

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**2020**

**Jaroslav CIBULKA**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Cibulka** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **469566**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávací katedra/ústav: **Ústav mechaniky tekutin a termodynamiky**  
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**  
Studijní obor: **bez oboru**

## II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

**Numerická simulace proudění v kanále čtvercového průřezu s kolenem.**

Název bakalářské práce anglicky:

**Numerical Simulation of Flow past a Band Channel of Squared Section**

Pokyny pro vypracování:

1. Formulujte úlohu a proveďte řešení proudění vazké nestlačitelné tekutiny v kanále čtvercového průřezu s kolenem 90°.
2. Popište a identifikujte z výsledků numerických řešení výskyt vírových struktur v proudovém poli v kanále čtvercového průřezu s kolenem 90°.
3. Řešte integrální parametry proudového pole v kanále čtvercového průřezu s kolenem 90°.
4. Proveďte rozbor dosažených výsledků a diskutujte je.

Seznam doporučené literatury:

1. J. Cibulka J., Beneš J. : Numerická analýza proudění čtvercovým kolenem 90°, semestrální úkol, FS ČVUT, Praha 2020
  2. M. Fialová, T. Hyhlík, K. Kozel, P. Šafařík : Numerical Study of Influence of Boundary Conditions on Vortex Structure Development in Curved Rectangular Channels, str.863-868. In : 5th ISAIF, Proc., Internal Flows, Vol.2, Gdaňsk, 2001
  3. M. Hrušová, J. Fořt, K. Kozel, P. Šafařík, M. Škvor : Numerické řešení stacionárního laminárního proudění vazké stlačitelné tekutiny v třírozměrném kanále, Zpráva č.201-99-129, Ú 201, ČVUT, Praha 1999
  4. M.H.Vavra : Aero-Thermodynamics and Flow in Turbomachines, John Wiley and Sons., New York, 1960
  5. ANSYS FLUENT User's Guide
- a další doporučená literatura a internetové zdroje.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

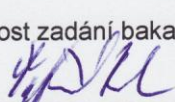
**prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc., 12112**

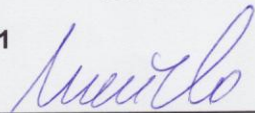
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

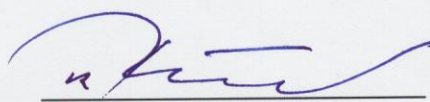
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.04.2021**

  
prof. Ing. Pavel Šafařík, CSc.  
podpis vedoucí(ho) práce

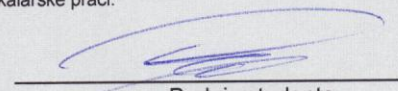
  
prof. Ing. Jiří Nožička, CSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

30.4.2020  
Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta

## **Numerická simulace proudění v kanále čtvercového průřezu s kolenem.**

### **Anotace:**

Předmětem bakalářské práce byla numerická simulace proudění nestlačitelné vazké tekutiny 90° kanálem čtvercového profilu. Pro analýzu byl použit výpočetní software Ansys. Výpočetní síť byla definována v softwaru Ansys Mechanical. Nastavení výpočetního modelu a následné zpracování výsledků bylo provedeno v softwaru Ansys Fluent. Z výsledků analýzy byly identifikovány a popsány vzniklé vírové struktury v proudovém poli formou zobrazení veličin (případně jejich složek) do rovinných řezů a následným rozbořem. Z výsledků simulace byl stanoven součinitel místní ztráty kolene. Zpětná kontrola přesnosti výpočtu byla provedena pomocí výpočtu kvadratických odchylek vybraných integrálních veličin v jednotlivých řezech a jejich přehledným zpracováním do grafů.

### **Klíčová slova:**

CFD, Ansys Fluent, Proudění kolenem 90° se čtvercovým průřezem, vírové struktury

## **Numerical Simulation of Flow past a Band Channel of Squared Section.**

### **Abstract:**

The subject of this bachelor thesis was numerical simulation of flow of incompressible viscous fluid past a band channel of squared section. For the analyses Ansys software was used. Computational grid was defined in Ansys Mechanical software. CFD model was defined, solved and post-processed in Ansys Fluent. Vortex structures were identified from the solution of the analyses and displayed in planar sections. Coefficient of the local loss of the channel was computed from the solution of the simulation. Accuracy of the results was verified by computing the root mean square deviation of chosen integral quantities in planar sections and its processing into graphs.

### **Keywords:**

CFD, Ansys Fluent, flow past a 90° band channel of squared section, vortex structures

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 22.7 2020



.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce prof. Ing. Pavlu Šafaříkovi, CSc. za odborné konzultace, pomoc se zajištěním odborné literatury a další cenné rady v průběhu práce na závěrečné práci. Dále bych rád poděkoval své rodině za podporu v průběhu studia na ČVUT v Praze i v zahraničí.

## Obsah

Seznam obrázků .....	2
Seznam tabulek .....	3
1 Úvod .....	4
2 Teoretický rozbor proudění zahnutým kanálem 90° .....	5
2.1 Sekundární proudění .....	5
2.1.1 Proudění kanálem s kolenem .....	5
2.1.2 Transportní jevy spojené se sekundárním prouděním .....	6
2.2 Rozbor proudění kolenem .....	7
2.3 Diferenciální analýza vírových struktur .....	7
2.3.1 Potenciální vír .....	7
2.3.2 Vynucený vír .....	9
2.3.3 Smíšený vír .....	9
3 Formulace CFD simulace .....	10
3.1 Geometrie .....	10
3.2 Výpočetní síť .....	11
3.2.1 Modelování mezní vrstvy .....	11
3.2.2 Kontrola výpočetní sítě .....	12
3.3 Parametry tekutiny .....	12
3.4 Okrajové podmínky .....	12
3.4.1 Okrajová podmínka na vstupu .....	12
3.4.2 Okrajová podmínka na výstupu .....	12
4 Výsledky výpočtu .....	13
4.1 Trajektorie pohybu částic .....	13
4.2 Zobrazení promítnutých vektorů rychlosti v řezech .....	15
4.3 Detailní zobrazení promítnutých vektorů rychlosti na konkávní straně kanálu v řezech .....	18
4.4 Rozložení absolutní hodnoty rychlosti v rovinných řezech .....	21
4.5 Rozložení statického přetlaku v rovinných řezech .....	23
4.6 Zobrazení sekundárního proudění .....	25
4.7 Zobrazení kinetické energie turbulence .....	26
4.8 Zobrazení toku disipované energie v řezech .....	28
5 Řešení integrálních parametrů .....	30
5.1 Střední hodnota rychlosti .....	31
5.2 Střední hodnota hmotnostního průtoku v rovinných řezech .....	31
5.3 Kvadratické odchylky vybraných integrálních parametrů .....	32

6	Stanovení součinitele místních ztrát kolene .....	34
7	Diskuse výsledků .....	35
8	Závěr .....	36
9	Seznam symbolů.....	37
10	Seznam zkratk .....	38
11	Seznam použité literatury .....	39

## Seznam obrázků

Obr. 1	Schéma působení tlaku na element proudu [1] .....	5
Obr. 2	Schéma proudění kanálem 90° [2] .....	7
Obr. 3	Potenciální vír [3] .....	8
Obr. 4	Vynucený vír [3].....	9
Obr. 5	Rozměry kanálu [8].....	10
Obr. 6	Řezné roviny [7].....	10
Obr. 7	Výpočetní síť.....	11
Obr. 8	Detailní zobrazení modelování mezní vrstvy .....	11
Obr. 9	Souřadnicový systém.....	13
Obr. 10	Axonometrické zobrazení trajektorií pohybu částic [7] .....	14
Obr. 11	Trajektorie pohybu částic, pohled shora [7] .....	14
Obr. 12	Trajektorie pohybu částic, pohled na výstup [7].....	15
Obr. 13	Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 8.....	15
Obr. 14	Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 12 .....	16
Obr. 15	Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 16 .....	17
Obr. 16	Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 16 detail .....	17
Obr. 17	Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 13 .....	18
Obr. 18	Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 14 .....	19
Obr. 19	Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 15 .....	19
Obr. 20	Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 16 .....	20
Obr. 21	Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do výstupní roviny .....	20
Obr. 22	Rozložení absolutní hodnoty rychlosti v rovině č. 4 .....	21
Obr. 23	Rozložení absolutní hodnoty rychlosti v rovině č. 8.....	22
Obr. 24	Rozložení absolutní hodnoty rychlosti v rovině č. 16.....	22
Obr. 25	Rozložení statického přetlaku v rovině č. 4 .....	23
Obr. 26	Rozložení statického přetlaku v rovině č. 12 .....	24
Obr. 27	Rozložení statického přetlaku v rovině č. 17 .....	25
Obr. 28	$V_{surf}$ na výstupu z kolene.....	26
Obr. 29	Zobrazení kinetická energie turbulence v rovině č. 8 .....	27
Obr. 30	Zobrazení kinetická energie turbulence v rovině č. 12 .....	27
Obr. 31	Zobrazení kinetická energie turbulence na výstupní rovině .....	28
Obr. 32	Zobrazení toku disipované energie v rovině č. 8.....	29
Obr. 33	Zobrazení toku disipované energie v rovině č. 16.....	29
Obr. 34	Graf střední hodnoty rychlosti v rovinných řezech .....	31
Obr. 35	Střední hodnoty hmotnostního průtoku.....	32

Obr. 36 Kvadratické odchyly střední hodnoty rychlosti .....	33
Obr. 37 Kvadratické odchyly střední hodnoty hmotnostního průtoku .....	33

### **Seznam tabulek**

Tabulka 1 Parametry funkce růstu buněk .....	11
Tabulka 2 Parametry výpočetní sítě .....	12
Tabulka 3 Parametry vzduchu .....	12
Tabulka 4 Integrální hodnoty .....	30



# 1 Úvod

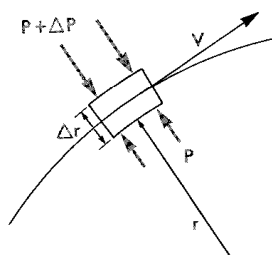
Předmětem bakalářské práce bude CFD simulace proudění uvnitř zahnutého kolene 90° čtvercového průřezu a rozbor vzniklých proudových struktur. Práce bude rozdělena do čtyř hlavních částí. V první části bude proveden teoretický rozbor jevů vzniklých při proudění kanálem. V další části bude uveden stručný postup a formulace základních parametrů CFD simulace v software Ansys Fluent. Třetí a hlavní částí práce bude názorné zobrazení parametrů do rovinných řezů kolene. Zde bude provedena identifikace vzniklých proudových struktur a jejich detailní popis. V další části bude provedena analýza vybraných integrálních parametrů a jejich rozbohem stanovena přesnost provedené simulace. Na závěr bude uvedena diskuse výsledků získaných z CFD simulace a jejich případné další využití.

## 2 Teoretický rozbor proudění zahnutým kanálem 90°

### 2.1 Sekundární proudění

Pojmem sekundární proudění je označováno více druhů proudění. Tato práce pojednává pouze o sekundárním proudění vzniklém vlivem proudění zakřiveným kanálem.[1]

Za předpokladu pohybu elementu po kružnicové trajektorii bylo vyjádřeno z Eulerovy rovnice v radiálním směru podle následujícího schématu:



Obr. 1 Schéma působení tlaku na element proudu [1]

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\rho V^2}{r} \quad (1)$$

Pro daný tlakový gradient  $\frac{dP}{dr}$  je vidět vztah mezi rychlostí v elementu tekutiny a zakřivením r trajektorie. Čím menší je rychlost elementu, tím menší musí být zakřivení trajektorie. Tlakový gradient tedy udává zakřivení trajektorií proudu. Za předpokladu tenké mezní vrstvy (zabírá jen malý podíl celkové hloubky kanálu) je tvar primárního proudění (vně mezní vrstvy) dán tlakovým gradientem. Z důvodu nízké velikosti obvodové rychlosti proudění v mezní vrstvě je její odstředivé zrychlení nedostatečné k vyvážení tlakového gradientu a element je tudíž tlačěn směrem do středu [1].

Popsané primární proudění nespĺňuje podmínky zákona zachování hybnosti v radiálním směru části prostoru kanálu. Vynucenou korekci definujeme jako sekundární proudění [1].

#### 2.1.1 Proudění kanálem s kolenem

V pravoúhlých kartézských souřadnicích x, y, z byly definovány složky vířivosti  $\Omega_x, \Omega_y, \Omega_z$  ze složek rychlosti u, v, w jako:

$$\Omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \quad (2)$$

$$\Omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3)$$

$$\Omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (4)$$

Po zavedení směru x jako směru proudění, z jako směru proudění svisle nahoru a y jako směru k nim kolmý. Pro počáteční vířivost v průřezu s konstantní rychlostí bylo vyjádřeno:

$$\Omega_x = 0 , \quad (5)$$

$$\Omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} = konst , \quad (6)$$

$$\Omega_z = 0 . \quad (7)$$

Při proudění v zakřivené části kolene dochází k zakřivení proudnic. Míru zakřivení proudnic je možné vyjádřit jako  $\frac{\partial v}{\partial x}$  , míru zakřivení vírového vlákna jako  $\frac{\partial u}{\partial y}$  . Za předpokladu nulové  $\Omega_z$  byl získán následující vztah:

$$\frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial y} . \quad (8)$$

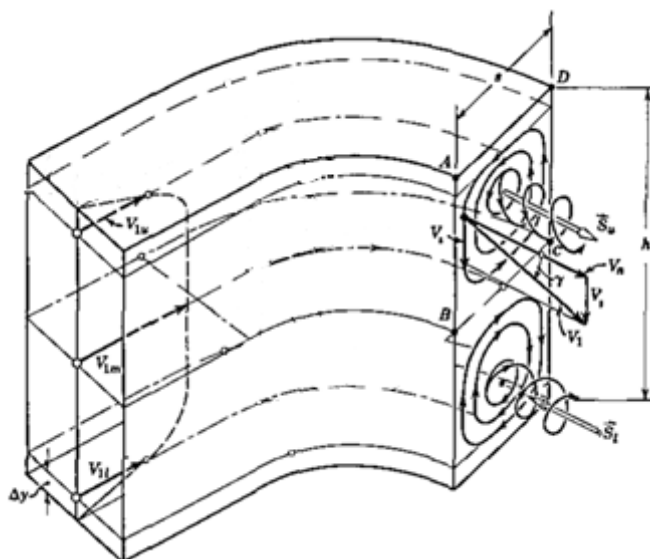
Počáteční míra zakřivení proudnic je rovna počáteční míře zakřivení křivek rotace. Popsané křivky jsou na sebe kolmé.

Při průchodu kanálem dochází k zakřivení proudnic mírou  $\frac{\partial v}{\partial x}$  . Podle Helmholtzova teorému zakřivení vířivost zachovává svůj směr s mírou  $\frac{\partial u}{\partial y}$  . Tímto jevem vznikají vertikální složky rychlosti [1].

