

**PIV MEASURING PROCESS THROUGH CURVED OPTICAL BOUNDARY  
FLOW LIQUID - OBJECT - VICINITY**

**PIV MĚŘENÍ PŘES ZAKŘIVENÁ OPTICKÁ ROZHRAŇÍ  
PROUDÍCÍ KAPALINA – OBJEKT – OKOLÍ**

**Pavel ZUBÍK**

**Abstrakt**

Problematika použití bezkontaktní měřicí metody – rovinné laserové anemometrie (Particle Image Velocimetry - PIV) pro stanovení rozložení rychlosti proudění kapaliny uvnitř objektů komplikovaných tvarů.

**1. Úvod**

Při použití PIV pro měření parametrů proudění kapalin v podstatě vždy řešíme problém optického přístupu k zájmové oblasti. Potřebujeme, aby stěny objektu, které oddělují kapalinu od okolního vzduchu, byly průhledné a nebo vybaveny velkými „okny“. Pokud má vnitřní povrch průhledné stěny nebo „okna“ věrně kopírovat původní funkční tvar objektu, tak častěji se setkáme se zakřivenými plochami než s rovinnými.

Jakékoliv zakřivení plochy rozhraní různě opticky hustých prostředí (různé indexy lomu světla), přes které snímáme obraz unášených částic, znamená deformaci zaznamenané prvotní obrazové informace a následně více nebo méně významné ovlivnění naměřených rychlostních polí. Druhým častým optickým problémem bývají odlesky na stěnách obklopujících sledovanou kapalinu.

**2. Použití kalibračních terčů**

Je zaznamenán známý obraz (pravidelně rozmístěné tečky, kontrastní vůči pozadí) přes rozhraní, které způsobuje deformaci obrazu, vyhodnocen opravný matematický algoritmus a tento je následně aplikován na obrazy unášených částic ještě před nasazením korelačních metod pro vyhodnocení rychlostního pole.

V převážné většině případů, se kterými se na našem pracovišti setkáváme je však technicky neproveditelné aplikovat postup: otevřít objekt, umístit terč, uzavřít objekt, naplnit objekt kapalinou (která nesmí proudit aby „nehnula“ s terčem), zaznamenat kalibrační snímek, vypustit kapalinu, otevřít objekt, vyjmout terč, uzavřít objekt, napustit kapalinu, rozběhnout proudění a zaznamenat snímky unášených částic a při tom všem nepohnout s osvětlovací soustavou a záznamovou kamerou.

**3. Dodatečná oprava naměřených rychlostních polí**

PIV měření a vyhodnocení proběhne standardním způsobem a teprve výsledná vektorová pole jsou opravena.

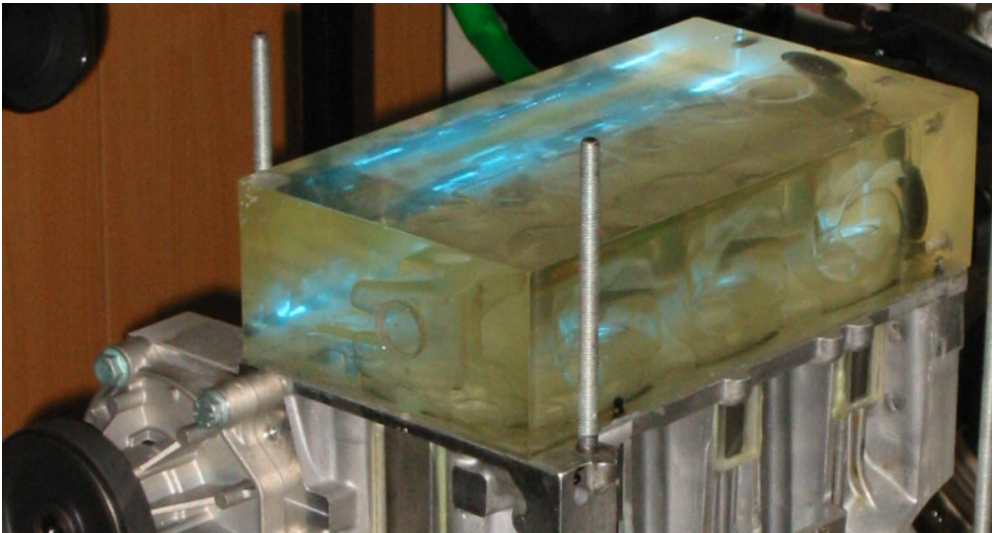
V roce 2002 v rámci řešení projektu FB-C3/80/00 „Experimentální výzkum proudění v průtočných částech hydraulických strojů metodou integrální laserové anemometrie – PIV“ byly poskytovány konzultace studentům pražského Gymnázia Christiana Dopplera. Kolektiv studentů posledního ročníku pod vedením svých pedagogů vyvíjel vlastní software pro přepočítání vektorových polí získaných měřicí metodou PIV. Cílem bylo odstranit zkreslení, jež by mohlo nastat za situace, kdyby optické rozhraní mezi proudící kapalinou a okolím bylo válcové. Výsledný software „Optics v1.0“ byl doveden do použitelného stavu. Rozšíření této metody na složitější tvary by však vyžadovalo ještě hodně práce a stále by zůstávaly značně omezující limity, přesto pro některé konkrétní případy je to efektivní metoda.

