

## THE MEASUREMENT OF FLOW PARAMETERS IN SQUARE CROSS SECTION BEND

P. Zubík, J. Šulc

**Summary:** *The article deals with measurement of flow parameters in defined 90° bend profiles of square constant cross section and it's linking upstream and downstream straight axis sections. For the measurement of mean and pulsation velocity components the contact-less measuring technique was used, such as Laser Doppler Anemometry (LDA) and Particle Image Velocimetry (PIV). Complementary the values of pressure in selected piezometric points on the canal walls were measured. The measurement was carried out in seven different flow regimes. The results of this detailed measurement in selected relatively simple element are used for subsequent calibration and verification of mathematical models with appropriate type of turbulence.*

### 1. Úvod

Součástí prvního roku výzkumného projektu podporovaného Grantovou agenturou České republiky „Měření struktury proudu k verifikaci matematického modelu ve vybraných hydraulických prvcích s možností jejich tvarové optimalizace“ reg. č.: 103/02/0545 byl experiment na kanálovém oblouku čtvercového průřezu. Jak je z názvu výzkumného úkolu zřejmé, účelem experimentu bylo získat vstupní a ověřovací data pro odladění matematických modelů realizovaných na dvou spoluřešitelských pracovištích. Pro daný účel bylo nutno zhotovit hydraulický okruh s průhledným modelem předmětného oblouku včetně vstupního a výstupního úseku. K měření byly použity tři metody: rovinná laserová anemometrie (Particle Image Velocimetry (PIV)) – měření rozložení rychlostí ve zvolených dvourozměrných řezech, bodová laserová anemometrie (Laser Doppler Anemometry (LDA)) – měření turbulence rychlosti ve zvolených bodech a měření tlakových poměrů ve zvolených řezech tlakovými odběry ve stěnách modelu. Všechna použitá měřicí technika je v majetku Laboratoře vodohospodářského výzkumu (LVV) Ústavu vodních staveb Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně.

### 2. Stavba modelu

V prostorách LVV bylo k existující zásobní nádrži připojeno nově zakoupené čerpadlo ( $Q_{\max} = 120$  l/s při  $H = 7$  m) řízené frekvenčním měničem. Vzhledem k záměru použít pro měření rychlostí bezkontaktní optické metody, byly pro výrobu modelu oblouku s protiproudním a poproudním kanálem zvoleny materiály a technologie zajišťující úplnou průhlednost téměř celého modelu. Požadavek úplné průhlednosti modelu kladl také mimořádné nároky na kvalitu práce řemeslníků. Rozměry modelu jsou uvedeny ve schématu na obr. 1. Celkový pohled na model je na obr. 2.

---

Ing. Pavel Zubík, Ph.D., Doc. Ing. Jan Šulc, CSc.: Ústav vodních staveb, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně; Veveří 95, 662 37 Brno; tel.: 541 147 286 , fax: 541 147 288; e-mail: Zubik.P@fce.vutbr.cz, Sulc.J@fce.vutbr.cz.

Proces získávání informací pro vstupní okrajovou podmínku a ověření matematického modelu probíhal z technologických a organizačních důvodů v jiném pořadí než je v logickém členění uvedeno v dalším textu. Celkový přehled provedených měření je uveden v tabulkách. Schémata rozmístění PIV měrných rovin jsou na obr. 3, LDA měrných bodů na obr. 4 a tlakových odběrů na obr. 5.

### 3. Měření parametrů vstupního pole

Ve vzdálenosti 1500 mm protiproudě před vstupem do oblouku byl zvolen řez pro měření parametrů vstupního pole. Metodou PIV bylo provedeno 11 sérií měření (obr. 2 a 7), v tabulce označené pořadovým číslem 26 až 36. Následným zpracováním byl získán časově střední obraz rozložení podélné složky rychlosti napříč celým kanálem (obr. 6). Střední (průřezová) rychlost tohoto rychlostního profilu činí 2,0 m/s a pro účely porovnání s jinými nastavovanými režimy proudění ve zkušebním hydraulickém okruhu je označena jako „poměrná průřezová rychlost = 1“.

Na základě požadavku podrobnějšího studia časového vývoje rychlostního profilu při různých průtocích byla provedena měření č. 37 až 39. Byl prokázán pouze „turbulentní“ charakter rozptylu okamžitých hodnot rychlostí v prostorově sousedících bodech, viz obr. 8.

Ve stejném profilu bylo ve zvolené síti dvanácti měrných bodů (obr. 4) provedeno měření metodou LDA (pořadové číslo 52 až 58), (obr. 9). V každém měrném bodě byla měřena podélná a svislá složka rychlosti a to maximálně možným tempem několika set dat za sekundu. Skutečné tempo je závislé na mnoha faktorech, jako například optické vlastnosti modelu v daném místě, četnost a tvar odrazných částic a nastavení pásmových propustí měřicí aparatury. Ze zachycených signálů je možno získat, pro matematický model, důležitou informaci o charakteru turbulence v daném místě.

### 4. Měření sekundárního proudění

PIV je metoda měření schopná zaznamenat okamžité rozložení průmětů rychlostí do měrné roviny. Pokud je měrná rovina umístěna kolmo na hlavní směr proudění (v daném případě je samozřejmě hlavní směr proudění ve směru hlavní osy kanálu) jsou zaznamenávány pouze relativně malé, ale pro verifikaci významné, složky rychlosti proudění. Tato úloha je pro PIV mnohem náročnější než měření dominantní složky rychlosti. Z dosažených výsledků je zřejmé, že byla zvládnuta dobře, příklad je na obr. 10. Měření tohoto typu jsou v tabulce poř. č. 1 až 18 a na obr. 11. Měřeno bylo v několika rovinách protiproudě před obloukem, uvnitř oblouku a poproudě za obloukem. Rychlostní pole před obloukem vykazovala skutečně velmi nízké hodnoty sekundárních rychlostí, avšak naprosto zřetelně potvrdila protiproudění ovlivnění rychlostních profilů obloukem. Největší sekundární rychlosti těsně za obloukem naopak vykazují značné hodnoty přibližně poloviny průřezové rychlosti a zachovávají si velmi významné hodnoty i ve vzdálenosti čtyř násobku šířky kanálu.

### 5. Měření v oblasti odtržení

Pro verifikaci matematického modelu je obzvláště zajímavá oblast kde dochází k odtržení proudu od stěny tedy kolem vnitřní boční stěny oblouku. V této oblasti bylo v době prvních testovacích měření zaznamenáno jedno z nejnázornějších rychlostních polí, časově střední obraz je na obr. 12. Jak je uvedeno v tabulce u měření s číslem 1, jde o měření ve svislé rovině těsně vedle vnitřní boční stěny kanálu. Chybějící vektory ve střední části pole jsou způsobeny rozzářením spoje materiálu stěny v těsné blízkosti laserové světelné roviny, spoj se nachází 100 mm poproudě za výstupem z oblouku. Pro získání celkového obrazu

o této oblasti byla nejprve měřena rychlostní pole přes celou šíři kanálu (poř. č. 19 až 25) a to v sedmi rovinách rovnoběžných se dnem kanálu.

