

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojírenství
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Proudění vzduchu v okolí frézy studované metodou PIV

Autor: **Tereza Kubíková**
Vedoucí práce: **RNDr. Daniel Duda, Ph.D.**
Odborný konzultant: **Prof. Ing. Václav Uruba, CSc.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

| | |
|-------------------|-------------------------------------------------------------|
| Jméno a příjmení: | Tereza KUBÍKOVÁ |
| Osobní číslo: | S17B0155P |
| Studijní program: | B2301 Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Stavba energetických strojů a zařízení |
| Téma práce: | Proudění vzduchu v okolí frézy studované metodou PIV |
| Zadávací katedra: | Katedra energetických strojů a zařízení |

Zásady pro vypracování

1. Připravit synchronizaci otáček frézy a časovače systému PIV.
2. Upevnit frézu, pohonnou jednotku a kameru do vzájemně výhodného postavení.
3. Provést kalibraci zobrazovací soustavy.
4. Vybrat zájmovou rovinu.
5. Nastavit osvětlení zájmové roviny laserovým nožem.
6. Změřit rozložení rychlostí v okolí rotující překážky.
7. Vyhodnotit vektorová pole rychlostí.
8. Sepsat bakalářskou práci.

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle potřeby vyjádření podstaty proudění**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- **Adrian.** Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields. *Experiments in Fluids*. 2000
- **Lautrup.** *Physics of Continuous Matter*. London: Institute of Physics Publishing, 2005. ISBN 0 7503 07528
- **Linhart.** *Mechanika tekutin*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. 978-80-7043-766-7
- **Fardin.** The hydrogen atom of fluid dynamics – introduction to the Taylor-Couette flow for soft matter scientists. *Royal Society of Chemistry*. 2014, 10,3523
- **Andereck.** Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders. *Cambridge university press*. 1986
- **Uruba.** *Turbulence*. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2009. 978-80-01-04330-1
- **Voda.** *Průvodce světem Arduina, 2015*, 978-80-87106-90-7

Vedoucí bakalářské práce: **RNDr. Daniel Duda, Ph.D.**
Katedra energetických strojů a zařízení

Konzultant bakalářské práce: **Prof. Ing. Václav Uruba, CSc.**
Katedra energetických strojů a zařízení

Datum zadání bakalářské práce: **31. října 2019**
Termín odevzdání bakalářské práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan

L.S.



Dr. Ing. Jaroslav Synáč
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....

Poděkování

Chtěla bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce, panu RNDr. Dudovi, Ph.D., a též i konzultantovi mé bakalářské práce, panu Prof. Ing. Urubovi, CSc., za cenné rady a připomínky, které mi byly poskytnuty během experimentu a zpracování této bakalářské práce. Dále děkuji panu doc. Ing. Yanovychovi, DrSc. a panu Ing. Laštovkovi za technickou pomoc při realizaci měření. Elektronické součástky bylo možno zakoupit díky shovívavosti paní Černé a vedoucího katedry pana Dr. Ing. Synáče.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

| | | | |
|----------------------|------------------------------------------------------|-------------------|-------------------------|
| AUTOR | Příjmení Kubíková | Jméno Tereza | |
| STUDIJNÍ OBOR | 2301R016 „Stavba energetických strojů a zařízení“ | | |
| VEDOUCÍ PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) RNDr. Duda, Ph.D. | Jméno Daniel | |
| PRACOVISŤE | ZČU - FST - KKE | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | Proudění vzduchu v okolí frézy studované metodou PIV | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KKE | ROK ODEVZD. | 2020 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----|----------------------|----|
| CELKEM | 81 | TEXTOVÁ ČÁST | 35 | GRAFICKÁ ČÁST | 46 |
| STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY | <p>Bakalářská práce obsahuje pozorování proudění vzduchu okolo frézy, která rotuje pomocí vrtačky. U frézy je umístěna deska demonstrativně sloužící jako obráběný předmět. Měření bylo provedeno v pěti variantách, kdy se měnila poloha kamery/laseru a desky tak, aby byl pozorován vývoj proudění. Všechna měření byla provedena metodou PIV, pomocí které je možno zachytit proudění celého pole najednou. K experimentu byl sestaven synchronizátor otáček frézy a vrtačky.</p> | | | | |
| KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE | <p>PIV, fréza, turbulentní proudění, vířivost, prostorová korelační funkce fluktuace rychlosti, synchronizace</p> | | | | |

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

| | | | |
|--------------------------|------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| AUTHOR | Surname Kubíková | Name Tereza | |
| FIELD OF STUDY | 2301R016 „Design of Power Machines and Equipment“ | | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) RNDr. Duda, Ph.D.. | Name Daniel | |
| INSTITUTION | ZČU - FST - KKE | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | „Air flow around the milling cutter studied by PIV method“ | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | Power System Engineering | SUBMITTED IN | 2020 |
|----------------|------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|
| TOTALLY | 81 | TEXT PART | 35 | GRAPHICAL PART | 46 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|

| | |
|---------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | The bachelor thesis contains observation of air flow around a milling cutter rotating by means of a drill and a plate demonstratively serving as a workpiece. The measurement was performed in five variants, where the position of the camera / laser and the plate was changed in order to observe the flow development. All measurements were performed by the PIV method, which can capture the flow of the entire field at once. The synchronizer of the milling cutter and the drilling machine was set up for the experiment. |
| KEY WORDS | PIV, milling cutter, turbulent flow, vorticity, synchronization, correlation function of the velocity fluctuation |

Seznam zkratk a vysvětlivek

| Zkratka | Název | Jednotka |
|------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|
| Ta | Taylorovo číslo | [-] |
| Ω | Úhlová rychlost | [m/s] |
| ν | Kinematická vazkost tekutiny | [m ² /s] |
| ϕ | Poměr poloměrů R i/R O | [-] |
| Re | Reynoldsovo číslo | [-] |
| μ | Poměr rotace Ω_o/Ω_i | [-] |
| MWV | Modulované víry | [-] |
| WVF | Vlnité vírové proudění | [-] |
| TVF | Taylorovy laminární víry | [-] |
| TTV | Taylorovy turbulentní víry | [-] |
| λ | Vlnová délka | [nm] |
| CCD | Charge coupled device | [-] |
| CMOS | Complementary metal oxide semiconductor | [-] |
| Δt | Časový interval mezi snímky | [ms] |
| k | Turbulentní kinetická energie | [m ² /s ²] |
| v | Rychlost v radiálním směru | [m/s] |
| u | Rychlost v axiálním směru | [m/s] |
| ζ | Enstrofie | [s ⁻²] |
| ω | Vířivost | [s ⁻¹] |
| ∇ | Hamiltonův operátor nabla | [-] |
| TKE | Turbulentní kinetická energie | [m ² /s ²] |
| Nmax | Maximální otáčky vrtačky | [ot/min] |
| Nmin | Minimální otáčky vrtačky | [ot/min] |
| E | Energie | [m ² /s ²] |
| R_{vv} | Korelační funkce radiální rychlosti v | [-] |
| Δx | Posun v axiálním směru | [mm] |

Seznam obrázků a grafů

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr 1: Schematický náčrtek Couettova proudění mezi dvěma soustřednými válci..... | 13 |
| Obr.2: Porovnání Couettova proudění (a) a Taylorova vírového proudění (b) – barevné mapy: tok (i), vířivost (ii) | 14 |
| Obr.3: Přechod z laminárního proudění na turbulentní (pro Ta od 41-1000) | 15 |
| Obr.4: Fázový diagram pro malé mezery mezi válci při TC proudění | 15 |
| Obr. 5: Rayleighovo rotační kritérium | 16 |
| Obr. 6: Skládání proudění | 17 |
| Obr. 7: Obtékání nevazké tekutiny kolem rotujícího válce..... | 17 |
| Obr. 8: Špatně obtékané těleso: a) ideální případ obtékání, b) reálné obtékání se vznikem úplavu a vírů..... | 18 |
| Obr. 9: PIV metoda v tunelu | 19 |
| Obr. 10: Okamžité vektorové pole s barevně označenou vířivostí. Proudění vzduchu za hliníkovým konstrukčním profilem. Vzdálenosti na osách jsou v mm. | 20 |
| Obr. 11: Zařízení pro synchronizaci otáček frézy | 22 |
| Obr. 12: Schéma a popis Arduina Nano..... | 23 |
| Obr. 13: Schéma zapojení reflexního optočlenu | 23 |
| Obr. 14: Schéma zapojení tlačítek | 24 |
| Obr. 15: Schéma zapojení potenciometru | 25 |
| Obr. 16: Schéma zapojení BNC konektoru..... | 25 |
| Obr. 17: Schéma zapojení diod | 26 |
| Obr. 18: Schéma zapojení displeje..... | 26 |
| Obr. 19: Použitá fréza naskenovaná 3D skenerem ATOS | 31 |
| Obr. 20: Měřené roviny označené jako zelené čtverce. Šedý válec reprezentuje frézu. 32 | |
| Obr. 21: Sestava pro rovinu α a β | 32 |
| Obr. 22: Rovina γ | 33 |
| Obr. 23: Rovina δ | 34 |
| Obr. 24: Rovina ϵ | 34 |
| Graf 1-5: Srovnání TKE-maximální otáčky..... | 40 |
| Graf 6-10: Srovnání TKE-minimální otáčky | 43 |
| Graf 11-15: Srovnání Enstrofie-maximální otáčky..... | 47 |
| Graf 16-20: Srovnání Enstrofie-minimální otáčky | 50 |
| Graf 21-23: Srovnání vířivosti-maximální otáčky | 53 |
| Graf 24-26: Srovnání vířivosti-minimální otáčky..... | 55 |
| Graf 27-28: Z10-pozadí, $\Delta t=5000 \mu s$, Turbulentní kinetická energie..... | 56 |
| Graf 29-30: Z10-Posunutí o 3 zuby, maximální otáčky, $\Delta t=1000 \mu s$, | 57 |
| Turbulentní kinetická energie a enstrofie..... | 57 |
| Graf S1: Bok – maximální otáčky, srovnání několika okamžitých rozložení vířivosti .. | 60 |
| Graf S2: Bok – minimální otáčky, srovnání několika okamžitých rozložení vířivosti... | 61 |
| Graf S3: Bok –deska nad frézou, maximální otáčky, srovnání několika okamžitých rozložení vířivosti..... | 62 |
| Graf 4: Bok –deska nad frézou, minimální otáčky, srovnání několika okamžitých rozložení vířivosti..... | 63 |
| Graf S5: Bok –deska pod frézou, maximální otáčky, srovnání několika okamžitých rozložení vířivosti..... | 64 |
| Graf S6: Bok –deska pod frézou, minimální otáčky, srovnání několika okamžitých rozložení vířivosti..... | 65 |
| Graf SMax: Srovnání vířivosti při maximálních otáčkách mezi rovinami γ , ϵ , δ | 66 |

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Graf SMin: Srovnání vířivosti při minimálních otáčkách mezi rovinami γ , ϵ , δ | 67 |
| Obr. 24: Oblasti pro tvorbu histogramů | 68 |
| H1-2: Bok-deska nad frézou – maximální otáčky, srovnání 3 oblastí v okolí frézy z hlediska vodorovné a příčné rychlosti | 69 |
| H3-4: Bok-deska nad frézou – minimální otáčky, srovnání 3 oblastí v okolí frézy z hlediska vodorovné a příčné rychlosti | 70 |
| H5-6: Bok-deska pod frézou – maximální otáčky, srovnání 3 oblastí v okolí frézy z hlediska vodorovné a příčné rychlosti | 71 |
| H7-8: Bok-deska pod frézou – minimální otáčky, srovnání 3 oblastí v okolí frézy z hlediska vodorovné a příčné rychlosti | 72 |
| H9-10: Bok – maximální otáčky, srovnání 3 oblastí v okolí frézy z hlediska vodorovné a příčné rychlosti | 73 |
| H11-12: Bok – minimální otáčky, srovnání 3 oblastí v okolí frézy z hlediska vodorovné a příčné rychlosti | 74 |
| Obr. 24: Horní záběry – PIV snímky během experimentu (viditelnost plum), spodní obrázky jsou zhotovené z horních a obarvené okamžitou vířivostí | 75 |
| G0: Korelace fluktuace radiální rychlosti v axiálním směru znázorněné čárkované..... | 76 |
| (horní obrázek platí pro rovinu ϵ , dolní obrázek pro rovinu γ a δ)..... | 76 |
| G1-G3: grafy korelačních funkcí pro roviny γ, δ, ϵ | 77 |
| G4-5: Srovnání rovin γ , δ , ϵ při maximálních a minimálních otáčkách | 78 |

Obsah

| | | |
|------|------------------------------------------------------|----|
| 1 | Předmluva | 12 |
| 2 | Úvod..... | 13 |
| 2.1. | Taylorova-Couettova nestabilita | 13 |
| 2.2. | Rayleighovo kritérium a Görtlerova nestabilita | 16 |
| 2.3. | Obtékání válce | 17 |
| 2.4. | Reynoldsovo číslo | 18 |
| 3 | PIV metoda | 19 |
| 3.1. | Laser | 20 |
| 3.2. | Kamery CCD/CMOS | 21 |
| 3.3. | Kalibrace | 21 |
| 4 | Synchronizace otáček frézy | 22 |
| 4.1. | Arduino..... | 22 |
| 4.2. | Součástky..... | 23 |
| 4.3. | Program | 27 |
| 5 | Fréza..... | 31 |
| 6 | Naměřená data | 35 |
| 6.1. | Turbulentní kinetická energie (TKE) | 37 |
| 6.2. | Enstrofie | 44 |
| 6.3. | Vířivost..... | 51 |
| 6.4. | Porovnání výsledků | 59 |
| 6.5. | Histogramy | 68 |
| 7 | Diskuze | 75 |
| 7.1. | Použitelnost současného rozlišení | 76 |
| 8 | Závěr | 79 |
| 9 | Citovaná literatura..... | 81 |

1 Předmluva

Turbulentní proudění je vnímáno jako chaos, jehož charakteristickým rysem jsou koherentní vírové struktury, mající polohu i orientaci víru v proudu zcela náhodnou. Tato skutečnost si zároveň odporuje, protože koherence vystihuje souvislost mezi pohyby částic v tekutině na malé vzdálenosti a koherentní vírová struktura je tedy organizovaná a velmi stabilní. Vývin proudění je závislý na hodnotě Reynoldsova čísla. Jeho růstem se proud vyvíjí od laminárního proudění přes přechodovou oblast až po plně vyvinutou turbulenci. Tento stav tekutiny je vysoce organizovaný a dochází k synchronizovanému pohybu velkého počtu molekul, které jsou schopny uchovávat energii. Atributy turbulence: náhodnost (náhodné poruchy způsobují nepředvídatelnost vývoje proudu), difuzivita (míšení tekutiny), vířivost, spektrum měřítek (rozsah délek vírů a přenos energie mezi různými délkami), prostorovost, disipativnost (přeměna kinetické energie vírů na teplo molekul), nevratnost (souvisí s disipací energie), nelinearita (s růstem poruch se urychluje přechod k turbulenci), nestacionarita (závislost proměnných na čase). Matematický model popisující turbulenci je Navier-Stokesova rovnice.

Jak bylo řečeno, jednou z vlastností pozorované turbulence je disipace energie, při níž vzniká teplo, které musí být odvedeno, aby nedošlo k poškození nástroje i obrobku (v našem případě se jedná o turbulenci vzduchu a zde je vzniklé teplo zanedbatelné). Při obrábění se používá procesních kapalin, které mohou mít chladicí i mazací účinek. Chlazení je uskutečněno proudem kapaliny, která smáčí povrch kovu v místě řezu, a tím dojde k ochlazení obráběného povrchu. Mazání se provádí kvůli snížení tření, vznikajícímu mezi nástrojem a obrobkem. Jedním ze sledovaných parametrů při experimentu byla kinetická energie proudícího vzduchu v okolí frézy, která má přímý vliv na efektivitu transportu.

Přístup je experimentální a je použita vizualizační metoda optického měření rychlosti unášených částic, angl. Particle image velocimetry (PIV) a pod touto zkratkou se tato metoda označuje i u nás. Mezi hlavní výhody této metody, oproti ostatním, patří to, že měří celou oblast proudového pole najednou, a tak můžeme přímo pozorovat vzniklé koherentní struktury, zatímco bodové metody mohou detekovat nanejvýš časové řady a pokud pomocí nich chceme vidět prostorovou závislost, museli bychom „traverzovat“, čímž stejně nemůžeme podchytit prostorový aspekt fluktuací.

K experimentu jsme vytvořili synchronizátor otáček vrtačky (složený z Arduina a potřebných součástek). Vrtačka je určena k otáčení frézy, okolo níž sledujeme vznik turbulentního proudění. Generované mlžné kapičky jsou sledované metodou PIV. Aby byl experiment srovnatelný s realitou, je použita deska, napodobující obráběný povrch. Z hlediska vývinu proudění je pozorována oblast od nejmladšího (deska příčně) po nejstarší mizející proud (deska nad frézou).

[1] [2] [3] [4]

2 Úvod

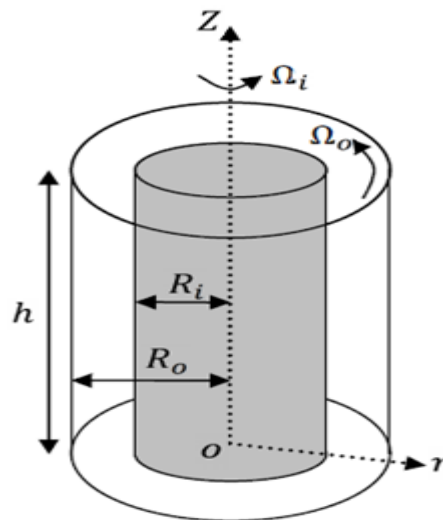
2.1 Taylorova-Couettova nestabilita

Proudění mezi dvěma otáčejícími se sousými válci (jeden/oba, ve stejném smyslu/opačně) popisuje Taylorův-Couettův systém. Mezera mezi válci je vyplněna vazkou tekutinou, jejíž pohyb je charakterizován Taylorovým číslem (Ta) vyjadřujícím poměr odstředivých a vazkých sil. Při Ta menším než $Ta_c = 41,2$ ($Ta_c = 1708$) je proudění tangenciální, stabilní, laminární – Couettovo proudění. Pokud je překročena tato hodnota, lze pozorovat vznik periodických nestabilit, které jsou charakteristické dvojicí proti sobě rotujících toroidních (prstencových) vírů

$$Ta = \frac{\Omega^2 R l^3}{\nu^2} \quad 2-1$$

Úhlová rychlost otáčení vnitřního válce je značena Ω , poloměr vnitřního válce je R , šířku mezery mezi válci značíme l a kinematická vazkost tekutiny je ν .

Na obr. 1 lze vidět schéma uspořádání válců, kde R_i a R_o jsou vnitřní a vnější poloměry, Ω_i a Ω_o jsou vnitřní a vnější úhlová rychlost, h je výška válců. V tomto případě se válce otáčejí souhlasným směrem.



Obr 1: Schematický náčrtek Couettova proudění mezi dvěma soustřednými válci
 Obrázek převzat z práce Nabila Ait-Moussa (2015) [5]

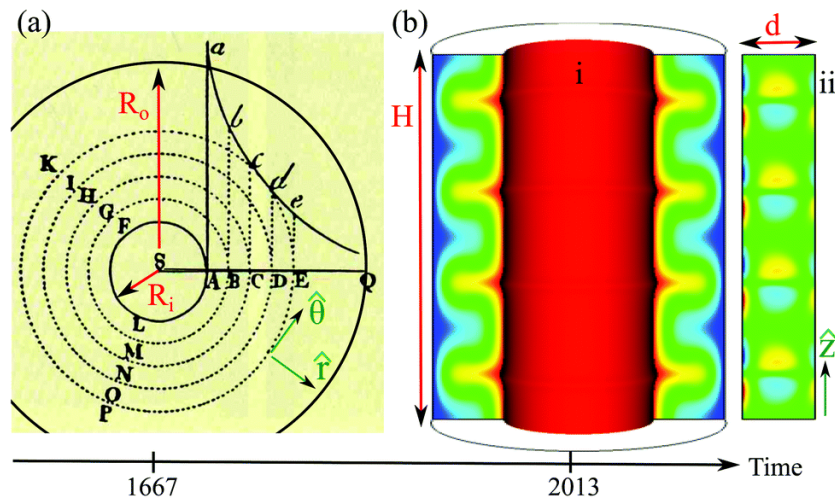
Couettův tok (obr.2(a)) je charakteristický čistě stabilním laminárním prouděním. Dochází k němu, pokud vnitřní válec rotuje s malou úhlovou rychlostí a vnější válec stojí. Toto proudění se vyskytuje ve viskozimetru nebo v třecím ložisku. Nejedná se o turbulenci, tedy nevznikají vírové struktury, podél osy z je proudění homogenní a fluktuace rychlosti jsou zanedbatelné.

Nenulová tečná rychlost:

$$v_{\theta}(r) = Ar + \frac{B}{r} \quad B = \frac{\Omega_i - \Omega_o}{1 - \Phi^2} R_i^2 \quad A = -\frac{\Phi^2 \Omega_i - \Omega_o}{1 - \Phi^2}$$

2-2

Kde Ω_i, Ω_o je hodnota vnitřní a vnější rotace a Φ je poměr R_i/R_o (0,25 - velká mezera; 0,5- střední mezera; 0,8-0,97 - malá mezera)



Obr.2: Porovnání Couettova proudění (a) a Taylorova vírového proudění (b) – barevné mapy: tok (i), vířivost (ii)
 Obrázek převzat z M.A. Fardin (2014) [6]

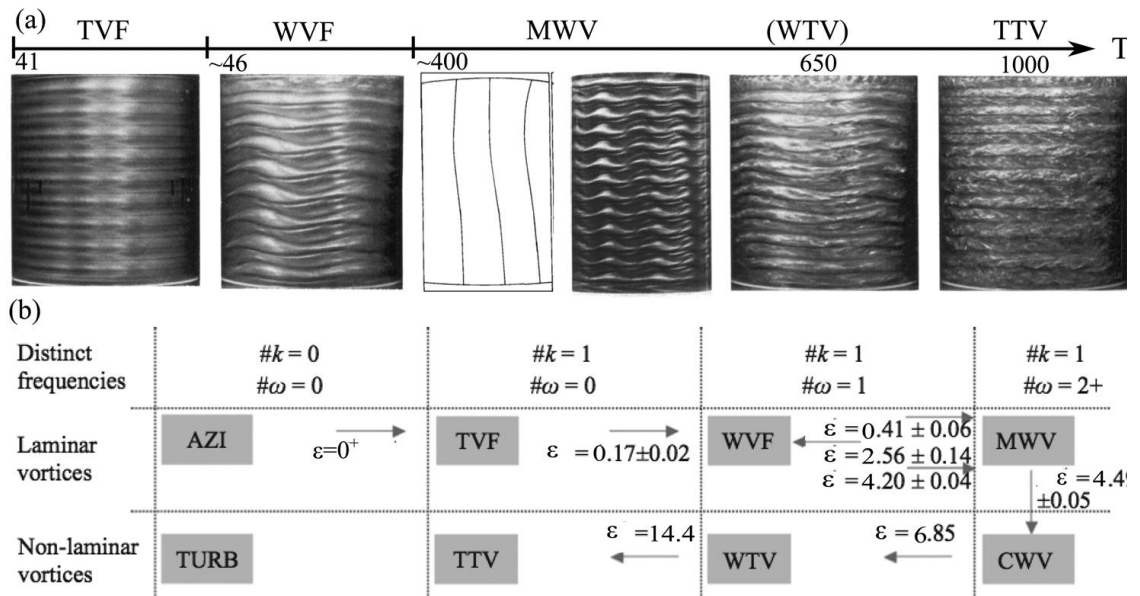
Pokud je překročena kritická hodnota Taylorova čísla (Ta_{c1}), přechází stabilní vírové proudění na nestabilní zvlněné vírové proudění (wavy vortex), při kterém lze pozorovat axisymetrické, proti sobě rotující víry (obr. 3 (a))

$$Ta = \sqrt{\Lambda} Re = \sqrt{\frac{d}{R_i}} \frac{\omega_i R_i d}{\nu} = \frac{\omega_i d^{3/2} R_i^{1/2}}{\nu} \geq 41,2 = Ta_{c1} \quad 2-3$$

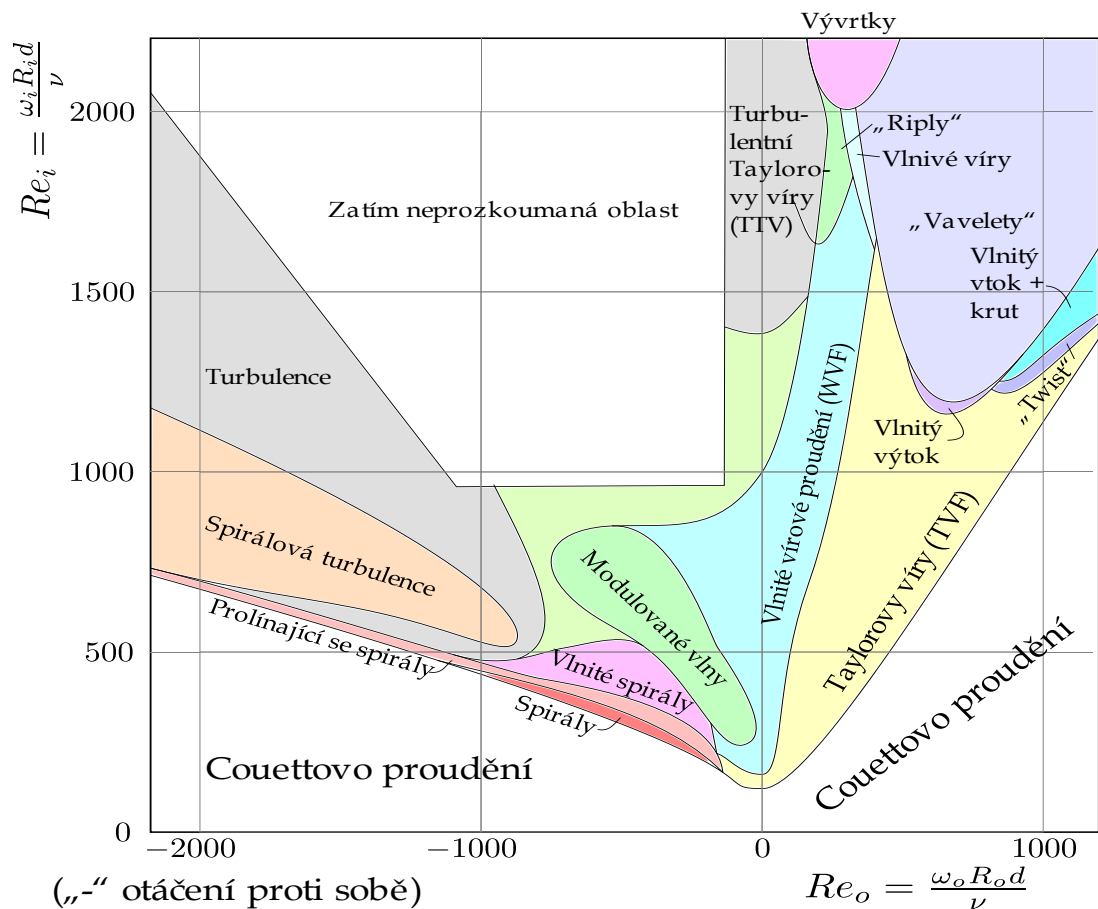
Kde Λ je křivost válce ($\Lambda = d/R_i$), Re je Reynoldsovo číslo a ν je kinematická viskozita.

Tato nestabilita vzniká pouze při poměru poloměrů menším než 1,4. Jestliže Ta přesáhne $100Ta_{c1}$, přechází laminární proudění postupně na turbulentní Taylorovo proudění (obr. 2(b)). Rotující tekutina je vlivem rotace vnitřního válce vytlačováno odstředivou silou k okraji vnějšího válce. Zvyšuje-li se rychlost otáčení vnitřního válce, lze pozorovat různé druhy proudění – vlnité vírové proudění (WVF), modulované víry (MWV).

Na obr.3, kde je znázorněn přechod z laminárního na turbulentní proudění pro určité hodnoty Taylorova čísla a frekvence, a na fázovém diagramu (obr. 4) je vidět, že pokud je poměr rotace $\mu = \Omega_o/\Omega_i \sim 0^-$, objeví se jako první Taylorovy laminární víry (TVF), pro které platí $41 < Ta < \sim 46$, poté se mění na spirály. Dále pro $\mu = \Omega_o/\Omega_i \sim 0$ začíná přechod k turbulentnímu proudění od Couettova proudění → přes Taylorovy laminární víry (TVF) → Vlnité vírové laminární proudění (WVF), které má hodnotu $Ta < \sim 400$ → Modulované víry (MWV), pro které je $Ta < \sim 400$ → Vlnité turbulentní Taylorovy víry (WTV) s $Ta < 1000$ → k Taylorovým turbulentním vírům (TTV), pro které platí $Ta > 1000$.



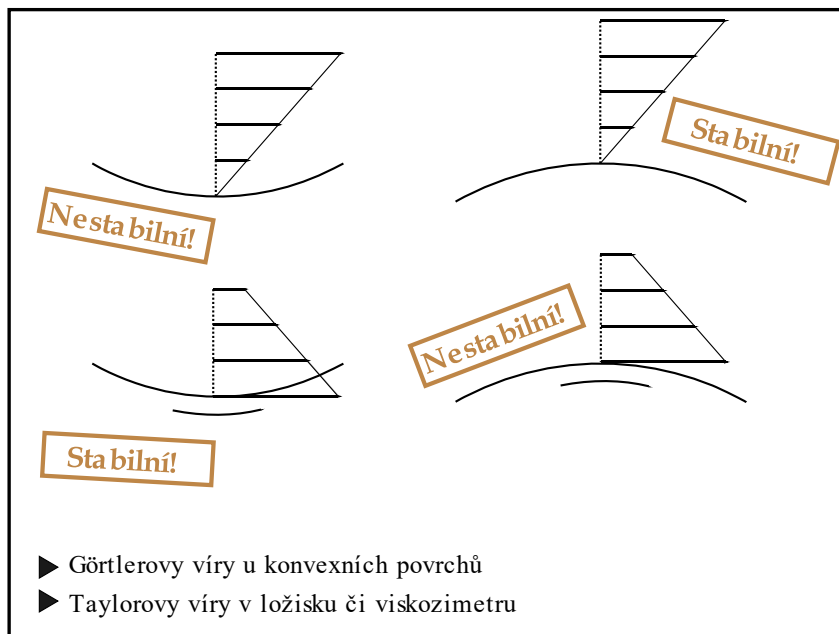
Obr.3: Přechod z laminárního proudění na turbulentní (pro Ta od 41-1000)
 Obrázek převzat z prací P.R. Fenstermachera (1979) a M. Fardina (2014) [6]



Obr.4: Fázový diagram pro malé mezery mezi válci při TC proudění
 Obrázek převzat z práce D. Dudy (2018) [7] a C. D. Anderecka (1986) [10]

Reynoldsovo číslo pro vnitřní válec (svislá osa): $Re_i = \frac{\omega RiD}{\nu}$, pro vnější válec (vodorovná): $Re_o = \frac{\omega RoD}{\nu}$

2.2. Rayleighovo kritérium a Görtlerova nestabilita



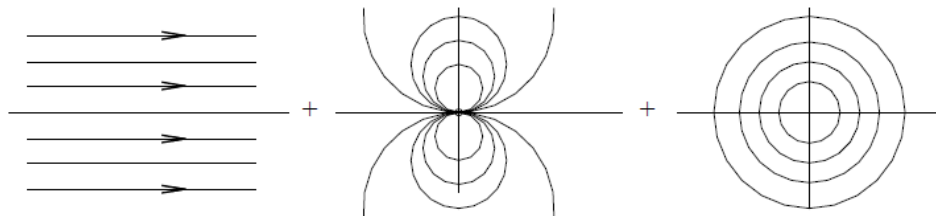
Obr. 5: Rayleighovo rotační kritérium
 Obrázek převzat z práce W.S. Sarica (1994) [21]

Mezi další nestability proudění patří Görtlerova nestabilita (obr. 5). Rayleighovo rotační kritérium říká, že nerovnost musí být splněna v celém proudovém poli. Nezbytná, dostačující podmínka pro vznik nestability je $(d(rv)^2/dr < 0)$, kdekoli v proudu, kde Γ představuje cirkulaci ($\Gamma = rv$). Rayleighovo kritérium lze demonstrovat na obtékání zakřivené stěny (obr.5). Pokud se, se snížením $|rv|$, zvyšuje r , tok je nestabilní. V opačném případě, kdy se $|rv|$ zvyšuje s r , je tok stabilní.

Görtlerova nestabilita proudění vzniká podél zakřivených válcových stěn. Po překročení kritické hodnoty Görtlerova čísla je výsledkem vznik vírových struktur. Tato nestabilita je velmi podobná Taylorově-Couettově nestabilitě, ale u Görtlerovy se mění pošinovací tloušťka mezní vrstvy. Na počátku se tvoří větší množství malých vírů, na konci zůstane méně velkých vírů.

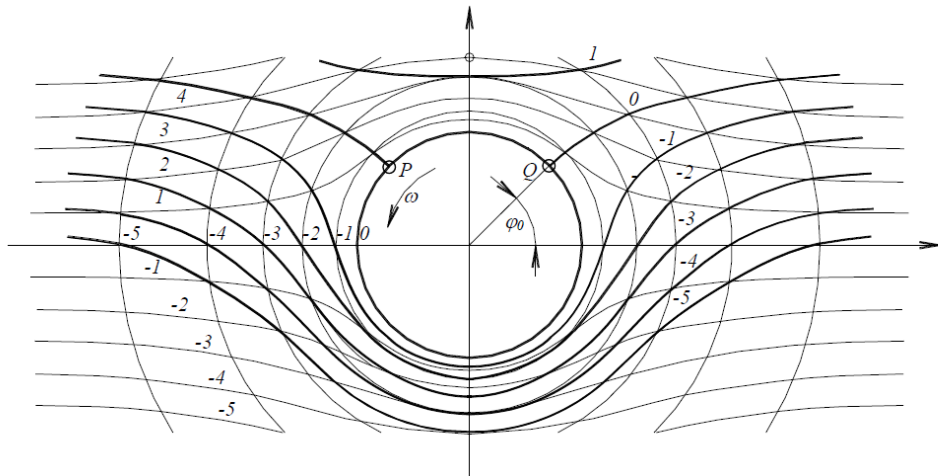
2.3. Obtékání válce

Složením rovnoběžkového proudu, dipólu a potenciálního víru vznikne proudová funkce obtékání rotujícího válce (obr. 6).



