PIV MEASURING INSIDE DRAFT TUBE OF MODEL WATER TURBINE
PIV MĚŘENÍ V SAVCE MODELOVÉ VODNÍ TURBÍNY

Pavel ZUBÍK

Abstrakt

Příklad použití bezkontaktní měřicí metody – rovinné laserové anemometrie (Particle Image Velocimetry - PIV) pro stanovení rozložení rychlostí proudění vody v poměrně velkém prostoru s obtížnými optickými podmínkami.

1. Úvod

Pro firmu ČKD Blansko Engineering, a. s. bylo v laboratoři Hydraulic Research Center Blansko, s.r.o. provedeno měření rozložení rychlostí v savce modelové vodní turbíny. Dodavatelem měření byl Ústav vodních staveb (ÚVS) Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně. Cílem experimentu bylo získat verifikační data pro výpočtové modelování proudění při vývoji vodní turbíny. Následující text stručně popisuje řešení daného úkolu.

K měření použitá rovinná laserová anemometrie (Particle Image Velocimetry (PIV)) posloužila ke stanovení rozložení podélné složky rychlostí proudění vody v profilu napříč savkou turbíny, jejíž hydraulické parametry poměrně významně ovlivňují celkovou účinnost vodní turbíny.

2. Měřený model

Při vývoji konkrétní objednané turbíny pro velké vodní dílo je obvyklé před její výrobou podrobit na zkušebně velmi rozsáhlému měření parametrů modelovou verzi. Tyto zmenšené - modelové turbíny jsou však (vzhledem ke značným rozměrům skutečné připravované turbíny) poměrně velké, plně funkční vodní stroje s rozměry v řádu jednotek metrů a výkony několika stovek kilowat (obr. 1).

U většiny typů vodních turbín následuje za výstupem z oběžného kola pozvolný difuzor – savka turbíny. U strojů s vertikální osou je z dispozičních důvodů savka zahnuta o přibližně 90°, tento ohyb tvoří kolenovou část savky (nebo koleno savky).

3. Volba měřicí metody

Po zvážení potřeb verifikace matematického modelu a podmínek přístupnosti do protékaného prostoru byl pro měření vybrán příčný profil těsně za kolenovou částí savky (obr. 2). Doposud byla pro obdobná měření při mnohaleté spolupráci ČKD Blansko Engineering a ÚVS používána Laserová dopplerovská anemometrie (LDA). Vzhledem k zcela nevyhovujícím optickým podmínkám pro LDA byla poprvé zvolena PIV metoda.

Využití PIV je v tomto případě poněkud netypické. Běžně je PIV metoda používána pro zjišťování směrových a velikostních (a případně časových) souvislostí mezi průměty vektorů rychlosti do měrné roviny. V tomto případě byly měřeny poměrně úzké pásy v proudovém poli a při jejich vyhodnocení bylo hlavní úsilí zaměřeno na získání jedné řady vektorů reprezentující rozložení podélné složky rychlosti od dna po strop kanálu – jedné svislice, podobně jako při použití LDA. V měrném profilu - napříč savkou bylo zvoleno 8 PIV měrných rovin jak naznačuje schéma na obr. 3 a 4.

Ing. Pavel Zubík, Ph.D.: Ústav vodních staveb, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně; Veveří 331/95, 602 00 Brno; tel.: 541 147 296, fax: 541 147 288; zubik.p@fce.vutbr.cz

K měření byla použita souprava FlowMap od firmy Dantec. Toto zařízení je schopno měřit optickou bezkontaktní metodou rozložení průmětů rychlostí v dvourozměrném řezu proudící tekutinou. Souprava sestává z dvojice pulzních laserů, optických prvků pro vytváření a polohování laserové světelné roviny, speciální digitální kamery, synchronizačního a řídícího procesoru a počítače s měřicím softwarem.

4. Optické podmínky v měrném profilu

Relativně malá část savky byla zhotovena z plexiskla - vnější povrch s maximálně jednoduchými rovinnými plochami a vnitřní povrch kopírující poměrně komplikovaný tvar savky. Ve skutečnosti se jedná o hodně velký blok plexiskla (obr. 5, rozměry na obr. 3). Ojedinělost tak velkého plexisklového modelu byla patrně také příčinou, že dodavatel nebyl schopen vyrobit objekt v ideální optické kvalitě.

Protože montážní podmínky na zkušebně v podstatě vylučují možnost umístit do měrného profilu kalibrační terčíky po sestavení celé modelové turbíny, rozhodl jsem se provést kalibrační test alespoň odděleně na plexisklovém bloku ještě před montáží na zkušebně (obr. 6 a 7). Ten prokázal jednak očekávanou deformaci obrazu způsobenou zakřiveným rozhraním mezi vodou a vnitřním povrchem plexiskla v místě pohledu kamery na PIV měrnou rovinu, ale také ukázal, že tato deformace má poměrně malý vliv na velikost vyhodnocované podélné složky rychlosti v savce.

