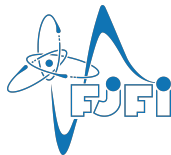


# Optimální tvar stěn idealizovaného kavopulmonálního spojení

Diplomová práce

**Jan Bureš**, Radek Fučík, Radomír Chabiniok

Katedra matematiky  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská  
České vysoké učení technické v Praze

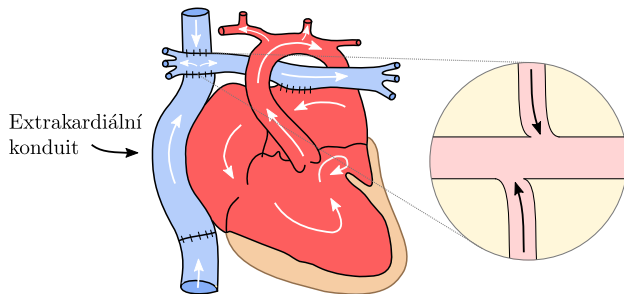


29. ledna 2025

## 1. Motivace

## 2. Optimalizační rámec

## 3. Výsledky



## Optimalizační úloha:

Nalézt minimum

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbb{X}} f(\mathbf{x}),$$

kde  $f(\mathbf{x})$  je účelová funkce.

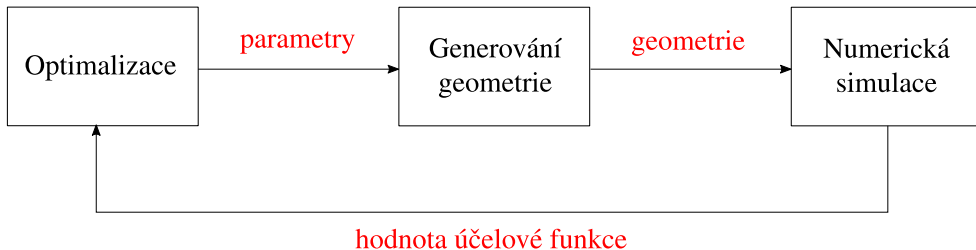
## Charakterizace:

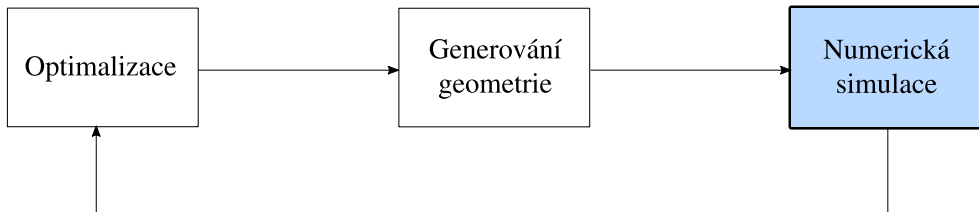
- nelineární
- s vazbami

Python: Nelder-Mead  
C++: NOMAD

Python: meshgen

C++: LBM





+



TNL-LBM

## LBM: - KM FJFI

- rychlostní model D3Q27, CuLBM

$$\rho = \sum_{k=1}^{27} \varphi_k$$
$$\rho \mathbf{u} = \sum_{k=1}^{27} \varphi_k \boldsymbol{\xi}_k + \frac{\Delta t}{2} \rho \mathbf{g}$$

## Okrajové a počáteční podmínky:

- konstatní přítok a free outflow OP
- hranice objektu  $\rightarrow$  bounce-back
- rovnovážná počáteční podmínka

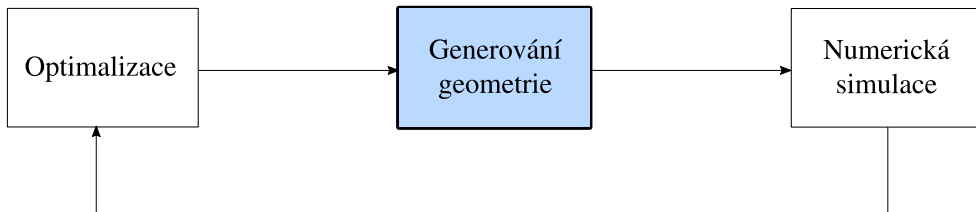
## Rovnice dynamiky tekutin:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$$

