

FLOW PARAMETERS MEASUREMENT IN THE CHANNEL WITH THE NEGATIVE STEP

J. Šulc^{*}, P. Lichtneger^{*}, P. Zubík^{*}

Summary: *The paper describes a measurement of flow parameters in the cross-section channel with the negative step. The pressure and free water level regimes were tested. The contact-less measuring technique, such as Laser Doppler Anemometry (LDA) and Particle Image Velocimetry (PIV), was used for the measurement of mean and pulsation velocity components. The measurement was carried out in several different states of flow. The results of this detailed measurement in the selected relatively simple technical element are used for subsequent calibration and verification of appropriate mathematical models of turbulence.*

1. Úvod

Laboratoř vodohospodářského výzkumu (LVV) Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně je spoluřešitelem výzkumného projektu podporovaného Grantovou agenturou České republiky „Vyšetřování turbulentního smykového proudění v kanálech s náhlým rozšířením průřezu“ reg. č.: 101/03/0018. V prvním roce řešení tohoto výzkumného projektu byl proveden experiment na přímém kanálu s rozšířením obdélníkového průřezu 200 x 180 mm na čtvercový průřez 200 x 200 mm (negativní stupeň ve dně 20 mm). Účelem experimentu bylo získat vstupní a ověřovací data pro odladění matematických modelů realizovaných na řešitelském pracovišti – Ústav termomechaniky Akademie věd České republiky. Pro daný účel byl vyroben hydraulický okruhu s průhledným modelem předmětného kanálu včetně vstupního a výstupního úseku. K měření byly použity dvě metody: rovinná laserová anemometrie (Particle Image Velocimetry (PIV)) – posloužila k měření rozložení rychlostí ve zvolených dvourozměrných řezech a bodová laserová anemometrie (Laser Doppler Anemometry (LDA)) – měření turbulence rychlosti ve zvolených bodech včetně měření nestacionarity proudění v prostoru za náhlým rozšířením kanálu. Všechna použitá měřicí technika je součástí vybavení LVV.

Současně proběhlo ve spolupráci s TU (Technische Universität) Dresden při modelově shodných okrajových podmínkách měření proudění o volné hladině s využitím LDA techniky. Experiment byl proveden na přímém otevřeném kanálu s rozšířením průtočného profilu 145 x 210 mm na 145 x 260 mm (negativní stupeň ve dně 50 mm). Kromě získání vstupních a ověřovacích dat pro matematický model bylo cílem experimentu získat informaci o možnostech využití specifických vlastností LDA techniky při měření parametrů a struktury proudu v rámci postgraduálního studia Ing. Lichtnegera. Popis měření a vyhodnocených výsledků na modelu v TU Dresden je obsažen v kapitole 5.

^{*} Doc. Ing. Jan Šulc, CSc., Ing. Petr Lichtneger, Ing. Pavel Zubík, Ph.D.: Ústav vodních staveb, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně; Veverí 331/95, 602 00 Brno; tel.: 541 147 289, fax: 541 147 288; e-mail: Šulc.J@fce.vutbr.cz., Lichtneger.P@fce.vutbr.cz, Zubik.P@fce.vutbr.cz

2. Stavba modelu

V prostorách LVV byla pro testovací okruh využita zásobní nádrž s čerpadlem řízeným frekvenčním měničem.

Vzhledem k záměru použít pro měření rychlostí bezkontaktní optické metody, byly pro výrobu celého kanálu s protiproudáním a poproudáním úsekem zvoleny materiály a technologie zajišťující maximální průhlednost. Rozměry modelu jsou uvedeny ve schématu na obr. 1. celkový pohled na model je na obr. 2. Celkový přehled provedených měření je uveden v tabulkách.

3. Měření parametrů vstupního pole

Ve vzdálenosti 600 mm protiproudě před rozšířením byl zvolen profil pro měření parametrů vstupního proudového pole. Metodou PIV bylo provedeno 10 sérií měření, v tabulce č.1 označené pořadovými čísly 27 až 36. Následným zpracováním byl získán časově střední obraz rozložení podélné složky rychlosti napříč celým kanálem (obr. 3). Střední (průřezová) rychlost tohoto rychlostního profilu činí 1,8 m/s a pro účely porovnání s jinými nastavovanými režimy proudění ve zkušebním hydraulickém okruhu je označena jako „poměrná průřezová rychlost = 1“.

Ve stejném profilu bylo ve zvolené síti 40 měrných bodů provedeno měření metodou LDA (v tabulce č.2 pořadové číslo 45). V každém měrném bodě bylo naměřeno 20 000 hodnot podélné složky rychlosti tempem několika set dat za sekundu. Ze zaznamenaných dat je možno získat pro matematický model důležitou informaci o charakteru turbulence v daném místě. V tomto zvoleném vstupním řezu bylo také provedeno měření v 8 bodech v jedné řadě uprostřed výšky kanálu od jedné boční stěny ke druhé boční stěně při dalších 7 různých rychlostech (v tabulce č.2 pořadová čísla 46 až 52) pro orientační zjištění vlivu průřezové rychlosti na intenzitu turbulence.

4. Měření proudění v okolí náhlého rozšíření

PIV je metoda měření schopná zaznamenat okamžité rozložení průmětů rychlostí do měrné roviny. V případě orientace měrné roviny kolmo na podélnou osu kanálu neumožňuje uspořádání předmětného modelu umístit záznamovou kameru tak jak to metoda PIV vyžaduje – kolmo na měrnou rovinu. Měrné roviny byly tedy zvoleny vždy rovnoběžně s podélnou osou kanálu a to svisle a vodorovně.