### 2.1.2 Transportní jevy spojené se sekundárním prouděním

Sekundární proudění zakřiveným kanálem se chová tak, že přemísťuje pomaleji proudící tekutinu u stěny s rychleji proudící tekutinou uvnitř kanálu. Tento jev vysoce zvyšuje viskózní tření podél stěny. Ztráty třením jsou významné nejen uvnitř kolene, ale také dále po proudu díky vzniklým vírovým strukturám [1].

## 2.2 Rozbor proudění kolenem



Obr. 2 Schéma proudění kanálem 90° [2]

Pro rozbor bylo použito proudění kolenem obdélníkového průřezu s uniformním statickým tlakem na vstupu. Mezní vrstva vrchní a spodní stěny je popsána rychlostním profilem [2].

Podle Obr. 2 mají elementy tendenci pohybovat se směrem do konvexní strany kanálu tak, že proudění na výstupu z kanálu získá spirální pohyb ve směru podle obrázku. Protože mají opačnou orientaci na horní a spodní stěně, sekundární víry  $S_u$  a  $S_l$  se formují také s opačnou orientací [2].

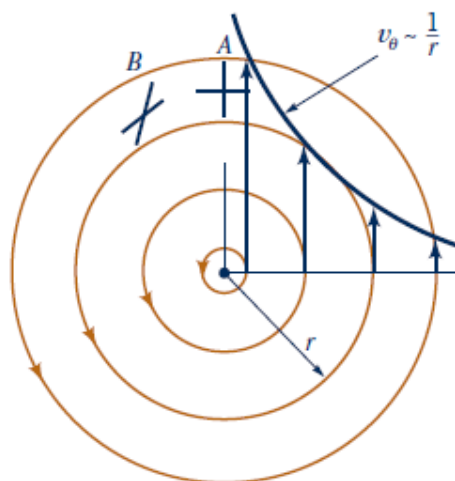
Při pohledu do rovinného řezu kolene ve směru proudu byla pravotočivá respektive levotočivá orientace volena po směru otáčení hodinových ručiček respektive proti směru otáčení. Spirální vír  $S_l$  ve spodní části se potom otáčí s levotočivou orientací. Vrchní vír  $S_u$  se otáčí s pravotočivou orientací.

## 2.3 Diferenciální analýza vírových struktur

Tento odstavec uvádí modelové dvourozměrné typy vírových struktur.

### 2.3.1 Potenciální vír

Při předpokladu proudění se soustřednými kruhovými proudnicemi podle schéma:



Obr. 3 Potenciální vír [3]

V cylindrických souřadnicích  $[r; \theta]$  lze vyjádřit proudový potenciál  $\phi$  jako [3]:

$$\phi = K\theta . \quad (9)$$

Proudová funkce  $\psi$  vyjádřit jako [3]:

$$\psi = -K \ln r , \quad (10)$$

kde K je konstanta rovna  $\frac{\Gamma}{2\cdot\pi}$  .

Vyjádření složek rychlosti [3]:

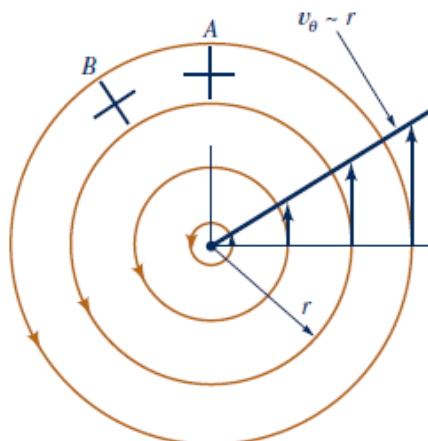
$$v_r = 0 , \quad (11)$$

$$v_\theta = \frac{1}{r} \frac{\delta\phi}{\delta\theta} = -\frac{\delta\psi}{\delta r} = \frac{K}{r} . \quad (12)$$

Z výsledků je patrné, že tečná rychlost inverzně závisí na vzdálenosti od středu. Ve středu  $r = 0$  dochází k singularitě tečné rychlosti, která se stává nekonečnou [3].

Popsaný potenciální vír je nerotační protože proudové pole lze popsat pomocí proudového potenciálu podle rovnice (9) [3].

### 2.3.2 Vynucený vír



Obr. 4 Vynucený vír [3]

Pokud by se proud pohyboval po soustředných kruhových trajektoriích s konstantní úhlovou rychlostí (jako tuhé těleso) lze tečnou rychlost vyjádřit jako [3]:

$$v_{\theta} = K_1 \cdot r, \quad (13)$$

kde  $K_1$  je konstanta.

Takto popsanou proudovou strukturu definujeme jako vynucený vír. Vynucený vír je rotační a nelze popsat pomocí proudového potenciálu [3].

### 2.3.3 Smíšený vír

Smíšený vír vzniká kombinací vynuceného a potenciálního víru. Jádru víru (do poloměru  $r_0$ ) tvoří vynucený vír a zbytek tvoří volný vír [3].

Pro úhlovou rychlost platí:

$$v_{\theta} = \omega \cdot r; r \leq r_0, \quad (14)$$

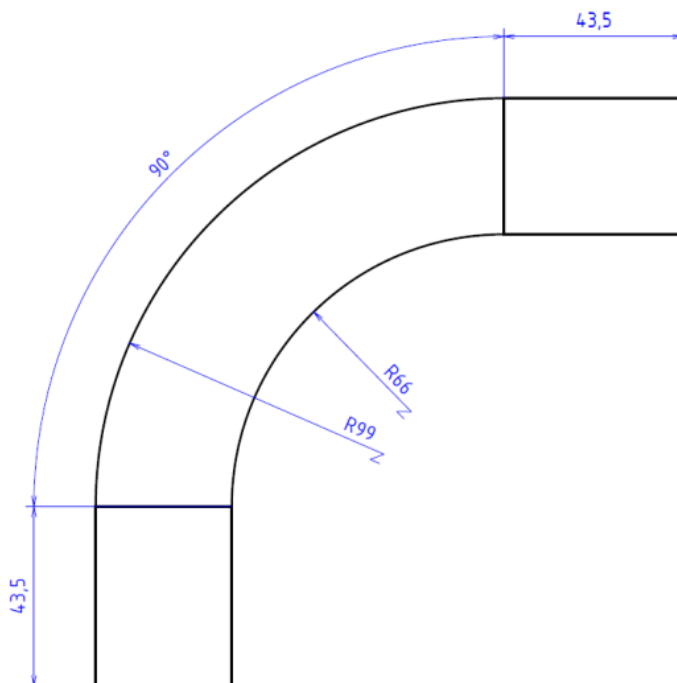
$$v_{\theta} = \frac{K}{r}; r \geq r_0, \quad (15)$$

kde  $K$  a  $\omega$  jsou konstanty.

### 3 Formulace CFD simulace

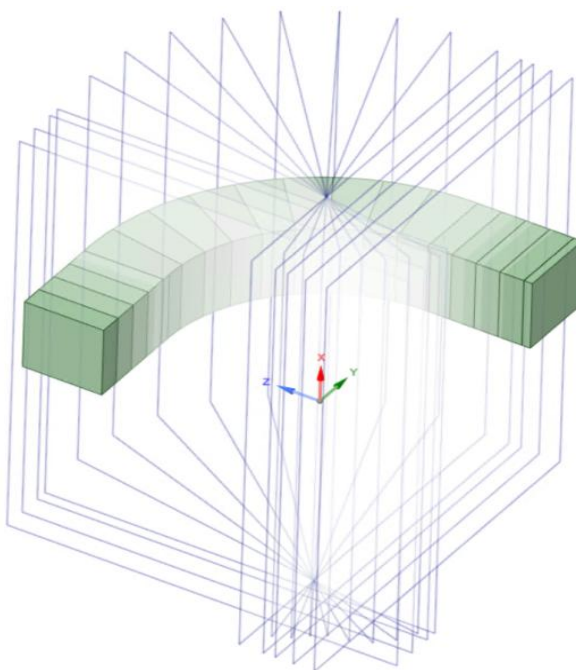
#### 3.1 Geometrie

Zahnutý kanál do 90° se čtvercovým průřezem o straně délky 33mm byl vymodelován v CAD software Space Claim.



Obr. 5 Rozměry kanálu [4]

Rozměry kanálu byly zvoleny podle Obr. 5.



Obr. 6 Řezné roviny [5]

V modelu bylo vytvořeno 19 řezných rovin (včetně vstupní a výstupní roviny) pro názorné zobrazení vypočtených parametrů podle Obr. 6. V obou přímých částech byly vytvořeny 4 roviny vzdálené od sebe 10mm. V zahnuté části bylo vytvořeno 9 rovinných řezů svírajících 10°.

### 3.2 Výpočetní síť

Výpočetní síť byla vytvořena v software Ansys Mechanical. Metoda tvorby výpočetní sítě byla zvolena Multizone. Typ výpočetní sítě byl nastaven na Hexa Dominant [5].

#### 3.2.1 Modelování mezní vrstvy

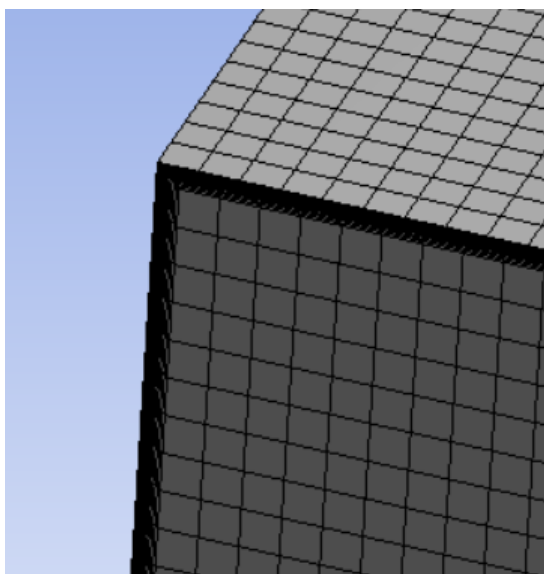
Na stěnách kolene byla použita funkce narůstání buněk (anglicky inflation) pro optimální modelování mezní vrstvy. Takto lze modelovat velmi jemnou výpočetní síť pomocí nastavení počtu vrstev, tloušťky první vrstvy a míry růstu buněk [6].

Parametry funkce růstu buněk:

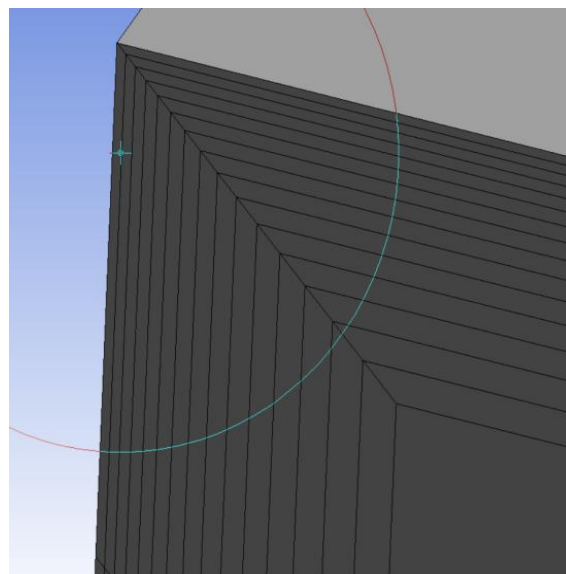
Tabulka 1 Parametry funkce růstu buněk

tloušťka první vrstvy	$1 \cdot 10^{-5}$ mm
počet vrstev	15
míra růstu vrstvy	1,1

3D zobrazení výpočetní sítě s detailním zobrazením modelování mezní vrstvy.



Obr. 7 Výpočetní síť



Obr. 8 Detailní zobrazení modelování mezní vrstvy



### 3.2.2 Kontrola výpočetní sítě

Důležitým kontrolním parametrem výpočetní sítě je míra zkosení buněk, anglicky skewness. Míra zkosení buněk vyjadřuje poměr mezi tvarem buňky a tvarem rovnostranné buňky ekvivalentního rozměru. Míra zkosení buněk nabývá hodnot od 0 do 1. Doporučené hodnoty jsou hodnoty menší než 0,95, při vyšších hodnotách dochází k problémům s konvergencí řešení výpočtu [7].

Důležité parametry výpočetní sítě:

Tabulka 2 Parametry výpočetní sítě

Počet uzlů	28880846
Počet buněk	7135892
Max. míra zkosení buněk	0,55

Hodnota parametru míry zkosení buněk rovna 0,55 znamená velmi kvalitní výpočetní síť.

### 3.3 Parametry tekutiny

Tekutinou pro výpočet byl zvolen vzduch s parametry podle tabulky 2.

Tabulka 3 Parametry vzduchu

Tekutina	Vzduch
Teplota	18°C
Hustota	1,225 kg·m <sup>3</sup>
Dynamická viskozita	1,79·10 <sup>-5</sup> kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>

### 3.4 Okrajové podmínky

#### 3.4.1 Okrajová podmínka na vstupu

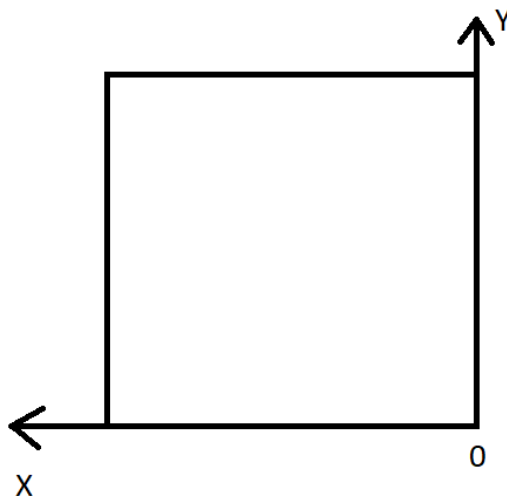
Na vstupu byla zvolena rychlostní okrajová podmínka. Rychlost vzduchu na vstupu byla zvolena 100 m·s<sup>-1</sup>. Při této rychlosti lze vzduch ve vnitřní aerodynamice považovat za nestlačitelnou tekutinu.

#### 3.4.2 Okrajová podmínka na výstupu

Na výstupu byla zvolena okrajová podmínka tlaku. Přetlak (oproti atmosférickému tlaku) na výstupu byl zvolen na 0 Pa. Atmosférický tlak byl v Ansys Fluent zvolen 101325 Pa.

## 4 Výsledky výpočtu

Pro zobrazení výsledků simulace byl zaveden souřadnicový systém XY podle Obr. 9. Parametry jsou vždy zobrazeny pohledem přímo do roviny řezu ve směru proudění.