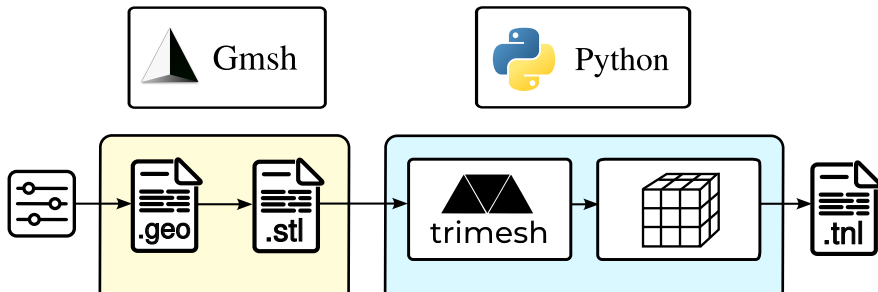
$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = \nabla \cdot \mathbf{T} + \rho \mathbf{g}$$

## Předpoklady:

- izotermální systém bez vnějších sil
- nestlačitelná newtonovská tekutina



- balík vytvořený pro účely parametrického generování geometrie a následné voxelizace

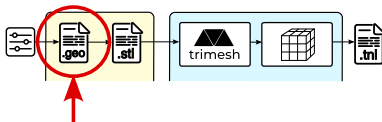




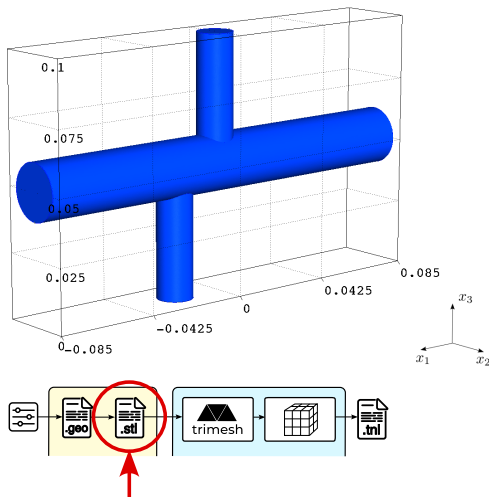
# Generování geometrie - šablona



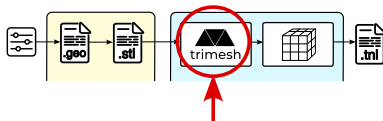
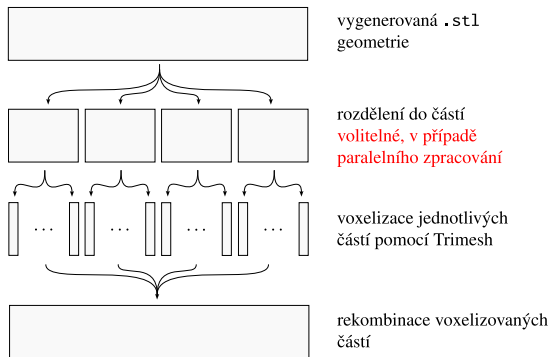
```
8 // Cylinder dimensions
9 LOWER_LENGTH = 0.05; // Length of the lower cylinder in meters
10 LOWER_RADIUS = 0.007; // Radius of the lower cylinder in meters
11 UPPER_LENGTH = 0.05; // Length of the upper cylinder in meters
12 UPPER_RADIUS = 0.007; // Radius of the upper cylinder in meters
13 MIDDLE_LENGTH = 0.17; // Length of the middle cylinder in meters
14 MIDDLE_RADIUS = 0.011; // Radius of the middle cylinder in meters
15 // Offset for positioning along the X-axis
16 OFFSET = DEFINE_OFFSET;
17
18 // First Cylinder - Lower //
19 // Define points along the axis of the lower cylinder
20 Point(1) = {OFFSET, 0.0, LOWER_LENGTH, h};
21 Point(2) = {OFFSET, 0.0, 0.0, h};
22 // Create line and wire for lower cylinder extrusion
23 Line(1) = {2, 1};
24 Wire(2) = {1};
25 // Disk representing the base of the lower cylinder
26 Disk(1) = {OFFSET, 0.0, LOWER_LENGTH, LOWER_RADIUS};
27 // Extrude the surface to form the first cylinder volume
28 Extrude { Surface{1}; } Using Wire {2}
```



