

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
2024

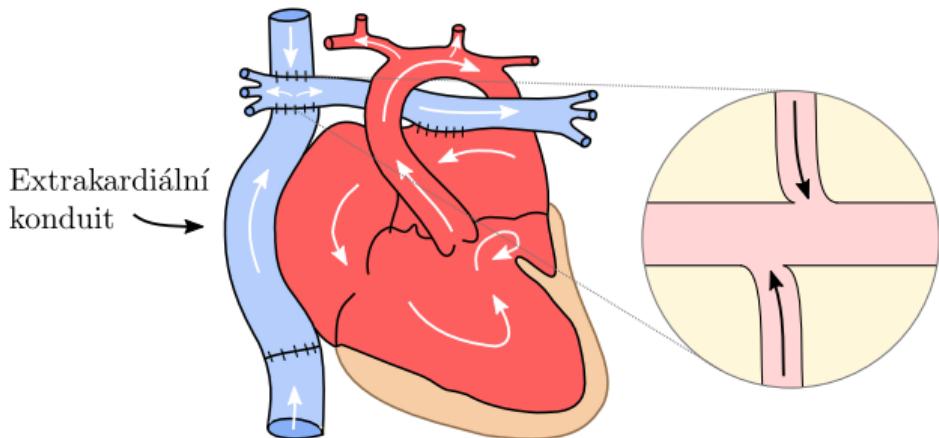
11. prosince

1. Motivace

2. Optimalizační rámec

3. Výsledky

Motivační úloha



Extrakardiální
konduit →

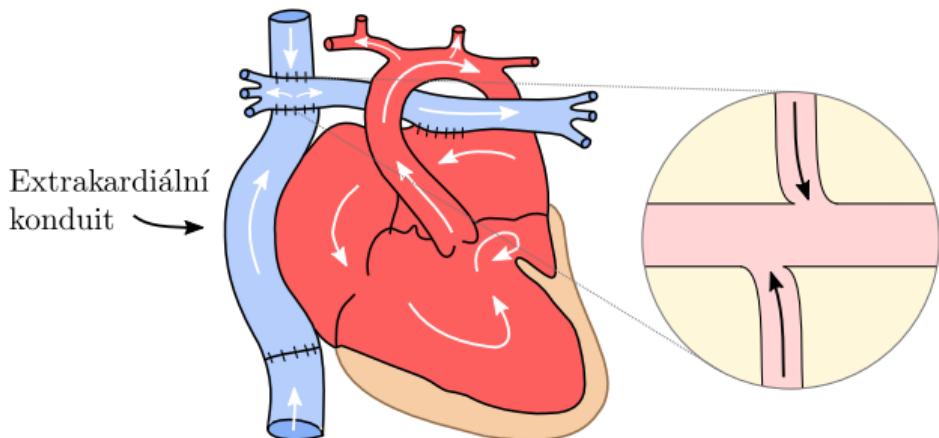
Optimalizační úloha:

Nalézt minimum

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

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

Motivační úloha



Optimalizační úloha:

Nalézt minimum

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

kde $f(x)$ je účelová funkce.

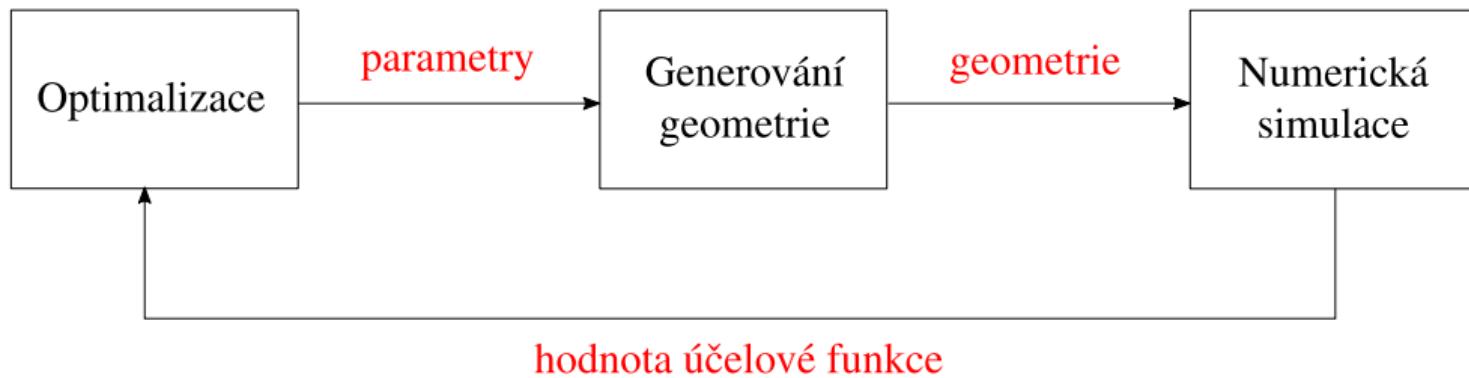
Charakterizace:

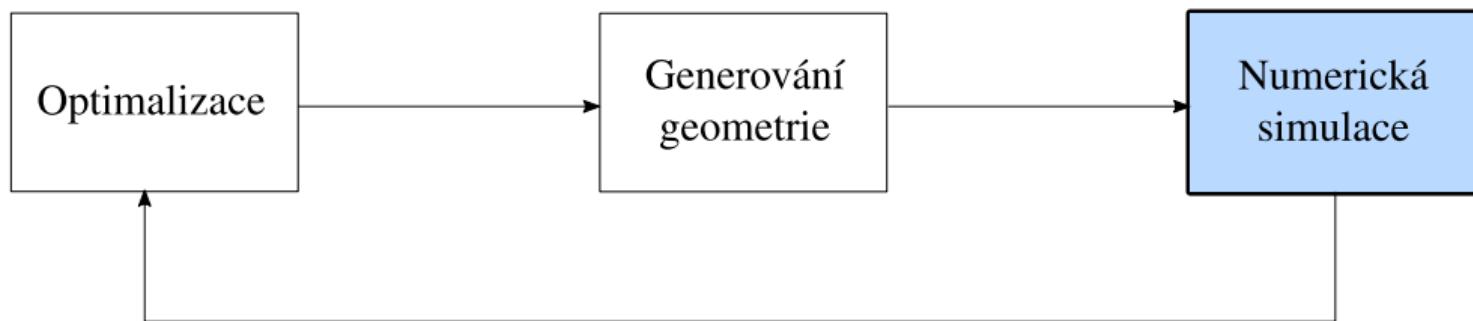
- nelineární
- s vazbami

Python: Nelder-Mead
C++: NOMAD

Python: meshgen

C++: LBM





Mřížková Boltzmannova metoda

LBM: - KM FJFI

- rychlostní model D3Q27, CuLBM

$$\rho = \sum_{k=1}^{27} f_k$$

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

Okrajové a počáteční podmínky:

- hranice oblasti → symetrické OP
- hranice objektu → bounce-back
- rovnovážná počáteční podmínka

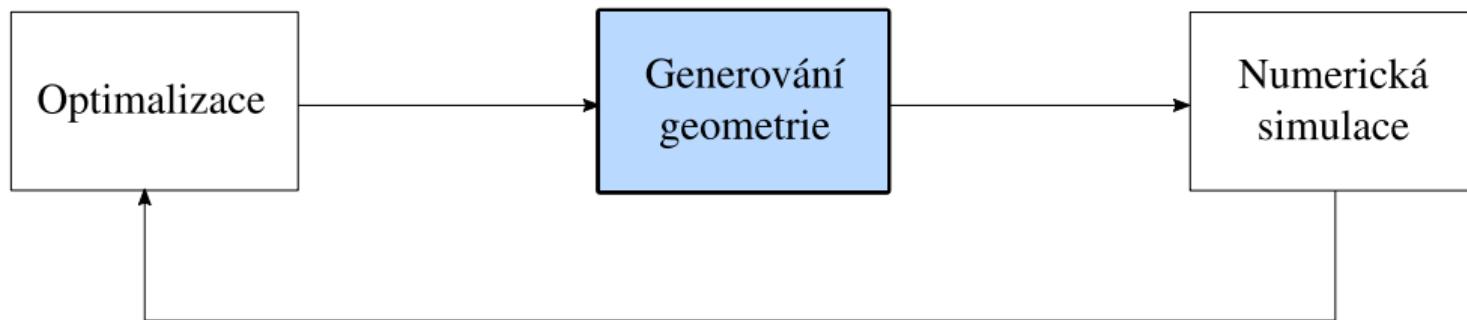
Rovnice dynamiky tekutin:

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

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

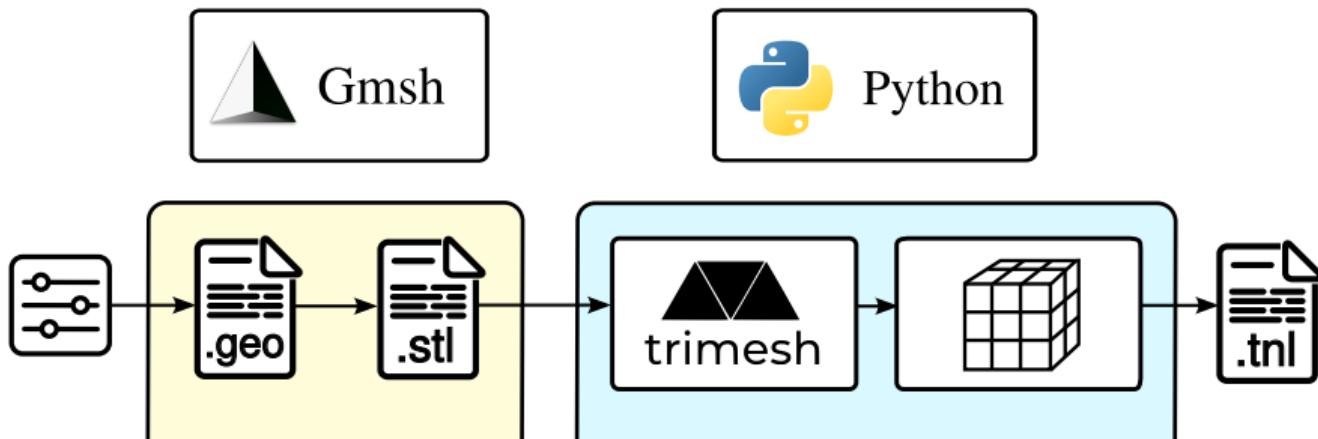
Předpoklady:

- izotermální systém bez vnějších sil
- nestlačitelná newtonovská tekutina



Generování geometrie

- balík vytvořený pro účely parametrického generování geometrie a následné voxelizace

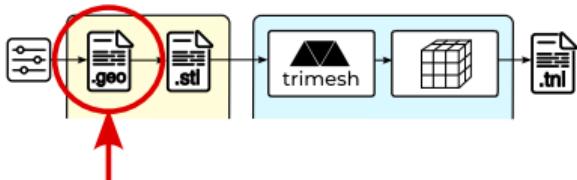


Generování geometrie - šablona

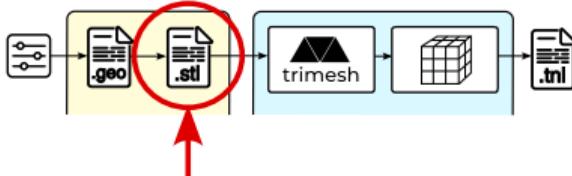
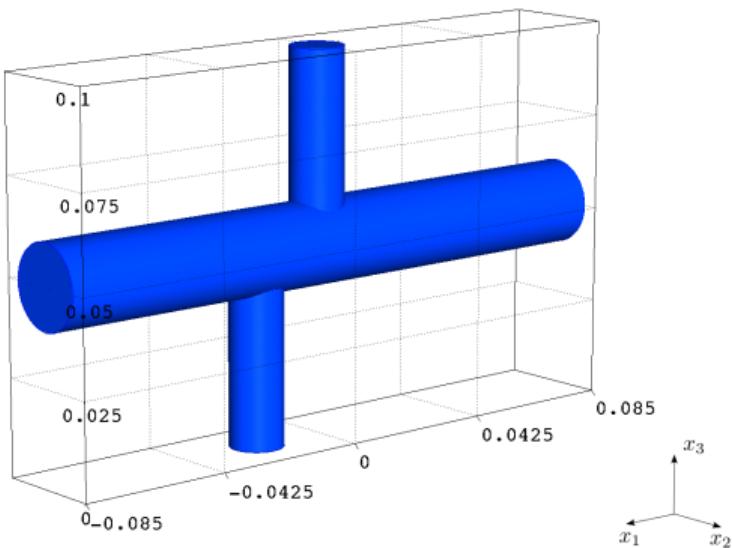
```

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}

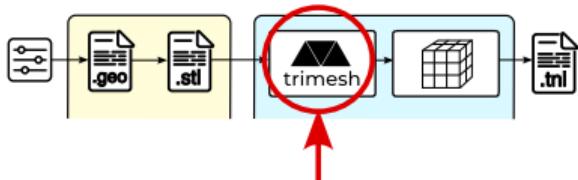
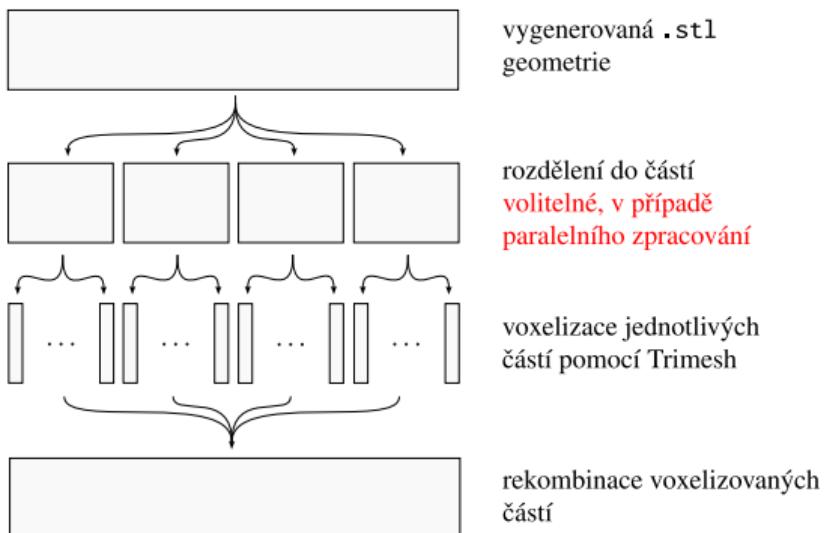
```