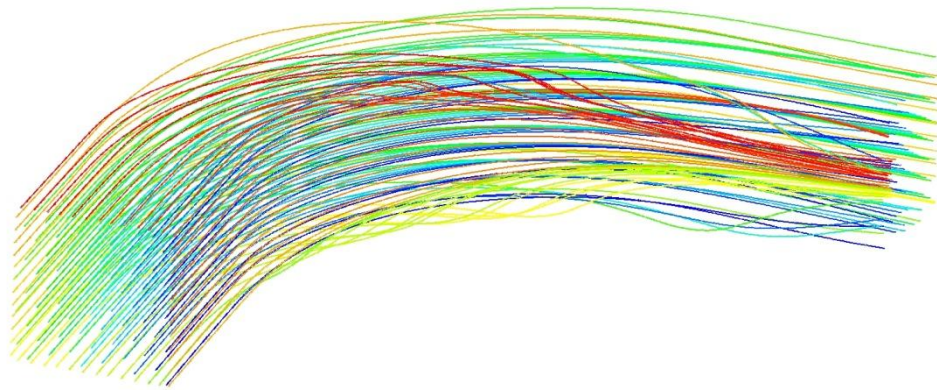


Obr. 9 Souřadnicový systém

### 4.1 Trajektorie pohybu částic

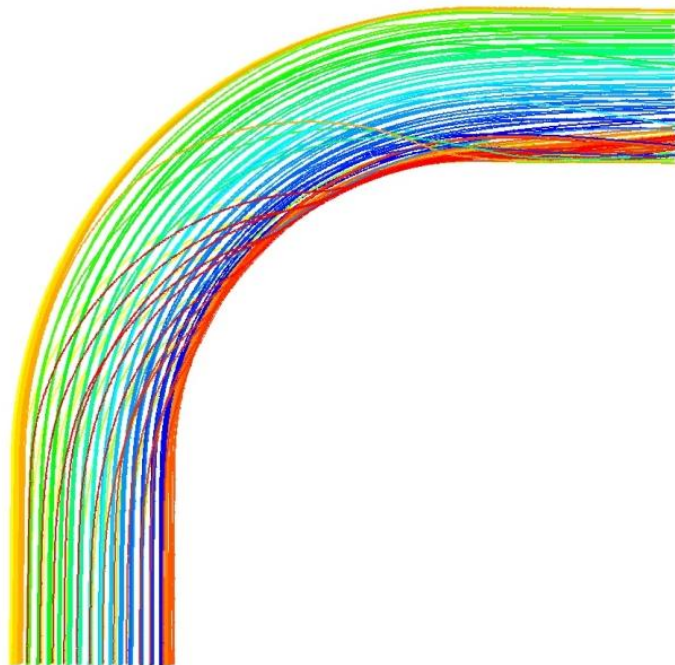
Pro názornou demonstraci vzniku a vývoje vírových struktur byla provedena prostorová vizualizace trajektorií částic proudu. Počet trajektorií byl volen tak, aby byly přehledně zchyceny vzniklé struktury proudu. Trajektorie byly vizualizovány v kartézské soustavě souřadnic X, Y, Z. V rovině YZ leží vstupní rovina do kolene, v rovině XY leží výstup z kolene a pohled XZ je pohled shora na koleno.

Trajektorie jsou křivky vzniklé pohybem částic proudu z jednoho bodu do dalšího [3]. Trajektorie byly vizualizovány od vstupu do kolene k jeho výstupu. Barevná škála trajektorií byla zvolena tak, aby bylo možné přehledně identifikovat vzniklé proudové struktury.



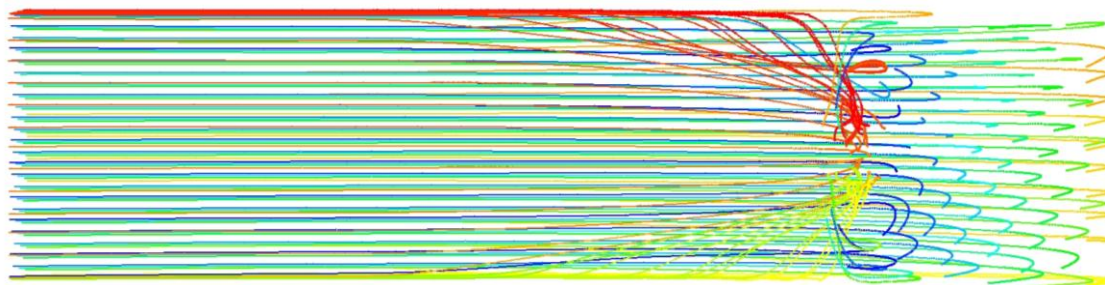
**Obr. 10 Axonometrické zobrazení trajektorií pohybu částic [5]**

Na Obr. 10 byly zobrazeny trajektorie na vnitřní straně kolene. Odtud je patrné, že vírové struktury vznikají vývojem mezní vrstvy již před zakřivením kanálu. Pomocí barevného odlišení lze identifikovat vznik a průběh dvou spirálních vírových struktur na vnitřní straně zakřiveného kanálu. Horní vír, vyznačen červenými trajektoriemi, vzniká především z trajektorií horní mezní vrstvy. Obdobně spodní vír, vyznačený žlutými trajektoriemi, je složen především z trajektorií ze spodní strany kolene. Z Obr. 10 je také možno sledovat symetrii ve struktuře proudového pole, které je symetrické podle středního řezu kolenem rovinou XZ.



**Obr. 11 Trajektorie pohybu částic, pohled shora [5]**

Na Obr. 11 je zobrazen pohled na rovinu YZ zakřiveného kanálu. Odsud lze sledovat formování spirální vírové struktury z mezní vrstvy v horní části kanálu a její následné šíření přímou částí kolene na výstupu.

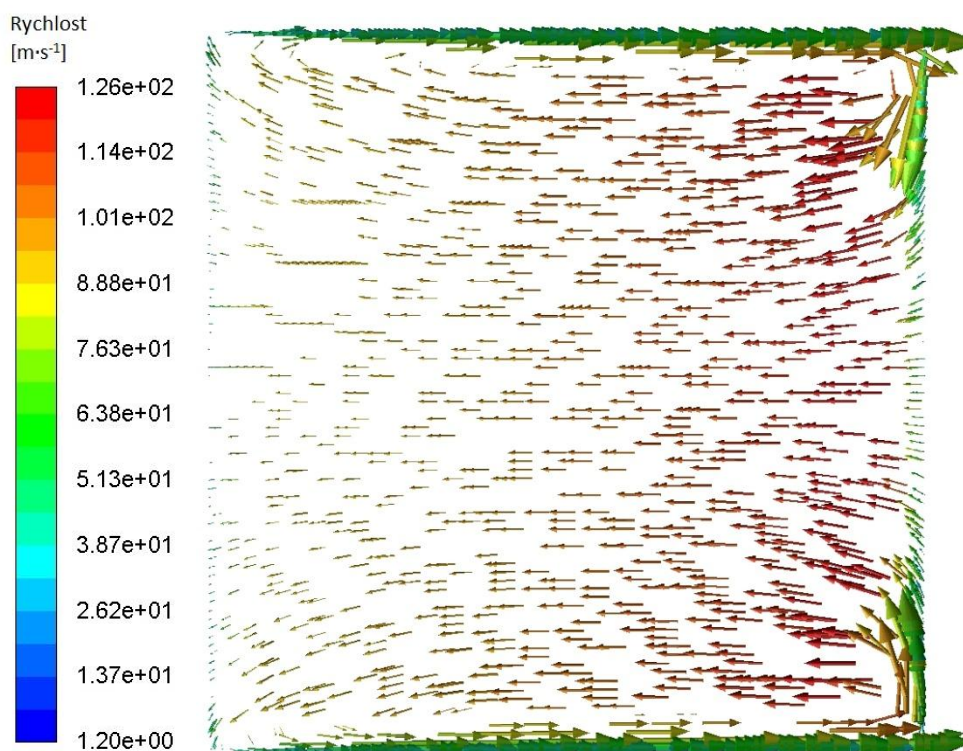


Obr. 12 Trajektorie pohybu částic, pohled na výstup [5]

Na Obr. 12 je pohled na koleno přímo na výstup z kanálu v rovině XY. Trajektorie zde zobrazují dva spirální symetrické víry v konvexní části kolene.

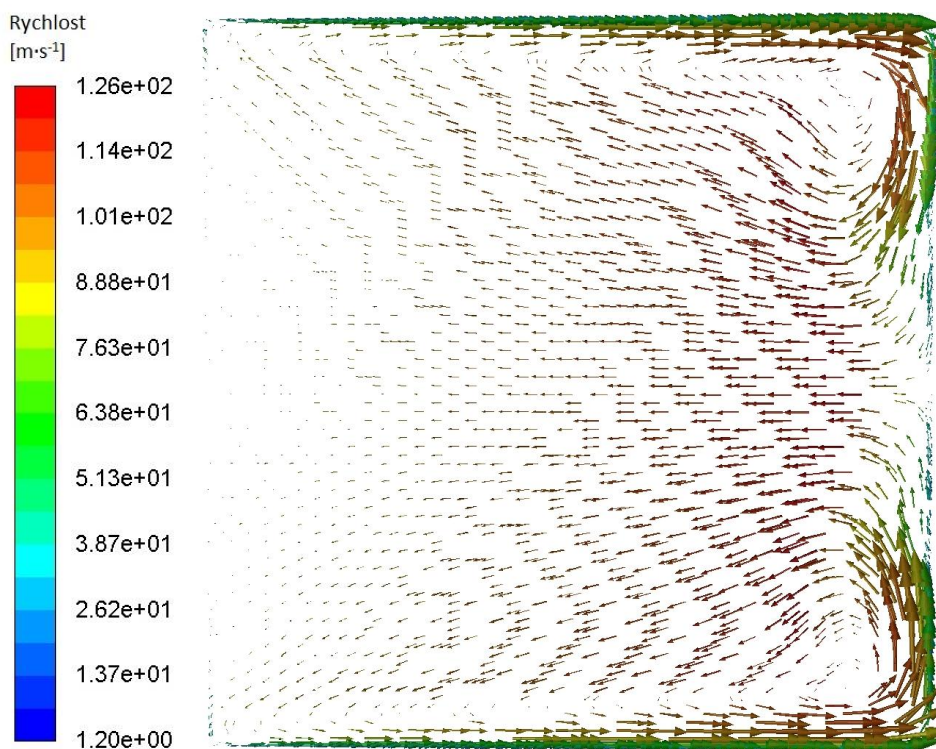
## 4.2 Zobrazení promítnutých vektorů rychlosti v řezech

Pro názornost a detailní studii vývoje vírových struktur byly do připravených rovinných řezů zobrazeny průměty vektorů rychlosti. Velikosti vektorů a škála velikosti byly upraveny pro každý řez tak, aby bylo možné identifikovat jemné změny ve směru proudění. Barevná škála zobrazuje velikost celkové rychlosti, rychlost sekundárního proudění je určena délkou vektorů rychlosti.



Obr. 13 Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 8

Na Obr. 13 jsou zobrazeny promítnuté vektory rychlosti do roviny č. 8. Velikost vektorů byla zvětšena 60x. Z řezu lze sledovat směr sekundárního proudění v mezních vrstvách na vrchní a spodní straně kolene směrem k vnitřní straně kolene. V proudovém poli vznikají dvě hlavní vírové struktury. Spodní vír je levotočivý a horní pravotočivý.

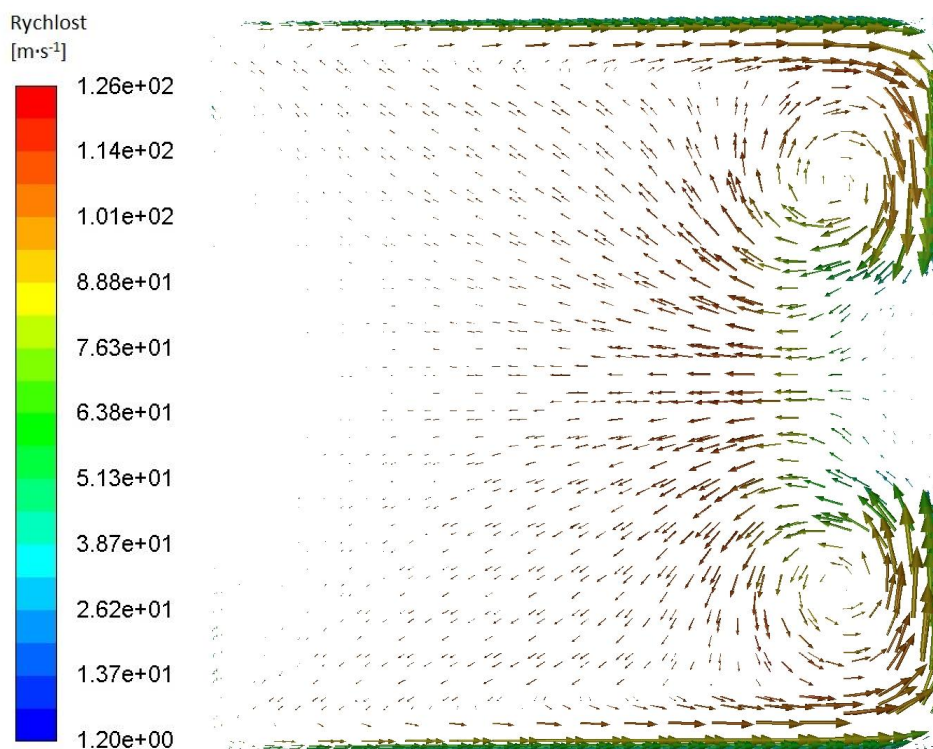


Obr. 14 Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 12

Na Obr. 14 je zobrazeno vektorové rychlostní pole promítnuté do roviny č. 12. Vektory rychlosti byly zvětšeny 30x. Symetrické vírové struktury nemají pravidelný tvar. Víry jsou zde stále protaženy podél horní respektive spodní mezní vrstvy kanálu. Zvolením souřadnicového systému s počátkem v pravém spodním rohu řezu tak, že X je vodorovná souřadnice a Y svislá byly identifikovány průměty vírových vláken v systému XY:

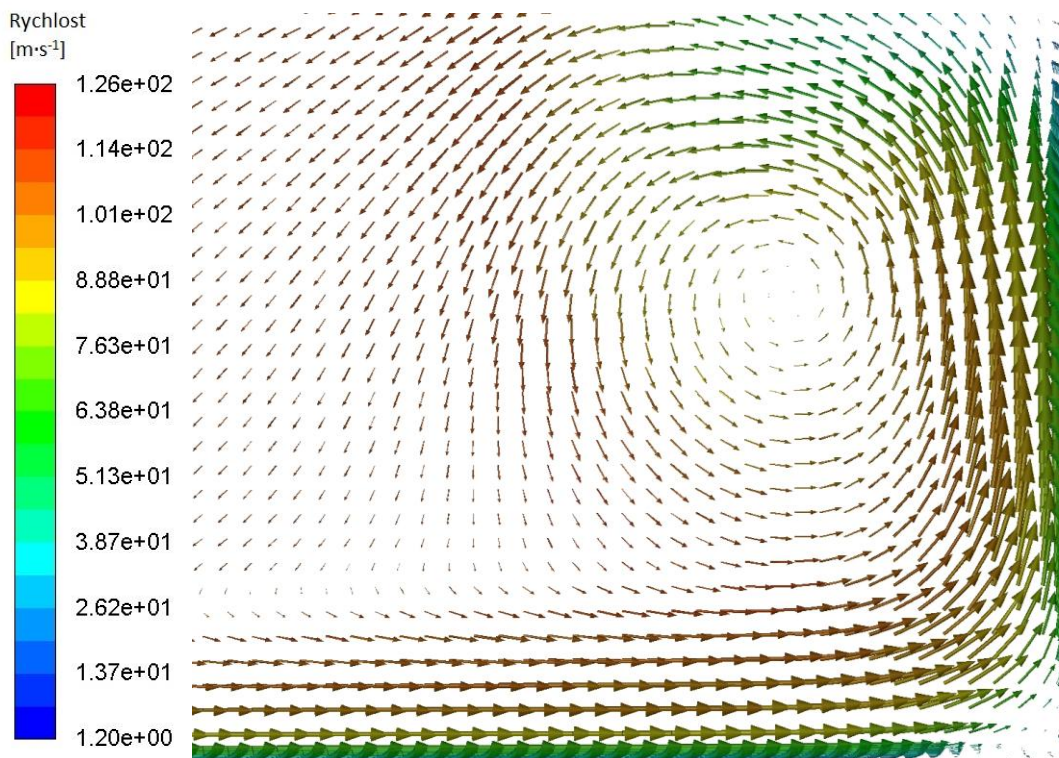
Spodní průmět vírového vlákna  $[X; Y]=[2,3; 3,2]$ mm

Vrchní průmět vírového vlákna  $[X; Y]=[2,3; 29,8]$ mm



Obr. 15 Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 16

Na Obr. 15 je zobrazeno vektorové rychlostní pole v rovině č. 16. Velikost vektorů byla zvětšena 35x. Vírové struktury jsou pravidelné spirální víry. Nejvyšší rychlost sekundárního proudění je dosažena na konvexní straně kanálu.

