

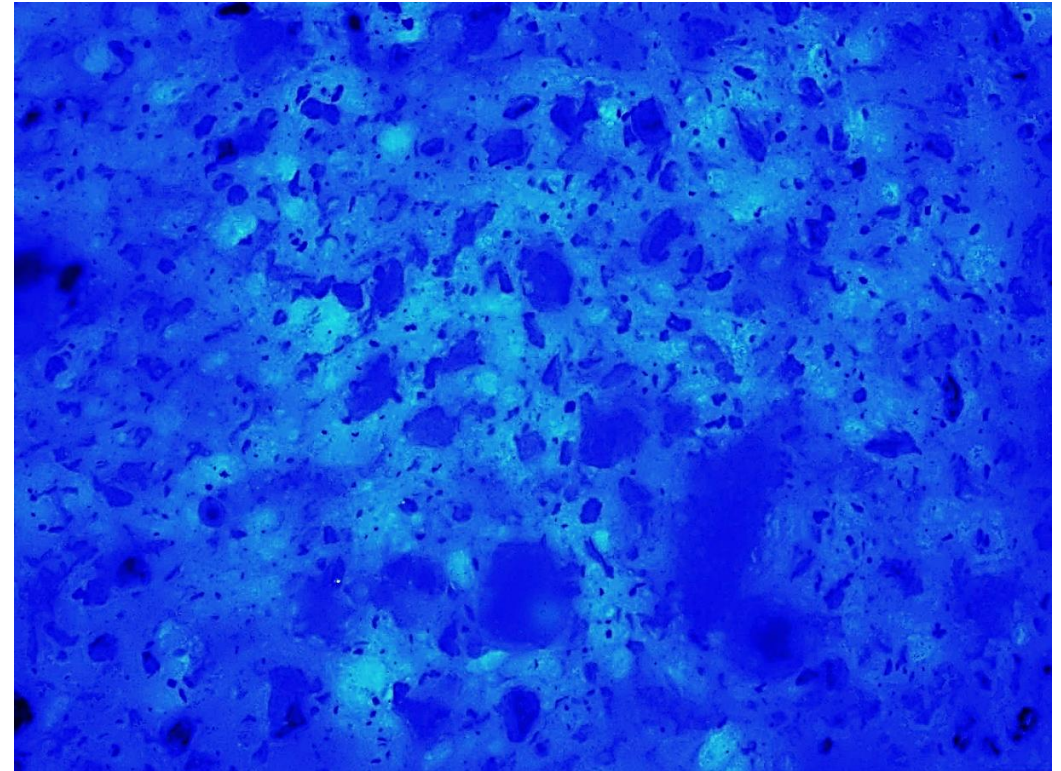
Matematický model magnetoelastického elastomeru

ING. ONDŘEJ SODOMKA

CIMRA RESEARCH GROUP

Magnetoreologický Elastomer (MRE)

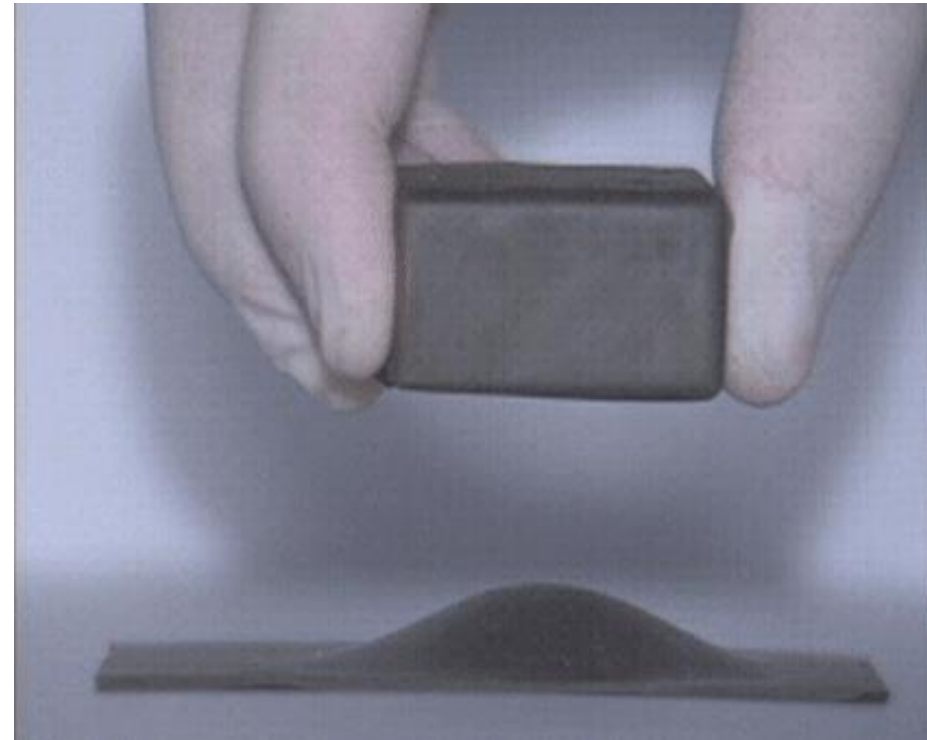
- MRE je elastomer s rozptýlenými částicemi železa ($\sim 27,2 \mu\text{m}$)
- Vykazuje výborné magnetické i elastické vlastnosti



Rozložení mikročástic ve vzorku

Studie magnetoreologických elastomerů (MRE)

- Identifikovat materiálové parametry
 - Magnetické vlastnosti
 - Mechanické vlastnosti
- Sdružit magneto-mechanickou úlohu
- Porozumět chování MRE



*Záznam z vysokorychlostní kamery
– zpomalený 16x*

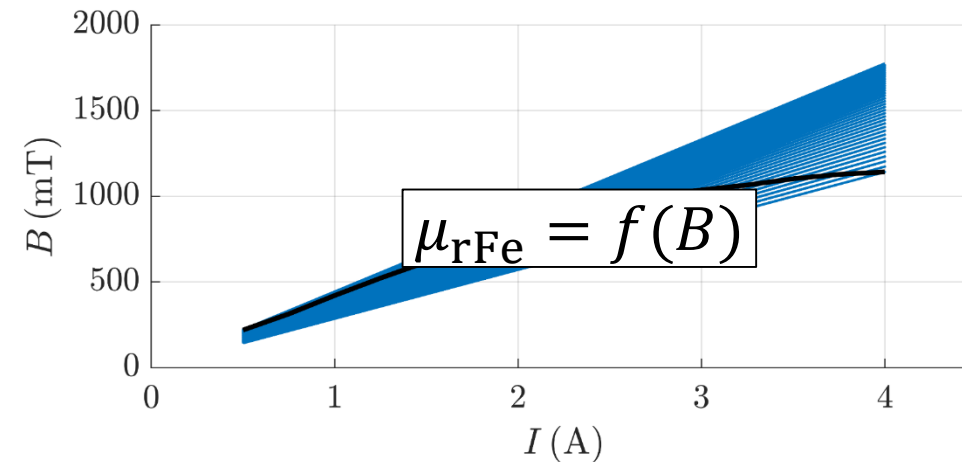
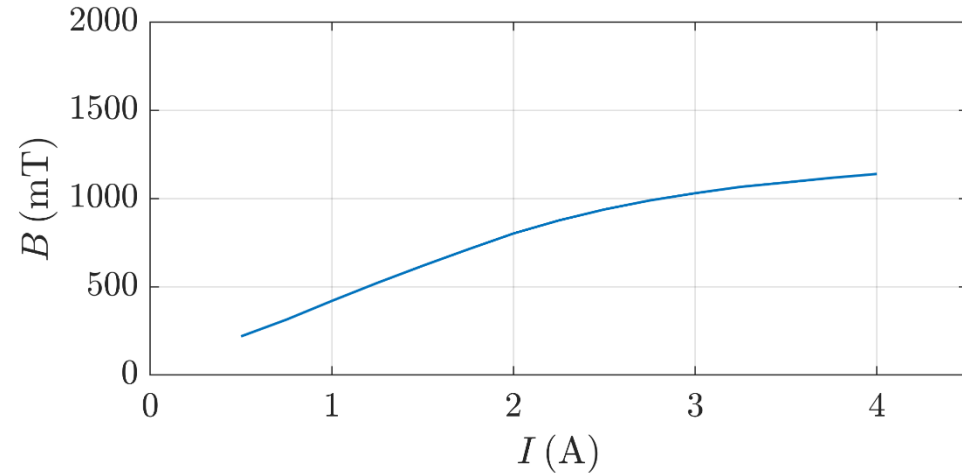
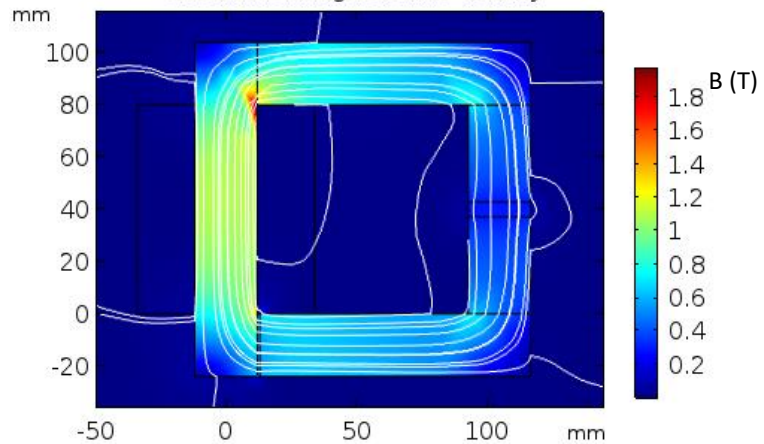
Magnetické vlastnosti MRE