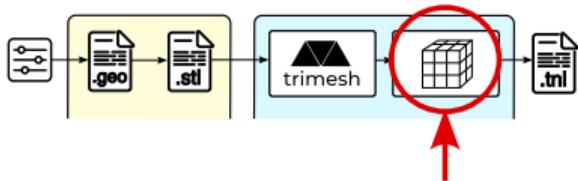
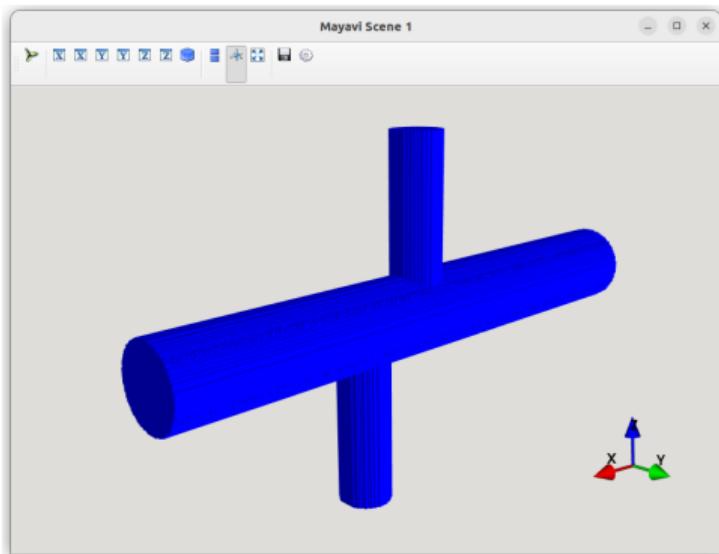
Generování geometrie - STL