Ve svislém řezu přes celý kanál je při daném relativně malém rozšíření na vektorovém poli velmi těžko pozorovatelný vliv rozšíření na proudění v celém průřezu. Proto byl zvolen nový postup měření a zpracování naměřených dat, podobný jako při měření vstupního pole. V rovinách rovnoběžných se dnem kanálu bylo provedeno 18 sérií měření, v tabulce č.1 označené pořadovými čísly 9 až 26. Následným zpracováním byly získány časově střední obrazy rozložení podélné složky rychlosti napříč celým kanálem v 31 řezech následujících s rovnoměrným krokem v úseku začínajícím 10 mm před negativním stupněm a končícím 200 mm za stupněm (několik příkladů je na obr. 4). Posloupnost těchto grafů nejnázorněji ukazuje vliv náhlého rozšíření průřezu na proudění v celém kanálu. Z grafů je také vidět, že s výjimkou poměrně malých oblastí v blízkosti stěn, má proudění uvnitř kanálu téměř dvourozměrný charakter, proto bylo následující detailní měření prováděno již pouze v jedné svislé rovině symetrie kanálu.

Měření detailně se zabývající odtrženým a zpětným prouděním za náhlým rozšířením byla provedena při 8 různých průřezových rychlostech proudění od nejmenší nastavitelné až do

maximální dosažitelné. Na všech rychlostních polích za odtržením je možno pozorovat poměrně značné rozdíly mezi časově středními a jednotlivými okamžitými stavy rychlostního pole (obr. 5 až 8). Charakteristickým rysem jsou neustále vznikající, ubíhající a zanikající vírové struktury. Po vyhodnocení měření PIV bylo zvoleno místo uprostřed šířky kanálu ve vzdálenosti 40 mm poproudě za rozšířením a 12 mm od dna kanálu, ve kterém byly zaznamenány pomocí LDA delší časové řady vodorovných a svislých složek rychlostí (v tabulce č.3 pořadová čísla 53 až 60). Podrobná analýza těchto záznamů ukázala značnou amplitudu kolísajících rychlostí avšak bez zřetelné opakovací frekvence.

5. Měření proudění o volné hladině na modelu v laboratoři TU Dresden

K modelování proudění o volné hladině s náhlým zvětšením průtočného profilu (negativním stupněm ve dně) byl využit v prostorách Hubert-Engels Labor na TU Dresden otevřený žlab (viz obr. 9) připojený na hydraulický okruh se zásobní nádrží, čerpadlem řízeným frekvenčním měničem a stabilizační nádrží. Stěny jsou vyrobeny z průhledného materiálu tak, aby umožnily měření s LDA. Na začátku žlabu je usměrňovací prvek pro usměrnění a uklidnění proudu. Na dno žlabu byl vložen dnový stupeň o výšce 50 mm.

Odtok vody ze žlabu byl regulován tak, aby při všech proudových stavech (různé Re) byla hladina ve žlabu na stejné úrovni a v takové výši, že její průběh nebyl znatelně ovlivněn dnovým stupněm. Ve všech případech se jednalo o říční režim proudění ($Fr < 1$). Pro každý proudový stav bylo ve zvolené síti měrných bodů změřeno rychlostní pole na vstupu (měrný profil A) a na výstupu (měrný profil B) a průmět vektorů rychlosti do svislé osové roviny (měrný profil C), viz obr. 10.

K měření bodových rychlostí (časově středních i fluktuálních složek) byla použita LDA souprava od firmy TSI ve 2D uspořádání (souprava je vybavena vláknovou optikou) s procesorem IFA 650 a vodou chlazený argonový laser o výkonu 5W od firmy Coherent. Pro pohyb optickou sondou bylo využito tříosé ortogonální traverzační zařízení Isert Electronic.

Pro stanovení struktury proudu na vstupu do zájmové oblasti byl zvolen měrný profil A ve vzdálenosti 700 mm protiproudě od stupně. V síti 56 měrných bodů byly metodou LDA měřeny podélné složky vektorů rychlosti (ve směru osy X). Kromě časově střední hodnoty podélné složky rychlosti tak byla získána také informace o intenzitě turbulence. Obdobně byly změřeny rychlosti v síti 63 měrných bodů na výstupu ze zájmové oblasti v profilu B ve vzdálenosti 600 mm poproudě od stupně. Příklad výsledků měření na vstupu – v profilu A je uveden na obr. 11.

Pro podrobné stanovení struktury proudění v oblasti odtržení tranzitního proudu byly v profilu C v síti 195 měrných bodů měřeny složky vektoru rychlosti ve směru osy X a ve směru osy Z s předpokladem, že proudění v příčném směru (směr osy Y) je v ose přímého kanálu nevýznamné. Protože LDA měření je prováděno postupně v jednotlivých měrných bodech, lze z hlediska celého měrného profilu vyhodnotit pouze časově střední složky rychlostí a získat tak časově střední obraz struktury proudění, viz obr. 12. Na obrázku je možné pozorovat silný recirkulační proud a malý rohový vír u dna těsně za stupněm. Měření LDA umožnilo v oblasti odtržení tranzitního proudu stanovit turbulenci, která dosahovala extrémně vysokých hodnot. To svědčí o obrovských fluktuacích rychlosti, které mnohonásobně převyšují časově střední hodnotu, potažmo o výrazně nestacionárním ději v této oblasti, jak potvrzuje i měření PIV popsané v kapitole 4. Kompletní informace a analýza realizovaného experimentu je obsažena v závěrečné zprávě na pracovišti autorů.

6. Závěr

Bezkontaktní měření středních a pulzačních složek rychlostí proudu včetně zobrazení časového vývoje úplných rychlostních polí v definovaných profilech hydraulického okruhu s náhlým rozšířením průřezu umožnilo detailní analýzu struktury proudu. Měření byla provedena při různých rychlostních poměrech (Re).