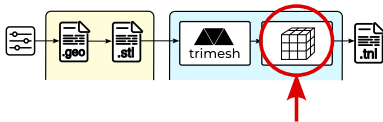
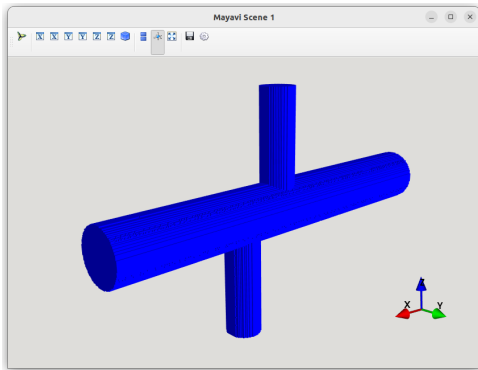
# Generování geometrie - STL

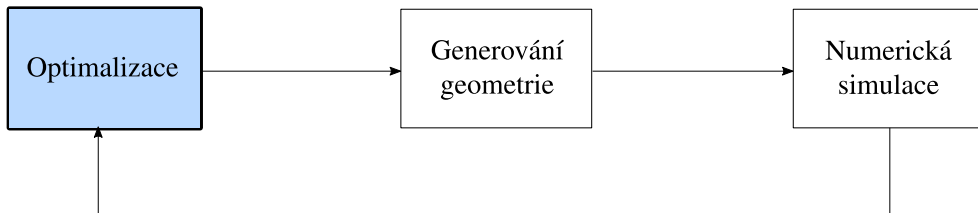


# Generování geometrie - voxelizace



# Generování geometrie - výsledek





Nelder-Mead / NOMAD

- Předchozí práce (VÚ)  $\Rightarrow$  bezgradientní metody
- Úloha s vazbami  $\Rightarrow$  extrémní bariérová metoda
- Vyčíslení  $f(x)$  pomocí LBM  $\Rightarrow$  výpočetně i časově náročné
- Algoritmy:
  - Nelderova-Meadova metoda - vlastní implementace podporující paralelizaci
  - Mesh Adaptive Direct Search (NOMAD [1])

[1] C. Audet, et al. (2022), *Algorithm 1027: NOMAD version 4: Nonlinear optimization with the MADS algorithm.*, DOI: 10.1145/3544489

- Použití balíku `meshgen`, řešení netriviálních úloh
- Reynoldsův rozklad:

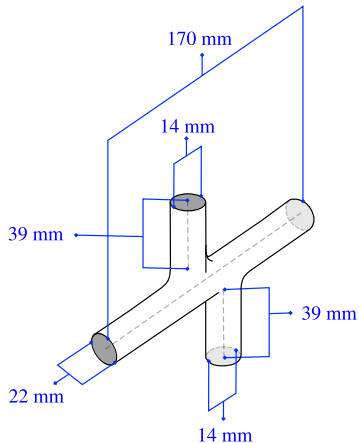
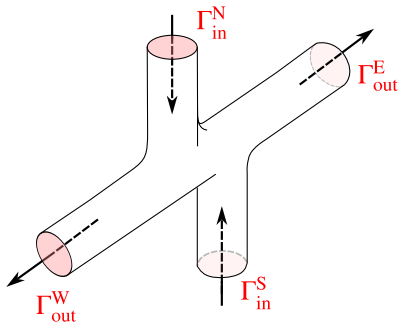
$$\mathbf{u}(x, y, z, t) = \overline{\mathbf{u}(x, y, z)} + \mathbf{u}'(x, y, z, t)$$

