (20 mm) in s Froudovim številom na glavnem kanalu Fr = 8,5 oziroma Fr = 5,6 na stranskem

kanalu. Ker je snemanje izvedeno od zgoraj navzdol (tj. tlorisno), model ne more prikazati zračnih žepov, ki se pojavijo pod krovnim grebenom vala vzdolž cone mešanja obeh dotokov (slika 67). Kot je razvidno iz spodnje slike, se ob velikih hitrostih obeh dotokov oblikuje sodčku podobna formacija vodnega toka. V odvisnosti od razmerij gibalne količine dotekajočih tokov se lahko oblikuje enojni sodček v smeri močnejšega toka oziroma dvojni sodček v primeru zelo enakovrednih tokov.



Slika 67: Sodčku podobna struktura vodnega toka, pri kateri se pod krovnim valom pojavljajo zračni žepi (scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$). Figure 67: Flow structure similar to barrel roll, where air pockets occur under an umbrella wave (scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8.5$ and $Fr_2 = 5.6$).

Ob upoštevanju fluktuacij v posameznem prerezu je prav tako mogoče določiti tudi ovojnico nihanja gladine. Ker so bile meritve izvedene po posameznih prerezih, sočasni prikaz časovne dinamike gibanja vodne mase na celotnem območju ni mogoč. Kljub temu pa je na podlagi rezultatov meritev stalnega dotoka iz obeh kanalov mogoče analizirati, v kakšnem razponu prihaja do nihanja vodne gladine, kar je lahko pomembna informacija pri iskanju ustreznih rešitev v praksi. Način določitve fluktuacij vodne gladine v posameznem prerezu je podan v podpoglavju 4.1.4, kasneje v podpoglavju 4.3.1 pa so podane tudi enačbe za izračun razpona nihanja gladine glede na vhodne parametre dotokov. Na sliki 68 levo je prikazano mesto 100 mm dolgega izseka, za katerega je na desni sliki prikazana tudi izmerjena ovojnica nihanja vodne gladine.



Slika 68: Izsek stoječega vala v dolžini 100 mm z vrisano povprečno gladino in ovojnicama gladin z upoštevanjem fluktuacij (scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$).

Figure 68: 100 mm long section of a standing wave with a plot of the average water surface and envelopes of the water surface by taking into account the fluctuation (scenario $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8.5$ and $Fr_2 = 5.6$).

Za prikaz sočasnega spreminjanja ploskve na merilnem odseku so potrebne sočasne meritve v mreži točk, ne le v prečnih prerezih.

4.2.2 Strukture vodnega toka na sotočju pri deročem toku

Iz opisa, fotografij in 3D mrežnih modelov vodne gladine, izdelanih na osnovi meritev vseh 168 scenarijev, smo opravili analizo glavnih struktur vodnega toka na območju sotočja. Izkaže se, da strukture vodnega toka na sotočju ne narekuje zgolj Froudovo število, temveč so pojavi odvisni tako od hitrosti kot globine vodnega toka v obeh dotekajočih vejah. Da bi bilo mogoče razmere opisati z razmerjem gibalne količine obeh dotokov, je v nadaljevanju vpeljana nova izpeljana veličina:

$$M_R = \frac{M_g}{M_g + M_s} \tag{66}$$

kjer je M_R delež gibalne količine glavnega toka glede na vsoto gibalne količine obeh dotokov. M_s in M_g predstavljata gibalni količini vodnega toka v stranskem oziroma glavnem kanalu, izračunani po enačbi

$$M_g = v_g^2 * h_g * b_g * \rho_v \tag{67}$$

oziroma v stranskem kanalu:

$$M_s = v_s^2 * h_s * b_s * \rho_v \tag{68}$$

Zaradi enakih širin dotočnih kanalov, $b_g = b_s$, in vode kot edinega medija na dotoku (na tok pred sotočjem, kjer še ni pojava dvofaznega toka, gostota mešanice tega še ne vpliva na specifično težo enote medija), lahko v enačbah 66, 67 in 68 izpostavimo oziroma izločimo zadnja dva člena M_s in M_g (b_s in ρ_v), ki ne vplivata na vrednost razmerja M_R . Z analizo dejanskega stanja pri vseh scenarijih je bilo ugotovljeno, da je mogoče pojave vodnega toka na območju sotočja razvrstiti v štiri glavne skupine: A – zajezitev na glavnem kanalu, na stranskem se pojavi zajezitev ali vodni skok pred sotočjem, B – vodni skok na glavnem kanalu pred sotočjam, na stranskem se pojavi vodni skok pred sotočjem ali zajezitev, C – sodček ali grbasti krovni val prek sotočja, pri čemer oba tokova ohranjata deroči režim, D – dušenje toka po glavnem kanalu, a se ohranja deroči režim toka, v stranskem se pojavi zajezitev ali vodni skok pred sotočjem. Na sliki 69 je prikazana razporeditev posameznih pojavov vseh obravnavanih scenarijev glede na gibalno količino dotokov.



Slika 69: Oblike vodnega toka v glavnem kanalu glede na razmerje gibalne količine dotekajočih tokov. Figure 69: Structures of the water flow in the main channel considering the momentum of the incoming flows.

Glede na vrednost M_R lahko izmed vseh scenarijev pojave razdelimo v naslednje glavne skupine oblik, in sicer:

- Fr_g ≤ 2 → Pri Froudovih številih toka v glavnem kanalu, manjših od 2, se na obeh kanalih na robu sotočja vedno pojavi vodni skok ali popolna zajezitev. Enake ugotovitve navajajo tudi drugi avtorji pri sotočjih manjših kotov. Pri pravokotnem sotočju je torej dušenje oziroma disipacija energije dotokov še večja kot pri sotočjih manjših kotov.
- *M_g* ≤ *M_s* → če je gibalna količina v stranskem kanalu enaka gibalni količini v glavnem kanalu ali jo celo presega, se v obeh vejah med vtokom in sotočjem pojavi vodni skok oziroma prihaja do potopljenega vtoka na enem ali obeh vtokih na preizkuševališče, kar kaže na to, da je zajezitev dotokov še bolj izrazita in bi se vodni skok lahko pojavil na večji razdalji gorvodno od sotočja, kot je oddaljen vtok. Tudi v primerih, ko gibalna količina stranskega toka močno presega gibalno količino v glavnem kanalu (tok v glavnem kanalu je popolnoma zajezen), se v stranskem kanalu vodni skok pojavi zelo blizu sotočja, ne prodre pa v območje samega sotočja. Pri manjših kotih sotočij je mogoče, da stranski dotok zajezi glavnega, pri tem pa se še vedno ohranja deroči tok iz stranskega kanala (Schwalt in Hager, 1995), kar pa se v obravnavanih scenarijih pri 90° sotočju ni pojavilo.
- M_s ≤ M_g ≤ 2, 5 * M_s → gibalna količina toka (oz. iz nje izračunana sila curka) v stranskem kanalu je dovolj velika, da tok v stranskem kanalu ne prehaja preko vodnega skoka v mirni režim, temveč prodre v območje sotočja. Pojavi se stoječi val (grbasti val ali sodčku podobna struktura vodnega toka). Pri tem višina stoječega vala močno presega višino vode, ki bi se na sotočju pojavila v primeru pojava vodnega skoka v posamičnih dotekajočih vejah. Tok v obeh vejah, na območju sotočja kot tudi dolvodno od njega, je v deročem režimu.

M_g ≥ 2, 5 * M_s → gibalna količina toka v glavnem koritu tako močno presega gibalno količino stranskega dotoka, da se na območju sotočja pojavlja zgolj dušenje toka vzdolž glavnega korita, pri čemer se ohranja deroči režim toka tako vzdolž sotočja kot tudi dolvodno. Motnja v toku zaradi bočnega dotoka se pokaže v obliki izrazite cone mešanja. Stranski kanal je pri tem zajezen.

Na spodnjih slikah so prikazani različni primeri pojavov.



Slika 70: Primeri struktur vodnega toka na sotočju: vodni skok na obeh dotokih (levo); sodček oziroma grbasti val (sredina); zgolj dušenje toka v glavnem kanalu, stranski kanal je zajezen (desno). Figure 70: Flow patterns in a junction: hydraulic jumps in both incoming channels (left); barrel roll or humped wave (middle); choking of the main channel flow, while the side incoming flow is dammed (right).

Na spodnji sliki je enaka razporeditev vzorcev vodnega toka prikazana v odvisnosti od gibalne količine toka po glavnem kanalu glede na skupno gibalno količino obeh dotokov. Rezultate smo dobili na podlagi meritev na preizkuševališču T-sotočja in ustrezajo zgornji klasifikaciji.



Slika 71: Razporeditev pojavov na sotočju glede na razmerje gibalne količine toka po glavnem kanalu in skupne gibalne količine obeh dotokov.

Figure 71: Distribution of the phenomena at the junction according to the ratio of the flow momentum in the main channel and the total momentum of both incoming flows.

Kot omenjeno v poglavju 2.8.3, sta Schwalt in Hager (1995) svojo raziskavo omejila na razpone kota sotočja med 0° in 60°, pri tem pa postavljata trditev, da se pri pravokotnem sotočju vedno pojavlja zajezitev obeh kanalov (Hager, 2010). Rezultati eksperimenta naše raziskave so pokazali, da temu ni tako in da se ob določenih pogojih sodček ali grbasti val, ki se je pojavil tudi pri njuni raziskavi, lahko pojavi tudi na pravokotnem sotočju.

4.3 Topološki opis razmer na sotočju pri deročem toku

Čeprav gre pri vseh obravnavanih scenarijih za tokovne razmere na sotočju dveh deročih režimov vodnega toka, pa se pri tem pojavljajo strukture z zelo različno topografijo vodne gladine. Zaradi raznolikosti zgoraj opisanih pojavov povezav med vhodnimi parametri in glavnimi topološkimi značilnostmi ni mogoče enoznačno zapisati.

Pri pojavu vodnega skoka oziroma zajezitvi obeh kanalov se v posameznem kanalu oblikuje topografija vodne gladine, ki jo lahko razmeroma dobro opišemo že v dvodimenzijskem prostoru, saj nastanejo na odseku kanala, na katerem se pojavi vpliv sotočja, le kot spodnji robni pogoj, ki povzroči zajezitev. Pri takšnih tokovnih razmerah na gorvodnem območju posameznega vodnega skoka se izoblikuje t. i. konjugirana gladina, preko turbulentnega toka na sotočju pa tudi gladina skupnega toka dolvodno od sotočja. Pri tem lahko tok odsekoma ali povsem preide v mirni režim, kar narekuje dolvodne razmere od sotočja. Ker je bilo za preizkuševališče T-sotočja uporabljeno horizontalno dno, lahko na ta način dobimo vpliv na tokovne razmere na sotočju, ki se v primeru nagnjenega dna, ki bi zagotavljalo vzpostavitev stalnega enakomernega toka na odtočnem delu kanala, ne bi pojavil. Kot smo omenili pri opisu pojavov v primeru izrazito močnejšega toka v glavnem koritu, kljub velikim hitrostim oziroma Froudovim številom na območju sotočja prihaja le do izrazite cone mešanja; vzdolž glavnega toka se sicer pojavlja dušenje, vendar je disipacija energije majhna. Tokovne razmere se zato ohranjajo, pri tem pa ne prihaja do izrazito kompleksne 3D vodne gladine. Tako pojav tudi ni zanimiv za iskanje povezav med lastnostmi toka dotokov in topografijo vodne gladine na sotočju, ki bi imele za primere v hidrotehnični praksi večjo uporabnost.



Slika 72: Pojav sodčka ali grbastega vala na sotočju in prikaz razmerja globin dotokov in višine konice vala (scenarij: $h_1 = h_2 = 20$ mm, $Fr_1 = 8,5$ in $Fr_2 = 5,6$).

Figure 72: Phemenomena of barrel roll or humped wave at the confluence, and illustration of the ratio between the depth of the incoming flow and the wave peak height wave (scenario $h_1 = h_2 = 2.0$ mm, $Fr_1 = 8.5$ and $Fr_2 = 5.6$).

V nadaljevanju so bili zato podrobneje obdelani scenariji, pri katerih se pojavlja izrazito kompleksna, nestacionarna 3D vodna gladina, v obliki sodčka ali krovnega grbastega vala vzdolž cone mešanja. Primer sodčka ali grbastega vala je na sliki 72, za lažje razumevanje pomembnosti pojava pa je prikazano tudi razmerje med globino dotokov in višino konice krovnega vala preko sotočja, ki pri tem nastane.

4.3.1 Enačbe za opis glavnih karakteristik stoječih valov pri 90° sotočjih

Opazovanje razmer na T-sotočju je pokazalo, da se oblikuje nekaj grbin in prevojev med njimi. Privzeli smo enako razdelitev kot drugi avtorji (Schwalt in Hager, 1995) in ocenili, da nastalo topografijo opišemo s karakteristikami, ki bi imele koristno sporočilno informacijo za reševanje primerov v praksi. To so običajno konice (maksimalne vrednosti), Z-koordinate posameznih valov in njihova lokacija (slika 73).

Pri pojavu sodčka se kljub majhnim globinam dotokov zaradi izrazitega dvofaznega toka oblikuje grbasti krovni val, katerega višina dosega tudi več kot desetkratno globino dotekajočega toka. Zaradi močne vertikalne dinamike se na območju sotočja disipira približno 80 % skupne energije dotokov, kljub temu pa se pri tem ohranja deroči režim vodnega toka vzdolž celotnega odseka, tudi dolvodno od sotočja. Primeri imajo, zaradi velikih hitrosti in kompleksne, nestacionarne topografije z visokim dvigom vodne gladine, vse lastnosti kritičnih primerov, ki se lahko pojavijo na sotočju, njihovo poznavanje pa je pomembno za rešitve na takšnih lokacijah v praksi.



Slika 73: Naris in tloris sotočja z vrisanimi glavnimi strukturami vodnega toka, za katere so podane zveze z vhodnimi parametri.

Figure 73: Front and plan views of a junction with the main flow structures of water flow for which relations with input parameters are given.

Na podlagi izdelanih 3D-modelov topografij vodne gladine za posamezne scenarije smo izvrednotili glavne lastnosti stoječega valovanja, z uporabo fenomenoloških modelov pa zapisali povezave teh lastnosti v odvisnosti od vplivnih parametrov v obliki brezdimezijskih števil. Vrednosti glavnih lastnosti stoječega valovanja na sotočju, ki so bile določene iz meritev in izdelanih 3D mrežnih modelov ter upoštevane pri fenomenoloških modelih, so podane v prilogi C. V poglavju 4.2.2, na sliki 69, so prikazane pojavne oblike in meje med njimi za vodni tok na območju sotočja.

Ker je naš način meritve topografije omogočil zaznavanje tudi najbolj komplicirane dinamike nihanja gladine, smo se pri fenomenoloških modelih omejili na scenarije s sodčkom na območju sotočja, ki jih drugi avtorji (z običajno merilno tehniko) doslej niso mogli izmeriti. Najprej so podana območja obravnave, pomen indeksov, osnovne in izpeljane veličine ter pogoji, pri katerih izpeljane enačbe veljajo.

Glede na sliko 73 smo obravnavali lastnosti naslednjih pojavov:

- $C \rightarrow$ krovni val na območju mešanja (grbasti val ali sodček)
- $B \rightarrow$ val ob steni na nasprotni strani od dotoka po stranskem kanalu
- $D \rightarrow$ val na strani stranskega dotoka (kanala) (odboj vala B)

Pri tem se uporabljajo indeksi, ki pomenijo:

- $g \rightarrow$ glavni kanal
- $s \rightarrow$ stranski kanal
- $M \rightarrow$ maksimalna vrednost (konica vala)
- $E \rightarrow$ oznaka za dolvodni konec stoječega vala

Zaradi lažje primerljivosti z rezultati raziskav drugih avtorjev smo uporabili nekatere enake vhodne in izpeljane veličine, nekatere pa smo izbrali ali določili na novo. Pri tem pomenijo:

- $X \rightarrow \text{os v smeri glavnega kanala}$
- $Y \rightarrow$ os, pravokotna na glavni kanal (smer stranskega kanala)
- $Z \rightarrow$ vertikalna os
- $A(X=0, Y=0, Z=0) \rightarrow$ izhodišče lokalnega koordinatnega sistema (začetek sotočja, levi rob glavnega kanala (nasproti stranskega kanala), dno kanala)
- $\delta \rightarrow \text{kot sotočja} (\text{v našem primeru } \delta = 90^{\circ})$
- $\theta \rightarrow$ kot cone mešanja (npr. linije grebena na stiku dveh deročih tokov)
- $h_g \rightarrow višina/globina$ dotekajočega toka v glavnem kanalu [m]
- $h_s \rightarrow višina/globina dotekajočega toka v stranskem kanalu [m]$
- $H' \rightarrow$ brezdimenzijski zapis višine fluktuacije vodne gladine [-]
- $h' \rightarrow$ višina fluktuacij [m]
- $b = b_g = b_s = \rightarrow$ v našem primeru sta enaki širini obeh kanalov [m]
- $\bar{b} = (b_g * b_s)^{0,5} \rightarrow$ razmerje širin obeh kanalov [m]

Izpeljane veličine:

- $Fr_g = \frac{v_1}{\sqrt{(g*h_g)}} \rightarrow$ Froudovo število dotekajočega toka v glavnem kanalu
- $Fr_s = \frac{v_2}{\sqrt{(g*h_s)}} \rightarrow$ Froudovo število dotekajočega toka v stranskem kanalu
- $f = \frac{Fr_g * Fr_s}{(Fr_g + Fr_s)} \Rightarrow$ razmerje Froudovih števil dotekajočih tokov

Za tako določene vhodne parametre in oznake so, na podlagi analize meritev celotnega nabora scenarijev (poglavje 4.2.2), podane še omejitve veljavnosti fenomenoloških izrazov oz. modelov, in sicer morajo biti zagotovljeni naslednji pogoji:

•
$$0,6 \approx \left[M_R = \frac{M_g}{M_g + M_s}\right] \approx 0.8$$

- $Fr_g > 6$
- $Fr_s > 3$
- $b = b_g = b_s$
- $\delta = 90^{\circ}$

S topološkim zapisom so podane razsežnost, lokacija in višina najvišje točke posameznega grebena stoječih valov. Za najvišje točke posameznega grebena je poleg enačbe za izračun srednje vrednosti gladine pri tako razburkanih pojavih treba podati tudi enačbo fluktuacij vodne gladine v točki maksimuma.