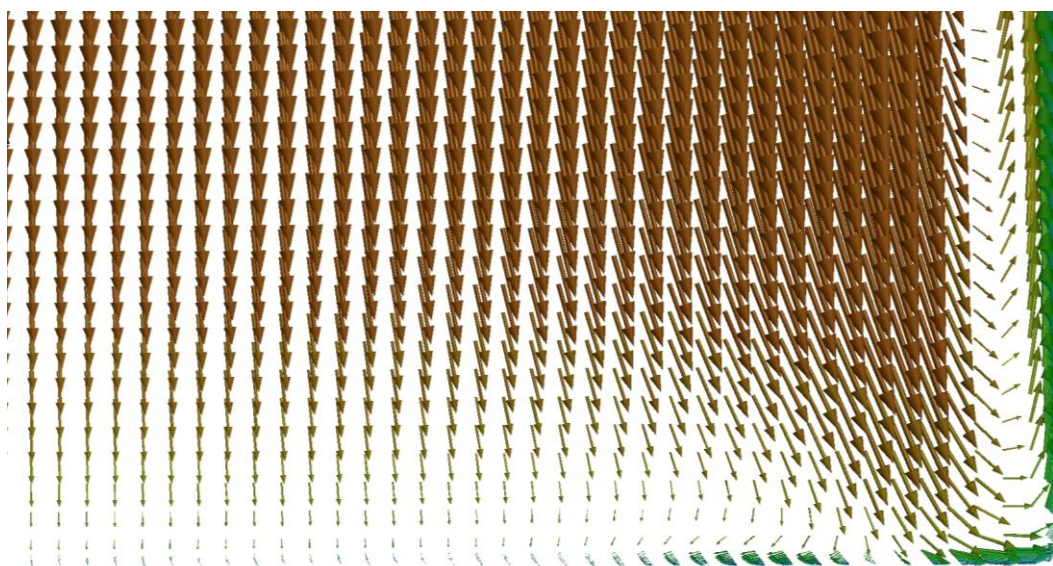


Obr. 16 Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 16 detail

Na Obr. 16 je výřez z vektorového rychlostního pole v rovině č. 16. Souřadnice průmětu spodního vírového vlákna jsou  $[X; Y]=[3,39; 5,51]$ mm. Souřadnice vrchního průmětu vírového vlákna jsou symetrické.

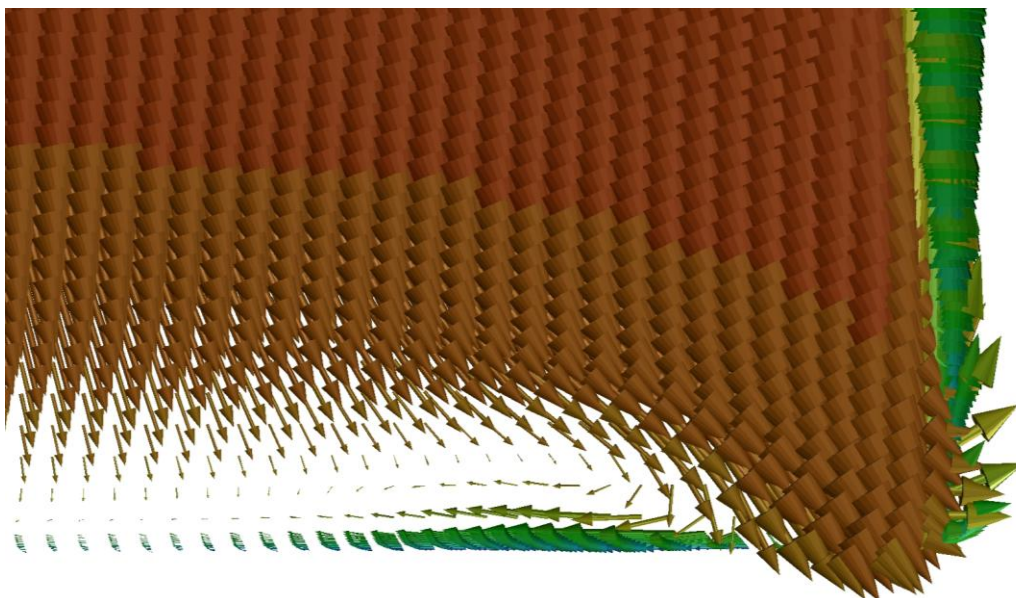
### 4.3 Detailní zobrazení promítnutých vektorů rychlosti na konkávní straně kanálu v řezech

Při detailním zkoumání vzniklých struktur byly identifikovány indukované vírové struktury vzniklé na konkávní straně kanálu. Pro jejich pozorování bylo nutné výrazné zvětšení vektorů rychlosti. Pro přehlednost byly řezy natočeny tak, že spodní strana řezu odpovídá konkávní hraně kanálu. Pro identifikaci a popis proudových struktur byl zvolen souřadnicový systém  $[X; Y]$  se středem v pravém spodním rohu řezu kanálu tak že X je vodorovná souřadnice a Y je souřadnice svislá.



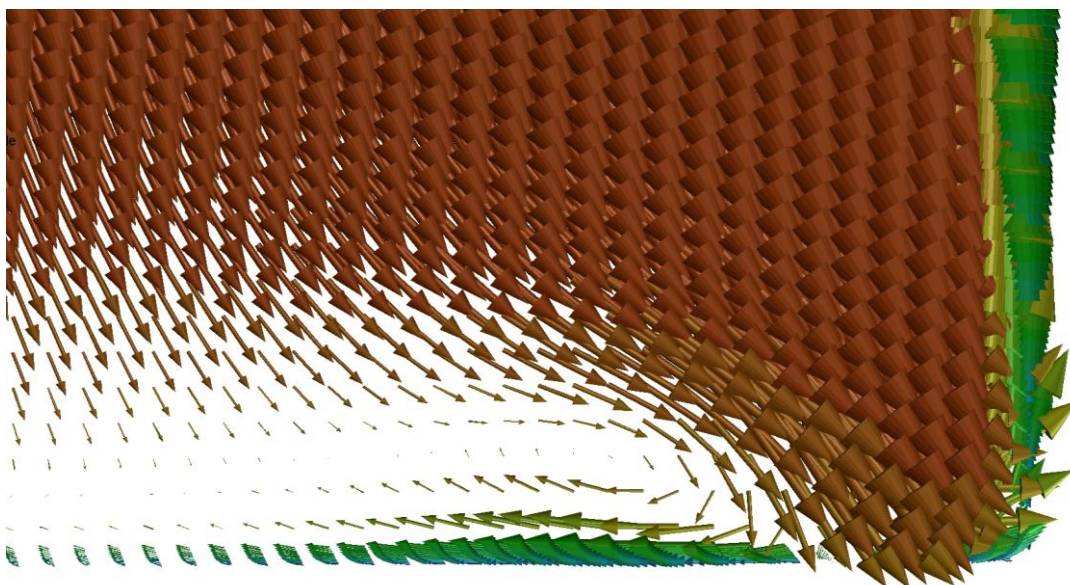
Obr. 17 Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 13

Na Obr. 17 je zobrazeno vektorové rychlostní pole v rovině č. 13. Zvětšení vektorů rychlosti je 50x. Na obrázku jsou patrné nepravidelnosti v proudovém poli.



Obr. 18 Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 14

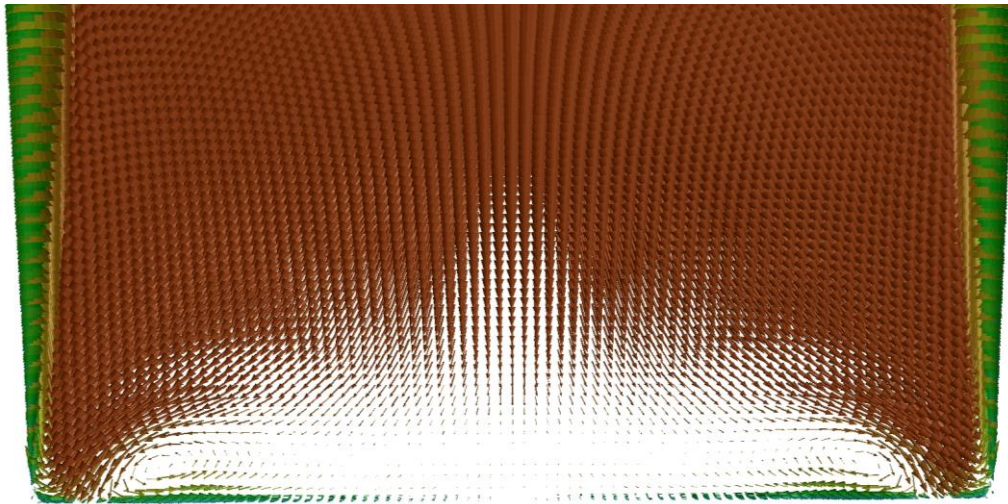
Na Obr. 18 lze při 250-ti násobném zvětšení vektorů rychlosti sledovat vznik vírové struktury v rovině č. 14.



Obr. 19 Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 15

Na Obr. 19 lze při 250-ti násobném zvětšení identifikovat vyvinutou vírovou strukturu v rovině č. 15.





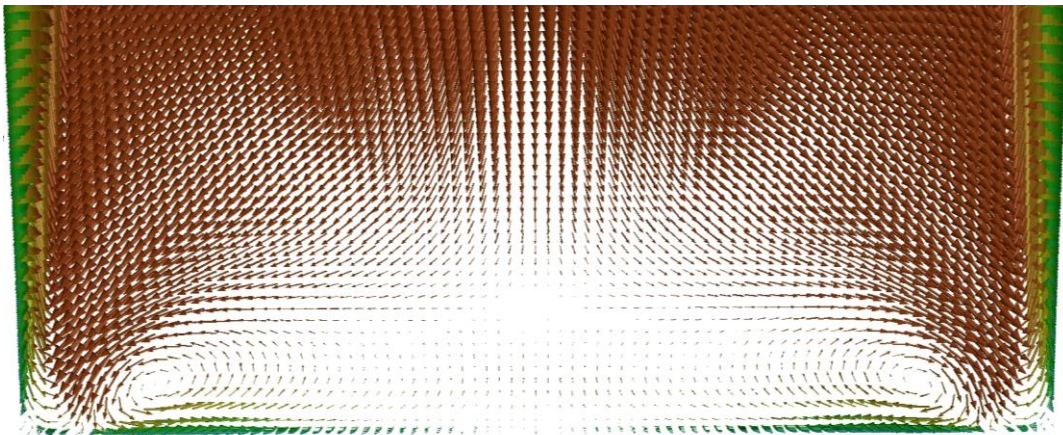
Obr. 20 Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do roviny č. 16

Na Obr. 20 při zvětšení 250x je identifikována rovina symetrie proudových struktur na vnější straně kolene. Proudové pole je symetrické podél středního řezu kolene. Střední vřív jsou:

Spodní průmět vřívového vlákná  $[X;Y] = [31,7; 4,2]$ mm

Vrchní průmět vřívového vlákná  $[X; Y] = [31,7; 28,8]$ mm

Určení průmětů vřívových vláken potvrzuje symetrii proudového pole.



Obr. 21 Zobrazení průmětu vektorů rychlosti do výstupní roviny

Na Obr. 21 jsou při 200x zvětšení průmětů vektorů rychlosti zobrazeny vyvinuté vřívové struktury na výstupu z kolene. Vzniklé vřivy mají charakter kombinovaných vřív s rychlostí úměrně narůstající se vzdáleností od vřívového vlákná a následným klesáním rychlosti. Rychlosti ve stejné vzdálenosti od vřívových vláken nejsou konstantní, ale rostou

v blízkosti mezní vrstvy stěn kolene. Orientace vírů je opět symetrická. Horní vír je levotočivý a spodní vír je pravotočivý.

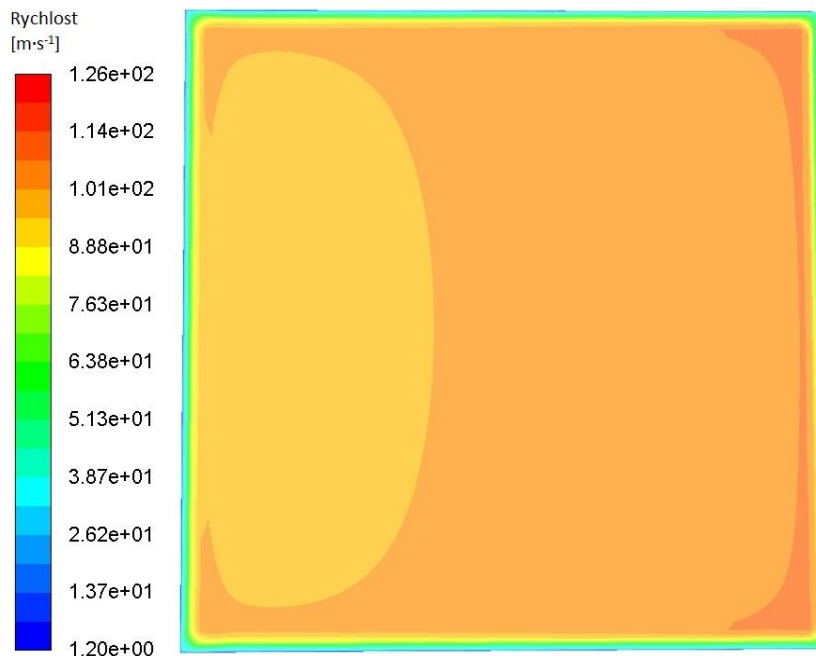
Spodní průmět vírového vlákna  $[X; Y] = [31; 4,2]$ mm.