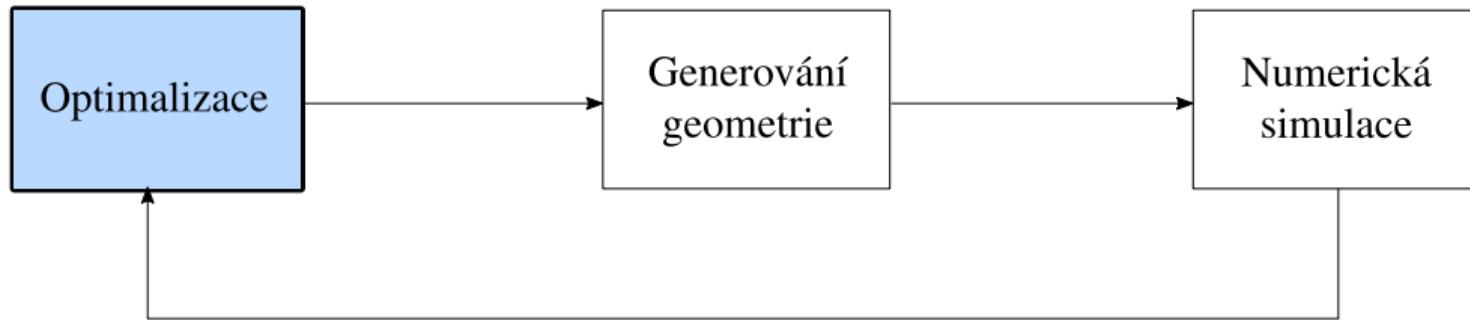


Generování geometrie - voxelizace



Generování geometrie - výsledek





Nelder-Mead / NOMAD

Optimalizace

- 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

Výsledky

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

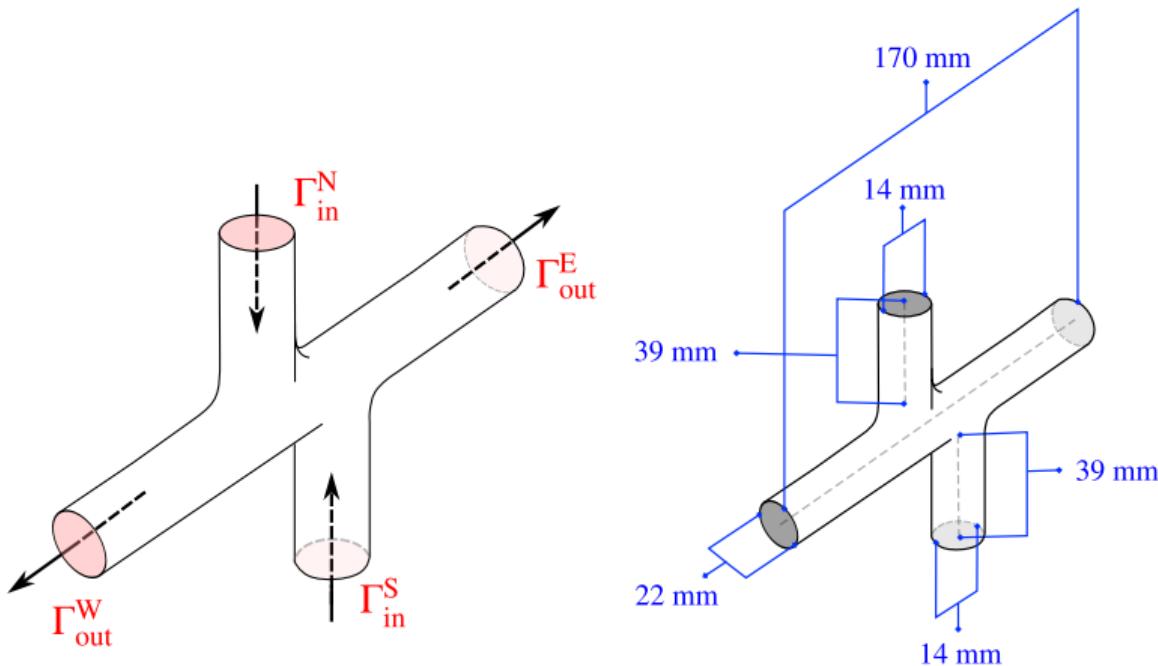
$$\mathbf{u}(x, y, z, t) = \overline{\mathbf{u}(x, y, z)} + \mathbf{u}'(x, y, z, t)$$

- Účelové funkce: turbulentní kinetická energie a smyková rychlosť

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

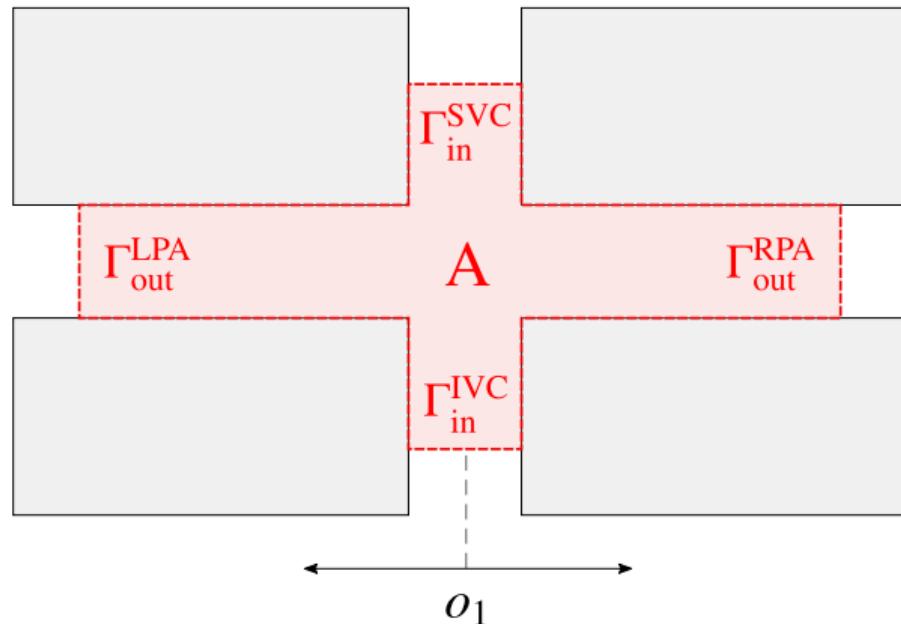
- Nestlačitelná newtonovská tekutina, 3D