Opis območij C, B, D (slika 73) lahko podamo z enačbami, ki uporabljajo zgoraj opisane parametre. V postopku razvoja enačb smo za posamezno vhodno ali izpeljano veličino ali parameter preverili njegov vpliv na lastnosti pojavov. Najvplivnejši parametri ali razmerja fizikalnih veličin so bili vključeni v sestavo fenomenološkega modela, pri čemer je bila njegova končna oblika določena glede na stopnjo doseženega ujemanja med merjenimi vrednostmi in vrednostmi, izračunanimi po na novo določeni enačbi. Z vrednostjo koeficientov v enačbah smo tudi pokazali pomembnost vpliva posameznega parametra. Najprimernejšo formulacijo fenomenološkega modela smo preverili s korelacijsko analizo.

Na spodnji sliki je prikazana korelacija med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi za maksimalno višino grebena vala C kot enega najpomembnejših podatkov pri obravnavanem pojavu na sotočju. Podano je tudi območje zaupanja ±5 % in enačba regresijske premice, ki kaže, da v celotnem razponu meritev enačba daje dobre rezultate, tj. ne daje ne podcenjenih ne precenjenih vrednosti v katerem od območij vrednosti vhodnih parametrov.



Slika 74: Primerjava med izmerjenimi in izračunanimi vrednostmi višine grbastega vala na sotočju. Figure 74: Comparison between the measured and calculated values of height of the humped wave at the confluence.

Na podlagi podrobne analiz posameznega pojava na sotočju so bile (na zgoraj opisani način) kot rezultat oblikovane enačbe lastnosti pojavov C, B, D na sotočju (slika 73). Enačbe so podane v nadaljevanju in smiselno združene za posamezni pojav.

Ker so lastnosti vala C, posledično pa tudi ostalih dveh obravnavanih grebenov, odvisne od kota, pod katerim se ustvari cona mešanja (oz. trka) dveh tokov in s tem pojav grebena vala C, je najprej podana enačba za izračun tega kota. Na sliki 75 je prikazano merjenje kota θ .



Slika 75: Glavni greben vala C se vzpostavi vzdolž cone mešanja. Figure 75: The main ridge of wave C is established along the circulation zone.

Kot cone mešanja oziroma grebena vala C lahko zapišemo kot:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{b - y_{MC}}{x_{MC}} \right) \tag{69}$$

pri čemer je $tan\theta$ enak:

$$tan\theta = \left(\frac{b - y_{MC}}{x_{MC}}\right) = 0.9 * \left(\frac{h_s}{h_g}\right)^{1,2} * f^{0,8}$$
(70)

Glavne lastnosti vala C

• Vzdolžna koordinata maksimalne višine grebena vala C

$$X_{MC} = \frac{x_{MC}}{b} = 1.1 * (\cos\theta)^{(-4,5)} * \left(\frac{h_s}{h_g}\right)^{(-0,6)} * Fr_g^{0,8} * Fr_s^{0,1} * \left(\frac{b}{\bar{h}}\right)^{(-0,85)}$$
(71)

• Prečna koordinata maksimalne višine grebena vala C

$$Y_{MC} = \frac{y_{MC}}{\bar{h}} = b - 2 * (\sin\theta)^{(-1,5)} * \left(\frac{h_s}{h_g}\right)^{3,7} * Fr_g^{(-2,5)} * Fr_s^{3,7}$$
(72)

• Maksimalna višina grebena vala C

$$Z_{MC} = \frac{h_{MC}}{\bar{h}} = Fr_g * Fr_s^{1,4} * \left(\frac{b}{\bar{h}}\right)^{(-0,6)}$$
(73)

• Fluktuacije na mestu maksimalne višine grebena vala C

$$H'_{MC} = \frac{h'_{MC}}{h} = 0.11 * Fr_g^{1,1} * Fr_s^{0,2}$$
(74)

• Dejansko stanje višine vode na mestu maksimalne višine grebena vala C

$$Z_{MC,dej} = Z_{MC} \pm H'_{MC} \tag{75}$$

Glavne lastnosti vala B

• Vzdolžna koordinata maksimalne višine grebena vala B ob steni nasproti stranskega dotoka

$$L_{MB} = \frac{x_{MB}}{b} = (\cos\theta)^4 * Fr_g^{0,25} * Fr_s^{0,15}$$
(76)

• Maksimalna višina grebena vala B ob steni nasproti stranskega dotoka

$$Z_{MB} = \frac{h_{MB}}{\bar{h}} = 1.1 * Fr_g^{0.9} * Fr_s^{1.5} * \left(\frac{b}{\bar{h}}\right)^{(-0,6)} - 1$$
(77)

• Fluktuacije na mestu maksimalne višine grebena vala B ob steni nasproti stranskega dotoka

$$H'_{MB} = \frac{h'_{MB}}{\bar{h}} = 0.16 * Fr_g^{0.6} * Fr_s^{0.75}$$
(78)

• Dejansko stanje višine vode na mestu maksimalne višine grebena vala B ob steni nasproti stranskega dotoka

$$Z_{MC,dej} = Z_{MB} \pm H'_{MB} \tag{79}$$

• Vzdolžna koordinata dolvodnega konca grebena vala B ob steni nasproti stranskega dotoka

$$L_{EB} = \frac{x_{EB}}{\bar{h}} = 0.75 * \left(\frac{h_s}{h_g}\right)^{(-1,3)} * Fr_g^{1,5} * Fr_s^{(-0,9)} * \left(\frac{b}{\bar{h}}\right)^{0,75} + \frac{b}{2\bar{h}}$$
(80)

Glavne lastnosti vala D

Vzdolžna koordinata maksimalne višine grebena vala D

$$L_{MD} = \frac{x_{MD}}{\bar{b}} = 1 + 0.45 * \left(\frac{h_s}{h_g}\right)^{(-2,1)} Fr_g^{2,3} * Fr_s^{(-1,2)} * \left(\frac{b}{\bar{h}}\right)^{(-0,5)}$$
(81)

• Maksimalna višina grebena vala D ob steni nasproti stranskega dotoka

$$Z_{MD} = \frac{h_{MD}}{\bar{h}} = 2.3 * Fr_g^{0.7} * Fr_s^{0.8} * \left(\frac{b}{\bar{h}}\right)^{(-0.55)}$$
(82)

• Fluktuacije na mestu maksimalne višine grebena vala D ob steni nasproti stranskega dotoka

$$H'_{MD} = \frac{h'_{MD}}{\bar{h}} = 0.1 * F r_g^{\frac{2}{3}} * F r_s^{\frac{2}{3}}$$
(83)

• Dejansko stanje višine na mestu maksimalne višine grebena vala D ob steni nasproti stranskega dotoka

$$Z_{MD,dej} = Z_{MD} \pm H'_{MD} \tag{84}$$

Zaradi skupnega števila enačb za posamezno povezavo ni podan graf s prikazom korelacije med merjenimi in izračunanimi vrednostmi. Kljub nestalnosti pojava z izrazito turbulentnim tokom z veliko vertikalno in horizontalno dinamiko pa je ujemanje presenetljivo zelo dobro. Faktor korelacije večinoma presega R $^2 \ge 0.9$. Narava pojava se odraža v posameznih točkah, ki nekoliko odstopajo, kljub temu pa so večinoma znotraj območja zaupanja ± 10 %. Nekoliko slabše ujemanje (R²~ 0,7) je doseženo pri fluktuacijah, kar je razumljivo, saj gre pri določanju razpona nihanja gladine okoli srednje vrednosti za oceno iz filtriranega oblaka točk.

Za vse ostale parametre, ki opisujejo topologijo vodne gladine na območju sotočja, so enačbe s pripadajočo primerjavo med merjenimi in izračunanimi vrednostmi podane v prilogi E.

4.3.2 Primerjava rezultatov na T-sotočju z rezultati drugih avtorjev

Le s primerjavo rezultatov podobnih raziskav drugih avtorjev lahko ocenimo uspešnost naše raziskave ter pokažemo nov prispevek in pomen rezultatov. V nadaljevanju smo opravili primerjavo našega dela s primerljivimi raziskavami, katerih cilj je bil opis topografije oziroma so podale zapis topologije vodne gladine na sotočju v odvisnosti od vhodnih parametrov.

Kljub razmeroma številnim raziskavam sotočij pa le raziskava Schwalt-Hager (1995) podaja zares primerljive rezultate, tj. topologijo struktur vodnega toka na sotočju pri deročem toku. Cilji drugih raziskav so bili večinoma usmerjeni v določanje hitrostnih polj, energijskih izgub, lastnosti turbulentnega toka ipd. Schwalt in Hager pa sta prav tako na podlagi eksperimenta določila nabor enačb za opis glavnih lastnosti stoječih valov na območju sotočja. Pri meritvah sta se omejila na asimetrična sotočja do kota 60°, saj sta bila mnenja, da se pri večjih kotih, predvsem pa pri pravokotnem sotočju, vedno pojavi zajezitev obeh kanalov (Hager, 2010). Avtorja sta veljavnost svojih enačb tako omejila na kote sotočij do 70°, a ker gre za edino primerljivo raziskavo, smo za vse lastnosti stoječih valov na sotočju, ki so bile obravnavane tako v naši kot njuni raziskavi, izvedli primerjavo izračunanih in merjenih vrednosti. Nekatere enačbe Schwalt-Hager kot člen produkta ali v imenovalcu vsebujejo *cosô* (kot sotočja). Ker je ta v našem 90°, torej je *cosô* = 0, primerjava merjenih vrednosti ni mogoča (npr. vzdolžna koordinata maksimalne višine val C, konec vala B). Naše raziskave kažejo, da prvenstveno na razmere na sotočju vpliva kot cone mešanja (θ) oziroma vala C (ta je odvisen od gibalne količine obeh dotokov) oziroma so nadaljnji pojavi odvisni od tega kota. Zato je na spodnji sliki namenoma, kot možen vir razlik med vrednostmi, izračunanimi iz enačb Schwalt-Hager, ki vsebujejo člen s kotom cone mešanja, prikazana primerjava merjenih vrednosti kota cone mešanja θ in izračunanih vrednosti po naši enačbi in enačbi Schwalt-Hager.



Slika 76: Primerjava izračunanih vrednosti po enačbah določenih v tej disertaciji in Schwalt-Hager z merjenimi vrednostmi na preizkuševališču T-sotočja.

Figure 76: Comparison between the values calculated with equations determined in this dissertation and Schwalt-Hager equations and measurements at the experiment of T-junction.

Kot je razvidno, daje enačba Schwalt-Hager prenizke izračunane vrednosti kota cone mešanja. Podobno se pokaže tudi pri ostalih topografskih lastnostih vodne gladine na sotočju, le pri izračunu vzdolžnih koordinat maksimalnih višin valov njune enačbe dajejo prevelike vrednosti – torej kažejo, da bi se naj konice valov pojavile dlje dolvodno. Odstopanje je v obeh primerih pričakovano. Pri manjših kotih sotočij je namreč celotna gibalna količina obeh dotokov veliko bolj usmerjena dolvodno, v smeri toka dolvodnega kanala, zato pa se temu primerno tudi bolj dolvodno pojavijo posamezni stoječi valovi. Pri 90° sotočju je disipacija energije na sotočju bistveno večja, vertikalna dinamika temu primerno večja, pojavi pa tudi bolj skoncentrirani na samo sotočje in ožje območje neposredno dolvodno. V prilogi E, kjer so podane enačbe, določene v tej disertaciji, in korelacija merjenih in izračunanih vrednosti, je grafično podana tudi primerjava z izračunanimi vrednostmi po enačbah Schwalt-Hager za naslednje spremenljivke: kot cone mešanja, vzdolžna koordinata maksimalne višine grebena vala C, maksimalna višina grebena vala C, vzdolžna koordinata maksimalne višine grebena vala B ob steni nasproti stranskega dotoka in maksimalna višina grebena vala B ob steni nasproti stranskega dotoka.

V topološkem opisu vodne gladine so podane tudi fluktuacije na mestu največje višine posameznega vala. Zaradi uporabljenih klasičnih merilnih metod (ostno merilo, Pitotova cevka) v objavi o raziskavi Schwalt-Hagerja nihanja gladine niso bila obravnavana, pa tudi enačb za oceno fluktuacij vodne gladine na območju sotočja iz literature ni moč zaslediti. So pa nekateri drugi avtorji to določili za nihanje gladine na območju vodnega skoka v kanalu (npr. Chanson in Murzyn, 2009; Chachereau in Chanson, 2010). Zaradi povsem drugačne dinamike vodne gladine, ki se pojavi na sotočju dveh dotokov, neposredna primerjava sicer ni mogoča, kažeta pa obe raziskavi, da so fluktuacije vodne gladine na območju turbulentnega vodnega toka odvisne od tokovnih razmer na dotoku oziroma obeh dotočnih vejah. Tudi pri vodnem skoku, preko katerega deroči tok preide v mirni režim, s čimer se pojavi vpliv na tokovne razmere gorvodno, pa pri tem ni zaznati neposrednega vpliva na nihanje gladine na območju vodnega skoka.

4.4 Terenske meritve reprezentativne gladine spodnje vode HE Doblar

Rezultati laboratorijskih meritev že kažejo, da so možna področja uporabe laserskega skeniranja tudi v praksi in omogočajo ocen pričakovano merilno negotovost meritev. Praktična uporabnost je bila že potrjena na primeru meritev dinamike vodne gladine na območju izteka valov na obalo, kjer zaradi močnega penjenja metoda zagotavlja natančne rezultate meritev po prerezu ob veliki časovni in krajevni ločljivosti (Blenkinsopp et al., 2010).

V našem primeru pa je bila opravljena verifikacija merilne metode, ko je bila uporabljena za meritve spodnje vode v odzračevalni komori HE Doblar I. Meritve so podrobneje opisane v poglavju 3.1.4. Na sliki 77 so v tlorisu prikazane tokovne razmere na mestu meritev na iztoku v odvodni kanal.



Slika 77: Tokovne razmere v odzračevalni komori HE Doblar I, posnete z zaporednimi slikami s časovnim razmikom 0,1 s.

Figure 77: Flow conditions in the vent chamber of HPP Doblar I, recorded as an image sequence with a time interval 0.1 s.

V času meritev v vseh delovnih točkah je bil odprt ventil, ki omogoča vstop zraka skozi pesto turbine. Zrak služi zmanjševanju tlačnih fluktuacij kot posledica prisotnosti kavitacijskega vrtinca, kar povzroča penjenje na vodni površini. Uspešnost meritev se kaže v ustreznem zajemu poteka dejanske vodne gladine prek celotne komore (slika 78). Vertikalne točke predstavljajo stene komore, rdeče obarvane točke pa prečni potek gladine v izbranem časovnem prerezu.



Slika 78: Prečni potek gladine spodnje vode v odzračevalni komori HE Doblar I v izbranem časovnem koraku meritve 6 iz preglednice 17.

Figure 78: Transverse water surface profile in the vent chamber of HPP Doblar I in the selected time step of measurement 6 from Table 17.

Kljub ugodnim pogojem, ki zagotavljajo razmeroma veliko število uspešnih meritev v posameznem skenu, pa je točnost meritev težko povsem natančno določiti. Kontrolne kote gladine, določene na podlagi slik izrisanih merilnih oznak skale na steni odzračevalne komore, omogočajo verifikacijo le na stenah, saj odražajo nihanje gladine ob steni, medtem ko je z laserskim skenerjem zajet celotni prerez in na vodnem toku nimamo referenčne meritve. Prav tako je pri merilni negotovosti več možnih virov napak. Poleg nazivne naključne napake merilnika (±12 mm) k odstopanju prispevajo še montaža in demontaža skenerja med meritvami, namenjenimi umerjanju, in dejanskimi meritvami spodnje vode, debelina pen, meritve gladine v izbranem prerezu, kljub temu da se na iztočnem območju pojavlja razgibana 3D-gladina. Odstopanje zaradi nihanja gladine in debeline sloja pen smo poskušali zmanjšati z zajemom dolge serije meritev (15.000 skenov). Skupna merilna negotovost meritev spodnje vode je bila tako ocenjena na ±10 cm. Razmeroma velika merilna negotovost je bila določena zaradi demontaže in ponovne montaže med umerjanjem in samimi meritvami. Zaradi težav z visoko spodnjo vodo ob obilnih padavinah je bil merilnik nekaj dni pred meritvami odstranjen in nato spet zmontiran (Hočevar et al., 2014). Kota spodnje vode je služila kot referenčna vrednost in je bila določena piezometrično na steni odzračevalne komore s tlačnim pretvornikom, montiranim v stransko komoro.

V spodnji preglednici so podane kote spodnje vode, določene na podlagi meritev. V zadnjem stolpcu preglednice 17 je podana tudi standardna deviacija, ki posredno podaja še informacijo o nihanju vodne gladine pri posamezni meritvi. Pri nobeni delovni točki meritve prečnega poteka gladine niso pokazale, da bi bila srednja vrednost nivoja gladina vode različna na levi strani, v sredini ali na desni strani.

meritev	Meritev LMS	Kota spodnje vode	Standardna deviacija
[-]	[m]	[m n. v.]	[m]
1	6,8	105,43	0,09
2	6,79	105,44	0,09
3	6,78	105,45	0,09
4	6,78	105,45	0,1
5	6,78	105,45	0,09
6	6,77	105,46	0,1
7	6,79	105,44	0,09
8	6,78	105,45	0,1
9	6,77	105,46	0,1
10	6,78	105,45	0,1

Preglednica 17: Rezultati meritev spodnje vode v odzračevalni komori HE Doblar I. Table 17: Results of tailwater measurements in the vent chamber of HPP Doblar I.

Z uporabo laserskega skenerja z manjšo nazivno naključno napako meritev, s trajno montažo merilnika in brez poseganja v nastavitve naprave ter z nekaterimi drugimi izboljšavami bi bilo mogoče merilno negotovost tudi zmanjšati. Kljub večji merilni negotovosti, kot je bila določena pri testnih meritvah v laboratoriju, je bila potrjena uporabnost merilne metode v praktičnih primerih, napaka meritev pa je glede na dejanske razmere na terenu povsem zadovoljiva. S stališča potreb obratovalca HE sicer niso potrebne meritve s časovno ločljivostjo, kot je bila uporabljena pri meritvah, je pa mogoče z meritvami celotnega prereza natančneje in z več sporočilnosti določiti merodajno koto spodnje vode, kot bi bila določena pri meritvah v eni točki z drugimi merilnimi metodami (npr. lokalne meritve z ultrazvočnim merilnikom).