---

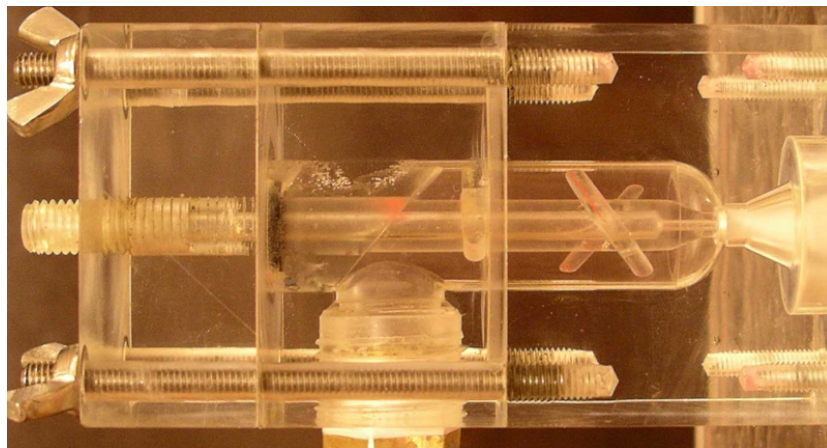
Ing. Pavel Zubík, Ph.D.: Ústav vodních staveb, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně; Veveří 331/95, 602 00 Brno; tel.: 541 147 296, fax: 541 147 288; [zubik.p@fce.vutbr.cz](mailto:zubik.p@fce.vutbr.cz)

#### 4. Úpravy objektů pro minimalizaci optických vad

Vzhledem k relativním poměrům indexů lomu nejčastěji používaných materiálů a médií (voda 1,33; vzduch 1.00; sklo, plexisklo  $\approx 1,5$ ) mnohem větší problémy způsobuje rozhraní objekt – okolí než kapalina – objekt. Z tohoto důvodu je především potřebné se zbavit zakřivených ploch na vnějším povrchu objektu v místech, přes která chceme snímat obrazy unášených částic. Jedna možnost je rovnou vyrobit objekt, který sice dodržuje vnitřní funkční tvary, ale z vnějšku se zcela odpoutá od kopírování originálu a má pouze rovinné plochy, příklady jsou na obr. 1 a 2.