Po prvním subjektivním zhodnocení získaných výsledků celým řešitelským kolektivem bylo rozhodnuto o provedení detailnějšího měření této a navazující oblasti při několika různých průtocích (poř. č. 40 až 51). Příklad jednoho časově středního obrazu rychlostního pole (poř. č. 40) je na obr. 13. U všech rychlostních polí za odtržením je možno pozorovat poměrně značné rozdíly mezi časově středními a jednotlivými okamžitými stavy rychlostního pole.

## 6. Závěr

Bezkontaktní měření středních a pulzačních složek rychlostí proudu včetně zobrazení časového vývoje úplných rychlostních polí v definovaných profilech hydraulického okruhu s obloukem pravoúhlého průřezu umožnilo detailní analýzu struktury proudu. Rychlostní parametry (bodové i integrální) byly doplněny pro uzavření celkové energetické bilance měřeními tlaky ve vybraných piezometrických odběrech stěn kanálu. Měření byla provedena při různých rychlostních poměrech ( $Re$ ).

Výsledky slouží ke kalibraci a verifikaci numerických postupů a nalezení vhodného modelu turbulence. Podrobnosti jsou v příspěvcích J. Příhody a M. Sedláře PREDICTION OF TURBULENT FLOW IN A CURVED CHANNEL USING VARIOUS TURBULENCE MODELS a P. Rudolfa FLOW ANALYSIS IN ELBOW OF SQUARE CROSS-SECTION.

Shodná měření parametrů a struktury proudu pro kalibrační a verifikační účely matematických modelů odlišných vybraných protékaných hydraulických tlakových prvků i s volnou hladinou budou prováděna s podporou GAČR také v letošním a následujícím roce.

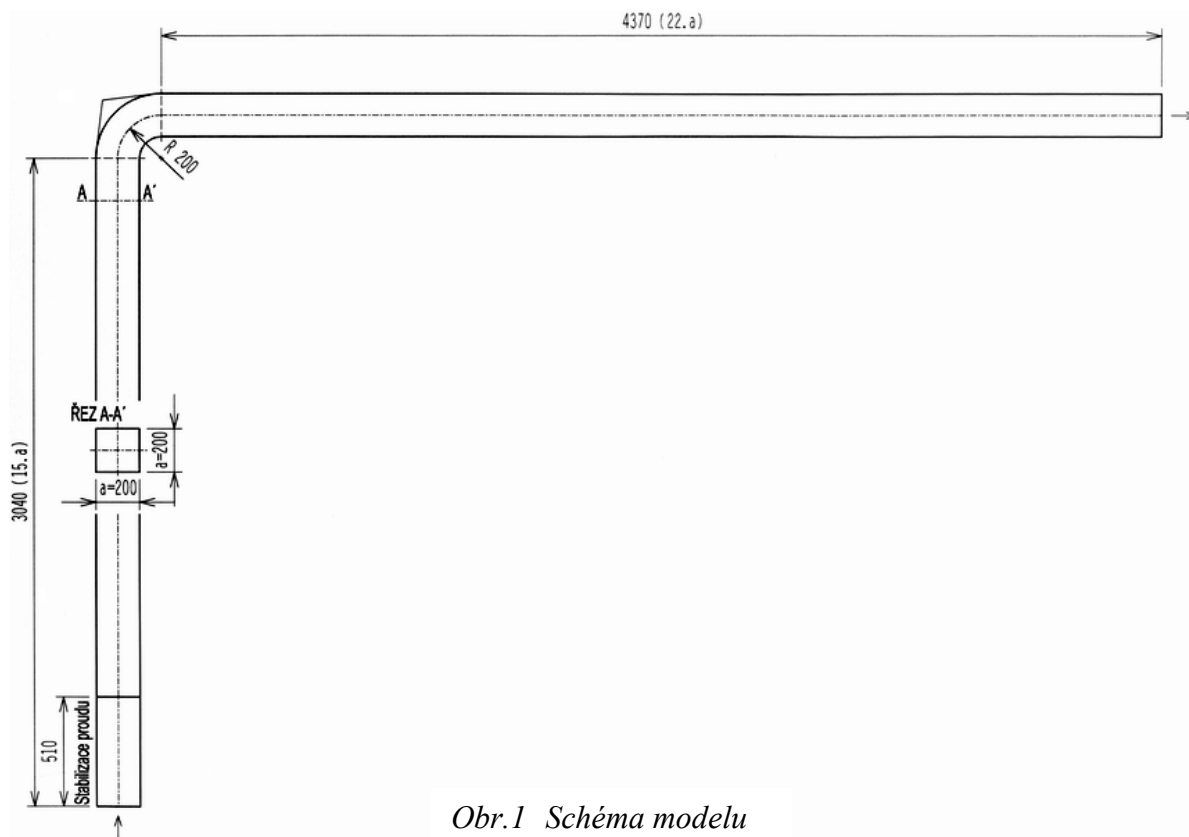
Tabulka 1

PIV měření (vždy série 30 až 50 okamžitých stavů rychlostního pole s periodou 0,25 s)						
Poř. č.	Nastavená frekvence pohonu čerpadla	Poměrná průřezová rychlost	Orientace měrné roviny	Poloha měrné roviny		Poznámka
1	35 Hz	1	svislá	výstup z oblouku	2 mm od boční stěny	celý průřez kanálu
2	35 Hz	1	svislá	před obloukem	-10 mm od vstupu	celý průřez kanálu
3	35 Hz	1	svislá	před obloukem	50 mm od vstupu	celý průřez kanálu
4	35 Hz	1	svislá	před obloukem	65 mm od vstupu	celý průřez kanálu
5	35 Hz	1	svislá	před obloukem	100 mm od vstupu	celý průřez kanálu
6	35 Hz	1	svislá	před obloukem	200 mm od vstupu	celý průřez kanálu
7	35 Hz	1	svislá	před obloukem	400 mm od vstupu	celý průřez kanálu
8	35 Hz	1	svislá	uvnitř oblouku	23° od vstupu	celý průřez kanálu
9	35 Hz	1	svislá	uvnitř oblouku	45° od vstupu	celý průřez kanálu
10	35 Hz	1	svislá	uvnitř oblouku	68° od vstupu	celý průřez kanálu
11	35 Hz	1	svislá	za obloukem	-20 mm od výstupu	celý průřez kanálu
12	35 Hz	1	svislá	za obloukem	0 mm od výstupu	celý průřez kanálu
13	35 Hz	1	svislá	za obloukem	20 mm od výstupu	celý průřez kanálu
14	35 Hz	1	svislá	za obloukem	50 mm od výstupu	celý průřez kanálu
15	35 Hz	1	svislá	za obloukem	110 mm od výstupu	celý průřez kanálu
16	35 Hz	1	svislá	za obloukem	200 mm od výstupu	celý průřez kanálu
17	35 Hz	1	svislá	za obloukem	400 mm od výstupu	celý průřez kanálu
18	35 Hz	1	svislá	za obloukem	800 mm od výstupu	celý průřez kanálu
19	35 Hz	1	vodorovná	výstup z oblouku	5 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
20	35 Hz	1	vodorovná	výstup z oblouku	15 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
21	35 Hz	1	vodorovná	výstup z oblouku	50 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
22	35 Hz	1	vodorovná	výstup z oblouku	100 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
23	35 Hz	1	vodorovná	výstup z oblouku	150 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
24	35 Hz	1	vodorovná	výstup z oblouku	185 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
25	35 Hz	1	vodorovná	výstup z oblouku	195 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
26	35 Hz	1	vodorovná	1500 mm před ob.	5 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
27	35 Hz	1	vodorovná	1500 mm před ob.	20 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu

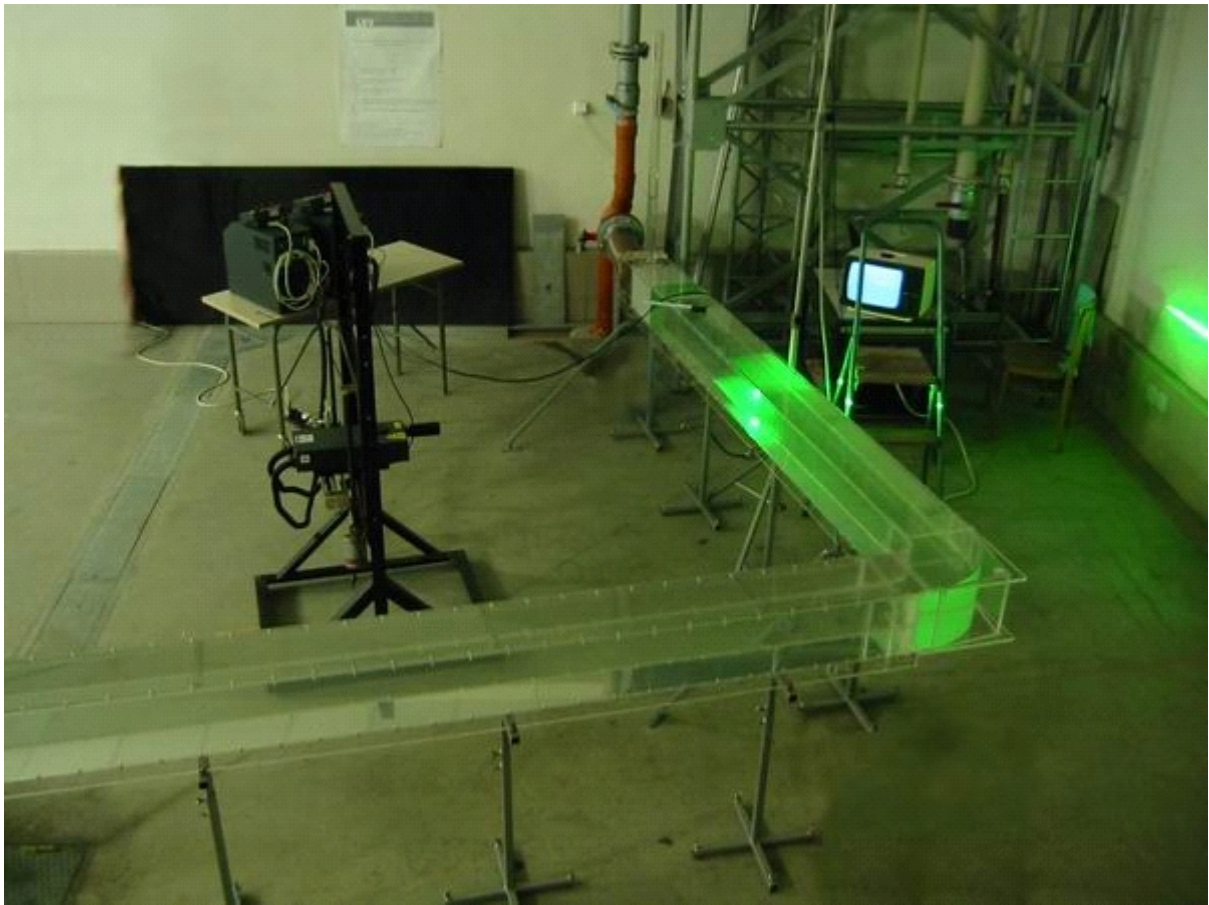
28	35 Hz	1	vodorovná	1500 mm před ob.	40 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
29	35 Hz	1	vodorovná	1500 mm před ob.	60 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
30	35 Hz	1	vodorovná	1500 mm před ob.	80 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
31	35 Hz	1	vodorovná	1500 mm před ob.	100 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
32	35 Hz	1	vodorovná	1500 mm před ob.	120 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
33	35 Hz	1	vodorovná	1500 mm před ob.	140 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
34	35 Hz	1	vodorovná	1500 mm před ob.	160 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
35	35 Hz	1	vodorovná	1500 mm před ob.	180 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
36	35 Hz	1	vodorovná	1500 mm před ob.	195 mm od dna kanálu	celý průřez kanálu
37	35 Hz	1	vodorovná	1500 mm před ob.	100 mm od dna kanálu	polovina průřezu
38	20 Hz	0,49	vodorovná	1500 mm před ob.	100 mm od dna kanálu	polovina průřezu
39	14 Hz	0,07	vodorovná	1500 mm před ob.	100 mm od dna kanálu	polovina průřezu
40	14 Hz	0,07	vodorovná	uvnitř oblouku	100 mm od dna kanálu	detail odtržení
41	16 Hz	0,28	vodorovná	uvnitř oblouku	100 mm od dna kanálu	detail odtržení
42	20 Hz	0,49	vodorovná	uvnitř oblouku	100 mm od dna kanálu	detail odtržení
43	25 Hz	0,68	vodorovná	uvnitř oblouku	100 mm od dna kanálu	detail odtržení
44	30 Hz	0,84	vodorovná	uvnitř oblouku	100 mm od dna kanálu	detail odtržení
45	35 Hz	1	vodorovná	uvnitř oblouku	100 mm od dna kanálu	detail odtržení
46	40 Hz	1,15	vodorovná	uvnitř oblouku	100 mm od dna kanálu	detail odtržení
47	16 Hz	0,28	vodorovná	za obloukem	100 mm od dna kanálu	detail za odtržením
48	20 Hz	0,49	vodorovná	za obloukem	100 mm od dna kanálu	detail za odtržením
49	30 Hz	0,84	vodorovná	za obloukem	100 mm od dna kanálu	detail za odtržením
50	35 Hz	1	vodorovná	za obloukem	100 mm od dna kanálu	detail za odtržením
51	40 Hz	1,15	vodorovná	za obloukem	100 mm od dna kanálu	detail za odtržením