Druhý očekávatelný optický problém je velká tloušťka vrstvy vody se stopovacími částicemi mezi PIV měrnou rovinou a záznamovou kamerou skrz kterou musí projít optická informace. Následkem toho se výrazně snižuje poměr signál/šum a úspěšnost korelačního vyhodnocovacího procesu. V důsledku to znamená, že krajní PIV měrné roviny (1 a 8) byly měřitelné nejlépe a vnitřní PIV měrné roviny (4 a 5) byly měřitelné nejhůře.

Proti očekávání se ale objevil ještě třetí typ optického problému – lokální nerovnosti na vnitřním povrchu průhledného kusu savky způsobené nezkušeností pracovníků dodavatele plexisklového bloku.

Kombinace druhého a třetího výše zmíněného optického problému téměř znemožnila provést měření ve 4. PIV měrné rovině. Kvalifikovaný odhad hodnoty rozšířené nejistoty naměřených rychlostních parametrů, na hladině spolehlivosti 95 %, je menší než 15 % pro měrné řezy 1, 2, 3, 5, 6, 7 a 8. Pro měrný řez 4 je kvalifikovaný odhad hodnoty rozšířené nejistoty naměřených rychlostních parametrů na hladině spolehlivosti 95 % menší než 50 %.

Při aplikaci metody PIV je nutné, aby ve sledované proudící tekutině byly unášeny velmi malé stopovací částice. Zkušební hydraulický okruh má objem v řádu desítek m^3, vzhledem k potřebnému množství a ceně tedy nebylo možno uvažovat s použitím běžně dodávaných tříděných částic pro PIV. Bylo připraveno dostatečně velké množství sice netříděných ale levných částic získaných z odpadního prachu z výroby polystyrénu. Při prvních testech se však naštěstí (k velké radosti provozovatele zkušebny) ukázalo, že můžeme PIV měření provést i s částicemi přirozeně se vyskytující ve vodě okruhu zkušební stanice.

5. Postup měření a vyhodnocení

Celý postup byl opakovaně proveden pro 6 provozních bodů turbíny.

Optická soustava vytvářející laserovou světelnou rovinu a záznamová kamera byly opakovaně postupně ustavovány do potřebných poloh vůči zvoleným 8 PIV měrným rovinám.

V každé PIV měrné rovině bylo provedeno (pro každý provozní body turbíny) 80 až 100 měření okamžitých stavů sledovaného rychlostního pole v tempu 2 měření za sekundu.

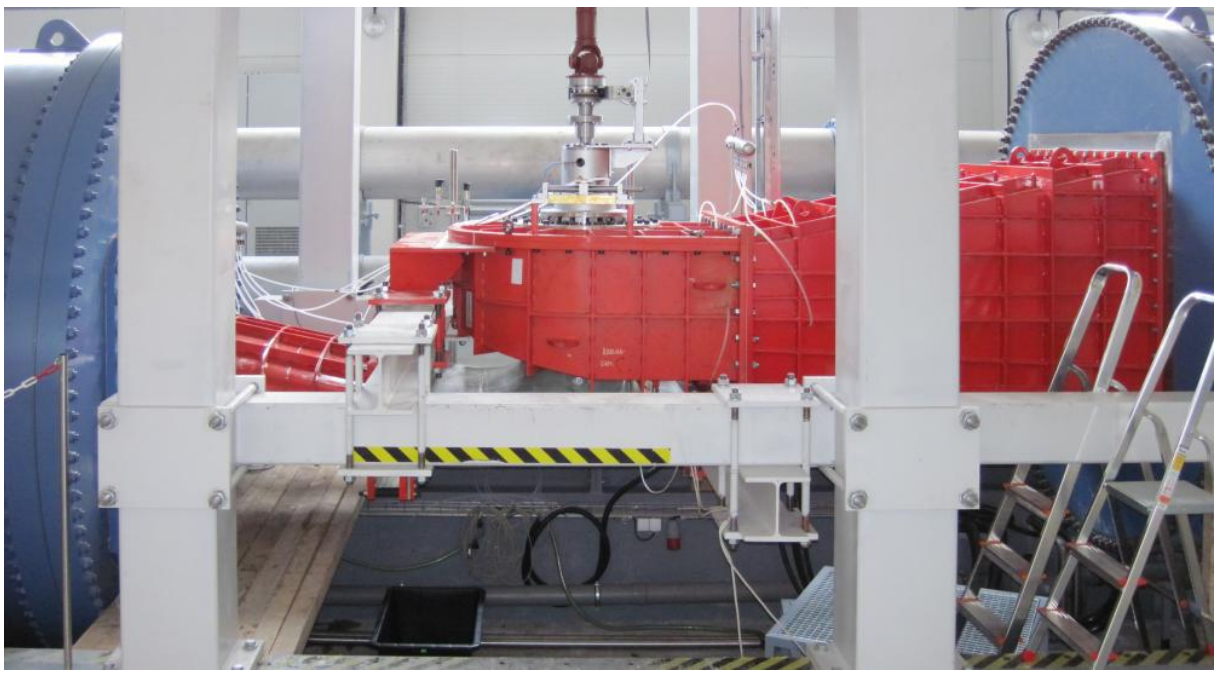
Pro každou PIV měrnou rovinu a provozní body turbíny byla vyhodnocena série okamžitých stavů rychlostního pole (příklad jednoho okamžitého stavu rychlostního pole je na obr. 8 vlevo) a z nich bylo statistickým zpracováním získáno jedno časově střední vektorové pole daného měřeného rychlostního pole. Příklad vyhodnoceného časově středního vektorového pole je na obr. 8 vpravo.