- Účelové funkce: turbulentní kinetická energie a smyková rychlost

$$T_{\text{turb}} = \frac{1}{2}(\mathbf{u}'(x, y, z, t))^2, \quad \dot{\gamma} = \sqrt{2} \|\mathbf{D}\|_F$$

- Nestlačitelná newtonovská tekutina, 3D

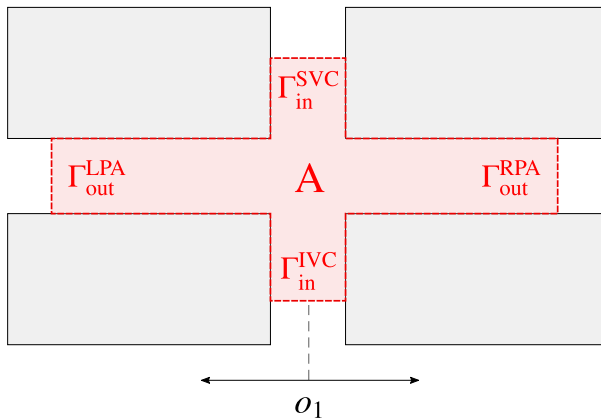
# Idealizovaný model TCPC





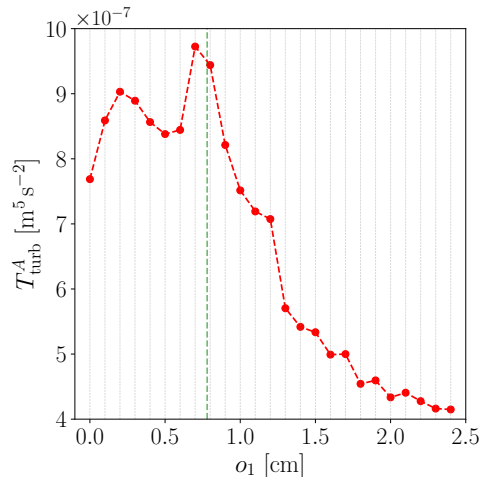
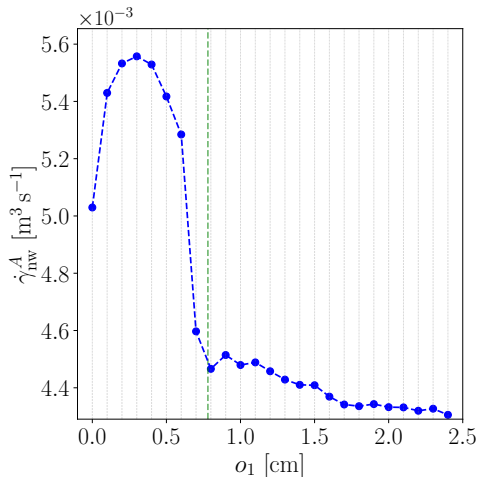
# 1 parametr – posun IVC

- Posun osy IVC, ozn.  $o_1$ , je jediný optimalizační parametr

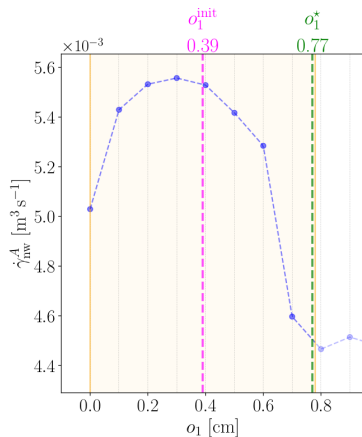


# 1 parametr – účelové funkce

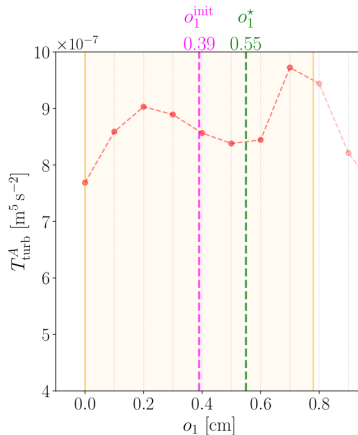
- Účelových funkce v závislosti na posunu  $o_1$  (vazba určená dělením IVC proudění)