Numerické určení permeability

1. Stanovení permeability železa měřícího obvodu



Surface: Magnetic flux density norm (T)
Streamline: Magnetic flux density

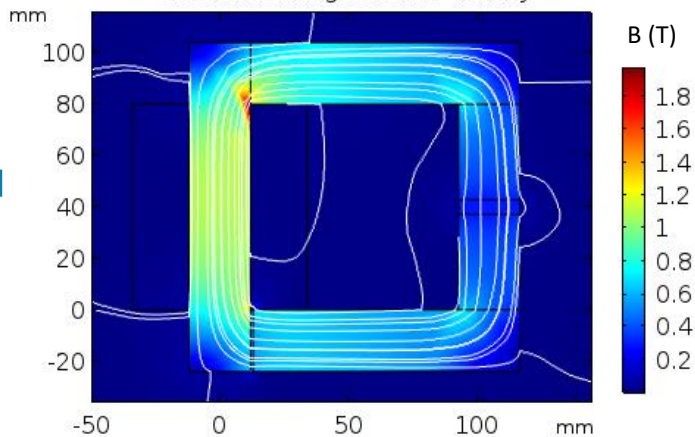
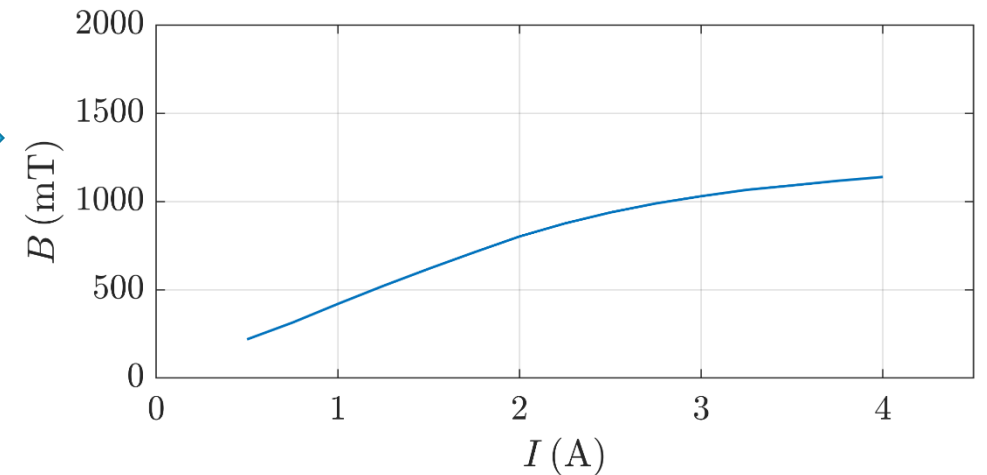


Numerické určení permeability

2. Stanovení permeability MRE



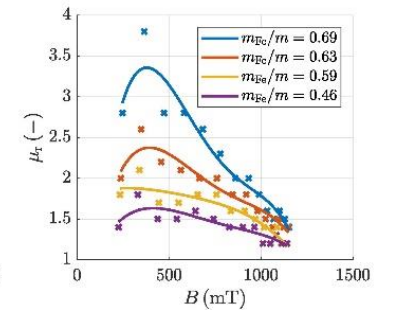
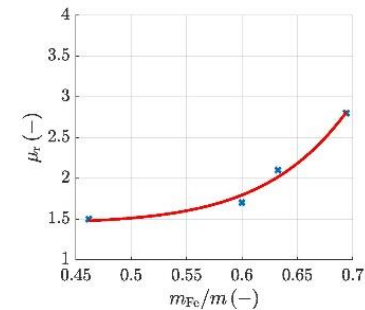
Změřená charakteristika se vzorkem MRE



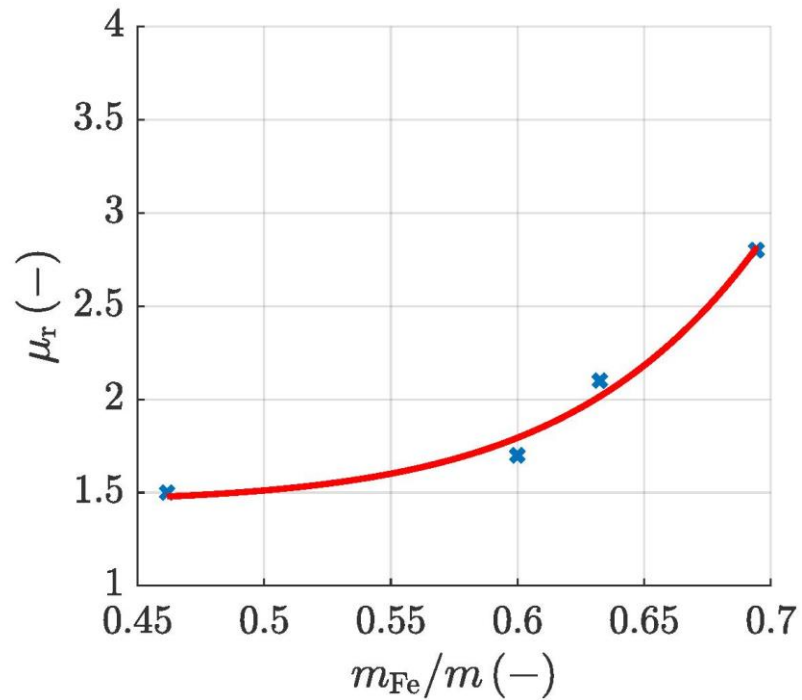
Konfrontace s měřením



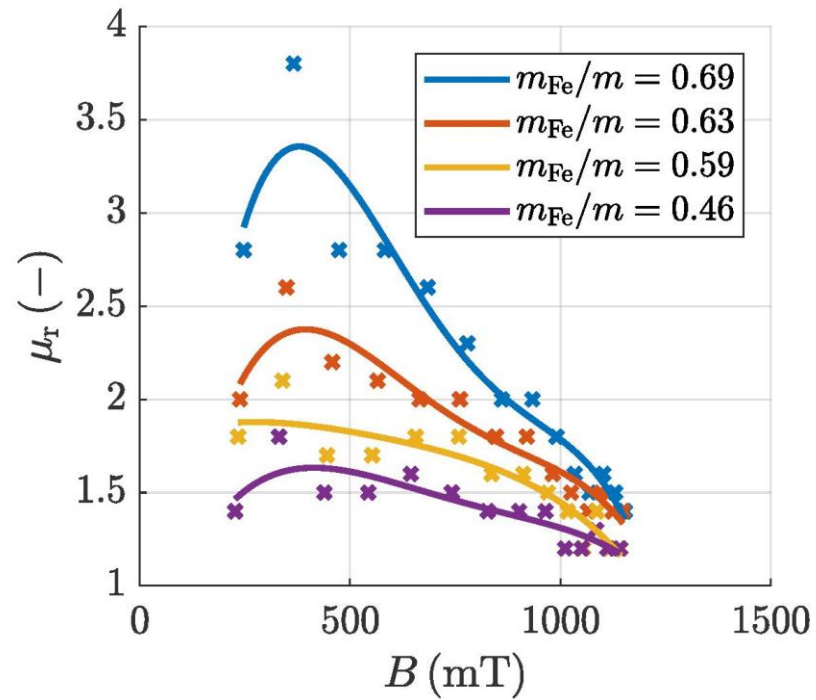
$$\mu_{rFe} = f(B)$$



Numerické určení permeability



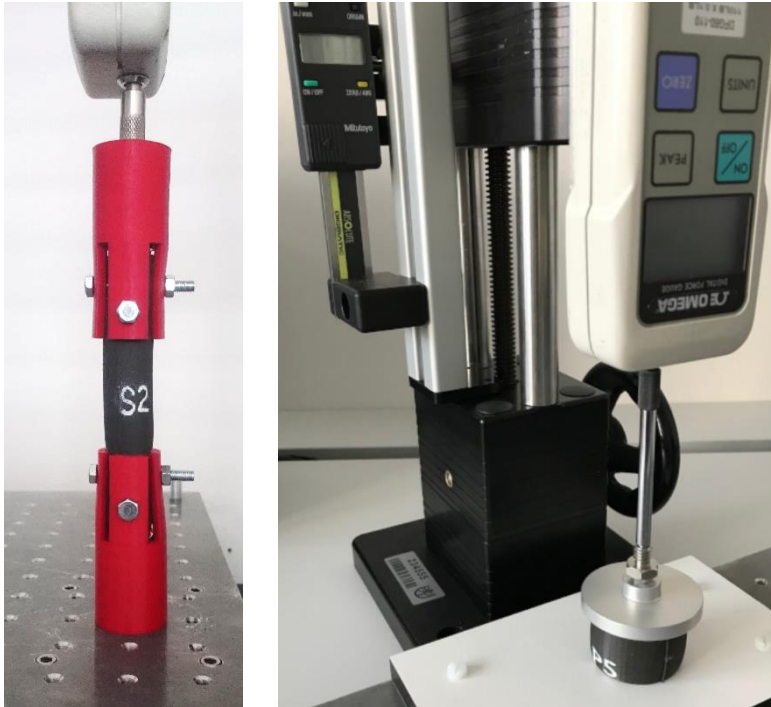
*Růst relativní permeability
s koeficientem plnění*