Z příslušných 8 časově středních vektorových polí byla uprostřed PIV měrného pole vytčena vždy jedna svislice rozložení časově střední hodnoty podélné složky rychlosti a její střední kvadratická odchylka (obr. 9 a 10).

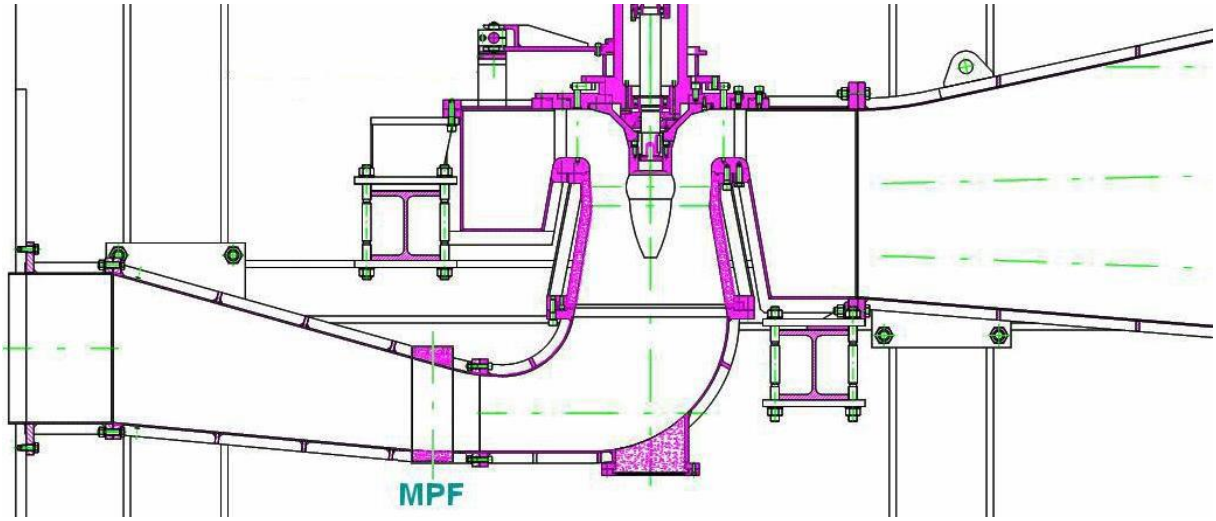
Plošnou integrací průběhů příslušných 8 svislic přes příčný řez savkou byly získány tvary celých rychlostních polí vyjádřených izotachami (obr. 11). Vzhledem k relativně řídké síti měrných bodů ve vodorovném směru (dáno polohami 8 vyhodnocených svislic) je nutno na tuto prezentaci naměřených hodnot nahlížet pouze jako na kvalifikovaný odhad.