# 1 parametr – výsledky



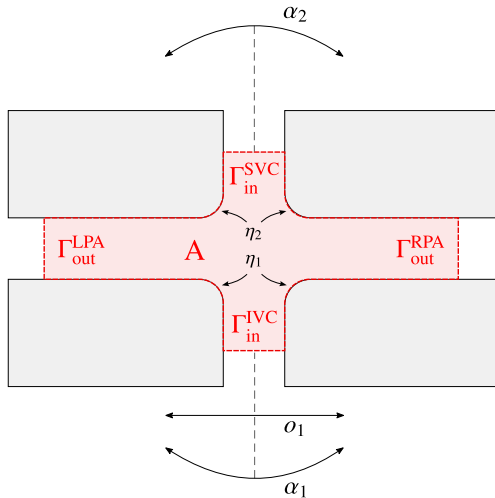
Metoda	Nelder-Mead	MADS
Výpočetní čas [h]	68.9	155.8



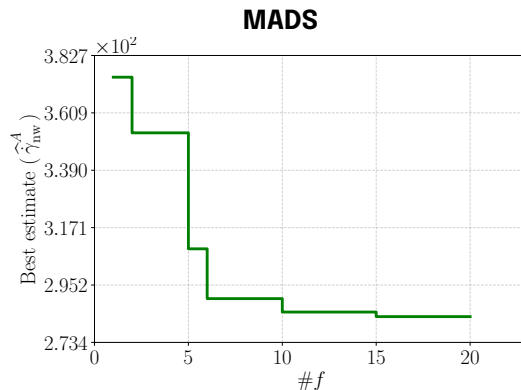
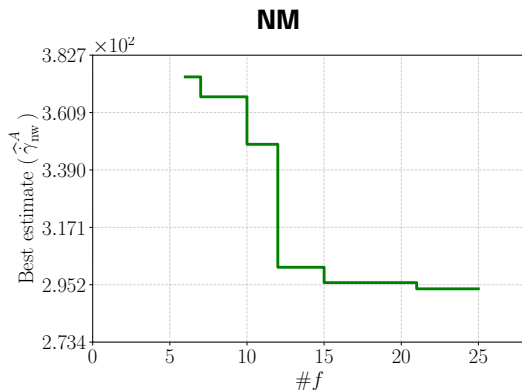
Metoda	Nelder-Mead	MADS
Výpočetní čas [h]	44.7	150.1

# 5 parametrů - model

- Posun osy IVC, naklonění os dolního a horního kanálu, tvar napojení



# 5 parametrů - výsledky

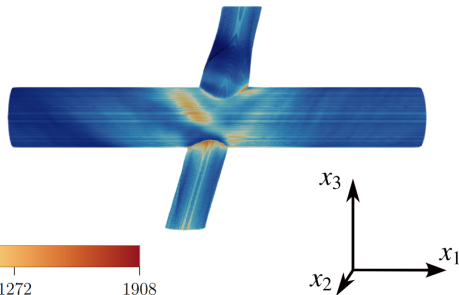
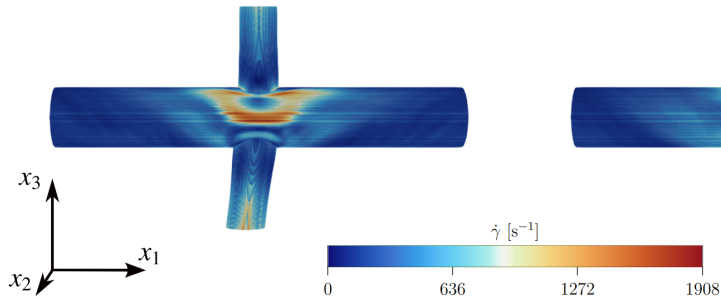