Vrchní průmět vírového vlákna  $[X; Y] = [31; 28,8]$ mm.

Vírové struktury vzniklé na konkávním okraji kolene jsou výrazně menší oproti hlavním vírům identifikovaným na konvexní straně kolene. Mají obrácenou orientaci. Spodní vír na konvexní straně kolene je levotočivý a spodní vír na konkávní straně kolene je pravotočivý. Obdobně na vrchní straně kolene je vnitřní vír pravotočivý a vnější levotočivý. Další podobností je poloha průmětů vírových vláken. Vzdálenost průmětů vírových vláken od stěn kanálu na vnější straně na výstupu je přibližně o 2mm kratší než u vírů na vnitřní straně kanálu. Proudové pole je symetrické podle středního horizontálního řezu kanálu.

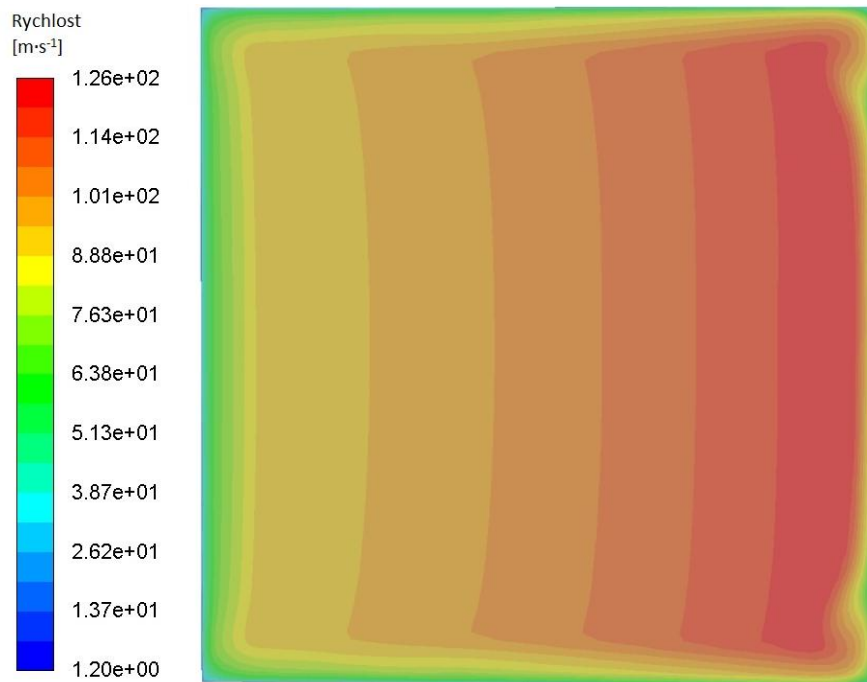
#### 4.4 Rozložení absolutní hodnoty rychlosti v rovinných řezech

Pro stanovení velikosti rychlosti byla zobrazena rychlostní pole do rovinných řezů pomocí barevných izoploch.



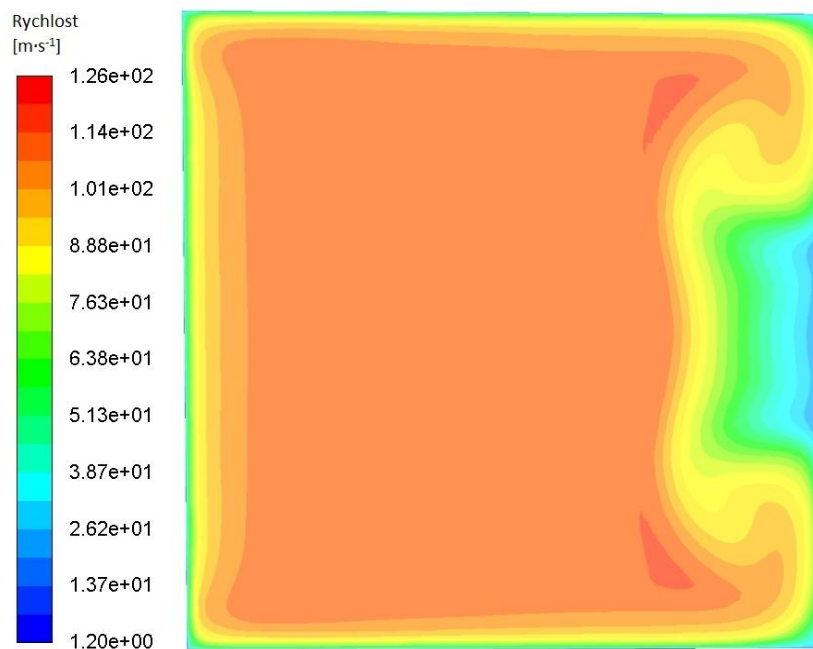
Obr. 22 Rozložení absolutní hodnoty rychlosti v rovině č. 4

Na Obr. 22 je zobrazeno rychlostní pole v rovině č. 4. Na vnitřní straně kanálu dochází k urychlení proudu na rychlost přibližně  $110 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 23 Rozložení absolutní hodnoty rychlosti v rovině č. 8

Na Obr. 23 se v rovině č. 8 dále urychluje proudění na vnitřní straně kolene na rychlost přibližně  $125 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Formující se víry vytváří oblasti lokálního snížení rychlosti ve vnitřních rozích průřezu kolene. Rychlost zde nabývá hodnoty přibližně  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 24 Rozložení absolutní hodnoty rychlosti v rovině č. 16

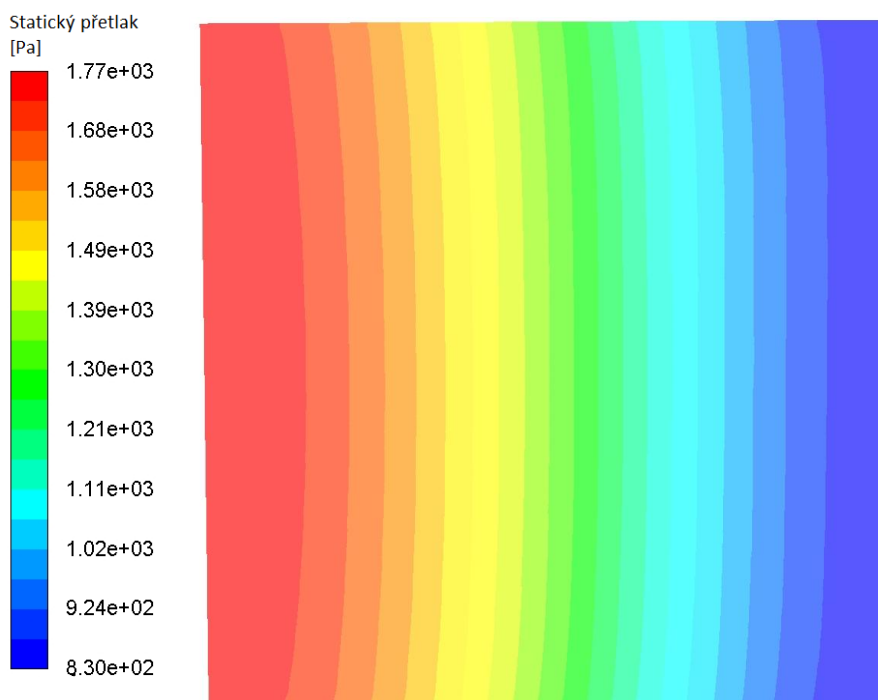
Na Obr. 24 je rychlostní pole v rovině č. 16. Na vnitřní straně kolene dochází k výraznému poklesu rychlosti v oblasti mezi vzniklými víry. Modrá kontura zde značí vzniklé minimum velikosti rychlosti přibližně  $25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Rychlostní profil odtud plynule přechází přes zelenou (značící přibližně  $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) a žlutou (značící přibližně  $80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) konturu do oranžové kontury (značící přibližně  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) ve zbytku kanálu. K urychlení proudu na  $110 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  vlivem vírů dochází na jejich vnější straně. Tato dvě symetrická maxima představují trojúhelníkovité obrazce z červené kontury.

Vírové struktury na konkávní straně kolene nebyly výrazně patrné v zobrazených konturách. Způsobují pouze nepatrné zkřivení barevných kontur na vnější straně kolene.

Důležitým poznatkem je maximální rychlost dosažená prouděním vzduchu kolenem  $125 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Za daných podmínek tak byla splněna podmínka proudění nestlačitelné kapaliny.

#### 4.5 Rozložení statického přetlaku v rovinných řezech

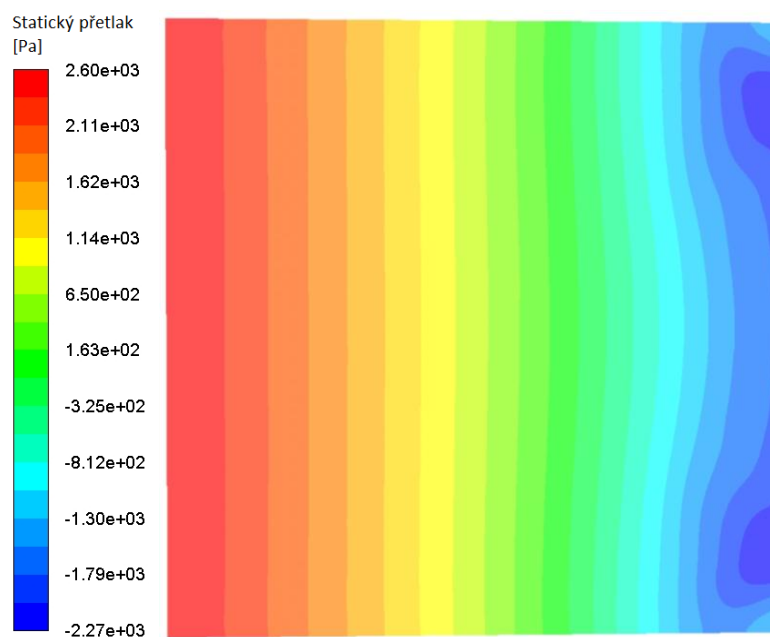
Pro detailní studii vzniku a vývoje vírových struktur byly zobrazeny profily statického přetlaku do vybraných řezných rovin. Statický přetlak zde představuje přetlak oproti normálnímu atmosférickému tlaku, který byl v Ansys Fluent zvolen na  $101325 \text{ Pa}$ .



Obr. 25 Rozložení statického přetlaku v rovině č. 4

Na Obr. 25 je zobrazen tlakový profil v rovině č. 4. Tlakový profil plynule přechází od modré kontury minima (představující přetlak přibližně  $830 \text{ Pa}$ ) na konvexní straně kanálu po

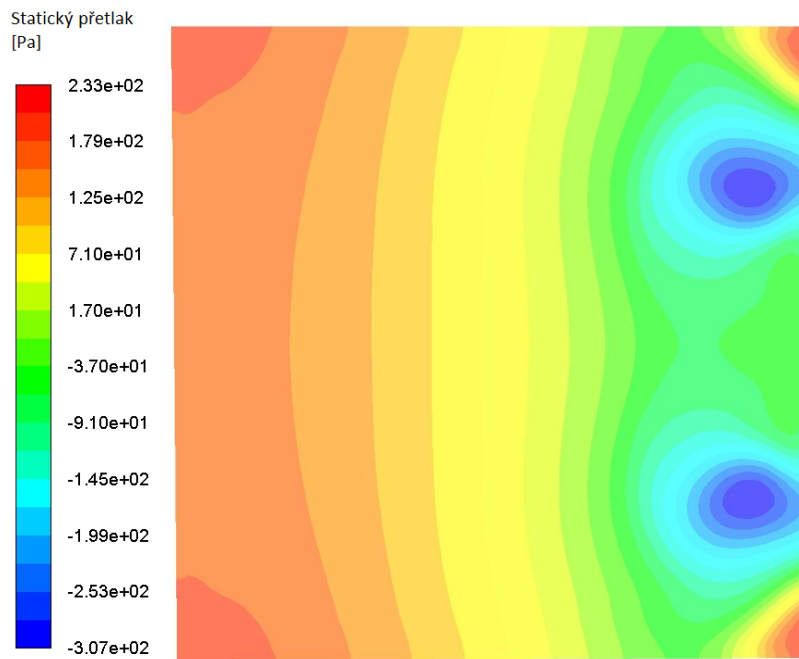
červenou konturu maxima (představující přetlak přibližně 1770Pa) na konkávní straně. Tlakový rozdíl mezi vnější a vnitřní stranou je přibližně 940Pa.



Obr. 26 Rozložení statického přetlaku v rovině č. 12

Na Obr. 26 lze sledovat symetrické zakřivení v tlakovém profilu na konvexní straně kanálu v rovině č. 12. Podtlaky  $-2270\text{Pa}$  značí podtlak v místech vírových vláken vzniklých vírových struktur. Tlakový profil poté plynule přechází do maxima  $2600\text{Pa}$  na vnější straně kolene. Tlakový rozdíl mezi maximem na vnější straně kolene a minimem v místech vírových vláken je  $4870\text{Pa}$ .

Na Obr. 27 je zobrazen takový profil v rovině č. 17. Z Obr. 27 jsou patrné kruhové středy vírových struktur s podtlakem přibližně  $-300\text{Pa}$ . Ve konvexních rozích průřezu kolene jsou tlaková maxima  $233\text{Pa}$ . Tlakový rozdíl mezi tlakovým minimem v místech průřezu vírových vláken a maximem ve vnitřních rozích kolene je  $533\text{Pa}$ . Tento tlakový rozdíl je menší oproti předešlým průřezům, ale je dosažen na mnohem menší vzdálenosti. Na vnitřní straně průřezu kolene se tedy na výstupu z kolene nachází vysoký tlakový gradient.