4.5 Skupne ugotovitve in potrditev hipotez

Na podlagi opravljene verifikacije merilne metode za meritve vodne gladine in rezultatov eksperimentalne analize tokovnih razmer na sotočju v nadaljevanju podajamo ključne ugotovitve, s katerimi je mogoče preveriti veljavnost uvodoma podanih hipotez. Ker se pri raziskovalnem delu vedno pojavljajo novi izzivi in vprašanja, so na koncu podane še nekatere usmeritve za morebitno nadaljnje delo.

4.5.1 Uporabnost laserskega skeniranja za zajem topografije vodne gladine

Nesporno široka uporabnost laserskega skeniranja se kaže predvsem pri meritvah trdnih teles, ne glede na zahtevnost morfologije površine. Nekateri avtorji so s svojimi poskusi že potrdili uporabnost metode tudi pri meritvah vodne gladine, ob dodajanju delcev za izboljšanje odbojnosti tudi pri laboratorijskih raziskavah. Dodajanje delcev je pri eksperimentalni hidravliki zaradi občutljivih elementov sistemov, kot so črpalke in merilna oprema neposredno na cevovodih ter velikih količin vode v sistemu, pogosto nemogoče.

Dodatno vrednost merilni metodi dajejo tudi rezultati naše raziskave, ki kažejo, da je lasersko skeniranje učinkovita metoda tudi pri modelnih raziskavah v primeru uporabe čiste vode. Pri tem je treba poudariti, da metoda preizkušeno daje zelo dobre rezultate v primerih izrazitih dvofaznih tokov. Naše izkušnje tudi kažejo, da je v primerih vodnega telesa z razmeroma majhno vsebnostjo zračnih mehurčkov oz. majhno gostoto dvofaznega toka v vrhnji plasti merilna metoda manj primerna, globine vode podcenjene, natančen potek gladine pa težko določljiv. Predvsem kadar se pri majhni količini mehurčkov ti pojavljajo v celotnem stolpcu merjenega vodnega telesa, prihaja do odboja žarkov od njih tudi pod vodno gladino, zaradi česar meritve izkazujejo večje razdalje in s tem nekaj centimetrov nižje gladine oziroma globine vode. Pri terenskih meritvah (meritve spodnje vode HE itn.) je takšna napaka lahko sprejemljiva, ni pa sprejemljiva za večino laboratorijskih primerov. V primeru močno ozračenih zgornjih slojev vodnih teles z zveznim in homogenim slojem mehurčkov je mogoče zelo natančno zajeti tudi profile vodne gladine turbulentnih tokov z veliko vertikalno dinamiko. Medtem ko pri takšnih pogojih druge brezkontaktne merilne metode (ultrazvočni merilniki itn.) ne dajejo zadovoljivih rezultatov, lasersko skeniranje predstavlja robustno rešitev z razmeroma enostavno obdelavo podatkov o odboju za določitev srednje lege gladine in pulzacij.

V primerjavi z drugimi merilnimi metodami, ki so bile do sedaj preizkušene za zajem prečnega poteka ali celotne topografije vodne gladine, se pri laserskem skeniranju kaže pomembna prednost predvsem pri kompleksnih primerih z nehomogenim in nestacionarnim tokom. Uporabnost fotogrametrije oz. triangulacije, ki zahteva dodajanje plavačev, je omejena na preproste primere, z geodetsko prizmo na čolničku pa je mogoče izvajati meritve le na toku s prosto gladino (reke, jezera), kjer se pojavlja razmeroma mirna gladina vode, pri tem pa so ugodni vremenski pogoji. Za razliko od omenjenih merilnih metod lasersko skeniranje zagotavlja meritve pri zahtevnejših primerih z veliko prostorsko in časovno dinamiko. Natančen opis topografije vodne površine je, predvsem v primerih z močno razgibano gladino v prečni smeri, pomemben podatek tudi za umerjanje in verifikacijo numeričnih modelov. Tudi 3D numerični modeli namreč ob nenatančno podanih robnih pogojih ne morejo simulirati dovolj natančnih rezultatov na območju obravnave.

Ker lasersko skeniranje omogoča meritve razmeroma dolgih prerezov, je metoda primerna za zajem časovnega in krajevnega nihanja vodne gladine pri potovanju valov. Številni hidravlični laboratoriji, predvsem v državah, ki se soočajo z erozijo morja, v kanalih za simuliranje morskih valov iščejo

možnost zamenjave uporovnih ali valovnih tipal z laserskimi merilniki. Slednji za razliko od uporovnih tipal brezkontaktno izmerijo obširnejši merjeni prerez, kar omogoča analizo sočasnosti dinamike v opazovanem prerezu. Pri valovanju gre sicer za precej počasnejšo dinamiko pojava kot v našem primeru, kljub temu pa za analizo potovanja in preoblikovanja valov niso bistvene zgolj povprečne vrednosti, temveč tudi povprečene vrednosti znotraj zelo majhnih časovnih oken, na podlagi katerih je mogoče pravilno oceniti dinamiko valovanja na merodajni dolžini potovanja valov.

Z analizo rezultatov meritev so bili v postopku verifikacije merilne metode podani pogoji stanja vodnih teles, pri katerih je mogoče natančno zajeti potek vodne gladine, s tem pa so tudi nakazana možna področja uporabe laserskega skeniranja pri laboratorijskih in praktičnih primerih. Uspešna meritev kompleksnih topoloških struktur vodne gladine in njene časovne spremenljivosti pri vseh obravnavanih scenarijih na sotočju kanalov z deročim režimom toka z laserskim skenerjem je potrdila prvo hipotezo, da je mogoče izmeriti potek gladine z merilno metodo, ki na območju obravnave ne posega v vodni tok, omogoča pa natančnejšo izmero poteka gladine in njihove časovne ter prostorske dinamike.

4.5.2 Določanje hidravličnih razmer na sotočju in topologije

Tokovne razmere pri različnih hidravličnih pojavih se najpogosteje določajo z meritvami hitrosti in globin vodnega toka ob znanih robnih in začetnih pogojih. Pri tokovnih razmerah z manjšo dinamiko se poskuša zajeti celotna hitrostna polja na obravnavanem območju, običajno pa zadošča, če so meritve globin izvedene v posameznih točkah. To potrjujejo tudi objavljene raziskave, iz pregleda katerih smo ugotovili, da so topografijo vodne gladine poskušali zajeti le redki avtorji, pa še ti na primerih s preprosto topografijo vodne gladine. Prav tako so razmere pri določenih hidravličnih pojavih, kot sta vodni skok in tok preko hidravličnih objektov, dobro opisane v povezavi z geometrijskimi in hidravličnimi parametri. Slabo pa je raziskano področje topologije vodne gladine pri kompleksnejših hidravličnih pojavih. Enako velja tudi za področje raziskav hidravličnih razmer na sotočjih.

V preteklosti so bila sotočja sicer pogosto predmet raziskav, kljub temu pa je bila topologija vodne gladine podrobneje obravnavana le v raziskavi Schwalt-Hager (1995). S primerjavo rezultatov njune in naše raziskave smo preverili konceptualno zasnovo njunih enačb, vendar je veljavnost njunih enačb omejena zgolj na sotočja manjših kotov. Nove enačbe, fenomenološko izpeljane iz naših meritev, pomembno razširijo področje uporabnosti enačb tudi za pravokotna sotočja in pokažejo obseg razlik, ko se bližamo 90° sotočju. Z določitvijo povezav med integralnimi parametri in parametri, ki opisujejo prečni in vzdolžni potek gladin ter njihove fluktuacije na območju sotočij, je bila (glede na pregled objav) prvič podrobneje opravljena karakterizacija topologije vodne gladine na sotočjih pri deročem režimu vodnega toka. S tem smo podali kvalitativne kot tudi kvantitativne povezave med posameznimi hidravličnimi in geometrijskimi parametri dveh stekajočih se deročih vodotokov, kar prispeva pomembne informacije za inženirsko prakso na področju načrtovanja prečnih in vzdolžnih objektov na območju sotočja.

Na podlagi preteklih raziskav je veljalo prepričanje, da se pri pravokotnem sotočju, kljub deročemu toku, vedno pojavlja zajezitev toka v obeh dotočnih vejah. Z rezultati našega eksperimentalnega dela smo pokazali, da trditev ne drži in da se lahko tudi v primeru pravokotnega sotočja, kljub močno turbulentnemu toku, veliki disipaciji energije in izrazito močni vertikalni dinamiki, deroči tok ohranja prek sotočja in nadaljuje v dolvodnem odseku. Gre za pomembno razliko. Konjugirana vodna gladina za vodnim skokom je namreč lahko bistveno nižja od izmerjene konice valov na sotočju, kar posledično pomeni, da bi bili inženirski posegi poddimenzionirani.

Z opisom glavnih struktur vodnega toka, ki se pojavljajo na območju sotočja glede na lastnosti obeh dotokov, predvsem pa z razvojem fenomenoloških enačb, je potrjena tudi druga hipoteza, s čimer smo dosegli zastavljene cilje disertacije. Če strnemo dosežke raziskav, so rezultati in ugotovitve, ki jih lahko štejemo kot prispevek k znanosti, naslednji:

- Podane so ugotovitve o delovanju merilne metode pri meritvah gladine čiste vode in pogoji, pri katerih je metodo mogoče uporabljati v laboratorijskih raziskavah in terenskih meritvah,
- pokazano je, da merilna metoda zagotavlja natančen zajem vodne gladine tudi v primerih, kjer druge kontaktne in brezkontaktne merilne metode ne dajejo zadovoljivih rezultatov, to je pri močno nehomogenem in nestacionarnem toku,
- pokazano je, da merilna metoda omogoča natančen zajem prečnega poteka gladine in s tem topografije vodne gladine kompleksnih primerov s turbulentnim tokom in močno vertikalno ter horizontalno dinamiko, in sicer z veliko časovno in krajevno ločljivostjo,
- na podlagi obdelave surovega oblaka točk odboja so lahko analizirane in ovrednotene tudi praktično sočasne fluktuacije vodne gladine preko celotnih merjenih prerezov, saj je dinamika pomika laserskega žarka bistveno večja od dinamike sprememb gladine,
- obdelava surovega oblaka točk meritev z laserskim skeniranjem omogoča konstruiranje topografije vodne gladine, ki omogoča nadaljnje analize tokovnih razmer, določitev glavnih struktur vodnega toka na sotočju ipd.,
- določene so nove fenomenološke enačbe za opis povezav med integralnimi parametri in glavnimi lastnostmi topografije stoječega valovanja, ki opisujejo topologijo na pravokotnem sotočju pri deročem režimu vodnega toka.

Pri zasnovi raziskovalnega dela je bila predvidena tudi analiza vpliva stopnje na prehodu med stranskim in glavnim kanalom. Zaradi obsežnosti izvedenih eksperimentalnih meritev vseh scenarijev za primer brez stopnje, ki so bili uporabljeni za analizo glavnih struktur vodnega toka na sotočju, in podrobnejše raziskave pojava sodčka ali grbastega vala, v eksperiment nismo vključili modifikacije dna preizkuševališča s stopnjo. Za natančnejšo analizo vpliva stopnje na prehodu iz stranskega v glavni kanal bi bilo treba namreč opraviti še številne meritve različnih scenarijev. Kot pa se je pokazalo pri primeru brez stopnje, je za oblikovanje sodčka ali grbastega vala potrebna velika gibalna količina glede na tok v glavnem kanalu. To pa bi bilo z zmanjšanjem globin toka v stranskem kanalu tudi težko doseči.

4.5.3 Nadaljnje delo

Rezultati eksperimentalnega dela dajejo pomembne informacije o delovanju laserskega skeniranja pri meritvah vodne gladine, kljub temu pa opravljene analize zaradi narave interakcije med vpadlo svetlobo signala laserskega merilnika in vodnim telesom odpirajo nova področja raziskav, ki presegajo obseg dela disertacije oziroma možnosti ob razpoložljivi opremi. Pri verifikaciji merilne metode smo pokazali, da so meritve pri čisti vodi mogoče le v primeru močno dvofaznih tokov v vrhnji plasti vodnega toka. Z razpoložljivo opremo ni bilo mogoče določiti mejne vrednosti gostote dvofaznega toka v krovni plasti, pri kateri še dobimo natančen opis poteka vodne gladine. Pri meritvah različne globine vode in isti količini vpihanega zraka v posodo s stoječo vodo smo pokazali, da se s spreminjanjem gostote dvofaznega toka spreminja tudi vpliv globljih delcev (mehurčkov) na zanesljivost meritev. V nadaljnjih raziskavah s kontrolirano gostoto dvofaznega toka bi bilo zato mogoče analizirati merilno negotovost v odvisnosti od gostote dvofaznega toka.

Prav tako še ni bilo podrobneje analizirano mesto odboja svetlobe na opni vodnih kapljic oziroma zračnih mehurčkov. Kot omenjeno, je po teoriji sipanja in loma svetlobe na kapljicah in zračnih

mehurčkih v vodi mogoče, da prihaja do odboja na zgornji, konveksni strani ali spodnji, konkavni strani oziroma prihaja do povratnega signala prek večkratnega odboja znotraj mehurčka. Odstopanje je pri tem odvisno predvsem od strukture dvofaznega toka (npr. velikosti kapljic, mehurčkov). Pri filtriranju surovega oblaka točk odboja je poleg mesta, vrste odbojne ploskve in vrste odboja (zrcalni, difuzni, spektralni), pomembna tudi disipacija energije, ki pri tem nastane. Boljše poznavanje pojava bi tako omogočalo natančnejše določanje vrednosti praga za filtriranje točk glede na jakost odbitega signala. Opisane izboljšave so smiselne predvsem pri uporabi merilne metode v laboratorijskih pogojih. Pri pojavih v naravi oziroma na vodni infrastrukturi, pri katerih lasersko skeniranje kaže bistvene prednosti pred drugimi merilnimi metodami, je v večini primerov merilna negotovost, pokazana pri našem praktičnem primeru, povsem zadovoljiva, saj so drugi viri napak, ki jih prav tako ni mogoče eliminirati pri drugih merilnih metodah, prevladujoči.

Pri meritvah kompleksne gladine z veliko časovno in prostorsko dinamiko smo ugotovili, da je število uspešno izmerjenih točk v posameznem skenu razmeroma majhno, za določitev povprečnega poteka gladine pa so zato potrebni razmeroma obsežni nizi meritev. Zaradi majhnega števila uspešnih meritev posameznega skena je trenutni potek gladine v njem težko natančno določljiv, posledično pa je iz niza zaporednih skenov težko izvedljiva diskretizacija dinamike vodne gladine. Spremljanje dinamike vodne gladine v času bi bilo mogoče z razvojem algoritma, ki bi potek vodne gladine v posameznem časovnem koraku določal z upoštevanjem meritev več skenov v časovnem oknu okoli izbranega časa.

Glede na težave in pomanjkljivosti, ki odpirajo nova področja raziskav, bi bilo v bodoče predvsem smiselno preveriti še uporabnost laserskih skenerjev z večjimi valovnimi dolžinami. Spektri svetlobe daljših valovnih dolžin namreč slabše prodrejo v vodno telo oziroma je disipacija energije na stiku z vodnimi telesi večja, zato bi bilo morda mogoče doseči ustreznejši odboj laserskega žarka tudi pri manj izrazitih dvofaznih tokovih. Laserskih skenerjev z daljšimi valovnimi dolžinami svetlobe zaradi specifičnosti uporabe na tržišču ni na voljo, zato bi bile takšne raziskave mogoče le v poglobljenem sodelovanju s strokovnjaki s področja elektrotehnike in optike.

Možnosti za nadaljnje delo se kažejo tudi na področju analize tokovnih razmer na sotočju. Naš eksperiment je bil opravljen pri fiksni geometriji sotočja, saj bi spremembe geometrije preizkuševališča ali že sama zasnova s fleksibilno geometrijo za vsako konfiguracijo zahtevale obsežne raziskave in s tem velik dodatni finančni in časovni vložek. Pri razvoju fenomenoloških enačb odvisnosti vhodnih parametrov na tokovne razmere na sotočju je bil vpliv geometrije tako lahko le delno zajet. Ker je bilo področje hidravličnih razmer pri pravokotnem sotočju ob velikih Froudovih številih zelo slabo raziskano, rezultati naše raziskave predstavljajo pomemben nov del mozaika in odpirajo pot tudi v analize vpliva spremenljive geometrije (npr. različne širine dotokov), s spreminjanjem naklona enega, drugega ali obeh odsekov, vstavljanjem stopnje na mestu sotočja itd.

Pri pojavih, ki smo jih podrobneje analizirali pri eksperimentu, se pojavlja izrazito dvofazni tok. Takšnih razmer po modelnih zakonitostih ni mogoče direktno preračunati na primere večjih in manjših dimenzij zaradi t. i. vpliva modelnega merila. Naše bazične raziskave so bile namreč zastavljene tako, da bi prispevale pomembne eksperimentalne podlage, ki jih je mogoče uporabiti za nadaljnje delo. Z raziskavami na podobnih modelih (izvedbah) večjih in manjših meril bi bilo mogoče dobljene ugotovitve in zakonitosti tudi interpolirati oziroma ekstrapolirati na primere, ki niso bili direktno eksperimentalno obdelani.

Seveda pa ostaja tudi izziv določanja vpliva gibljivega dna prodonosnosti v eksperimentalne raziskave, kar pomeni pojav večfaznega toka, in sicer v vseh treh agregatnih stanjih (plinasto, tekoče in trdno). Iz

takšnih raziskav bi bilo na začetku vsaj konceptualno možno določanje tokovnih razmer na sotočju, ki bi kazale področja odlaganja rinjenih in lebdečih plavin, pojav mrtvih con in vpliv spreminjanja morfologije dna na spreminjanje topografije vodne gladine in na tokovne razmere.