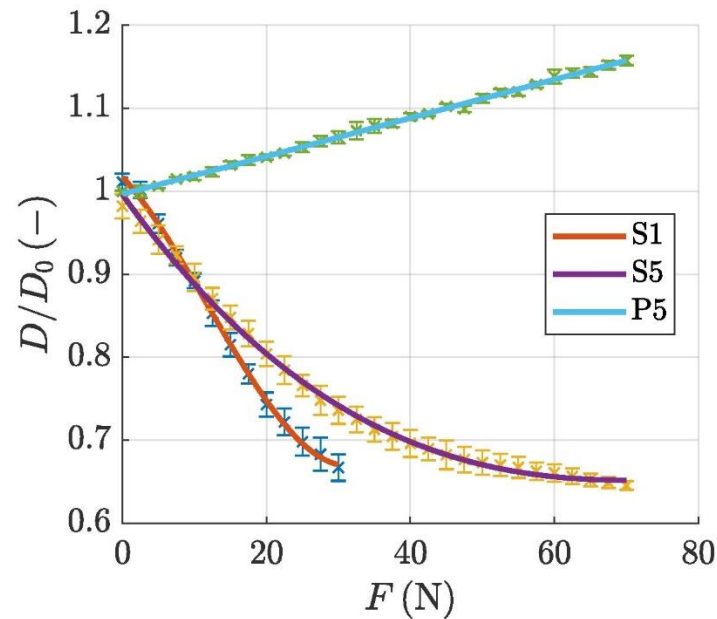
*Změna relativní permeability
s magnetickou indukcí*

Mechanické vlastnosti MRE

Měření v tahu a tlaku

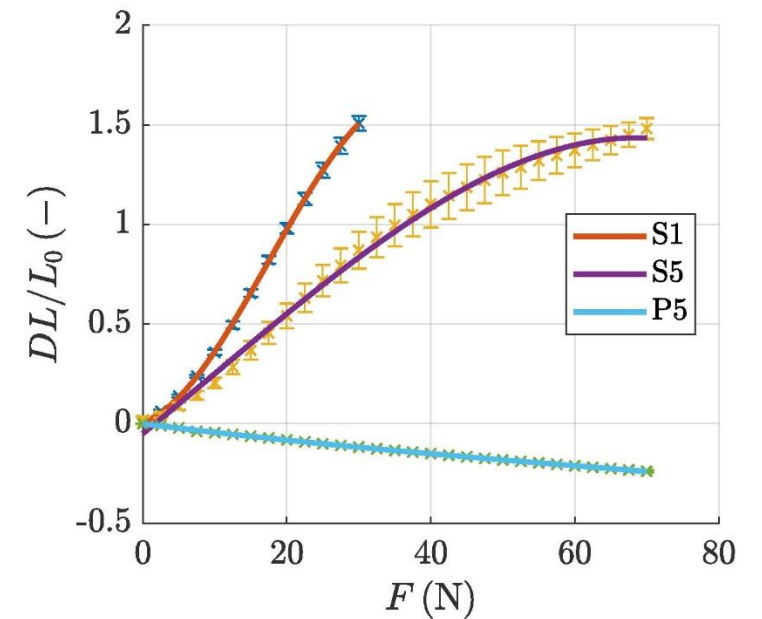


*Způsob uchycení vzorku
při měření v tahu a tlaku*



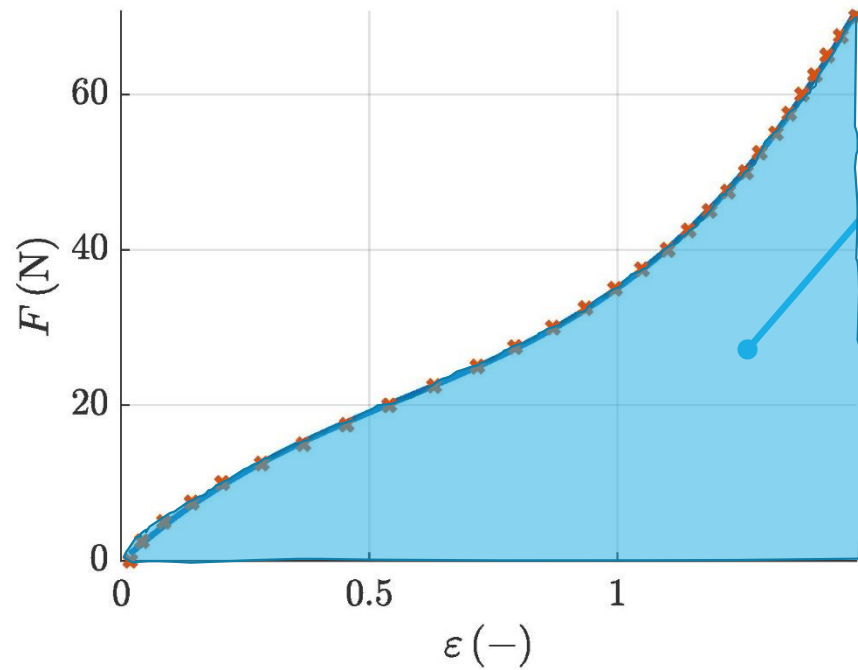
Poměrný průměr vzorku

S1 = natahování vzorku z čistého silikonu; S5 = natahování vzorku MRE; P5 = stlačování MRE vzorku



Poměrné prodloužení vzorku

Tahové údaje a jejich citlivost



$$W_S = f(\sigma, \epsilon)$$

- Lamého rovnice a respektování daného charakteru

$$\nabla \cdot (\mathbf{I} + \nabla \mathbf{u}) \otimes \mathbf{S} + \mathbf{f}_V = 0, \quad \mathbf{S} = \frac{\partial W_S}{\partial \boldsymbol{\epsilon}}, \quad \boldsymbol{\epsilon} = \frac{1}{2} (\mathbf{F}^T \mathbf{F})$$

- Yeoh hyperelastický model [1]