Obr. 27 Rozložení statického přetlaku v rovině č. 17

#### 4.6 Zobrazení sekundárního proudění

Pomocí uživatelsky definované funkce byl definován poměrný rychlostní parametr  $V_{surf}$  podle následujícího vzorce:

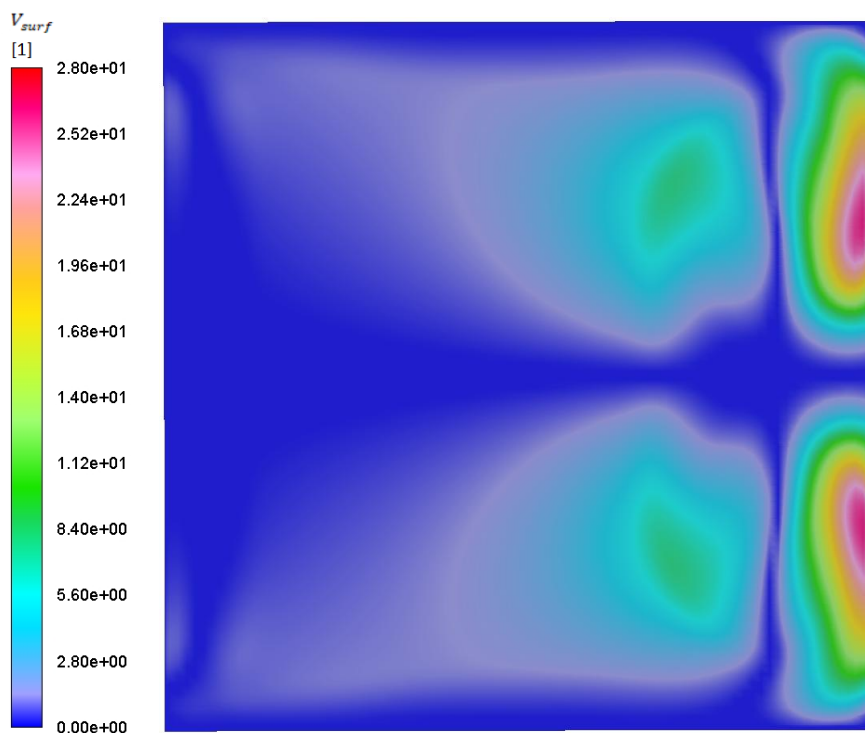
$$V_{surf} = \frac{\sqrt{|V_i^2 - \bar{V}^2|}}{\bar{V}}, \quad (18)$$

kde:

$V_i$  je absolutní velikost rychlosti tekutiny.

$\bar{V}$  je velikost střední rychlosti v dané řezné rovině.

Průřezový rychlostní parametr  $V_{surf}$  umožňuje citlivější zobrazení sekundární složky proudění uvnitř řezů.  $V_{surf}$  neumožňuje přesné stanovení velikosti rychlostního poměru. Pro přesné stanovení rychlostního profilu sekundárního proudění uvnitř kanálu by bylo nutné od celkové rychlosti odečíst primární složku rychlosti. Tuto parametrizaci Ansys Fluent neumožňuje.



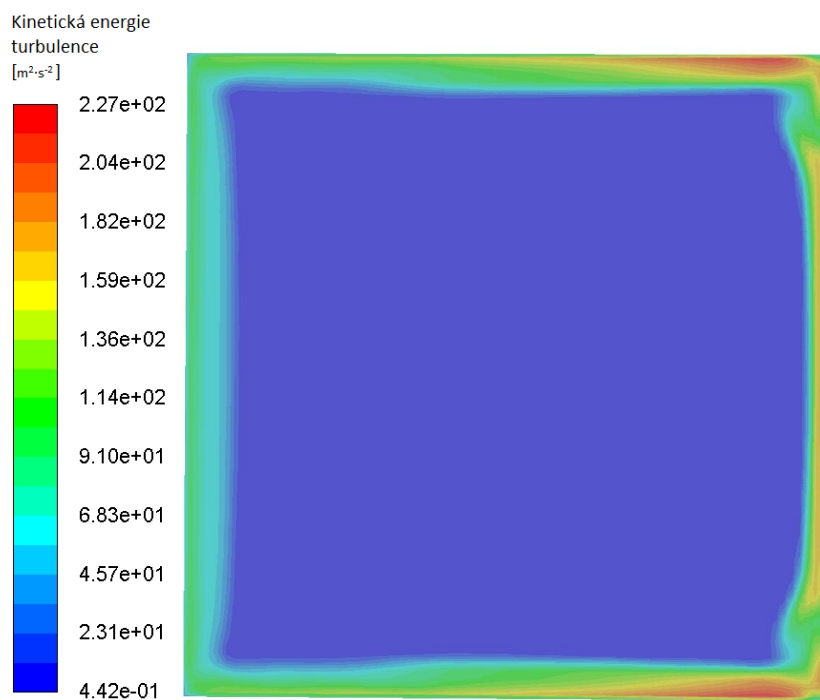
Obr. 28  $V_{surf}$  na výstupu z kolene

Na Obr. 28 je zobrazen barevný profil funkce  $V_{surf}$ . Z obrázku je především parné, že sekundární složka rychlosti vírů ve stejné vzdálenosti od jejich středu není konstantní a tudíž se nejedná o kombinované víry. Nejvyšší rychlosti dosahuje sekundární proudění v blízkosti mezní vrstvy stěny na vnitřní straně kolene.

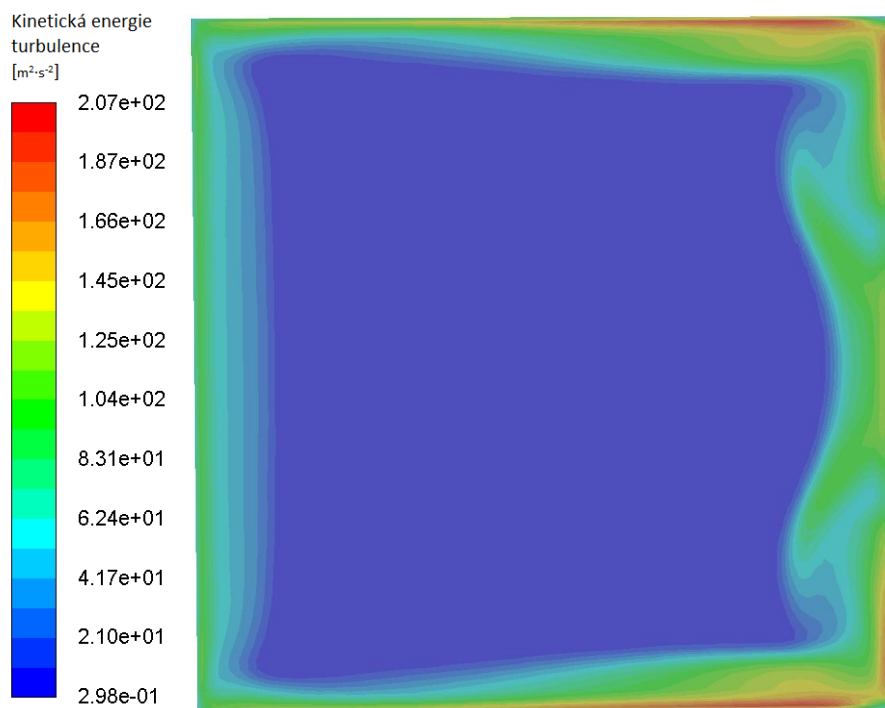
#### 4.7 Zobrazení kinetické energie turbulence

Do řezných rovin byly zobrazeny formou barevných kontur profily kinetické energie turbulence. Kinetická energie turbulence představuje specifickou energii vhodnou pro zobrazení vírových struktur v turbulentním proudění [8].

Na Obr. 29 je zobrazena kinetická energie turbulence formou barevných kontur v rovině č. 8. Zvýšení kinetické energie turbulence lze sledovat po obvodu kanálu v blízkosti stěn. Maxima  $227 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  zde nabývá na konvexní straně horní respektive spodní stěny. Kontury kinetické energie turbulence jsou symetrické podle středního horizontálního řezu kolene.



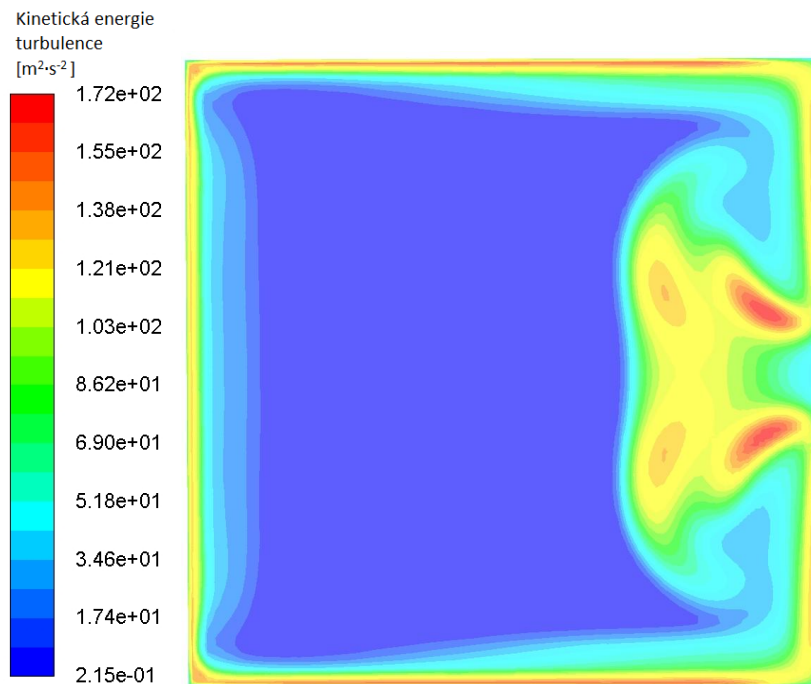
Obr. 29 Zobrazení kinetická energie turbulence v rovině č. 8



Obr. 30 Zobrazení kinetická energie turbulence v rovině č. 12

Na Obr. 30 je zachycen vývoj kinetická energie turbulence v rovině č. 12. V konturách jsou patrné vzniklé víry na vnitřní straně kolene. Maxima kinetická energie turbulence přibližně  $200 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  se stále nachází v mezní vrstvě na vnitřní straně spodní i vrchní stěny.





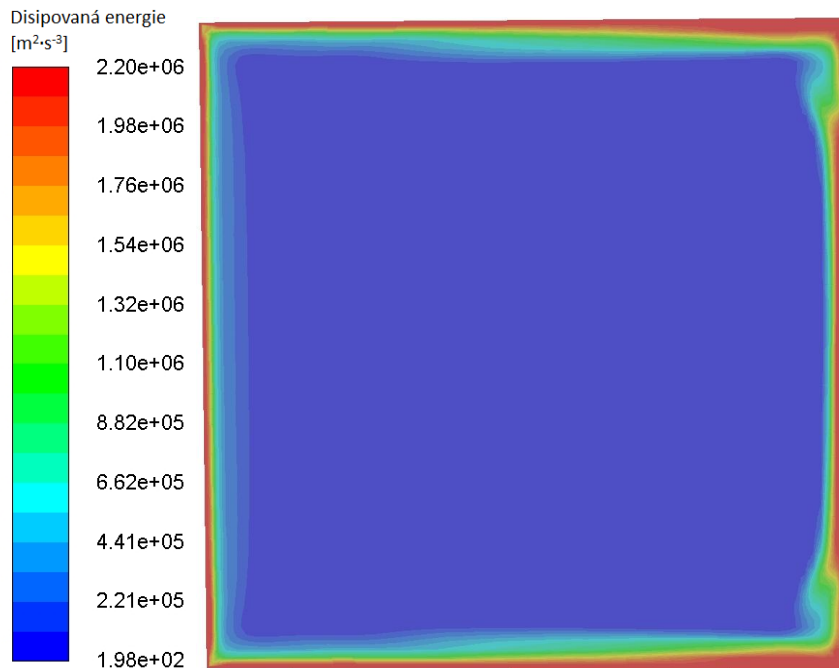
Obr. 31 Zobrazení kinetická energie turbulence na výstupní rovině

Na Obr. 31 je výrazné zvýšení kinetické energie turbulence na vnitřní straně kolene. Víry na vnitřní straně kolene vytvářejí oddělená maxima kinetické energie turbulence  $172 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$  mimo mezní vrstvu kolene.

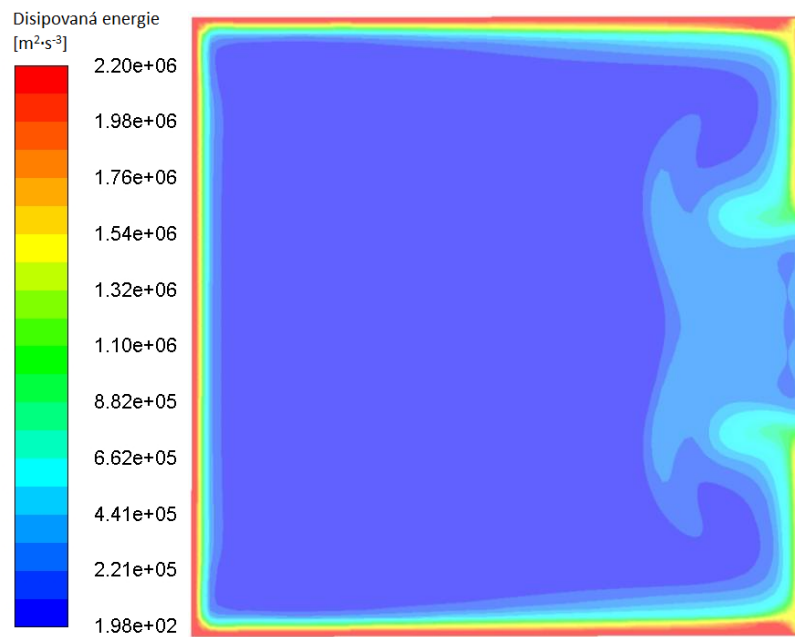
#### 4.8 Zobrazení toku disipované energie v řezech

Pro analýzu vlivu vírových struktur na celkové ztráty kolene bylo provedeno zobrazení toku turbulentní disipované energie. Tok turbulentní disipace (anglicky Turbulent Dissipation Rate) představuje tok specifické energie disipované na vnitřní energii ve formě tepla [9].

Z Obr. 32 je patrné, že nejvíce energie je disipováno v mezní vrstvě po obvodu kolene. Červená kontura představující maximum toku turbulentní disipované energie  $2,2 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$  je silnější na konvexní straně kolene a směrem ke konkávní straně plynule klesá.



Obr. 32 Zobrazení toku disipované energie v rovině č. 8



Obr. 33 Zobrazení toku disipované energie v rovině č. 16

Na Obr. 33 je zobrazení toku disipované energie v rovině č. 16. Maximum disipace  $2,2 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$  je stále po obvodu kanálu, ale po celém obvodu má přibližně konstantní šířku. Víry na vnitřní straně kanálu vytvářejí symetrické výběžky zvýšené disipace přibližně  $6,5 \cdot 10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-3}$ .

## 5 Řešení integrálních parametrů

Pomocí funkce surface integrals (plošný integrál) byly v software Ansys Fluent vypočteny integrální hodnoty statického tlaku, rychlosti a hmotnostního průtoku ve všech řezných rovinách, na vstupu i výstupu z kolene. Vypočtené parametry byly zpracovány do Tabulka 4 Integrální hodnoty.