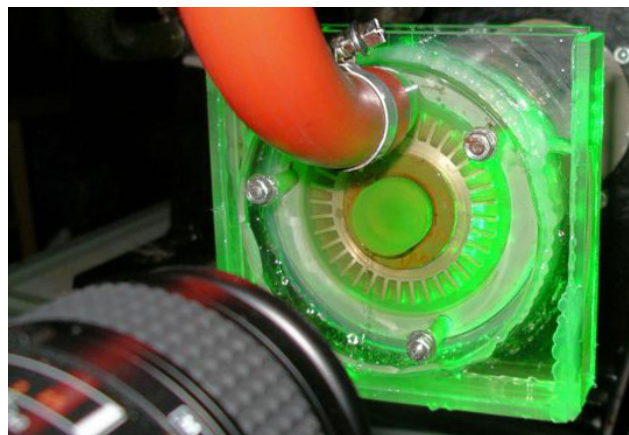


*Obr. 1 Model průhledné hlavy spalovacího motoru*

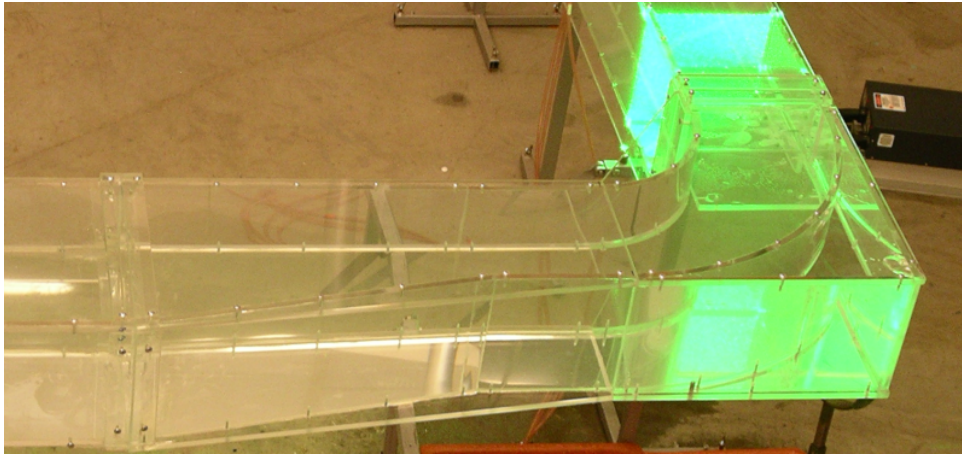


*Obr. 2 Model ejektorové trysky*

Druhá možnost je vytvořit kolem příslušné části objektu nádrž s rovinnými stěnami (případně celý objekt ponořit do vhodného „akvária“) a vzniklou dutinu naplnit kapalinou. Příklad na obr. 3 ukazuje případ, kdy tímto způsobem byla dodatečně řešena chyba zbytečně vzniklá při výrobě modelu – zadavatel měření podcenil předběžnou konzultaci a nechal blok plexiskla obrobít nejen zevnitř ale i zvenku. Na obr. 4 je naopak příklad efektivní výroby kvalitního modelu pro PIV měření.



*Obr. 3 Model vírového čerpadla*



*Obr. 4 Model oblouku 90° na kanálu čtvercového průřezu 200x200 mm s navazujícím difuzorem*

## 5. Úpravy kapaliny pro minimalizaci optických vad

V některých případech, kdy vnitřní dutiny objektu mají velmi složité tvary případně se i různě překrývají je i relativně malý rozdíl v indexech lomu 1,33/1,45 natolik velký, že může velmi omezit až znemožnit kvalitní PIV měření (například při úlohách na obr. 1 a 3). Nejen že dochází k deformacím v zaznamenaných obrazech, ale také světelná rovina se postupným průchodem přes několik různě skloněných rozhraní uvnitř objektu rozpadá na několik ploch odkloněných různými směry. Pouze v případě, kdy materiál objektu bude mít ideálně stejný index lomu jako kapalina, může světelná rovina projít celým objektem a přitom zůstat jednou rovinou.

Vzhledem k tomu, že není k dispozici průhledný materiál s optickou hustotou velmi podobnou optické hustotě vody, je nutno přizpůsobit vodu používaným materiálům. Z dostupných možností se nám nejvíce osvědčil nasycený roztok jodidu sodného. Práce s ním však rozhodně není bezproblémová.

Vzniklý roztok je žíravina, která již po několikadenním kontaktu s kovy způsobí jejich silnou korozi. Jodid sodný se na vzduchu pomaleji, ve vodě rychleji (během jednoho až dvou týdnů) rozkládá na hydroxid sodný a na jód, který vodní roztok postupně zbarvuje do žluta až do hněda a ten se stává neprůhledný. Specifická hmotnost a viskozita nejsou totožné s čistou vodou.