5 ZAKLJUČEK

Pri načrtovanju ureditev sotočij in objektov, ki se nahajajo na vplivnem območju tokovnih razmer na stiku dveh dotokov v mirnem režimu, se v praksi za določanje gladinskih stanj uporabljajo numerični modeli, pri detajlnih analizah tokovnih razmer in spremljajočih procesov (npr. transport sedimentov) pa pri zahtevnejših razmerah še vedno fizične modelne raziskave. Tako fizični kot numerični modeli dajejo zadovoljivo natančne rezultate le za primere z mirnim režimom toka obeh dotokov, pri dotokih z deročim tokom, tj. pri velikih hitrostih s Froudovim številom več kot ena, pa se na območju sotočja pojavlja močno turbulenten, dvofazni tok, ki ga je mogoče povsem natančno analizirati le s prototipnimi raziskavami. Za analize lastnosti tokovnih razmer na sotočjih pri visokih vrednostih Froudovih števil smo izbrali eksperimentalni pristop, in sicer na preizkuševališču sotočja T-oblike, ki je bilo po rezultatih pregleda literature v preteklosti najslabše raziskano. Ob stiku dveh dotokov v deročem režimu se, kljub veliki, predvsem vertikalni dinamiki vodne gladine, vzdolž sotočja oblikujejo značilne strukture vodnega toka oziroma stoječe valovanje, katerih topografijo je bilo pri naših poizkusih, ob uporabi merilne metode z veliko časovno in prostorsko ločljivostjo, mogoče zajeti, njene glavne lastnosti pa analizirati z obdelavo teh meritev. Pregled objavljene literature je pokazal tudi, da topografija hidravličnih pojavov s kompleksno razgibano vodno gladino in velikimi fluktuacijami okoli srednje vrednosti v preteklosti še ni bila zajeta, saj merilne metode, ki so jih avtorji običajno uporabljali v hidrotehniki, tega ne omogočajo.

Za topološke analize je bilo treba v prvem delu poiskati in preizkusiti merilno metodo, ki bi omogočala zajem podatkov topografije s frekvencami, bistveno večjimi od hitrosti spremenljivosti vodne gladine, ki bi imela veliko prostorsko ločljivost, hkrati pa elementi merilne opreme ne bi posegali v vodni tok in tako morebiti vplivali na tokovne razmere. Analiza različnih merilnih metod je pokazala, da veliko obeta metoda laserskega skeniranja, ki se uporablja v širokem spektru tako strokovnih kot tudi raziskovalnih področij za meritve ploskev oz. terena, vendar je na področjih, kjer se pojavljajo tudi vodna telesa, do sedaj večinoma veljala za manj primerno oz. uspešno. Ocenili smo, da bi lahko z inovativnim pristopom to metodo uspešno uporabili za naše raziskave razmer na sotočju, zato je bil najprej opravljen obsežen postopek verifikacije. Pri tem je bilo treba preučiti nastavitve merilne opreme in poiskati primerne frekvence vzorčenja itd., zato so bile izhodiščne meritve usmerjene v podrobno preverjanje delovanja merilne metode za primer stoječe vode v posodi, tako pri čisti vodi kot pri razmerah, ko je bilo mogoče v vodno telo kontrolirano dodajati različne medije. Pri stoječi vodi je bilo mogoče tudi natančno določiti referenčne vrednosti z uporabo klasične merilne opreme.

Serija poizkusov je pokazala uspešno uporabo merilne metode pri izmeri poteka gladinske ploskve pri močneje ozračeni stoječi vodi. Zato je bila metoda preizkušena na dinamični, razburkano razpenjeni površini vodnega toka na sotočju dveh deročih tokov. Z obsežnim nizom meritev je bila verifikacija uspešno izvedena še z zajemom prečnega poteka vodne gladine pri turbulentnih dvofaznih tokovih na območju stoječega valovanja na preizkuševališču T-sotočja. Z uspešnostjo meritev kompleksnega, nestacionarnega poteka gladine vodnega telesa, ne da bi na gladino oz. v vodni tok dodali delce za izboljšanje odbojnosti laserskih žarkov in s tem povečali število uspešnih meritev odbojev, ter ob doseženi primerni merilni negotovosti meritev, je bila potrjena prva postavljena hipoteza, da je mogoče poiskati in verificirati primerno metodo za zajem topografije vodne gladine vode z veliko časovno in prostorsko ločljivostjo. Rezultati verifikacije merilne metode širijo dosedanja področja uporabnosti laserskega skeniranja tudi na meritve vodne gladine. Kljub omejenosti meritev na hidravlične primere, kjer prihaja do izrazitih dvofaznih tokov, pa je treba poudariti, da imamo v praksi veliko primerov, kjer je pomembno poznati potek in dinamiko vodne gladine, pa izmere takšnih pojavov z dosedanjimi

merilnimi metodami ni bilo mogoče zadovoljivo opraviti. Medtem ko razgibana vrhnja plast turbulentnega dvofaznega ali razpenjenega toka pri drugih merilnih metodah vpliva na manj zanesljive, pogosto neuporabne rezultate meritev, pa pri laserskem skeniranju prav to omogoča uspešne meritve. Pri močno razvitih dvofaznih tokovih se pogosto ne pojavlja homogena plast razpenjenega toka, hkrati pa se pojavljajo leteče kapljice vode nad gladino. Pokazalo se je, da lasersko skeniranje zazna globlje potopljene mehurčke, pa tudi odboje na vodnih kapljicah škropljenja. Zaradi velike frekvence oddajanja laserskih žarkov je bilo na eni strani mogoče izmeriti dinamiko dogajanja v vodi in nad njo, na drugi strani pa je to vplivalo na natančnost izvrednotenja poteka povprečne vodne gladine v merjenem prerezu. Z analizo surovega oblaka točk je bilo ugotovljeno, da je mogoče vpliv takšnih odbojev (od potopljenih mehurčkov in kapljic v zraku) močno zmanjšati z upoštevanjem ustrezno izbranih mejnih jakosti odboja. Pri potovanju žarka skozi vodno telo prihaja namreč do disipacije energije, zaradi česar ima signal, ki se vrne na sprejemnik laserskega skenerja, nižjo energijo kot odboji iz zgornjih plasti oziroma s površine vodnega telesa. Zaradi majhne površine vodnih kapljic pršenja nad vodno gladino, od katere prihaja do odboja, pa imajo majhno energijo tudi povratni signali z njih. S filtracijo in obdelavo oblakov točk meritev smo lahko opisali potek vodne gladine z merilno negotovostjo ±5 mm na mestih z manjšo vertikalno dinamiko in ± 10 mm na mestih z veliko vertikalno dinamiko vodne gladine. Merilna negotovost je bila določena iz primerjave z meritvami gladine s hitro kamero v točkah, kjer je bila uporaba kamere mogoča. Pojave izrazitih dvofaznih tokov navadno spremlja velika vertikalna dinamika vodne gladine, zato se prednost meritev z veliko prostorsko in časovno ločljivostjo pokaže tudi v tem, da je mogoče iz oblaka točk oceniti tudi obseg vertikalne fluktuacije vodne gladine. Pri mirni, stoječi vodi je raziskava pokazala, da je merilna negotovost laserskega skeniranja sicer slabša, kot jo omogočajo nekatere druge merilne metode, kljub temu pa lasersko skeniranje v raziskave turbulentnih hidravličnih pojavov z razpenjeno in močno razgibano vodno gladino prinaša nove pomembne informacije, s katerimi je mogoč natančnejši opis in interpretacija pojavov, tako pri laboratorijskih raziskavah kot tudi širše v praksi, ki jih z običajnimi merilnimi metodami doslej še ni bilo mogoče zajeti.

Prednosti laserskega skeniranja so se izkazale v drugem delu disertacije, ko je bil uporabljen zajem kompleksne, nestacionarne topografije vodne gladine, ki se oblikuje na območju sotočja tokov v deročem režimu. Pregled literature pokaže sicer številne raziskave tokovnih razmer na sotočjih z deročim tokom, vendar pa meritve takšne topografije, zaradi omejenosti običajno uporabljenih merilnih metod pri meritvah vodne gladine, niso bile izvedene. Preizkuševališče T-sotočja v hidravličnem laboratoriju UL FGG, ki je omogočalo simuliranje dotokov z visokimi vrednostmi Froudovih števil, je s sistemom za natančno lociranje nameščene merilne opreme omogočilo tudi sistematično zajemanje topografije vodne gladine za obsežen nabor scenarijev (pretokov, robnih pogojev idr.). Na podlagi oblakov točk laserskega skeniranja so zato lahko bili izvrednoteni poteki vodne gladine po prerezih na medsebojni razdalji 100 mm, iz njih pa izdelana topografija v obliki 3D mrežnih modelov vzdolž celotnega sotočja. Z analizo hidravličnih razmer v vodnih tokovih in pojavov različnih struktur vodnega toka na območju sotočja je bila lahko izdelana klasifikacija tipov stoječega valovanja, ki se pojavijo, in izvedena analiza parametrov toka, ki posamezen tip narekujejo. Iz skupine štirih glavnih tipov pojavov na sotočju je bil v nadaljevanju za podrobnejšo analizo izbran pojav sodčka ali grbastega vala, ki je s svojimi značilnostmi tudi najbolj zanimiv za prakso. V tem primeru se pojavijo konice (gladine) stoječega valovanja, ki lahko za več desetkratni faktor presegajo globine dotokov, pri tem pa se preko območja sotočja ohranja deroči režim toka. Ker gre pri tem za izrazito turbulenten tok z razpenjeno in razgibano vodno gladino, ki ga (v obsegu te disertacije še) ni mogoče analitično popisati, so bile glavne lastnosti stoječega valovanja na območju sotočja zapisane s fenomenološkimi enačbami. Izkazana je dobra korelacija med izračunanimi vrednostmi z novo razvitimi enačbami in izmerjenimi vrednostmi na preizkuševališču za celotni nabor scenarijev. To dokazuje uspešen zapis topologije glavnih vodnih struktur, ki se pojavljajo na območju sotočja v odvisnosti od vhodnih, geometrijskih in hidravličnih parametrov. S tem pa je bila potrjena tudi druga postavljena hipoteza, hkrati pa dodan pomemben prispevek k inženirskemu delu v hidrotehniki.

S posameznimi ugotovitvami pri pripravi ustrezne merilne metode ter z prikazanimi vsebinami, ugotovitvami in rezultati disertacije smo podali nov prispevek znanosti. Z verifikacijo laserskega skeniranja je tudi na izmero vodnih gladin razširjeno področje uporabe merilne metode, po drugi strani pa smo pokazali, kako je mogoče zajeti topografijo vodne gladine kompleksnih hidravličnih pojavov, kar do sedaj še ni bilo izvedeno. Primerjava izmerjenih vrednosti in vrednosti, izračunanih po enačbah za opis lastnosti valovanja, je bila mogoča le z rezultati iz objave dveh avtorjev, ki smo jo sploh našli v pregledu literature, pa še v tem primeru so bile opravljene le meritve s klasično merilno opremo za sotočja manjših kotov. Rezultati so pokazali, da njune enačbe pri ekstrapolaciji na pravokotno sotočje dajejo podcenjene vrednosti. To pa je nova dodana vrednost za prakso, saj naše meritve kažejo večjo dinamiko tokovnih razmer na pravokotnem sotočju. Z novimi fenomenološkimi enačbami, razvitimi na podlagi meritev na našem eksperimentu, povezave med vhodnimi integralnimi parametri in lastnostmi stoječega valovanja, kot so npr. velikosti in položaj konic, prinašajo nova znanja za pravokotna sotočja. Pri tem smo dodatno analizirali tudi vertikalna nihanja vodne gladine po prerezih, kar je skupaj z razvitimi fenomenološkimi enačbami prav tako izvirni prispevek znanosti.

6 POVZETEK

Na sotočjih dveh ali več vodotokov se, predvsem pri deročem režimu dotokov, oblikuje turbulentni tridimenzionalni tok, zaradi velike hitrosti toka in dinamike vodne gladine, še posebej pri pojavu vodnega skoka, pa se pogosto pojavi tudi dvofazni tok. Ker je sotočje pogost element na naravni hidrografski mreži in na vodnih gradnjah, je poznavanje tokovnih razmer na sotočju pomembno tako za načrtovanje ureditev samih sotočij, obrežnih in morebitnih premostitvenih objektov kot tudi za razumevanje drugih spremljajočih procesov, kot je npr. dinamika premeščanja sedimentov in spreminjanje batimetrije. Kljub današnji visoki dovršenosti 3D numeričnih modelov bi bilo natančno simuliranje tokovnih razmer na sotočju z njimi mogoče le ob ustrezno opredeljenih začetnih in robnih pogojih, ki pa jih je mogoče pridobiti le na podlagi terenskih ali laboratorijskih meritev. To še posebej velja pri sotočjih deročih tokov, kjer se oblikuje močno razgibana 3D-topografija vodne gladine, pogosto še s stoječim valovanjem nad osnovnim vodnim tokom. Zaradi kompleksnosti in dinamike vodne gladine njena izmera s prostorsko ločljivostjo, ki bi omogočala natančen opis topografije, s klasičnimi merilnimi metodami ni mogoča. Na sotočju deročega toka se pojavijo časovno spremenljive strukture vodnega toka, zato je treba poleg prostorske zagotoviti tudi veliko časovno ločljivost merilne metode, kar je mogoče, če frekvenca vzorčenja izrazito presega dinamiko sprememb vodne gladine, ki jo želimo izmeriti.

S ciljem zajeti kompleksno, nestacionarno topografijo vodne gladine z veliko časovno in prostorsko ločljivostjo smo v prvem delu disertacije opravili niz meritev, kjer smo preverili ustreznost metode laserskega skeniranja za izmero poteka (ploskve) vodne gladine. Na številnih področjih že uporabljena merilna metoda skeniranja pa je bila za meritve vodne gladine do sedaj uporabljena le redko, pa še tedaj so bili vodi vedno dodani delci za izboljšanje odbojnosti, ki je sicer, zaradi narave interakcije med laserskim žarkom in vodno gladino, problematična in slabo raziskana. V objavljenih raziskavah prikazano dodajanje delcev (kalnost, namiznoteniške žogice itd.) pa pri meritvah na terenu kakor tudi pri laboratorijskih poskusih pogosto ni mogoče, npr. zaradi velike količine vode, škodljivega delovanja delcev na merilno in regulacijsko opremo. Zato smo najprej raziskali delovanje laserskega skeniranja pri merjenju gladine čiste vode in merilna negotovost meritev, ki jo je pri tem mogoče doseči. Verifikacija rezultatov meritev je bila opravljena v dveh delih. Najprej smo izvedli meritve gladine stoječe vode v posodi, kjer je bilo mogoče z drugačno merilno opremo natančno izmeriti referenčne vrednosti višine gladin. V drugem delu pa je bila preverjena uporabnost za meritve kompleksne topografije vodne gladine z veliko dinamiko in pojavi razburkanega dvofaznega toka ter primerjava z rezultati meritve s hitro kamero v kontrolnih prerezih. Za te analize je bilo izdelano preizkuševališče za primer sotočja dveh kanalov z deročim režimom, na katerem pri oblikovanju stoječih valov prihaja tudi do pojava samoozračenega dvofaznega toka.

Z analizo rezultatov meritev smo pokazali, da lasersko skeniranje lahko uporabimo tudi v primerih, ko je kot medij uporabljena čista voda, dodajaje delcev pa ni mogoče. Pri tem je treba poudariti, da so meritve uspešne predvsem pri močno ozračenih tokovih. Ker se takšni primeri pojavljajo predvsem pri pojavu turbulentnega, dvofaznega toka z močno razgibano vodno gladino, raziskana merilna tehnika (in potrebne nastavitve) omogočajo zapolniti področje meritev hidravličnih pojavov, pri katerih dajejo druge merilne metode manj zanesljive rezultate oz. so neuporabne. Z analizo izmerjenih točk odboja laserskega snopa smo iz surovih oblakov točk prikazali, da prihaja, predvsem v primerih z manjšo gostoto zračnih mehurčkov v vrhnji plasti vodnega telesa, do odboja signala nazaj na sprejemnik laserskega skenerja tudi od globlje potopljenih mehurčkov, zaradi česar laserski skener pokaže večje razdalje, posledično pa so izvrednotene prenizke gladine vode. Vpliv takšnih odbojev smo uspešno

odstranili s filtracijo točk glede na jakost odboja povratnega signala. Ob trku z vodno gladino in pri potovanju skozi vodno telo namreč laserski žarek izgubi del energije. Disipacija energije narašča z globino mehurčkov, od katerih se odbije žarek, na drugi strani pa do nizke jakosti odboja prihaja tudi pri majhnih površinah delcev, ki jih žarek zadene. Z upoštevanjem jakosti odboja je bilo mogoče iz izmerjenega oblaka točk izločiti tako delež odbojev od globlje potopljenih mehurčkov kot tudi od kapljic pršenja nad vodno gladino, ki so posledica velike dinamike (razburkanosti, razpenjenosti) vodne gladine v obravnavanem sotočju deročega toka. Filtriranje z upoštevanjem jakosti odboja je omogočilo, da iz raziskave na novem področju uporabljene merilne metode izdelamo oceno merilne negotovosti, ki za močno razvite dvofazne tokove znaša ±5 mm na mestih z manjšo vertikalno dinamiko vodne gladine oziroma ± 10 mm na mestih z veliko vertikalno dinamiko. Takšna merilna negotovost je, ob poznavanju pojavov pri katerih lasersko skeniranje prinaša glavne prednosti (turbulentni, dvofazni tokovi), povsem zadovoljiva tudi za potrebe laboratorijskih meritev. Poleg natančnega opisa poteka srednje vrednosti gladine je na podlagi analize surovega oblaka točk, zajetega z laserskim skeniranjem, mogoče razmeroma natančno določiti tudi fluktuacije gladine okoli srednje vrednosti. To pa je pomemben dosežek, saj pri zajemu topografije vodne gladine turbulentnih dvofaznih tokov druge brezkontaktne merilne metode ne dajejo zadovoljivih rezultatov, lasersko skeniranje pa predstavlja robustno rešitev z razmeroma enostavno obdelavo podatkov. Uporabnost merilne metode zunaj laboratorijskih pogojev smo potrdili z uspešno izvedbo terenskih meritev razpenjene gladine na odtočnem kanalu iz drugega agregata HE Doblar I, kamor je bil dostop možen preko odzračevalne komore.