Obr. 6: Skládání proudění
Obrázek převzat z práce J. Linharta (2009) [8]

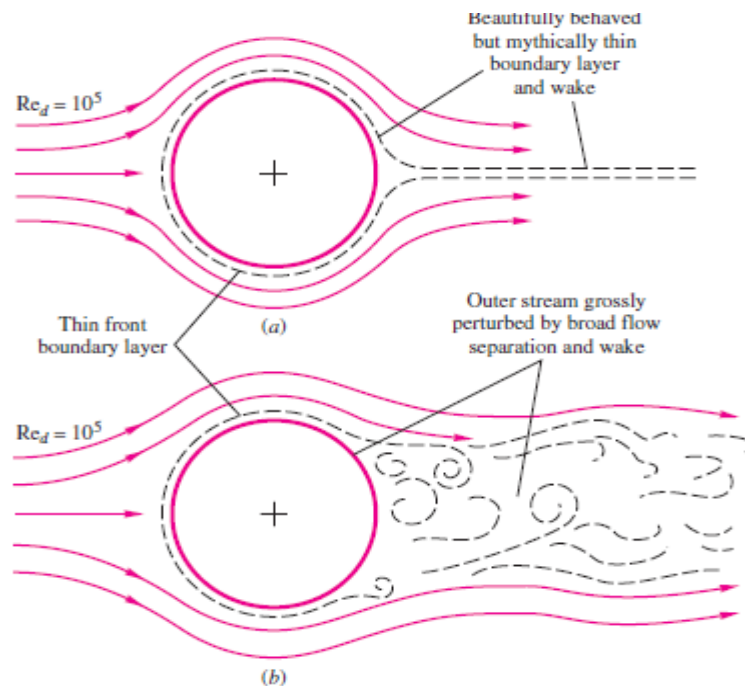
Po složení proudnic rovnoběžkového proudu s proudnicemi dipólu vznikne proudění okolo nerotujícího válce, toto proudění lze složit s proudnicemi potenciálního víru, a tím vznikne proudění nevazké tekutiny okolo rotujícího válce.



Obr. 7: Obtékání nevazké tekutiny kolem rotujícího válce
Obrázek převzat z práce J. Linharta (2009) [8]

Na obr. 7 jsou znázorněny proudnice (1-5). Po proudnici s indexem 0 se částice pohybuje s určitou rychlostí, v bodě P nebo Q narazí na válec a zbrzdí se na $w = 0$ (oproti neotáčejícímu se válci jsou body posunuty směrem nahoru po obvodu). Proudnice rovnoběžkového proudu jsou rozevírány dipólem a nulová proudnice potenciálního víru je totožná s válcem. Pokud by se jednalo o obtékání vazké tekutiny, body P, Q by se posunuly ve směru obvodové rychlosti.

Toto je pouze ideální pohled nevazké teorie na obtékání válce. Ve skutečnosti dochází k odtržení mezní vrstvy a vzniku úplavu.



Obr. 8: Špatně obtékané těleso: a) ideální případ obtékání, b) reálné obtékání se vznikem úplavu a vířů
 Obrázek převzat z práce F.M.White [9]

Z obr. 8 lze srovnat ideální a reálné obtékání válce za stejného Reynoldsova čísla $Re = 10^5$. Toto proudění je buď přechodové ($2320 < Re < 10^5$) nebo již turbulentní ($Re > 10^5$). Na obr.8b) je znázorněno odtržení mezní vrstvy a vzniku úplavu za tělesem. Odtržení mezní vrstvy je důsledek nepříznivého gradientu tlaku (zvýšení tlaku) za současného poklesu rychlosti. U turbulentního proudění se mezní vrstva trhá dál (je stabilnější), a proto má užší úplav než u laminárního proudění, kde dojde k odtrhnutí při prvních poruchách. Kromě poruch v proudu má na odtržení MV vliv drsnost povrchu tělesa (platí, že čím je drsnější, tím je mezní vrstva stabilnější). Čím větší je tření (tím více poruch), tím rychleji dojde k odtrhávání a ke vzniku turbulence. Ta vzniká vždy vývojem od laminárního, přes přechodové až k turbulentnímu proudění.

2.4. Reynoldsovo číslo

Je definováno jako bezrozměrový zlomek určující kvalitu a typ proudu. Při překročení kritické hodnoty přechází proud do turbulence. Reynoldsovo číslo také bývá popsáno jako poměr mezi setrvačnými a vazkými silami proudění skutečné tekutiny [9].

$$Re = \frac{wD}{\nu} \quad 2-3$$

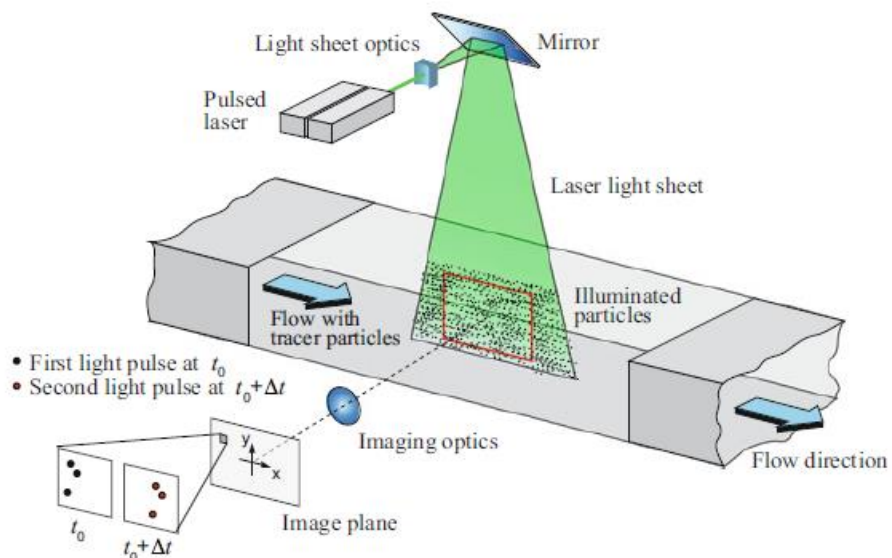
Kde w je charakteristická rychlost, D je charakteristický rozměr a ν je kinematická viskozita. Při $Re \leq 2320$ (pro proudění v trubce, u jiných geometrií je jiné) má proud čistě laminární charakter. Pokud nastane situace, kdy je $Re_{kr} < Re < 10^5$ nastává přechodové proudění (mezi laminárním a turbulentním). Při $Re > 10^5$ je již turbulentní charakter proudu.

[4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14]

3 PIV metoda

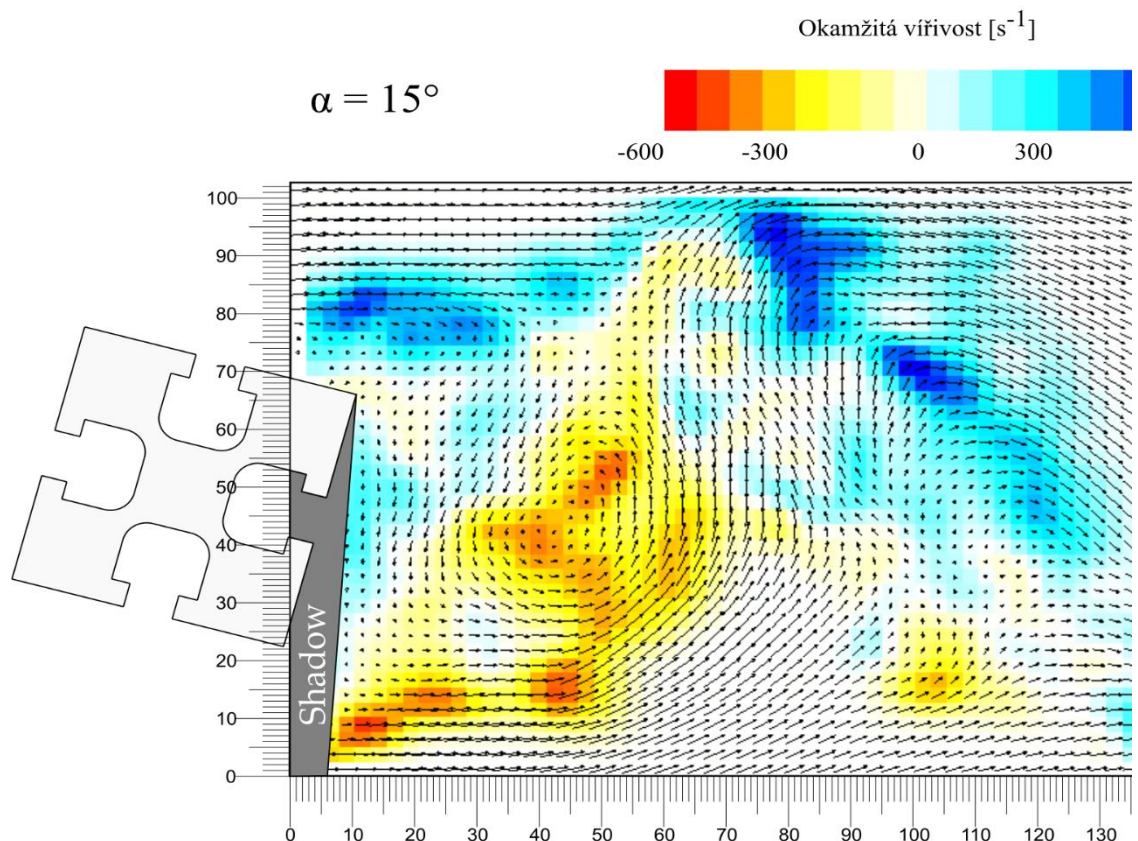
Particle image velocimetry neboli *obrazové měření rychlosti unášených částic* (OMRUČ) měří vektorové rychlostní pole proudící tekutiny. Rychlostní pole unášených částic je měřeno najednou v celé pozorované oblasti. Snímky drobných částic unášených proudem jsou zaznamenány ve zlomcích sekundy. Jednotlivé vektory lokálního posunutí částic jsou vypočítány na základě vzájemné korelace dvou obrázků. Jak je znázorněno na obr. 9, laserový paprsek je v jednom směru rozšířen cylindrickou čočkou a prochází tekutinou s trasovacími částicemi (mlhou). Na rovinu osvětlenou laserem je namířena kamera (CCD nebo CMOS) snímající pohyb částic. Kamera dokáže rozlišit 2 expozice oddělené pouze velmi krátkým časovým intervalem v řádu μs ($t_0 \rightarrow t_0 + \Delta t$) a následně lze vypočítat rychlosti částic v každém měřeném místě (ze znalosti času a vzdálenosti) a určit směr jejich pohybu (obr.9).

Před každým měřením musí být optika zkalibrována. Výhoda této metody je měření široké oblasti rychlostí, neinvazivnost laseru a možnost určení dalších charakteristik proudění jako je vířivost nebo průtok. Nevýhodou je nutnost sycení proudu částicemi a potřeba optického přístupu ze dvou kolmých směrů.



Obr. 9: PIV metoda v tunelu
Obrázek převzat z práce M. Raffela (2018) [15]

Jednotlivé snímky z kamery jsou zaznamenány do počítače a po nasnímání je nutné tato data vytržít. Vektorové pole je zobrazeno v měřítku v pravidelné mřížce (obr. 10)



Obr. 10: Okamžité vektorové pole s barevně označenou vířivostí. Proudění vzduchu za hliníkovým konstrukčním profilem. Vzdálenosti na osách jsou v mm.

Komplexnějších měření lze dosáhnout zapojením druhé kamery – stereo PIV, která bude snímat z jiného úhlu než první kamera. Touto technikou lze získat všechny 3 složky rychlosti ve zkoumané rovině. Stereo přístup však v této práci použit nebyl. Za zmínku ještě stojí současný pomalý vývoj tzv. *volumetrického PIV*, kdy se sleduje pohyb jednotlivých částic pomocí vícero kamer (3-8) v celém zkoumaném objemu. Technicky už však tato metoda patří spíše do rodiny PTV metod (*angl.*: Particle Tracking Velocimetry – měření rychlosti sledováním částic), jejichž výstupem jsou *trajektorie* odpovídající Lagrangeovskému přístupu, nikoli vektorové pole typické pro Eulerovský přístup k popisu pohybu tekutin.

3.1. Laser

Laser se zde využívá jako zdroj monochromatického světla a je tvořen aktivním prostředím, rezonátorem a zdrojem energie. Dodáváním energie do aktivního média dojde k vybuzení elektronů ze základní energetické hladiny do vyšší energetické hladiny a dochází k excitaci. Po určité době elektron přechází zpět do nižší energetické hladiny a emituje kvanta energie ve formě fotonů, které se odráží do rezonátoru a prochází prostředím.

Pro PIV se používají tyto typy laserů:

Argonový laser (Ar+ laser, $\lambda = 514, 488 \text{ nm}$) – plynový laser, u kterého je nutné dosáhnout vysokých hodnot ionizace a excitace. Emise jsou produkovány na několika

vlnových délkách, ze kterých jsou nejdůležitější $\lambda = 514$ nm (zelená) a $\lambda = 488$ nm (modrá). V PIV se používají pro měření nízkorychlostního proudění vody.

Neodym-YAG lasery (Nd:YAG lasery, $\lambda = 1064$ nm a $\lambda = 532$ nm) jsou nejpoužívanější lasery pro PIV. V nich je paprsek emitován ionty Nd³⁺. Používají se YAG krystaly – Yttrium-Aluminium-Granát. Tyto lasery mají dobré tepelné a mechanické vlastnosti a vysoké zesílení.

Neodym-YLF lasery (Nd:YLF lasery, $\lambda = 1053$ nm a $\lambda = 526$ nm) se využívají pro procesy, které vyžadují výkonné a spolehlivé laserové zdroje. Laser Nd: YLF (yttrium - lithium - fluorid) produkuje nejvyšší puls energie a lze ho provozovat na několika různých vlnových délkách.

Na experiment byl využit Nd:YAG laser (NEW WAVE RESEARCH-Solo 200xt) a trasovací částice byly produkovány generátorem mlhy Safex

3.2. Kamery CCD/CMOS

CCD (Charge coupled device/přístroj vázaný náboji) a CMOS (Complementary metal oxide semiconductor/komplementární znamená, že logické členy jsou tvořeny dvojicemi tranzistorů, zbytek zkratky vyjadřuje řídicí elektrodu, vyrobenou z hliníku a odizolovanou vrstvou oxidu křemičitého) kamery snímají světlo a převádí ho na elektrické pulsy (náboje) za použití fotodiod-fotocitlivých buněk umístěných na čipu. Rozdíl mezi nimi je ve zpracování dat. U CCD kamery dochází ke shromažďování signálů postupně z jednotlivých buněk do řídicí elektroniky, což je časově náročné. CMOS má oproti CCD u každé buňky obvod, který přenáší signál z jednotlivých buněk do procesoru. Z toho důvodu je plocha těchto buněk u CMOS menší než u CCD, a tudíž je výroba levnější a méně náročná.

Součástí kamer tvoří objektivy, jejichž volba závisí na ohniskové vzdálenosti, světelnosti a sférických a bodových vadách.

Pro experiment byla zvolena kamera od Dantec Dynamics Mk II Flow Sense, což je CCD kamera. Objektiv byl použit od značky Nikon-AF Micro NIKKOR s ohniskovou vzdáleností 60 mm, světelností a f/2,8.

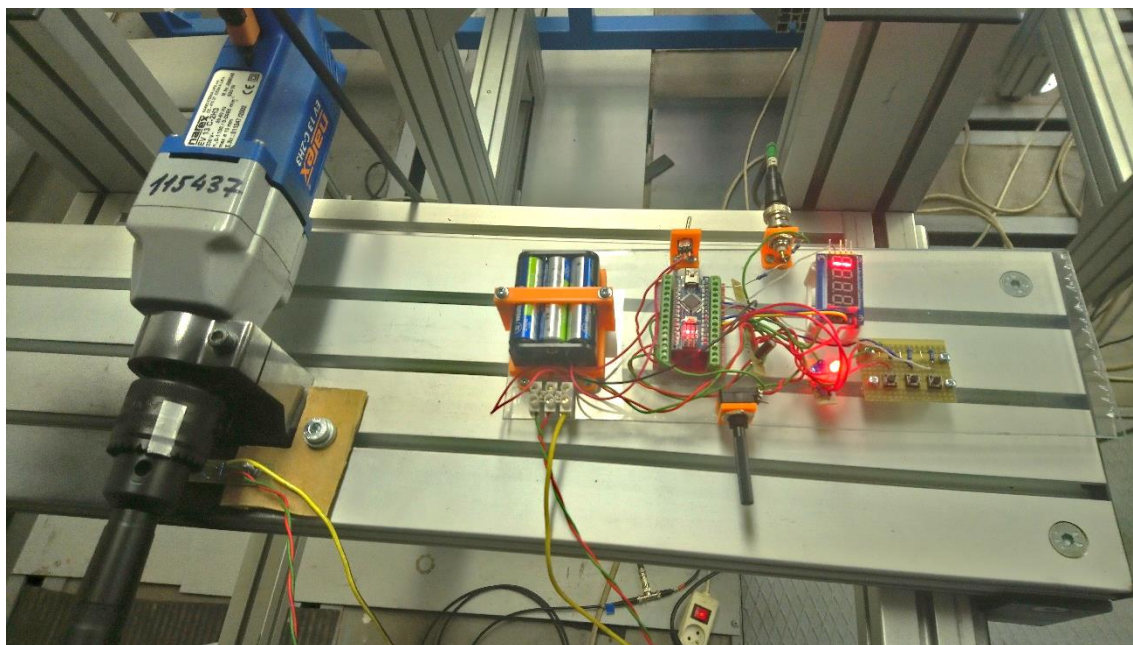
3.3. Kalibrace

Před každým měřením je třeba provést kalibraci, aby se dalo zjistit posunutí částic v proudu ve fyzikálních jednotkách (μm). Kalibrace byla provedena pomocí kalibračního terčíku, s pravidelně rozmístěnými shodnými body, který byl připevněn na místo, kde ležel pozorovaný objekt (fréza). Kamera byla zaměřena na terč a doostřena na požadovanou přesnost, poté byl zaznamenán snímek a byl proveden výpočet měřítka – mapovou funkcí, která spojuje rovinu obrazu s rovinou objektu. Tato kalibrace je uložena a používá se pro přesné výpočty vektorových polí ve stejném měřítku. [12] [16] [15] [17]

4 Synchronizace otáček frézy

Kvůli nerovnoměrnosti chodu vrtačky a požadavkům na co nejpřesnější měření jsme sestavili zařízení, které je připojeno přes počítač k PIV. Má za úkol řídit zaznamenání snímků kamerou po časových intervalech Δt (tak, aby byl viditelný posun částic) na označeném místě rotující frézy, které by na snímcích mělo být stále na stejném místě. Tuto funkci zajišťuje fotodioda, která je umístěna přímo pod rotující frézou, na níž je přilepen lesklý pásek, díky kterému je fotodioda schopna zachytit otáčky frézy a za daný interval Δt vyslat signál do počítače a do kamery.

Hlavní součástí zařízení je Arduino Nano, na kterém je nahrán program pro nastavení displeje, tlačítek, diod, potenciometru, BNC konektoru a signálu. Celé zařízení je možno napájet 6 tužkovými bateriemi nebo přes USB z počítače.

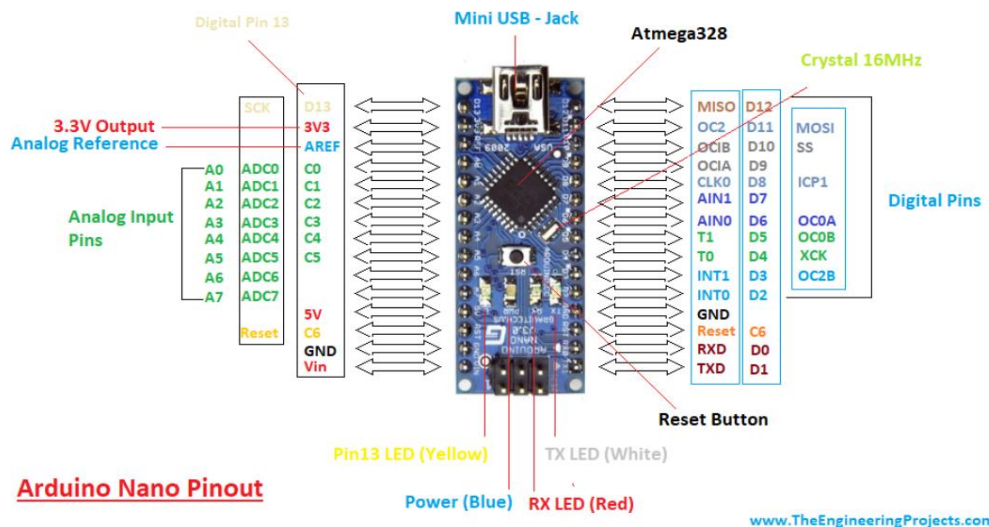


Obr. 11: Zařízení pro synchronizaci otáček frézy

4.1. Arduino

Arduino se používá pro získání signálů z jednotlivých součástek (senzorů a snímačů), které následně vyhodnotí ve formě výstupů (rozsvícení diody, displeje), aby došlo k vykonání požadovaných příkazů, musí být vytvořen program v programovacím jazyce Arduino. Tento program se nahrává na mikrokontrolér a zbylou část desky tvoří krystal, napájecí zdroj 5V a převodník. Podle náročnosti požadovaných funkcí existuje několik typů desek (Arduino Shield) – Nano, Uno, Mega, WeMos atd. s charakteristicky rozloženými konektory.

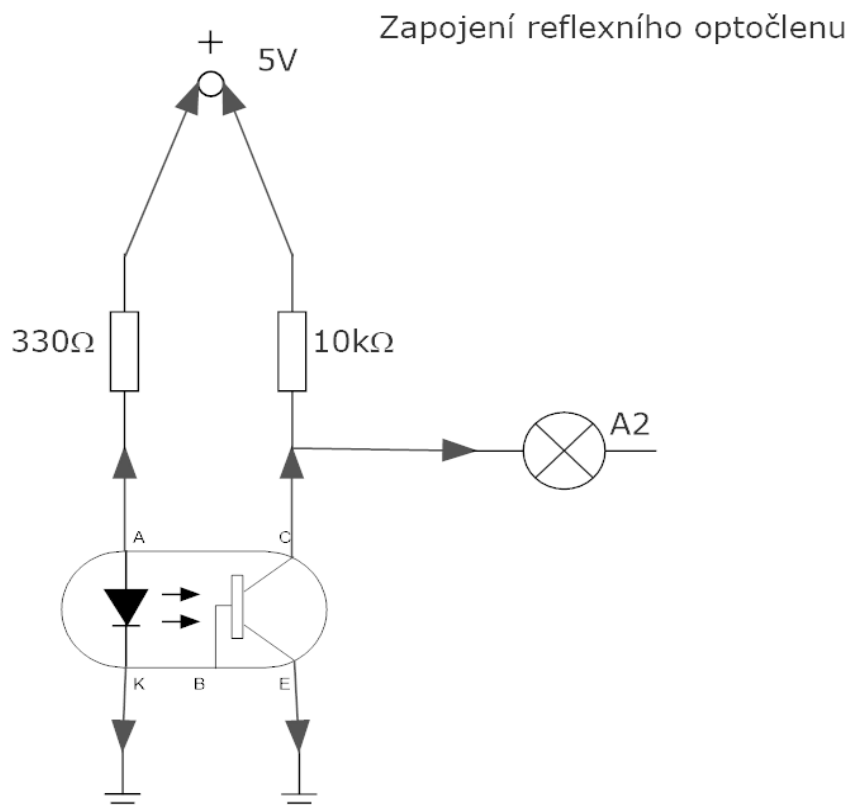
Arduino Nano (Obr.12) je nejmenší vývojová deska založená na ATmega328, která obsahuje vstupní/výstupní piny. Celé Arduino je umístěno na kompatibilním Nano Shieldu, z jehož výstupů (pinů) vedou kabely přímo k součástkám.



Obr. 12: Schéma a popis Arduina Nano
 Obrázek převzat z <https://www.theengineeringprojects.com> - Introduction to Arduino Nano

4.2. Součástky

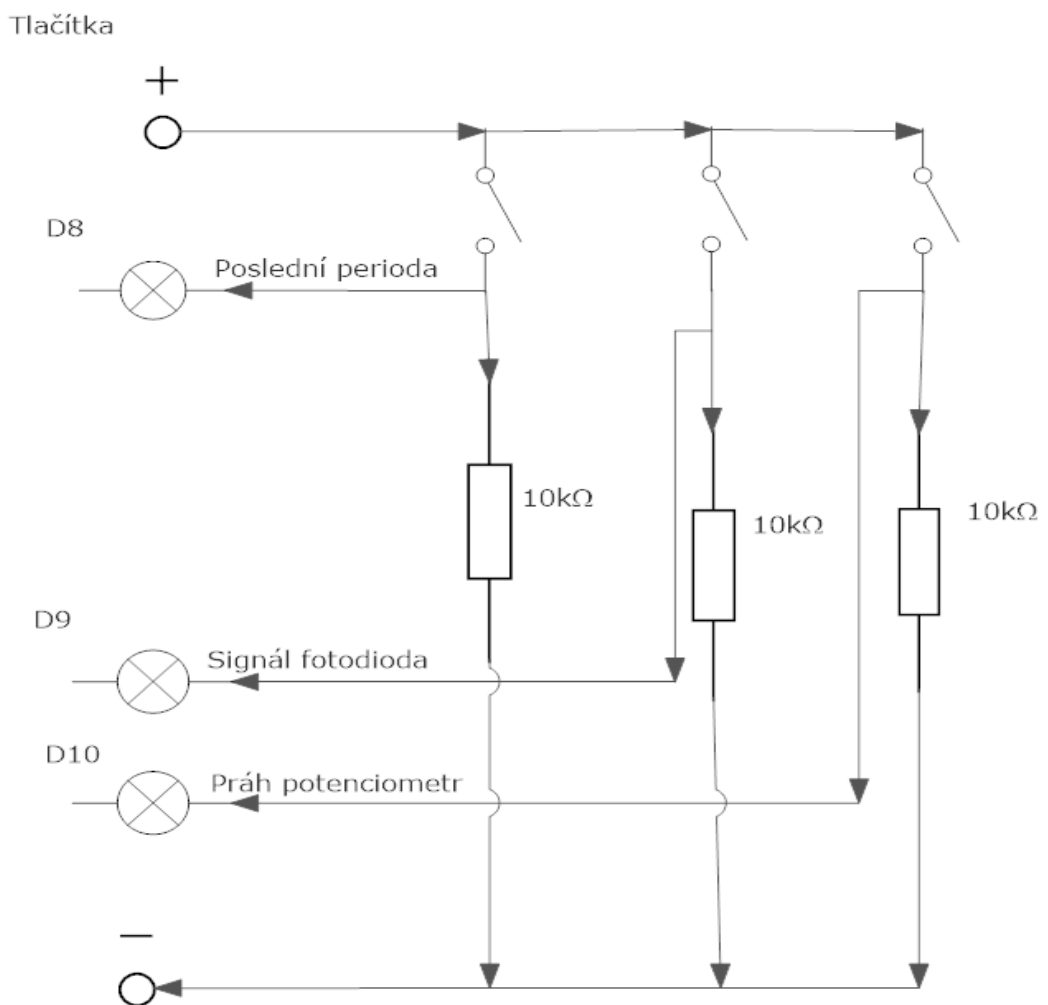
K našemu účelu bylo zapotřebí, kromě samotného programu, připojit několik komponent. Mezi ně patří potenciometr, kondenzátor, diody (2 signální, fotodioda), tlačítka, displej, rezistory, vypínač, BNC konektor a držák pro 6 tužkových baterií.



Obr. 13: Schéma zapojení reflexního optočlenu

Toto zapojení slouží k zaznamenání signálu z reflexního optočlenu QRD1113/14, který se skládá z přijímače (fototranzistoru) a vysílače (IR diody). Zapojení je uskutečněno přes kolektor (C) a emitor (E) (PIN 1,2) a anodu (A) a katodu (K) (PIN 3,4). Přenos signálu je uskutečněn následovně: infračervená dioda emituje záření, které je podkladem buď pohlceno (černá barva) nebo odraženo (bílá barva). Pokud jsou paprsky odraženy, dopadají na fototranzistor, na kterém je fotocitlivá vrstva na bázi tranzistoru a dojde k jeho sepnutí.

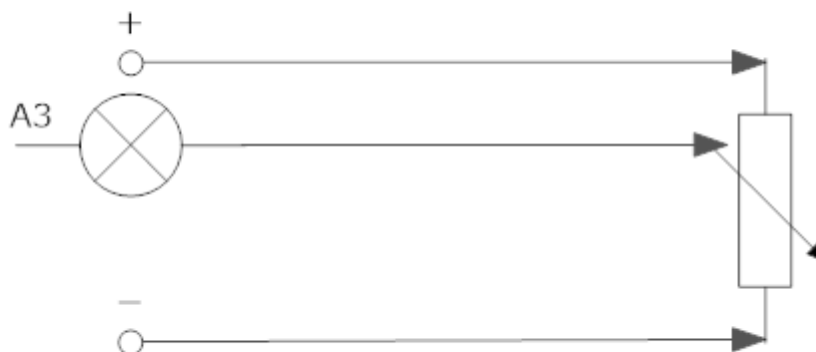
Metalizovaný rezistor $330\ \Omega$ je připojen proto, aby snižoval proud tekoucí diodou. Propojení přes $10\ \text{k}\Omega$ rezistor zajistí vybití záporného náboje v případě, že je tranzistor již vypnut, zároveň je jeho odpor tak velký, aby proudově nezatěžoval napájení v sepnutém stavu. Z kolektoru vystupuje signál do Arduina na analogový pin 2.



Obr. 14: Schéma zapojení tlačítek

Tlačítka jsou opět opatřeny rezistory, pokud by nebyly připojeny, došlo by ke zkratování napájecího obvodu. Jejich velikost je opět volena tak, aby v sepnutém stavu nebyl napájecí obvod zbytečně zatěžován, zároveň však tak, aby byl dostatečný proud pro sepnutí tranzistorů uvnitř Arduina. Z jednotlivých tlačítek jsou vysílány signály na piny D8, D9, D10, které po stisknutí tlačítka zobrazí hodnotu na displeji.

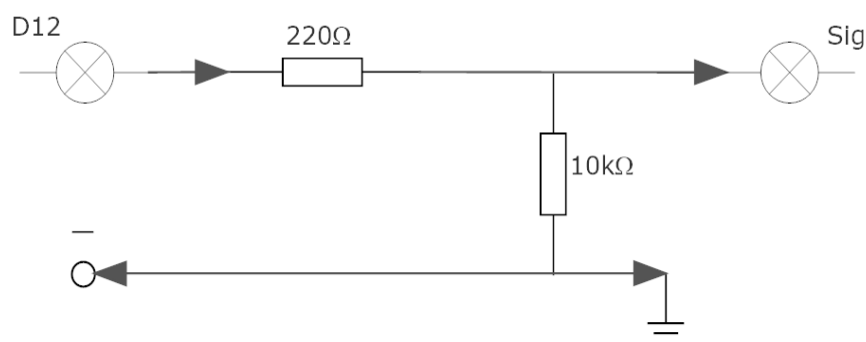
Potenciometr



Obr. 15: Schéma zapojení potenciometru

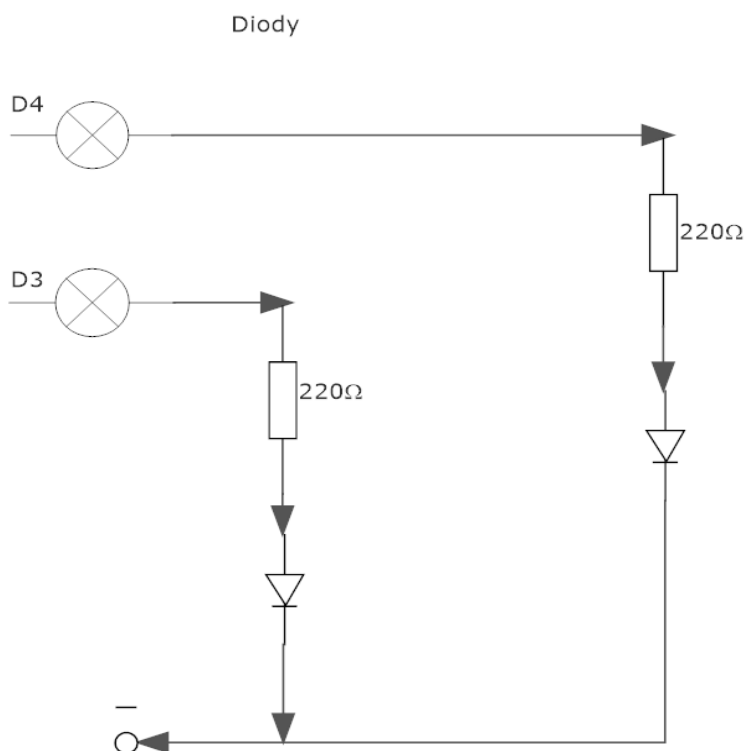
Potenciometr je součástka, která má za úkol přímou regulaci odporu (nastavení prahu) v obvodu otáčením jezdcy na otočné ose. Tento signál je vysílán na analogový pin 3.

BNC konektor (připojení k počítači-časovač)



Obr. 16: Schéma zapojení BNC konektoru

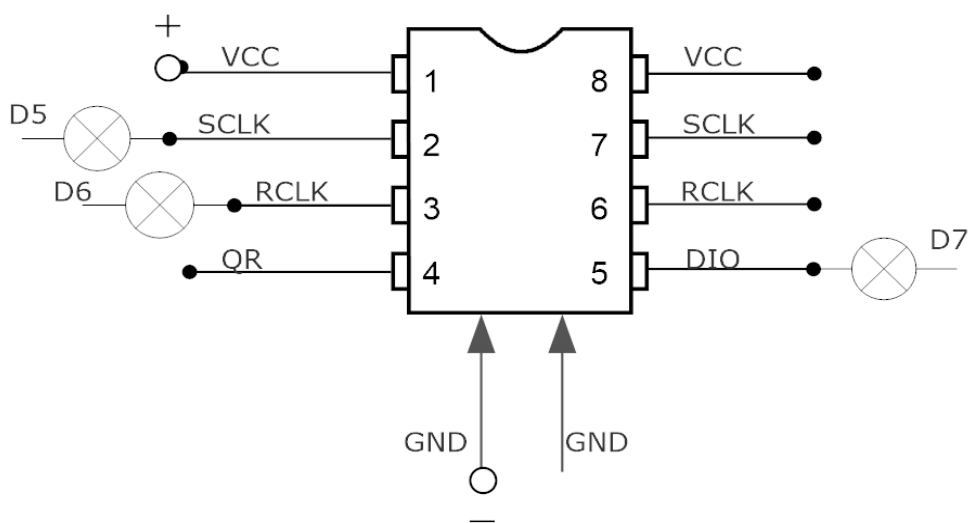
BNC konektor slouží k propojení PIV, počítače a reflexního optočlenu. Požadovaný počet snímků, pořízený kamerou, je přenesen do počítače a následně vytřízen a analyzován až do podoby vektorových polí.



Obr. 17: Schéma zapojení diod

První dioda se rozsvítí po zaznamenání signálu D3, který značí hodnotu větší, než je hodnota prahu (nastavená potenciometrem). Druhá dioda se rozsvítí, když je vyslán signál D4 pro PIV, aby byl pořízen snímek (kdykoliv uběhne Δt)

LED displej



Obr. 18: Schéma zapojení displeje

Signál D5, D6, D7 dává impuls k zobrazení číslic na displeji.

4.3. Program

Na analogový pin 2 je připojen senzor, který určuje spouštění (fototranzistor nebo tlakové čidlo).

Na analogový pin 3 je připojen potenciometr pro nastavení prahové hodnoty. Aby se zbránilo zdvojení šumu při porovnávání dvou zašuměných hodnot, je signál z A3 (z potenciometru) vyhlazován pohyblivým průměrem. Pokud se právě překročila prahová hodnota a zároveň doba od poslední takové události je delší než 1,5 ms, je spočtena perioda děje. Pokud je navíc doba od posledního spuštění signálu pro PIV alespoň 150 ms (jedná se o ochranu periodu, neboť maximální frekvence PIV aparatury je 7,4 Hz a ta by neměla být překročena), dojde ke spuštění signálu pro PIV, výstup je negován na pinech 12 a 4.