Tabulka 2

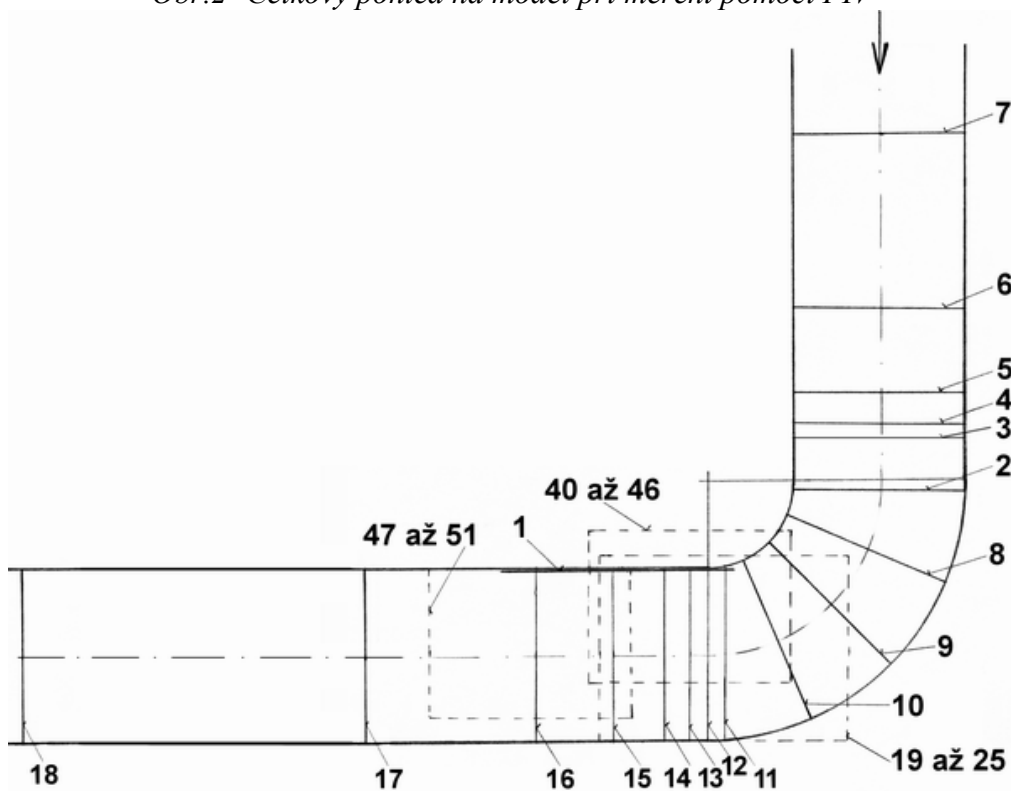
LDA měření (vždy časová řada 20 000 hodnot rychlostí naměřených v každém bodu zvolené sítě)				
Poř. č.	Nastavená frekvence pohonu čerpadla	Poměrná průřezová rychlost	Poloha měrné roviny	Poznámka
52	14 Hz	0,07	1500 mm před ob.	polovina průřezu
53	16 Hz	0,28	1500 mm před ob.	polovina průřezu
54	20 Hz	0,49	1500 mm před ob.	polovina průřezu
55	25 Hz	0,68	1500 mm před ob.	polovina průřezu
56	30 Hz	0,84	1500 mm před ob.	polovina průřezu
57	35 Hz	1	1500 mm před ob.	polovina průřezu
58	40 Hz	1,15	1500 mm před ob.	polovina průřezu



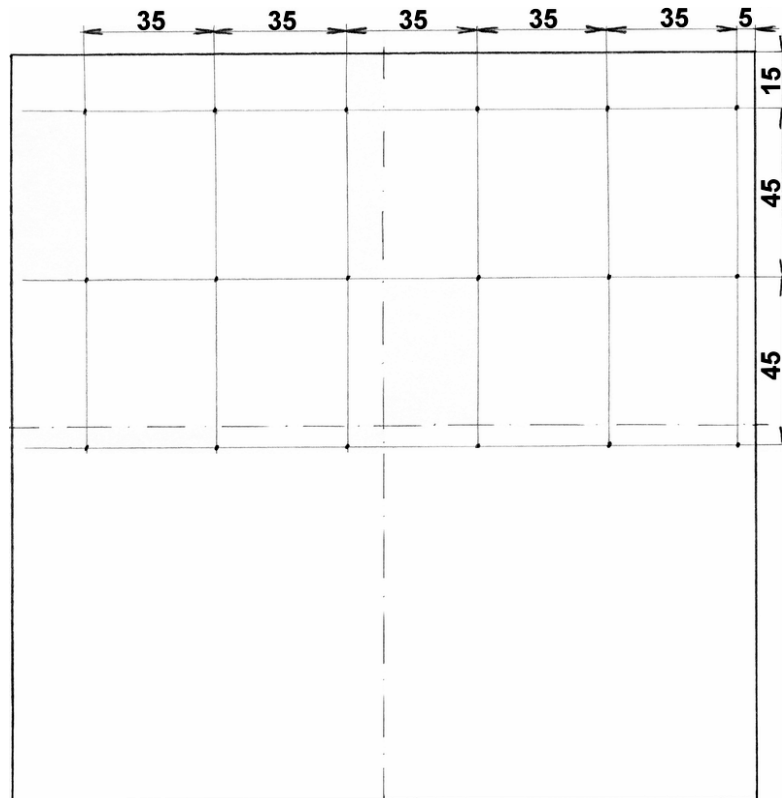
Obr.1 Schéma modelu



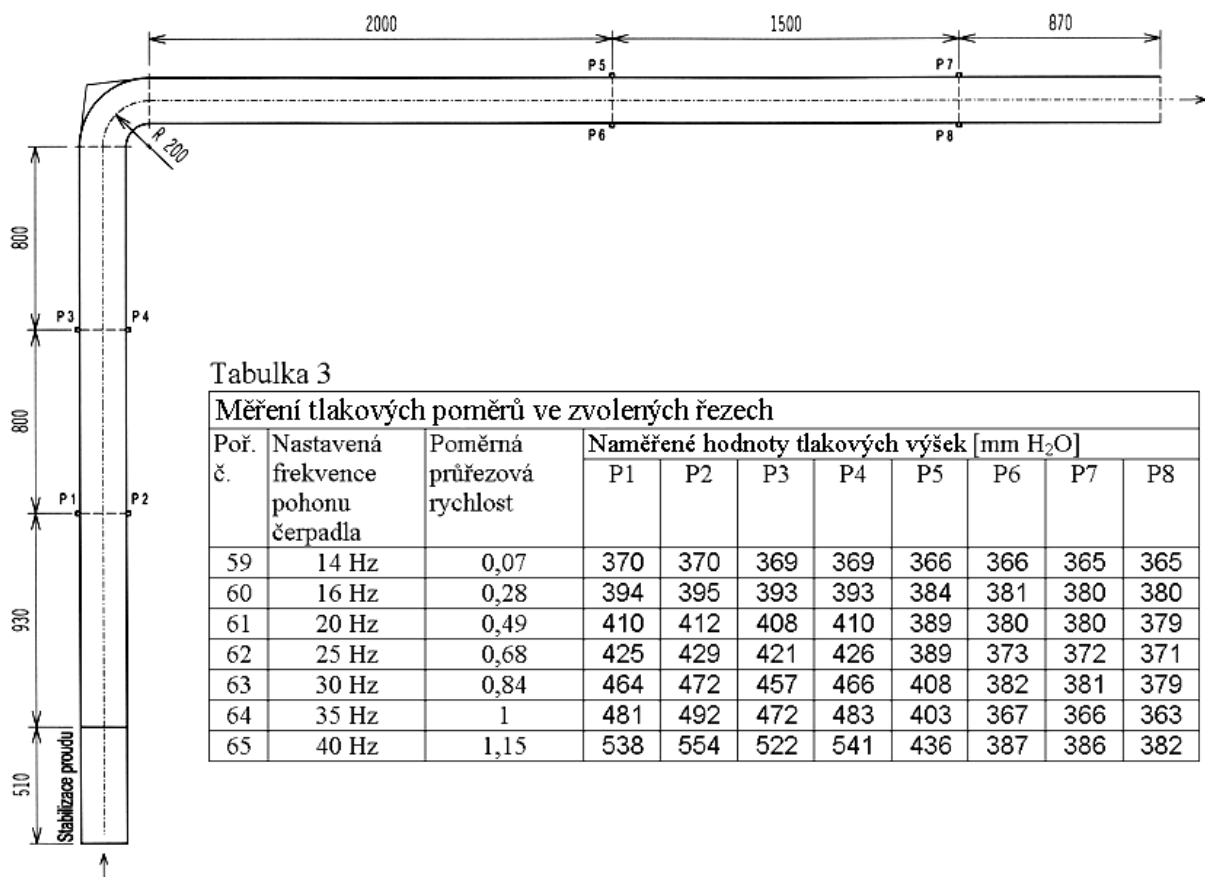
Obr.2 Celkový pohled na model při měření pomocí PIV