Pro experimenty byl záměrně zvolen prvek relativně jednoduchého geometrického tvaru s proudovými poměry závisujícími zejména na Reynoldsově kritériu. měření parametrů nestacionárního proudění v oblasti odtržení a tvorby vírů je pro verifikaci numerických postupů a nalezení vhodného modelu turbulence obzvlášť cenné. Podrobnosti jsou v příspěvku Jaňour & Jonáš (2004).

Obdobná měření parametrů a struktury proudění tlakového i o volné hladině pro kalibrační a verifikační účely matematických modelů s odlišnými poměrnými rozšířeními průřezu kanálu budou prováděna s podporou GA ČR také v letošním a následujícím roce.

Tabulka 1

PIV měření (série 50 okamžitých stavů rychlostního pole s periodou 0,2s)

Poř. č.	Nastavená frekvence pohonu čerpadla	Poměrná střední průřez. rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny		Poznámka
1	30 Hz	1	svislá	nad stupněm	100 mm od boč. stěny	celý průřez kanálu
2	30 Hz	1	svislá	nad stupněm	5 mm od boč. stěny	celý průřez kanálu
3	30 Hz	1	svislá	nad stupněm	50 mm od boč. stěny	celý průřez kanálu
4	30 Hz	1	svislá	nad stupněm	150 mm od boč. stěny	celý průřez kanálu
5	30 Hz	1	svislá	nad stupněm	195 mm od boč. stěny	celý průřez kanálu
6	30 Hz	1	svislá	nad stupněm	195 mm od boč. stěny	detail
7	30 Hz	1	svislá	nad stupněm	150 mm od boč. stěny	detail
8	30 Hz	1	svislá	nad stupněm	100 mm od boč. stěny	detail
9	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	195 mm od dna	celý průřez kanálu
10	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	180 mm od dna	celý průřez kanálu
11	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	160 mm od dna	celý průřez kanálu
12	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	140 mm od dna	celý průřez kanálu
13	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	120 mm od dna	celý průřez kanálu
14	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	100 mm od dna	celý průřez kanálu
15	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	80 mm od dna	celý průřez kanálu
16	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	60 mm od dna	celý průřez kanálu
17	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	40 mm od dna	celý průřez kanálu
18	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	30 mm od dna	celý průřez kanálu
19	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	25 mm od dna	celý průřez kanálu
20	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	20 mm od dna	celý průřez kanálu
21	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	15 mm od dna	celý průřez kanálu
22	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	10 mm od dna	celý průřez kanálu
23	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	5 mm od dna	celý průřez kanálu
24	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	5 mm od dna	celý průřez kanálu
25	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	2,5 mm od dna	celý průřez kanálu
26	30 Hz	1	vodorovná	nad stupněm	2,5 mm od dna	celý průřez kanálu
27	30 Hz	1	vodorovná	600 mm před	195 mm od dna	celý průřez kanálu
28	30 Hz	1	vodorovná	600 mm před	180 mm od dna	celý průřez kanálu
29	30 Hz	1	vodorovná	600 mm před	160 mm od dna	celý průřez kanálu
30	30 Hz	1	vodorovná	600 mm před	140 mm od dna	celý průřez kanálu
31	30 Hz	1	vodorovná	600 mm před	120 mm od dna	celý průřez kanálu

32	30 Hz	1	vodorovná	600 mm před	100 mm od dna	celý průřez kanálu
33	30 Hz	1	vodorovná	600 mm před	80 mm od dna	celý průřez kanálu
34	30 Hz	1	vodorovná	600 mm před	60 mm od dna	celý průřez kanálu
35	30 Hz	1	vodorovná	600 mm před	40 mm od dna	celý průřez kanálu
36	30 Hz	1	vodorovná	600 mm před	25 mm od dna	celý průřez kanálu
37	12,7 Hz	0,25	svislá	za stupněm	100 mm od boč. stěny	detail
38	13 Hz	0,27	svislá	za stupněm	100 mm od boč. stěny	detail
39	14 Hz	0,33	svislá	za stupněm	100 mm od boč. stěny	detail
40	17 Hz	0,47	svislá	za stupněm	100 mm od boč. stěny	detail
41	20 Hz	0,59	svislá	za stupněm	100 mm od boč. stěny	detail
42	25 Hz	0,82	svislá	za stupněm	100 mm od boč. stěny	detail
43	30 Hz	1	svislá	za stupněm	100 mm od boč. stěny	detail
44	32,5 Hz	1,1	svislá	za stupněm	100 mm od boč. stěny	detail

Tabulka 2

LDA měření (časová řada 20 000 hodnot rychlostí naměřených v každém měrném bodě)

Poř. č.	Nastavená frekvence pohonu čerpadla	Poměrná střední průřez. rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny	Poznámka
45	30 Hz	1	svislá	600 mm před	celý průřez kanálu
46	32,5 Hz	1,1	svislá	600 mm před	celý průřez kanálu
47	25 Hz	0,82	svislá	600 mm před	celý průřez kanálu
48	20 Hz	0,59	svislá	600 mm před	celý průřez kanálu
49	17 Hz	0,47	svislá	600 mm před	celý průřez kanálu
50	14 Hz	0,33	svislá	600 mm před	celý průřez kanálu
51	13 Hz	0,27	svislá	600 mm před	celý průřez kanálu
52	12,7 Hz	0,25	svislá	600 mm před	celý průřez kanálu