V neprimernosti običajno uporabljenih merilnih metod za zajem kompleksne, nestacionarne topografije vodne gladine je mogoče iskati tudi razlog, da so, kljub številčnosti raziskav razmer na sotočjih, le redke objavljene raziskave sotočij obravnavale tokovne razmere pri deročem režimu in analizirale topologijo vodnih struktur, ki pri tem nastajajo. Pregled literature je pokazal, da je bila do sedaj podrobneje obravnavana le ena raziskava topologije vodne gladine na sotočjih manjših kotov. Zato je razvoj novih fenomenoloških enačb z raziskavo razmer na pravokotnem sotočju dveh deročih tokov, ki ga podajamo v drugem delu te disertacije, izvirni prispevek znanosti. V ta namen je bilo v hidravličnem laboratoriju UL FGG postavljeno preizkuševališče asimetričnega pravokotnega sotočja z možnostjo simuliranja dotokov z visokimi vrednostmi Froudovih števil ($2 \le Fr \le 12$). S preverjeno merilno metodo z laserskim skenerjem smo izvedli meritve topografije vodne gladine 168 skrbno izbranih scenarijev, ki zajemajo različne hidravlične razmere na sotočju. Sistematično izmerjene poteke vodne gladine po prerezih na območju sotočja pri vseh scenarijih smo uporabili za izvrednotenje srednjega poteka gladine in z izdelavo 3D mrežnih modelov topografije prikazali geometrijo ploskev stoječega valovanja. S podrobno analizo struktur vodnega toka na območju sotočja smo jih klasificirali glede na vhodne parametre dotokov. Na ta način smo prikazali še topologijo sotočja. Detajlno smo nato obravnavali še lastnosti stoječega valovanja, ki se na sotočju pojavlja ob grbastem valu ali sodčku. Poznavanje lastnosti pojava, pri katerem se preko sotočja ohranja deroči režim vodnega toka, hkrati pa se nad njim pojavljajo visoke konice valovanja, ki močno presegajo globine dotokov, in povezav lastnosti valovanja z vhodnimi parametri, prinaša pomembna nova znanja za načrtovanje ureditev na območju sotočij v praksi. Za posamezni scenarij, pri katerem se je sodček pojavil, so bile na podlagi 3D mrežnega modela topografije vodne gladine izvrednotene lastnosti, kot so višina konic valov in njihove lokacije v prostoru, vrednosti pa nato uporabljene v topološki analizi in za razvoj brezdimenzijskih fenomenoloških enačb, ki podajajo zveze med vhodnimi, geometrijskimi in hidravličnimi parametri ter glavnimi značilnostmi vodnih struktur, ki se pri tem pojavljajo na območju sotočja. Kljub močno razvitemu turbulentnemu dvofaznemu toku z veliko dinamiko vodne gladine na območju sotočja je korelacijska analiza na modelu izmerjenih in z na novo podanimi fenomenološkimi enačbami izračunanih vrednosti pokazala zelo dobro ujemanje v celotnem razponu izmerjenih vrednosti pri številnih scenarijih. Dobro ujemanje merjenih in izračunanih vrednosti dodatno potrjuje primernost laserskega skeniranja za zajem topografije vodne

gladine ter tudi, da lahko z uporabo novo pridobljenih povezav med integralnimi parametri in srednjimi vrednostmi toka ter fluktuacijami parametrov, ki so značilni za stoječe valove na sotočjih, dobimo nove, pomembne informacije za inženirsko delo na področju vodarstva.

Z dokazi, da so z laserskim skeniranjem mogoče uspešne brezkontaktne meritve kompleksne, nestacionarne topografije vodne gladine, in z razvojem novih fenomenoloških enačb za opis topologije na sotočju deročih tokov smo potrdili obe uvodoma postavljeni hipotezi. Izvirni prispevek znanosti je tudi znanje, pod kakšnimi pogoji, s kakšnimi nastavitvami in načinom obdelave oblaka točk lahko izmerimo razburkano, razpenjeno vodno gladino. Izvirna znanja prinašajo tudi nove enačbe za opis topologije pravokotnih sotočij in način opisovanja lastnosti stoječega valovanja, ki z izračunom velikosti in položaja konice valov omogoča ustrezno načrtovanje ureditev na takšnih sotočjih.

7 SUMMARY

At confluences of two or more rivers, especially in the case of incoming supercritical flows, there occurs a turbulent three-dimensional flow, while due to high flow velocities and water surface dynamics, particularly if a hydraulic jump takes place, two-phase flow also occurs. Confluences are commonly found elements in natural hydrographic networks and hydraulic structures, and the knowledge of flow conditions at a confluence is important for both the planning of developments at the confluence itself, of riparian and potential bridging structures, as well as for understanding of other accompanying processes, such as sediment transport dynamics and variations in bathymetry. Despite the high quality of modern 3D numerical models, their use in precise simulations of flow conditions at confluences is only possible with adequately defined initial and boundary conditions, which can be acquired only by field or laboratory measurements. This particularly applies to confluences with incoming supercritical flows where a distinctively three-dimensional water surface topography is formed, frequently involving standing waves above the basic water flow. When measuring complex and dynamic water surfaces, conventional measurement methods do not allow for a spatial resolution that would provide a precise description of the topography. Time-varying flow structures occur at confluences with incoming supercritical flows, so temporal resolution of the measurement method must be provided along with its spatial resolution; this is possible if the sampling frequency distinctly exceeds the dynamics in the water surface variability that we want to measure.

To measure more complex water surface topographies with high temporal and spatial resolution, a set of measurements were taken in the first part of the dissertation to verify the appropriateness of the laser scanning method for water surface (area) formation measurements. This measuring method of scanning has been widely applied in other fields, but only rarely in water surface measurements, and even then particulate matter was added to the water to improve reflectivity, which is, considering the nature of the interaction between the laser beam and the water surface, problematic and under-researched. The addition of particulate matter, as presented in the literature (turbidity, ping pong balls, etc.), is often impossible in field measurements or laboratory experiments, e.g. due to the large volume of water or adverse effects of the particulate matter to measuring and regulation instruments. Thus we first investigated the operation of laser scanning in measuring clean water surfaces and the level of precision attainable thereby. The measurement results were verified in two parts. First, standing water in a tank was measured where, using a different measuring equipment, it was possible to take reference values of surface levels. In the second part, we checked the measurement applicability of complex surface water topography with high dynamics and turbulent, two-phase flow, and compared it with the results of the measurements involving a high-speed camera in control cross-sections. An experimental apparatus was established for these analyses, i.e. for the case of a confluence of two channels with supercritical flow where the development of standing waves leads to the phenomenon of self-aerated flow.

Our analysis of the measurements revealed that laser scanning can be also used when clean water is used as a medium, while the addition of particulate matter is often impossible. It should be noted that these measurements are particularly successful in highly aerated flows. As such cases mainly occur during turbulent, two-phase flows with highly dynamic water surfaces, the studied measurement method (and the necessary settings) allows us to fill in the field of measuring hydraulic phenomena, where other methods yield less reliable results or are unsuitable. By analysing the measured reflected points of the laser beam, the raw point cloud was used to show that, particularly in the cases with lower density of the air bubbles present in the surface layer of the water body, the signal is reflected back to the laser scanner receiver even from those bubbles that are somewhat deeper in the water, which is the reason that the measuring device records larger distances, leading to underestimated water levels. The effect of such reflections was successfully removed by filtering the points according to the reflection magnitude of the return signals. The laser beam loses some of its energy upon impact with the water's surface and when travelling through the water body. As energy dissipation increases with the depth of the bubbles that the beam is reflected off and, on the other hand, as a low magnitude of reflection also occurs in small particle surfaces that the beam hits, it was possible, by taking into account the magnitude of reflection from the measured point cloud, to exclude both a proportion of reflections from the bubbles deeper in the water and from the water drops (spraying) above the water's surface, which are a consequence of the high water surface dynamics (turbulence, foaming) at the confluence with supercritical flow investigated. By taking into account the reflection magnitude, filtering allowed us to estimate the uncertainty in using this measuring method, which is $\pm 5-10$ mm for strongly developed two-phase flows. Such measurement uncertainty is, with knowledge of the phenomena where the main advantages of laser scanning come to the fore (turbulent, two-phase flows), perfectly satisfactory also for the purposes of laboratory measurements. Along with a detailed description of the water level's mean value it is possible to fairly accurately determine the water level fluctuation around the mean values on the basis of analysing raw point clouds. This is an important achievement, as in acquiring the water surface topography of turbulent, two phase flows, other non-contact measurement methods fail to give satisfactory results, while laser scanning provides a robust solution that involves fairly simple data processing. The applicability of the measurement method outside the laboratory was confirmed by taking successful field measurements of foamed water surface in the tailwater channel from the second power unit of the Doblar I HPP, which could be accessed via a vent chamber.

The unsuitability of the conventionally used measurement methods for capturing complex water surface topographies could be attributed to the fact that even though there are many studies concerning the conditions at confluences, only a few of them address flow regimes with supercritical flow and analyse the topology of the flow structures thus formed. The literature review revealed that so far only one study has addressed water surface topology in confluences at smaller angles in detail. The second part of this dissertation – with the derivation of new phenomenological equations – makes a novel contribution to science by studying the conditions at a right-angled confluence of two supercritical flows. An experimental apparatus was set up at the hydraulic laboratory of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering of the University of Ljubljana (UL FGG) to test an asymmetric right-angled confluence with incoming supercritical flow at higher Froude numbers ($2 \le Fr \le 12$). The verified measurement method involving a laser scanner was used to measure water surface topography for 168 carefully selected scenarios, which cover various hydraulic conditions at the confluence. Systematically measured water surfaces in the individual cross-sections in the confluence area for all the scenarios were used to determine the water level's mean value, while 3D mesh models of topography were used to show the geometry of surfaces of standing waves. They were classified in a detailed analysis of flow structures in the confluence area, based on the input parameters of inflows. The confluence topology was also shown in this way. Then we addressed in detail the characteristics of standing waves that occur at the confluence during a humped wave or a barrel roll. Knowing the characteristics of the phenomenon where supercritical flow is preserved across the confluence, while high wave peaks occur above it that highly exceed flow depths, and knowing the relations between wave characteristics and input parameters brings about important new knowledge for the planning of developments in confluence areas in practice. For the individual scenario where the barrel roll occurred we assessed various characteristics based on the 3D mesh model of water surface topography, such as peak wave levels and their locations, while the values were then used in a topological analysis and for development of dimensionless phenomenological equations providing the relations between input, geometrical, and hydraulic parameters and the main characteristics of the water structures that occur in the confluence area. Despite the strongly developed turbulent, two-phase flow with high water surface dynamics in the confluence area, the correlation analysis of the values measured by the model and calculated with the newly proposed phenomenological equations revealed a very good fit across the entire range of the measured values in many scenarios. The good fit between the measured and calculated values additionally confirms the adequacy of laser scanning for water surface topography acquisition and that – by using newly acquired relations between integral parameters and mean flow values as well as parameter fluctuations characteristic for standing waves at confluences – new, important information for engineering work in water sciences is provided.

We confirmed both initially proposed hypotheses with evidence that laser scanning allows for successful non-contact measurements of complex water surface topography and by developing novel phenomenological equations to describe the topography at confluences with supercritical flow. Another original contribution to science is the knowledge of what conditions, settings, and method of point cloud processing should be used to measure turbulent, foamed water surfaces. This dissertation's original contribution to knowledge is also found in the new equations describing the typology of right-angled confluences and the method of describing the characteristics of standing waves, which, by calculating the magnitude and height of wave peaks, allows for the proper planning of developments at such confluences.

VIRI IN LITERATURA

ABB. 2014. WaterMaster electromagnetic flowmeter. Gloucestershire, UK: 52 str.

Allis, M.J., Peirson, W.L., Banner, M.L. 2011. Application of LIDAR as a measurement tool for waves. Proceedings of the Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. USA, Maui, Hawaii, International Society of Offshore and Polar Engineers: 19–24.

Amador, A., Sánchez-Juny, M., & Dolz, J. 2006. Characterization of the nonaerated flow region in a stepped spillway by PIV. Journal of Fluids Engineering 128: 1266–1273.

Awrangjeba, M., Lua, G., Fraser, C.S. 2014. Automatic building extraction from LIDAR data covering complex urban scenes. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 3: 25–32.

Bahner, M. 1997. A practical overview of level measurement technologies. Flow Control. 34, 3: 1–9. <u>http://www.gilsoneng.com/reference/Levelpap.pdf</u> (Pridobljeno 13. 7. 2016).

Bajcar, T., Širok, B., Eberlinc, M. 2009. Quantification of flow kinematics using computer-aided visualization. Strojniški vestnik 55, 4: 215–223.

Baltsavias, E.P. 1999. Airborne laser scanning: existing systems and firms and other resources. Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 54: 164–198.

Behlke, C. E., Pritchett, H. D. 1966. The design of supercritical channel junction. Highway Research Record 133: 17–35.

Bell, S. 1999. A beginner's guide to uncertainty of measurement. Measurement good practice guide No. 11. Teddington, Middlesex, National Physical Laboratory: 41 str.

Bergelj, F. 2000. Osnove meritev. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko: 274 str.

Best, J., Reid, I. 1984. Seperation zone at open channel junction. Journal of hydraulic engineering, 110: 1588–1594.

Blenkingsopp, C.E., Mole, M. A., Turner, I.L., Peirson, W.L. 2010. Measurements of the time-varying free-surface profile across the swash zone obtained using an industrial LIDAR. Coastal Engineering 57: 1059–1065.

Blenkingsopp, C.E., Turner, I.L., Allis M.J., Peirson, W.L., Garden, L.E. 2012. Application of LIDAR technology for measurement of time-varying free-surface profiles in a laboratory wave flume. Coastal Engineering 68: 1–5.

Biron, P. M., Richer, A., Kirkbride, A. D., Roy, A. G., Han, S. 2002. Spatial patterns of watter surface topography at a river confluence. Earth surface process and landforms 27: 913–928.

Biron, P. M., Ramamurthy, A. S., Han, S. 2004. Three-dimensional numerical modeling of mixing at river confluence. Journal of hydraulic engineering 130, 3: 243–253.

Bradbrook, K. F., Lane, S. N., Richards, K. S. 2000. Numerical simulation of three-dimensional, timeaveraged flow structure at river channel confluences. Water Resources Research 36, 9: 2731–2746.

Bruckmann, B. 2014. 25 years of high definition 3D Scanning: history, state of the art, outlook. Electronic Visualisation and the Arts 2014: 262–266.

Brudu, N., Lague, D. 2012. 3D terrestrial LIDAR data classification of complex natural scenes using a multi-scale dimensionality criterion: Applications in geomorphology. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 68: 121–134.

Bung, D.B., Velero, D. 2016. Optical flow estimation in aerated flows. Journal of Hydraulic Research 54, 5: 575–580.

Casio Computer Co., Ltd. 2008. Casio Digital Camera EX-F1 User's Guide: 185 str.

Chanson, H. 1997. Air bubble entrainment in free-surface turbulent shear flows. London, Academic Press: 401 str.

Chanson, H. 1999. The hydraulics of open channel flow. London, Hodder Headline: 650 str.

Chachereau, Y., Chanson, H. 2010. Free-surface fluctuations and turbulence in hydraulic jumps. Experimental Thermal and Fluid Science 35: 896–909.

Chanson, H., Chachereau, Y. 2013. Scale effects affecting two-phase flow properties in hydraulic jump with small inflow froude number. Experimental Thermal and Fluid Science 45, 1: 234–242.

Chen, Q., Wang, H., Zhang, H.C., Sun, M.W. Liu, X.G. 2016. A point cloud filtering approach to generating DTMs for steep mountainous areas and adjacent residential areas. Remote Sensing 8, 1: 1–22.

Chow, V. T. 1959. Open channel hydraulics. New York, McGraw-Hill, Inc.: 616 str.

Christodoulou, G. C. 1993. Incipient hydraulic jump at channel junction. Journal of hydraulic engineering 119: 409–423.

Constantinescu, G., Miyawaki, S., Rhoads, B., Sukhololov, A. 2012. Numerical analysis of the effect of momentum ratio on the dynamics and sediment-entrainment capacity of coherent flow structures at a stream confluence. Journal of geophysical research 117: 1–21.

Daimon, M., Masumura, A. 2007. Measurement of the refractive index of distilled water from the near-infrared region to the ultraviolet region. Applied Optics 46: 3811–3820.

Dietrich, W. E., Smith, J. D. 1983. Influence of the point bar on flow through curved channels. Water Resources Research 19: 1173–1192.

Dietrich, W. E. 1987. Mechanics of flow and sediment transport in river bends. In River Channels: Environment and Process. Basil Blackwell, Institute of British Geographers Special Publication 18, Inc: 179–227.

Ergenzinger, P., DeJong, C. 1996. Linking hydraulics, bedload transport and river bed adjustment with the conceptual FAST model. Coherent Flow Structures in Open Channels. Chichester, John Wiley & Sons Ltd: 655–679.

Ferreira, E., Chandler, J., Wackrow, R., Shiono, K. 2017. Automated extraction of free surface topography using SfM-MVS photogrammetry. Flow measurement and instrumentation 54: 243–249.

Ghostine, R., Mose, R., Vazguez, J., Ghenaim, A., Gregoire, C. 2010. Two-dimensional simulation of subcritical flow at a combining junction: luxury or necessety? Journal of hydraulic engineering 136, 10: 799–805.

Greated, C. A. 1968. Supercritical flow through junctions. La Houlille Blanche 23, 3: 693–695.

Guidelines for drinking-water quality. 3rd Edition. 2006. Switzerland, Geneva, World Health Organization: 564 str.

Haberman, W. L., and Morton, R. K. 1954. An experimental study on bubbles moving in liquids. Proceedings of ASCE 80, 1: 1–25.

Hager, W. H. 1989a. Supercritical flow in channel junctions. Journal of hydraulic engineering 115, 5: 595–616.

Hager, W. H. 1989b. Transitional flow in channel junctions. Journal of hydraulic engineering 115: 243–259.

Hager, W. H. 2010. Wastewater hydraulics: theory and practice, 2nd Edition. Berlin, Springer Verlag – Heidelberg: 652 str.

Hällström, J., Barup, K., Raimondi., V., Palombi, L., Lognoli, D., Cecchi, G., Grönlind, R., Johansson, A., Svanberg, S., Conti, C. 2008. Remote fluorescence LIDAR imaging of monuments: The Coliseum and the Lateran baptistery in Rome. Laser in the Conservation of Artworks: 169–175.

Hambrice, K., Hopper, H. 2004. Leak/Level: A dozen ways to measure fluid level and how they work. Sensors 21, 12: 14–20.

Heller, V. 2011. Scale effects in physical hydraulic engineering models. Journal of Hydraulic Research 49, 3: 293–306.

Higginson, E. 2005. Wastewater Level Measurement Techniques. Environmental Instrumentation and Analysis Handbook. Raleigh: John Wiley & Sons: 791–816.

Hočevar, M., Malneršič, A., Osterman, A. 2014. Merjenje kote spodnje vode na HE Doblar I agregat 2. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 7 str.

Hughes, S. 1993. Physical models and laboratory techniques in coastal engineering. Singapore, World Scientific: 550 str.

ISO 1438:2008 (E). Hydrometry - open channel flow measurement using thin-plate weirs: 59 str.