Obr.3 Schéma rozmístění PIV měrných řezů



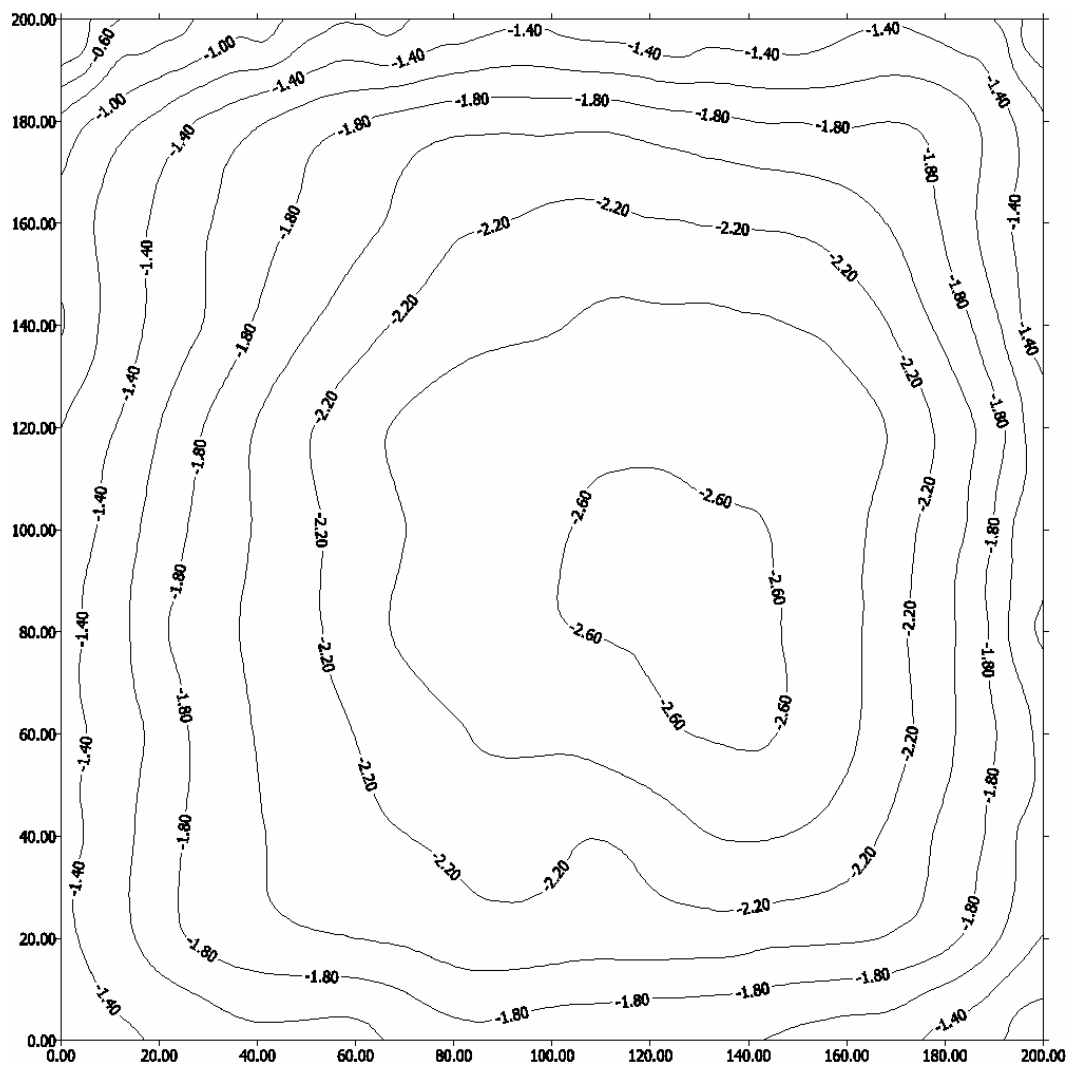
Obr.4 Schéma rozmístění LDA měrných bodů