6. Závěr

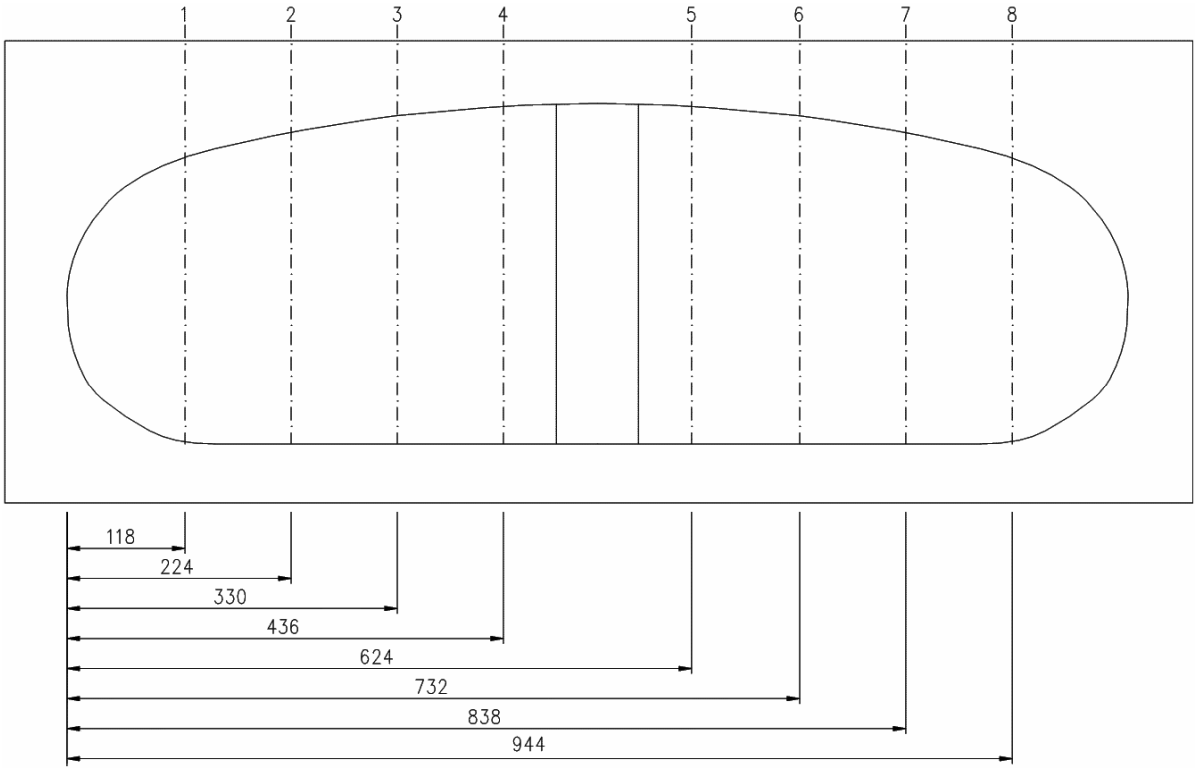
Přes poměrně značné problémy s optickými vlastnostmi průhledného segmentu savky, zhotoveného z plexiskla s vnitřním povrchem jednak kopírujícím tvar savky ale také poznamenaným lokálními nerovnostmi způsobenými při leštění, bylo dosaženo uspokojivých výsledků umožňujících následný rozbor proudových podmínek na vstupu do přímé části savky a verifikaci matematického modelu.



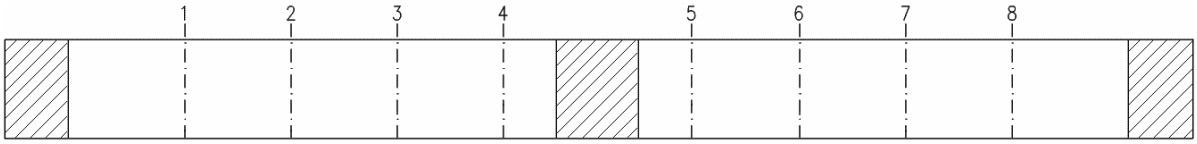
Obr. 1 Modelová turbína na zkušební stanici



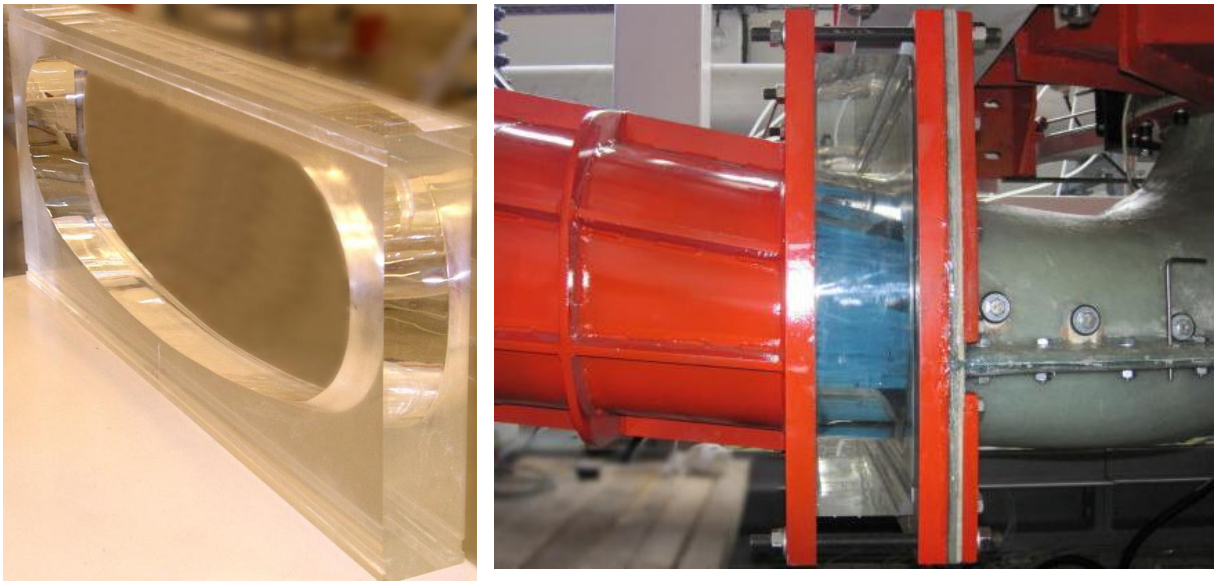
Obr. 2 Umístění měrného profilu za kolenovou částí savky