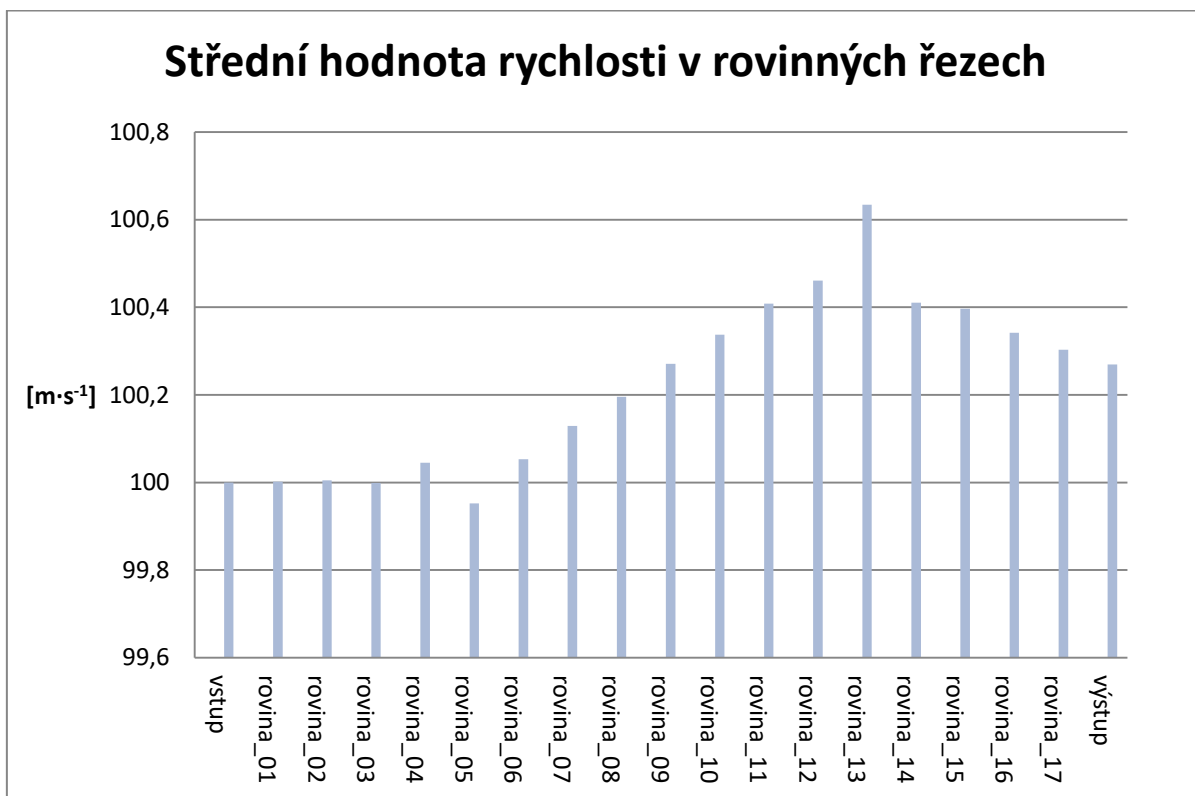
Tabulka 4 Integrální hodnoty

Číslo roviny	Statický přetlak	Statický tlak	Rychlost	Hmotnostní Průtok
	[Pa]	[Pa]	[m·s <sup>-1</sup> ]	[kg·s <sup>-1</sup> ]
rovina_01	1 554,67	102 879,67	100,00	0,13340
rovina_02	1 435,12	102 760,12	100,00	0,13340
rovina_03	1 350,39	102 675,39	100,00	0,13338
rovina_04	1 328,82	102 653,82	100,05	0,13342
rovina_05	1 221,52	102 546,52	99,95	0,13340
rovina_06	1 110,92	102 435,92	100,05	0,13340
rovina_07	1 020,83	102 345,83	100,13	0,13341
rovina_08	927,63	102 252,63	100,20	0,13340
rovina_09	834,16	102 159,16	100,27	0,13341
rovina_10	742,44	102 067,44	100,34	0,13340
rovina_11	651,06	101 976,06	100,41	0,13341
rovina_12	550,04	101 875,04	100,46	0,13339
rovina_13	354,35	101 679,35	100,63	0,13331
rovina_14	206,63	101 531,63	100,41	0,13336
rovina_15	150,69	101 475,69	100,40	0,13341
rovina_16	91,58	101 416,58	100,34	0,13341
rovina_17	43,93	101 368,93	100,30	0,13340
výstup	0,00	101 325,00	100,27	0,13340
Průměrná hodnota	804,12	102 129,12	100,22	0,13339

Ze zákona kontinuity vyplývá konstantní hodnota střední rychlosti respektive hmotnostního průtoku v každé z řezných rovin. Odchytky v rychlosti od hodnot nastavených v okrajové podmínce představují chybu v numerickém řešení CFD analýzy. Pro názornou demonstraci byly hodnoty z Tabulka 4 vyneseny do grafů a následně vyhodnoceny.

## 5.1 Střední hodnota rychlosti

Střední hodnoty rychlosti byly vyneseny do Obr. 34.

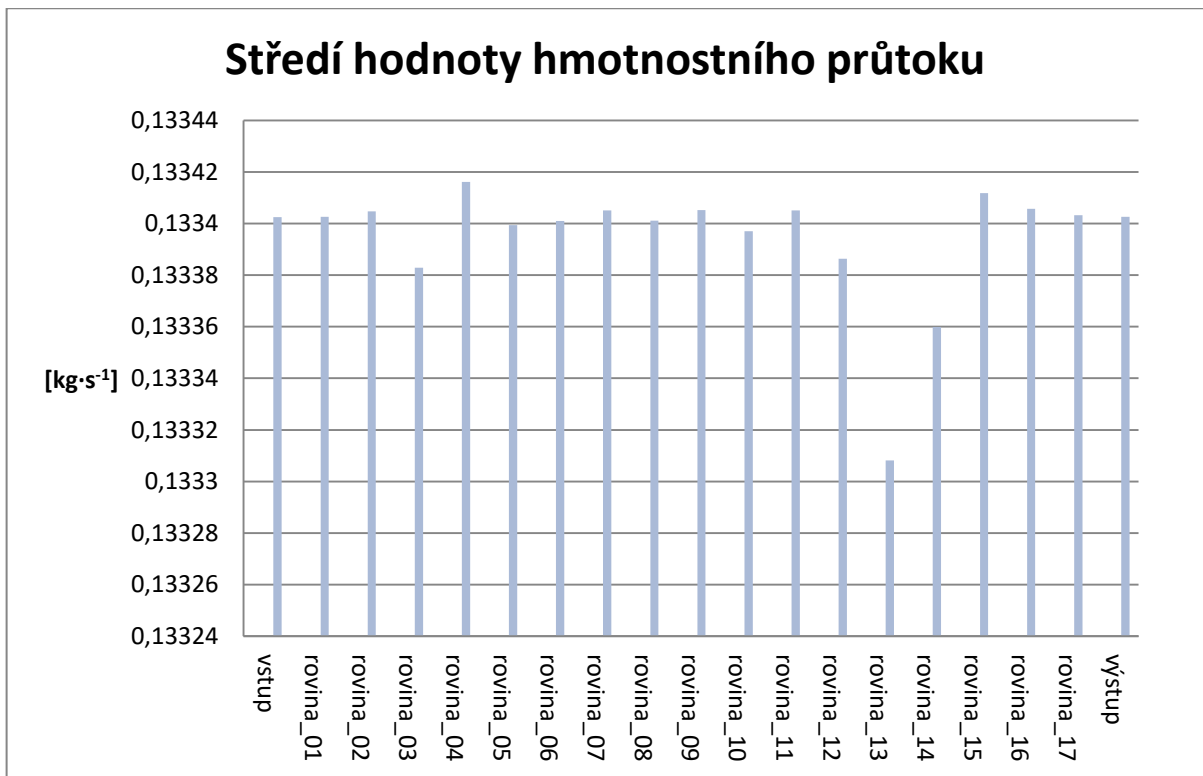


Obr. 34 Graf střední hodnoty rychlosti v rovinných řezech

Z Obr. 34 vyplývá správná střední hodnota rychlosti na vstupu do kolene  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . V přímé části kolene, do roviny č. 4, je hodnota přibližně konstantní. Se zakřivením kolene narůstá střední hodnota rychlosti až do roviny č. 13 na hodnotu přibližně  $100,63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . V přímé části na výstupu z kolene dochází ke klesání střední hodnoty rychlosti.

## 5.2 Střední hodnota hmotnostního průtoku v rovinných řezech

Střední hodnoty hmotnostního průtoku byly vyneseny do Obr. 35. Smyslem rozboru hmotnostního průtoku je analýza dalších nejistot spojených s numerickou simulací, které se v integrální hodnotě hmotnostních průtoků mohou objevit. Příkladem je různá velikost průřezu kolene, který je teoreticky konstantní, ovšem vlivem objemové sítě a rozdělení průřezu do buněk je výsledná velikost průřezu různá od teoretické.



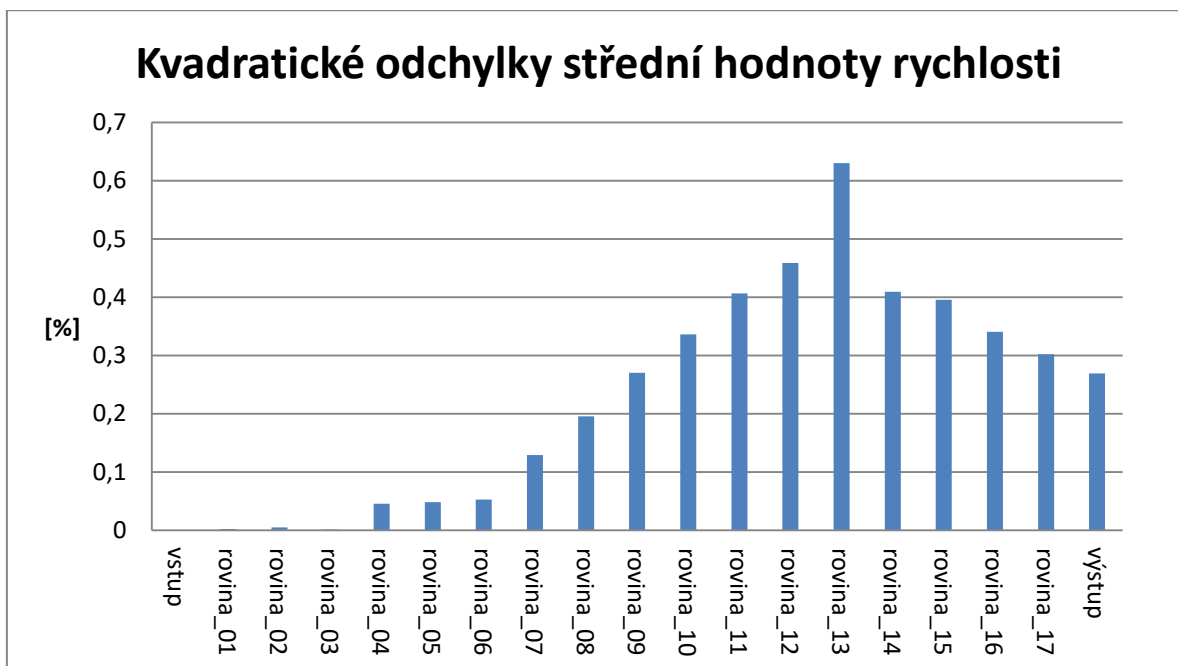
Obr. 35 Středí hodnoty hmotnostního průtoku

Z Obr. 35 vyplývá přibližně konstantní hodnota hmotnostního průtoku v celém zahnutém kanálu. K rozdílům dochází až na 4. desetinném místě a to zejména ve 13. rovině na konci zahnuté části kolona, kde hodnota klesne na 0,13331 kg·s<sup>-1</sup>.

### 5.3 Kvadratické odchylky vybraných integrálních parametrů

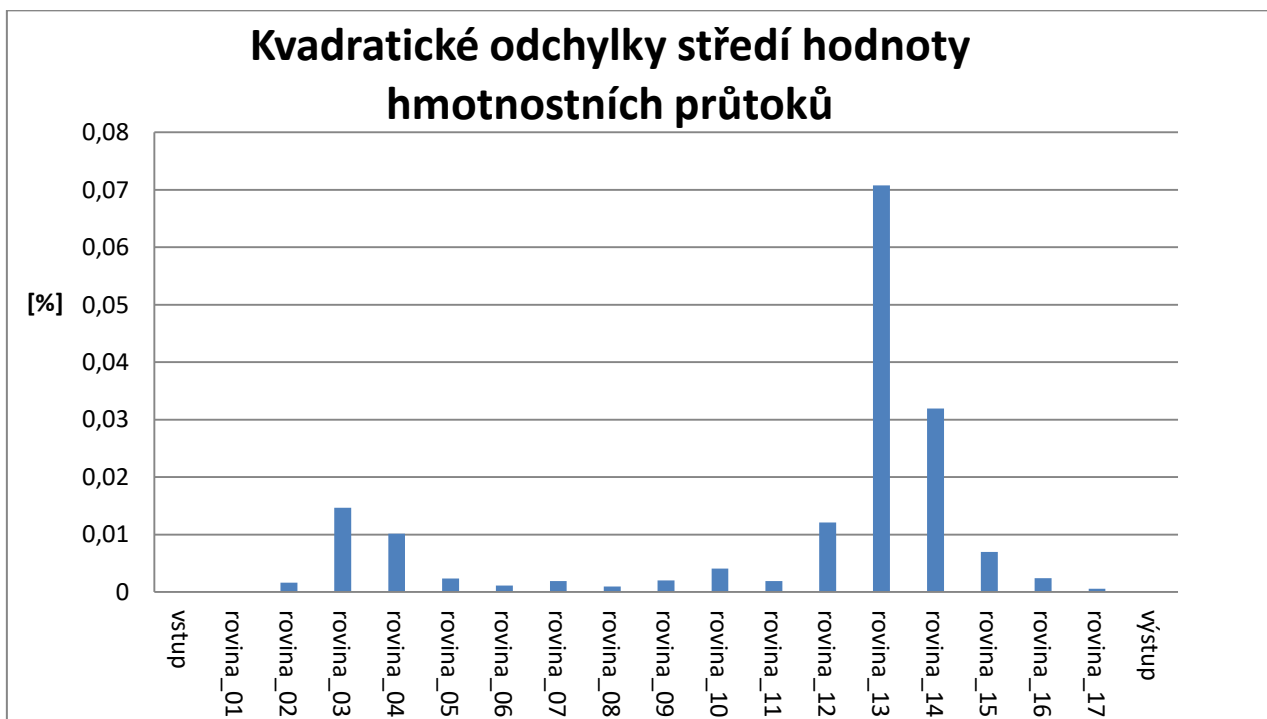
Pro stanovení velikosti nejistoty CFD analýzy byly vypočteny kvadratické odchylky integrálních parametrů v každé z řezných rovin a výsledky vyneseny do názorných grafů.