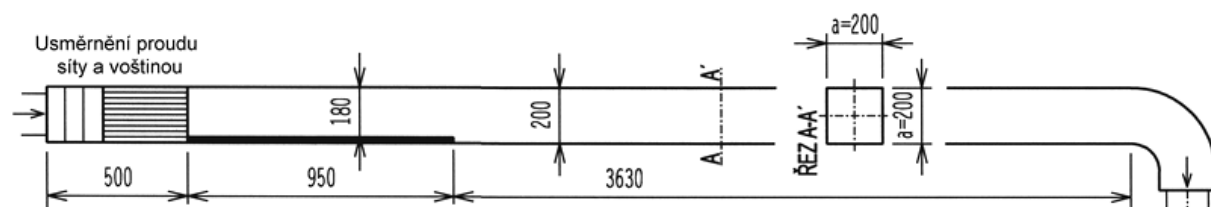
Tabulka 3

LDA měření (časová řada 60 000 až 80 000 hodnot rychlostí naměřených v jednom měrném bodě v úplavu za stupněm)

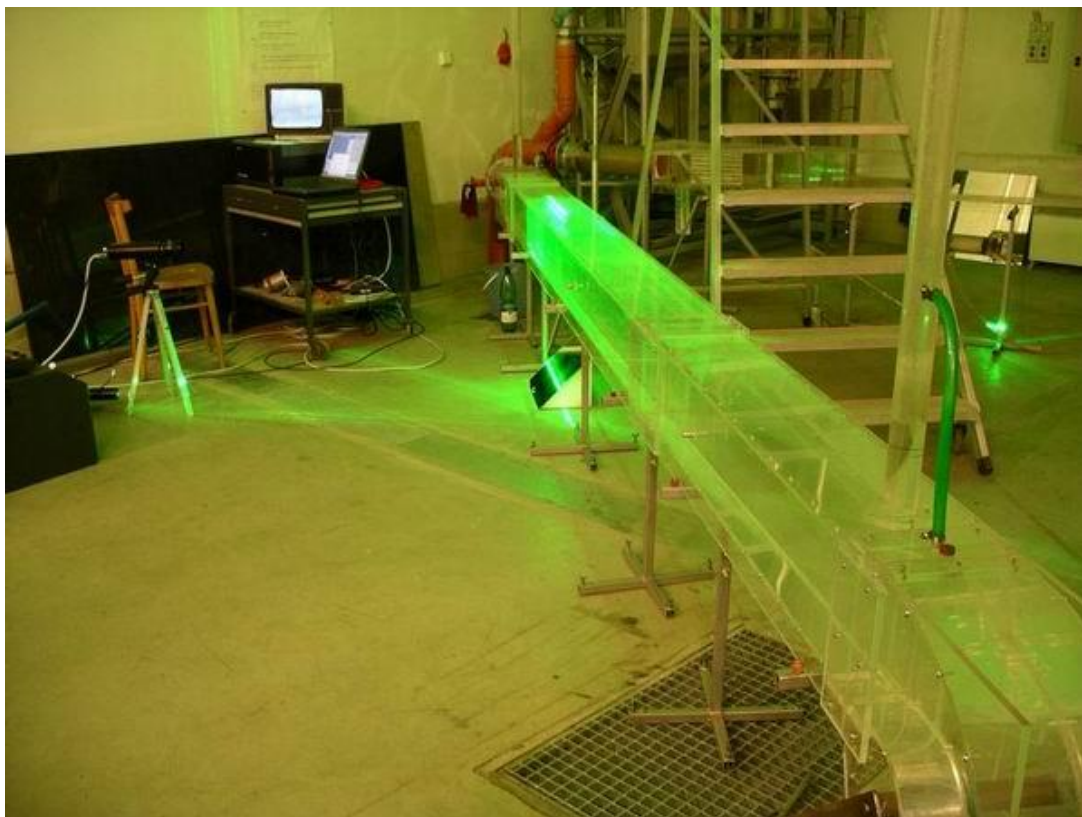
Poř. č.	Nastavená frekvence pohonu čerpadla	Poměrná střední průřez. rychlost	Orientace měřené složky	Poloha měrného bodu	Poznámka
53	15 Hz	0,37	vodorovná	40 mm za 12 mm od dna	
54	20 Hz	0,59	vodorovná	40 mm za 12 mm od dna	
55	25 Hz	0,82	vodorovná	40 mm za 12 mm od dna	
56	30 Hz	1	vodorovná	40 mm za 12 mm od dna	
57	15 Hz	0,37	svislá	40 mm za 12 mm od dna	
58	20 Hz	0,59	svislá	40 mm za 12 mm od dna	
59	25 Hz	0,82	svislá	40 mm za 12 mm od dna	
60	30 Hz	1	svislá	40 mm za 12 mm od dna	