ISO 17123-1:2014. Optics and optical instruments. Field procedures for testing geodetic and surveying instruments: 39 str.

Kelbe, D.,van Aardt, J., Romanczyk, P., van Leeuwen, M., Cawse-Nicholson, K. 2016. Marker-free registration of forest terrestrial laser scanner data pairs with embedded confidence metrics. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 54, 7: 4314–4330.

Kesserwani, G., Ghostine, R., Vazquez, J., Ghenaim, A., Mose, M. 2007. One-dimnesional simulation of supercritical flow at a confluence by means of a nonlinear junction model applied with RKDG2 method. International journal of numerical methods in fluids 57: 1695–1708.

Kobus, H., Abraham, G. 1980. Hydraulic modelling. Berlin, Verlag Paul Parey - Hamburg: 323 str.

Kuzmany, H. 2009. Solid-state spectroscopy. Berlin, Springer Verlag - Heidelberg: 554 str.

Lin, J. D., Soong, H. K. 1979. Junction losses in open-channel flows. Water Resources Research 15, 2: 414–418.

Mandlburger, G., Hauer, C., Hofle, B., Habersack, H., Pfeifer, N. 2009. Optimisation of LIDAR derived terrain models for river flow modelling. Hydrology and Earth System Sciences 13: 1453–1466.

Means, J.E., Acker, S.A., Fitt, B.J., Renslow, M., Emerson, L., Hendrix, C.J. 2000. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning LIDAR. Photogrammetric engineering and Remote Sensing 66, 11: 121–134.

Mignot, E., Riviere, N., Perkins, R.J., Paquier, A. 2008. Flow patterns in a four-branch junction with supercritical flow. Journal of hydraulic engineering 134, 6: 701–713.

Mignot, E., Riviere N., Paquier, A., Perkins, R.J. 2011. Hydraulic models of the flow distribution in a four branch open channel junction with supercritical flow. Journal of Hydraulic Engineering 137, 3: 289–299.

Milan, D. J., Heritage, G. L., Large, A. R. G., Entwistle, N. S. 2010. Mapping hydraulic biotopes using terrestrial laser scan data of water surface properties. Earth surface processes and landforms 35: 918–931.

Müller, M., Novak, G., Steinman, F., Rak, G., Bajcar, T. 2015. Influence of the operating and geometric characteristics of a bottom-hinged flap gate on the discharge coefficient of a side weir. Journal of Mechanical Engineering 61, 9: 498–506.

Murzyn F., Chanson, H. 2007. Free surface, bubbly flow and turbulence measurements in hydraulic jumps. Report No. CH63/07. Brisbane, The University of Queensland, Division of Civil Engineering: 116 str.

Murzyn, F., Chanson, H. 2008. Experimental assessment of scale effects affecting two-phase flow properties in hydraulic jumps. Experiments in Fluids 45, 3: 513–521.

Murzyn, F., Chanson, H. 2009. Free-surface fluctuations in hydraulic jumps: Experimental observations. Experimental Thermal and Fluid Science 33: 1055–1064.

Nania, L.S., Gonzalo, R., Gómez, M. 2014. Influence of channel width on flow distribution in fourbranch junctions with supercritical flow: experimental approach. Journal of Hydraulic Engineering 140: 77–88.

Nobrega, J.D., Schulz, H.E., Zhu, D.Z. 2014. Free surface detection in hydraulic jumps through image analysis and ultrasonic sensor measurments. Hydraulic Structures and Society: Engineering Challenges and Extremes. 5th IAHR International Symposium on Hydraulic Structures. Australia, Brisbane, The University of Queensland: 1–9.

Novak, P., Moffat, A. I., Nalluri, C., Narayanan, R. 2007. Hydraulic structures. London, Taylor in Francis: 700 str.

Novak, G., Steinman, F., Müller, M., Bajcar, T. 2012. Study of velocity field at model sideweir using visualization method, Journal of Hydraulic Research 50, 1: 129–133

Palace, M., Sullivan, F.B., Ducey, M., Herrick, C. 2016. Estimating tropical forest structure using a terrestrial LIDAR. PLoS ONE: 1–19.

Peakall, J., Warburton, J. 1996. Surface tension in small hydraulic river models – the significance of the Weber number. Journal of Hydrology 35: 199–212.

Pfister, M., Chanson, H. 2014. Two-Phase air-water flows: Scale effects in physical modelling. Journal of Hydrodynamics 26, 2: 291–298.

Pinto Coelho, M. M. 2015. Experimental determination of free surface levels at open-channel junction. Journal of Hydraulic Research 53, 3: 394–399

Pope, R.M., Fry, E.S. 2016. Absorption spectrum (380–700 nm) of pure water. II. Integrating cavity measurements. Applied Optics 36, 33: 8710–8723.

Prufer, K.M., Thompson, A.E., Kennett, D.J. 2015 Evaluating airborne LIDAR for detecting settlements and modified landscapes in disturbed tropical environments at Uxbenka, Belize. Journal of Archaeological Science 57: 1–13.

Rak, G. 2006. Uporaba prostorskih podatkov v analizi hidravličnih lastnosti vodotokov. Diplomska naloga. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 87 str.

Ramamurthy, A.S., Qu, J., and Vo, D. 2007. Numerical and experimental study of dividing open channel flows. Journal of Hydraulic Engineeing 133: 1135–1144.

Ren, X. T., Luo, X., Wang, J. J. 2011. Automatic road clearance surveying with sensor fusion. Proceedings of Australasian Conference on Robotics and Automation. Australia, Melbourne, Monash University: 1–8.
Risbol, O., Briese, C., Doneus, M., Nesbakken, A. 2015. Monitoring cultural heritage by comparing DEMs derived from historical aerial photographs and airborne laser scanning. Journal of Cultural Heritage 16, 2: 202–209.

Rivillas-Ospina, G., Pedrozo-Acuna, A., Silva, R., Torres-Freyermuth, A., Gutierrez, C. 2012. Estimation of the velocity field induced by plunging breakers in the surf and swash zones. Experiments in fluids 52, 1: 53–68.

Rodič, P. 2016. Modelna podobnost in vpliv modelnega merila na prenos rezultatov fizičnega hidravličnega modela na prototip. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 82 str.

Schwalt, M., Hager, W. H. 1995. Experiments to supercritical junction flow. Experiments in Fluids 18: 429–437.

Seber, G. A. F., Lee, A. J. 2003. Linear regression analysis. Hoboken, John Wiley & Sons: 544 str.

Sharifipoura, M., Bonakdaria, H., Zajia, A.H., Shamshirbandb, S. 2015. Numerical investigation of flow field and flowmeter accuracy in open-channel junctions. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics 9, 1: 280–290.

Shepherd, I.E. 1997. Wave measurement methods in laboratory experiments. Ocean Wave Measurements and Analysis: Proceedings of the Third International Symposium, Virginia. ASCE: 1155–1166.

SICK, 2015. Technical description of laser measurement systems LMS5xx. Germany, Waldkirch, SICK AG — Division Auto Ident: 122 str.

SICK, 2016. Operating instruction – LMS400 Laser measurement sensors. Germany, Waldkirch, SICK AG — Division Auto Ident: 142 str.

Smith, M., Vericat, D., Gibbins, C. 2012. Through-water terrestrial laser scanning of gravel beds at the patch scale. Earth Surface Processes and Landforms 37: 411–421.

Steinman, F. 1983. Prispevek k analizi dinamičnih zakonitosti natege. Magistrsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 90 str.

Steinman, F. 2010. Hidravlika. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 250 str.

Streicher, M., Hofland, B., Lindenbergh, R.C. 2013. Laser ranging for monitoring water waves in the new deltares delta flume. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2, 5: 271–276.

Šumrada, R. 2005a. Strukture podatkov in prostorske analize. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 284 str.

Šumrada, R. 2005b. Tehnologija GIS. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 330 str.

Tamari, S., Mory, J., Guerrero-Meza, V. 2011. Testing a nearinfrared LIDAR mounted with a large incidence angle to monitor the water level of turbid reservoirs. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 66: 85–91.

Tavoularis, S. 2005. Measurement in fluid mechanics. First Edition. USA, New york, Cambridge University Press: 355 str.

Taylor, E. H. 1944. Flow characteristics at rectangular open-channel junctions. Transactions of ASCE 109: 893–912.

Trošt, S. 2013. Meritve lastnosti vodnega skoka. Diplomska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za strojništvo: 65 str.

Wang, R.S., Hu, Y., Wu, H.Y., Wang, J. 2016. Automatic extraction of building boundaries using aerial LIDAR data. Journal of Applied Remote Sensing 10, 1: 16–22.

Webber, N. B., Greated, C. A. 1966. An investigation of flow behavior at the junction of rectangular channels. of The Institution of Civil Engineers 34: 321–334.

Weber, L.J., Schumate, E.D., Mawer, N. 2001. Experiments on flow at a 90° open channel junction. Journal of hydraulic engineering 127: 340–350.

Zhang, Y.J. Li, Q., Lu, H.S., Liu, X.Y., Huang, X., Song, C., Huang, S., Huang, J.Y. 2015. Optimized 3D street scene reconstruction from driving recorder images. Remote Sensing 7, 7: 9091–9121.

Zindovic, B., Vojt, P., Kapor, R., Savic, L. 2016. Converging stepped spillway flow. Journal of Hydraulic Research 54, 6: 699–707.

Zlokarnik, M. 1991. Dimensional analysis and scale-up in chemical engineering. Berlin, Springer-Verlag: 176 str.

Priloga A1: Primerjava meritev gladin v izbranih točkah kontrolnih prerezov z obema laserskima skenerjema in analizo slik hitre kamere

Appendix A1: Comparison of water surface measurements in selected locations of control crosssections with both laser scanners and image analysis of a high-speed camera



<u>KONTROLNI PREČNI PREREZ 1</u>

		i	izmerjene v	rednosti g	lobine vode	?		
				[mm]				
točka 1 točka 2 točka 3 točka 4 točka 5 točka 6 točka								
ostno merilo	335	285	285	285	240	25	25	
LMS400 brez filtriranja	305	240	243	242	219	24	22	
LMS400 s filtriranjem	330	286	280	278	225	30	21	
LMS511 brez filtriranja	316	250	249	239	205	79	28	
LMS511 s filtriranjem	318	268	260	244	212	106	29	

			napaka (LMS-ostno	o merilo)					
				[mm]						
	točka 1 točka 2 točka 3 točka 4 točka 5 točka 6 točka 7									
ostno merilo	/	/	/	/	/	/	/			
LMS400 brez filtriranja	-30	-45	-42	-43	-21	-1	-3			
LMS400 s filtriranjem	-5	1	-5	-7	-15	5	-4			
LMS511 brez filtriranja	-19	-35	-36	-46	-35	54	3			
LMS511 s filtriranjem	-17	-17	-25	-41	-28	81	4			

Priloga A2: Primerjava meritev gladin v izbranih točkah kontrolnih prerezov z obema laserskima skenerjema in analizo slik hitre kamere

Appendix A2: Comparison of water surface measurements in selected locations of control crosssections with both laser scanners and image analysis of a high-speed camera

<u>KONTROLNI PREČNI PREREZ 2</u>



		i	zmerjene v	rednosti g	lobine vode	?				
				[mm]						
	točka 1 točka 2 točka 3 točka 4 točka 5 točka 6 točka 7									
ostno merilo	80	70	70	65	75	115	150			
LMS400 brez filtriranja	63	50	46	48	62	81	121			
LMS400 s filtriranjem	77	70	65	62	77	117	147			
LMS511 brez filtriranja	45	36	33	37	52	75	128			
LMS511 s filtriranjem	50	41	40	45	56	95	126			

			napaka (LMS-ostno	o merilo)			
				[mm]				
točka 1 točka 2 točka 3 točka 4 točka 5 točka 6 točka 7								
ostno merilo	/	/	/	/	/	/	/	
LMS400 brez filtriranja	-17	-20	-24	-17	-13	-34	-29	
LMS400 s filtriranjem	-3	0	-5	-3	2	2	-3	
LMS511 brez filtriranja	-35	-34	-37	-28	-23	-40	-22	
LMS511 s filtriranjem	-30	-29	-30	-20	-19	-20	-24	

Priloga A3: Primerjava meritev gladin v izbranih točkah kontrolnih prerezov z obema laserskima skenerjema in analizo slik hitre kamere

Appendix A3: Comparison of water surface measurements in selected locations of control crosssections with both laser scanners and image analysis of a high-speed camera



KONTROLNI PREČNI PREREZ 3

		i	izmerjene v	rednosti gl	lobine vode	2				
				[mm]						
	točka 1 točka 2 točka 3 točka 4 točka 5 točka 6 točka 7									
ostno merilo	120	90	70	70	65	65	60			
LMS400 brez filtriranja	115	71	62	64	60	56	45			
LMS400 s filtriranjem	124	88	71	70	67	62	57			
LMS511 brez filtriranja	<i>93</i>	54	44	42	41	42	37			
LMS511 s filtriranjem	96	58	48	46	44	44	38			

			napaka (LMS-ostno	o merilo)				
				[<i>mm</i>]					
točka 1 točka 2 točka 3 točka 4 točka 5 točka 6 točka 7									
ostno merilo	/	/	/	/	/	/	/		
LMS400 brez filtriranja	-5	-19	-8	-6	-5	-9	-15		
LMS400 s filtriranjem	4	-2	1	0	2	-3	-3		
LMS511 brez filtriranja	-27	-36	-26	-28	-24	-23	-23		
LMS511 s filtriranjem	-24 -32 -22 -24 -21 -21								

Priloga A4: Primerjava meritev gladin v izbranih točkah kontrolnih prerezov z obema laserskima skenerjema in analizo slik hitre kamere

Appendix A4: Comparison of water surface measurements in selected locations of control crosssections with both laser scanners and image analysis of a high-speed camera



<u>KONTROLNI PREČNI PREREZ 4</u>

		i	zmerjene v	rednosti gl	lobine vode	?	
				[mm]			
	točka l	točka 2	točka 3	točka 4	točka 5	točka 6	točka 7
ostno merilo	65	65	65	65	70	80	85
LMS400 brez filtriranja	55	61	55	59	64	75	72
LMS400 s filtriranjem	65	66	63	62	70	79	80
LMS511 brez filtriranja	44	46	41	42	49	64	62
LMS511 s filtriranjem	48	47	43	45	50	65	65

			napaka (LMS-ostno	o merilo)					
				[mm]						
	točka 1 točka 2 točka 3 točka 4 točka 5 točka 6 točka 7									
ostno merilo	/	/	/	/	/	/	/			
LMS400 brez filtriranja	-10	-4	-10	-6	-6	-5	-13			
LMS400 s filtriranjem	0	1	-2	-3	0	-1	-5			
LMS511 brez filtriranja	-21	-19	-24	-23	-21	-16	-23			
LMS511 s filtriranjem	-17	-18	-22	-20	-20	-15	-20			

-	oznaka primera	hg	h₅	Q_g	Qs	Vg	Vs	Fr _g	Frs	Weg	Wes
#		[r	n]	[1,	/s]	[m	/s]		[]	
1	Fr1-8_Fr2-2	0,01	0,01	12,53	3,10	2,51	0,62	8,00	1,98	862	53
2	Fr1-8_Fr2-4	0,01	0,01	12,53	6,25	2,51	1,25	8,00	3,99	862	214
3	Fr1-8_Fr2-6	0,01	0,01	12,53	9,42	2,51	1,88	8,00	6,01	862	487
4	Fr1-8_Fr2-8	0,01	0,01	12,47	12,56	2,49	2,51	7,96	8,02	854	865
5	Fr1-9_Fr2-3	0,01	0,01	14,11	4,64	2,82	0,93	9,01	2,96	1093	118
6	Fr1-9_Fr2-6	0,01	0,01	14,01	9,44	2,80	1,89	8,95	6,03	1078	490
7	Fr1-9_Fr2-9	0,01	0,01	14,00	14,03	2,80	2,81	8,94	8,96	1076	1080
8	Fr1-10_Fr2-2.5	0,01	0,01	15,71	3,92	3,14	0,78	10,03	2,50	1355	84
9	Fr1-10_Fr2-5	0,01	0,01	15,71	7,89	3,14	1,58	10,03	5,04	1355	342
10	Fr1-10_Fr2-7.5	0,01	0,01	15,63	11,75	3,13	2,35	9,98	7,50	1340	758
11	Fr1-10_Fr2-10	0,01	0,01	15,72	15,64	3,14	3,13	10,04	9,99	1357	1343
12	Fr1-12_Fr2-3	0,01	0,01	18,75	4,75	3,75	0,95	11,97	3,03	1930	124
13	Fr1-12_Fr2-6	0,01	0,01	18,75	9,36	3,75	1,87	11,97	5,98	1930	481
14	Fr1-12_Fr2-9	0,01	0,01	18,78	14,08	3,76	2,82	11,99	8,99	1936	1089
15	Fr1-12_Fr2-12	0,01	0,01	18,69	18,86	3,74	3,77	11,94	12,04	1919	1953
16	F=1 4 F=2 2	0.015	0.015	11 47	Γ 91	1 5 2	0.77	2.00	2.02	492	100
10	Fr1-4_Fr2-2	0,015	0,015	11,47	5,81	1,55	1.52	3,99	2,02	482	123
10	Fr1-4_Fr2-4	0,015	0,015	14.26	11,44	1,54	1,53	4,01	3,98	480	479
10	F11-5_F12-2	0,015	0,015	14,30	5,67	1,91	0,76	4,99	1,97	755	272
19	Fr1-5_Fr2-3	0,015	0,015	14,33	8,64	1,91	1,15	4,98	3,00	752	2/3
20	Fr1-5_Fr2-5	0,015	0,015	14,30	14,14	1,91	1,89	4,99	4,91	/55	132
21	Fr1-6_Fr2-2	0,015	0,015	17,24	5,81	2,30	0,77	5,99	2,02	1087	123
22	Fr1-6_Fr2-4	0,015	0,015	17,28	11,14	2,30	1,49	6,01	3,87	1093	454
23	Fr1-6_Fr2-6	0,015	0,015	17,06	17,01	2,27	2,27	5,93	5,91	1065	1059
24	Fr1-7_Fr2-3	0,015	0,015	20,08	8,19	2,68	1,09	6,98	2,85	1476	246
25	Fr1-7_Fr2-5	0,015	0,015	20,08	14,36	2,68	1,91	6,98	4,99	1476	/55
26	Fr1-/_Fr2-/	0,015	0,015	20,17	19,97	2,69	2,66	7,01	6,94	1488	1460
27	Fr1-8_Fr2-2	0,015	0,015	23,11	5,69	3,08	0,76	8,03	1,98	1955	119
28	Fr1-8_Fr2-4	0,015	0,015	23,03	11,06	3,07	1,47	8,00	3,84	1941	447
29	Fr1-8_Fr2-6	0,015	0,015	23,04	16,89	3,07	2,25	8,01	5,87	1943	1044
30	Fr1-8_Fr2-8	0,015	0,015	23,00	23,06	3,07	3,07	7,99	8,01	1936	1945
31	Fr1-9_Fr2-3	0,015	0,015	25,86	8,50	3,45	1,13	8,99	2,95	2448	264
32	Fr1-9_Fr2-6	0,015	0,015	25,86	16,83	3,45	2,24	8,99	5,85	2448	1037
33	Fr1-9_Fr2-9	0,015	0,015	25,89	25,94	3,45	3,46	9,00	9,02	2453	2464
34	Fr1-10_Fr2-2.5	0,015	0,015	28,81	7,17	3,84	0,96	10,01	2,49	3037	188
35	Fr1-10_Fr2-5	0,015	0,015	28,78	14,67	3,84	1,96	10,00	5,10	3031	787
36	Fr1-10_Fr2-7.5	0,015	0,015	28,78	21,58	3,84	2,88	10,00	7,50	3031	1705
37	Fr1-10_Fr2-10	0,015	0,015	28,69	28,81	3,83	3,84	9,97	10,01	3014	3037
38	Fr1-12_Fr2-3	0,015	0,015	34,64	8,39	4,62	1,12	12,04	2,92	4391	258
39	Fr1-12_Fr2-6	0,015	0,015	34,64	17,33	4,62	2,31	12,04	6,02	4391	1100
40	Fr1-12_Fr2-8	0,015	0,015	34,50	23,08	4,60	3,08	11,99	8,02	4356	1950
41	Fr1-12_Fr2-12	0,015	0,015	34,67	34,56	4,62	4,61	12,05	12,01	4398	4370