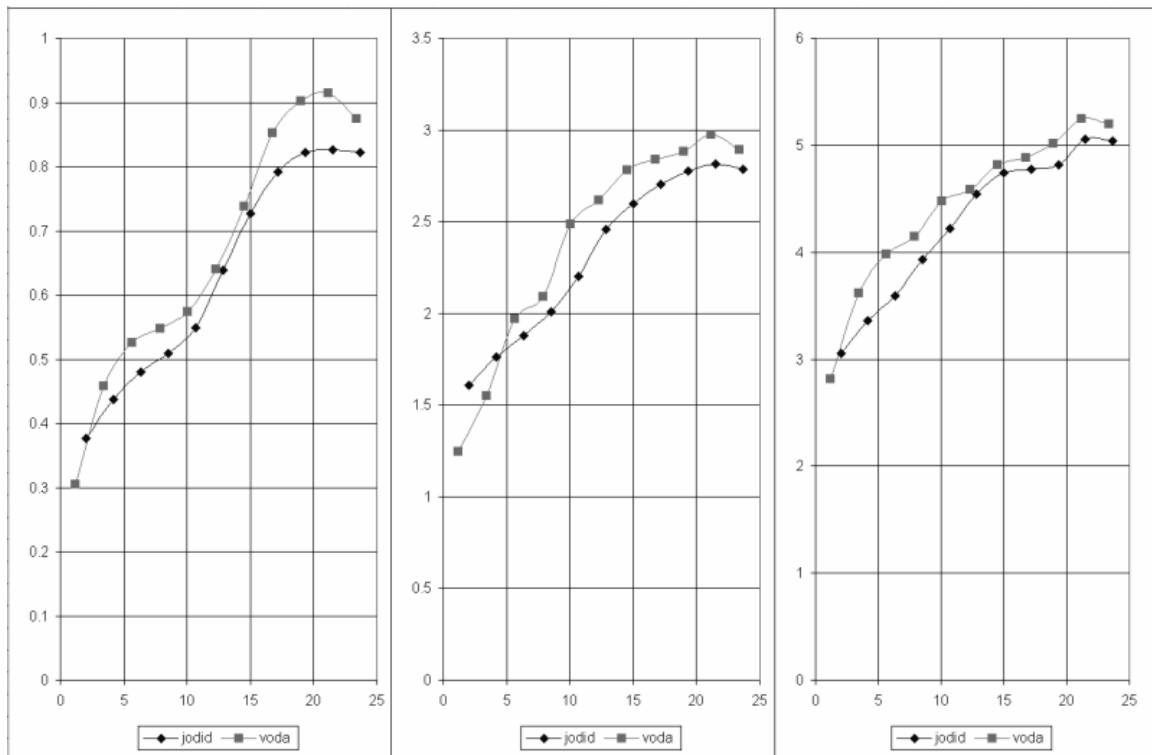
Na počátku měření ejektorové trysky (obr.2) se ukázal další významný problém při použití jodidu sodného. Dvoufázová tekutina vytvořená na výstupu z trysky se chovala příliš odlišně od směsi čisté vody a vzduchu a také použité vysokotlaké vícestupňové odstředivé čerpadlo nebylo schopno s touto kapalinou dosáhnout jmenovitých parametrů. V důsledku toho bylo nutno se vrátit k původní vodní náplni.

## 6. Porovnání naměřených rychlostí s různou náplní modelu

Vzhledem k velmi výraznému rozdílu specifické hmotnosti ( $\rho_{\text{roztok jodidu}} = 1,8 \text{ kg/dm}^3$ ) a mírnému rozdílu viskozity mezi vodou a nasyceným roztokem jodidu sodného ve vodě je na místě otázka – jak se to projeví na sledovaném fyzikálním jevu? Pro získání odpovědi bylo provedeno například při studiu proudění v hlavě spalovacího motoru (obr.1) měření také s vodní náplní.