7. Literatura

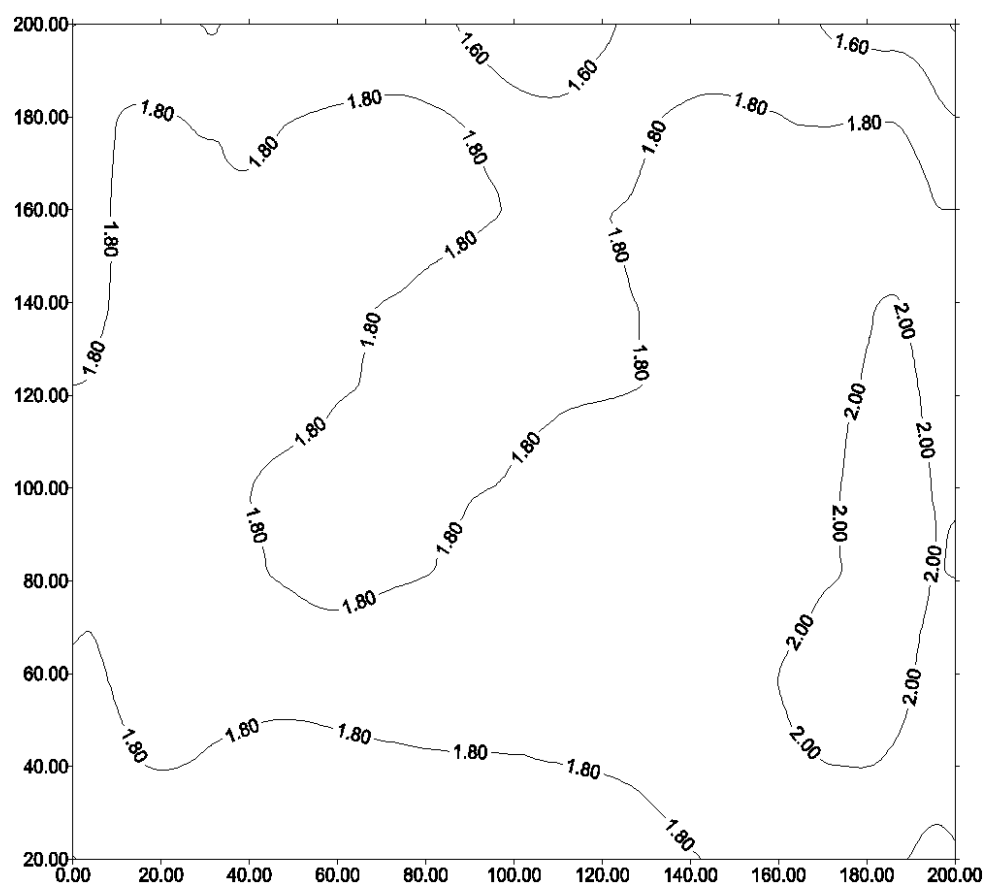
Jaňour Z. & Jonáš P. (2004), Some methods of the control of the separation region behind a backward facing step. Accepted to presentation on GAMM'2004 Jahrestagung, Dresden