Priloga B1: Seznam vseh izmerjenih scenarijev z vrednostmi glavnih parametrov in veličin Appendix B1: List of all measured scenarios with values of key parameters and variables

	oznaka primera	hg	h₅	Q_g	Q₅	Vg	Vs	Fr g	Frs	Weg	Wes
#		[n	n]	[1/	/s]	[m	/s]		ſ	-]	
42	Fr1-4_Fr2-2	0,02	0,02	17,67	8,78	1,77	0,88	3,99	1,98	857	211
43	Fr1-4_Fr2-4	0,02	0,02	17,69	17,67	1,77	1,77	3,99	3,99	859	857
44	Fr1-5_Fr2-2	0,02	0,02	22,11	8,56	2,21	0,86	4,99	1,93	1342	201
45	Fr1-5_Fr2-3	0,02	0,02	22,21	13,31	2,22	1,33	5,01	3,00	1354	486
46	Fr1-5_Fr2-5	0,02	0,02	22,15	22,14	2,22	2,21	5,00	5,00	1347	1345
47	Fr1-6_Fr2-2	0,02	0,02	26,56	8,81	2,66	0,88	6,00	1,99	1936	213
48	Fr1-6_Fr2-4	0,02	0,02	26,56	17,72	2,66	1,77	6,00	4,00	1936	862
49	Fr1-6_Fr2-6	0,02	0,02	26,56	26,56	2,66	2,66	6,00	6,00	1936	1936
50	Fr1-7_Fr2-3	0,02	0,02	31,03	13,22	3,10	1,32	7,00	2,99	2643	480
51	Fr1-7_Fr2-5	0,02	0,02	32,69	22,19	3,27	2,22	7,38	5,01	2934	1352
52	Fr1-7_Fr2-7	0,02	0,02	32,67	32,69	3,27	3,27	7,37	7,38	2929	2934
53	Fr1-8_Fr2-2	0,02	0,02	35,50	8,82	3,55	0,88	8,01	1,99	3459	214
54	Fr1-8_Fr2-4	0,02	0,02	35,47	17,72	3,55	1,77	8,01	4,00	3454	862
55	Fr1-8_Fr2-6	0,02	0,02	35,54	26,61	3,55	2,66	8,02	6,01	3467	1944
56	Fr1-8_Fr2-8	0,02	0,02	35,47	35,44	3,55	3,54	8,01	8,00	3454	3449
57	Fr1-9_Fr2-3	0,02	0,02	39,94	12,53	3,99	1,25	9,02	2,83	4380	431
58	Fr1-9_Fr2-6	0,02	0,02	39,86	26,60	3,99	2,66	9,00	6,00	4362	1942
59	Fr1-9_Fr2-9	0,02	0,02	40,06	40,08	4,01	4,01	9,04	9,05	4404	4410
60	Fr1-10_Fr2-2.5	0,02	0,02	44,67	10,42	4,47	1,04	10,08	2,35	5477	298
61	Fr1-10_Fr2-5	0,02	0,02	44,22	22,19	4,42	2,22	9,98	5,01	5368	1352
62	Fr1-10_Fr2-6	0,02	0,02	44,39	26,47	4,44	2,65	10,02	5,98	5409	1924
63	Er1_4 Er2_2	0.025	0.025	2/1 83	12.36	1 99	0 99	4.01	2.00	135/	336
64	Fr1-4_Fr2-4	0,025	0,025	24,83	24.81	1,99	1.98	4,01	2,00	1354	1351
65	Fr1-5 Fr2-2	0,025	0.025	30.97	12 28	2 / 8	0.98	5.00	1.98	2107	331
66	Fr1-5_Fr2-2	0,025	0,025	21.00	18.22	2,40	1 47	5,00	2.96	2107	729
67	Fr1-5_Fr2-5	0,025	0.025	30.42	30.14	2,40	2 /1	1 91	4.87	2032	1005
68	Fr1-6 Fr2-2	0.025	0.025	37 19	11 42	2,43	0.91	6.01	1.84	3038	286
69	Fr1-6 Fr2-4	0.025	0.025	37.56	25.32	3.00	2.03	6.07	4.09	3097	1408
70	Fr1-6 Fr2-6	0.025	0.025	37.06	36.83	2.96	2.95	5,99	5.95	3015	2979
71	Fr1-7 Fr2-3	0.025	0.025	43.56	18.36	3.48	1.47	7.04	2.97	4166	740
72	_ Fr1-7 Fr2-5	0,025	0,025	43,42	31,08	3,47	2,49	7,01	5,02	4139	2122
73	 Fr1-7 Fr2-7	0,025	0,025	43,56	43,51	3,48	3,48	7,04	7,03	4166	4158
74	 Fr1-8_Fr2-2	0,025	0,025	49,58	12,08	3,97	0,97	8,01	1,95	5399	321
75	 Fr1-8_Fr2-4	0,025	0,025	49,67	24,94	3,97	2,00	8,02	4,03	5417	1366
76	Fr1-8_Fr2-6	0,025	0,025	49,03	35,83	3,92	2,87	7,92	5,79	5279	2820
77	Fr1-8_Fr2-8	0,025	0,025	49,44	48,47	3,96	3,88	7,99	7,83	5369	5160
78	Fr1-9_Fr2-3	0,025	0,025	52,64	17,53	4,21	1,40	8,50	2,83	6085	675

Priloga B2: Seznam vseh izmerjenih scenarijev z vrednostmi glavnih parametrov in veličin Appendix B2: List of all measured scenarios with values of key parameters and variables

	oznaka primera	hg	hs	Q_g	Qs	Vg	Vs	Frg	Fr s	Weg	Wes
#		[r	n]	[1,	/s]	[m	/s]		[-]	-
79	Fr1-4_Fr2-2	0,03	0,03	32,61	15,89	2,17	1,06	4,01	1,95	1946	462
80	Fr1-4_Fr2-4	0,03	0,03	32,64	32,42	2,18	2,16	4,01	3,98	1949	1923
81	Fr1-5_Fr2-2	0,03	0,03	40,78	16,00	2,72	1,07	5,01	1,97	3043	468
82	Fr1-5_Fr2-3	0,03	0,03	40,67	24,36	2,71	1,62	5,00	2,99	3026	1086
83	Fr1-5_Fr2-5	0,03	0,03	41,00	40,47	2,73	2,70	5,04	4,97	3076	2998
84	Fr1-6_Fr2-2	0,03	0,03	48,83	15,03	3,26	1,00	6,00	1,85	4364	413
85	Fr1-6_Fr2-4	0,03	0,03	48,69	32,67	3,25	2,18	5,98	4,01	4339	1953
86	Fr1-6_Fr2-6	0,03	0,03	49,03	48,69	3,27	3,25	6,02	5,98	4399	4339
87	Fr1-7_Fr2-2	0,03	0,03	56,64	14,78	3,78	0,99	6,96	1,82	5871	400
88	Fr1-7_Fr2-3	0,03	0,03	55,81	24,50	3,72	1,63	6,86	3,01	5699	1098
89	Fr1-7_Fr2-4	0,03	0,03	55,39	31,75	3,69	2,12	6,81	3,90	5614	1845
90	Fr1-7_Fr2-5	0,03	0,03	54,44	40,56	3,63	2,70	6,69	4,98	5424	3010
91	Fr1-3_Fr2-1	0,03	0,01	24,64	1,81	1,64	0,36	3,03	1,15	1111	18
92	Fr1-3_Fr2-3	0,03	0,01	24,64	4,75	1,64	0,95	3,03	3,03	1111	124
93	Fr1-3_Fr2-6	0,03	0,01	24,61	9,26	1,64	1,85	3,02	5,92	1108	471
94	Fr1-3_Fr2-9	0,03	0,01	24,39	14,08	1,63	2,82	3,00	8,99	1089	1089
95	Fr1-3_Fr2-12	0,03	0,01	24,14	18,94	1,61	3,79	2,97	12,10	1066	1970
96	Fr1-4_Fr2-2	0,03	0,01	32,65	3,18	2,18	0,64	4,01	2,03	1951	56
97	Fr1-4_Fr2-4	0,03	0,01	32,58	6,42	2,17	1,28	4,00	4,10	1943	226
98	Fr1-4_Fr2-8	0,03	0,01	32,65	12,35	2,18	2,47	4,01	7,88	1951	837
99	Fr1-4_Fr2-12	0,03	0,01	32,72	19,06	2,18	3,81	4,02	12,17	1959	1993
100	Fr1-6_Fr2-3	0,03	0,01	48,92	4,69	3,26	0,94	6,01	3,00	4379	121
101	Fr1-6_Fr2-6	0,03	0,01	48,69	9,42	3,25	1,88	5,98	6,01	4339	487
102	Fr1-6_Fr2-12	0,03	0,01	48,72	18,78	3,25	3,76	5,99	11,99	4344	1936
103	Fr1-7_Fr2-3	0,03	0,01	56,90	4,74	3,79	0,95	6,99	3,02	5925	123
104	Fr1-7_Fr2-5	0,03	0,01	56,78	7,83	3,79	1,57	6,98	5,00	5899	337
105	Fr1-7_Fr2-7	0,03	0,01	56,60	10,64	3,77	2,13	6,96	6,79	5862	621
106	Fr1-7_Fr2-9	0,03	0,01	56,40	14,42	3,76	2,88	6,93	9,21	5822	1141
107	Fr1-7_Fr2-11	0,03	0,01	56,21	17,31	3,75	3,46	6,91	11,05	5782	1644
108	Fr1-3_Fr2-1	0,03	0,02	24,64	4,40	1,64	0,44	3,03	0,99	1111	53
109	Fr1-3_Fr2-3	0,03	0,02	24,36	13,07	1,62	1,31	2,99	2,95	1086	469
110	Fr1-3_Fr2-6	0,03	0,02	24,47	26,99	1,63	2,70	3,01	6,09	1096	1999
111	Fr1-3_Fr2-9	0,03	0,02	24,35	40,00	1,62	4,00	2,99	9,03	1085	4392
112	Fr1-4_Fr2-2	0,03	0,02	32,96	8,86	2,20	0,89	4,05	2,00	1988	216
113	Fr1-4_Fr2-4	0,03	0,02	32,64	17,86	2,18	1,79	4,01	4,03	1949	876
114	Fr1-4_Fr2-8	0,03	0,02	33,08	35,40	2,21	3,54	4,07	7,99	2003	3440
115	Fr1-6_Fr2-3	0,03	0,02	48,86	13,36	3,26	1,34	6,00	3,02	4369	490
116	Fr1-6_Fr2-6	0,03	0,02	49,39	26,61	3,29	2,66	6,07	6,01	4464	1944
117	Fr1-6_Fr2-9	0,03	0,02	48,64	40,33	3,24	4,03	5,98	9,11	4329	4465
118	Fr1-7_Fr2-3	0,03	0,02	56,39	12,81	3,76	1,28	6,93	2,89	5819	450
119	Fr1-7_Fr2-5	0,03	0,02	55,72	21,97	3,71	2,20	6,85	4,96	5682	1325
120	Fr1-7_Fr2-7	0,03	0,02	55,00	31,19	3,67	3,12	6,76	7,04	5536	2671
121	Fr1-7_Fr2-9	0,03	0,02	54,25	40,14	3,62	4,01	6,67	9,06	5386	4423

Priloga B3: Seznam vseh izmerjenih scenarijev z vrednostmi glavnih parametrov in veličin Appendix B3: List of all measured scenarios with values of key parameters and variables

	oznaka primera	hg	hs	Q_g	Q₅	Vg	Vs	Frg	Frs	Weg	Wes
#		[n	n]	[1,	′s]	[m	/s]		ſ	-]	
122	Fr1-3_Fr2-1	0,03	0,03	24,47	8,19	1,63	0,55	3,01	1,01	1096	123
123	Fr1-3_Fr2-3	0,03	0,03	24,46	24,44	1,63	1,63	3,01	3,00	1095	1093
124	Fr1-3_Fr2-6	0,03	0,03	25,97	48,97	1,73	3,26	3,19	6,02	1234	4389
125	Fr1-6_Fr2-3	0,03	0,03	48,81	24,39	3,25	1,63	6,00	3,00	4359	1089
126	Fr1-1_Fr2-3	0,03	0,03	8,08	24,39	0,54	1,63	0,99	3,00	120	1089
127	Fr1-2_Fr2-4	0,03	0,03	16,44	32,50	1,10	2,17	2,02	3,99	495	1933
128	Fr1-3_Fr2-6	0,03	0,03	24,94	48,75	1,66	3,25	3,07	5,99	1139	4349
129	Fr1-1_Fr2-3	0,01	0,03	1,71	24,69	0,34	1,65	1,09	3,03	16	1116
130	Fr1-3_Fr2-3	0,01	0,03	4,71	24,69	0,94	1,65	3,01	3,03	122	1116
131	Fr1-6_Fr2-3	0,01	0,03	9,54	24,49	1,91	1,63	6,09	3,01	500	1097
132	Fr1-9_Fr2-3	0,01	0,03	14,58	24,22	2,92	1,61	9,31	2,98	1168	1074
133	Fr1-12_Fr2-3	0,01	0,03	19,69	24,61	3,94	1,64	12,58	3,02	2129	1108
134	Fr1-2_Fr2-4	0,01	0,03	3,17	32,69	0,63	2,18	2,02	4,02	55	1956
135	Fr1-4_Fr2-4	0,01	0,03	6,24	32,69	1,25	2,18	3,98	4,02	214	1956
136	Fr1-8_Fr2-4	0,01	0,03	12,61	32,50	2,52	2,17	8,05	3,99	873	1933
137	Fr1-12_Fr2-4	0,01	0,03	18,83	32,72	3,77	2,18	12,03	4,02	1947	1959
138	Fr1-3_Fr2-6	0,01	0,03	4,69	32,64	0,94	2,18	3,00	4,01	121	1949
139	Fr1-6_Fr2-6	0,01	0,03	9,58	48,72	1,92	3,25	6,12	5,99	504	4344
140	Fr1-12_Fr2-6	0,01	0,03	18,78	48,58	3,76	3,24	11,99	5,97	1936	4319
141	Fr1-3_Fr2-7	0,01	0,03	3,78	56,89	0,76	3,79	2,41	6,99	78	5922
142	Fr1-5_Fr2-7	0,01	0,03	7,67	56,53	1,53	3,77	4,90	6,95	323	5848
143	Fr1-7_Fr2-7	0,01	0,03	11,17	56,17	2,23	3,74	7,13	6,90	685	5773
144	Fr1-9_Fr2-7	0,01	0,03	14,14	56,03	2,83	3,74	9,03	6,89	1097	5745
145	Fr1-11_Fr2-7	0,01	0,03	17,19	55,86	3,44	3,72	10,98	6,86	1623	5710
146	Fr1-1_Fr2-3	0,02	0,03	4,39	24,78	0,44	1,65	0,99	3,04	53	1124
147	Fr1-3_Fr2-3	0,02	0,03	13,28	24,47	1,33	1,63	3,00	3,01	484	1096
148	Fr1-6_Fr2-3	0,02	0,03	13,28	24,47	1,33	1,63	3,00	3,01	484	1096
149	Fr1-9_Fr2-3	0,02	0,03	39,81	24,47	3,98	1,63	8,99	3,01	4349	1096
150	Fr1-11_Fr2-3	0,02	0,03	47,67	24,11	4,77	1,61	10,76	2,96	6237	1064
151	Fr1-2_Fr2-4	0,02	0,03	9,13	32,61	0,91	2,17	2,06	4,01	229	1946
152	Fr1-4_Fr2-4	0,02	0,03	18,51	33,10	1,85	2,21	4,18	4,07	941	2005
153	Fr1-8_Fr2-4	0,02	0,03	35,44	32,47	3,54	2,16	8,00	3,99	3449	1930
154	Fr1-10.5_Fr2-4	0,02	0,03	47,17	32,53	4,72	2,17	10,65	4,00	6107	1936
155	Fr1-3_Fr2-6	0,02	0,03	13,31	48,83	1,33	3,26	3,00	6,00	486	4364
156	Fr1-6_Fr2-6	0,02	0,03	26,50	48,50	2,65	3,23	5,98	5,96	1928	4305
157	Fr1-10.5_Fr2-6	0,02	0,03	45,86	48,44	4,59	3,23	10,35	5,95	5773	4295
158	Fr1-3_Fr2-7	0,02	0,03	13,42	56,00	1,34	3,73	3,03	6,88	494	5739
159	Fr1-5_Fr2-7	0,02	0,03	22,03	55,42	2,20	3,69	4,97	6,81	1332	5620
160	Fr1-7_Fr2-7	0,02	0,03	30,92	54,92	3,09	3,66	6,98	6,75	2624	5519
161	Fr1-9_Fr2-7	0,02	0,03	39,03	53,19	3,90	3,55	8,81	6,54	4181	5178
162	Fr1-11_Fr2-7	0,02	0,03	44,00	53,94	4,40	3,60	9,93	6,63	5314	5325
163	Fr1-1_Fr2-3	0,03	0,03	8,08	24,39	0,54	1,63	0,99	3,00	120	1089
164	Fr1-2_Fr2-4	0,03	0,03	16,44	32,50	1,10	2,17	2,02	3,99	495	1933
165	Fr1-3_Fr2-6	0,03	0,03	24,42	48,75	1,63	3,25	3,00	5,99	1091	4349
166	Fr1-3_Fr2-7	0,03	0,03	24,25	55,47	1,62	3,70	2,98	6,82	1076	5631
167	Fr1-5_Fr2-7	0,03	0,03	40,94	54,33	2,73	3,62	5,03	6,68	3068	5402
168	Fr1-7_Fr2-7	0,03	0,03	51,89	53,22	3,46	3,55	6,38	6,54	4927	5184