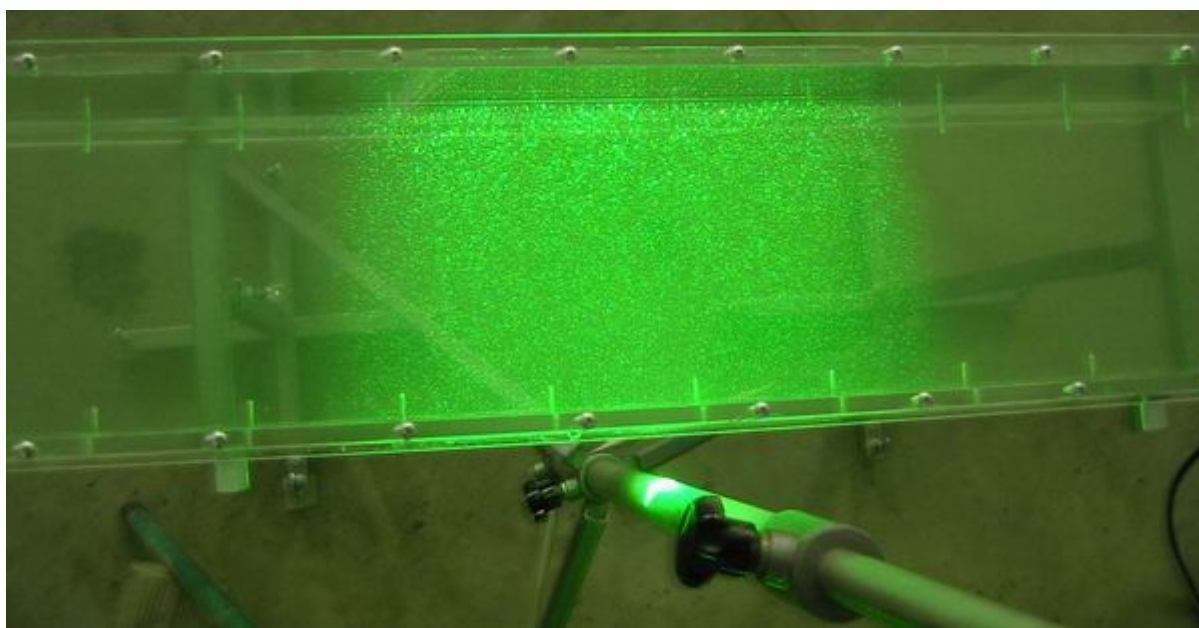
Tabulka 3

Měření tlakových poměrů ve zvolených řezech		Naměřené hodnoty tlakových výšek [mm H <sub>2</sub> O]								
Poř. č.	Nastavená frekvence pohonu čerpadla	Poměrná průřezová rychlost	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
59	14 Hz	0,07	370	370	369	369	366	366	365	365
60	16 Hz	0,28	394	395	393	393	384	381	380	380
61	20 Hz	0,49	410	412	408	410	389	380	380	379
62	25 Hz	0,68	425	429	421	426	389	373	372	371
63	30 Hz	0,84	464	472	457	466	408	382	381	379
64	35 Hz	1	481	492	472	483	403	367	366	363
65	40 Hz	1,15	538	554	522	541	436	387	386	382

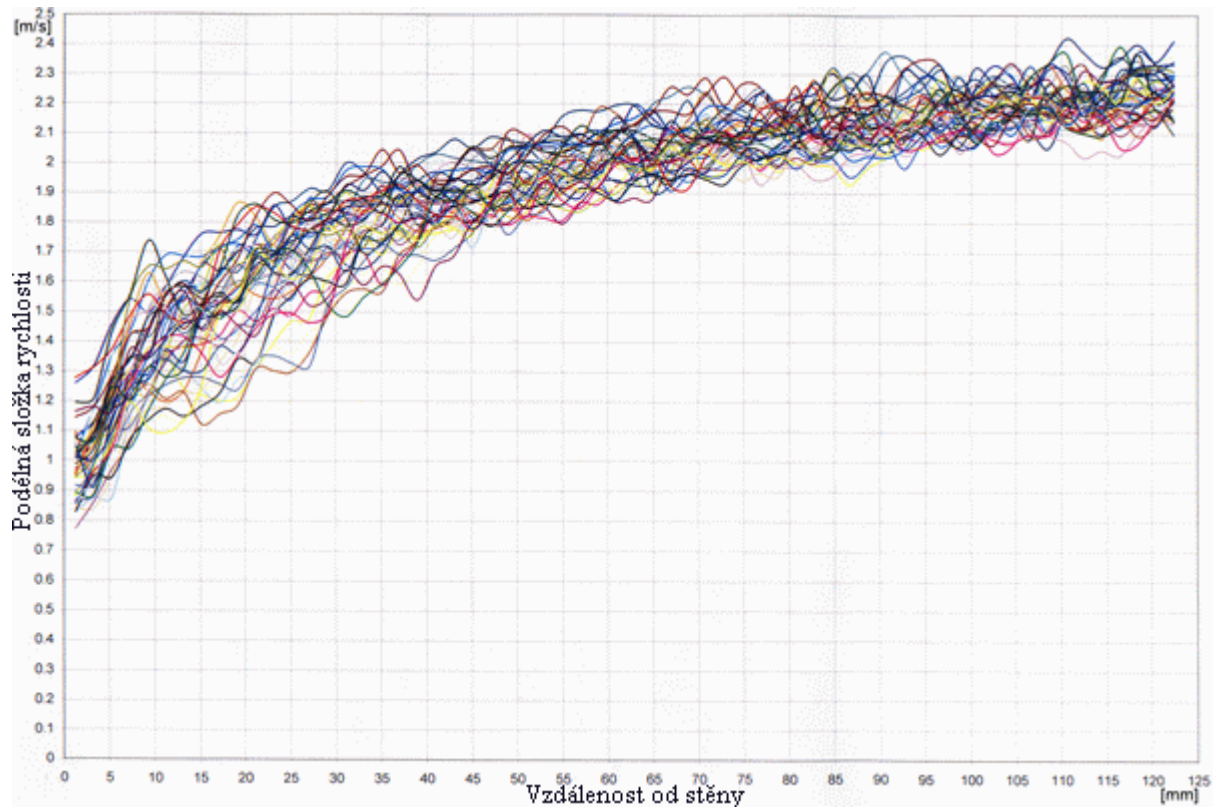
Obr.5 Schéma rozmístění tlakových odběrů



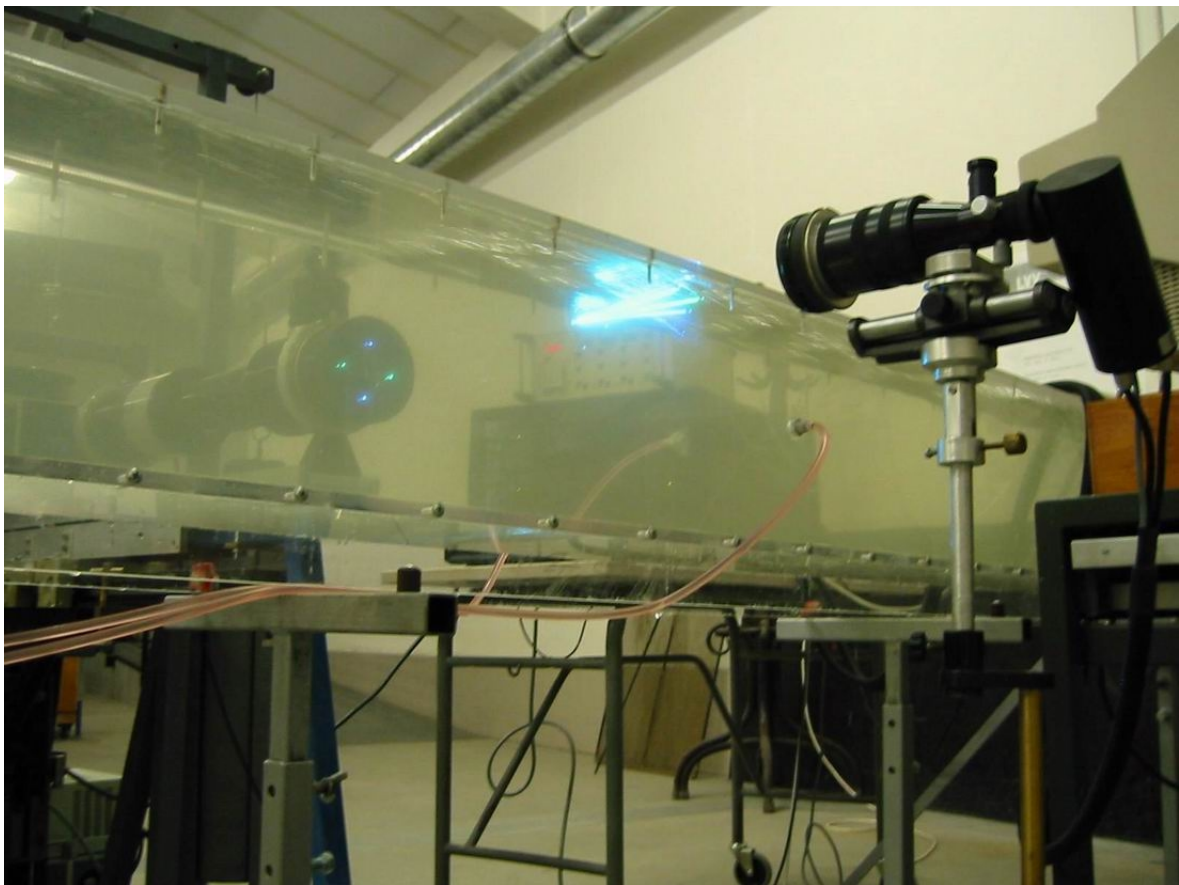
Obr.6 Rozložení podélné složky rychlosti 1500 mm protiproudě před obloukem