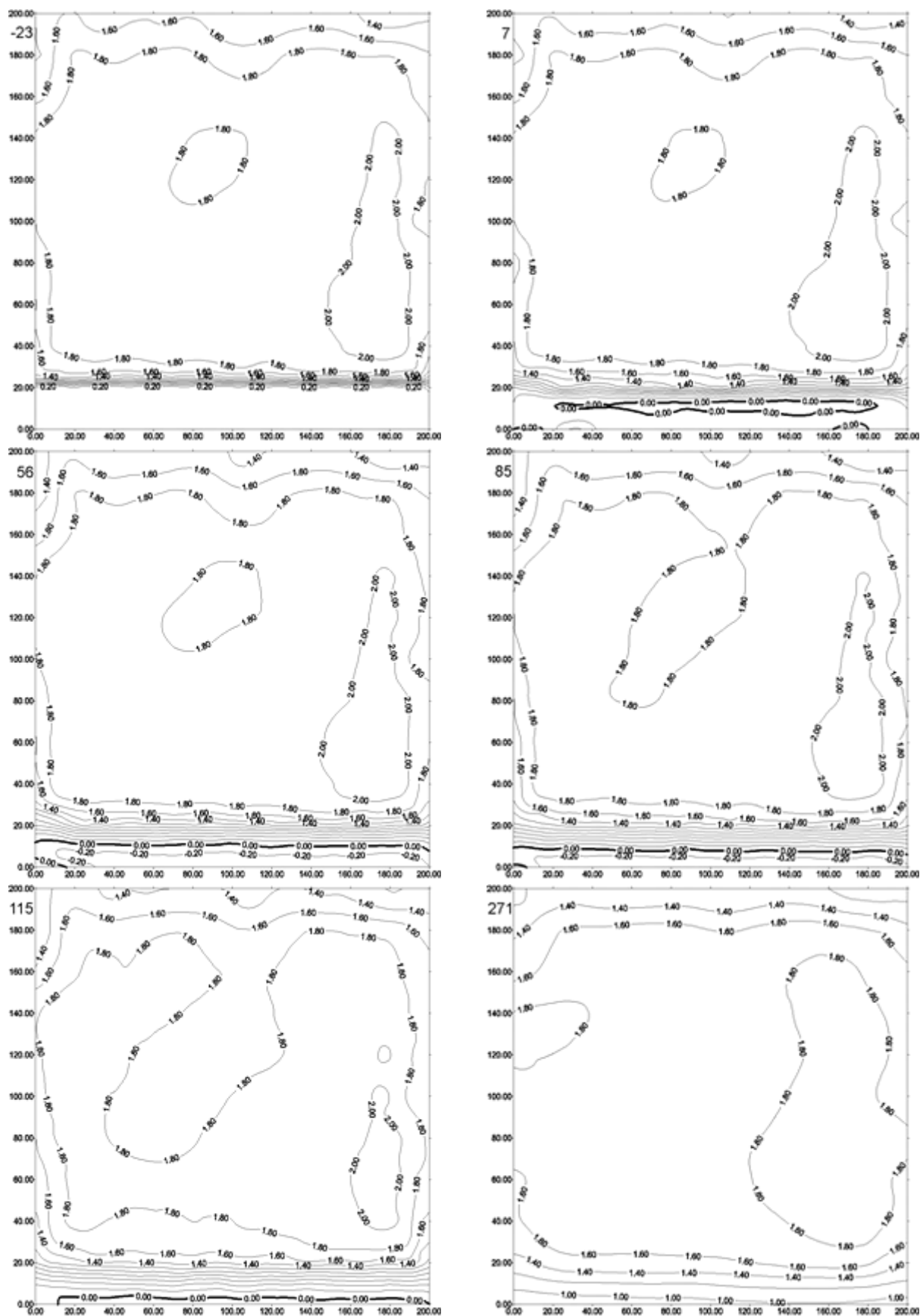
Obr.1 Schéma modelu (LVV) – svislý řez



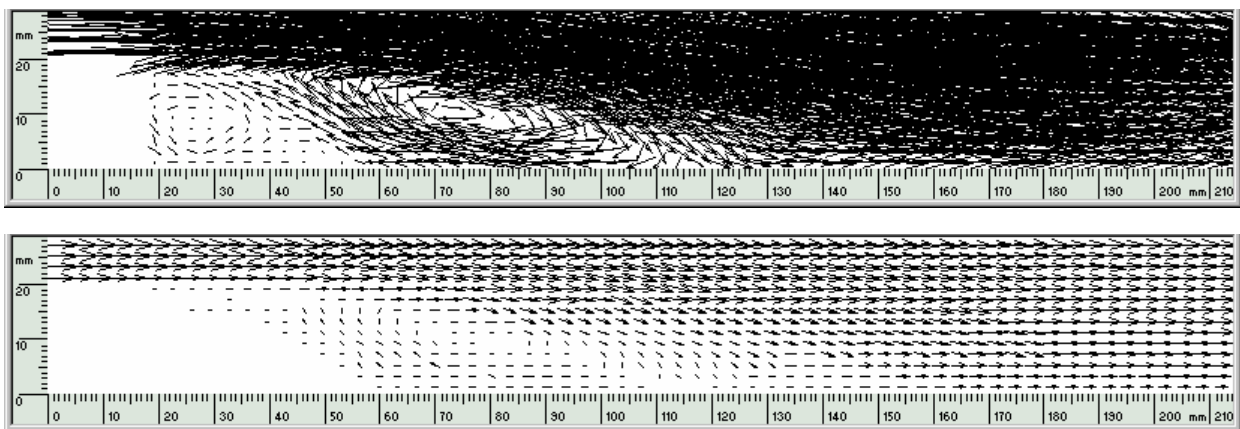
Obr.2 Celkový pohled na model při měření pomocí PIV



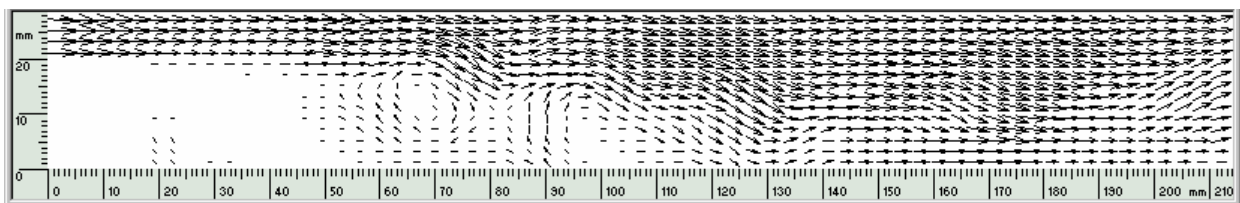
Obr.3 Rozložení podélné složky rychlosti 600 mm protiproudě před schodem



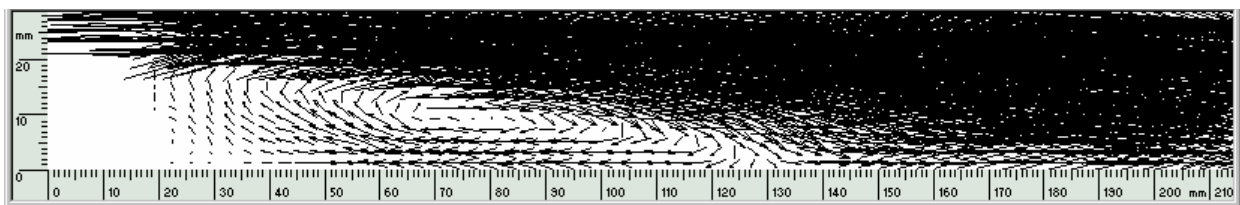
Obr.4 rozložení podélné složky rychlosti v různých vzdálenostech od stupně



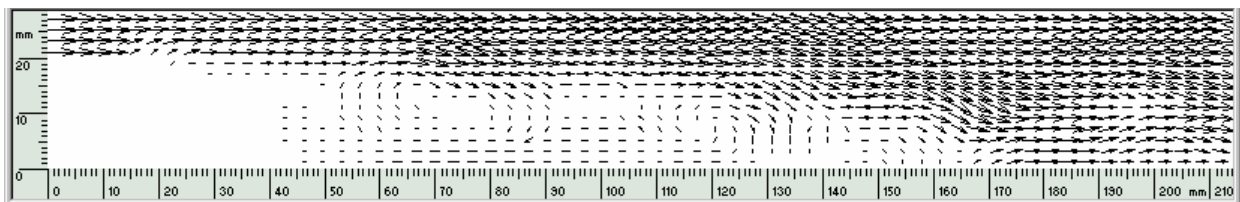
*Obr.5 Časově střední obraz odtržení proudu za stupněm – poměrná průřezová rychlost 0,25
(ve dvou různých měřítcích zobrazení vektorů)*