Priloga B4: Seznam vseh izmerjenih scenarijev z vrednostmi glavnih parametrov in veličin Appendix B4: List of all measured scenarios with values of key parameters and variables

Priloga C1: Primeri konstruirane topografije vodne gladine vzdolž sotočja Appendix C1: Examples of constructed water surface topography along the confluence

Oznaka primera	Fr1-10_Fr2-5
Višina odprtja na glavnem kanalu	15 mm
Višina odprtja na stranskem kanalu	15 mm
Pretok v glavnem kanalu	28,78 l/s
Pretok v stranskem kanalu	14,67 l/s
Froudovo število v glavnem kanalu	10,00
Froudovo število v stranskem kanalu	5,10





Priloga C2: Primeri konstruirane topografije vodne gladine vzdolž sotočja Appendix C2: Examples of constructed water surface topography along the confluence

Oznaka primera	Fr1-8_Fr2-6
Višina odprtja na glavnem kanalu	25 mm
Višina odprtja na stranskem kanalu	25 mm
Pretok v glavnem kanalu	49,03 l/s
Pretok v stranskem kanalu	35,83 l/s
Froudovo število v glavnem kanalu	7,92
Froudovo število v stranskem kanalu	5,79





Priloga C3: Primeri konstruirane topografije vodne gladine vzdolž sotočja Appendix C3: Examples of constructed water surface topography along the confluence

Oznaka primera	Fr1-6_Fr2-12
Višina odprtja na glavnem kanalu	30 mm
Višina odprtja na stranskem kanalu	10 mm
Pretok v glavnem kanalu	48,72 l/s
Pretok v stranskem kanalu	18,78 l/s
Froudovo število v glavnem kanalu	5,99
Froudovo število v stranskem kanalu	11,99





Priloga C4: Primeri konstruirane topografije vodne gladine vzdolž sotočja Appendix C4: Examples of constructed water surface topography along the confluence

Oznaka primera	Fr1-7_Fr2-11
Višina odprtja na glavnem kanalu	30 mm
Višina odprtja na stranskem kanalu	10 mm
Pretok v glavnem kanalu	56,21 l/s
Pretok v stranskem kanalu	17,31 l/s
Froudovo število v glavnem kanalu	6,91
Froudovo število v stranskem kanalu	11,05





Priloga C5: Primeri konstruirane topografije vodne gladine vzdolž sotočja Appendix C5: Examples of constructed water surface topography along the confluence

Oznaka primera	<i>Fr1</i> –7_ <i>Fr2</i> –7
Višina odprtja na glavnem kanalu	30 mm
Višina odprtja na stranskem kanalu	20 mm
Pretok v glavnem kanalu	55,00 l/s
Pretok v stranskem kanalu	31,19 l/s
Froudovo število v glavnem kanalu	6,76
Froudovo število v stranskem kanalu	7,04





Priloga D1: Lastnosti stoječega valovanja na sotočju za pojav sodčka ali grbastega vala, določene iz meritev in izdelanih 3D mrežnih modelov Appendix D1: Properties of standing waves at channel junction for the phenomenon of barrel roll or humped wave, obtained from measurements and created 3D mesh models

		-								Val C					Val C prehod Val B						Val D			
	ŀ		h₅	Q_g	Q₅	Vg	Vs	Frg	Frs	kot	Xmax	Ymax	Zmax	flukt	vala C v B	Xmax	Zmax	flukt	Xkonec	Xmax	Zmax	flukt		
#	oznaka primera	[m]		[l/s]		[m/s]		[-]		[9]	[<i>m</i>]			[-]	[<i>m</i>]				· · · · · ·					
1	Fr1-9_Fr2-6	0.01	0.01	14.0	9.4	2.8	1.9	8.9	6.0	33	/	/	0.105	0.015	DA	0.50	0.12	0.020	1.03	1.13	0.05	0.010		
2	Fr1-10_Fr2-7.5	0.01	0.01	15.6	11.8	3.1	2.4	10.0	7.5	36	0.405	0.250	0.156	0.025	NE	0.46	0.15	0.025	0.98	1.10	0.06	0.015		
3	Fr1-12_Fr2-6	0.01	0.01	18.8	9.4	3.8	1.9	12.0	6.0	28	0.300	0.400	0.135	0.030	NE	0.70	0.12	0.030	1.40	/	/	/		
4	Fr1-12_Fr2-9	0.01	0.01	18.8	14.1	3.8	2.8	12.0	9.0	36	/	0.195	0.220	0.025	NE	0.55	0.27	0.035	0.93	1.00	0.10	0.025		
5	Fr1-8_Fr2-6	0.015	0.015	23.0	16.9	3.1	2.3	8.0	5.9	35	0.440	/	0.190	0.025	NE	0.45	0.17	0.035	0.98	0.95	0.09	0.020		
6	Fr1-9_Fr2-6	0.015	0.015	25.9	16.8	3.4	2.2	9.0	5.9	33	0.385	0.285	0.210	0.030	NE	0.60	0.22	0.040	1.08	1.30	0.11	0.020		
7	Fr1-10_Fr2-5	0.015	0.015	28.8	14.7	3.8	2.0	10.0	5.1	28	0.350	0.365	0.185	0.030	NE	0.70	0.15	0.035	1.58	/	/	/		
8	Fr1-10_Fr2-7.5	0.015	0.015	28.8	21.6	3.8	2.9	10.0	7.5	35		0.125	0.310	0.035	DA	0.55	0.33	0.045	1.00	1.20	0.13	0.025		
9	Fr1-12_Fr2-6	0.015	0.015	34.6	17.3	4.6	2.3	12.0	6.0	28	0.450	0.375	0.260	0.035	NE	0.70	0.21	0.045	1.48	1.80	0.10	0.025		
10	Fr1-12_Fr2-8	0.015	0.015	34.5	23.1	4.6	3.1	12.0	8.0	32	/	0.125	0.375	0.035	DA	0.65	0.40	0.060	1.30	1.50	0.15	0.030		
11	Fr1-7_Fr2-5	0.02	0.02	32.7	22.2	3.3	2.2	7.4	5.0	33	0.490	0.195	0.200	0.030	NE	0.50	0.20	0.040	1.00	1.05	0.12	0.025		
12	Fr1-8_Fr2-4	0.02	0.02	35.5	17.7	3.5	1.8	8.0	4.0	28	0.400	0.380	0.185	0.030	NE	0.60	0.16	0.030	1.50	1.60	0.10	0.020		
13	Fr1-8_Fr2-6	0.02	0.02	35.5	26.6	3.6	2.7	8.0	6.0	36		0.120	0.300	0.025	DA	0.45	0.32	0.035	0.98	1.09	0.15	0.020		
14	Fr1-10_Fr2-5	0.02	0.02	44.2	22.2	4.4	2.2	10.0	5.0	28	0.490	0.315	0.285	0.040	NE	0.67	0.24	0.040	/	1.70	0.13	0.030		
15	Fr1-10_Fr2-6	0.02	0.02	44.4	26.5	4.4	2.6	10.0	6.0	31	0.520	0.185	0.360	0.035	NE	0.55	0.36	0.045	1.40	1.55	0.17	0.030		
16	Fr1-9_Fr2-6	0.02	0.02	39.9	26.6	4.0	2.7	9.0	6.0	33	/	0.125	0.340	0.040	DA	0.60	0.36	0.045	1.23	1.30	0.16	0.025		
17	Fr1-7_Fr2-5	0.025	0.025	43.4	31.1	3.5	2.5	7.0	5.0	35	0.590	0.125	0.265	0.030	NE	0.45	0.29	0.045	1.05	1.10	0.16	0.030		
18	Fr1-8_Fr2-4	0.025	0.025	49.7	24.9	4.0	2.0	8.0	4.0	28	0.475	0.330	0.245	0.030	NE	0.60	0.20	0.040	1.23	1.63	0.15	0.025		
19	Fr1-8_Fr2-6	0.025	0.025	49.0	35.8	3.9	2.9	7.9	5.8	35	/	/	0.390	0.030	DA	0.50	0.42	0.050	1.15	1.30	0.18	0.025		
20	Fr1-7_Fr2-4	0.03	0.03	55.4	31.8	3.7	2.1	6.8	3.9	31	0.500	0.300	0.275	0.040	NE	0.55	0.26	0.045	1.08	1.32	0.18	0.025		
21	Fr1-7_Fr2-5	0.03	0.03	54.4	40.6	3.6	2.7	6.7	5.0	36	0.665	/	0.315	0.040	NE	0.45	0.35	0.050	1.08	1.10	0.19	0.025		
22	Fr1-6_Fr2-4	0.03	0.03	48.7	32.7	3.2	2.2	6.0	4.0	33	0.550	0.150	0.220	0.030	NE	0.50	0.23	0.040	0.98	1.20	0.16	0.025		
23	Fr1-6_Fr2-12	0.03	0.01	48.7	18.8	3.2	3.8	6.0	12.0	25	0.500	0.235	/	0.030	NE	0.80	0.39	0.045	1.38	1.90	0.16	0.035		
24	Fr1-7_Fr2-9	0.03	0.01	56.4	14.4	3.8	2.9	6.9	9.2	16	0.430	0.365	/	0.025	NE	0.95	/	0.055	/	/	/	/		
25	Fr1-7_Fr2-11	0.03	0.01	56.2	17.3	3.7	3.5	6.9	11.1	20	0.500	0.280	/	0.025	NE	0.90	/	0.055	1.68	/	/	/		
26	Fr1-6_Fr2-6	0.03	0.02	49.4	26.6	3.3	2.7	6.1	6.0	28	0.455	0.235	0.314	0.025	NE	0.55	0.33	0.050	1.15	1.31	0.16	0.025		
27	Fr1-7_Fr2-5	0.03	0.02	55.7	22.0	3.7	2.2	6.8	5.0	24	0.455	0.375	0.260	0.035	NE	0.70	0.21	0.045	1.45	1.81	0.12	0.025		
28	Fr1-7_Fr2-7	0.03	0.02	55.0	31.2	3.7	3.1	6.8	7.0	30	/	0.125	0.420	0.035	DA	0.56	0.45	0.050	1.20	1.42	0.18	0.025		
29	Fr1-9_Fr2-3	0.02	0.03	39.8	24.5	4.0	1.6	9.0	3.0	30	0.425	0.355	0.195	0.050	NE	0.55	0.18	0.030	/	/	1	/		
30	Fr1-11_Fr2-3	0.02	0.03	47.7	24.1	4.8	1.6	10.8	3.0	27	0.400	0.370	0.202	0.040	NE	0.65	0.17	0.035	/	/	/	/		
31	Fr1-10.5_Fr2-4	0.02	0.03	47.2	32.5	4.7	2.2	10.6	4.0	32	0.550	0.235	0.295	0.055	NE	0.55	0.29	0.050	1.23	1.49	0.18	0.030		

Priloga E1: Fenomenološke enačbe za opis lastnosti stoječega valovanja na sotočju in primerjava merjenih vrednosti ter izračunanih vrednosti po naših enačbah in enačbah Schwalt-Hager Appendix E1: Phenomenological equations for description of standing waves' properties, and comparison of measured values and calculated values with our and Schwalt-Hager equations

VAL C

• <u>Kot mešanja/grbastega vala C</u>

$$tan\theta = \frac{b - y_{MC}}{x_{MC}} = 0.9 * \left(\frac{h_s}{h_g}\right)^{1,2} * f^{0,8}$$



 $\theta = \tan^{-1}(\tan\theta)$

• <u>Vzdolžna koordinata maksimalne višine grebena vala C</u>



Priloga E2: Fenomenološke enačbe za opis lastnosti stoječega valovanja na sotočju in primerjava merjenih vrednosti ter izračunanih vrednosti po naših enačbah in enačbah Schwalt-Hager Appendix E2: Phenomenological equations for description of standing waves' properties, and comparison of measured values and calculated values with our and Schwalt-Hager equations

• <u>Prečna koordinata maksimalne višine grebena vala C</u>

$$Y_{MC} = \frac{y_{MC}}{\bar{h}} = b - 2 * (\sin\theta)^{(-1,5)} * \left(\frac{h_s}{h_g}\right)^{3,7} * Fr_g^{(-2,5)} * Fr_s^{3,7}$$



• <u>Maksimalna višina grebena vala C</u>

$$Z_{MC} = \frac{h_{MC}}{\overline{h}} = Fr_g * Fr_s^{1,4} * \left(\frac{b}{\overline{h}}\right)^{(-0,6)}$$



Priloga E3: Fenomenološke enačbe za opis lastnosti stoječega valovanja na sotočju in primerjava merjenih vrednosti ter izračunanih vrednosti po naših enačbah in enačbah Schwalt-Hager Appendix E3: Phenomenological equations for description of standing waves' properties, and comparison of measured values and calculated values with our and Schwalt-Hager equations



• <u>Fluktuacije na mestu maksimalne višine grebena vala C</u>

$$H'_{MC} = \frac{h'_{MC}}{\bar{h}} = 0.11 * Fr_g^{1,1} * Fr_s^{0,2}$$

• <u>Dejansko stanje višine vode na mestu maksimalne višine grebena vala C</u> $Z_{MC,dej} = Z_{MC} \pm H'_{MC}$



Priloga E4: Fenomenološke enačbe za opis lastnosti stoječega valovanja na sotočju in primerjava merjenih vrednosti ter izračunanih vrednosti po naših enačbah in enačbah Schwalt-Hager Appendix E4: Phenomenological equations for description of standing waves' properties, and comparison of measured values and calculated values with our and Schwalt-Hager equations

VAL B

• <u>Vzdolžna koordinata maksimalne višine grebena vala B ob steni nasproti stranskega dotoka</u>

$$L_{MB} = \frac{x_{MB}}{h} = (\cos\theta)^4 * Fr_g^{0,25} * Fr_s^{0,15}$$

• Maksimalna višina grebena vala B ob steni nasproti stranskega dotoka

$$Z_{MB} = \frac{h_{MB}}{\bar{h}} = 1.1 * Fr_g^{0.9} * Fr_s^{1.5} * \left(\frac{b}{\bar{h}}\right)^{(-0.6)} - 1$$



Priloga E5: Fenomenološke enačbe za opis lastnosti stoječega valovanja na sotočju in primerjava merjenih vrednosti ter izračunanih vrednosti po naših enačbah in enačbah Schwalt-Hager Appendix E5: Phenomenological equations for description of standing waves' properties, and comparison of measured values and calculated values with our and Schwalt-Hager equations

• Fluktuacije na mestu maksimalne višine grebena vala B ob steni nasproti stranskega dotoka

$$H'_{MB} = \frac{h'_{MB}}{\bar{h}} = 0.16 * Fr_g^{0.6} * Fr_s^{0.75}$$

• <u>Dejansko stanje višine vode na mestu maksimalne višine grebena vala B ob steni nasproti</u> <u>stranskega dotoka</u>



$$Z_{MC,dej} = Z_{MB} \pm H'_{MB}$$

Priloga E6: Fenomenološke enačbe za opis lastnosti stoječega valovanja na sotočju in primerjava merjenih vrednosti ter izračunanih vrednosti po naših enačbah in enačbah Schwalt-Hager Appendix E6: Phenomenological equations for description of standing waves' properties, and comparison of measured values and calculated values with our and Schwalt-Hager equations

• Vzdolžna koordinata dolvodnega konca grebena vala B ob steni nasproti stranskega dotoka

$$L_{EB} = \frac{x_{EB}}{\bar{h}} = 0.75 * \left(\frac{h_s}{h_g}\right)^{(-1,3)} * Fr_g^{1,5} * Fr_s^{(-0,9)} * \left(\frac{b}{\bar{h}}\right)^{0,75} + \frac{b}{2\bar{h}}$$



VAL D

Vzdolžna koordinata maksimalne višine grebena vala D

$$L_{MD} = \frac{x_{MD}}{\overline{b}} = 1 + 0.45 * \left(\frac{h_s}{h_g}\right)^{(-2,1)} Fr_g^{2,3} * Fr_s^{(-1,2)} * \left(\frac{b}{\overline{h}}\right)^{(-0,5)}$$



Priloga E7: Fenomenološke enačbe za opis lastnosti stoječega valovanja na sotočju in primerjava merjenih vrednosti ter izračunanih vrednosti po naših enačbah in enačbah Schwalt-Hager Appendix E7: Phenomenological equations for description of standing waves' properties, and comparison of measured values and calculated values with our and Schwalt-Hager equations

• Maksimalna višina grebena vala D ob steni na strani stranskega dotoka

• <u>Fluktuacije na mestu maksimalne višine grebena vala D stoječega vala ob steni na strani</u>



$$Z_{MD} = \frac{h_{MD}}{\bar{h}} = 2.3 * Fr_g^{0,7} * Fr_s^{0,8} * \left(\frac{b}{\bar{h}}\right)^{(-0.55)}$$

Priloga E8: Fenomenološke enačbe za opis lastnosti stoječega valovanja na sotočju in primerjava merjenih vrednosti ter izračunanih vrednosti po naših enačbah in enačbah Schwalt-Hager Appendix E8: Phenomenological equations for description of standing waves' properties, and comparison of measured values and calculated values with our and Schwalt-Hager equations

• Višina vode in fluktuacij na mestu maksimalne višine vala D



$$Z_{MD,dej} = Z_{MD} \pm H'_{MD}$$