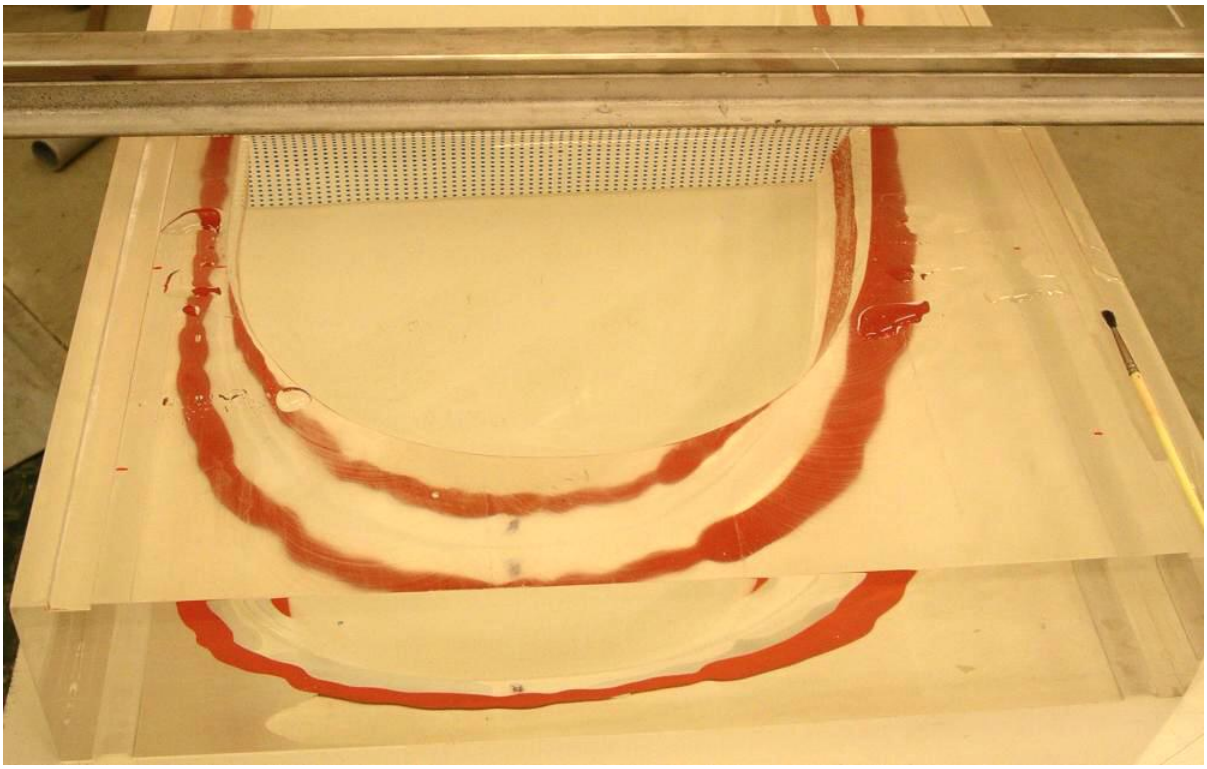
Obr.3 Rozmístění PIV měrných rovin v savce modelové turbíny, protiproudní pohled