Je-li stisknuto tlačítko na pinu 8, je na displeji zobrazena perioda v milisekundách, je-li stisknuto tlačítko na pinu 9, je na displeji zobrazena hodnota signálu A2 (v relativních jednotkách o rozsahu 0 až 1023 *zhruba* odpovídající napětí 0 až 5 V), je-li stisknuto tlačítko na pinu 10, je na displeji zobrazena hodnota prahu A3.

Proměnné

```
#define SCLK 5
```

```
#define RCLK 6
```

```
#define DIO 7
```

```
byte digitBuffer[4];
```

```
long T;
```

```
//čas v milisekundách
```

```
long TBlik = 0, PBlik = 200000;
```

```
long TZ = 0;
```

```
long Perioda;
```

```
long Tsig=0, Psig = 2000, PsigPIV=150000;
```

```
int X2;
```

```
//signál
```

```
int Prah = 500;
```

```
bool Zap,ZapS;
```

```
const byte digit[21] = { //které diody se mají rozsvítit pro zobrazení jednotlivých cifer
```

```
0b11000000, // 0
```

```
0b11111001, // 1
```

```
0b10100100, // 2
```

```
0b10110000, // 3
```

```
0b10011001, // 4
```

```
0b10010010, // 5
```

```
0b10000010, // 6
```

```
0b11111000, // 7
```

```
0b10000000, // 8
```

```
0b10010000, // 9
```

```
0b01000000, // 0.
```

```
//čísla s desetinnou tečkou
```

```
0b01111001, // 1.
```

```
0b00100100, // 2.
```

```
0b00110000, // 3.
```

```
0b00011001, // 4.
```

```
0b00010010, // 5.
0b00000010, // 6.
0b01111000, // 7.
0b00000000, // 8.
0b00010000, // 9.
0b11111110, // err-náš znak pro chybu
};

const byte chr[4]= { //adresy jednotlivých pozic na ciferníku
0b00001000,
0b00000100,
0b00000010,
0b00000001
};

void setup() { // initialize digital pin LED_BUILTIN as an output
  pinMode(LED_BUILTIN, OUTPUT);
  pinMode(12,OUTPUT); //signál pro PIV
  pinMode(3,OUTPUT); //hodnota větší než práh
  pinMode(4,OUTPUT); //signál pro PIV - negace
  pinMode(RCLK, OUTPUT); //piny pro ovládání displeje
  pinMode(SCLK, OUTPUT);
  pinMode(DIO, OUTPUT);
  pinMode(8, INPUT); //tlačítka spouštěče displeje
  pinMode(9, INPUT);
  pinMode(10, INPUT);

  Serial.begin(9600); //definice sériové linky pro komunikaci s počítačem
  delay(500);
}

void loop() {
  T = micros(); //Základní časovou jednotkou jsou mikrosekundy
                //Jsou-li stisknuta tlačítka, zapíšeme na displej aktuální hodnotu.
  if (digitalRead(8) == HIGH)
    Zapsat(Perioda/100,true);
  //Zapíšeme poslední změřenou periodu v milisekundách s jedním desetinným místem
  if (digitalRead(9) == HIGH)
    Zapsat(X2,false); //Zapíšeme aktuální signál z čidla [0 - 1023]
  if (digitalRead(10) == HIGH)
    Zapsat(Prah,false);
  //Zapíšeme aktuální nastavení prahu (signál z potenciometru) [0 - 1023]
  //Poblikávání vestavěné diody (kontrola základní funkčnosti)
  if ((T - TBlik) < PBlik)
  {
    digitalWrite(LED_BUILTIN,HIGH);
  }
}
```

```
else
{
digitalWrite(LED_BUILTIN,LOW);
}
//reset bliknutí vestavěné diody + posláni na sériovou linku aktuálního signálu z čidla
if ((T-TBlik) > 2*PBlik)
{TBlik = T;
Serial.println(X2);
}
//Vytváčení signálu pro PIV, stejný signál na 2 pinech kvůli kontrolní diodě.
if ((T - Tsig)<Psig )
{
digitalWrite(4,HIGH);
digitalWrite(12,LOW);
}
else
{
digitalWrite(4,LOW);
digitalWrite(12,HIGH);
}
}
```

Čtení hodnoty senzoru

```
X2 = analogRead(A2);
//čteme hodnotu prahu. Kvůli odstranění šumu obsahuje pohyblivý průměr s
konstantou 11;
Prah = (10*Prah + analogRead(A3))/11; //indikace toho, zda je signál větší než práh
Zap = (X2>Prah);

if (Zap)
digitalWrite(3,HIGH);
else
digitalWrite(3,LOW);

//pokud se změnila nadprahovost signálu, vygenerujeme řídicí puls
if ((Zap==true) && (ZapS==false))
{
if (T-TZ >1500){ //ochrana proti šumu 1,5 ms
Perioda = T-TZ;
if ((T-Tsig)>PsigPIV) //PIV má maximální frekvenci 7 Hz, toto to omezí
Tsig=T;
TZ = T;
}
}
ZapS = Zap;
}
```

Ovládání displeje

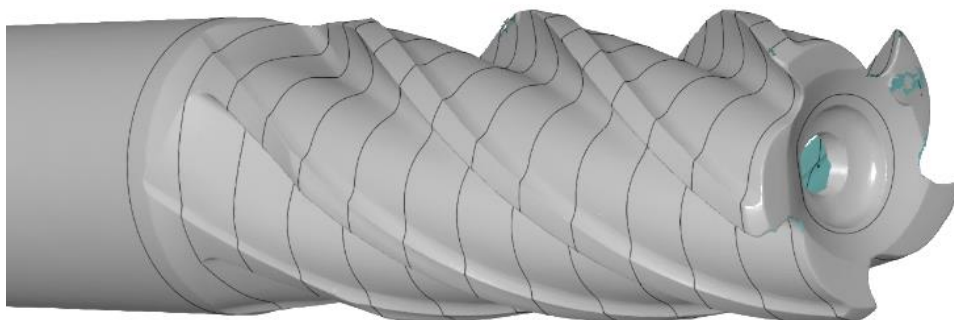
```
void showDisplay(){ //komunikace s displejem (zkopírováno z internetu)

for(byte i = 0; i <= 3; i++){
    digitalWrite(RCLK, LOW);
    shiftOut(DIO, SCLK, MSBFIRST, digit[digitBuffer[3-i]]);
    shiftOut(DIO, SCLK, MSBFIRST, chr[3-i]);
    digitalWrite(RCLK, HIGH);
    delay(1); //
}
}

void Zapsat(int X,bool tecka){//zapisuje číslo na displej. Proměnná tečka určuje, zda za předposlední číslicí má být desetinná tečka
    if ((X<0) || (X>9999))
        { //zapiši chybový znak, pokud je číslo záporné nebo moc velké
        digitBuffer[3] = 20;digitBuffer[0] =20;digitBuffer[1] = 20;digitBuffer[2] = 20;
        }
    else{
        digitBuffer[3] = X % 10;
        digitBuffer[2] = (X/10)% 10;
        digitBuffer[1] = (X/100)% 10;
        digitBuffer[0] = (X/1000)% 10;
        if (tecka==true)
            digitBuffer[2]+=10;
    }
    showDisplay();
}
```

[18] [19]

5 Fréza



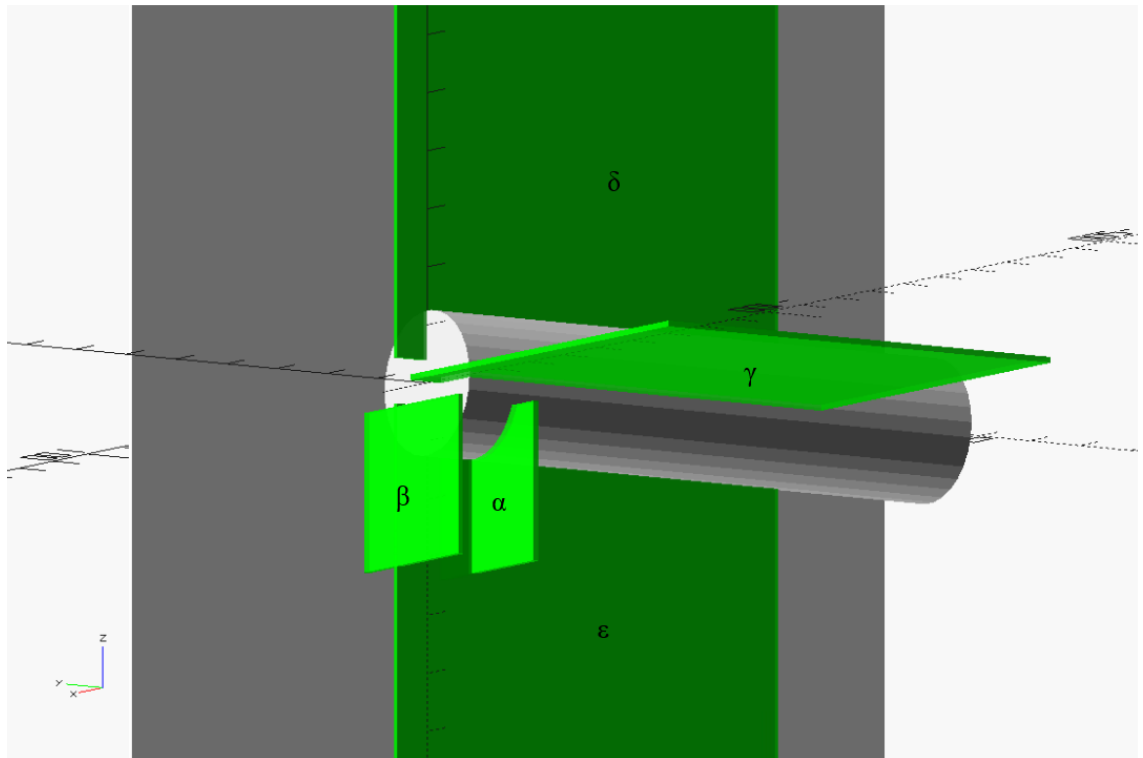
Obr. 19: Použitá fréza naskenovaná 3D skenerem ATOS

K experimentu je použita monolitní stopková válcová čelní fréza s 5 břity z povlakované (TiN) rychlořezné oceli (obr. 19). Velký průměr frézy je 25,3 mm, menší průměr je 15,1 mm a aktivní délka frézy měří 65 mm. Upnutí je provedeno přes kuželovou stopku šroubem do vrtačky (Narex EV 13 C-2H3/0-2650 min⁻¹), která je upevněna k rámu. Na vrtačce byly nastaveny 2 hodnoty otáček – maximální (19,7 Hz) a minimální (7,72 Hz), při kterých probíhalo měření. Kromě změny otáček se dá také posunout reflexní pásek, předávající signál reflexnímu optočlenu, v tomto případě byl zvolen posun o 3 zuby na vrtačce a dále čas mezi pulzy laseru Δt , který byl měněn s ohledem na otáčky a měřenou rovinu.

S pomocí desky, která slouží jako frézovaný předmět, bylo nasimulováno frézování. Kvůli proudícímu vzduchu z vrtačky musí být přidána další deska kryjící vrtačku, aby nebylo ovlivněno proudění okolo frézy, což se projevuje hlavně při maximálních otáčkách.

Aby bylo možno zaznamenat proudění, je použit generátor mlhy Safex F2010, který generuje částice velikosti cca 1 μm , jež jsou vstřikovány po určitých dávkách do okolí frézy a následně snímány metodou PIV. Nevýhodou je nerovnoměrné rozmístění částic a velká rychlost rozptýlení, což má za následek nedostatek částic na snímcích, které vede k chybnému vyčíslení vektorového pole. Z tohoto důvodu musí být mlha vstřikována v určité vzdálenosti o určité intenzitě a v určitém okamžiku, protože přes mnoho částic neprojde laserový paprsek a zachytí se pouze šum. Na ostrost částic má také vliv nastavení výstupního energetického paprsku (15-200 mJ při 532 nm).

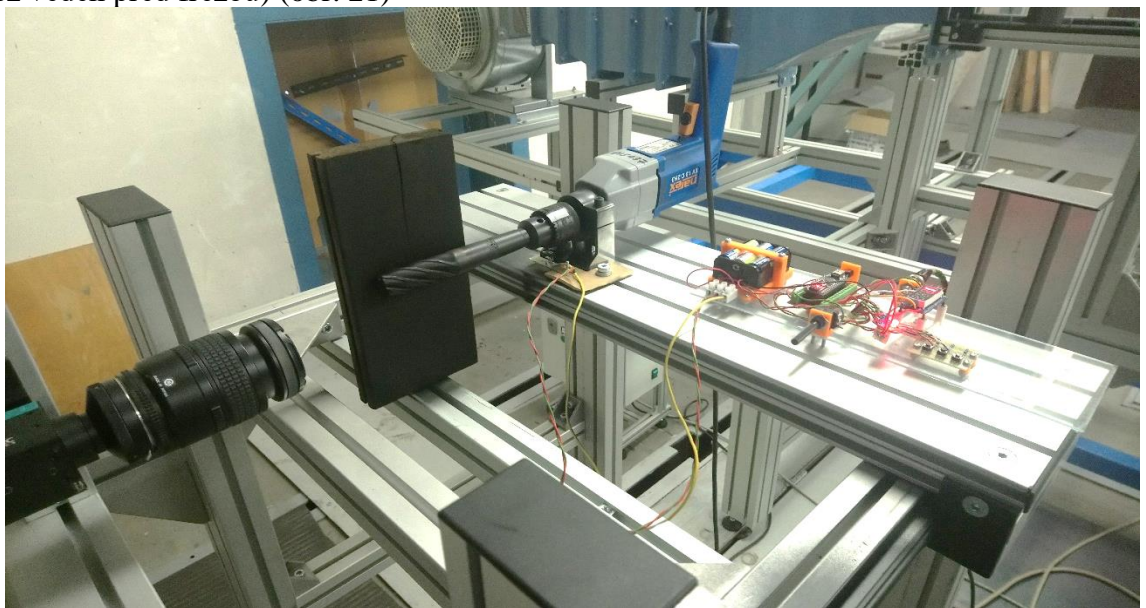
Na obr. 20 je znázorněno, které roviny se podařilo úspěšně naměřit. Ve všech bylo zaznamenáno proudění při maximálních i minimálních otáčkách a v rovině α navíc také proudění na pozadí bez rotace frézy a posunutí signalizačního pásku o 3 zuby. Na frézu byla kvůli zpracování dat, použita maska, jelikož v poloze frézy je vyhodnocena nulová rychlost a při středních hodnotách se berou data z celého pole, došlo by k ovlivnění číselných výsledků.



Obr. 20: Měřené roviny označené jako zelené čtverce. Šedý válec reprezentuje frézu.

Rovina α zachycuje proudění vzniklé na spodní části frézy. V tomto případě je laser namířen na bok frézy, kde špička je nulový bod a měřená rovina je 10 mm směrem ke středu (řez je veden frézou). Kamera míří na čelo frézy a deska je ve vertikální poloze z boku frézy (obr.21)

Rovina β znázorňuje proudění opět ve spodní části frézy, při stejném nastavení kamery a desky, ale s odlišným posunutím laseru o 5 mm od nulového bodu před frézu (řez veden před frézou) (obr. 21)



Obr. 21: Sestava pro rovinu α a β

Rovina γ vznikne prohozením kamery a laseru. Kamera nyní míří na bok frézy a zachycuje její horní část i s deskou, která je stále vertikálně na jejím boku. Laser míří na doprostřed čela (obr.22)



Obr. 22: Rovina γ

Touto sestavou měl být zjištěn průběh proudění a vznik vírů podél frézy (na válcové části). Obráběný povrch se nyní nachází na pozadí, kde je vykreslováno vektorové pole. Nevýhoda tohoto umístění se ukazuje při nedostatku částic mlhy. Kamera zachytává místo nich letokruhy dřeva desky a na některých snímcích tedy dochází ke vzniku šumu.

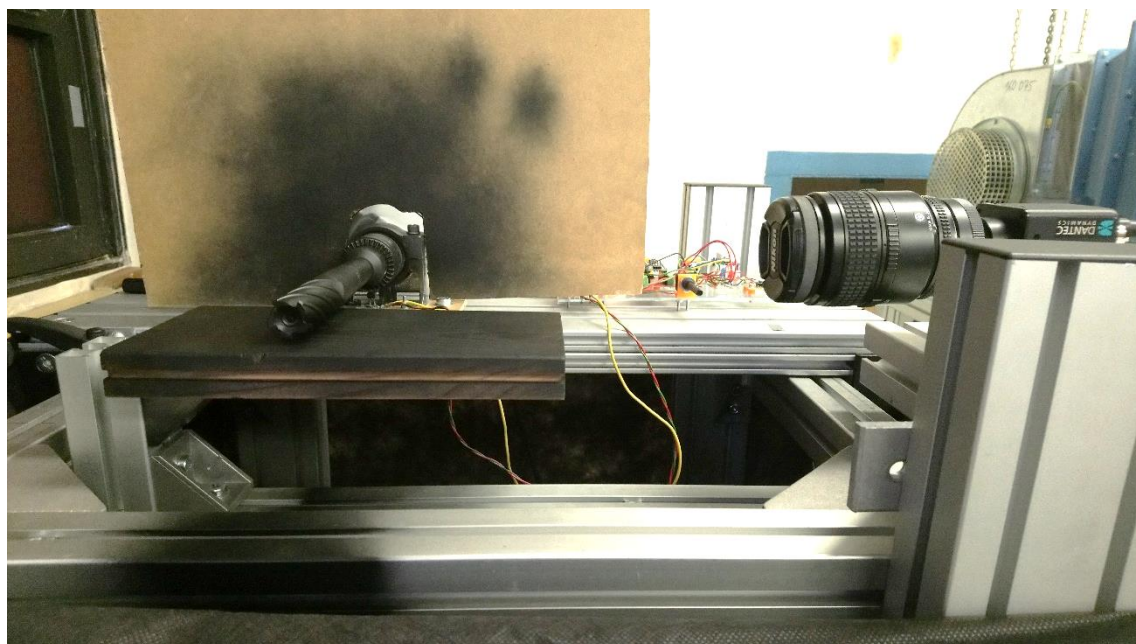
Rovina δ a ϵ jsou výsledkem změny polohy desky. V prvním případě je deska umístěna pod frézou a ve druhém je deska připevněna nad frézu. V obou případech jsou kamera i laser namířeny na bok desky.

Rovina δ se tedy od roviny γ liší pouze v umístění desky (pod frézou), díky které mělo být zjištěno, do jaké míry deska ovlivňuje proudění způsobené rotací frézy. (obr. 23)

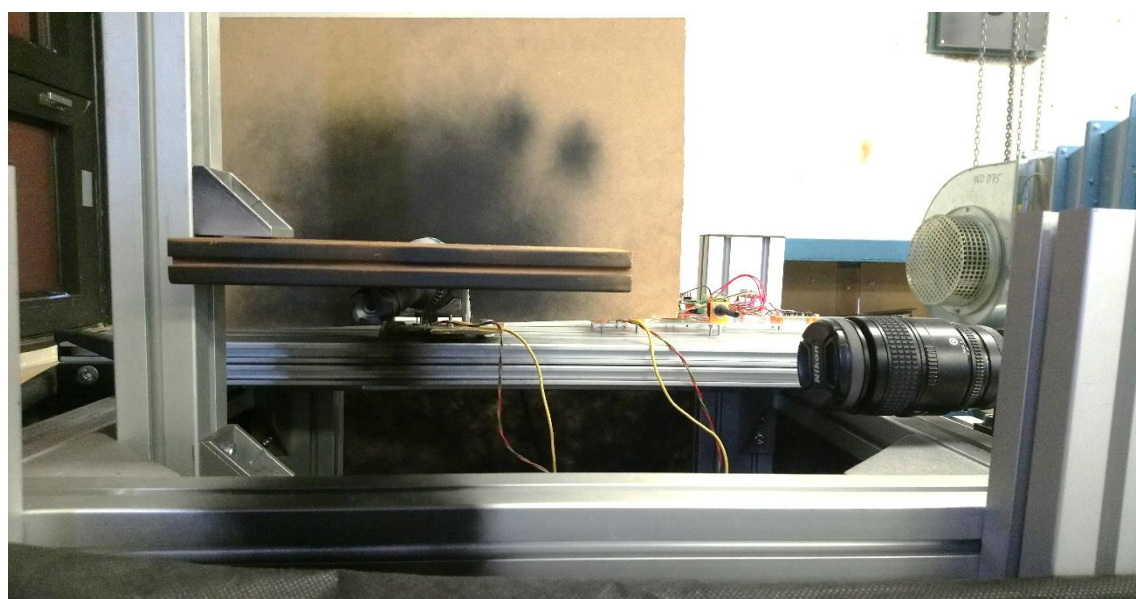
Rovina ϵ

V rovině δ byl zjištěn vývoj proudění, kdy byla deska pod frézou. Nyní je deska zrcadlově umístěna nad frézou, aby bylo ověřeno, zda má proudění směřující dolů stejný průběh, jako když míří vzhůru. Při tomto umístění desky mohou být struktury v proudění „staré“, oproti zbylým možnostem upevnění, kde jsou proudové struktury na začátku či uprostřed svého vývinu. Z toho důvodu nedochází (v takovém množství) k tvorbě koherentních vírových struktur, což lze vidět na grafech TKE a entropie. Při zkoumání vířivosti opravdu menší víry vznikají, ale v průběhu měření se rychle rozpadají.

Při měření této roviny, musel být přidělán ke konstrukci obal, který měl udržovat počet částic a směr až k fréze a generátor mlhy musel být taktéž umístěn do tohoto uzavřeného objektu. Toto řešení by mohlo být později, při dalších pokusech, použito i u zbylých rovin, neboť umožňuje získání mnohem kvalitnějších výsledků. (Obr. 24)



Obr. 23: Rovina δ



Obr. 24: Rovina ϵ

6 Naměřená data

Při vyhodnocení dat byla pozornost soustředěna na výsledky *střední hodnoty rychlosti proudění tekutiny* (kromě vířivosti zpracovávané z okamžitých hodnot), ze které se následně získávají další data:

Turbulentní kinetická energie – polovina střední hodnoty fluktuací rychlostí (diagonální složky Reynoldsových napětí). Experiment byl prováděn v rovině, takže počítáme pouze s rychlostmi u_1, u_2 a $u_3 = 0$

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_k u'_k} \rightarrow k = \frac{1}{2} \overline{u_k'^2} = \frac{1}{2} (\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2}) \quad 6-1$$

Enstrofie – je definována jako korelace střední hodnoty fluktuací vířivosti. Charakterizuje víření nestacionárního proudění. I zde je $u_3 = 0$, a proto z definice vířivosti bereme pouze poslední člen $\frac{\partial u_2}{\partial x} - \frac{\partial u_1}{\partial y}$, který je dále použit pro výpočet enstrofie.

$$\zeta = \frac{1}{2} \overline{\omega'_k \omega'_k} \rightarrow \zeta = \frac{1}{2} \overline{\omega_k'^2} = \frac{1}{2} (\overline{\omega_1'^2} + \overline{\omega_2'^2} + \overline{\omega_3'^2}) \quad 6-2$$

Vířivost - je-li $\text{rot}(\vec{u}) \neq \vec{0}$, je vektorové pole vírové, konkrétní oblast nenulové rotace se nazývá vír. Vířivost je definována jako rotace rychlosti \vec{u} , v turbulentním poli je nenulová (koncentruje se do jader vírů) a má vliv na protahování vírů.

$$\text{rot}(\vec{u}) = \vec{\omega} = \nabla \times \vec{u} = \left(\frac{\partial u_3}{\partial x} - \frac{\partial u_2}{\partial z}, \frac{\partial u_1}{\partial z} - \frac{\partial u_3}{\partial x}, \frac{\partial u_2}{\partial x} - \frac{\partial u_1}{\partial y} \right) \quad 6-3$$

Divergence – součet parciálních derivací složek rychlostí

$$\text{div}(\vec{u}) = \nabla \cdot \vec{u} = \frac{\partial u_1}{\partial x} + \frac{\partial u_2}{\partial y} + \frac{\partial u_3}{\partial z} \quad 6-4$$

Pozn. *Hamiltonův operátor nabra*

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad 6-5$$

Jelikož použitý program na zpracování surových obrazových dat vyhodnocuje frézu jako šum a došlo by k ovlivnění vektorového pole, byla do každé roviny přidána maska, která kryje polohu frézy.

U každého grafu (1-30) je v levém horním rohu vypočtena průměrná rychlost a turbulentní kinetická energie v celé zobrazené oblasti. Jednotlivé grafy byly vytvořeny z vyexportovaných dat PIV, kdy bylo průměrně zaznamenáno 150 snímků, které bylo třeba protřídit od již zmíněných chyb měření (nedostatek/velké množství částic, chyby kamery...). Podle naměřených dat (vznik vírů, otáček, množství šumu, atd.) se rozhodovalo, jaké funkce (TKE, enstrofie, vířivost, ...) budou na výsledky aplikovány.

[4]

Tabulka 1: Výsledná naměřená data (průměrné hodnoty jednotlivých měření)

| Výsledky | | Střední rychlost u [ms ⁻¹] | Průměrná rychlost v [ms ⁻¹] | Kinetická energie středního proudu [m ² s ⁻²] | TKE [m ² s ⁻²] | Enstrofie [s ⁻²] | Střední vířivost [s ⁻¹] |
|--------------------------------------------|-----|------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| Z10 (α) | Max | 4,02E-02 | 2,84E-02 | 3,300E-03 | 0,752 | 1,12/10000 | / |
| | Min | 1,92E-02 | 1,46E-02 | 8,230E-04 | 0,694 | 1/10000 | / |
| Z-5 (β) | Max | 1,53E-02 | 2,79E-02 | 1,800E-03 | 0,835 | 0,54/150 | / |
| | Min | 9,53E-03 | 1,03E-02 | 6,680E-04 | 0,395 | 0,298/150 | / |
| Bok_ Strana (γ) | Max | 1,32E-01 | 3,44E-02 | 2,380E-02 | 1,840 | 7,52/10000 | 1,84/90 |
| | Min | 1,17E-02 | 1,08E-02 | 2,620E-03 | 0,148 | 0,967/1000 | 1,47/40 |
| Bok_Pod (δ) | Max | 6,73E-02 | 5,55E-02 | 2,050E-02 | 3,340 | 3,51/10000 | 3,36/70 |
| | Min | 1,28E-03 | 3,92E-02 | 3,250E-03 | 0,093 | 0,341/1000 | 0,092/40 |
| Bok_Nad (ε) | Max | 9,72E-02 | 7,45E-02 | 3,010E-02 | 2,640 | 18,5/20000 | 2,65/70 |
| | Min | 5,94E-02 | 8,60E-02 | 9,840E-03 | 0,335 | 2,23/3000 | 0,328/40 |

Výsledky z tabulky 1 vyplývají z níže uvedených naměřených dat každé z rovin. Hodnoty v tabulce jsou průměrem okamžitých hodnot jednotlivých měření (bez započítání frézy, která je brána jako nula a ovlivňuje výsledky). Při porovnání této tabulky s údaji na grafech, lze si všimnout, že se čísla mění. To je dáno tím, že při tvorbě grafů (obrázků) bylo bráno celé pole (i se zamaskovanou frézou), které bylo převedeno na střední hodnoty, a k tomu nastaveno na vyšší meze enstrofie a vířivosti (čísla za lomítkem), aby byl vidět rozdíl mezi oblastmi okolo frézy. Údaje před lomítkem jsou okamžité a platí pro celé vektorové pole. U roviny α a β nebyla určována vířivost, neboť je při tomto pohledu mimořádně lokalizovaná v blízkosti frézy a je zde podezření, že může být výsledkem pouze smyku, nikoli otáčení.

Nejvyšších hodnot rychlostí (na boku) je naměřeno na boku frézy s deskou nad frézou (což opět dle dat na grafech srovnání S1-S6 nebo SMax, SMin není viditelné, protože jsou to snímky buď s průměrnou hodnotou středních hodnot, nebo snímky okamžitých rychlostí, kde rychlost kolísala dle počtu částic). Tento přesný výsledek je očekávaný, protože u desky pod frézou lze sledovat spíše energetické víry (menší rychlost, vyšší TKE) a u desky nad frézou setrvačné, které jsou menší a mají vyšší rychlost. Boční rovina byla sledována nejvíce kvůli vývoji proudění, které bude pozorovatelné na nadcházejících grafech, porovnávajících grafech a histogramech.

Všechny výpočty, úprava dat a jejich vyhodnocování dle požadovaných veličin (enstrofie, TKE a vířivost) byly provedeny v programu vytvořeném vedoucím této práce.

6.1. Turbulentní kinetická energie (TKE)

Na grafech 1-10 lze vidět příklady, jak vypadá prostorové rozložení turbulentní kinetické energie v každé rovině při maximálních a minimálních otáčkách s časovými intervaly $\Delta t = 1500-2000 \mu s$. Každý graf představuje 1 měření, které je provedeno za stejných podmínek jako ostatní. Data jednotlivých měření byla vyfiltrována a převedena z okamžitých rychlostí (po odstranění špatných snímků zbylo cca 140 záznamů) na střední hodnotu rychlosti (1 snímek). Turbulentní kinetická energie představuje polovinu ze střední hodnoty fluktuací rychlostí částic a na jednotlivých grafech se nejvíce projevuje na dolní hraně frézy, kde dochází k vypuštění nabraných částic na desku. Bílé místo představuje frézu, která byla zamaskována z důvodu ovlivnění vykreslení středních hodnot. V těsné blízkosti frézy (pravý kraj grafu) se nachází deska (obráběný povrch), do které částice okamžitou rychlostí narážejí a dochází k jejich rozptylu. Ze skutečnosti, že naměřená turbulentní kinetická energie je nenulová, je patrné, že proudění okolo frézy je turbulentního charakteru. Škála v levém dolním rohu každého snímku je pouze orientačně nastavená tak, aby byl vidět rozdíl hodnot mezi jednotlivými oblastmi pole.

Maximální otáčky

Při porovnání grafů s hodnotami v tabulce 1 dosahuje nejvyšší TKE rovina δ , tedy umístění desky pod frézou, kde si lze i při dalších vyhodnoceních všimnout vzniku energetických vírů. U roviny α a β ovlivňuje fréza proudění pouze v nejbližším okolí a díky směru kamery nejsou víry pozorovatelné. Z toho důvodu byly přidány zbylé roviny, na kterých jsou tyto struktury pozorovatelné, a pro jejich další výzkum byla deska otáčena po obvodu frézy. Při tomto pootáčení desky bylo zjištěno, že v rovině γ a δ je vývoj proudu na začátku, u roviny ϵ je proud již vyvinutější.

Minimální otáčky

U minimálních otáček (graf 6-10) byl postup stejný jako u maximálních. Tentokrát byly nastaveny parametry na delší časový interval mezi snímky ($\Delta t = 3000 \mu s$) a bylo třeba dodat více částic. Kvůli poklesu rychlosti došlo k poklesu TKE a rychlému zániku vírů.