Bylo možno vybrat lokální oblasti ve zvolených měrných řezech, kde tvar modelu poskytuje vyhovující optické podmínky pro PIV měření i při běžné vodní náplni. V těchto lokálních oblastech bylo vytknuto několik rychlostních profilů pro porovnání vlivu různých náplní. Příklad výsledku porovnání je na obr. 5. Je zřejmé, že rozdíly jsou poměrně malé

(v průměru jsou naměřené rychlosti s roztokem jodidu o 3% nižší než s vodou) a hlavně relativní poměry v poli jsou v zásadě zachovány.



*Obr. 5 Porovnání rychlostí naměřených při použití vodní náplně a roztoku jodidu sodného v jednom vybraném profilu - výstupní kanál z hlavy, při třech různých otáčkách čerpadla, na svislé ose jsou naměřené rychlosti [m/s], na vodorovné ose šířka profilu [mm]*

## 7. Problematika odlesků

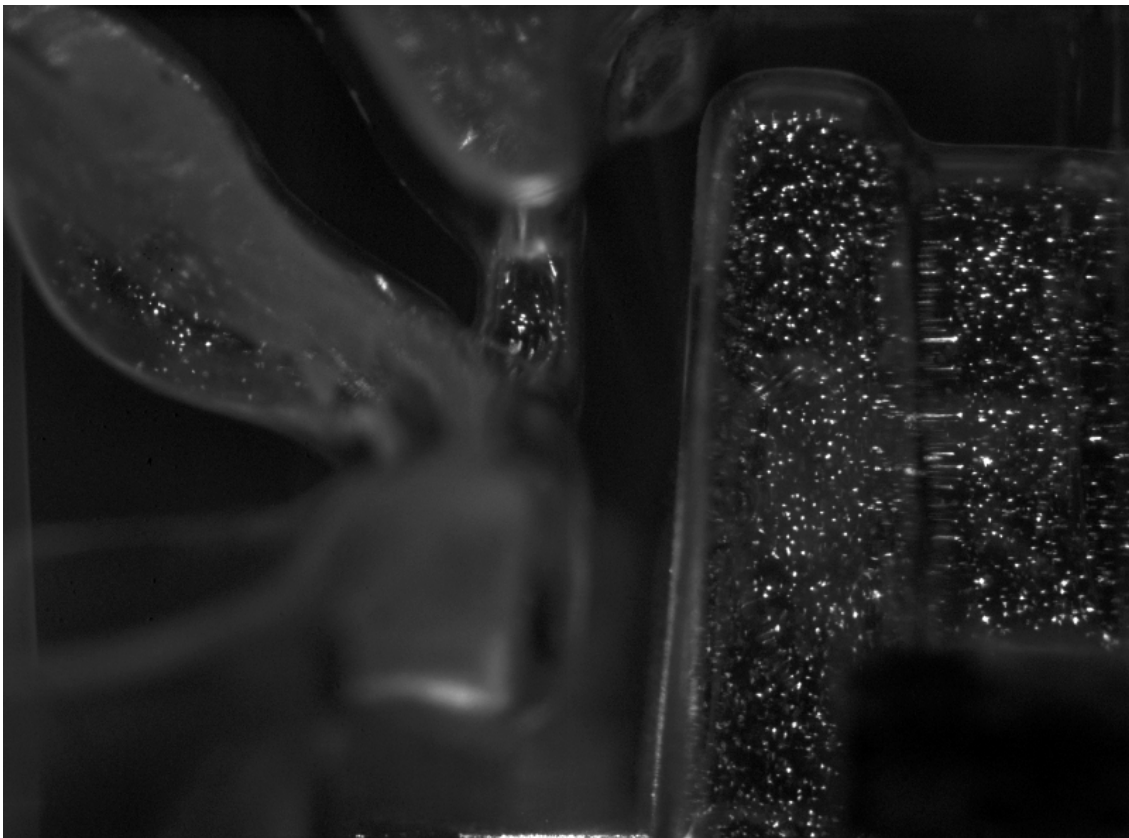
Další velmi závažnou překážkou při provádění PIV měření v uzavřených prostorech je mnoho různých odlesků, které jednak zvyšují hladinu šumu ve vyhodnocovaném signálu, případně zcela překryjí odrazy od unášených částic a tím znemožňují provádět PIV měření. Tento negativní jev lze velmi výrazně potlačit použitím fluorescentních částic a příslušného barevného filtru na objektivu kamery. Porovnání účinku využití barevné separace versus standardní záznam je možno vidět na obr. 6 a 7. Použití fluorescentních částic a filtru na objektivu má však i svá negativa – především je to velmi vysoká cena těchto částic (více než stonásobně vyšší než u běžných polyamidových částic) což v podstatě omezuje jejich použití pouze na malé uzavřené okruhy a značné snížení celkové světelné úrovně v zaznamenávaném obrazu. Pokud i bez použití barevného filtru provozujeme osvětlovací laser na hranici maximálního výkonu, může se stát, že při použití barevného filtru již PIV měření nebude proveditelné.