1 parametr - posun IVC



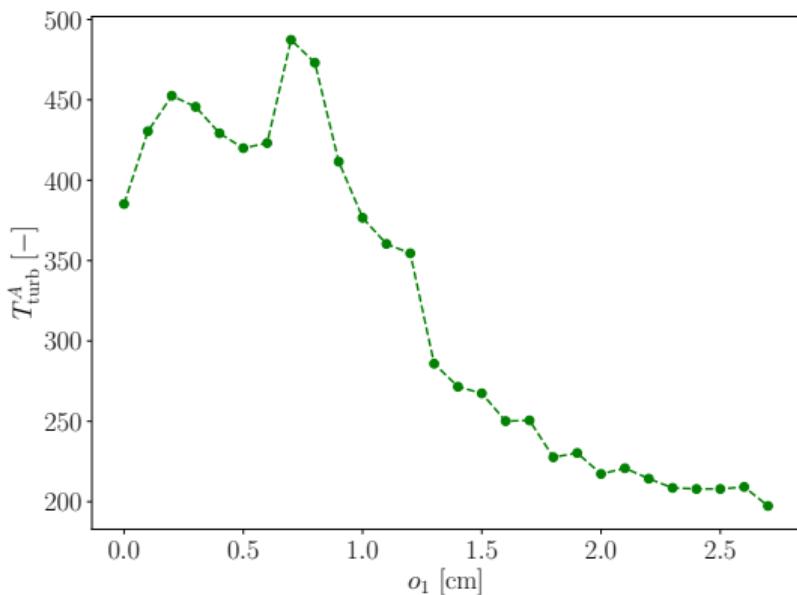
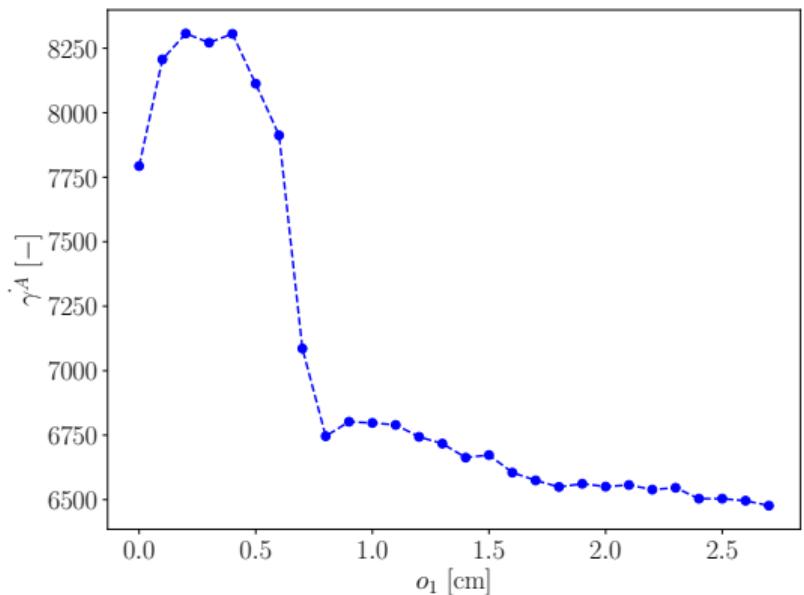
1 parametr - posun IVC