Maximální otáčky

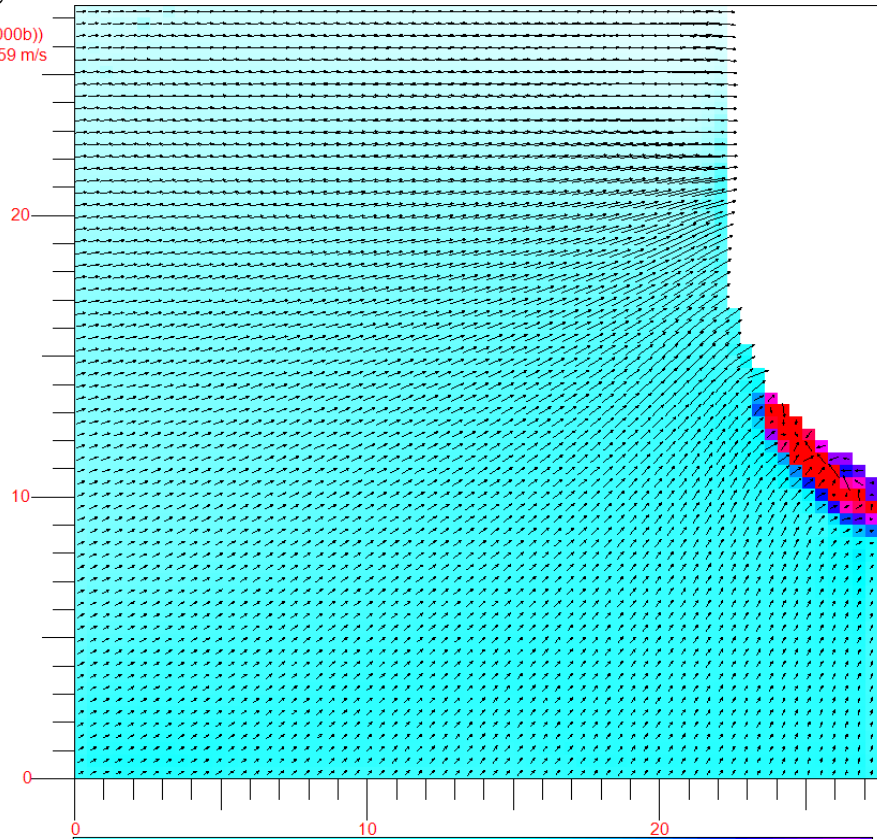
SP-Filtr(Filtr(z10NmaxT2000b))
Průměrná rychlost = 0,0559 m/s
E = 0,00169 m²/s²

0,1 m/s
0

Rovina α

TKE [m²/s²]
0,01

0



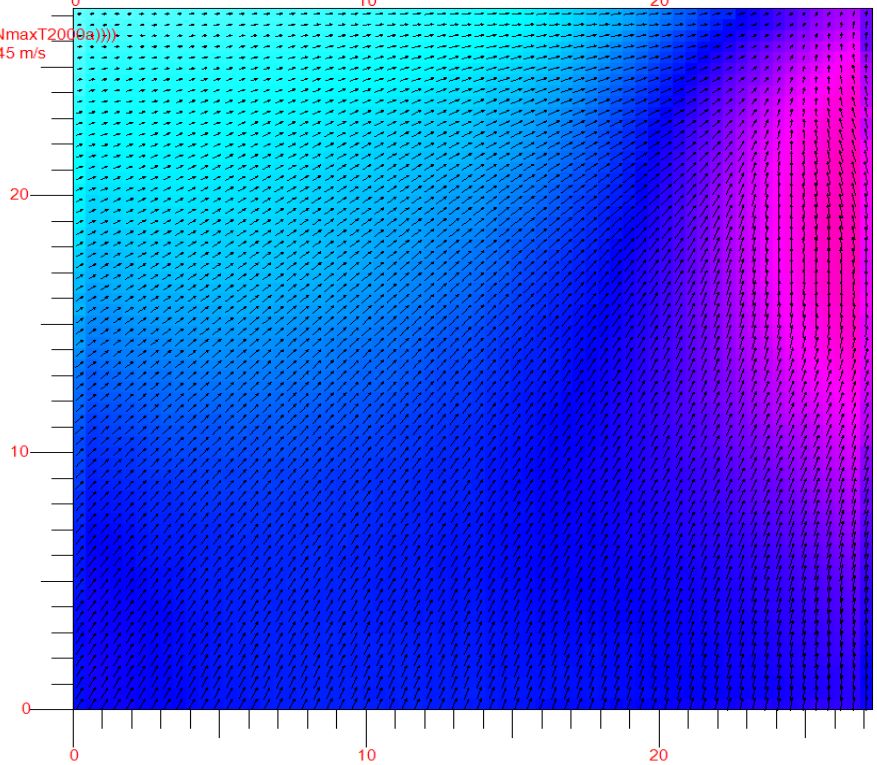
SP-Filtr(Filtr(Filtr(z-5NmaxT2000a)))
Průměrná rychlost = 0,0345 m/s
E = 0,000625 m²/s²

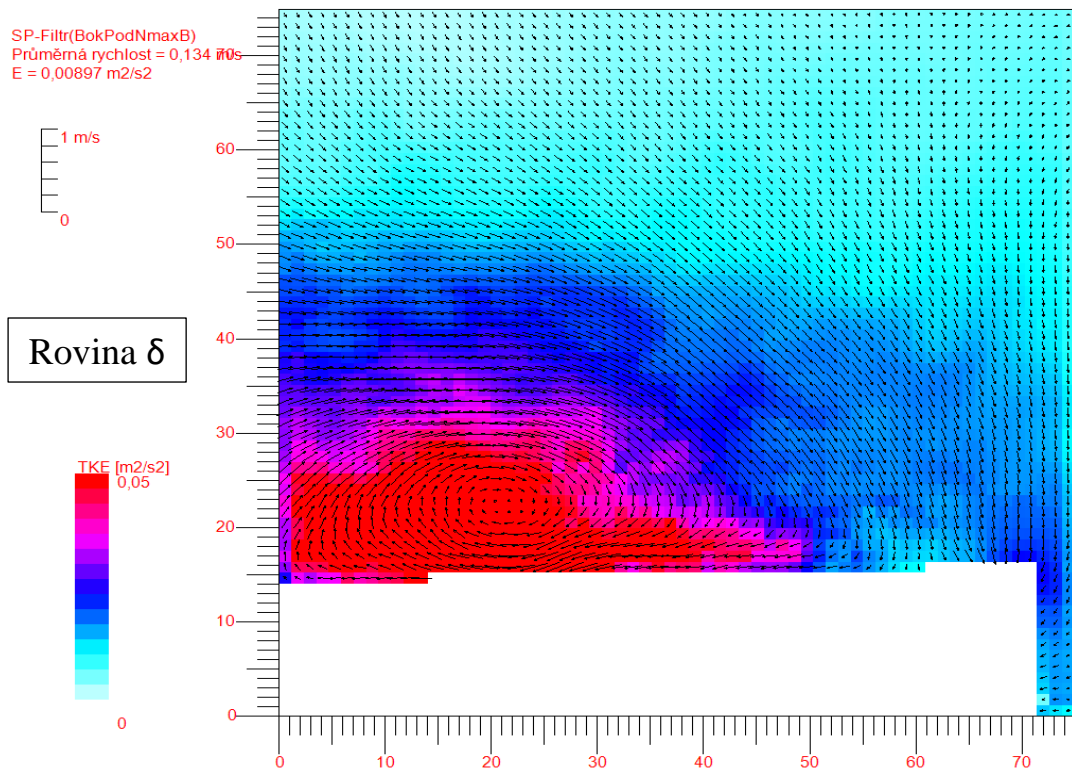
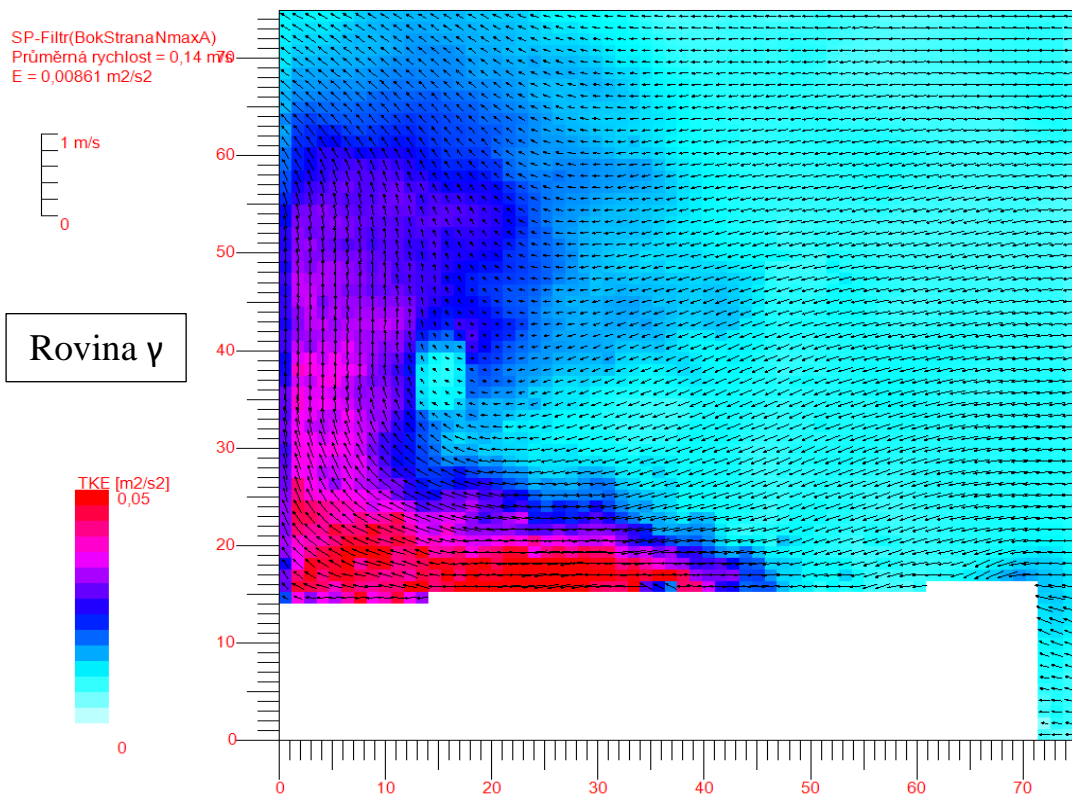
0,1 m/s
0

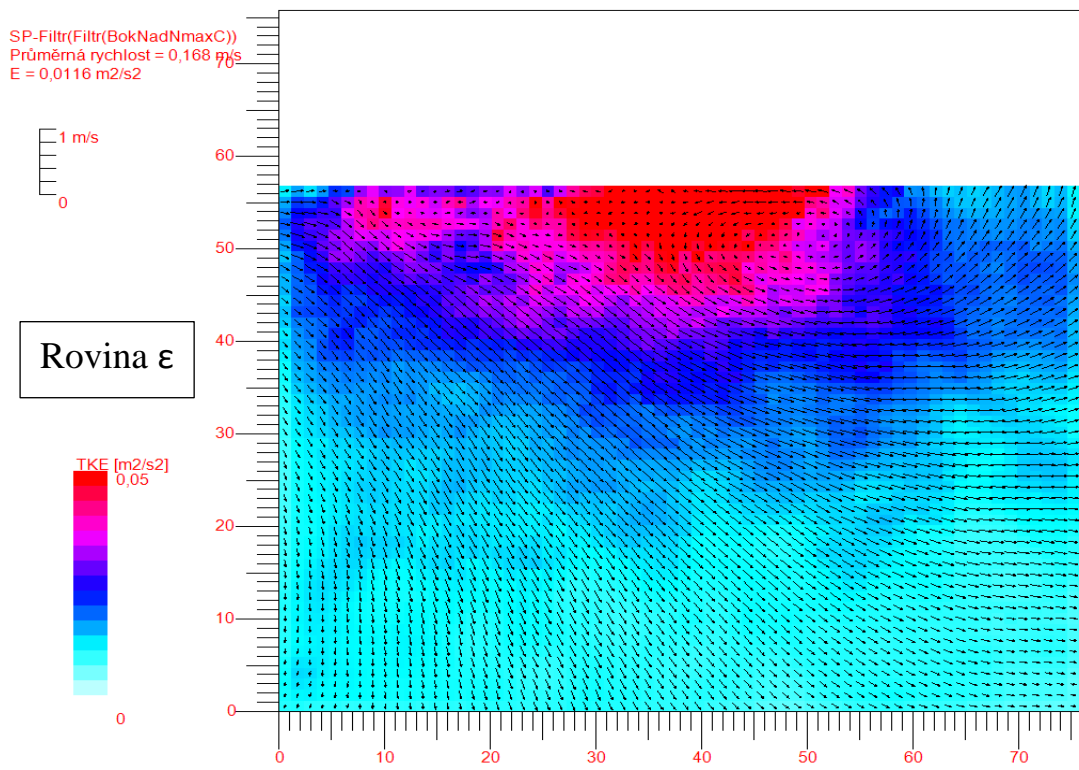
Rovina β

TKE [m²/s²]
0,003

0

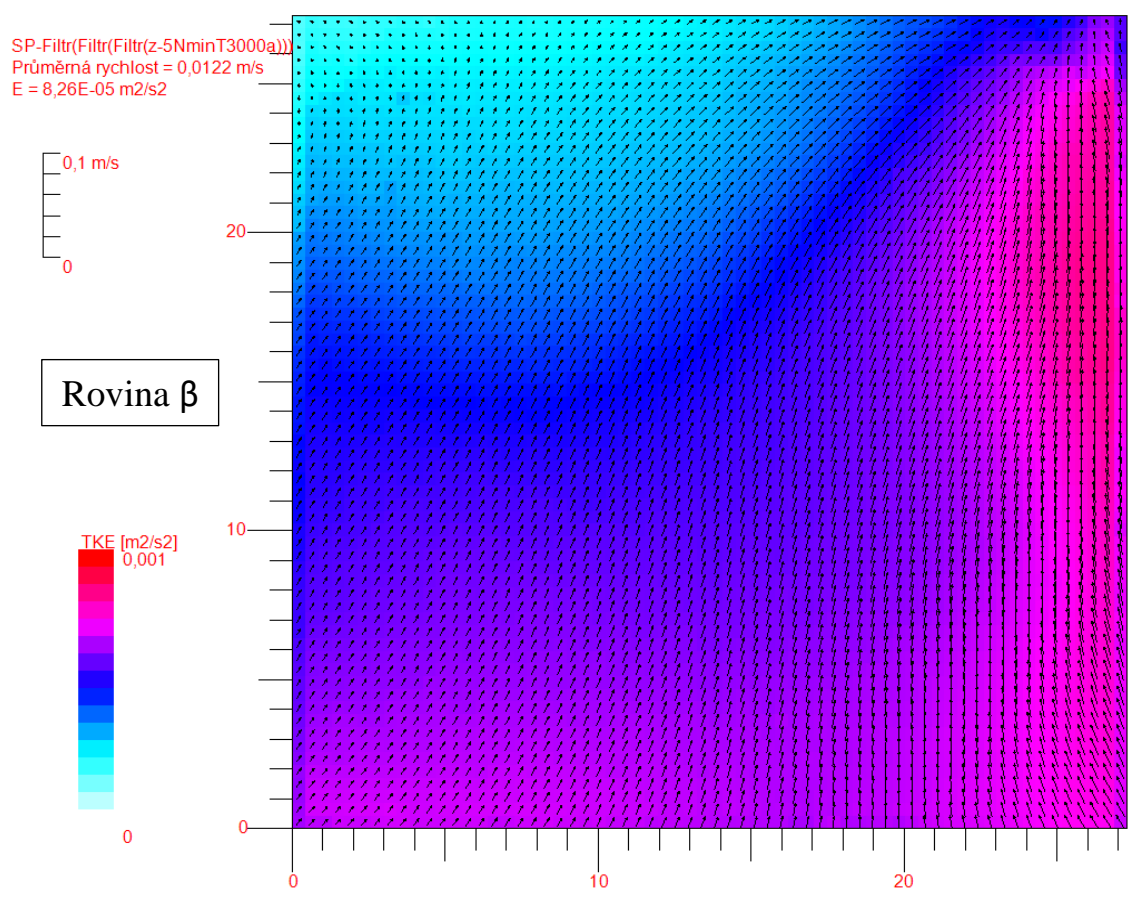
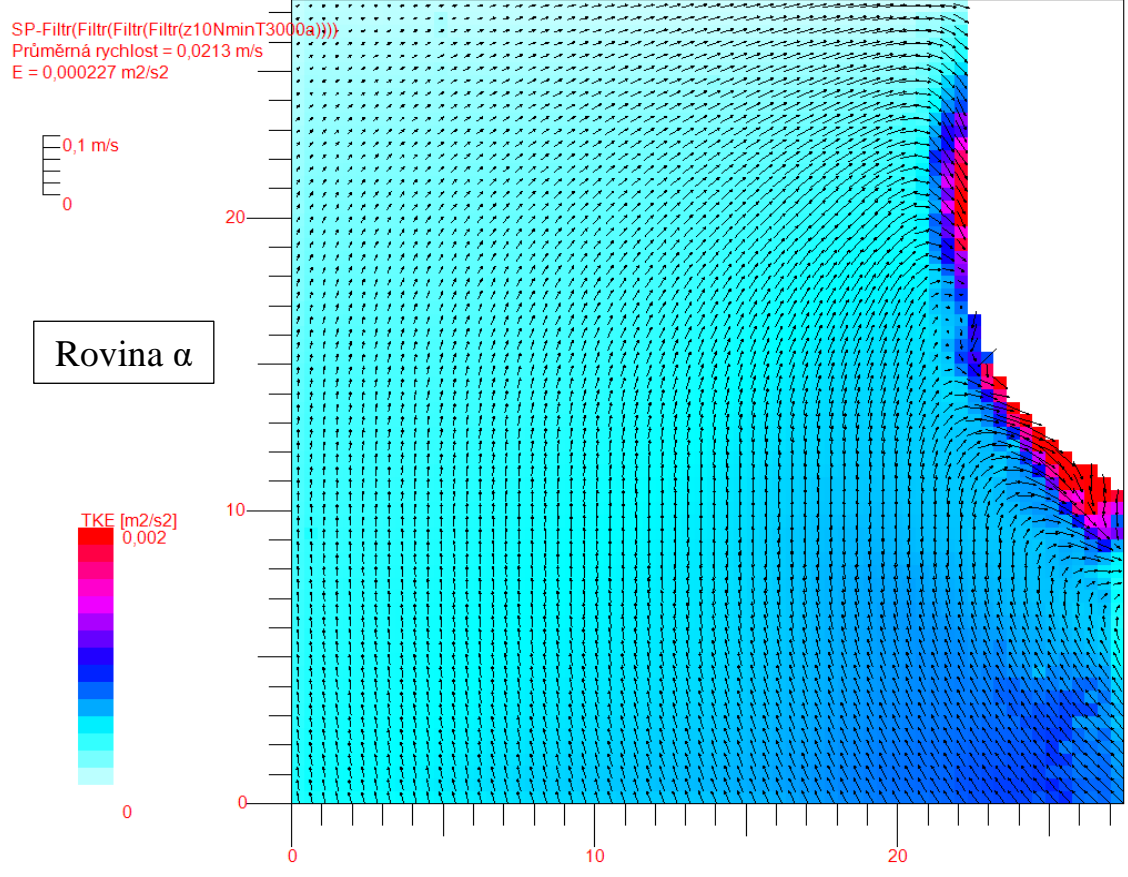


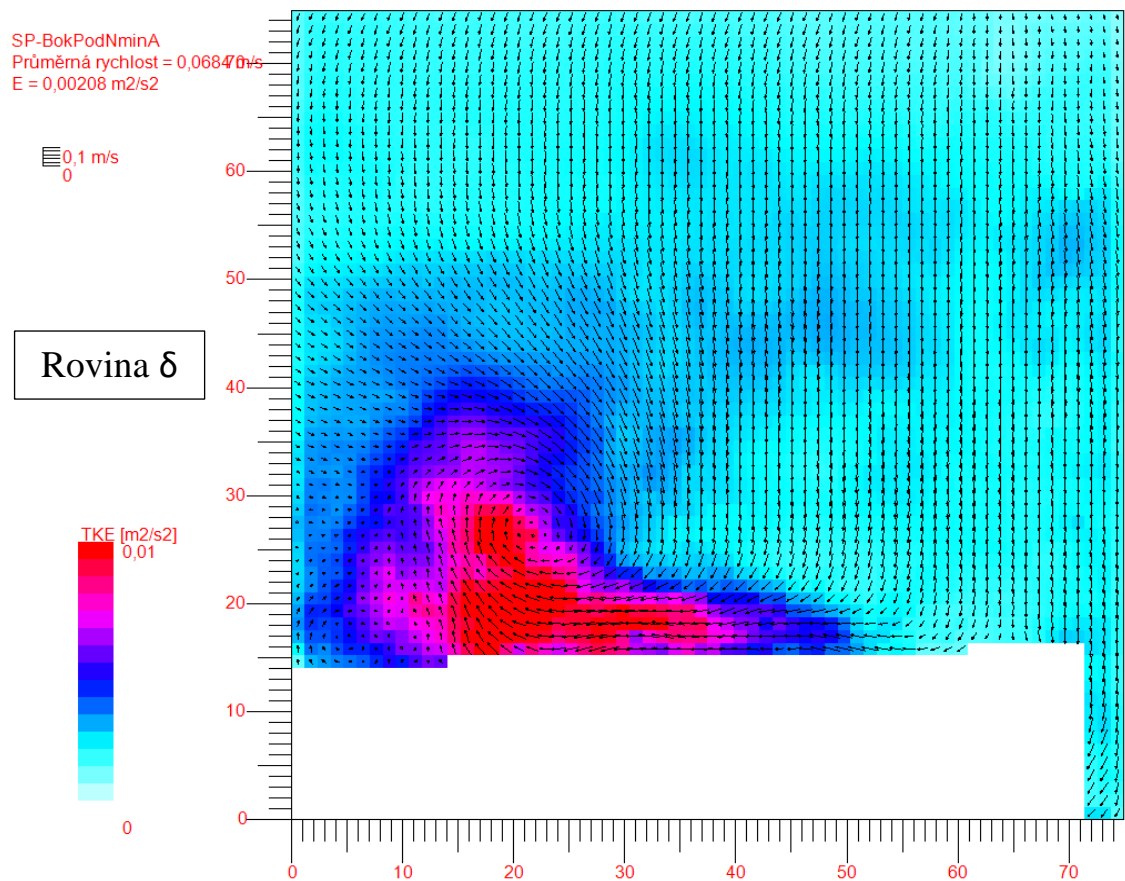
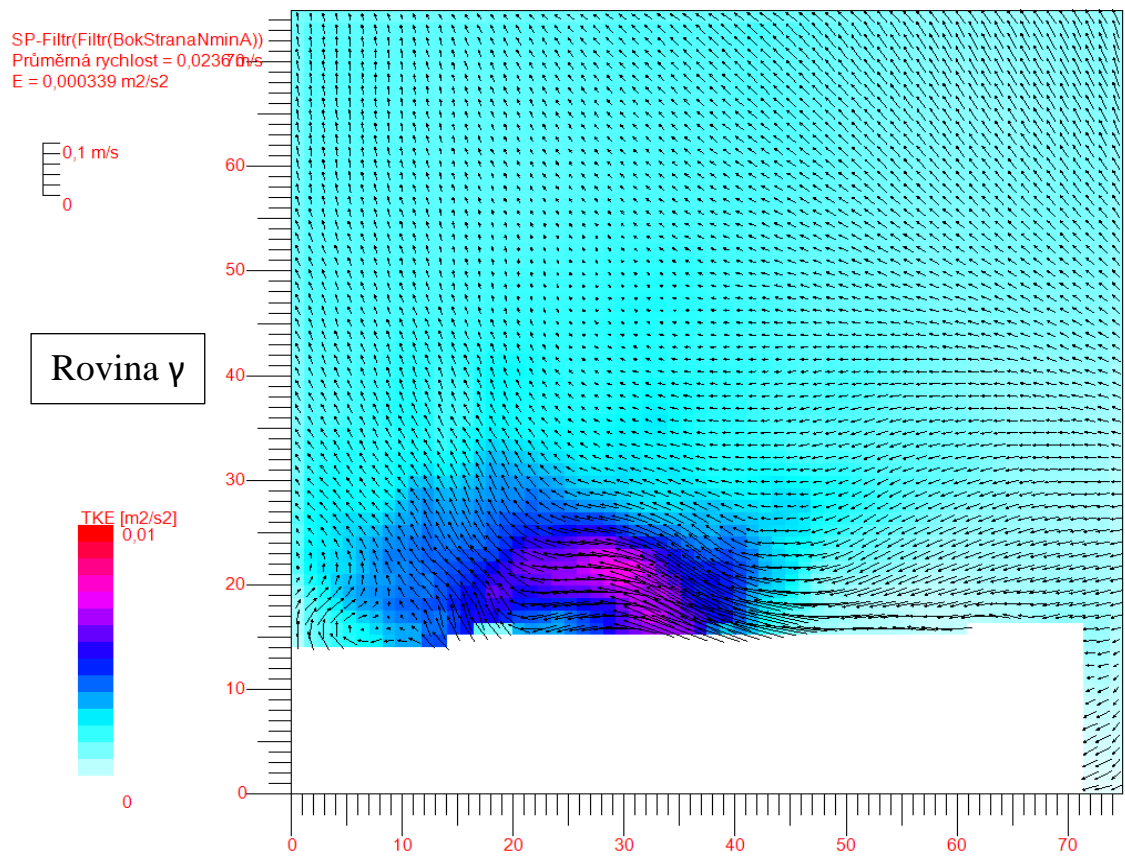


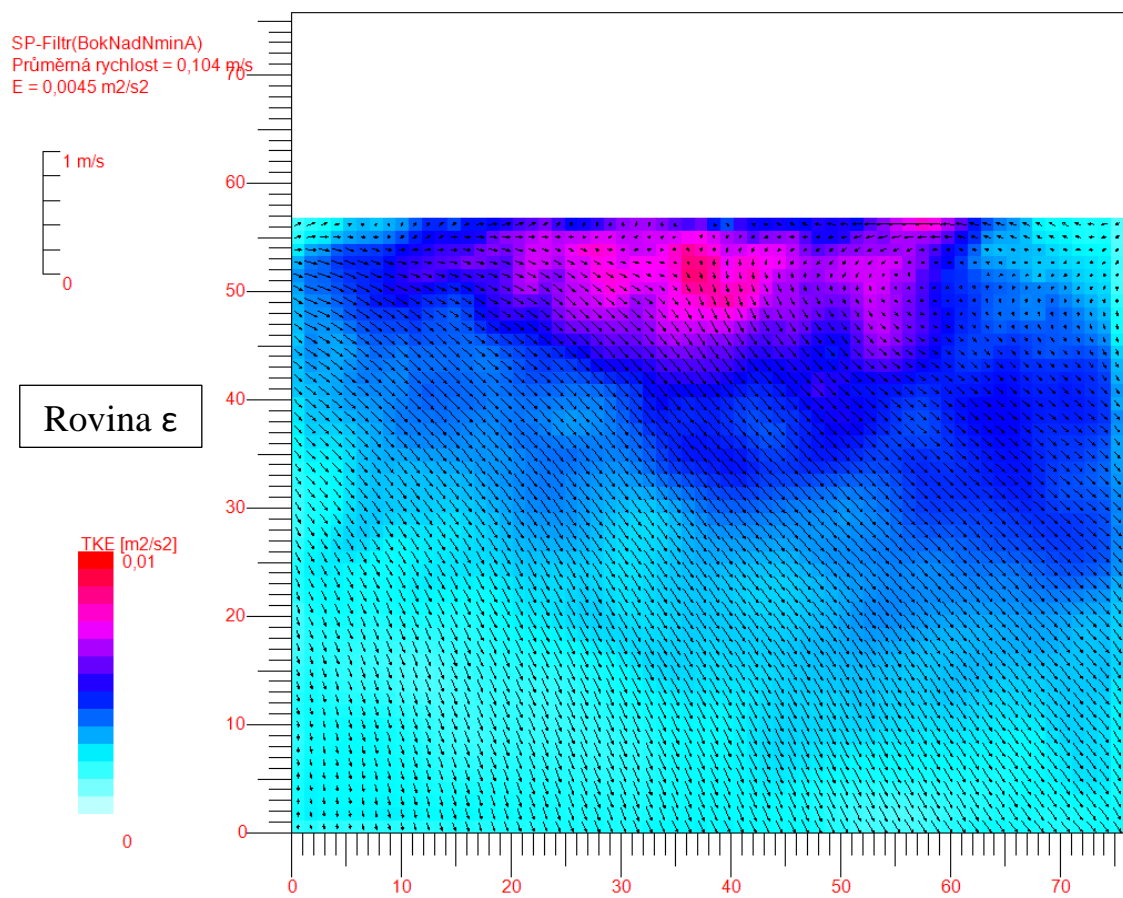


Graf 1-5: Srovnání TKE-maximální otáčky

Minimální otáčky







Graf 6-10: Srovnání TKE-minimální otáčky

6.2. Enstrofie

Na grafech 11-20 je vyhodnocena enstrofie, která popisuje víření u nestacionárních proudů. Z těchto výsledků vyplývá, že se vířivost tvoří a postupuje po vnějším obvodu frézy. Z naměřených hodnot lze opět vyzorovat, že se jedná o turbulentní proudění, které je charakteristické tvorbou vírů, v jejichž jádrech se dala naměřit vířivost a následně z ní určit enstrofii, která představuje střední hodnotu fluktuace vířivosti.

Maximální otáčky

Srovnáním obrázků TKE a enstrofie je vidět shoda. Tam, kde byla naměřena největší energie, je zároveň největší enstrofie, jelikož všechny výsledky se odvíjí od naměřené rychlosti. U bočních rovin víry vznikají na středu frézy a největší energetický vír byl vytvořen u roviny δ , který byl udržitelný pouze v jejím okolí (ve větší vzdálenosti ztrácel energii).

Minimální otáčky

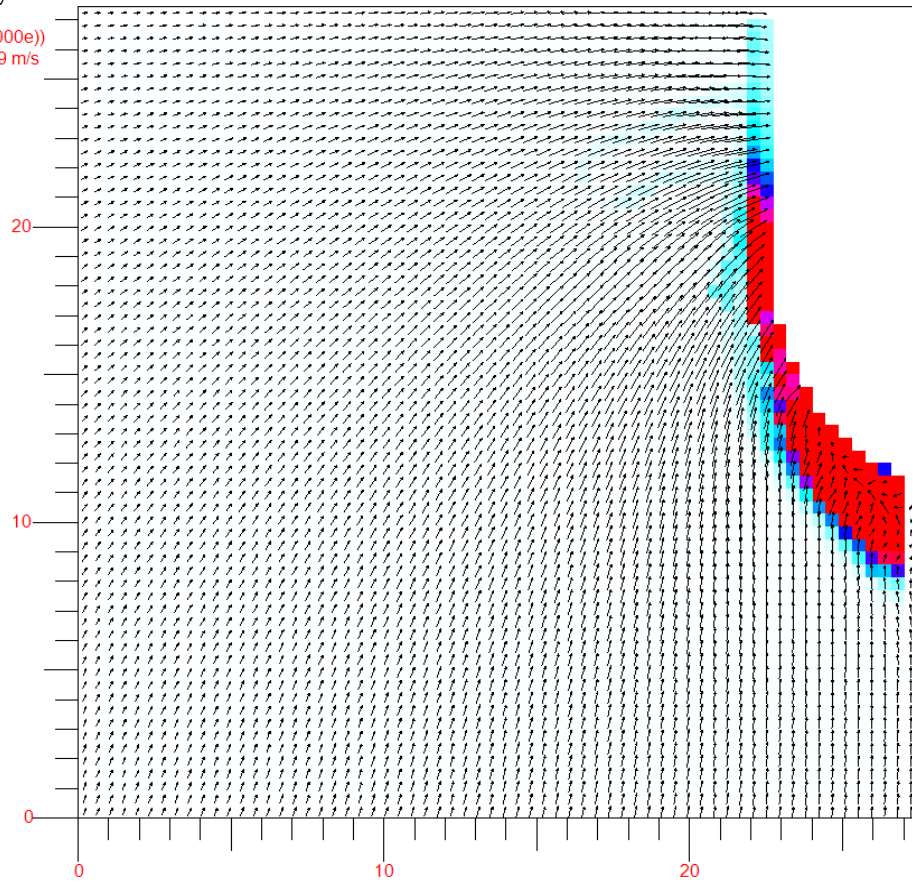
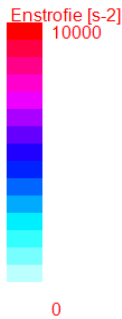
Při minimálních otáčkách dojde k očekávaným výsledkům, a to k poklesu rychlosti, proto se opět vírové koherentní struktury po vzniku velmi rychle rozpadaly. U roviny δ se podařilo zachytit snímek, na kterém se vír vytvořil a byl po nějakou dobu stabilní.

Maximální otáčky

SP-Filtr(Filtr(z10NmaxT2000e))
Průměrná rychlost = 0,059 m/s
E = 0,00179 m2/s2

0,1 m/s
0

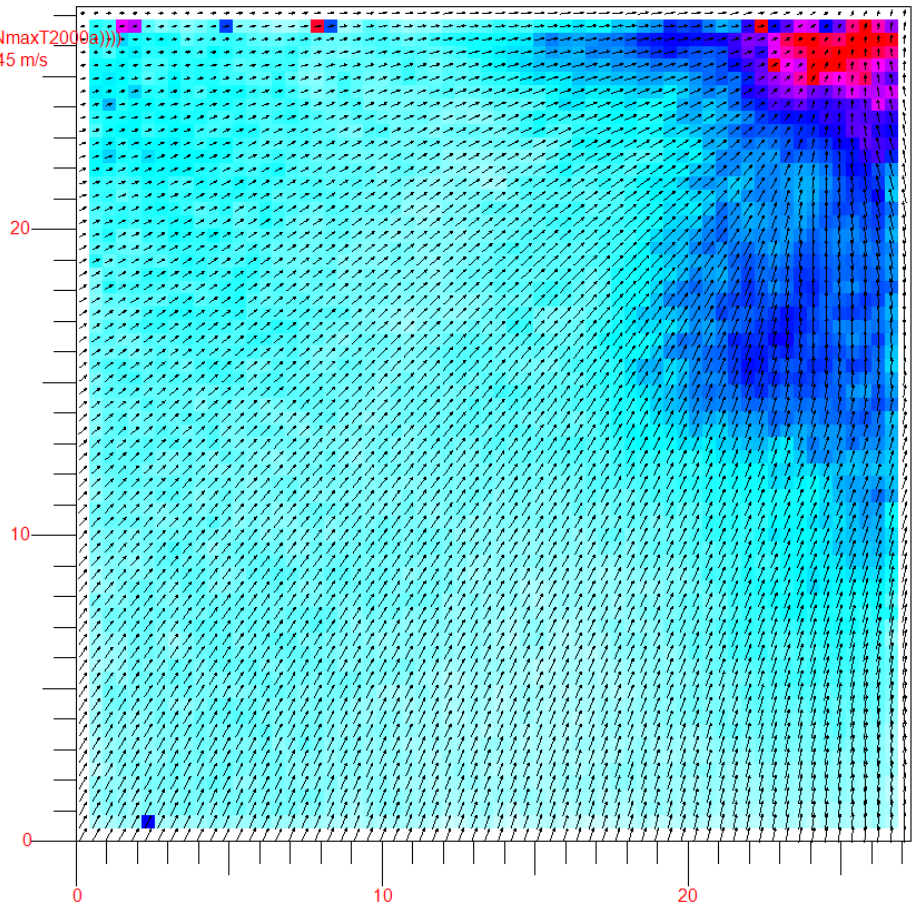
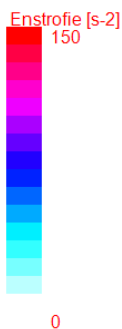
Rovina α

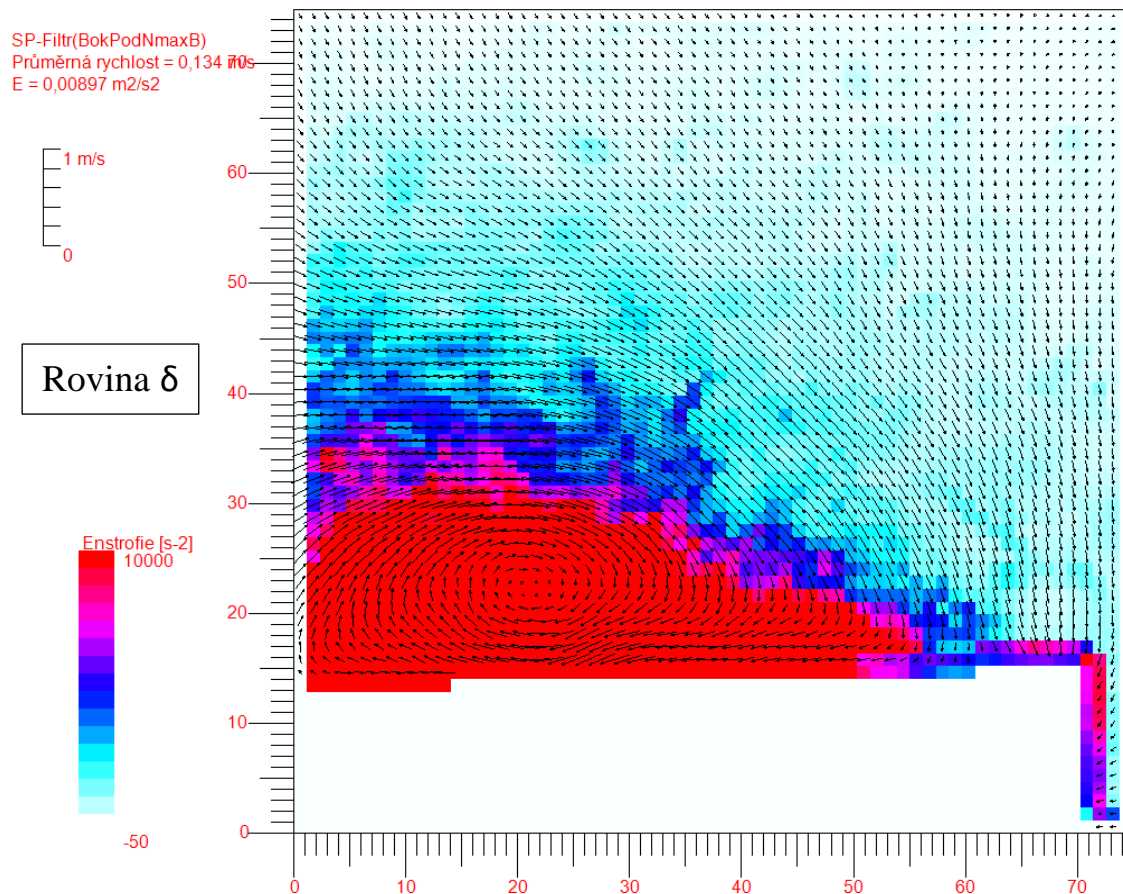
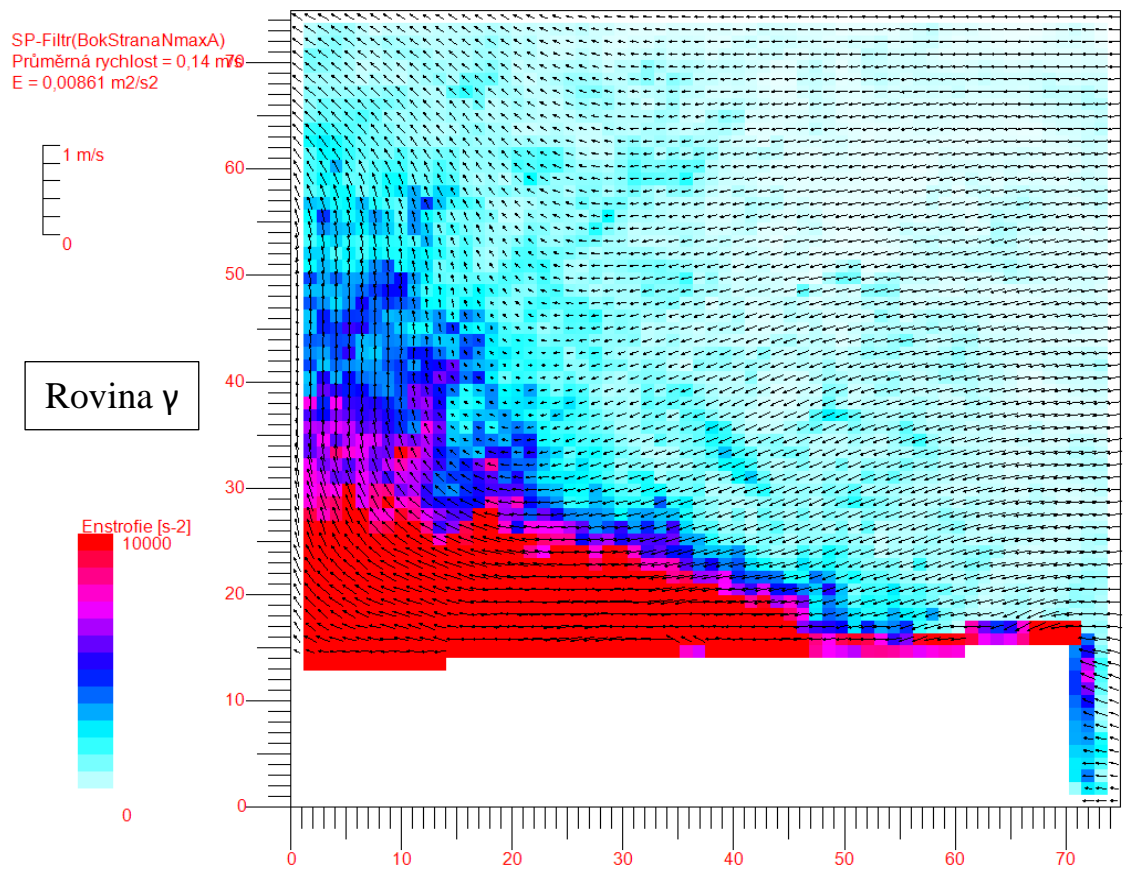