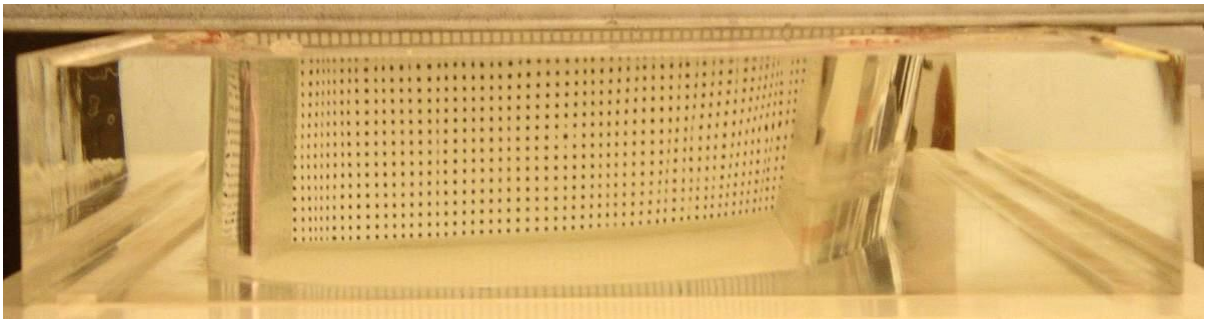
Obr.4 Rozmístění PIV měrných rovin v savce modelové turbíny, půdorysný pohled



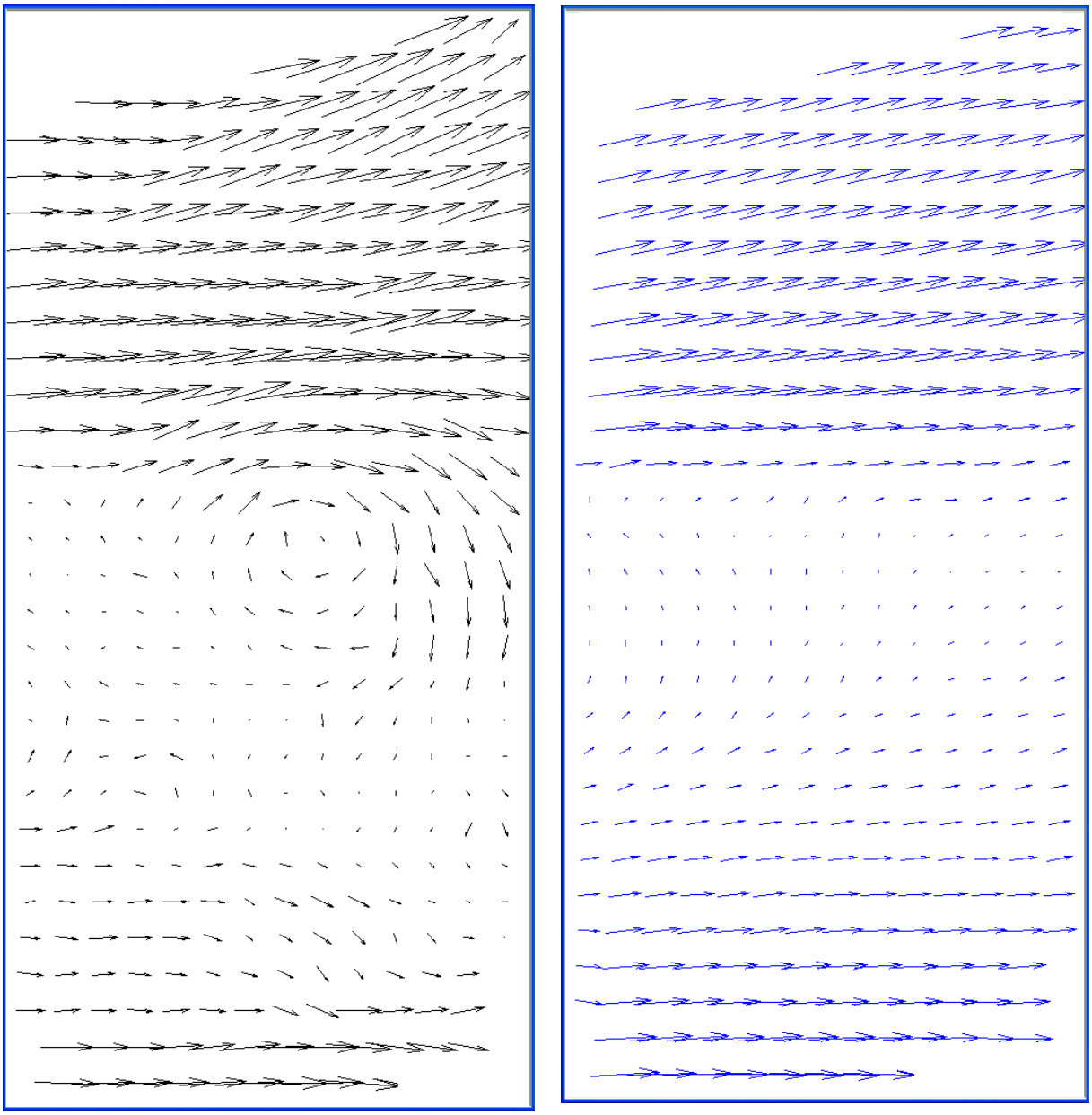
Obr.5 Průhledný segment savky před montáží (vlevo) a osazený v savce modelové turbíny