Řešení	Čas [h]	$o_1$ [cm]	$\alpha_1$ [°]	$\alpha_2$ [°]	$\eta_1$ [cm]	$\eta_2$ [cm]
$\mathbf{x}_{NM}^*$	<b>49.2</b>	-0.139	6.8	-0.2	0.058	0.128
$\mathbf{x}_{MADS}^*$	<b>144.2</b>	0.1	16	13	0	0.25

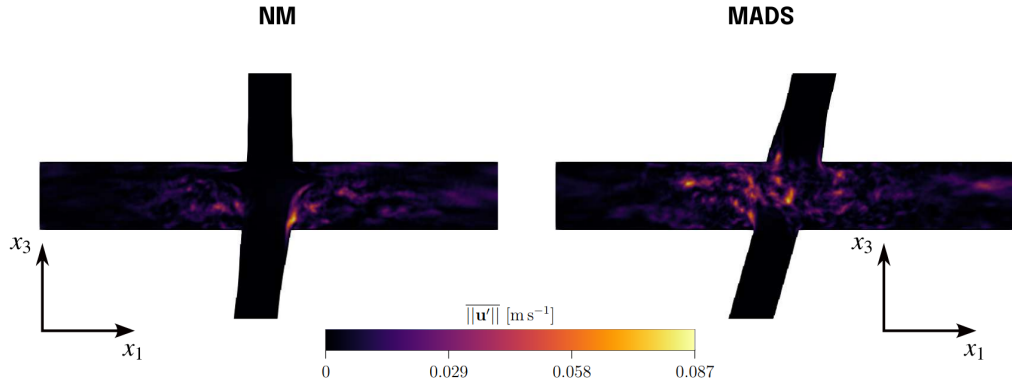
# 5 parametrů - výsledky

NM

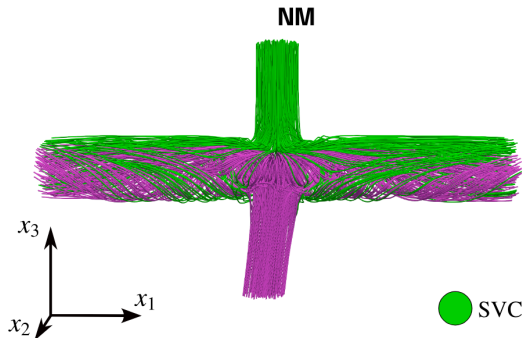
MADS



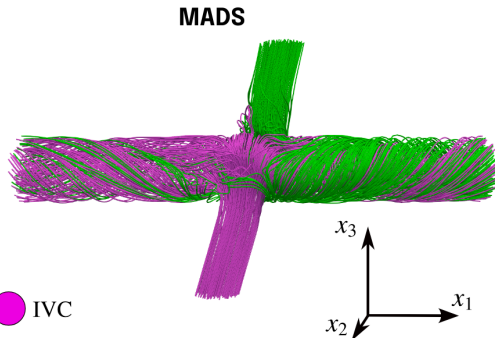
# 5 parametrů - výsledky



# 5 parametrů - výsledky



	RPA	LPA
SVC	45.19%	48.81%
IVC	45.67%	54.33%



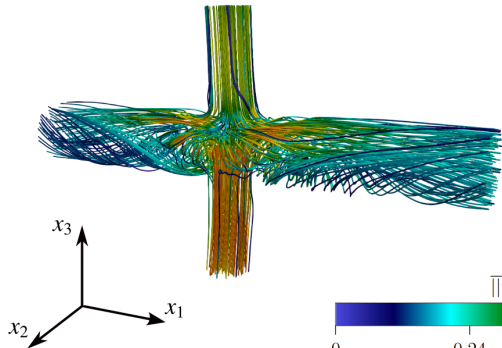
	RPA	LPA
SVC	20.68%	79.32%
IVC	66.02%	33.98%