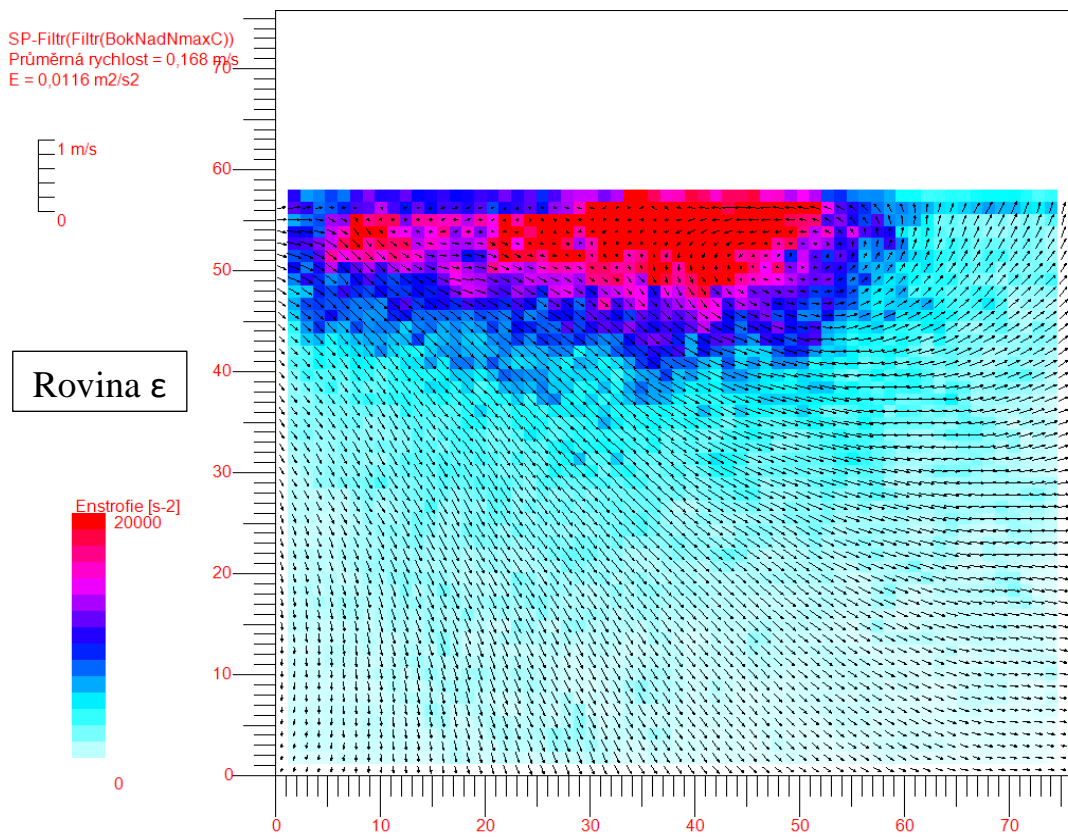
SP-Filtr(Filtr(Filtr(z-5NmaxT2000a)))
Průměrná rychlost = 0,0345 m/s
E = 0,000625 m2/s2

0,1 m/s
0

Rovina β







Graf 11-15: Srovnání Enstrofie-maximální otáčky

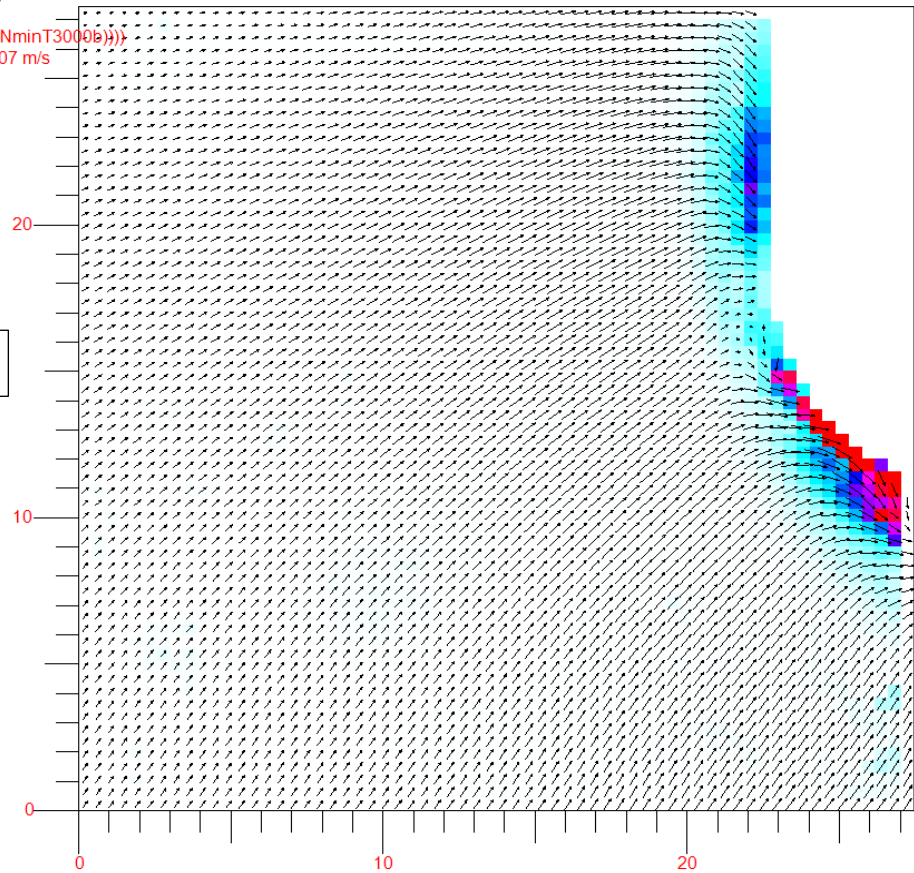
Minimální otáčky

SP-Filtr(Filtr(Filtr(Filtr(z10NminT3000b)))
Průměrná rychlost = 0,0307 m/s
E = 0,000453 m2/s2

0,1 m/s
0

Rovina α

Enstrofie [s-2]
10000
0

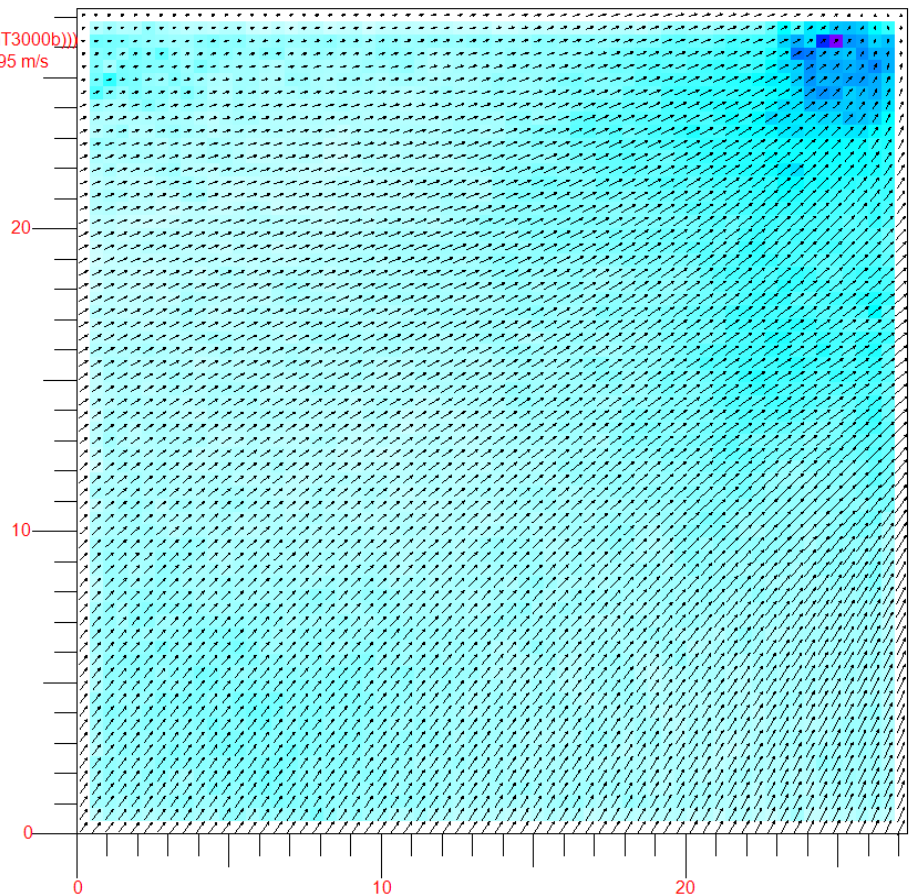


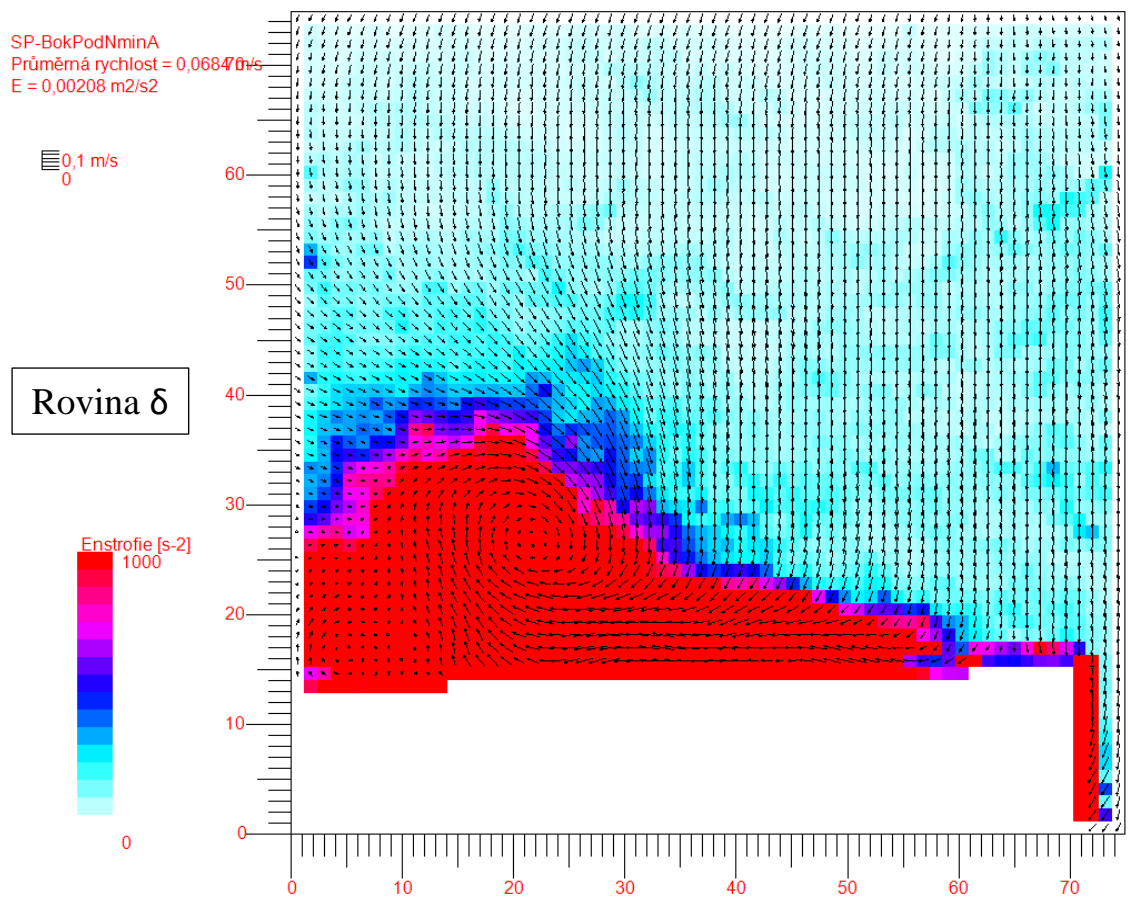
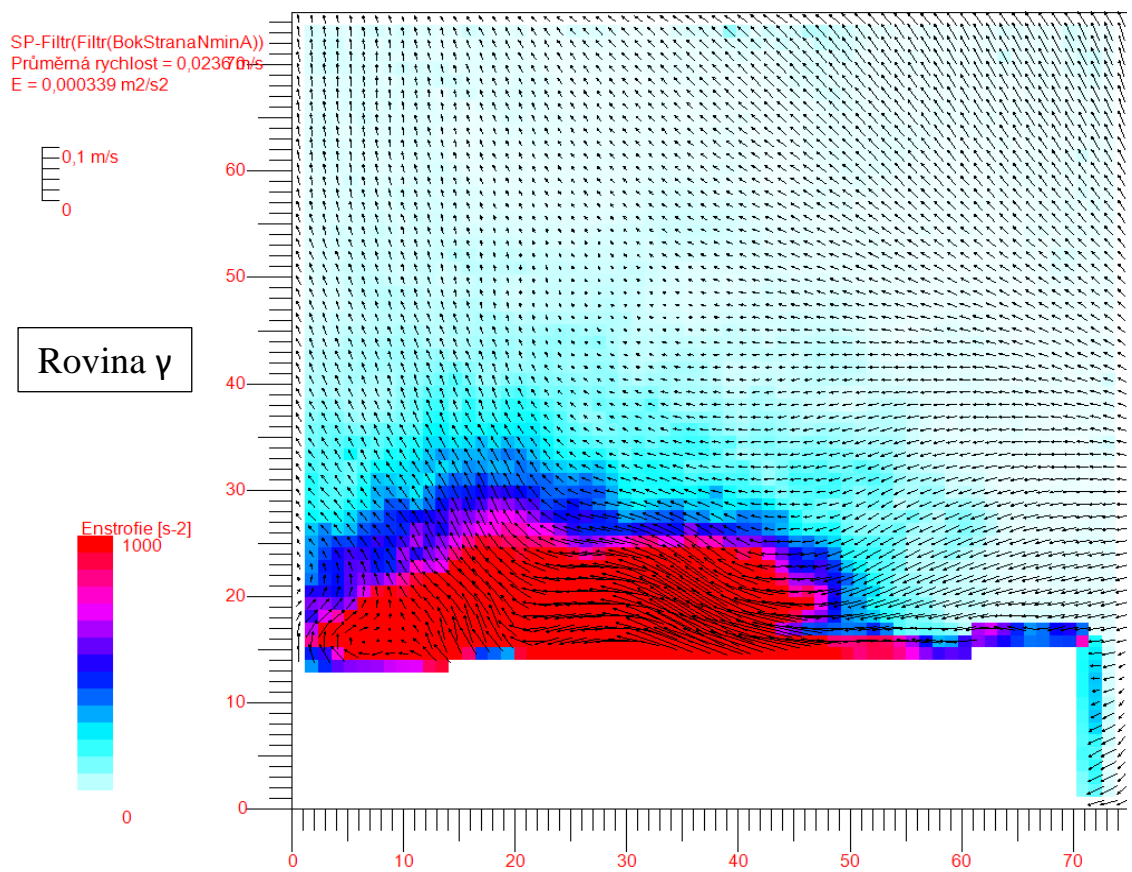
SP-Filtr(Filtr(Filtr(z-5NminT3000b)))
Průměrná rychlost = 0,0195 m/s
E = 0,000201 m2/s2

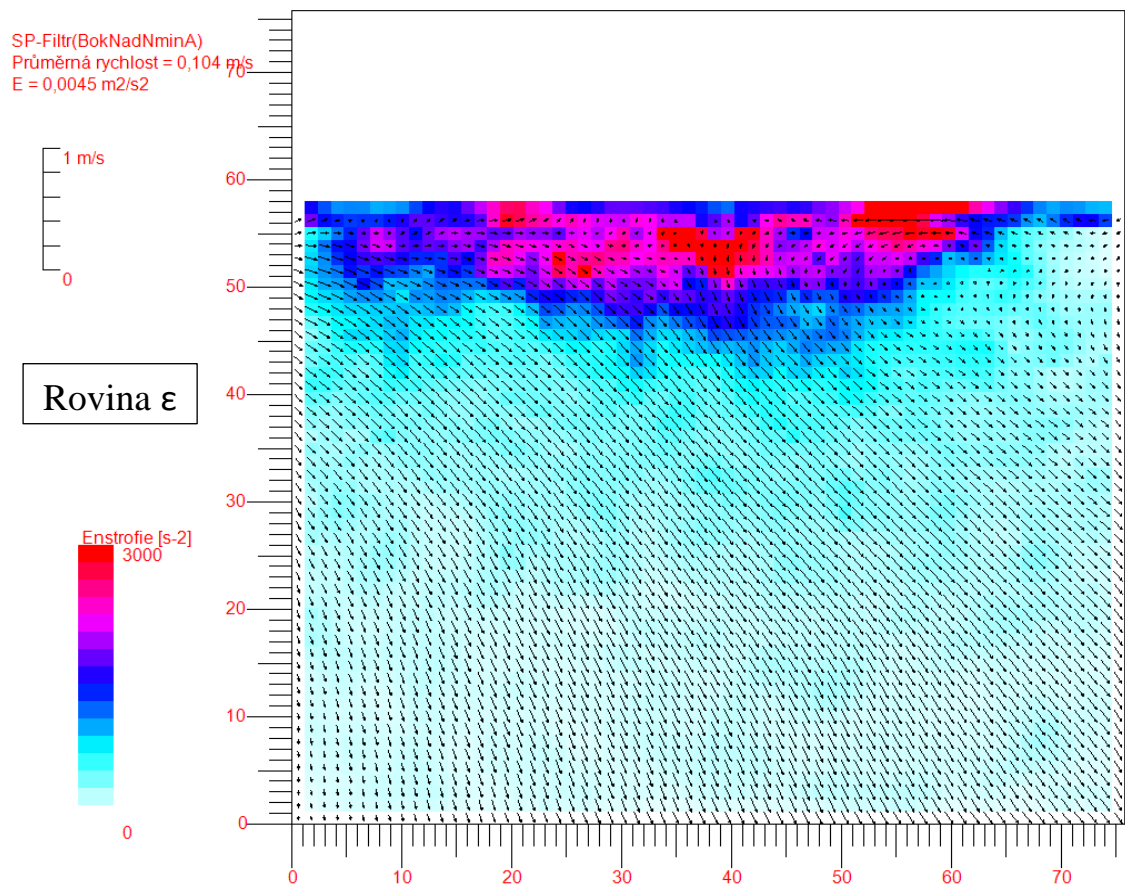
0,1 m/s
0

Rovina β

Enstrofie [s-2]
150
0







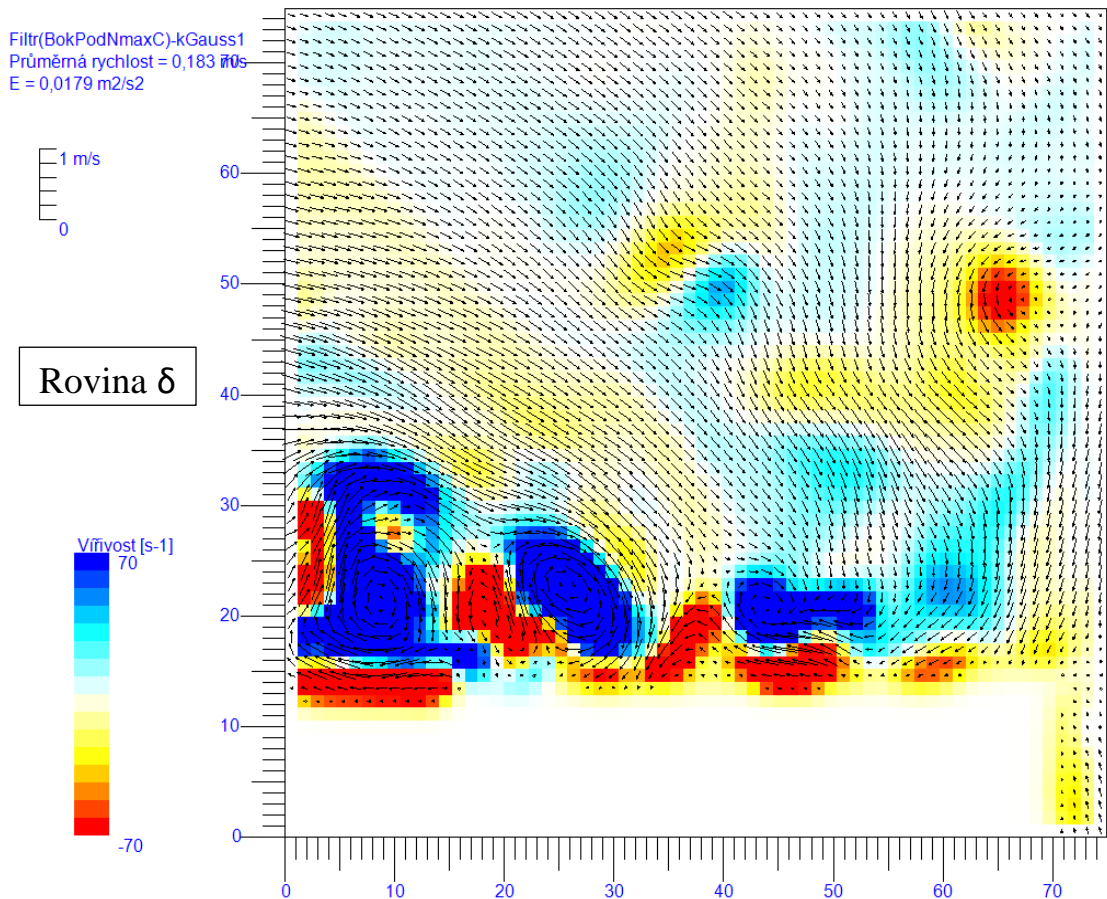
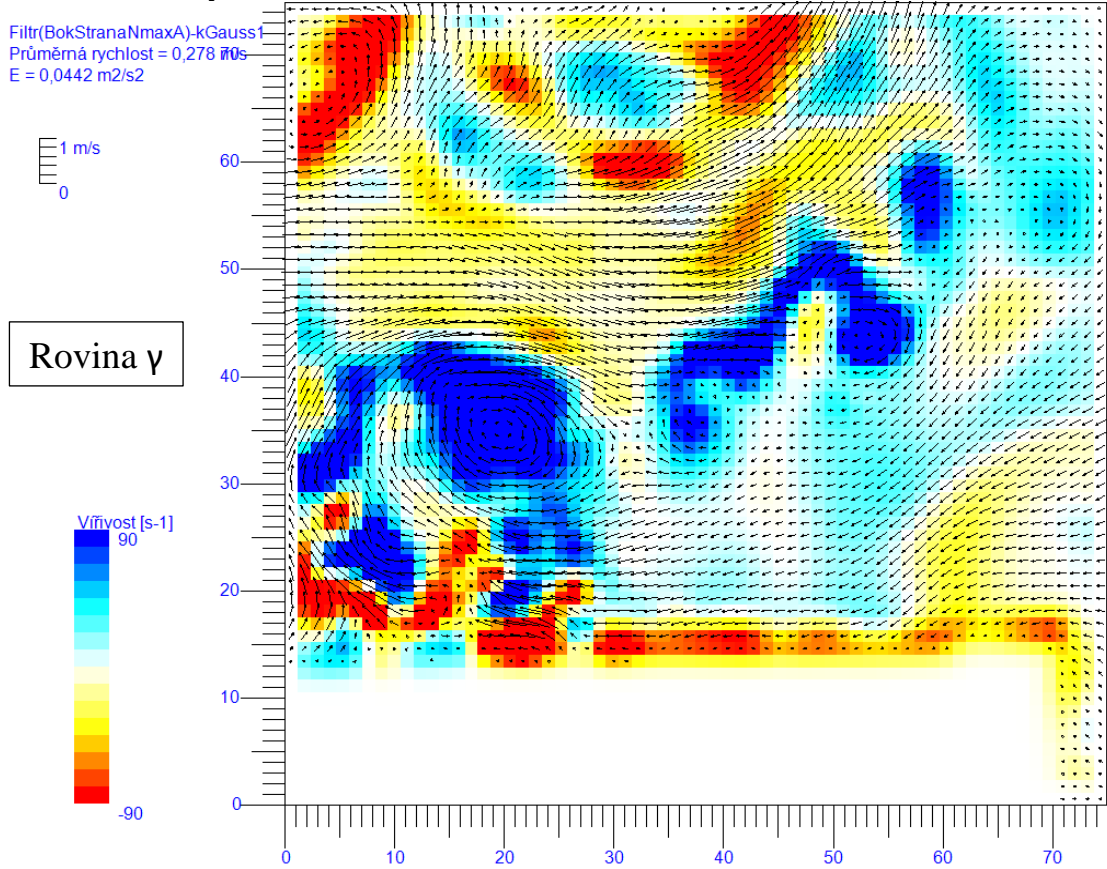
Graf 16-20: Srovnání Enstrofie-minimální otáčky

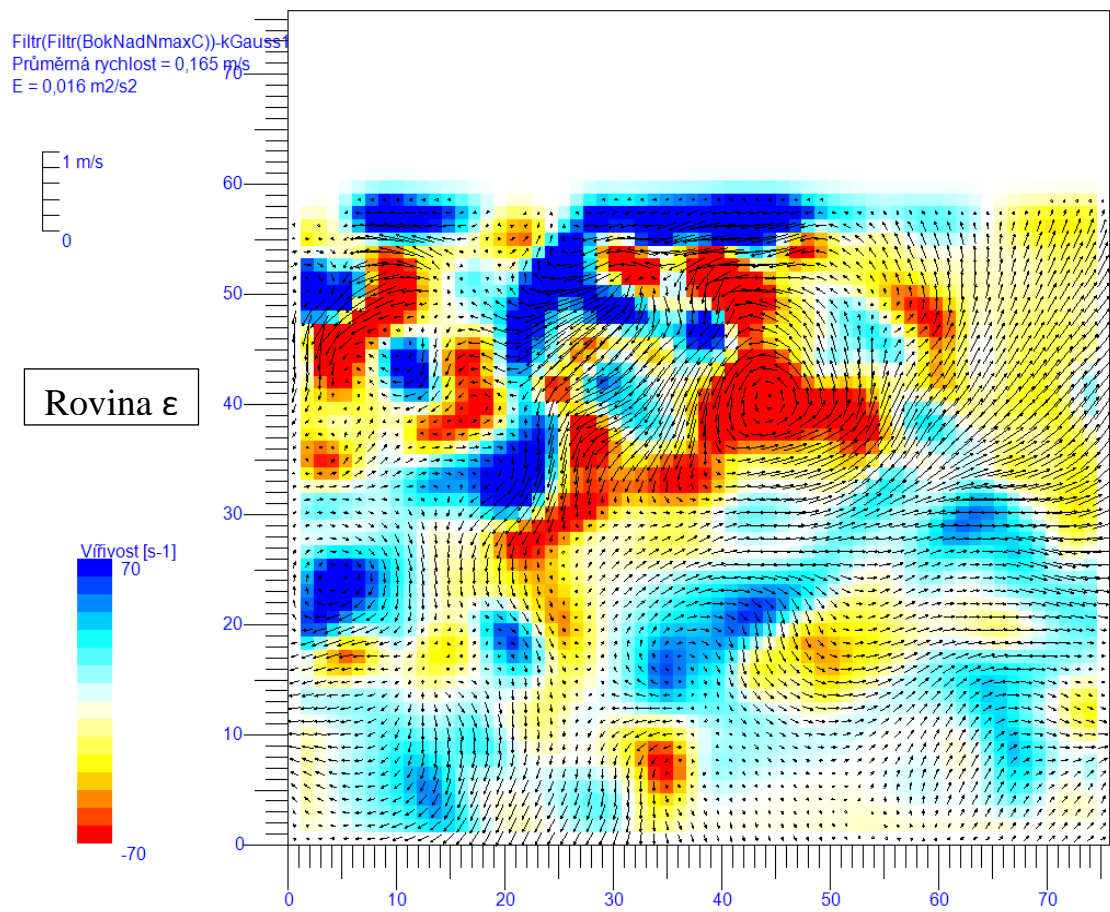
6.3. Vířivost

Vzhledem k tvorbě vírů, která je viditelná i na grafech TKE a enstrofie, byla vyhodnocena i vířivost okamžité rychlosti. Snímky byly vybrány z vyfiltrovaných okamžitých rychlostí všech měření a bylo použito vyhlazení vektorů pomocí konvoluce s dvourozměrnou Gaussovou funkcí. Místo vzniku vírů odpovídá místům s nejvyšší TKE a enstrofií a dosahují vířivosti okolo -90 až 90 s^{-1} , ale to je opět pouze orientační hodnota. Záporné znaménko (červená barva) vířivosti odpovídá otáčení proti směru hodinových ručiček. Tyto opačné směry vyvolávají zpětné proudění (střídání záporných a kladných vířivostí), způsobené odtrháváním mezní vrstvy.

Z grafu 21-26 vyplývá, že v blízkosti frézy je vířivost a postupným vzestupem od povrchu energie disipuje nejprve rozpadem na menší a menší víry až nakonec na tepelnou energii molekul. Grafy enstrofie a TKE byly vytvořeny z ustředněných hodnot, které oproti okamžitým hodnotám vyhlazují fluktuace, proto na porovnání grafů musí být takto nahlíženo. Na vybraných snímcích jsou pozorovatelné spíše menší setrvačné víry, které měly častější výskyt než velké energetické pozorovatelné v prostorovém rozložení ustředněné rychlosti.