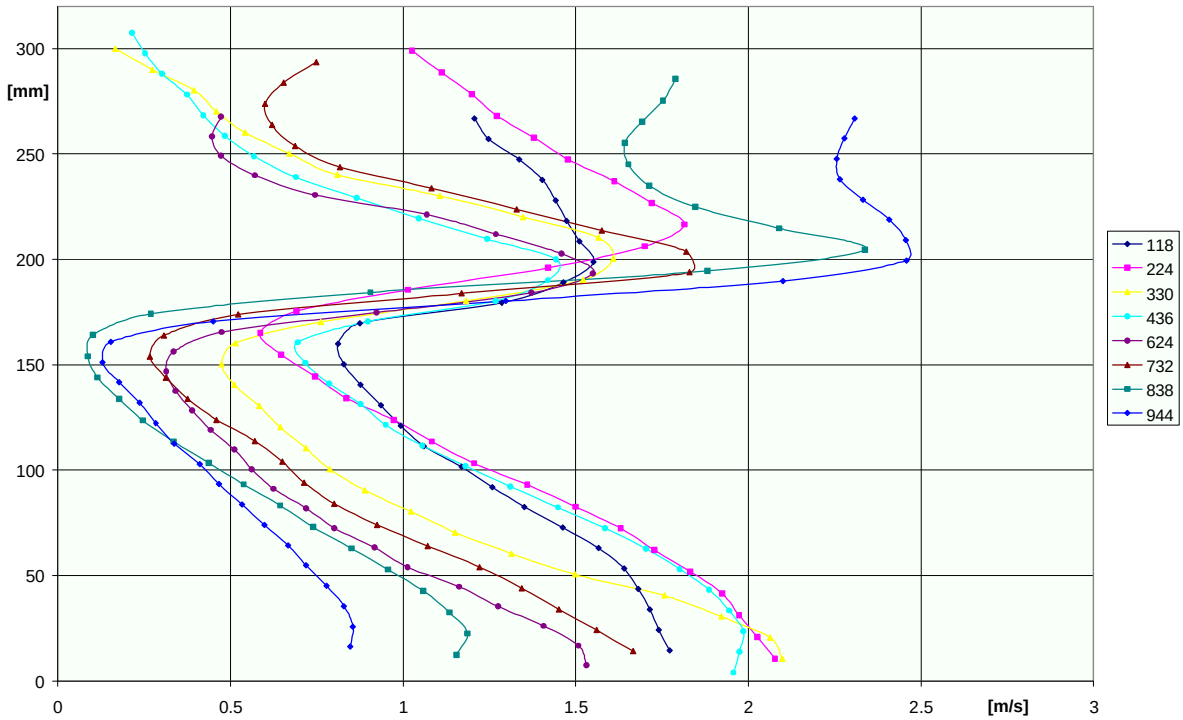
Obr. 6 Kalibrační test před montáží na zkušebně



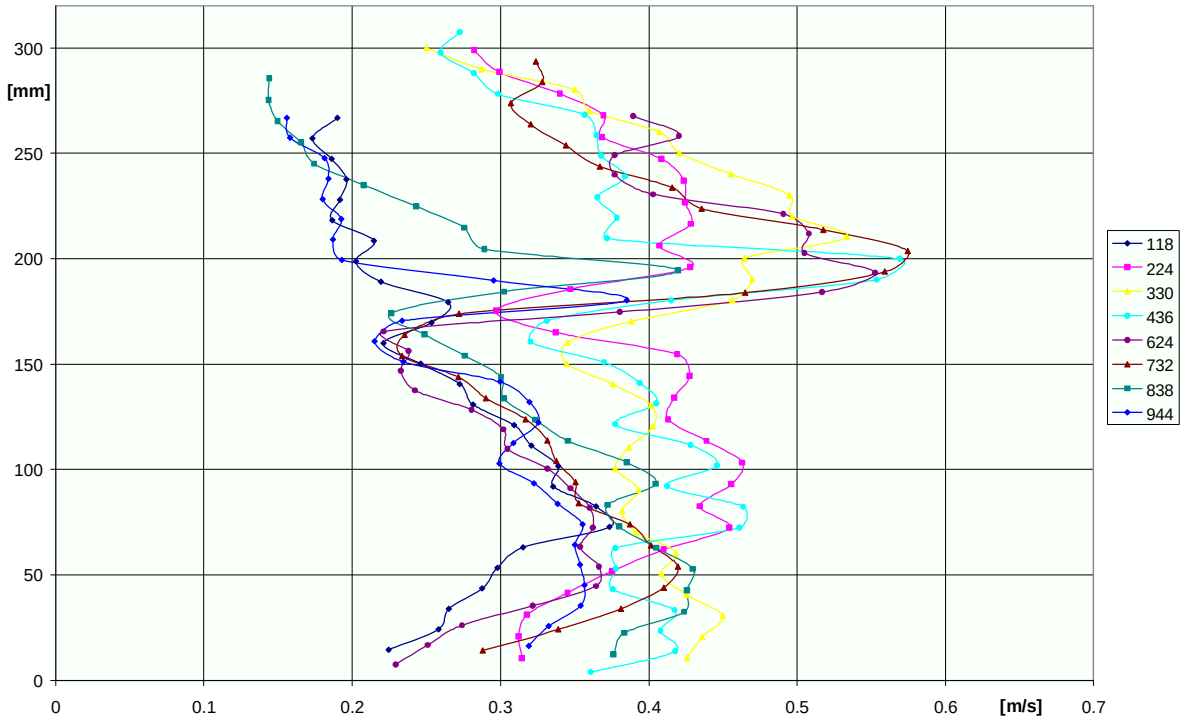
Obr. 7 Kalibrační test před montáží na zkušebně