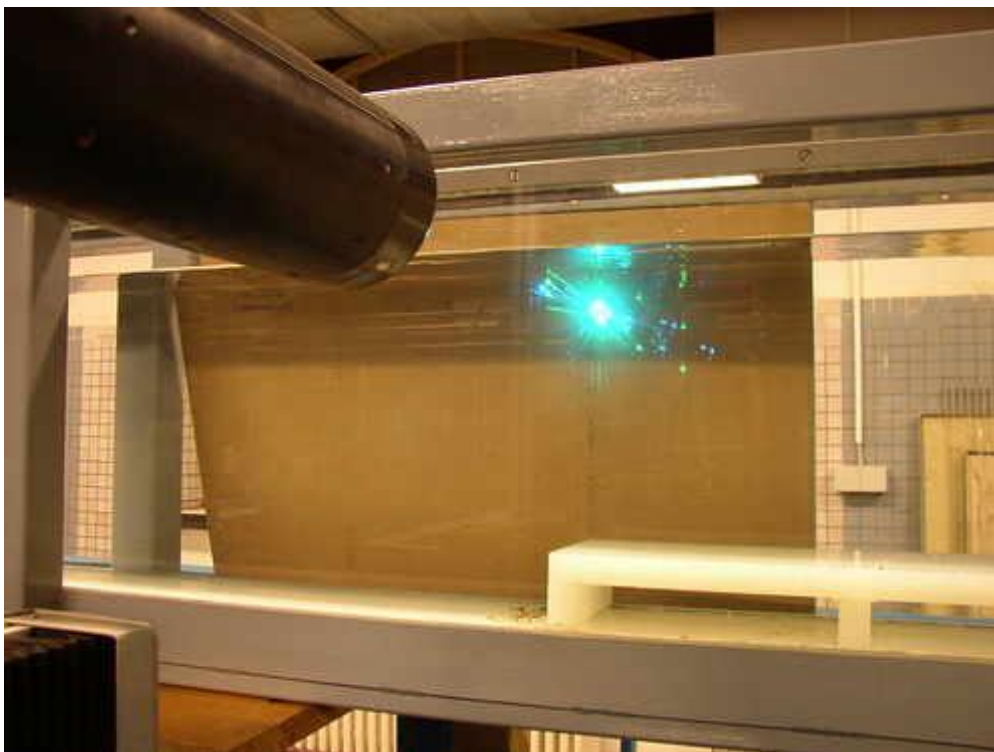
Obr.6 Jeden okamžitý stav odtržení proudu za stupněm – poměrná průřezová rychlost 0,25



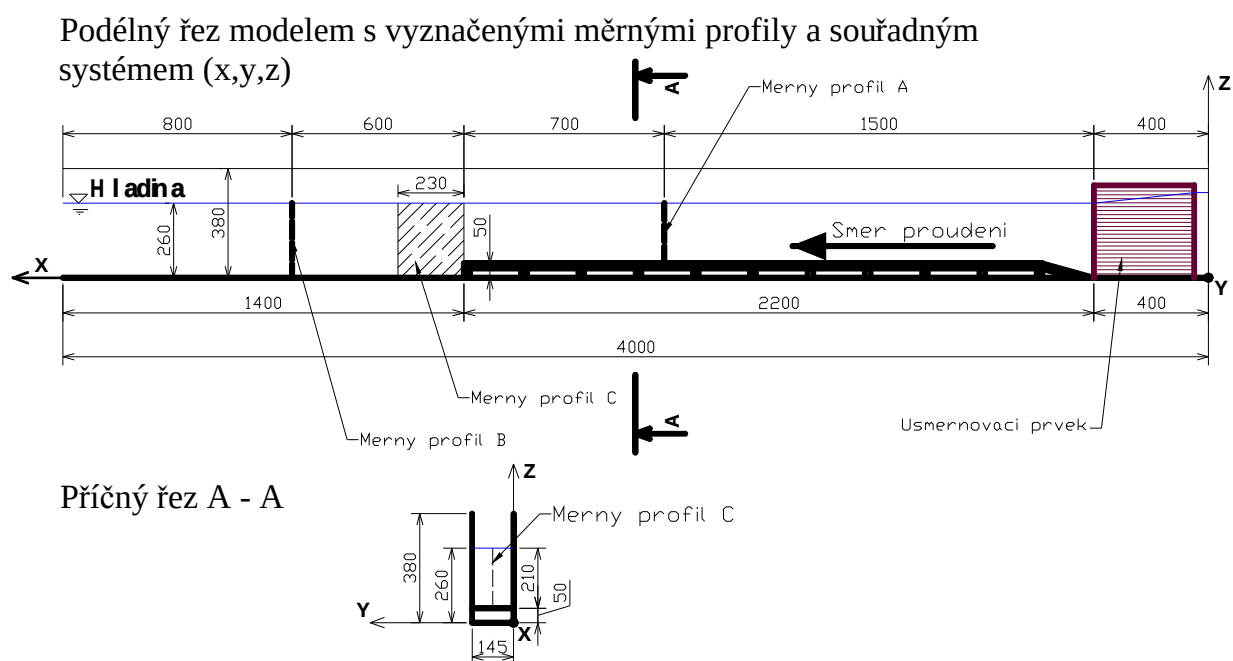
*Obr.7 Časově střední obraz odtržení proudu za stupněm – poměrná průřezová rychlost 1
(ve dvou různých měřítcích zobrazení vektorů)*