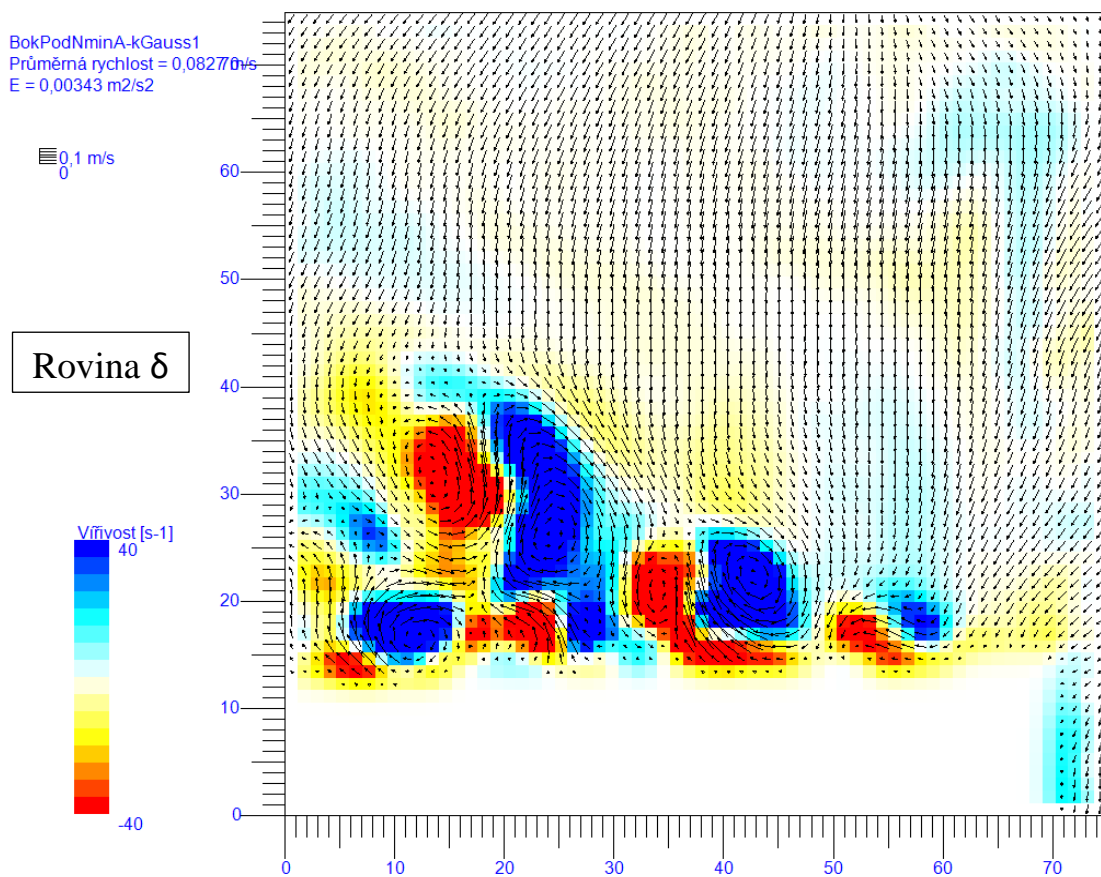
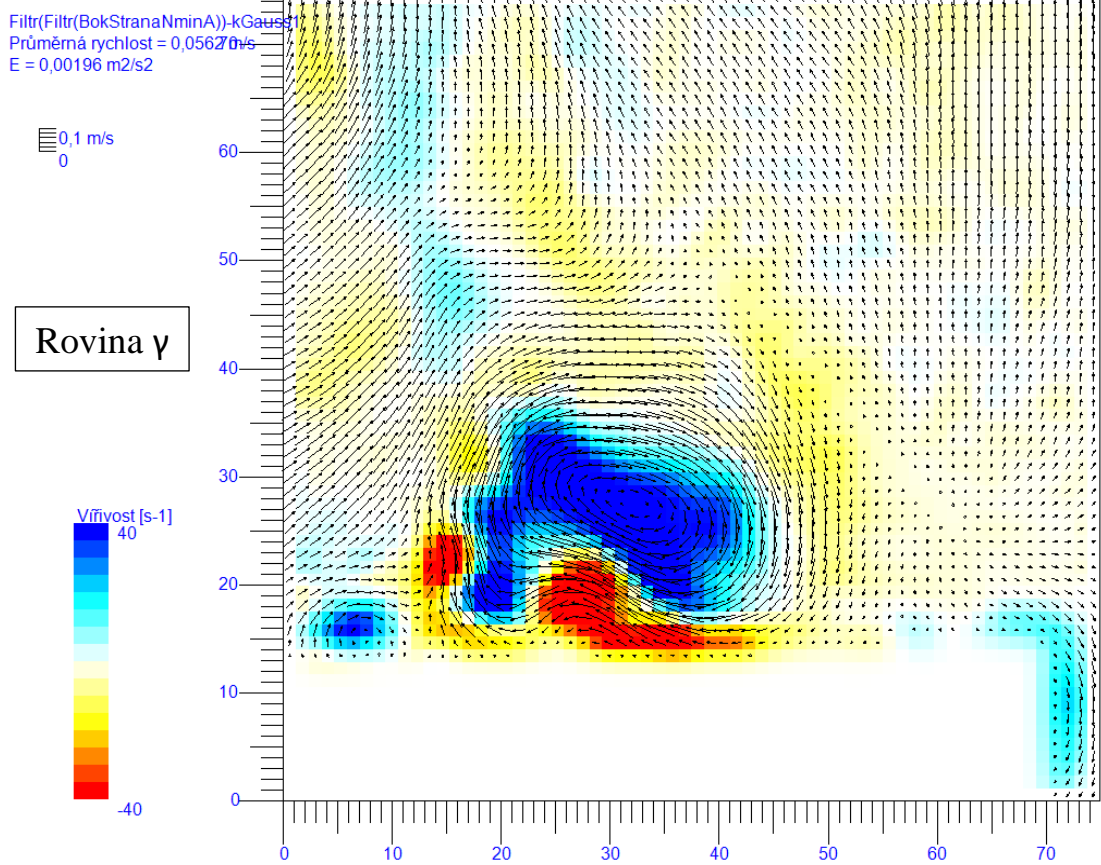
Maximální otáčky

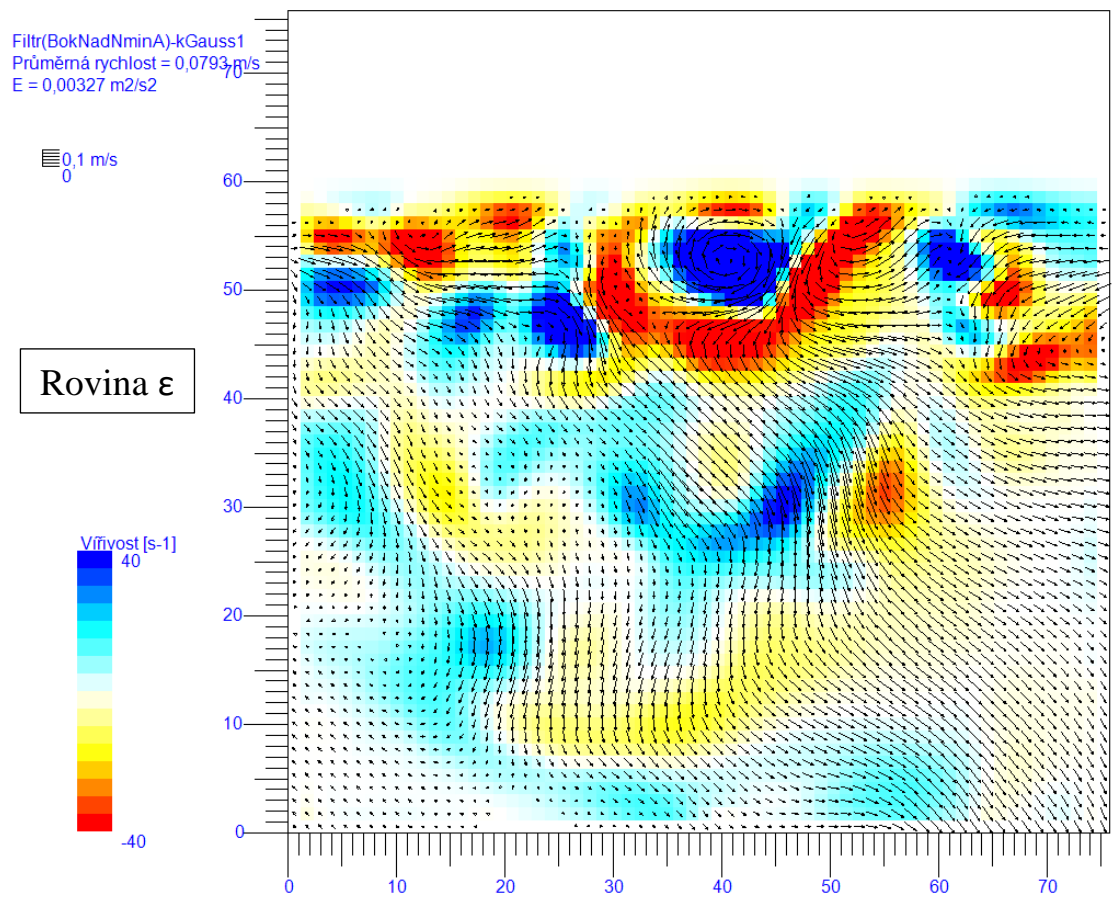




Graf 21-23: Srovnání vřivosti-maximální otáčky

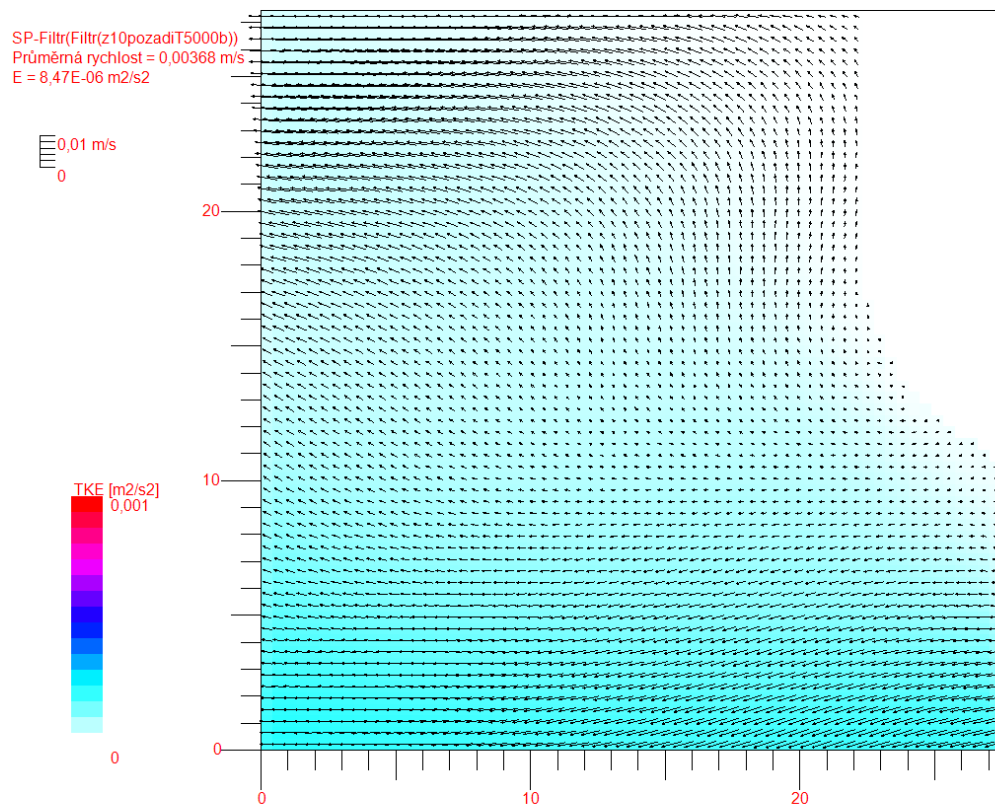
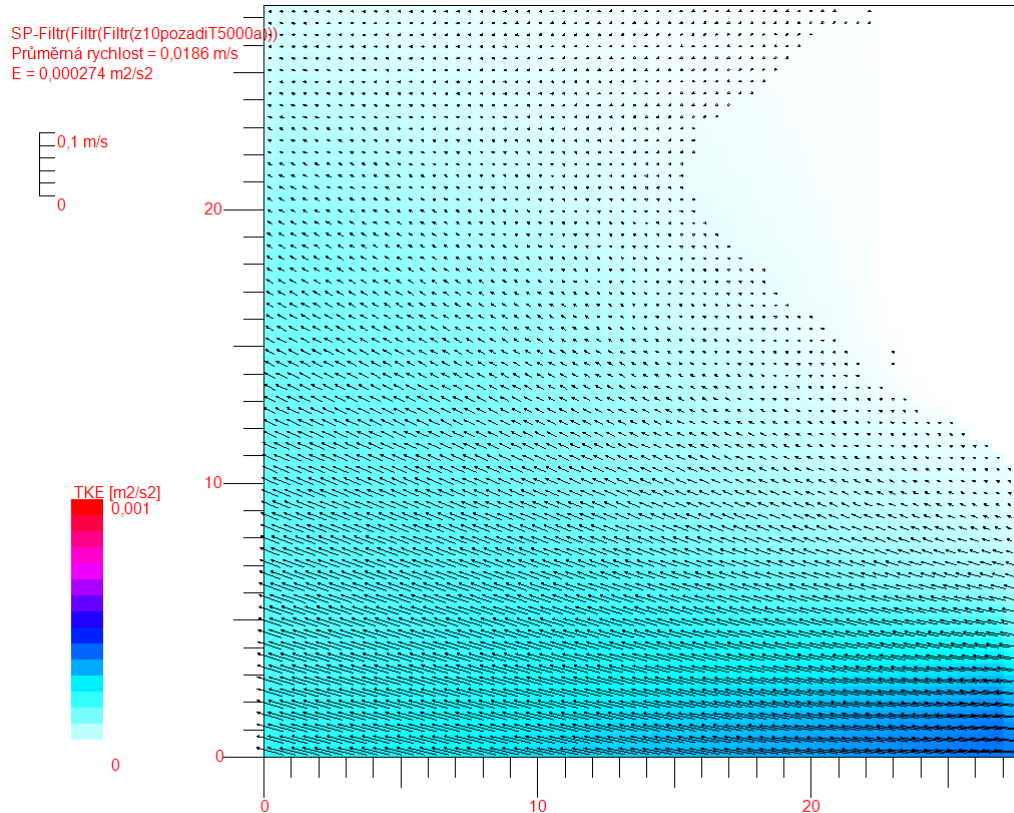
Minimální otáčky





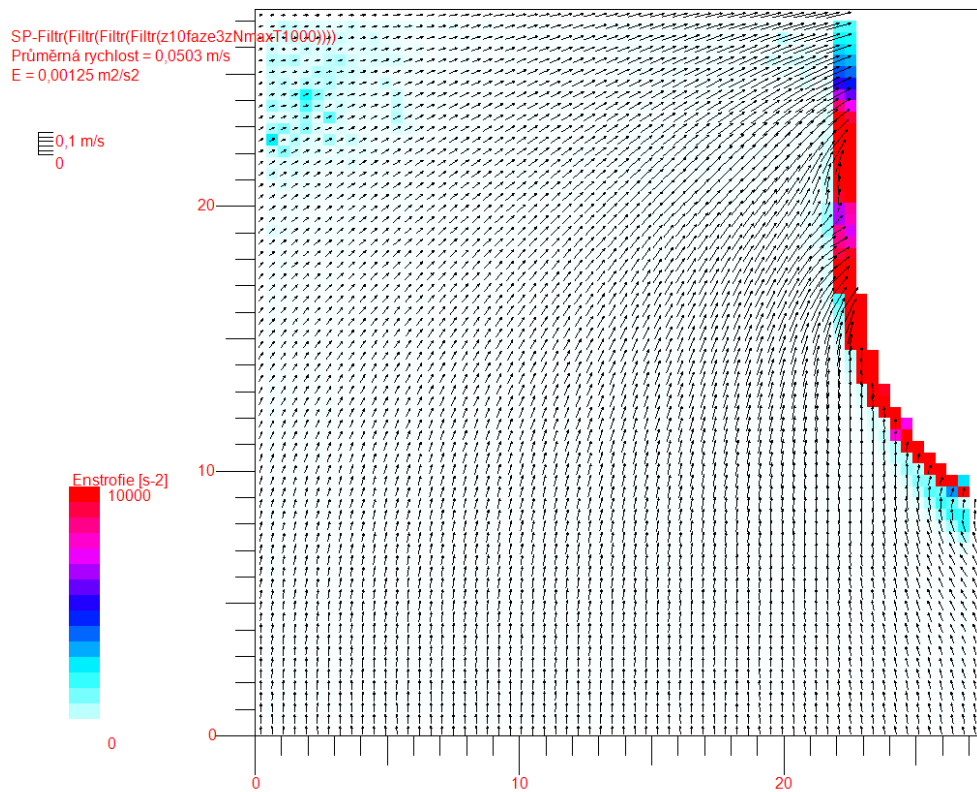
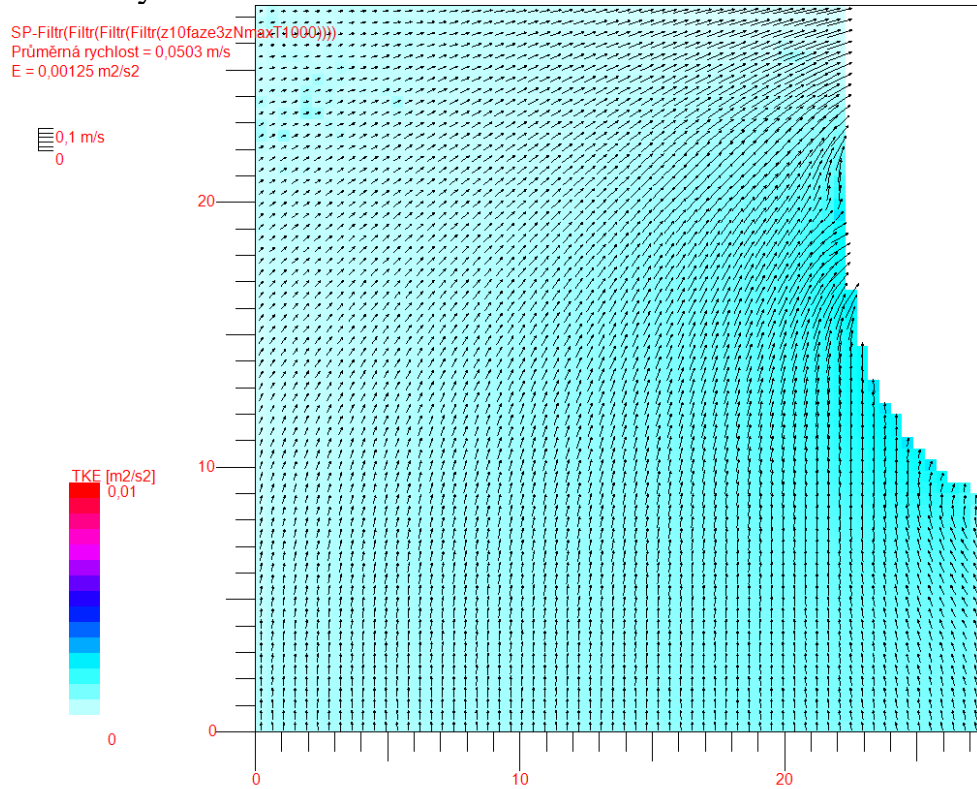
Graf 24-26: Srovnání vířivosti-minimální otáčky

Pozadí



Graf 27-28: Z10-pozadi, $\Delta t=5000 \mu s$, Turbulentní kinetická energie

Posun o 3 zuby



Graf 29-30: Z10-Posunutí o 3 zuby, maximální otáčky, $\Delta t = 1000 \mu\text{s}$,
Turbulentní kinetická energie a enstropie

Průměrná rychlost na pozadí se při prvním měření o tolik nelišila od rychlosti při maximálních a minimálních otáčkách, při druhém měření se již lišila o řád. Tato odchylka mohla být způsobena rozdílným množstvím částic při obou měřeních. Generátor mlhy vypouští částice v proudu o různé intenzitě (kterou lze nastavit) a také záleží, z jaké vzdálenosti jsou částice generovány a jak rychle se stihnou rozptýlit. Tyto parametry velmi ovlivňují kvalitu výsledku. TKE je srovnatelná s TKE minimálních otáček, i když je fréza v klidu a záleží pouze na generátoru mlhy. Bez rotace frézy není proudění urychlováno, proto bylo nastaveno $\Delta t = 5000 \mu s$, aby byl vidět posun částic mezi snímky.

V případě přelepení odrazného pásku na jiné místo na vrtačce (konkrétně posun o 3 zuby) ukázal, že hodnoty TKE i enstrofie dosahují řádově podobných menších hodnot. To je způsobeno umístěním pásku, který byl původně na vrtačce přilepen tak, aby byl v mezeře mezi dvěma zuby frézy a nyní se posunutím na vrtačce dostal na hřbet zubu. To mohlo způsobit pokles rychlosti, který vedl ke snížení TKE i vířivosti (enstrofie).

6.4. Porovnání výsledků

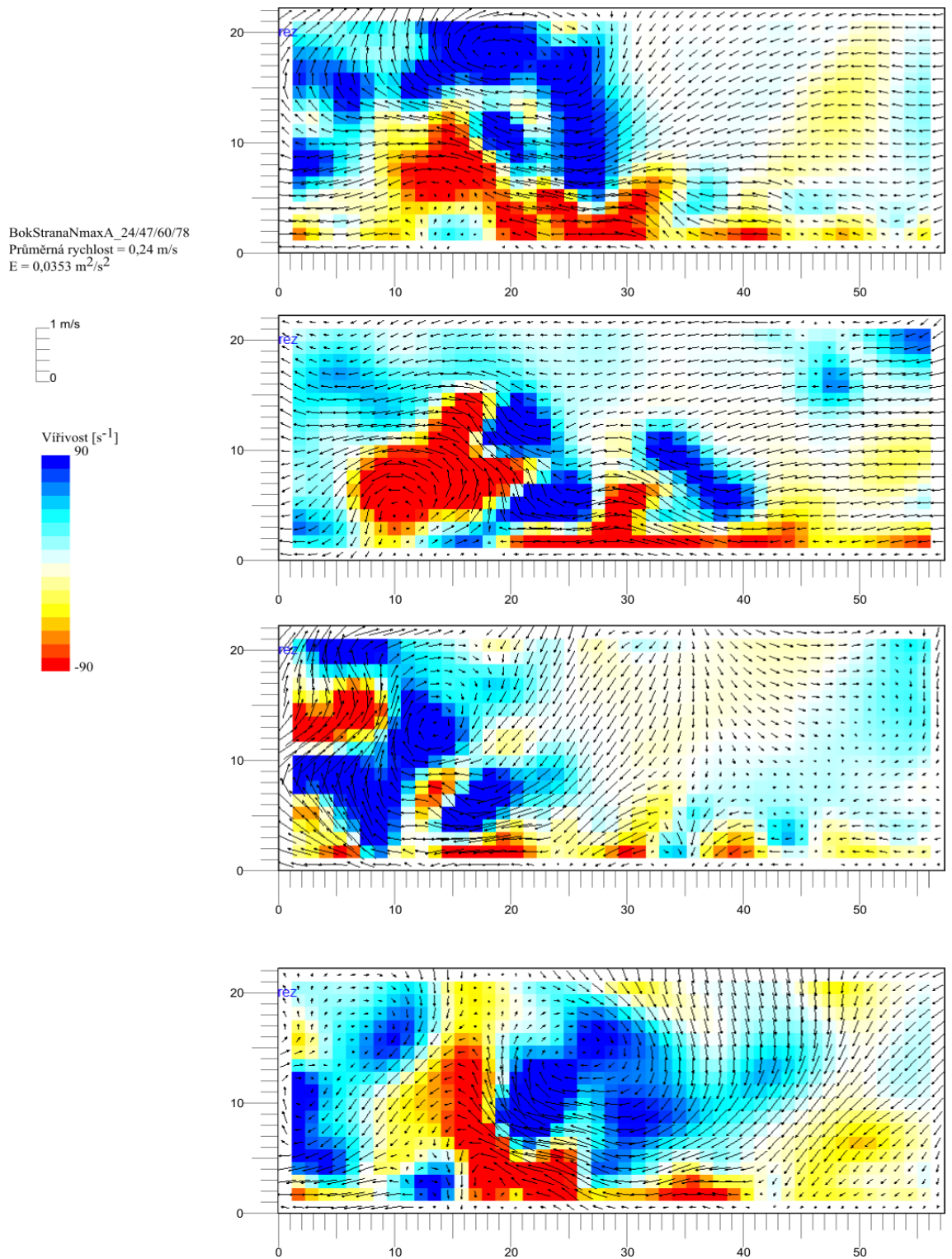
Výsledná vektorová pole na boku frézy (ze strany, pod frézou, nad frézou) byla dále porovnána pouze z hlediska vířivosti (za okamžité rychlosti) při maximálních a minimálních otáčkách. Toto srovnání bylo provedeno vybráním jednoho z několika měření v jedné z rovin při určitých otáčkách. Na grafu S1-6 jsou v přehledu porovnány průřezy vybraného měření na 4 snímcích. Například S1 obsahuje data při maximálních otáčkách na boku frézy (deska příčně) ze snímků 24,47,60,78. Obrázky vířivosti jsou oříznuty a upraveny tak, aby v místě vodorovného měřítka ležela fréza (u roviny s deskou nad frézou je fréza na opačné straně vodorovného měřítka) a bylo zaznamenáno proudění a vznik vírů těsně okolo ní. Při srovnání tvorby vírů u tří pozorovaných rovin (γ , δ , ϵ) docházelo dle předpokladu při nižších otáčkách k vzniku menších vírů (kvůli menší rychlosti částic) a u maximálních otáček k větším energetickým vírům, které po chvíli disipovaly na menší, rychleji otáčející se víry.

Jak bylo zmíněno, tyto roviny se vyplatí sledovat kvůli vývoji proudění. Například si lze povšimnout na obrázcích S1, S3 a S5 maximálních otáček rovin γ , ϵ , δ , mají víry úplně jiný charakter, nejen z hlediska změn okamžitých rychlostí viz tabulka 1 (v popisku je pouze průměrná rychlost všech snímků, která je podobná u všech tří rovin, proto ji nelze brát směrodatně), ale také kvůli poloze obráběného povrchu, směru a vzdálenosti částic vypouštěných generátorem mlhy.

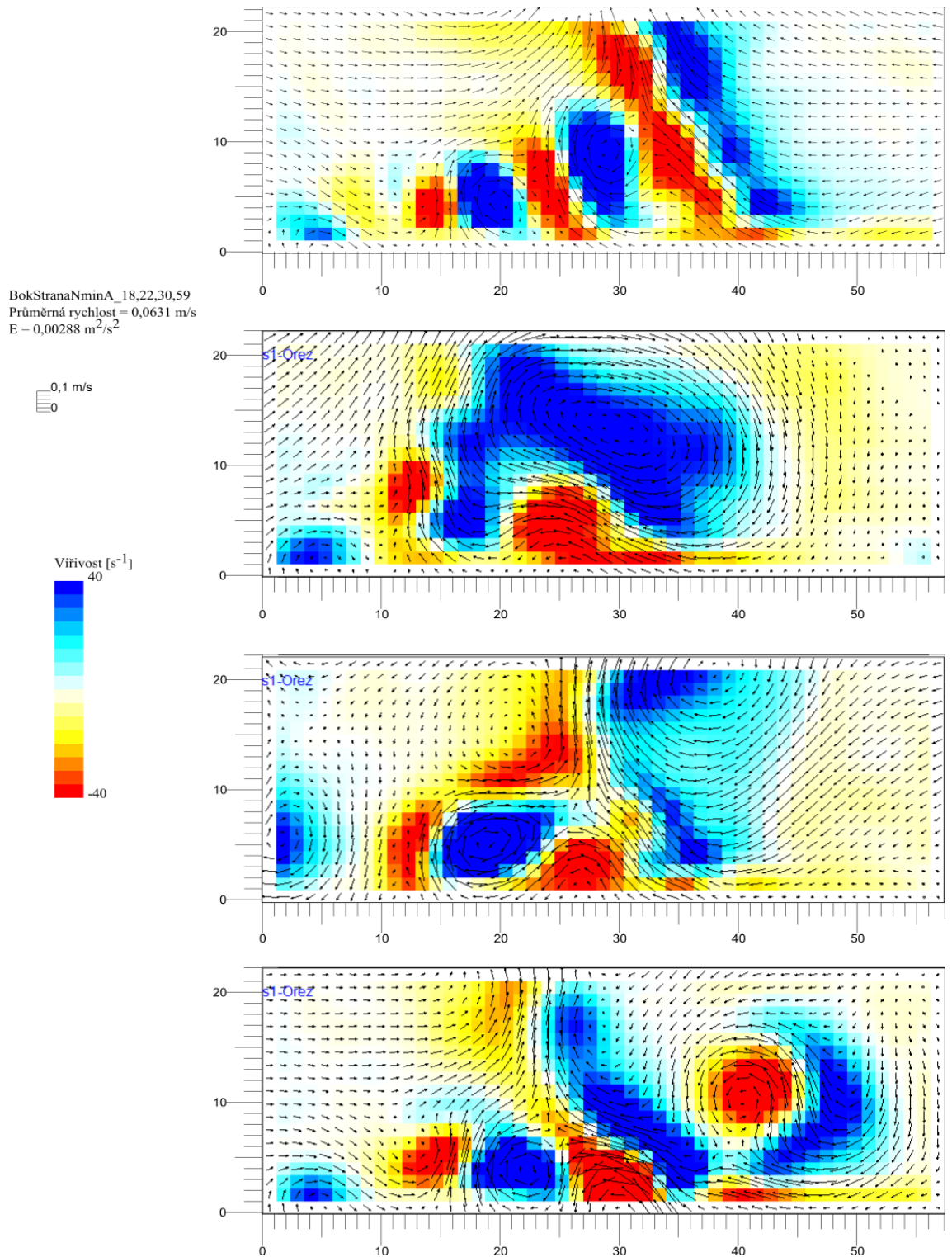
Na snímcích SMax a SMin je porovnání rovin γ (strana), ϵ (deska nad frézou), δ° (deska pod frézou) mezi sebou při maximálních a minimálních otáčkách opět z vířivosti, zhruba ve stejných okamžicích měření. Celkově v rovině, kdy je deska pod frézou, vznikají největší energetické víry, čehož si lze i povšimnout i díky měřítku vedle jednotlivých grafů, oproti tomu u desky nad frézou je situace opačná a víry jsou menší a ve větším počtu.

Tyto úvahy jsou samozřejmě brány v ohledu proudění (obtékání) okolo válcového tělesa a výzkum je brán spíše z hlediska mechaniky tekutin než z praktického, při kterém by obrobek nebyl frézován v poloze nad frézou. Ovšem z hlediska proudění a disipace energie proudu na teplo molekul je tento pohled zajímavý.

Opakovatelnost měření hrála roli kvůli statistice dat, ale i přes snahu o dodržování přesných parametrů nastavení laseru, kamer, tak i při vypouštění částic, byly chyby a odchylky časté. Opakovatelnost se tedy ukazuje být značně problematickou. To je samozřejmě technická výzva pro budoucí výzkum. Důvodem je jednak problematické sycení, ale také otevřenost studovaného objektu a celého jeho okolí, čímž dochází k interakci s makroskopickým prouděním na měřítku celé místnosti. Řešením by bylo uzavření objektu, což by však bylo nad časový rámec současné práce.



Graf S1: Bok – maximální otáčky, srovnání několika okamžitých rozložení vířivosti



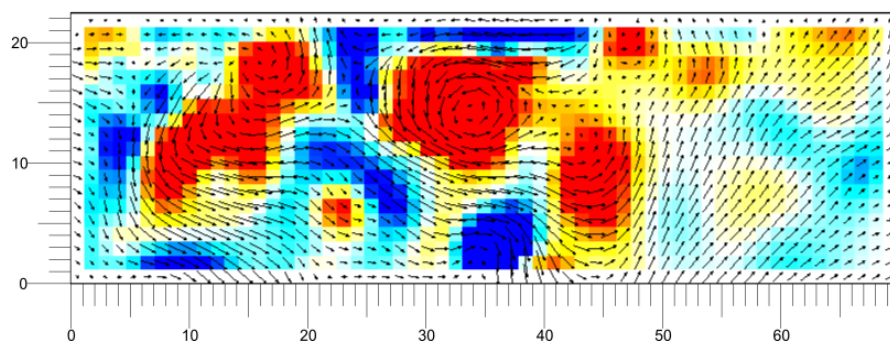
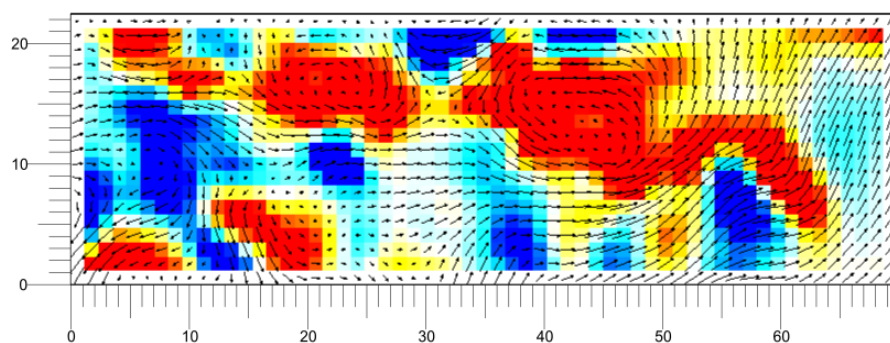
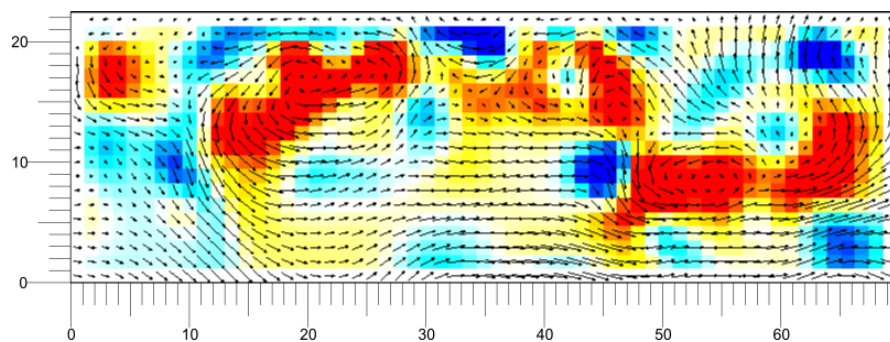
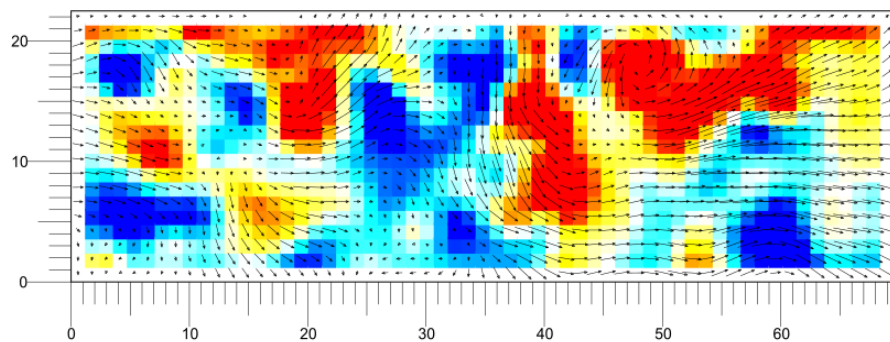
Graf S2: Bok – minimální otáčky, srovnání několika okamžitých rozložení vřivosti

BokNadNmaxB-1,24,57,112
Průměrná rychlost = 0,238 m/s
E = 0,0383 m²/s²

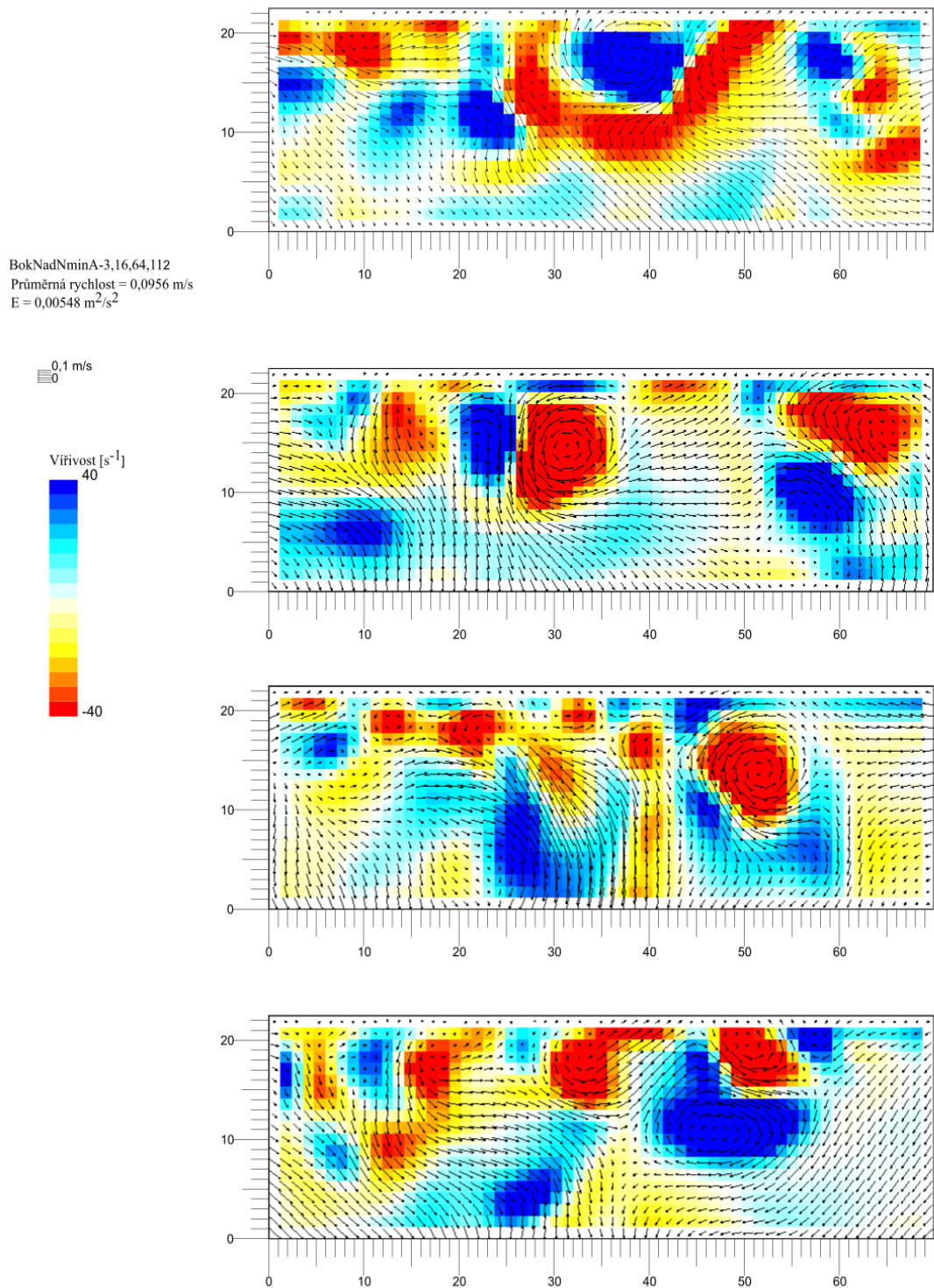
1 m/s
0

Vířivost [s⁻¹]