$$W_S = c_1 (\bar{I}_1 - 3) + c_2 (\bar{I}_1 - 3)^2 + c_3 (\bar{I}_1 - 3)^3$$

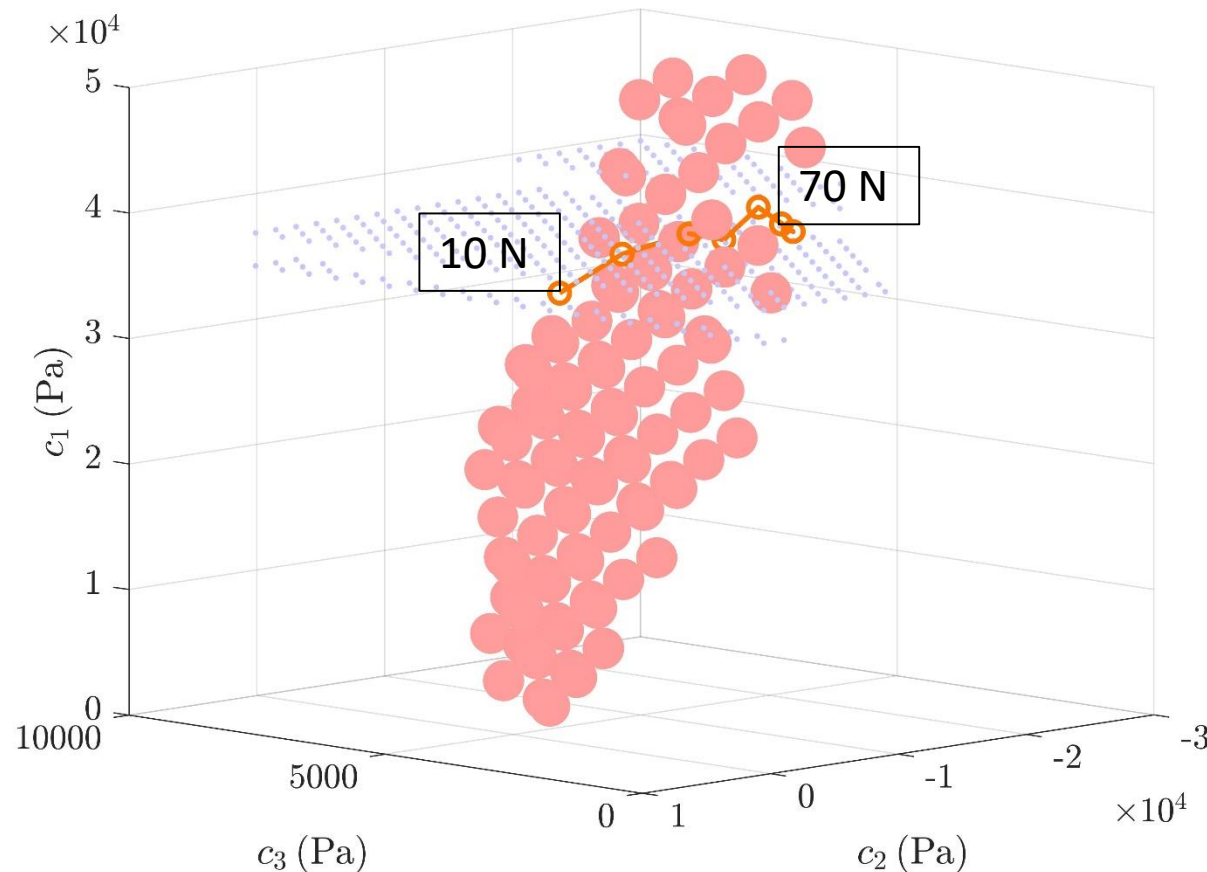
$$c_1 = ?$$

$$c_2 = ?$$

$$c_3 = ?$$

Hyperelasticita

Stanovení koeficientů modelu Yeoh



Každý bod reprezentuje jedno řešení modelu pro danou variaci koeficientů.

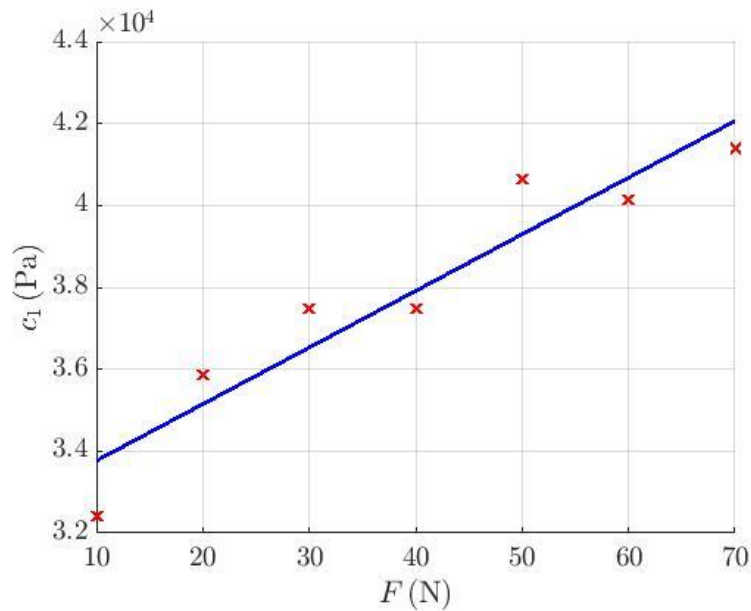
Červené body odpovídají kladnému protažení. Modré odpovídají zápornému protažení (stlačení). Sytost barvy a velikost bodu je úměrná deformaci.

Průnik množiny tahu a množiny tlaku (záporná síla) s naměřenou deformací odpovídá množině koeficientů se silovým působením 30 N.

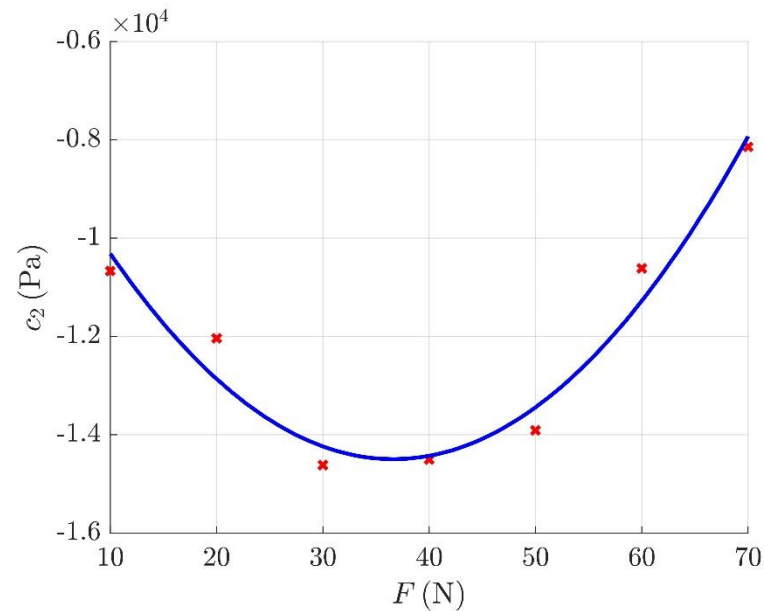
Proložení lokálních optim odpovídajících silovému působení od 10 do 70 N.

Hyperelasticita

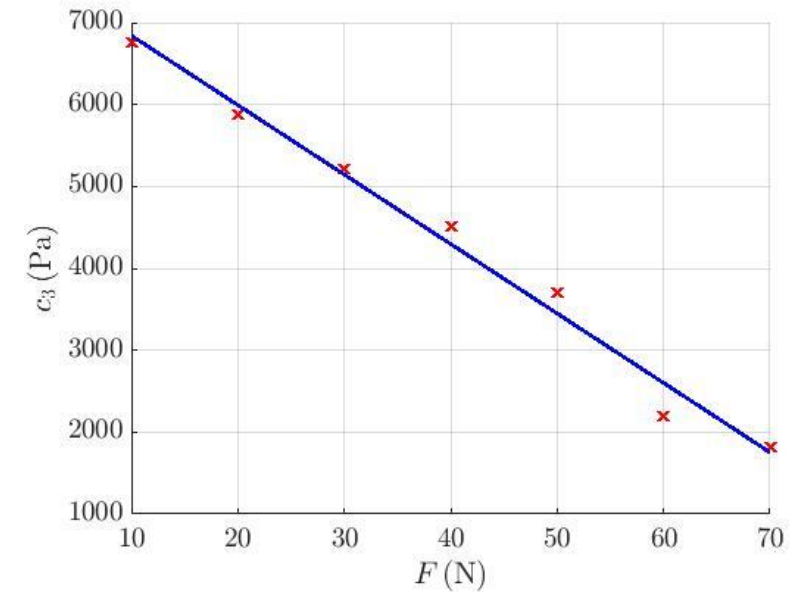
Stanovení koeficientů modelu Yeoh



*Aproximace závislosti na síle
koeficientu c_1*



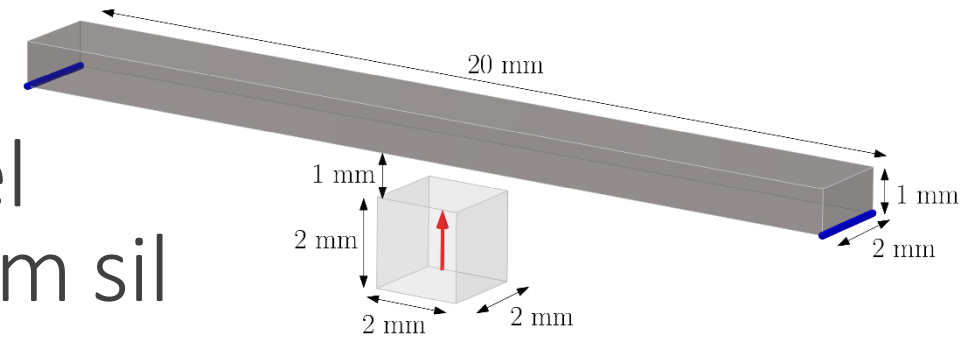
*Aproximace závislosti na síle
koeficientu c_2*



*Aproximace závislosti na síle
koeficientu c_3*

Model magneto-hyperelasticity

Matematický model s objemovým rozložením sil



Magnetické pole: $\nabla \times (\mu(|\mathbf{B}|)^{-1}(\nabla \times \mathbf{A} - \mathbf{B}_r)) = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A},$