Obr.7 Osvit unášených částic v jednom měrném řezu

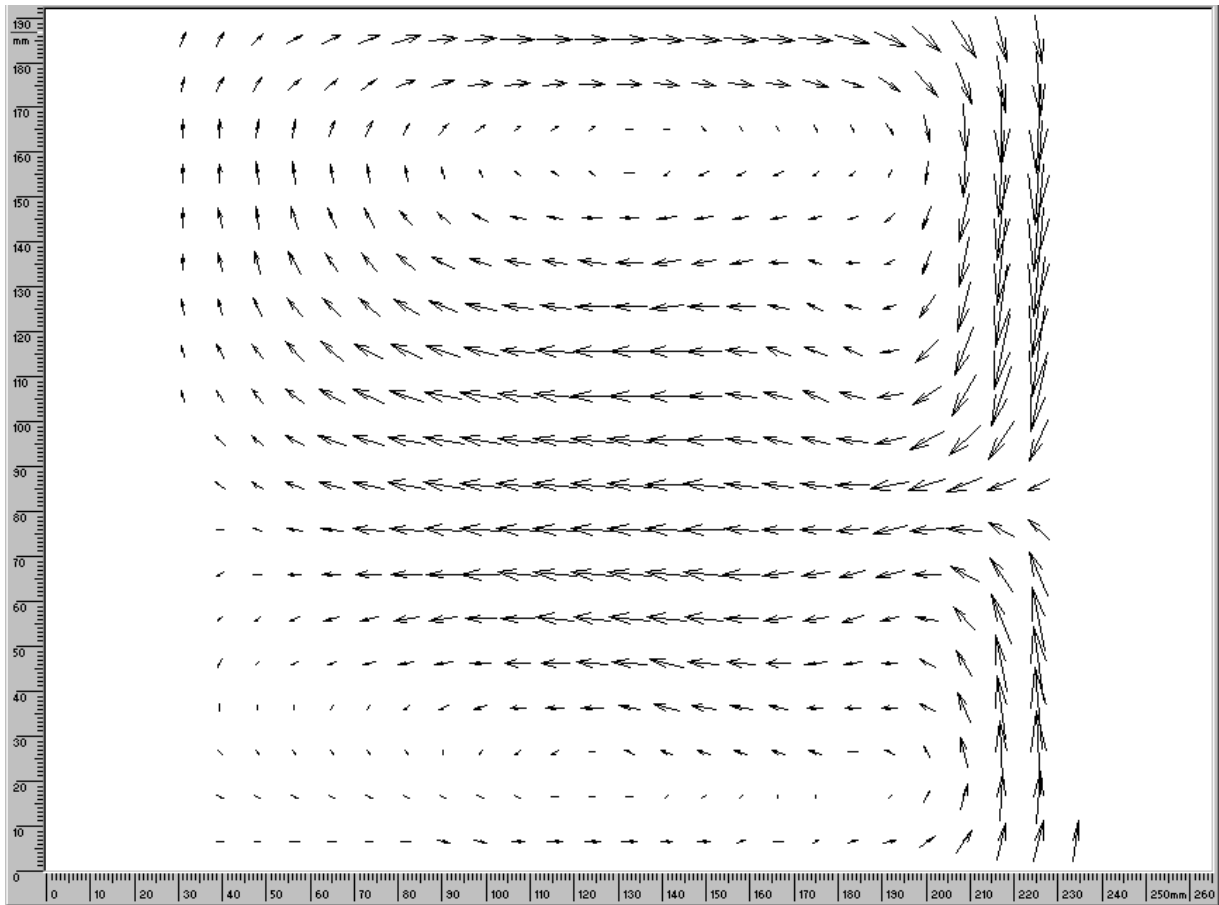


Obr.8 Okamžité rychlostní profily ve vstupním řezu

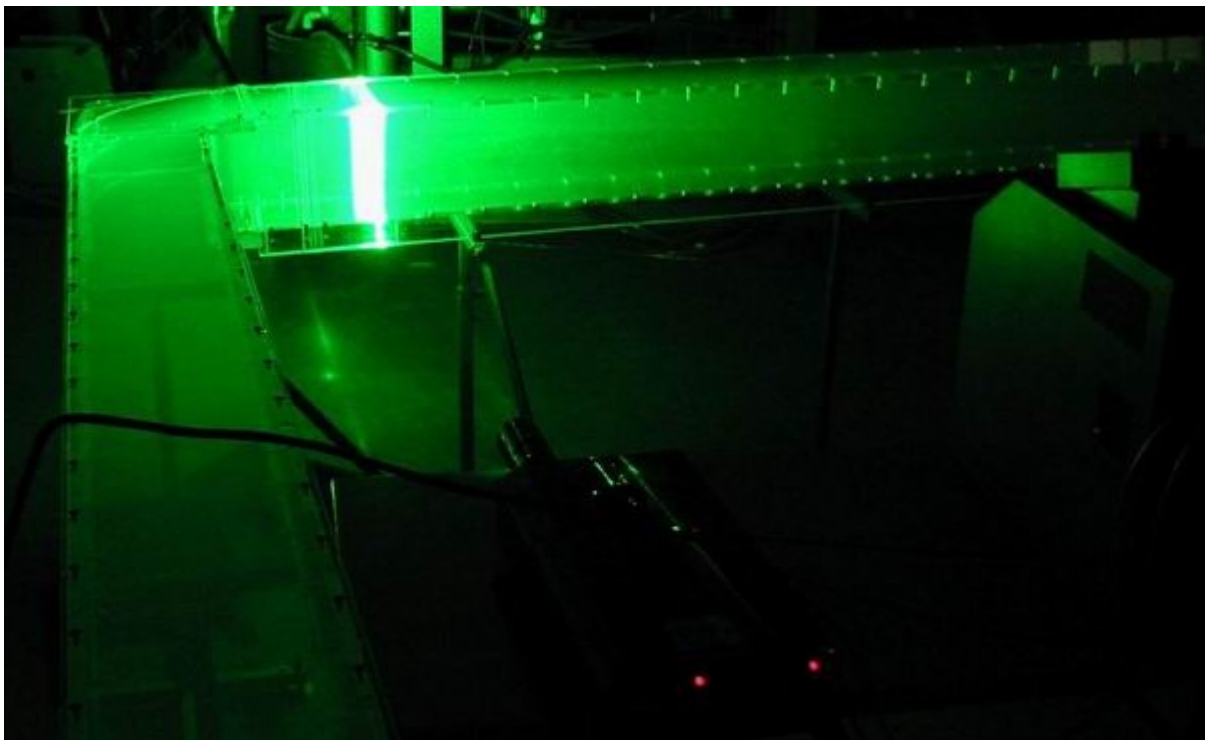


Obr.9 Měření fluktuací rychlosti pomocí LDA

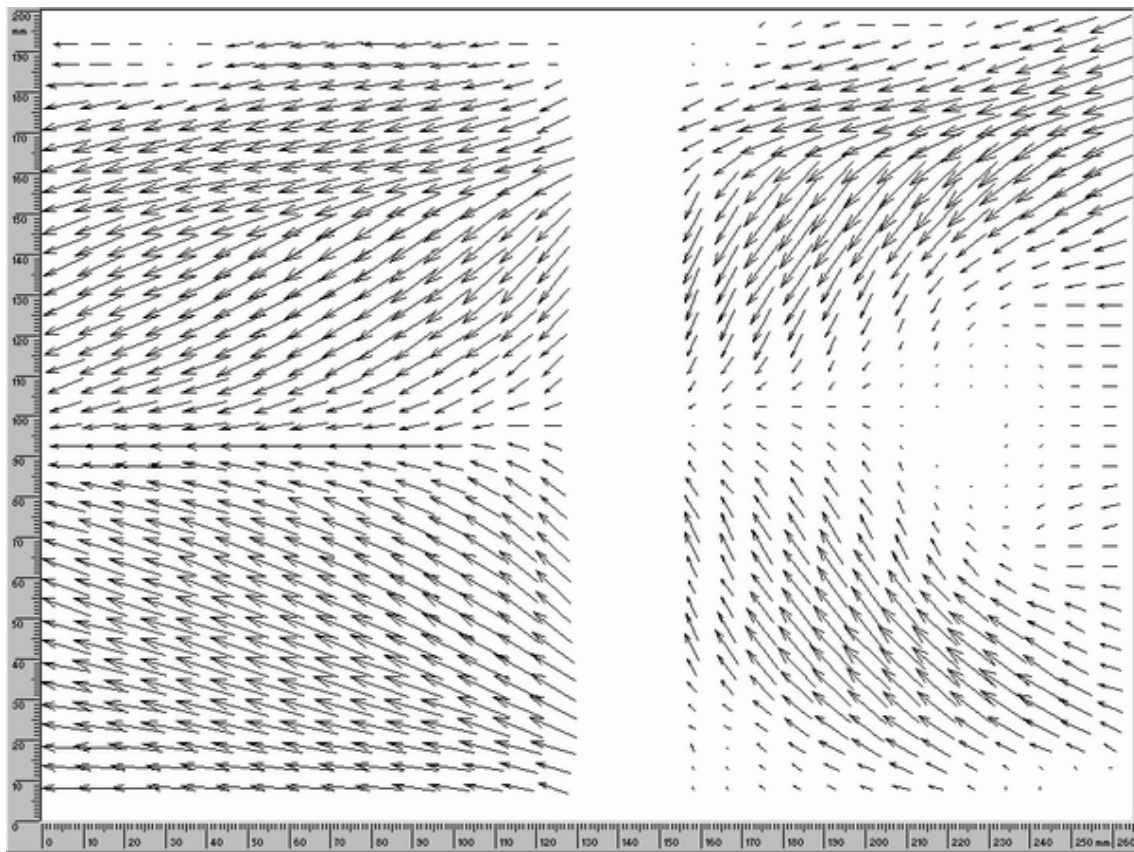