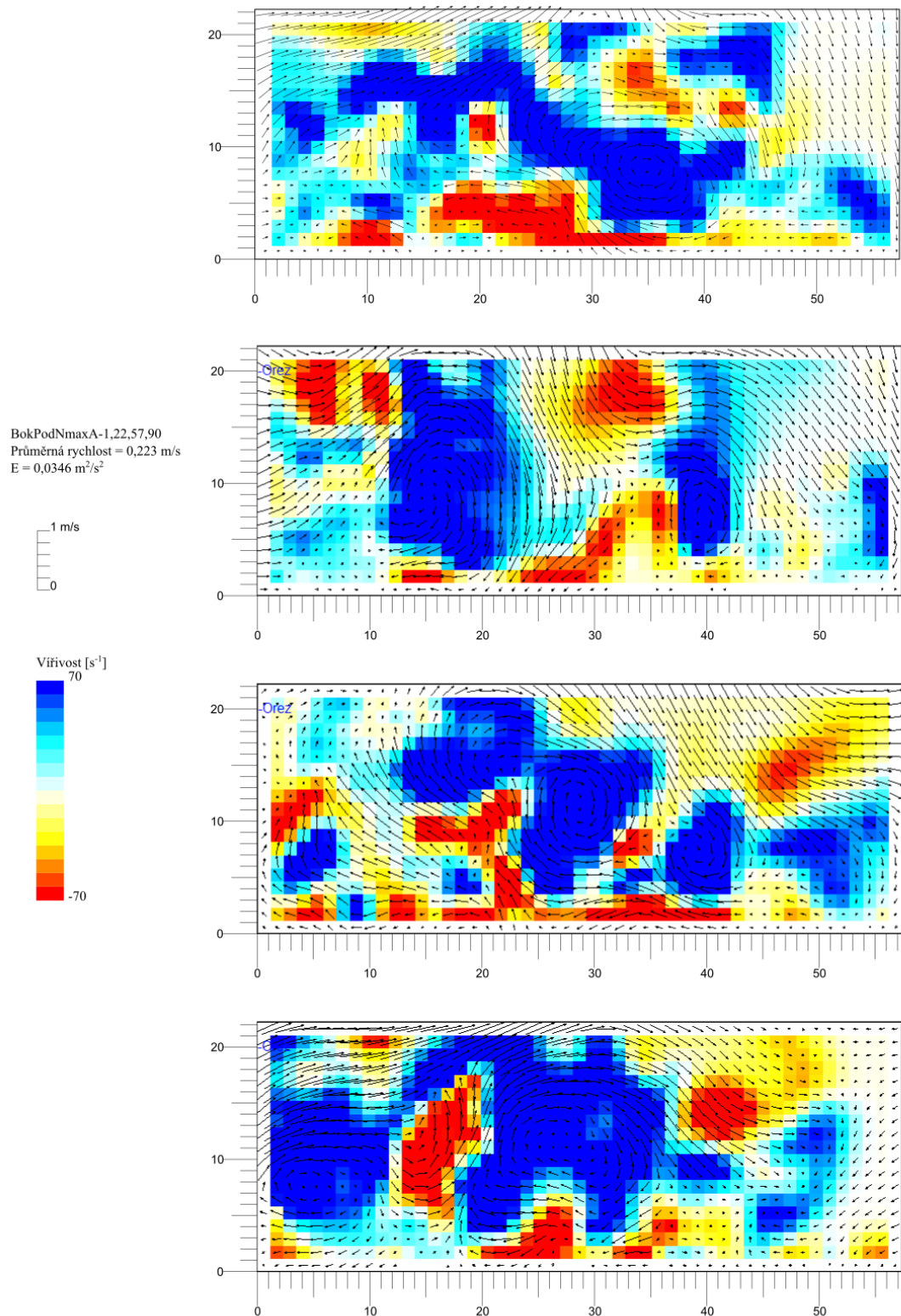
70
-70



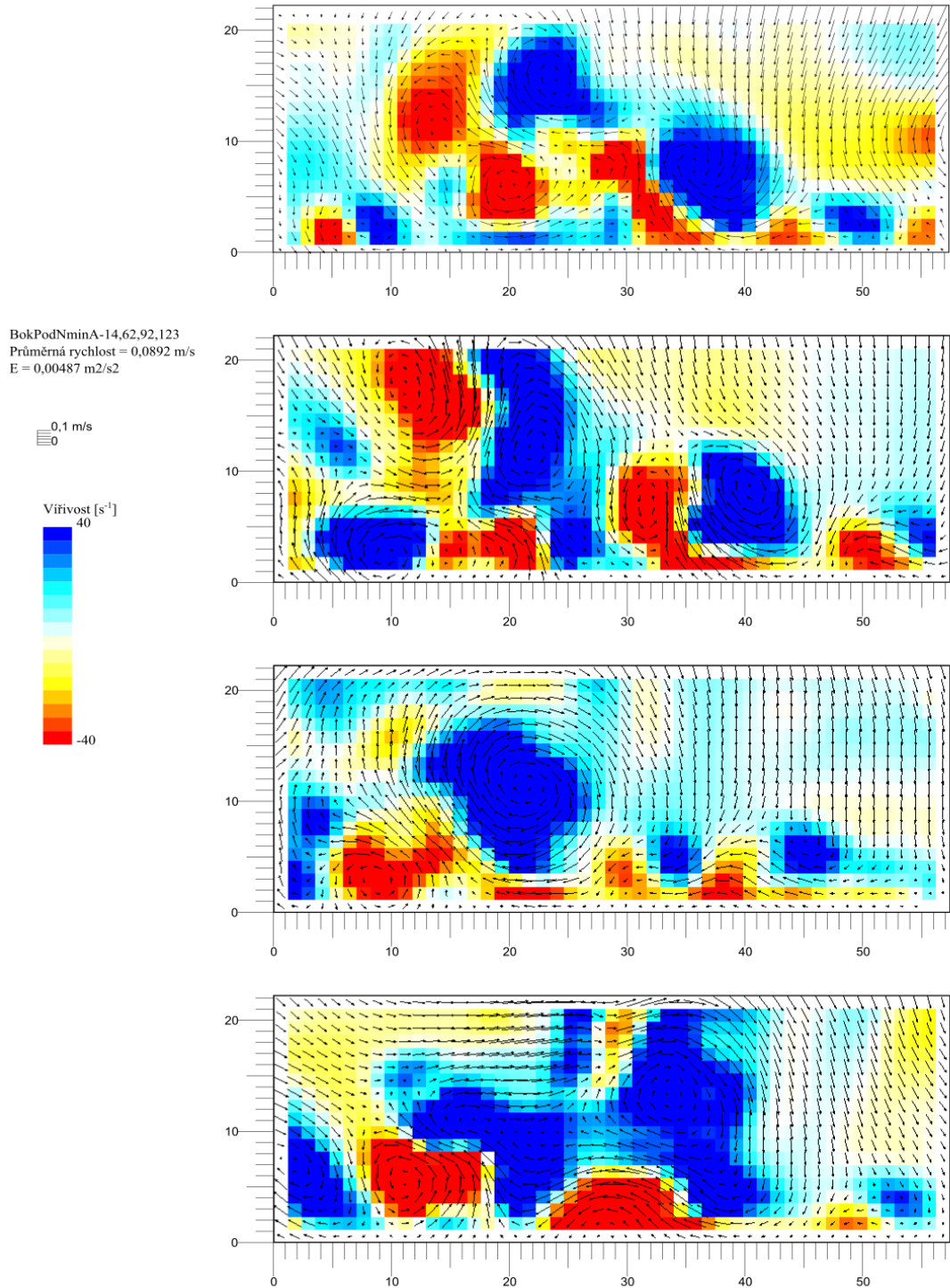
Graf S3: Bok –deska nad frézou, maximální otáčky, srovnání několika okamžitých rozložení vířivosti



Graf 4: Bok –deska nad frézou, minimální otáčky, srovnání několika okamžitých rozložení vířivosti

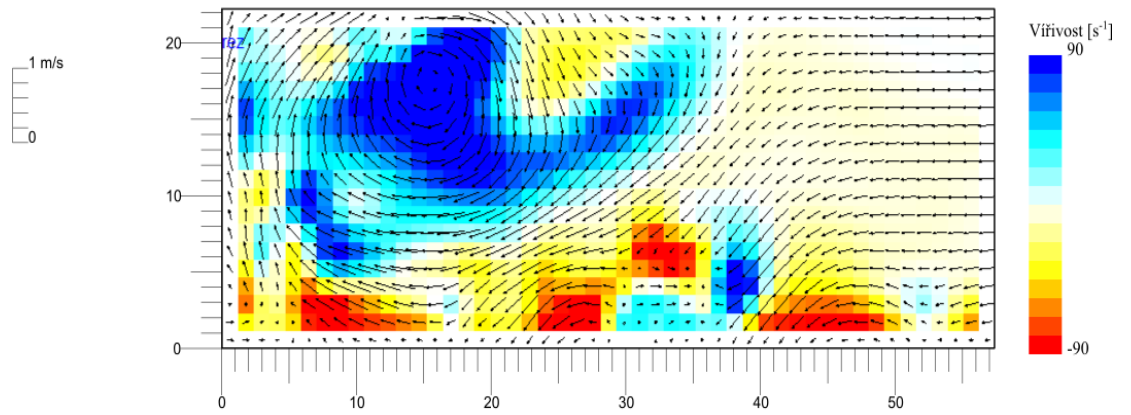


Graf S5: Bok –deska pod frézou, maximální otáčky, srovnání několika okamžitých rozložení vířivosti

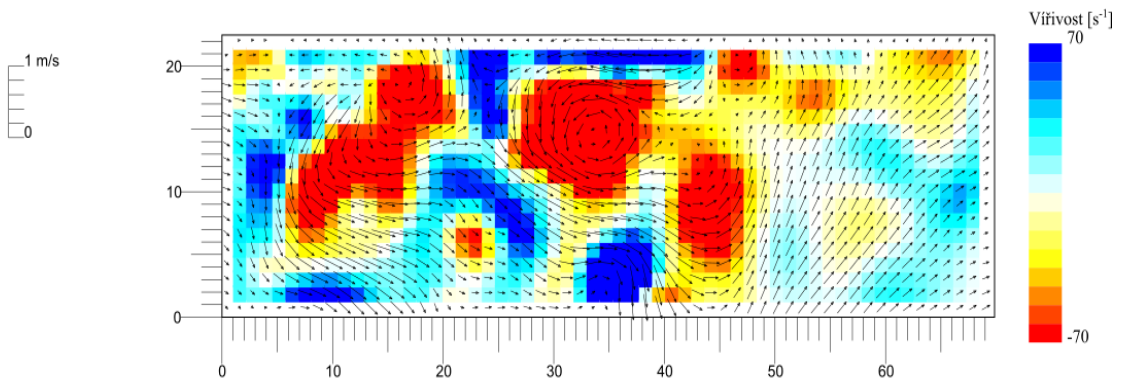


Graf S6: Bok –deska pod frézou, minimální otáčky, srovnání několika okamžitých rozložení vířivosti

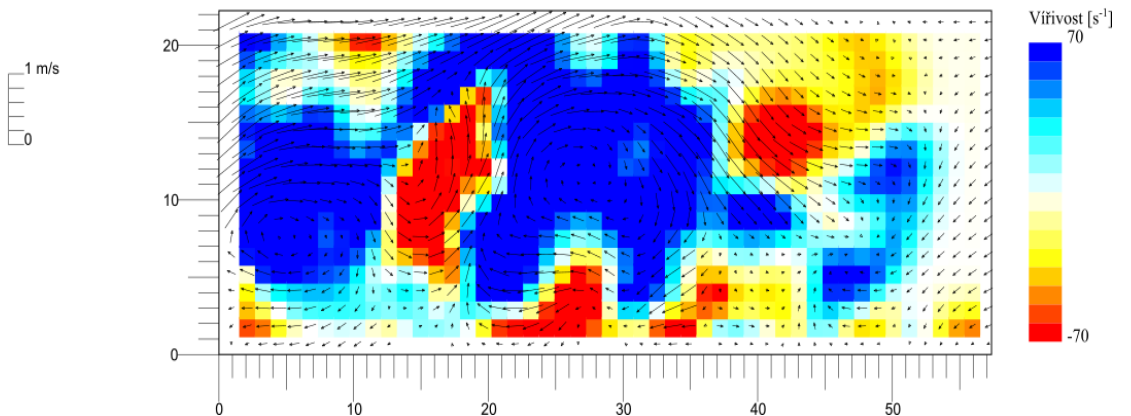
BokStranaNmax-111
 Průměrná rychlost = 0,24 m/s
 $E = 0,0353 \text{ m}^2/\text{s}^2$



BokNadNmax-112
 Průměrná rychlost = 0,207 m/s
 $E = 0,0262 \text{ m}^2/\text{s}^2$



BokPodNmax-90
 Průměrná rychlost = 0,252 m/s
 $E = 0,0466 \text{ m}^2/\text{s}^2$



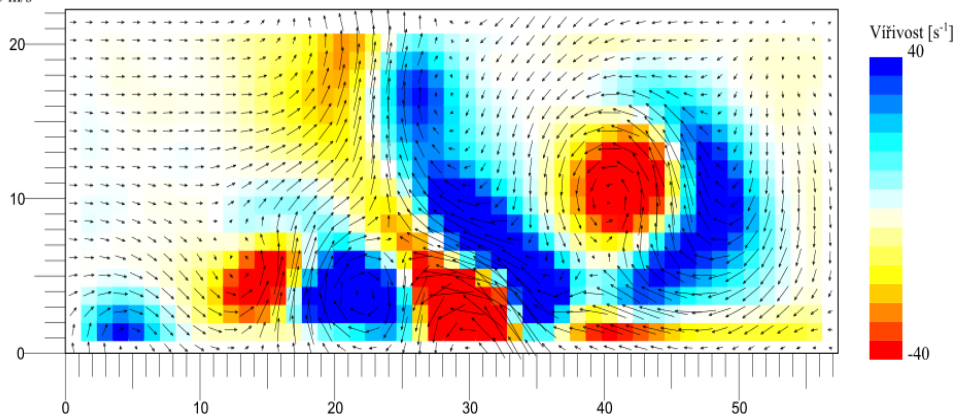
Graf SMax: Srovnání vířivosti při maximálních otáčkách mezi rovinami γ , ϵ , δ

BokStranaNmin-59

Průměrná rychlost = 0,0565 m/s

$E = 0,00237 \text{ m}^2/\text{s}^2$

0,1 m/s
0

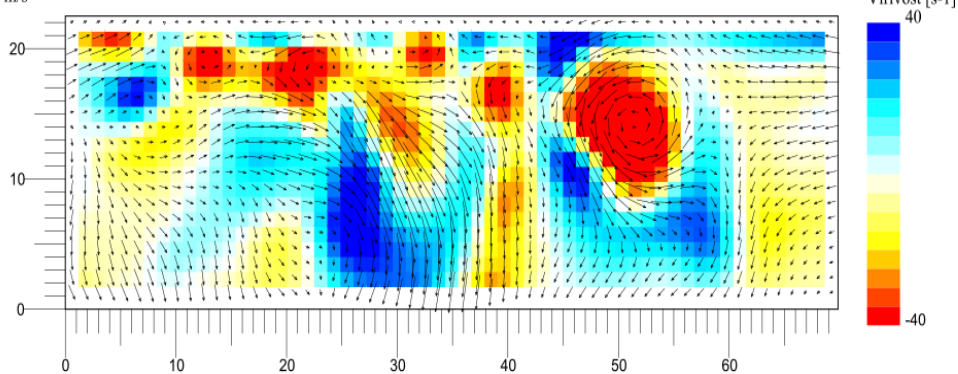


BokNadNmin-64

Průměrná rychlost = 0,077 m/s

$E = 0,00394 \text{ m}^2/\text{s}^2$

0,1 m/s
0

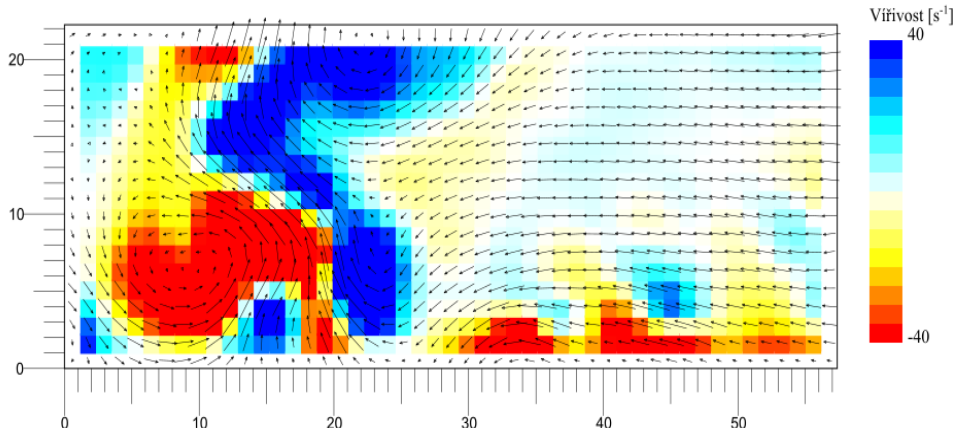


BokPodNmin-62

Průměrná rychlost = 0,116 m/s

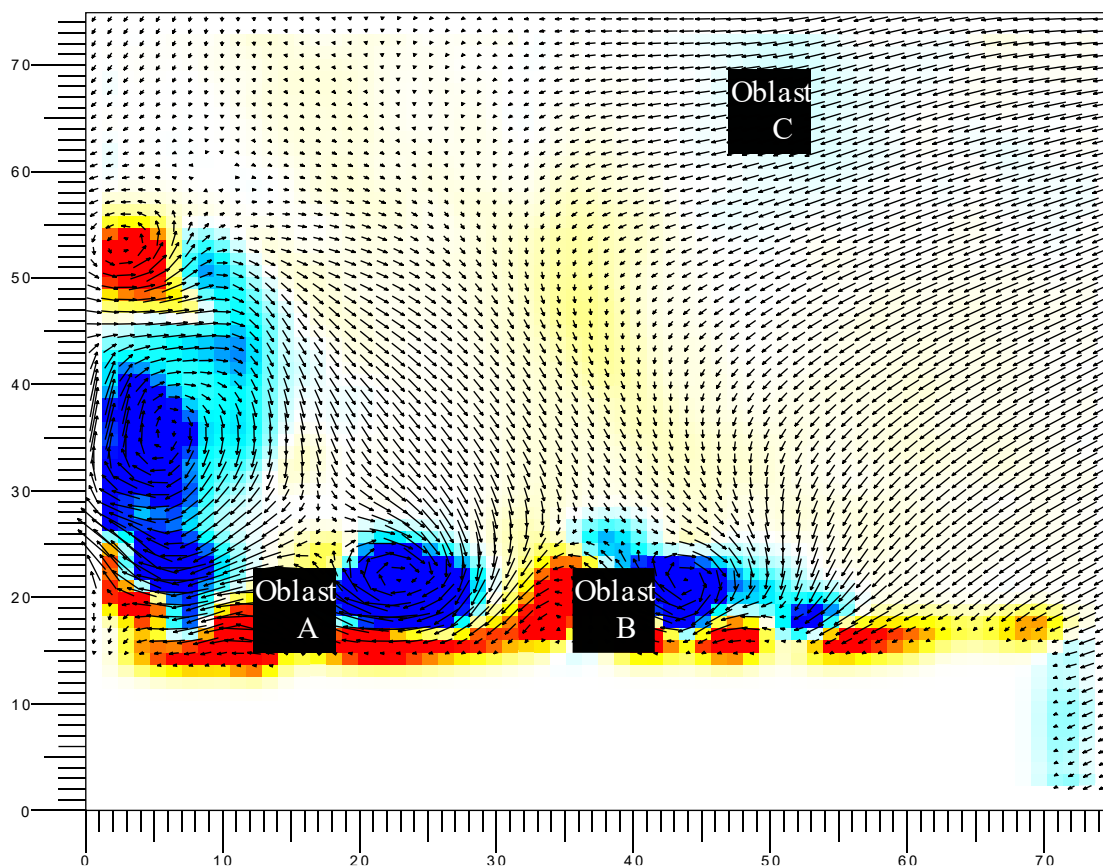
$E = 0,00796 \text{ m}^2/\text{s}^2$

1 m/s
0



Graf SMin: Srovnání vířivosti při minimálních otáčkách mezi rovinami γ , ϵ , δ

6.5. Histogramy

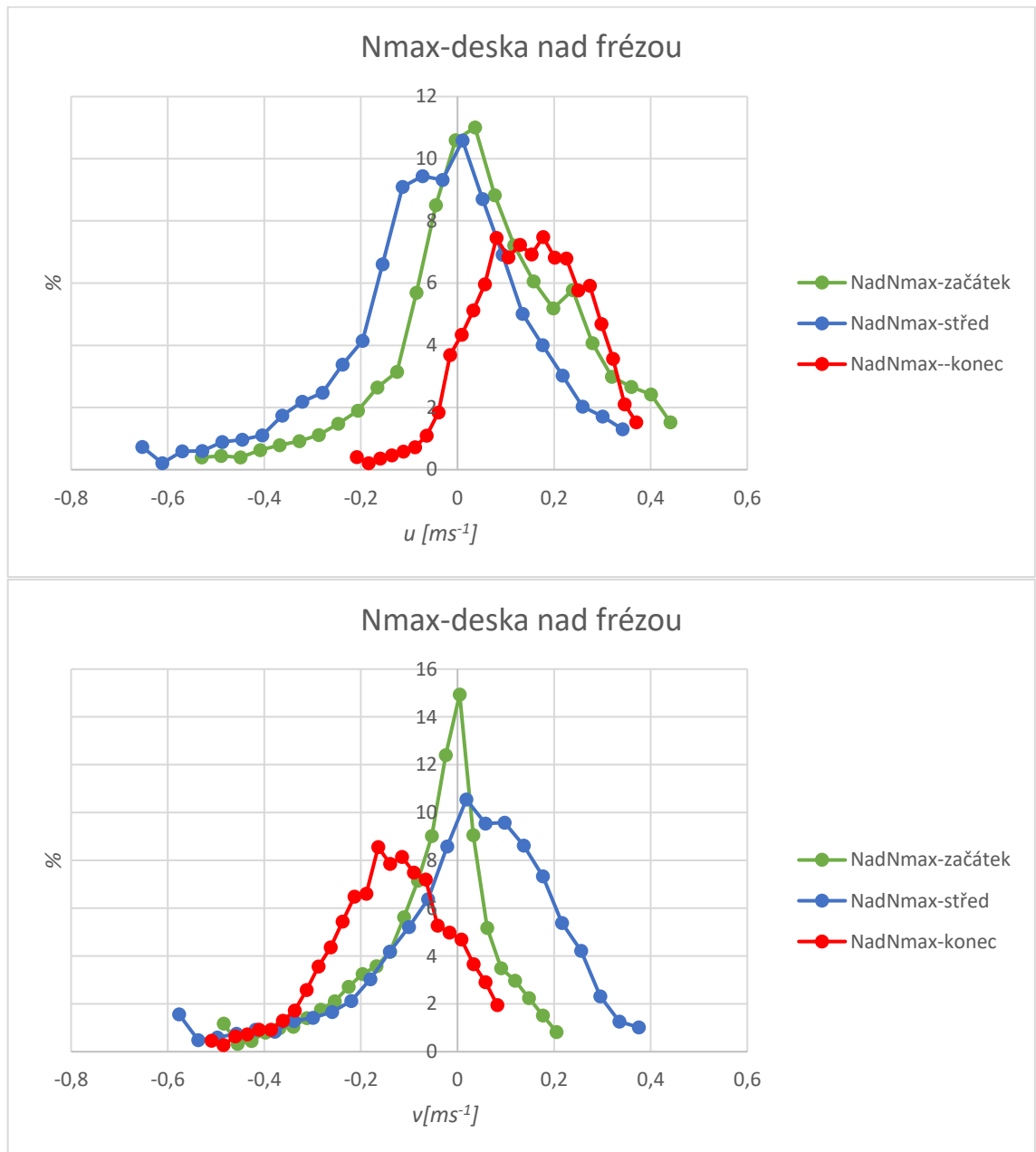


Obr. 24: Oblasti pro tvorbu histogramů

Histogramy byly vytvořeny z čtvercových oblastí o velikosti 6×6 dílků měřítka (obr. 24) pouze pro hodnoty naměřené z boku frézy. Posuzovaná pole byla vybrána tak, aby byl vidět průběh rychlostí (u, v) částic u frézy a rychlosti částic ve větší vzdálenosti (pozorování vlivu frézy na zbylé částice). U desky nad frézou byly samozřejmě oblasti obráceně, ale všechna data rovin byla brána přibližně ze stejných míst. Oblast A odpovídá místu u konce aktivní části frézy, oblast B se nalézá blíže špičce frézy a oblast C je brána z volného proudu tekutiny (hlavně pro porovnání s pozicemi u frézy).

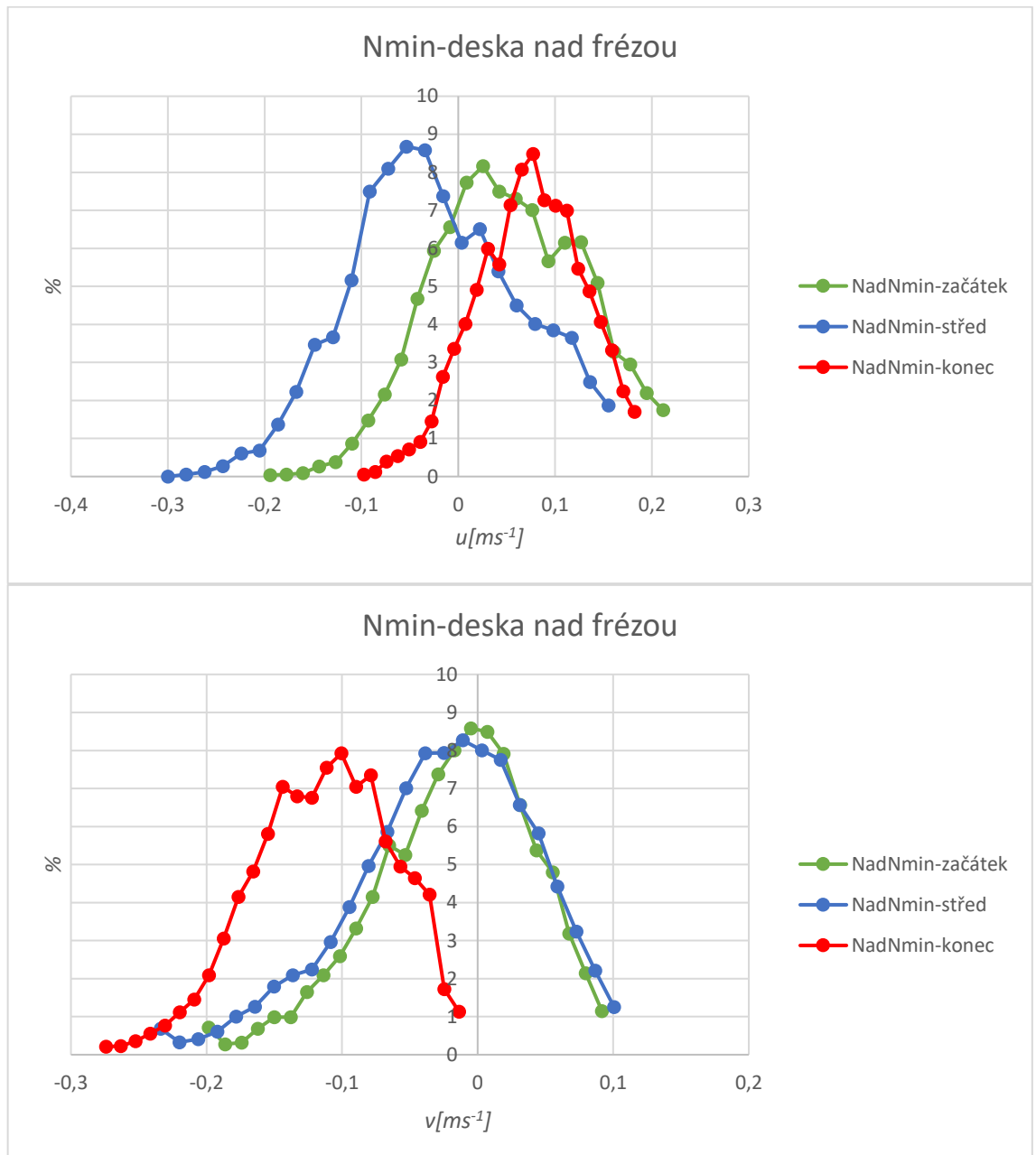
Na jednotlivých histogramech je na svislé ose zobrazen procentuální výskyt příslušné hodnoty a na vodorovné ose buď axiální složka rychlosti u , nebo radiální složka rychlosti v . Průběh rychlosti ve směru radiálním (v) je podstatnější, ale pro úplnost byla vyhodnocena i rychlost podél osy frézy. Pro přehlednost byly vytvořeny bodové grafy sestávající z 24 údajů pro každé pole. Údaje o rychlostech a procentech byly vygenerovány z oblastí, které byly zobrazeny na náhodném snímku okamžité rychlosti každého měření. Z jednoho vybraného obrázku byl tedy vytvořen histogram pro obě rychlosti ve stejných oblastech. Rychlosti dosahují také záporných hodnot, což ve fyzikálním významu znamená pouze změnu směru proudění.

Rozložení pravděpodobnosti výskytu částic vyjadřuje procentuální počet částic pohybujících se určitou rychlostí v okolí frézy. Zjednodušeně jaké je procentuální rozložení částic v oblasti a jaké množství má rychlosti ve vybrané oblasti.



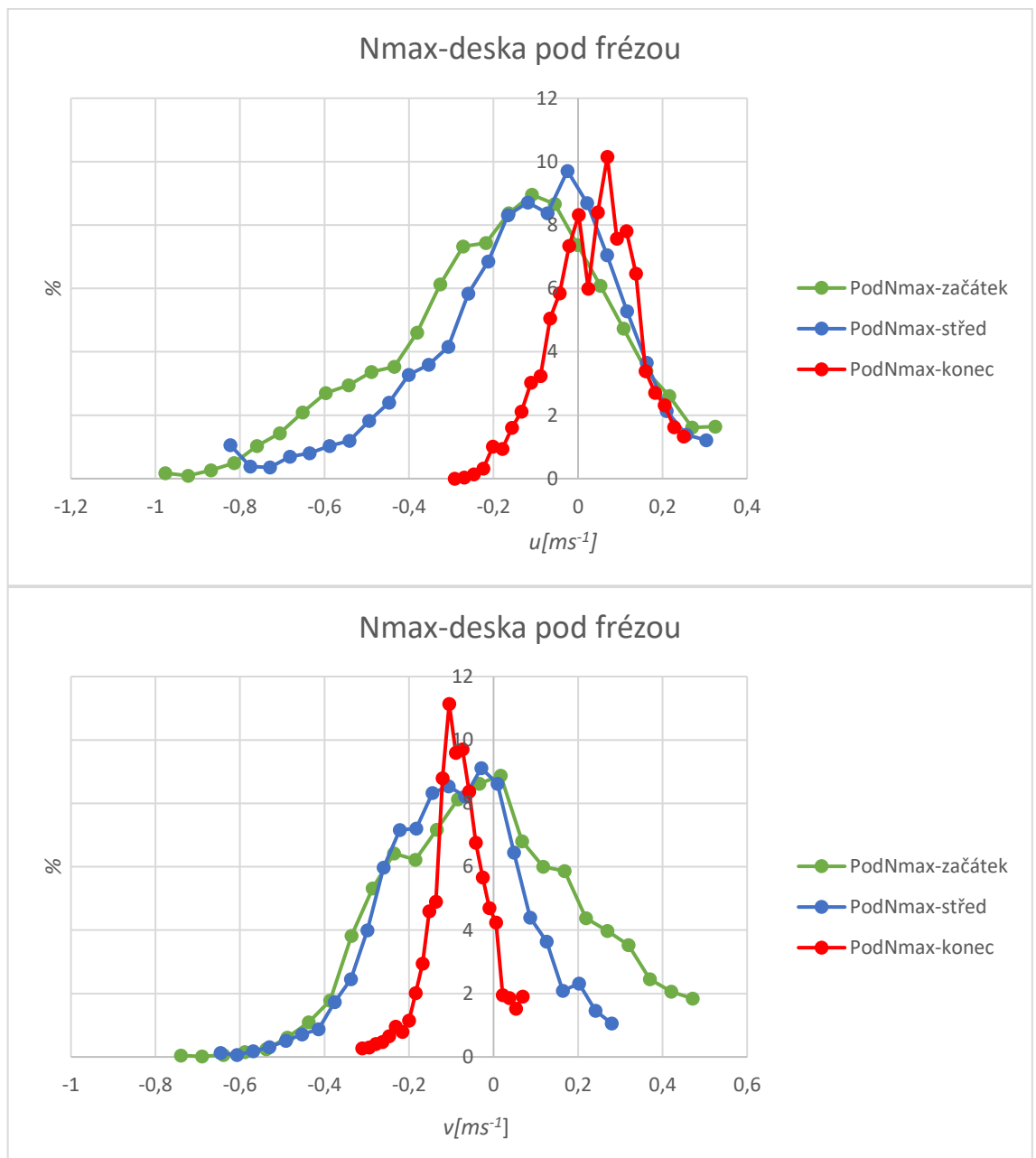
H1-2: Bok-deska nad frézou – maximální otáčky, srovnání 3 oblastí v okolí frézy z hlediska vodorovné a příčné rychlosti

V rovině ε (deska nad frézou) při maximálních otáčkách (histogram 1-2) je vidět výsledek rychlostí v podélném a příčném směru. Podélná rychlost u vyobrazená na prvním histogramu, dosahuje v rozmezí 0–0,6 ms^{-1} nejvyššího počtu událostí, a to na začátku a středu, což je očekávaný výsledek. U rychlosti v je na začátku velký počet částic s rychlostí pohybující se v našem rozlišení okolo 0 a s postupem ke středu a konci má zhruba 8-10 % částic rychlost od $-0,1$ – $0,1$ ms^{-1} . Při porovnání je vidět, že obě rychlosti na středu dosahují cca stejných hodnot, na konci dosahují stejných hodnot, ale v jiném směru a největší rozdíl je na začátku, kdy došlo u příčné rychlosti k rozdílu okolo 4 % oproti podélné, avšak tato hodnota se pohybovala okolo nulové rychlosti v tomto směru, což znamená, že o 4 % více částic téměř nemělo rychlost.