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



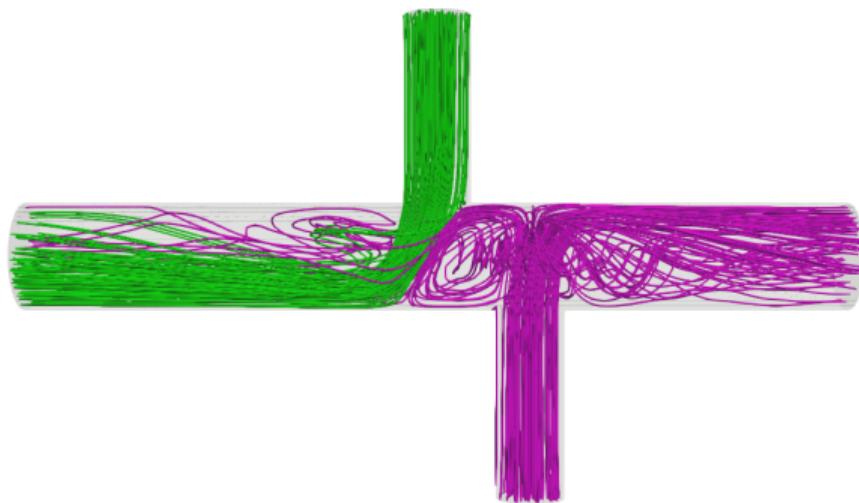
1 parametr - účelové funkce

- Hodnoty účelových funkcí v závislosti na posunu o_1 (pouze nezáporný posun)



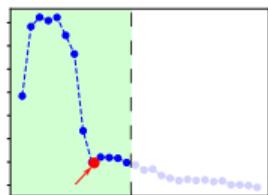
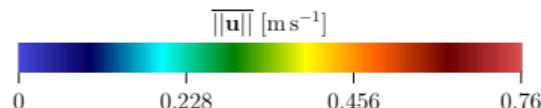
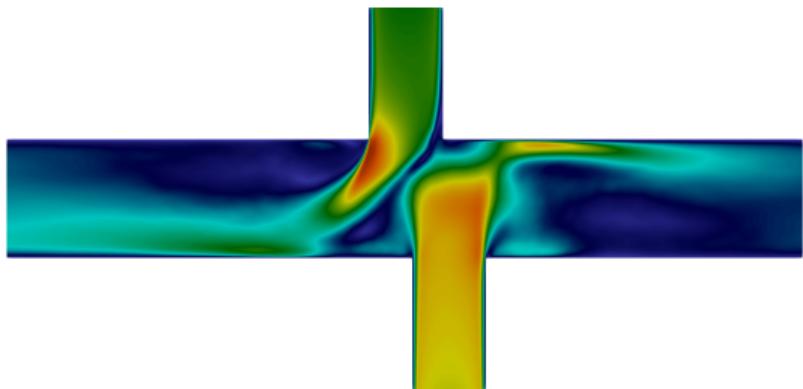
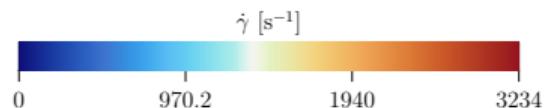
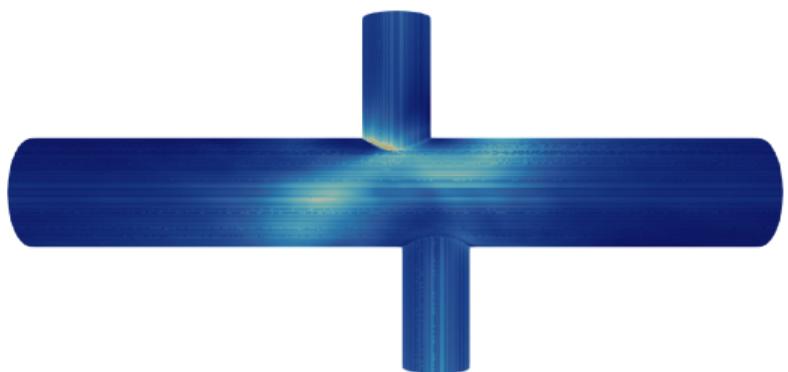
1 parametr