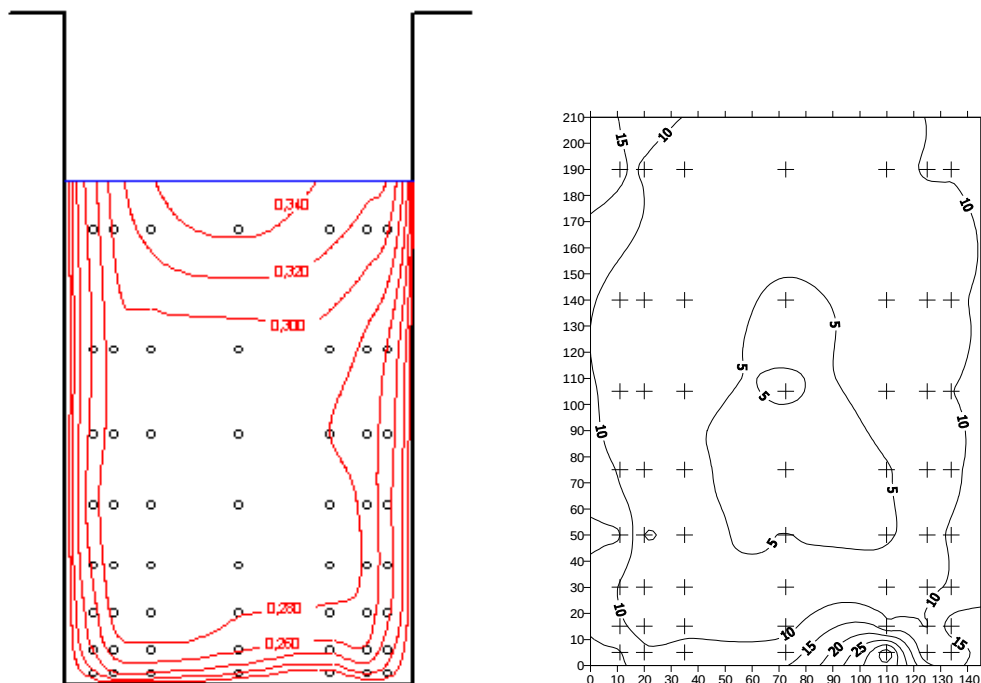
Obr.8 Jeden okamžitý stav odtržení proudu za stupněm – poměrná průřezová rychlost 1



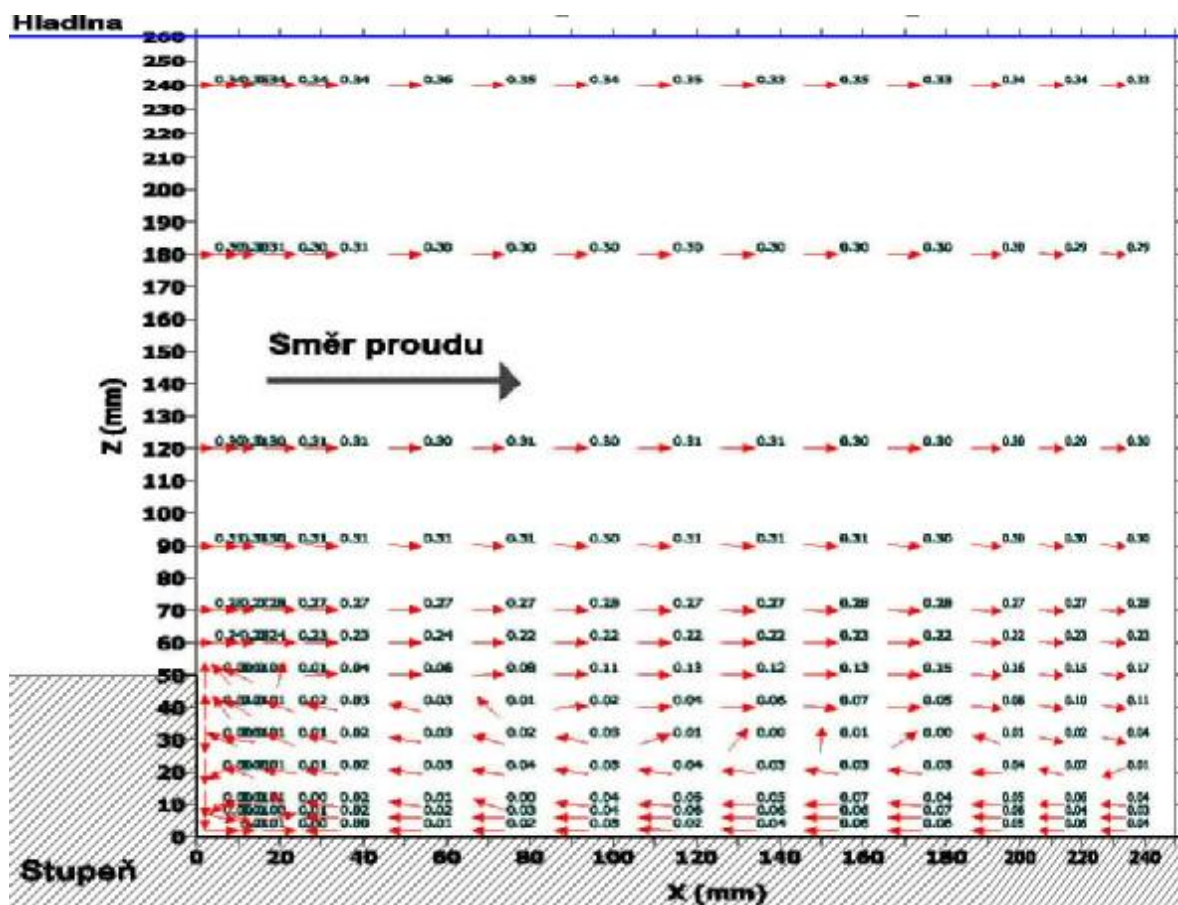
Obr. 9 Pohled na model při měření s LDA



Obr. 10 Schéma modelu (TU Dresden) proudění o volné hladině se záporným stupněm ve dně



Obr.11 Rozložení podélné složky rychlosti v měrném profilu A (m/s) a odpovídající rozložení intenzity turbulence (%); měřeno LDA



Obr.12 Struktura proudu v měrném profilu C; měřeno LDA. Z důvodu nepoměrného rozdílu mezi maximálními a minimálními velikostmi rychlostí znázorňují šipky na obrázku pouze směr proudění, velikost rychlosti je uvedena popiskem (m/s)