Z Obr. 36 je patrné, že velikost nejvyšší odchylky analýzy rychlosti je přibližně 0,6% ve 13. rovině na konci zahnuté části kanálu.



Obr. 36 Kvadratické odchytky střední hodnoty rychlosti

Z Obr. 36 je patrné, že velikost nejvyšší odchytky analýzy rychlosti je přibližně 0,6% ve 13. rovině na konci zahnuté části kanálu.



Obr. 37 Kvadratické odchytky střední hodnoty hmotnostního průtoku

Z Obr. 37 jsou patrná 2 místa se zvýšenou odchylkou hmotnostního průtoku. První je v rovině č. 3 s hodnotou přibližně 0,15 % a druhá ve 13. rovině s hodnotou přibližně 0,07%.

Z výsledků rozboru kvadratických odchylek vyplývá vysoká přesnost provedené CFD analýzy. Při výpočtu integrálních hodnot rychlosti byla maximální odchylka v řádu desetin %. Maximální odchylky hmotnostních průtoků jsou v řádu setin %.

## 6 Stanovení součinitele místních ztrát kolene

Pro efektivní výpočet proudění tekutin potrubím se v mechanice tekutin používá součinitel místních ztrát  $\xi$ . Jeho stanovení je možné vyjádřením z rozšířené Bernoulliovy rovnice [10]:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + \xi \cdot \frac{v_2^2}{2} + \lambda \cdot \frac{l}{d_H} \cdot \frac{v_2^2}{2}, \quad (16)$$

kde z rovnice kontinuity vyplývá [10]:

$$v_1 = v_2 = v. \quad (17)$$

Potom lze ztrátový součinitel vyjádřit jako [10]:

$$\xi = \frac{\Delta P \cdot 2}{v^2 \cdot \rho} - \lambda \cdot \frac{l_{st}}{d_H}. \quad (18)$$

Hodnota kinematické viskozity byla vypočtena z nastavené hodnoty dynamické viskozity [10]:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{1,79 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}}{1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}.$$

Vyjádření Reynoldsova čísla, Deanova čísla a součinitele místních třecích ztrát pro kanál čtvercového průřezu [10] [11]:

$$Re = \frac{v \cdot a}{\nu} = \frac{100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot 0,033 \text{ m}}{1,46 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}} = 226027, \quad (19)$$

$$\lambda = \frac{57}{Re} = \frac{57}{226027} = 2,48 \cdot 10^{-4}, \quad (20)$$

$$l_{st} = 2 \cdot l + \frac{\pi \cdot (R + r_m)}{4} = 2 \cdot 43,5 \text{ mm} + \frac{\pi \cdot (99 \text{ mm} + 66 \text{ mm})}{4} = 217 \text{ mm} = 0,217 \text{ m}, \quad (21)$$

$$d_H = a = 33 \text{ mm} = 0,033 \text{ m}, \quad (22)$$

$$\Delta P = |P_2 - P_1| = |1703,5 \text{ Pa} - 0 \text{ Pa}| = 1703,5 \text{ Pa}, \quad (23)$$

$$De = Re \cdot \sqrt{\frac{d_H}{2 \cdot R_c}} = 226027 \cdot \sqrt{\frac{0,033 \text{ m}}{2 \cdot 0,0825 \text{ m}}} = 101082, \quad (24)$$

$$\xi = \frac{\Delta P \cdot 2}{v^2 \cdot \rho} - \lambda \cdot \frac{l_{st}}{d_H} = \frac{1703,5 \text{ Pa} \cdot 2}{(100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 \cdot 1,225 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} - 2,48 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{0,217 \text{ m}}{0,033 \text{ m}} = 0,28. \quad (25)$$

## 7 Diskuse výsledků

Při CFD analýze proudění zahnutým kolenem do 90° byly v úvodní části identifikovány a názorně prostorově vizualizovány vírové struktury pomocí 3D zobrazení trajektorií proudu. Zobrazené vírové struktury na konvexní straně kolene byly odpovídající strukturám popsaným v teoretickém rozboru. Tím byla předběžně ověřena správnost nastavení výpočtu CFD analýzy v software Ansys Fluent.

Dále byl proveden detailní rozbor vektorového rychlostního pole uvnitř rovinných řezů. Zde byl popsán vývoj vírových struktur. Dále byla identifikována rovina symetrie proudění uvnitř kanálu. Při detailním rozboru byly díky možnosti vysokého zvětšení vektorů rychlosti identifikovány výrazně slabší indukované víry na vnější straně kanálu. Byla identifikována jejich rovina symetrie a opačný smysl otáčení oproti silnějším vírům na vnitřní straně kolene. Pro zobrazení velikosti sekundární složky rychlosti byl definován parametr poměrné rychlosti  $V_{surf}$ . Zobrazením kontur  $V_{surf}$  byl získán přibližný rychlostní profil sekundárního proudění. Kontury  $V_{surf}$  zobrazily různou velikost rychlosti ve stejné vzdálenosti od průmětu vírových vláken. Tím byla vyloučena definice vzniklých vírů jako kombinovaných. Potvrzen byl pouze charakter kombinovaných vírů, kde rychlost roste úměrně se vzdáleností vírového vlákna, až do určité vzdálenosti, kde začne klesat.

Zobrazením kontur statických přetlaků byl určen tlakový profil uvnitř vybraných řezných rovin. Zde byly identifikovány podtlaky v průmětech vírových vláken.

Pomocí kontur kinetické energie turbulence a toku disipované turbulentní energie byla popsána místa s nejvyšší energií a místa s nejvyšší disipací energie. Odsud bylo zjištěno, že k nejvyšší disipaci dochází v mezní vrstvě po obvodu kolene.

Pro zpětné stanovení přesnosti analýzy byly pomocí funkce plošných integrálů vypočteny střední hodnoty vybraných integrálních veličin v rovinných řezech. Vypočtením jejich kvadratických odchylek byla zjištěná vysoká přesnost provedené CFD analýzy, kdy nejvyšší kvadratická odchylka ve střední hodnotě rychlosti byla v řádu desetin % a nejvyšší kvadratická odchylka ve střední hodnotě hmotnostních průtoků byla v řádu setin %. K nejvyšším odchylkám došlo v rovině č. 13 na konci zakřivené části kanálu.

Na závěr byl analyticky vypočten součinitel místních ztrát analyzovaného kolene  $\xi$  na 0,28 pro případné další inženýrské aplikace.



## 8 Závěr

Bakalářská práce je numerickou simulací proudění vazké nestlačitelné tekutiny zahnutým kolenem do 90° s čtvercovým průřezem. Zpracování práce bylo rozděleno do 4 částí. V teoretické části byla provedena rešerše matematicko-fyzikálních vztahů proudění zahnutým kolenem 90°. Ve druhé části byly uvedeny důležité parametry výpočetní sítě v Ansys Mechanical, především velice jemné modelování mezní vrstvy a následná kontrola výpočetní sítě.

Z výsledků analýzy byly ve 3. části identifikovány a detailně popsány symetrické spirální vírové struktury na konvexní a konkávní straně kolene. Pomocí zobrazení parametrů do rovinných řezů byl popsán zvláště vývoj silnějších spirálních vírů na konvexní straně kolene a vývoj slabších indukovaných spirálních vírů na straně vnější. Z analýzy maximální velikosti rychlosti proudění uvnitř prostoru kanálu byla potvrzena správnost volby okrajových podmínek pro proudění nestlačitelné tekutiny.

V poslední 4. části byly vypočteny integrální hodnoty vybraných parametrů v rovinných řezech. Stanovením jejich kvadratické odchylky byla ověřena vysoká přesnost provedené simulace. Pro jednoduchou aplikaci kolene v inženýrských systémech byl analyticky vypočten ztrátový součinitel kolene.

Popsané víry mají významný vliv na ztráty prouděním kolenem. Víry mohou dále působit problémy při použití kolene v soustavě s lopatkovými stroji, například savka vodních turbín. Vzniklé víry zde snižují účinnost lopatkových strojů, případně mohou vést k jejich rychlejšímu opotřebení nebo poškození. Provedená CFD simulace identifikovala vzniklé víry. Další aplikací provedené simulace může být změna geometrie průřezu kolene případně přídavná ploutvička na vnitřní straně kolene. Zachováním stávající formulace numerické simulace lze rychle vyhodnotit navrhované optimalizace.

## 9 Seznam symbolů

$a$	Délka čtvercové strany průřezu kanálu	[m]
$De$	Deanovo číslo	[1]
$d_H$	Hydraulický průměr	[m]
$K$	Konstanta	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]
$K_1$	Konstanta	[s <sup>-1</sup> ]
$l_{st}$	Střední délka kanálu	[m]
$P$	Tlak	[Pa]
$R$	Poloměr konkávní strany kanálu	[m]
$R_c$	Střední poloměr zkřivení kanálu	[m]
$Re$	Reynoldsovo číslo	[1]
$r$	Souřadnice radiálního směru	[1]
$r_m$	Poloměr konvexní strany kanálu	[m]
$u$	Rychlost ve směru x	[m · s <sup>-1</sup> ]
$V$	Rychlost	[m · s <sup>-1</sup> ]
$V_i$	Absolutní velikost rychlosti	[m · s <sup>-1</sup> ]
$\bar{V}$	Velikost střední rychlosti v řezné rovině	[m · s <sup>-1</sup> ]
$V_{surf}$	Poměrný parametr rychlosti	[1]
$v$	Rychlost ve směru y	[m · s <sup>-1</sup> ]
$v_r$	Radiální složka rychlosti	[m · s <sup>-1</sup> ]
$v_\theta$	Obvodová složka rychlosti	[m · s <sup>-1</sup> ]
$v_1$	Rychlost na vstupu	[m · s <sup>-1</sup> ]
$v_2$	Rychlost na výstupu	[m · s <sup>-1</sup> ]
$w$	Rychlost v směru z	[m · s <sup>-1</sup> ]
$\rho$	Hustota	[kg · m <sup>-3</sup> ]
$\phi$	Rychlostní potenciál	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]

$\theta$	Úhlová souřadnice	[1]
$\psi$	Proudová funkce	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]
$\Gamma$	Cirkulace rychlosti	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]
$\Omega$	Vířivost	[s <sup>-1</sup> ]
$\omega$	Úhlová rychlost	[s <sup>-1</sup> ]
$\xi$	Místní ztrátový součinitel	[1]
$\lambda$	Součinitel třecích ztrát	[1]
$\nu$	Kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> · s <sup>-1</sup> ]
$\eta$	Dynamická viskozita	[Pa · s]

## 10 Seznam zkratk

CFD

Computational fluid dynamics

## 11 Seznam použité literatury

- [1] TAYLOR, EDWARD S. *National Committee for Fluid Mechanics Films FILM NOTES for SECONDARY FLOW*. 1968. , 8. ISSN Education Development Center, Inc. Dostupné také z: <https://web.mit.edu/hml/ncfmf/13SC.pdf>
- [2] M.H.Vavra : *Aero-Thermodynamica and Flow in Turbomachines*, John Wiley and Sons., New York, 1960
- [3] MUNSON, Bruce R., Theodore H. OKIISHI, Wade W HUEBSCH a Alric P. ROTHMAYER. *Fundamentals of fluid mechanics*. 7th edition. River Street, Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. ISBN 978 1 118 11613 5.
- [4] M.Fialová, T.Hyhlík, K.Kozel, P.Šafařík : Numerical Study of Influence of Boundary Conditions on Vortex Structure Development in Curved Rectangular Channels, str.863-868. In : 5th ISAIF, Proc., Internal Flows, Vol.2, Gdaňsk, 2001
- [5] Cibulka J., Beneš J. : Numerická analýza proudění čtvercovým kolenem 90°, semestrální úkol, FS ČVUT, Praha 2020
- [6] INFLATION LAYER MESHING IN ANSYS. *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS BLOG - LEAP AUSTRALIA* [online]. Australia, 2012 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://www.computationalfluidynamics.com.au/tips-tricks-inflation-layer-meshing-in-ansys/>
- [7] Mesh Quality: Cell Shape. *ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation* [online]. Ansys, 2009 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/ug/node167.htm>
- [8] Modeling the Turbulence Kinetic Energy. *ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation* [online]. 2009 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/html/th/node83.htm>
- [9] Turbulence dissipation rate. *CFD Online* [online]. 2015 [cit. 2020-07-15]. Dostupné z: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence\\_dissipation\\_rate](https://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_dissipation_rate)
- [10] NOSKIEVIČ, Jaromír. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury Alfa, 1987.
- [11] Dean number. *Wikipedia* [online]. 2020 [cit. 2020-07-21]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Dean\\_number](https://en.wikipedia.org/wiki/Dean_number)

## Anotační list

<b>Jméno autora:</b>	Jaroslav CIBULKA
<b>Název BP:</b>	Numerická simulace proudění v kanále čtvercového průřezu s kolenem
<b>Anglický název:</b>	Numerical Simulation of Flow past a Band Channel of Squared Section.
<b>Rok:</b>	2020
<b>Obor studia:</b>	Teoretický základ strojního inženýrství
<b>Ústav/odbor:</b>	Ústav mechaniky tekutin a energetiky – Odbor mechaniky tekutin a termodynamiky
<b>Vedoucí BP:</b>	prof. Ing. Pavel ŠAFAŘÍK, CSc.
<b>Bibliografické údaje:</b>	počet stran: 46 Počet obrázků: 37 Počet tabulek: 4 Počet příloh: 0
<b>Klíčová slova:</b>	CFD, Ansys Fluent, Proudění kolenem 90° se čtvercovým průřezem, vírové struktury
<b>Keywords:</b>	CFD, Ansys Fluent, flow past a 90° band channel of squared section, vortex structures
<b>Anotace:</b>	Předmětem bakalářské práce byla numerická simulace proudění nestlačitelné viskózní tekutiny 90° kanálem čtvercového profilu. Pro analýzu byl použit výpočetní software Ansys. Výpočetní síť byla definována v softwaru Ansys Mechanical. Nastavení výpočetního modelu a následné zpracování výsledků bylo provedeno v softwaru Ansys Fluent. Z výsledků analýzy byly identifikovány a popsány vzniklé vírové struktury v proudovém poli formou zobrazení veličin (případně jejich složek) do rovinných řezů a následným rozborem. Z výsledků simulace byl stanoven součinitel místní ztráty kolene. Zpětná kontrola přesnosti výpočtu byla provedena pomocí výpočtu kvadratických odchylek vybraných integrálních veličin v jednotlivých řezech a jejich přehledným zpracováním do grafů.
<b>Abstract:</b>	The subject of this bachelor thesis was numerical simulation of flow of incompressible viscous fluid past a band channel of squared section. For the analyses Ansys software was used. Computational grid was defined in Ansys Mechanical software. CFD model was defined, solved and post-processed in Ansys Fluent. Vortex structures were identified from

the solution of the analyses and displayed in planar sections. Coefficient of the local loss of the channel was computed from the solution of the simulation. Accuracy of the results was verified by computing the root mean square deviation of chosen integral quantities in planar sections and its processing into graphs.