- Určení vazeb pro posun dle fyziologických požadavků \Rightarrow 0 cm až 1.2 cm

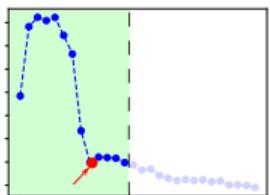
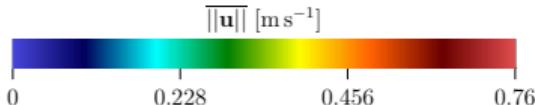
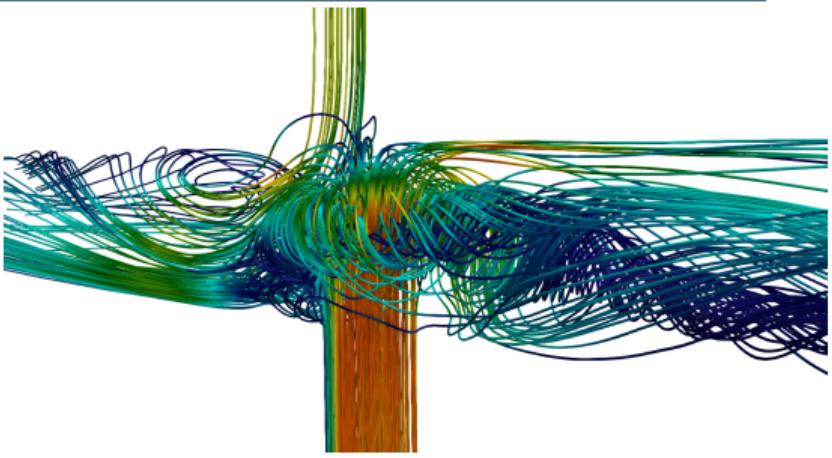
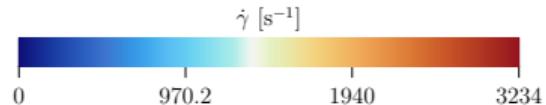
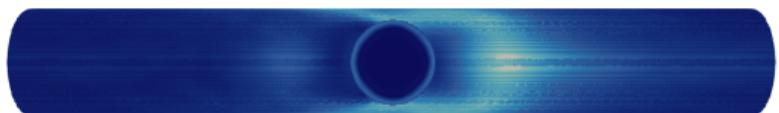


 SVC  IVC

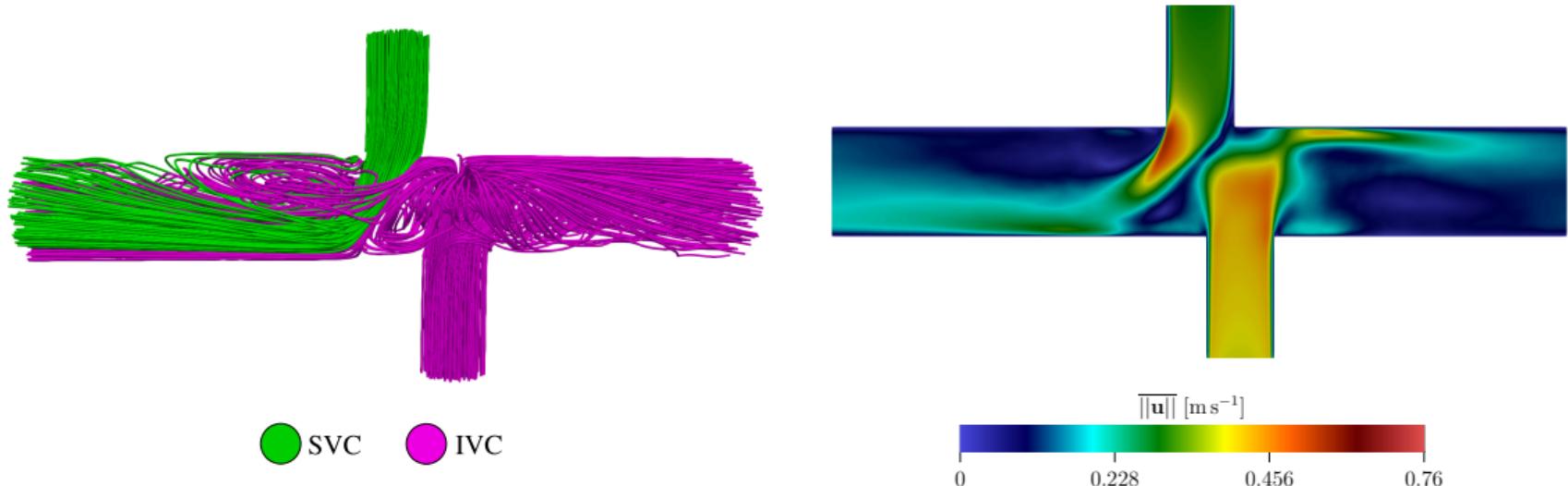
1 parametr - minimalizace smykové rychlosti



1 parametr - minimalizace smykové rychlosti



1 parametr - minimalizace TKE



- Vytvořen rámec pro generování a řešení netriviálních optimalizačních úloh s pomocí LBM
- Navrženy parametrické modely idealizovaného TCPC
- Plány do budoucna: otestování komplexnějšího modelu s více parametry "(DP), experimenty na MRI

Děkuji za pozornost!