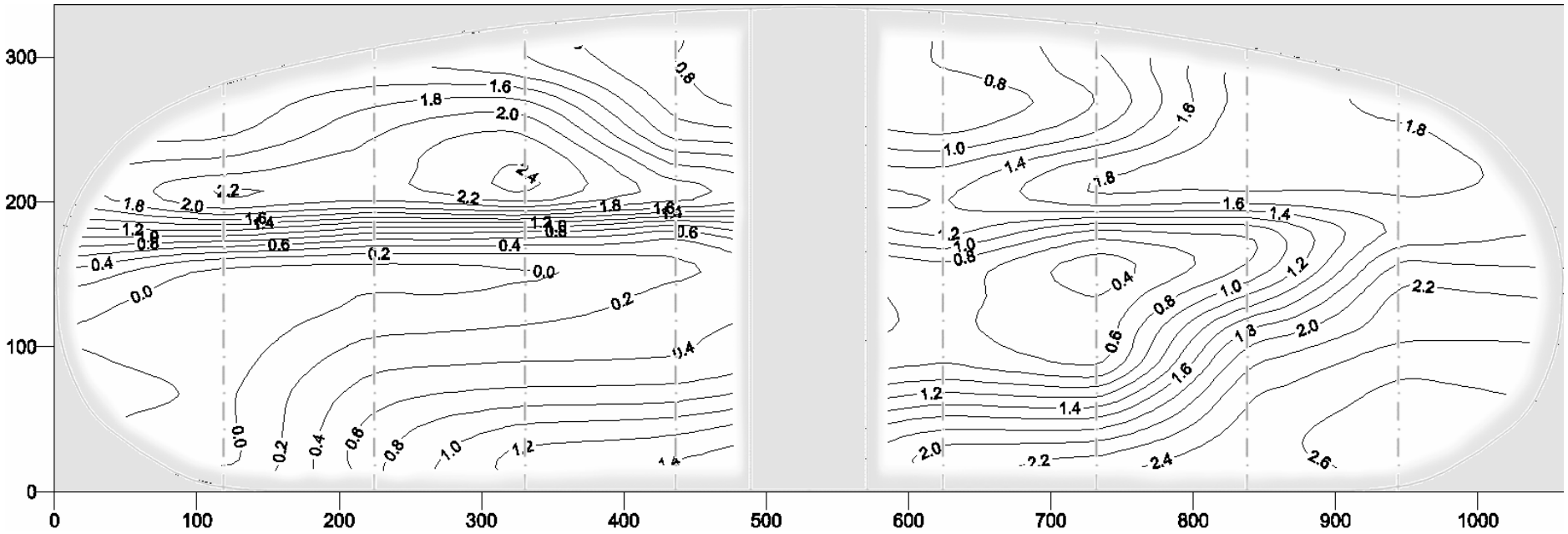
Obr.8 Příklad jednoho okamžitého stavu rychlostního pole v PIV měrné rovině (vlevo) a odpovídající vyhodnocené časově střední vektorové pole v PIV měrné rovině



Obr.9 Příklad rozložení časově střední hodnoty podélné složky rychlosti v 8 svislicích ležících napříč savkou turbíny (označených dle obr. 2)



Obr.10 Příklad rozložení střední kvadratické odchylky podélné složky rychlosti v 8 svislicích ležících napříč savkou turbíny (označených dle obr. 2)



Obr.11 Příklad rozložení časově střední hodnoty podélné složky rychlosti v příčném řezu savkou turbíny, rozměr hodnot izolínií je [m/s]