Step 1:

$$\boldsymbol{\sigma}_M = -\frac{1}{2\mu}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{B})\mathbf{I} + \frac{1}{\mu}\mathbf{B} \otimes \mathbf{B},$$

$$F_M = \int_S \boldsymbol{\sigma}_M \mathbf{dS}$$

Fm_x	0.0010
Fm_y	0.0026
Fm_z	-1.5551

Step 2:

$$\mathbf{F}_1(\mathbf{B}) = -F_M \frac{\mathbf{B}}{B_{\text{max}}}, \quad \mathbf{f}_{V1} = -\frac{F_M}{V} \frac{\mathbf{B}}{B_{\text{max}}},$$

$$F_{Z1} = \int_V \mathbf{f}_{V1} \mathbf{dV}$$

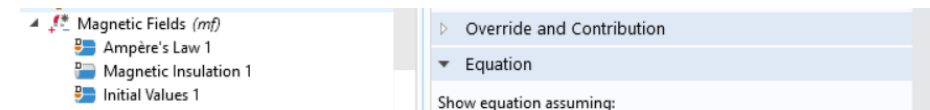
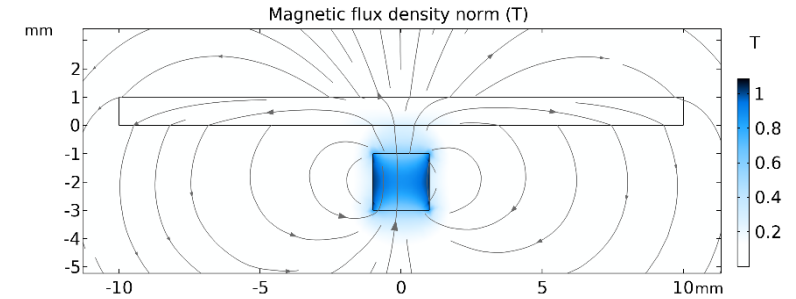
Fz1_x	-6.482 E-6
Fz1_y	2.656 E-7
Fz1_z	-0.0884

Step 3:

$$\mathbf{F}_2(\mathbf{B}) = -\frac{F_M}{F_{Z1}} \mathbf{F}_1(\mathbf{B}), \quad \mathbf{f}_{V2} = -\frac{F_M}{F_{Z1}} \frac{\mathbf{B}}{V} \frac{F_M}{B_{\text{max}}},$$

$$F_{Z2} = \int_V \mathbf{f}_{V2} \mathbf{dV}$$

Fz2_x	-1.140 E-4
Fz2_y	4.671 E-6
Fz2_z	-1.5551



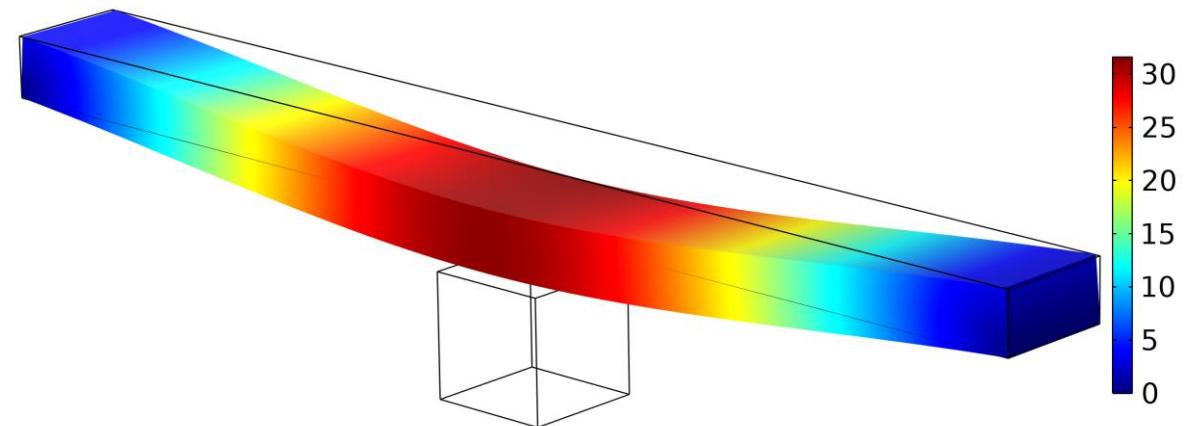
Surface: Displacement magnitude (mm)

Mechanika:

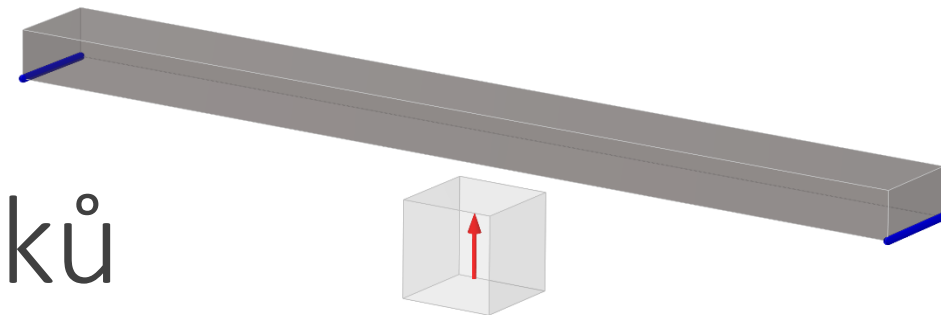
$$\nabla \cdot (\mathbf{I} + \nabla \mathbf{u}) \otimes \mathbf{S} + \mathbf{f}_{V1}(\mathbf{v}_2) = 0$$

$$\mathbf{S} = \frac{\partial W_S}{\partial \boldsymbol{\epsilon}}, \quad \boldsymbol{\epsilon} = \frac{1}{2}(\mathbf{F}^T \mathbf{F})$$

$$W_S = c_1(I_1 - 3) + c_2(I_1 - 3)^2 + c_3(I_1 - 3)^3 + \frac{1}{2}\kappa(J - 1)^2$$

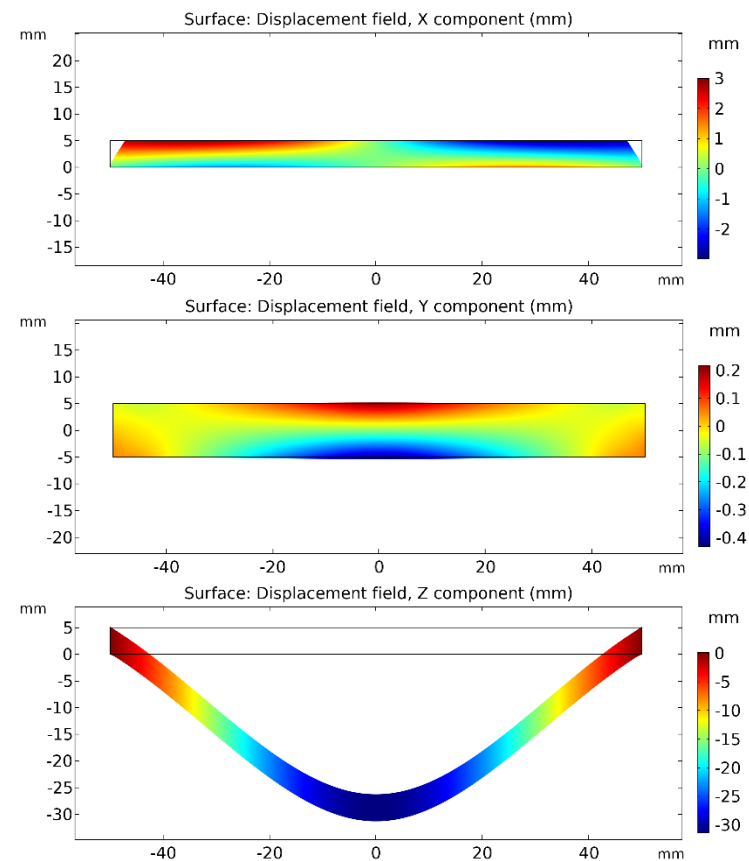
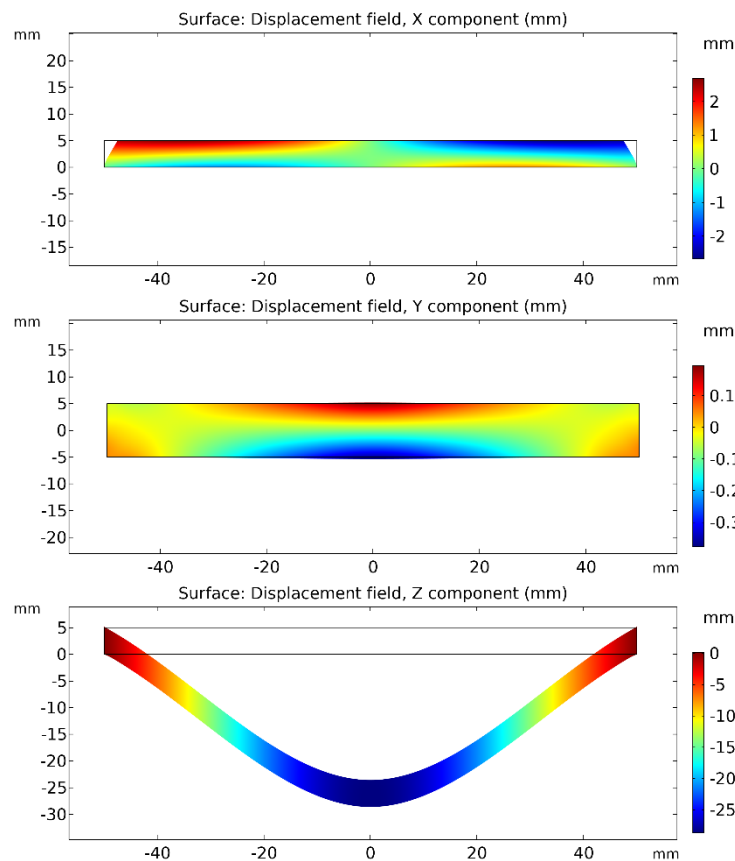