## 8. Závěr

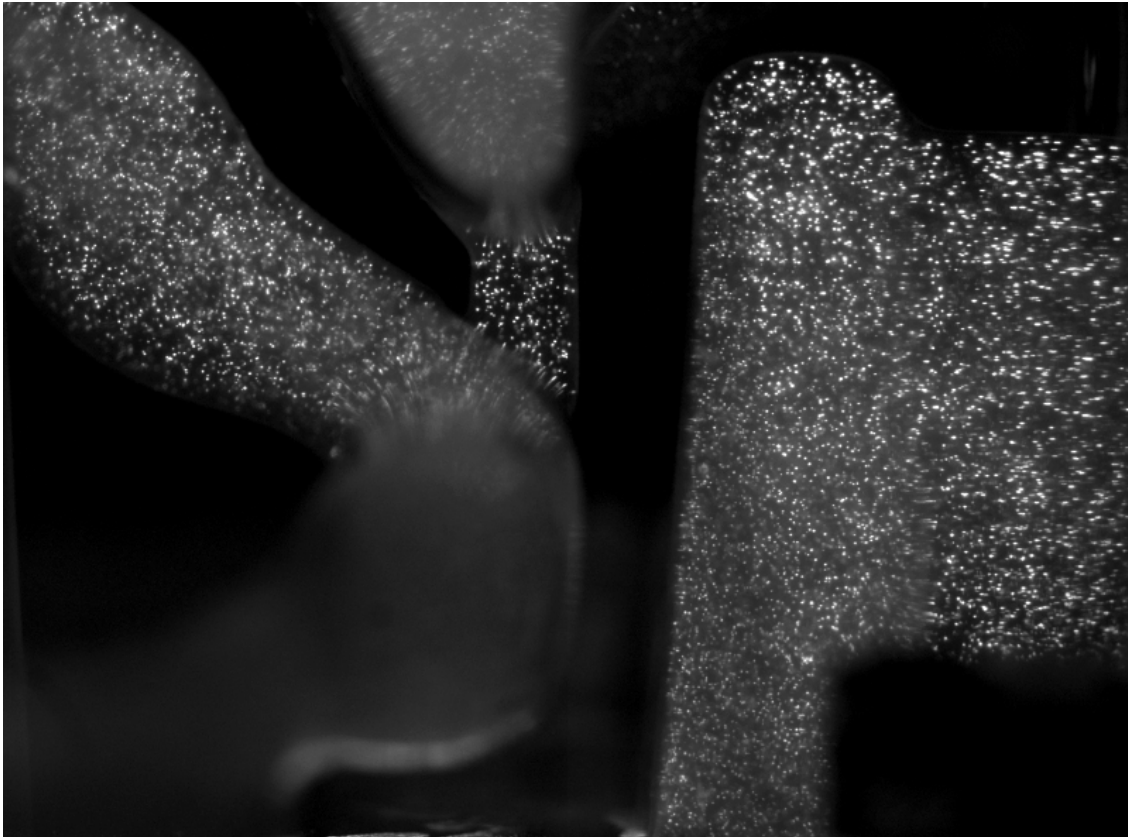
Použití speciální náplně – roztoku jodidu sodného s fluorescentními částicemi a příslušného barevného filtru na objektivu záznamové kamery umožňuje provádět měření rychlostních polí i v opticky velmi komplikovaných objektech, v kterých by PIV měření s čistou vodou a běžnými částicemi nebylo možné.