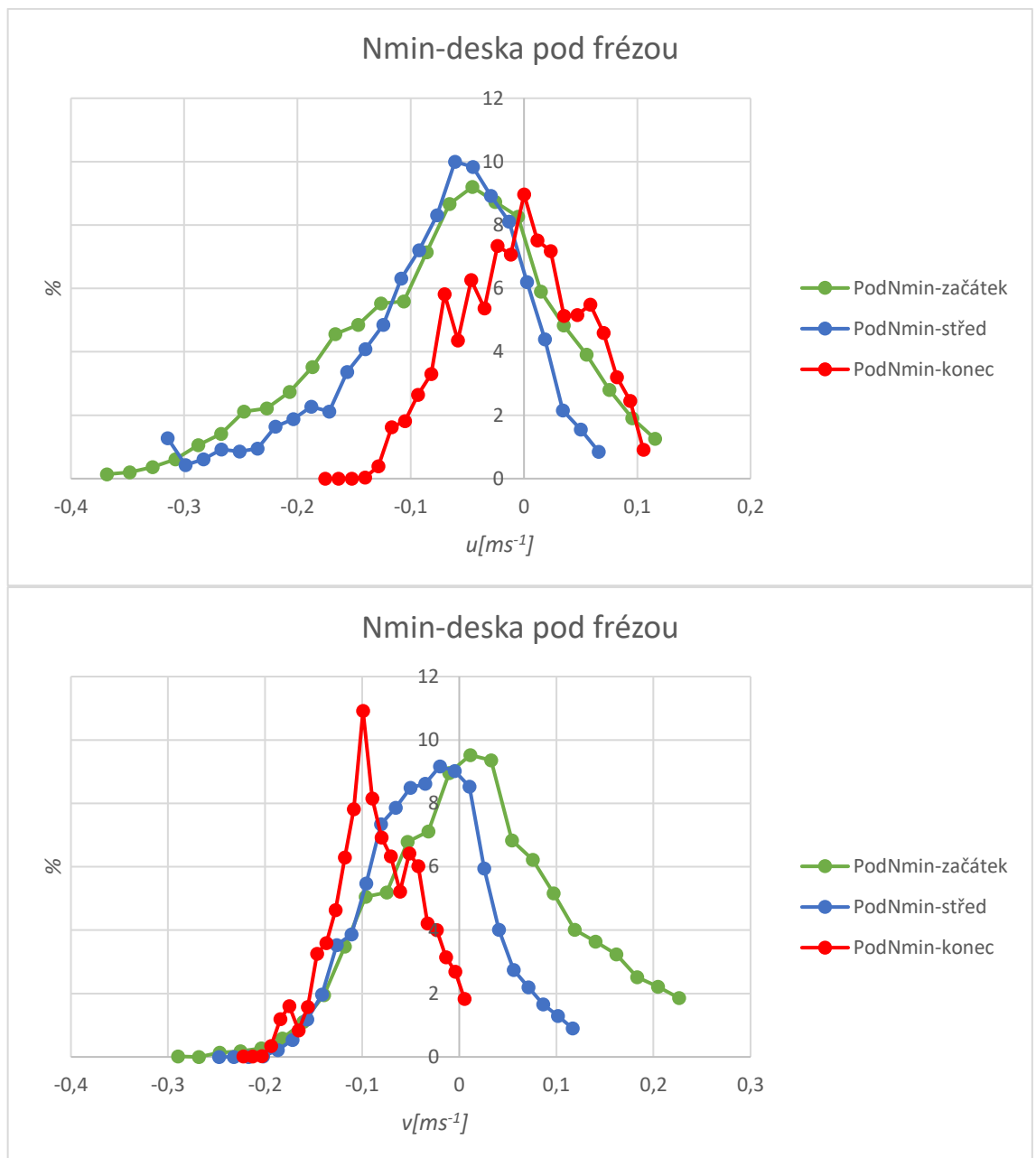
H3-4: Bok-deska nad frézou – minimální otáčky, srovnání 3 oblastí v okolí frézy z hlediska vodorovné a příčné rychlosti

U minimálních otáček dochází k poklesu rychlosti v obou směrech. Lze si všimnout, že bodové křivky na prvním histogramu jsou si podobné, až na počáteční posun, kdy částice na středu dosahovaly nejvyšších hodnot. U druhého histogramu příčné rychlosti v jsou oblasti na začátku a středu téměř shodné, tudíž nedochází ke značným změnám rychlosti, oproti tomu oblast mimo frézu se pohybuje ve vyšších hodnotách okolo $-0,1 \text{ ms}^{-1}$.



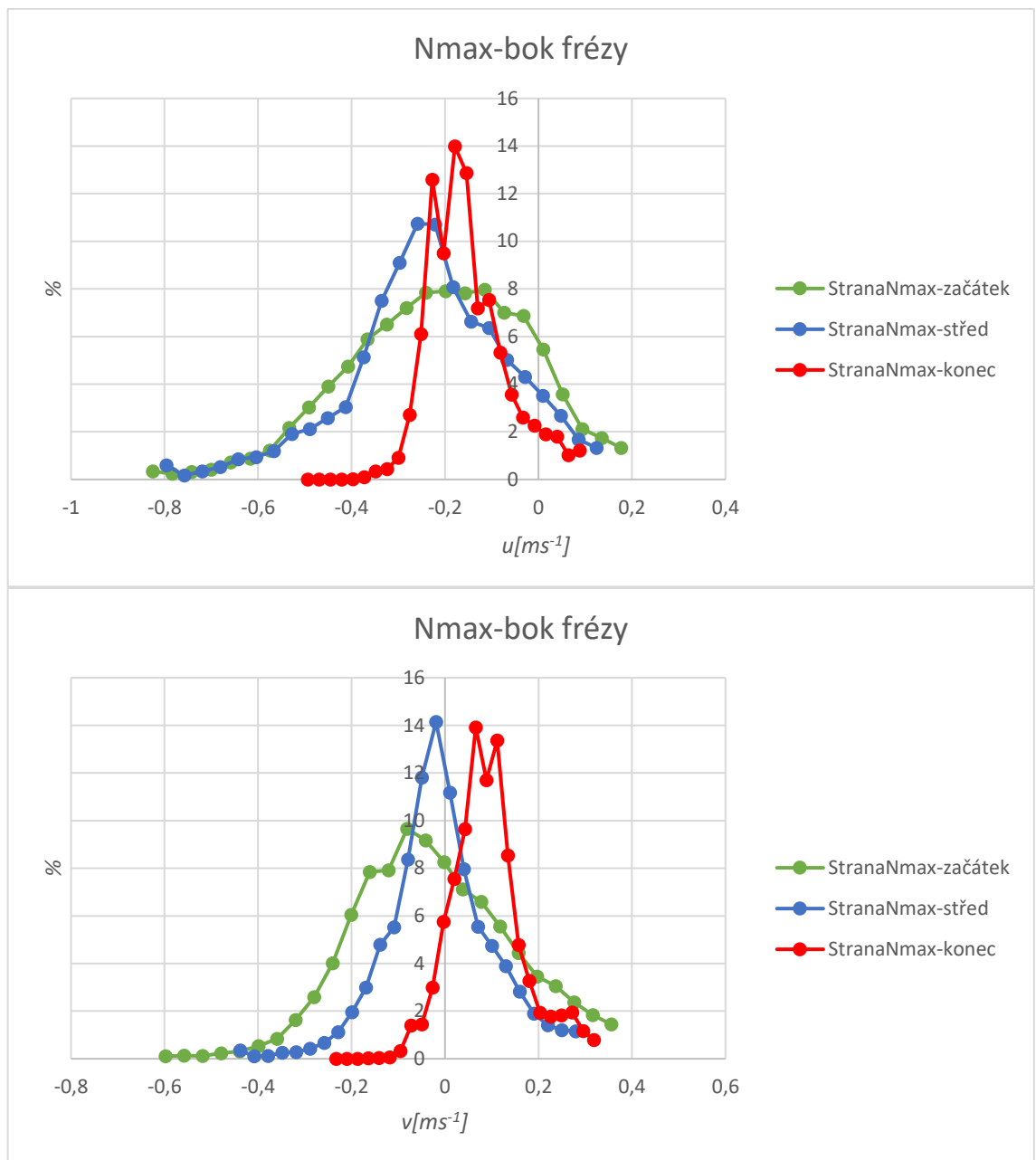
H5-6: Bok-deska pod frézou – maximální otáčky, srovnání 3 oblastí v okolí frézy z hlediska vodorovné a příčné rychlosti

Při umístění desky pod frézu je dosaženo vyšších rychlostí v obou směrech než při poloze desky nad frézou. U podélné rychlosti je dosaženo až rychlosti -1 ms^{-1} . Oproti desce nad frézou je zde i vidět nárůst počtu částic ve vnějším proudu (označeno konec), ale také s nižší rychlostí.



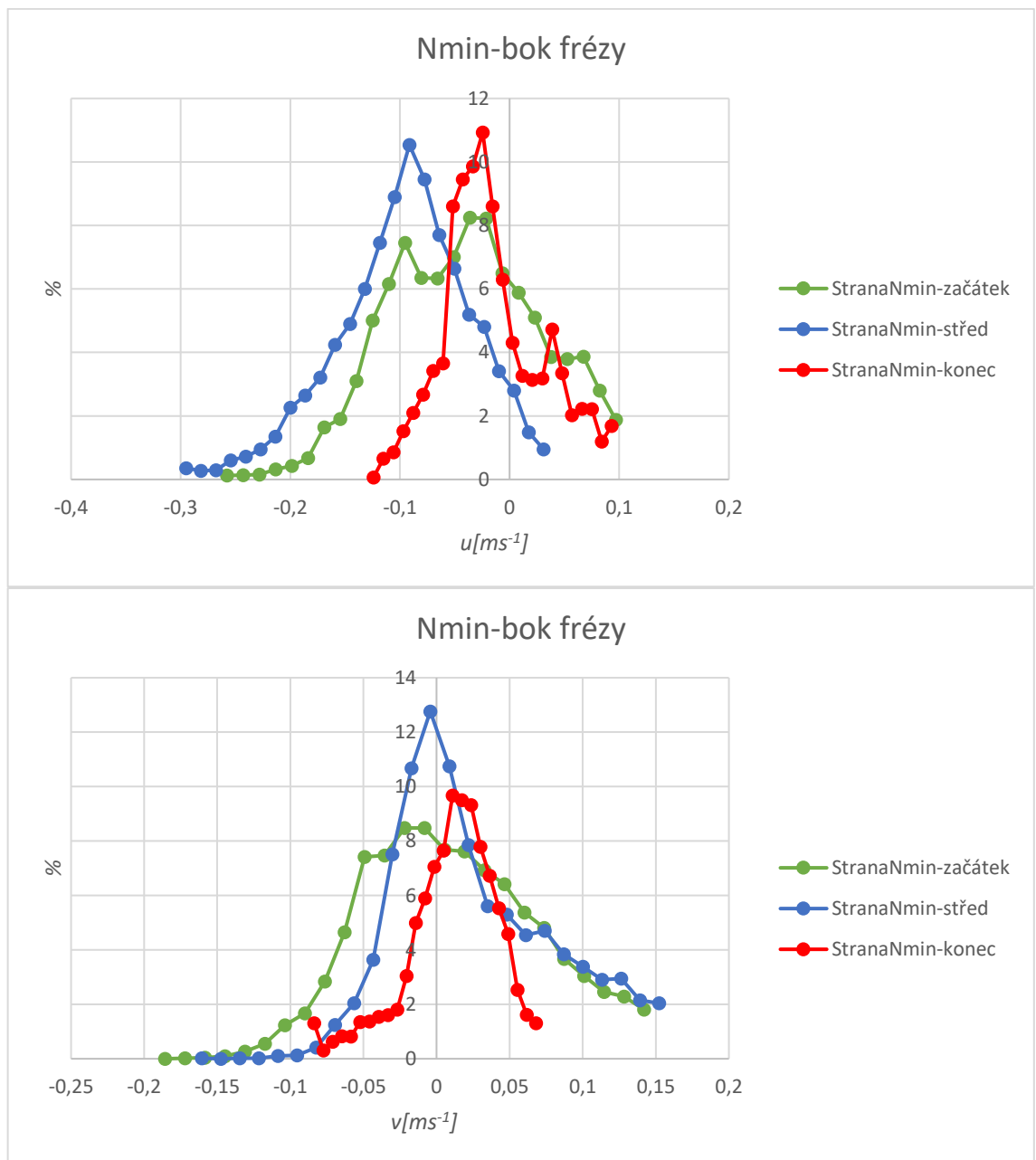
H7-8: Bok-deska pod frézou – minimální otáčky, srovnání 3 oblastí v okolí frézy z hlediska vodorovné a příčné rychlosti

U minimálních otáček je průběh rychlosti na začátku i středu skoro stejný jako u maximálních otáček, ovšem opět s menšími hodnotami rychlosti. U příčné rychlosti v jsou histogramy velmi podobné u obou otáček.



H9-10: Bok – maximální otáčky, srovnání 3 oblastí v okolí frézy z hlediska vodorovné a příčné rychlosti

Poslední z porovnávaných oblastí je bok frézy s příčnou deskou. Zde je vidět podobnost mezi touto a předešlou rovinou, kde se deska nachází pod frézou. Ve srovnání s předchozí rovinou jsou rychlosti i počty částic vyšší.

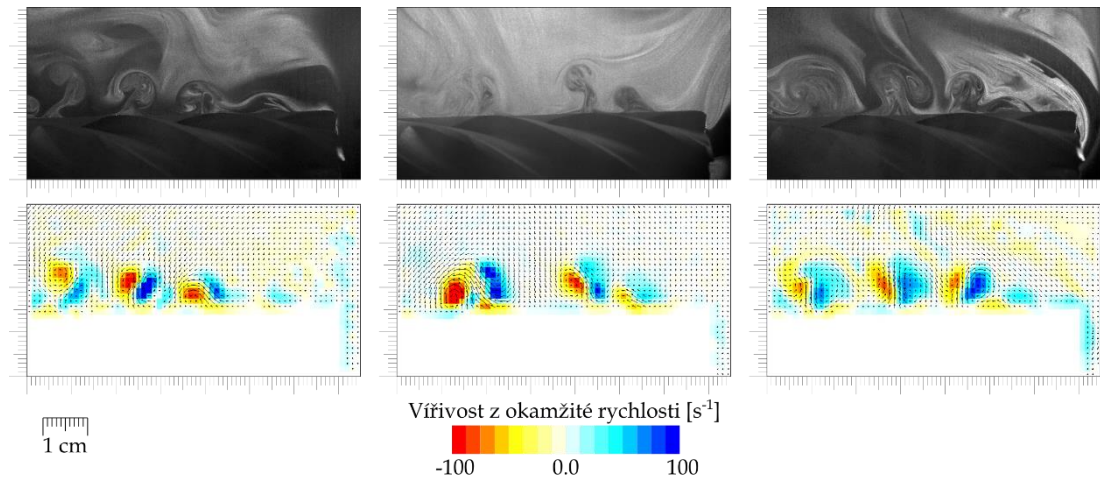


H11-12: Bok – minimální otáčky, srovnání 3 oblastí v okolí frézy z hlediska vodorovné a příčné rychlosti

Při minimálních otáčkách jsou histogramy z hlediska začáteční a střední oblasti velmi podobné předešlé rovině. Změna opět nastává při srovnání pole mimo frézu, kde rychlost může být náhodná. U rychlosti v byly při tomto umístění naměřeny nejnižší rychlosti.

Pokud se zaměříme na „píky“, kde je pohyb bodů zhruba nulový, lze dojít k závěru, že se tvoří z důvodu nedostatku částic. Ovšem s uvažováním, že tento stav byl pravidelný u histogramů (přibližně uprostřed) rovin, kde je deska pod frézou a příčná, mohl být způsoben nárazem částic na zub frézy.

7 Diskuze

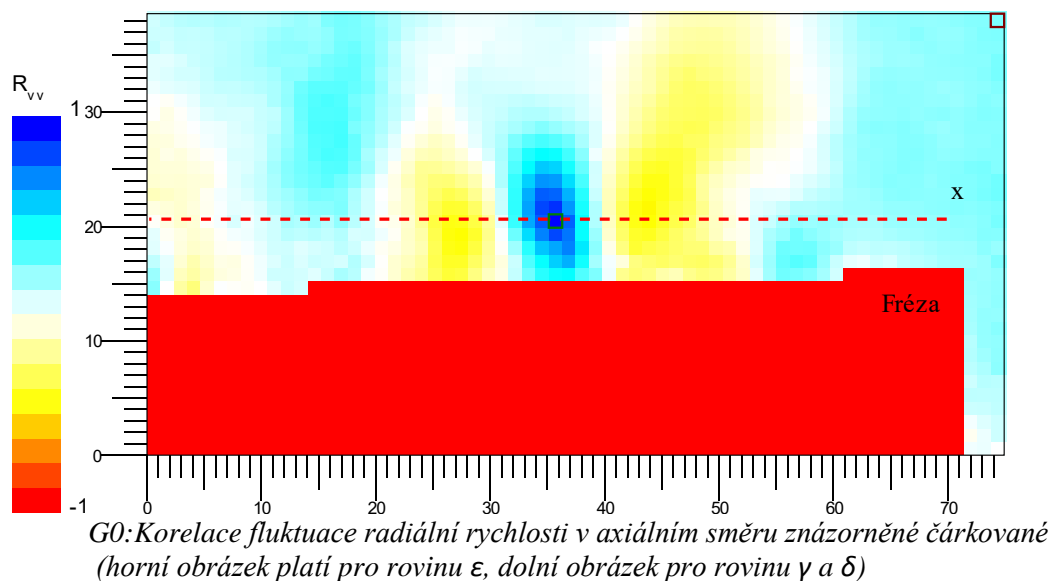


Obr. 24: Horní záběry – PIV snímky během experimentu (viditelnost plum), spodní obrázky jsou zhotovené z horních a obarvené okamžitou vířivostí

Přímo na nezpracovaných záběrech PIV jsou vidět útvary (plumy) tvořící se okolo frézy. Jsou důsledkem nestacionárního a nestabilního proudění. Tvorba plum je známá především v případě tepelné konvekce, kdy je způsobena změnou hustoty tekutiny v blízkosti ohřívaného povrchu. Zde se jedná o principiálně stejný mechanismus: Rayleighovu nestabilitu, kdy je vztlak vyvolán nikoli změnou teploty, ale změnou odstředivé síly působící na element tekutiny, který je rotačně strháván rotující frézou. Jelikož fréza má stálou teplotu a částice okolo ní se mísí a dochází k disipaci energie (vznik tepla). Když tekutina stoupá, vytváří se Rayleighova-Taylorova nestabilita a částice jsou nasávány do hřibovitých útvarů (plum), v jejichž „hlavě“ molekuly o vyšší kinetické energii tekutiny cirkulují. Jakmile plumy dosáhnou rovnovážné polohy, začínají se zplošťovat a rozpadat, v důsledku poklesu turbulence. [20]

7.1. Použitelnost současného rozlišení

Je otázkou, zda použité rozlišení dané objektivem a vzdáleností mezi kamerou a studovanou rovinou, je dostatečné pro tento problém. Jak je patrné, velkoškálové struktury srovnatelné s celou frézou jsou dobře viditelné, avšak malé, jako například plumy (zmíněné výše), jsou nasnímány s nedostatečným rozlišením. Exaktnější soud je možno vynést s použitím prostorové korelační funkce (viz G1-G5).



Korelační funkce popisuje ustředněné násobení fluktuací, kdy v 1 bodě je korelace a další bod je posunut o Δx , Δy .

$$R_{vv}(\Delta x, \Delta y) = \frac{\langle v'(x, y) \cdot v'(x + \Delta x, y + \Delta y) \rangle_T}{\sigma[v'(x, y)] \cdot \sigma[v'(x + \Delta x, y + \Delta y)]} \quad 7-1$$

$$\sigma[v] = \sqrt{\langle (v - \langle v \rangle_T)^2 \rangle_T}$$

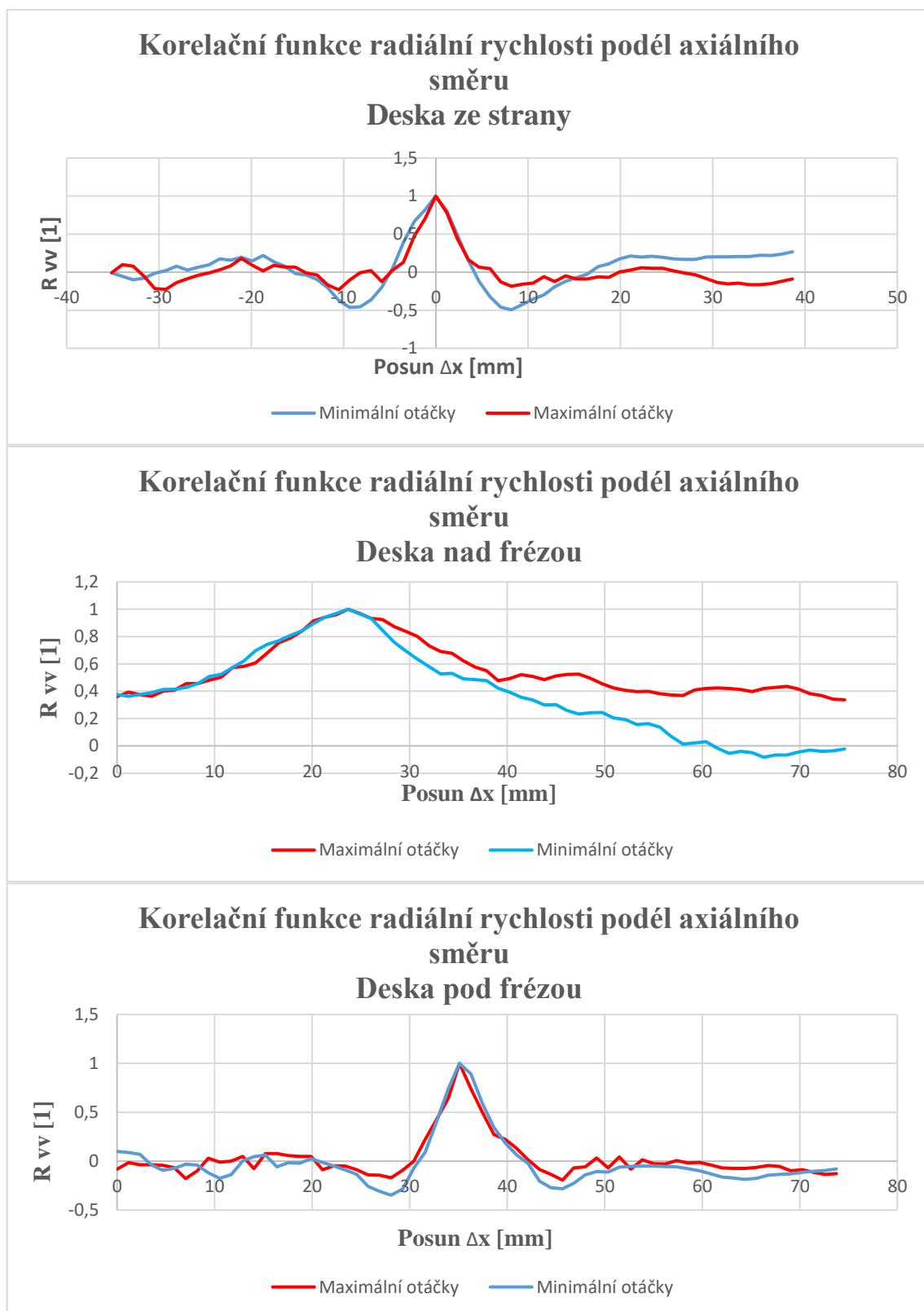
$$v' = v - \langle v \rangle_T$$

$$\langle \cdot \rangle_T$$

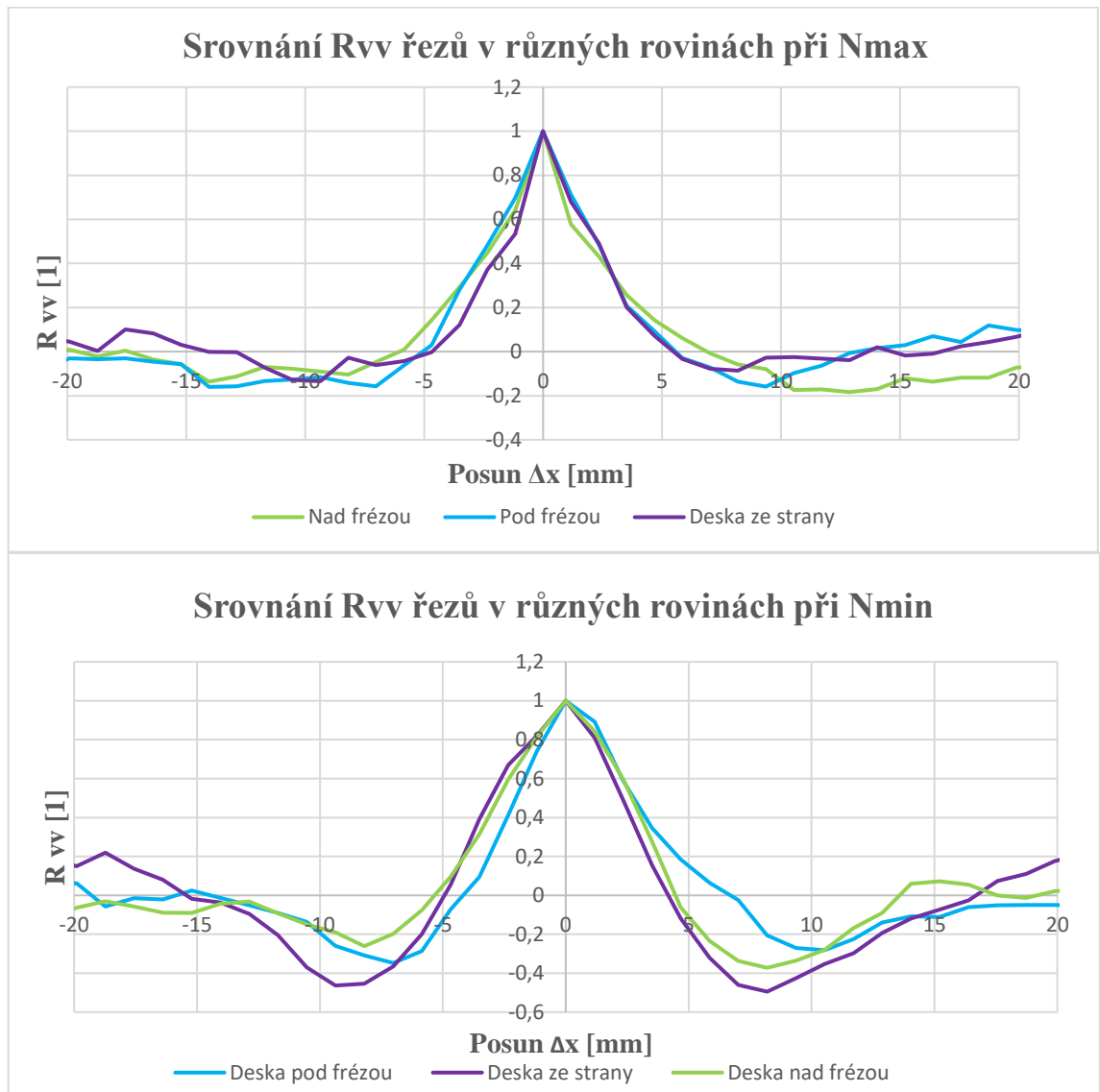
Směrodatná odchylka

Fluktuace radiální rychlosti

Průměr přes časovou řadu



G1-G3: grafy korelačních funkcí pro roviny γ, δ, ϵ



G4-5: Srovnání rovin γ , δ , ϵ při maximálních a minimálních otáčkách

Ve výzkumu turbulencí se korelační funkce často používá k určení velikosti koherentní struktury. Korelační funkce podobně jako vzájemná statistická korelace dvou souborů může nabývat hodnot od -1 do 1 s tím, že 1 odpovídá tomu, že fluktuační jsou stejné, -1, že jsou přesně opačné a 0, může znamenat buď, že spolu statisticky nesouvisí, nebo že je mezi hodnotami fázový posun o 90° . To je i tento případ, kdy korelační funkce radiální rychlosti v v axiálním směru x zobrazuje prostorovou vlnu fluktuační, neboť korelační funkce přejímá periodicitu původní funkce. V případě minimálních otáček tedy nula neznamená dosažení integrálního délkového měřítka, to je dosaženo až ve větší vzdálenosti, kdy se charakter vlny ztratí, tedy až cca 30 mm. Naproti tomu při maximálních otáčkách je obdobná vlna také naznačena, ovšem její charakter se rozplyne v pozadí podstatně dříve.

Z pohledu na ostrot maxima v okolí $\Delta x = 0$ je vyvozeno, že rozlišení měření se nachází daleko od Kolmogorova měřítka, neboť při ideálním rozlišení by na špičce měla být pozorovatelná parabola, jejíž pološířka udává Kolmogorovo měřítko.

Použité rozlišení je tedy dostatečné pro získání přehledné situace makroskopického středního proudění, rovněž k identifikaci velkých okamžitých vírů, avšak ke studiu struktur na středních a menších měřítkách by bylo potřeba rozlišení zvětšit tím, že by se kamera posunula blíže ke studované rovině. V tom případě by však bylo nutné zvlášť měřit proudění u špičky, paty a středu frézy, což by bylo nad časový rámec této práce.

8 Závěr

Cílem této práce bylo experimentálně pozorovat proudění okolo frézy, ke které byla přidána deska, ilustrativně sloužící jako obrobek. Proudící částice byly opticky snímány metodou PIV, díky které bylo možno pozorovat celé pole najednou. Každé měření bylo nastaveno na zhruba 150 snímků, které byly dále filtrovány a až z vyhodnocených dat byly vytvářeny grafy. Zprvu bylo nastaveno 500 snímků, ale ukázalo se, že počet částic a stálost otáček vrtačky se dala relativně udržet pouze na 100-200 snímků maximálně, proto bylo bráno méně dat vícekrát, ale i tak bylo zaznamenáno kolísání otáček, proto by bylo vhodné pro příští experiment zařadit místo vrtačky motor.

V kapitole 6 jsou shrnuta výsledná data v podobě grafů a histogramů měřených rovin α , β , γ , δ , ε s jejich vzájemným srovnáním. Změnou polohy desky byl sledován vývoj turbulentního proudu, a tím vliv na tvorbu vírů, které se konstrukčně lišily. Jejich disipace měla za následek změny teploty v proudu a vznik plum, které jsou dále analyzovány v kapitole 7.

Výsledky měření byly ukázány z hlediska použitých operací: turbulentní kinetické energie, entropie a vířivosti, které byly podloženy grafy zpracovaných dat. Na nich si lze povšimnout několika jevů. Rotace frézy ovlivňuje pouze nejbližší okolí, proto většina koherentních vírových struktur vzniká právě u ní, čím více se částice vzdalují, tím rychleji dochází k disipaci energie. Začátek vývoje proudu byl pravděpodobně u desky pod frézou, jelikož tam je dosaženo nejstabilnějších a největších energetických vírů, vývin postupoval přes desku ze strany, kde měly víry nižší energii a nejmenších setrvačných vírů (nejstaršího proudění) vznikalo při umístění desky nad frézu. Dalším průzkumem stavu okolo frézy bylo sledování pravděpodobnostního rozložení výskytu částic a jejich axiální a radiální rychlosti ve 3 oblastech. V místech u frézy se rychlost pohybovala okolo $0-0,6 \text{ ms}^{-1}$, což je potvrzeno i v tabulce 1 a na průměrných i okamžitých rychlostech grafů, proto se rychlostmi blízkými 0 pohybuje nejvíce částic.

Při tvorbě grafů i histogramů byly zaznamenány hřibovité útvary (plumy) vznikající v blízkosti frézy způsobené Rayleighovou-Taylorovou nestabilitou (viz úvod). Za další podrobnější průzkum stálo posouzení rozlišení použité kamery. Proto byla vytvořena korelační funkce, která měla odhalit, zda kamera stačí k zobrazení alespoň makroskopických útvarů. Korelační funkce znázorňuje vlnu fluktuací v axiálním směru (podél frézy) a v ideálním případě by měla být popsána parabolou. Použitá optika tento ideál úplně nesplňuje, ale zdá se být vhodná pro zobrazení makroskopických vírových struktur.

Celý experiment byl v podstatě veden jako obrábění za sucha, tedy bez použití procesní kapaliny, jelikož k přímému frézování nedošlo. Z výsledných hodnot rychlostí (malý rozsah otáček) a použitých vyhodnocovacích funkcí (TKE, entropie, vířivost) lze soudit, že pouhou rotací frézy nedocházelo k nárůstu teplot. Tento fakt by stál za ověření v dalších experimentech tak jako uložení celého zařízení (vrtačka s frézou, kamera, laser) do uzavřeného prostoru (např. z plastu) kvůli udržení počtu částic, polohování kamery a laseru vůči fréze (zaostření na různé objekty v proudu) a v neposlední řadě samotné

frézování za sucha, které by přineslo nejreálnější výsledky. Teplotní pole v okolí frézy a přesnější vizualizace proudění (bez úniku částic) by mohly pomoci v představě o chlazení vzduchem.

9 Citovaná literatura

- [1.] **Drábková, Sylva.** *Mechanika tekutin.* Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1508-4.
- [2.] **Blejchař, Tomáš.** *Turbulence- Modelování proudění-CFX.* Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2606-6.
- [3.] **Nováček, Pavel.** *Moderní chladicí kapaliny pro obrábění.* Brno : VUT Brno-Fakulta strojního inženýrství, 2012.
- [4.] **Uruba.** *Turbulence.* Praha : ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2009. 978-80-01-04330-1.
- [5.] **Ait-Moussa, Nabila.** article.sapub.org. [Online] 2015. [Citace: 13. 10 2019.] <http://article.sapub.org/10.5923.j.ajfd.20150501.02.html>.
- [6.] **Fardin.** The hydrogen atom of fluid dynamics - introduction to the Taylor-Couette flow for soft matter scientists. *Royal Society of Chemistry.* 2014, 10,3523.
- [7.] **Duda, Daniel.** Hydrodynamic education with rheoscopic fluid. *EPJ Web of Conferences.* [Online] 28. 6 2019. [Citace: 15. 3 2020.] <https://doi.org/10.1051/epjconf/201921302014>.
- [8.] **Linhart.** *Mechanika tekutin.* Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2009. 978-80-7043-766-7.
- [9.] **White, Frank M.** *Fluid Mechanics.* New York : McGraw-Hil, 2011. 978-0-07-352934-9.
- [10.] **Andereck.** Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders. *Cambridge univeresity press.* 1986.
- [11.] **Lautrup.** *Physics of Continuous Matter.* London : Institute of Physics Publishing, 2005. ISBN 0 7503 0752 8.
- [12.] **Lubeník.** ČVUT DSpace. [Online] 30. 6 2016. [Citace: 16. 10 2019.] <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/63333/F2-DP-2015-Lubenik-Jan-DP-Lubenik.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [13.] **Adrian.** Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields. *Experimnts in Fluids.* 2000.
- [14.] **Falta, Jiří.** *Kvalitativní řešení interakce smykové vrstvy.* Praha : Matematický Ústav Univerzity Karlovy, 2007.
- [15.] **Raffel, M.** *Particle Image Velocimetry .* Cham : Springer, 2018. 978-3-319-68851-0.
- [16.] **Peterka, T.** ČVUT Dspace. [Online] 25. 8 2017. [Citace: 9. 11 2019.] <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73350/F2-DP-2017-Peterka-Tomas-DP-Peterka%20-%20komplet.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [17.] **Scheinerr, Bc. Adam.** *EXPERIMENTÁLNÍ STUDIUM PŘESNOSTI KALIBRACE METODY SPIV.* Plzeň : ZČU, 2010.
- [18.] **Zacpal, Michal.** *Malý robot pro sledování čáry .* Brno : VUT, 2013.
- [19.] **Arduino.cz.** *Co je to Arduino?* [Online] [Citace: 19. 01 2020.] <https://arduino.cz/>.
- [20.] **Tan, Ka-Kheng.** *On predicting mantle mushroom plumes.* Beijing : Geoscience Frontiers-China University of Geosciences, 2011.
- [21.] **Saric, W.** Görtler vortices. Arizona State University, Arizona 85287-6106, 1994