Porovnání výsledků



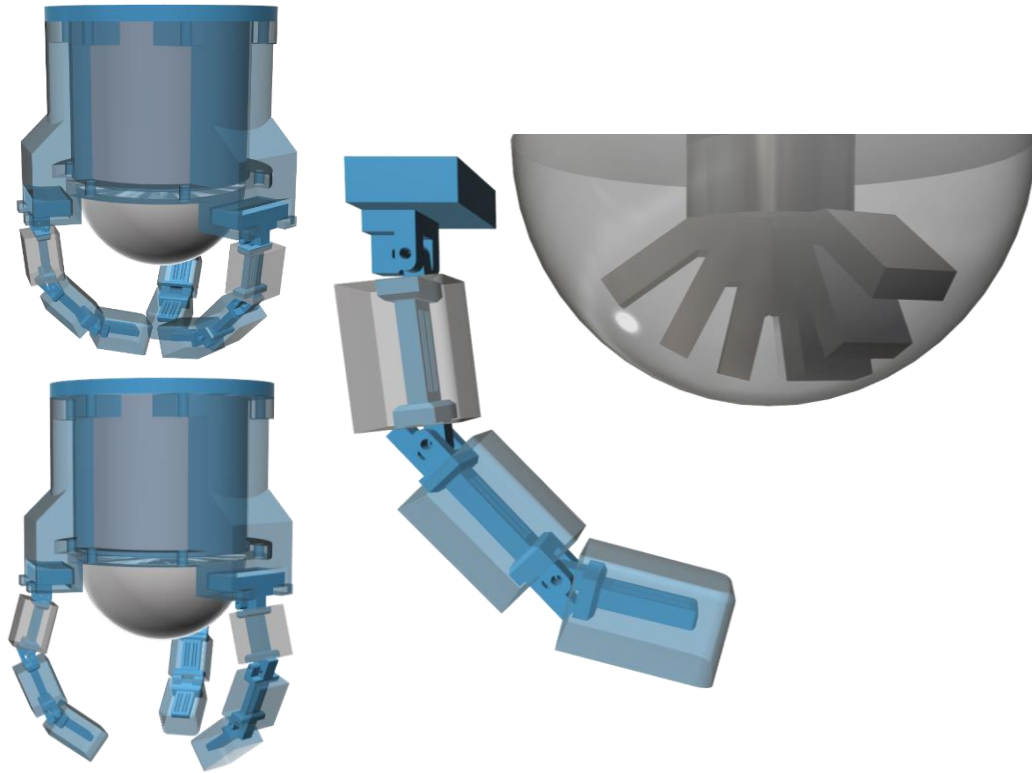
Maxwellův tenzor

Objemové rozložení sil

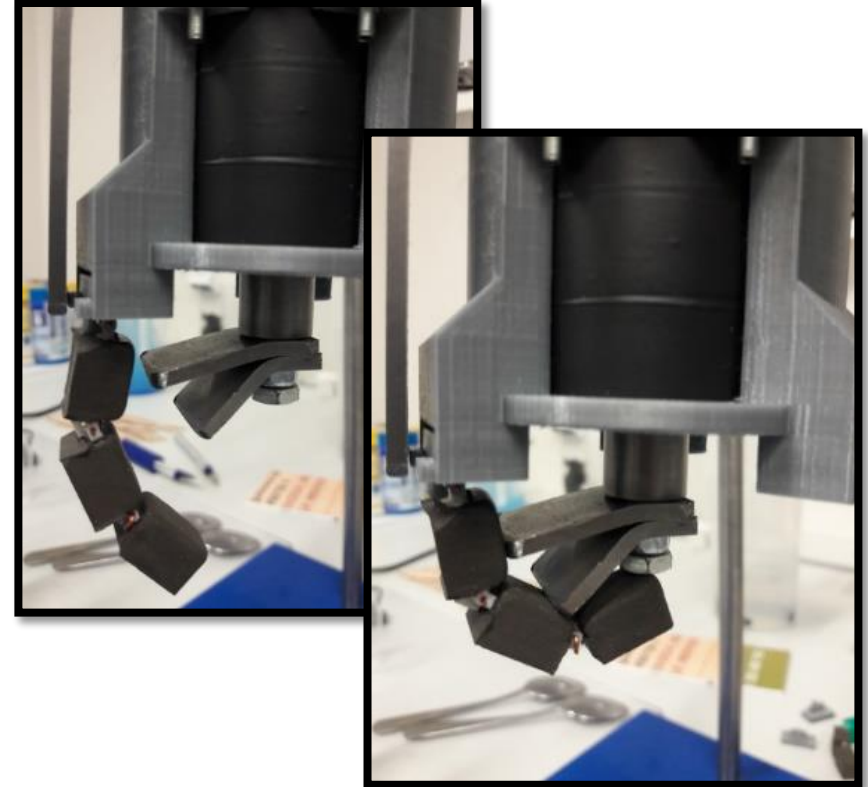


Aplikace MRE

Manus

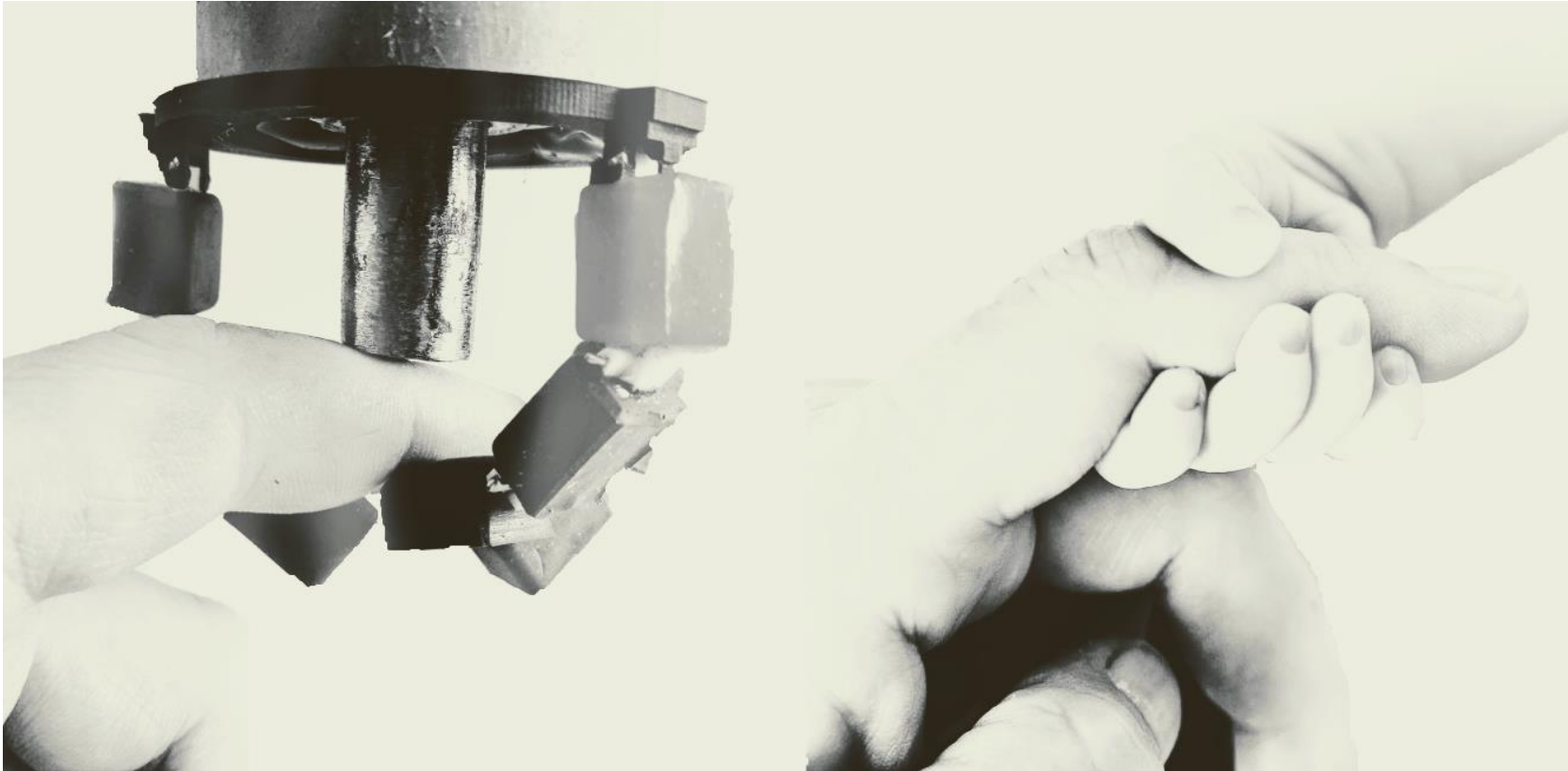


3D model

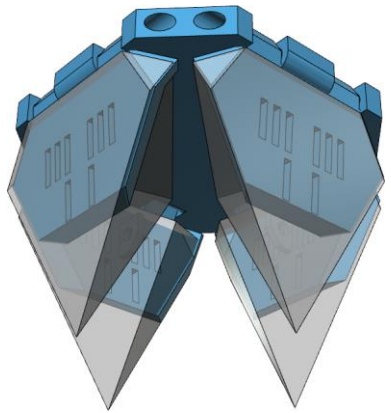


Prototyp Manus

Manus



Beak



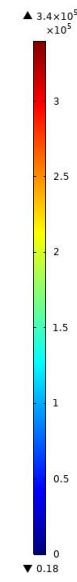
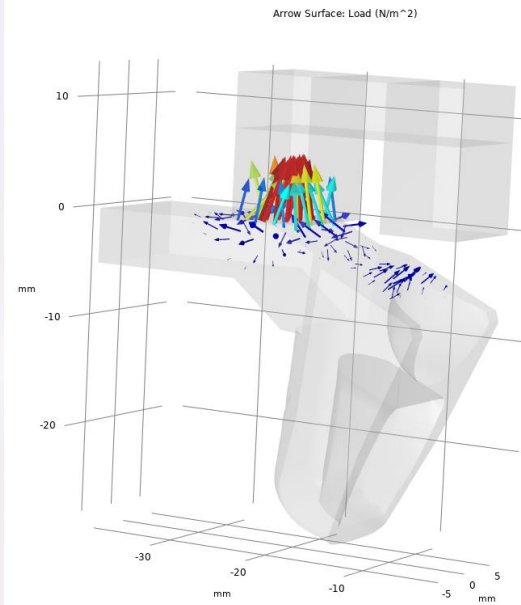
Beak 0.001