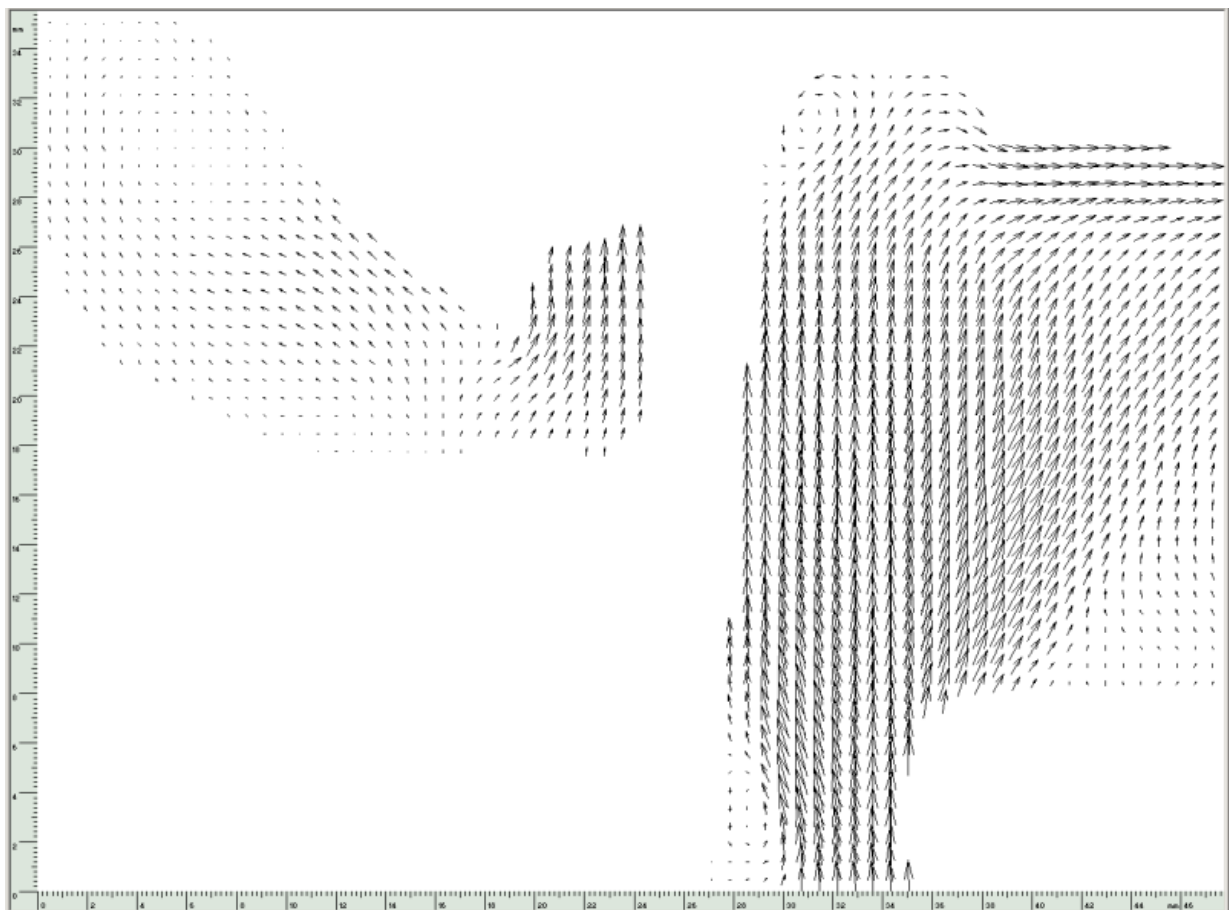
*Obr. 6 Obraz unášených částic v detailu modelu, vodní náplň s běžnými částicemi*



*Obr. 7 Obraz unášených částic v detailu modelu, vodní náplň s fluorescentními částicemi*



*Obr. 8* Obraz unášených částic v detailu modelu, náplň – roztok jodidu sodného s fluorescentními částicemi



*Obr. 9* Časově střední obraz rychlostního pole vyhodnoceného z řady měření provedených dle obr. 8