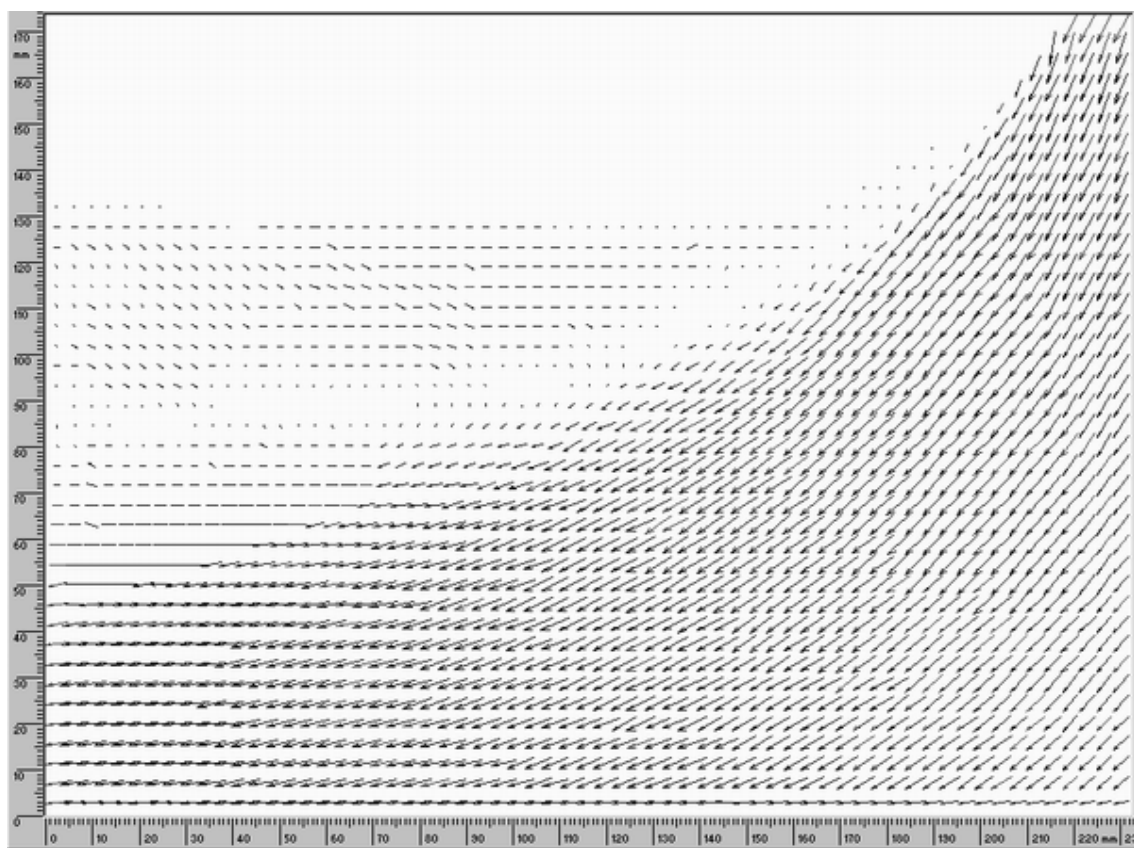
*Obr.10 Sekundární rychlosti 110 mm za obloukem*



*Obr.11 Měření sekundárních rychlostí za obloukem*



Obr.12 Průměty složek rychlosti do svislé roviny podél vnitřní stěny těsně za obloukem



Obr.13 Detail odtržení proudu od stěny