Beak 5.0

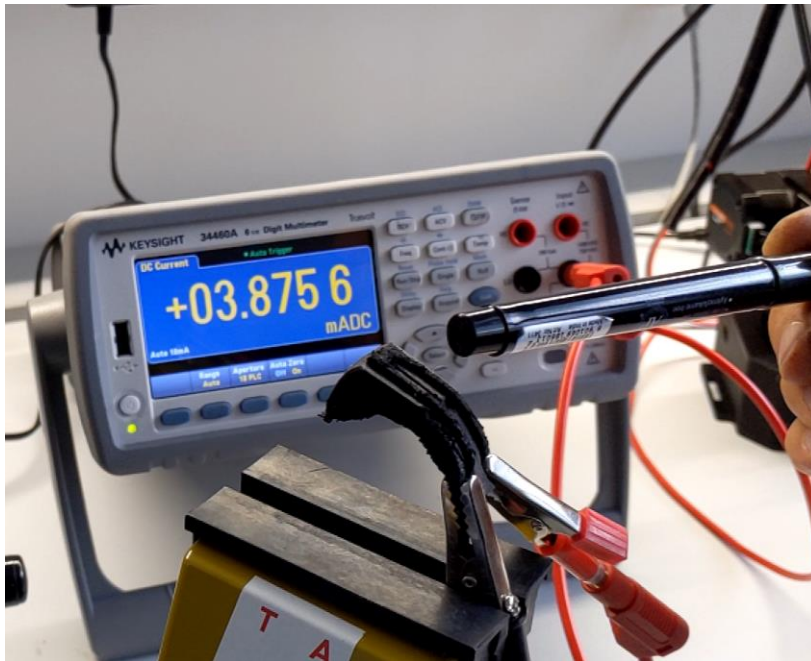


Upevnění k μ ARM



Beak 7.0

Elektricky vodivé elastomery

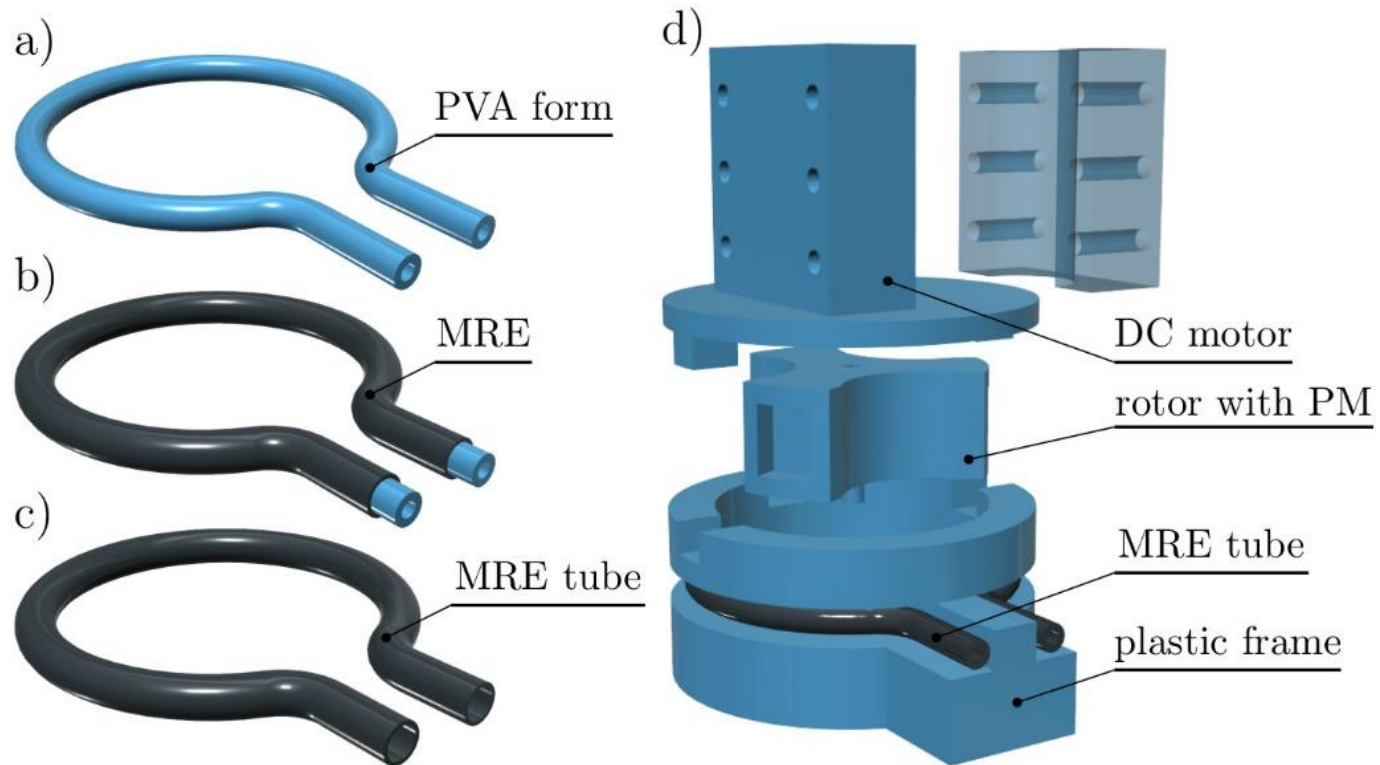


Registrace deformací

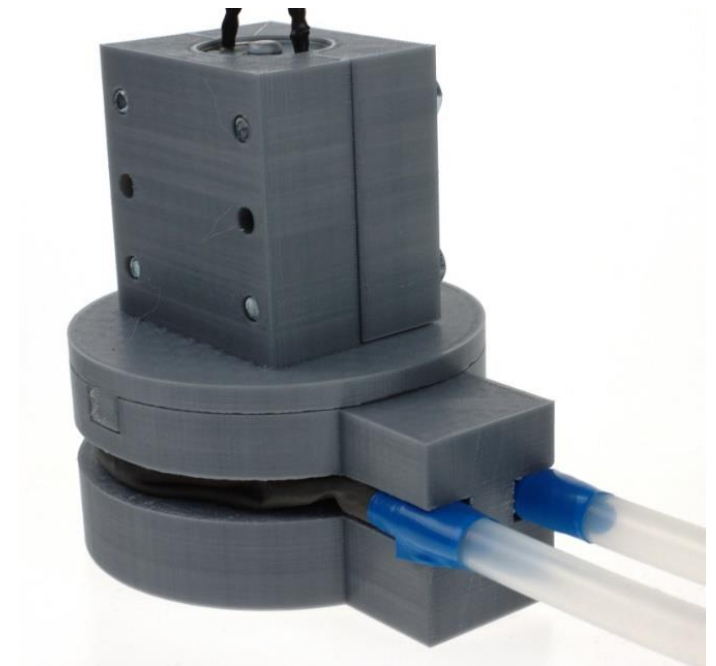


Maximalizace vodivosti

Intestino