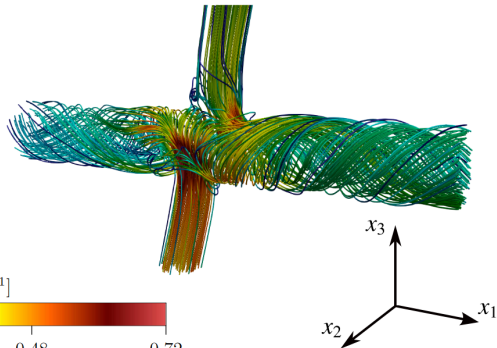
# 5 parametrů - výsledky



NM



MADS



- Vytvořen rámec pro generování a řešení netriviálních optimalizačních úloh s pomocí LBM
- Navrženy parametrické modely idealizovaného TCPC
- Plány do budoucna (PGS): zdokonalení rámce, reálná data, experimenty na MRI
- Publikace:
  - "Geometry optimization of idealized total cavopulmonary connection using a CFD-based framework," *FIMH 2025, Dallas* – podáno
  - Článek v přípravě

## Děkuji za pozornost!

# 1. Hustota na přítoku OP

---

- Dotaz: *Jak je nastavena/vypočítána hustota pro přítokovou okrajovou podmínku?*
- Na přítoku je použita rovnovážná (equilibrium) okrajová podmínka, kde se hustota fixuje na referenční hodnotu ( $\rho = 1 [-]$ ), rychlost se předepisuje konstatní.

## 2. Kritérium zastavení simulace

---

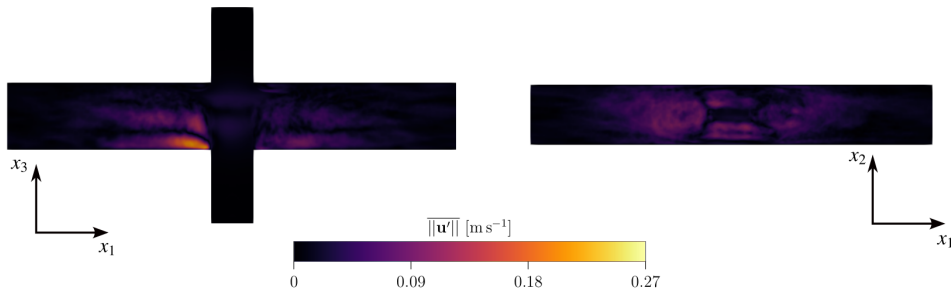


- Dotaz: *Jaké je přesné kritérium pro zastavení simulace proudění v LBM?*
- Je specifikovaný charakteristický čas  $T$  stejný pro všechny simulace. Tento čas je volen tak, aby mohl být použit Reynoldsův rozklad.

### 3. Nesymetrie symetrické úlohy



- Dotaz: *Co mohlo způsobit nesymetrii řešení jinak symetrické úlohy (je úloha opravdu symetrická i po diskretizaci?)*
- Výpočty prováděny s jednoduchou strojovou přesností, vliv by tedy mohla mít numerická chyba. Projektovaná geometrie je i po diskretizaci symetrická.



## 4. Výpočet napětí na stěnách

---



- Dotaz: *Dal by se pro výpočet napětí na stěnách použít takový algoritmus, který používá M. Matyka?*

Wall orientation and shear stress in the lattice Boltzmann model

Maciej Matyka<sup>a,\*</sup>, Zbigniew Koza<sup>a</sup>, Łukasz Mirośław<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup> Faculty of Physics and Astronomy, University of Wrocław, pl. M. Borna 9, 50-204 Wrocław, Poland

<sup>b</sup> Institute of Informatics, Wrocław University of Technology, Poland

<sup>c</sup> Vratix Ltd., Wrocław, Muchoborska 18, Poland

## 5. Urychlení rámce

---



- Dotaz: *Dal by se optimalizační rámec více urychlit při zachování potřebného prostorového a časového rozlišení?*
- Jistě je možné dále zefektivnit samotný použitý optimalizační algoritmus. Dále je zde potenciál projektovat perturbovanou geometrii přímo za běhu jedné simulace, což by značně mohlo zkrátit čas potřebný k vyčíslení účelové funkce.