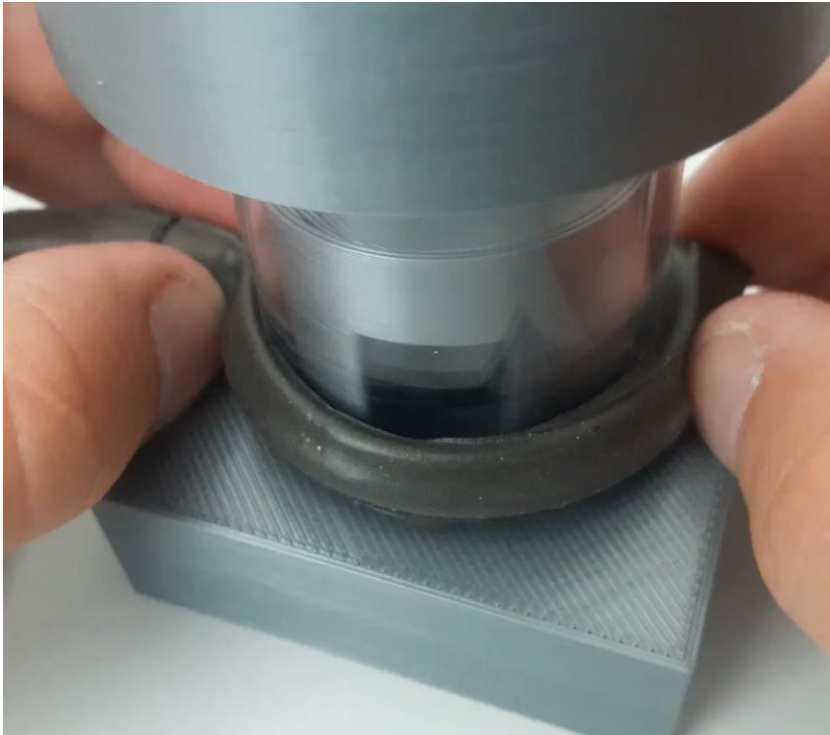


Složení prototypu

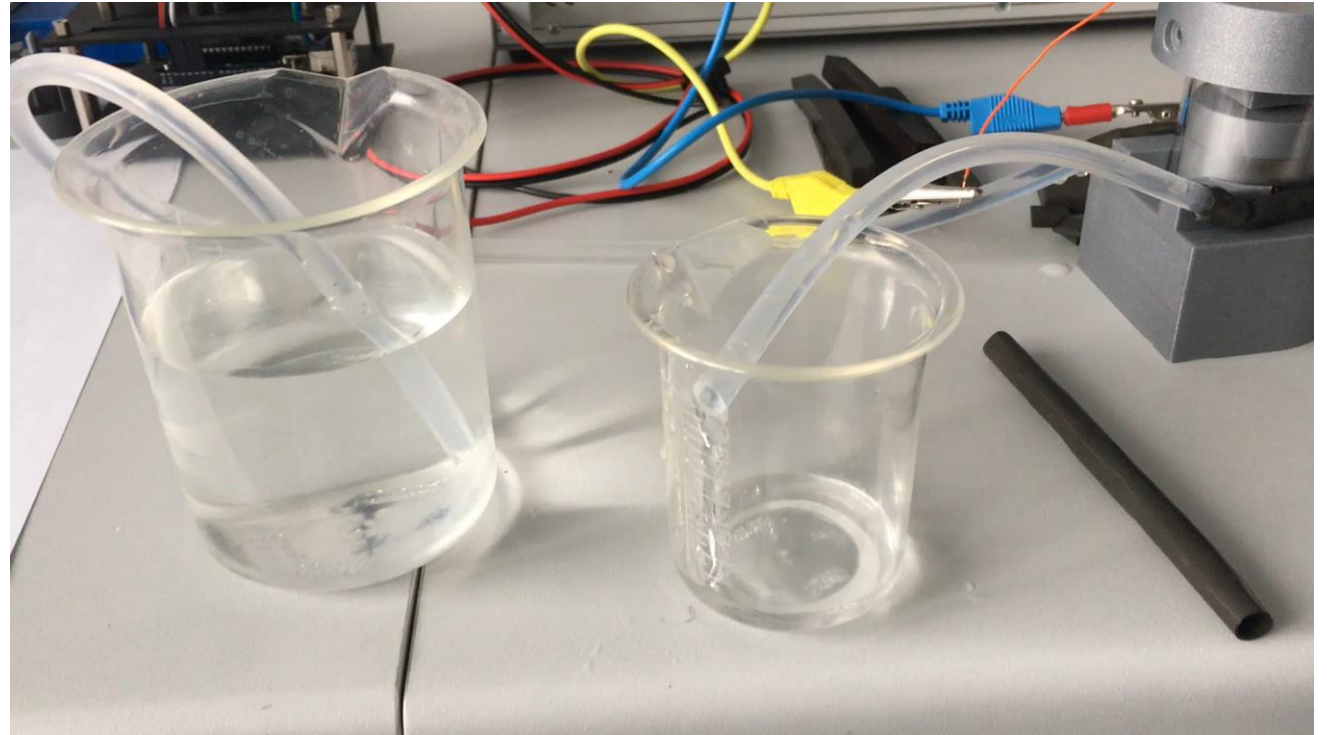


Prototyp Intestino

Intestino

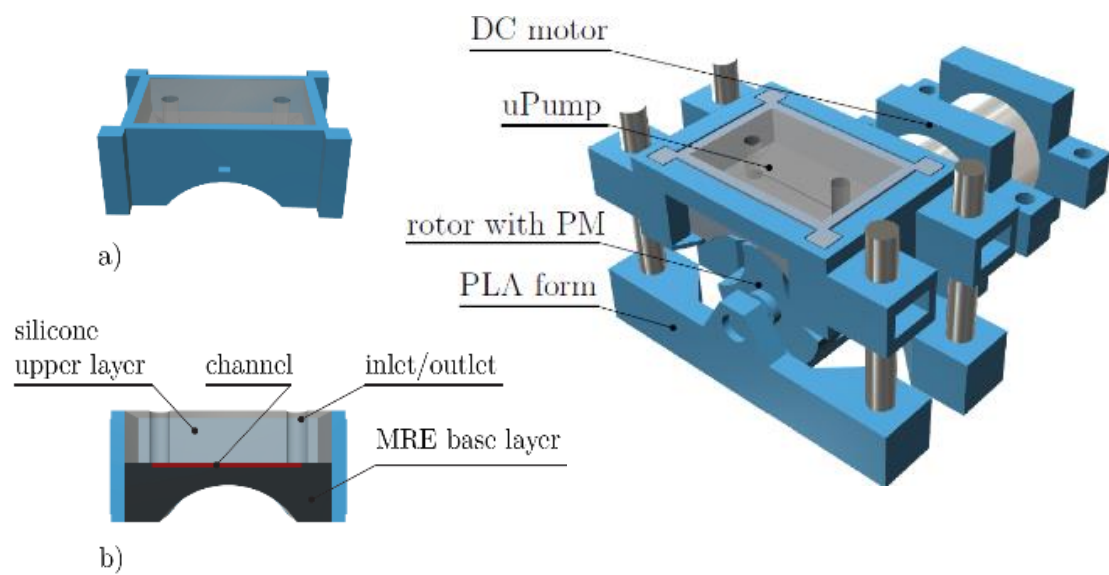


Detail peristaltického efektu

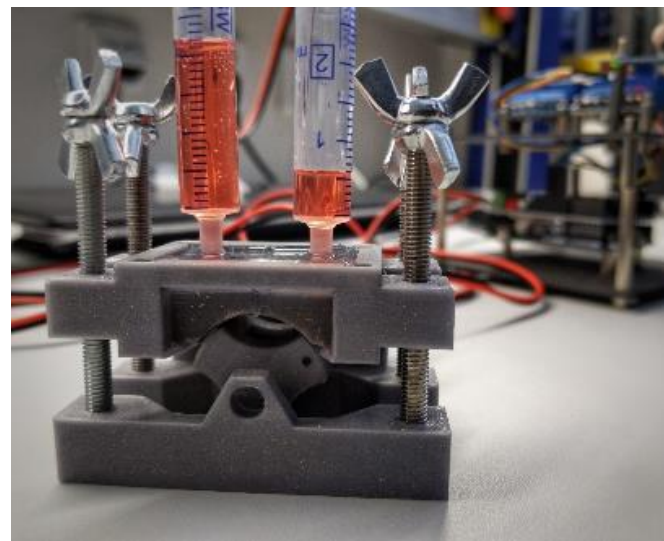


První experimenty

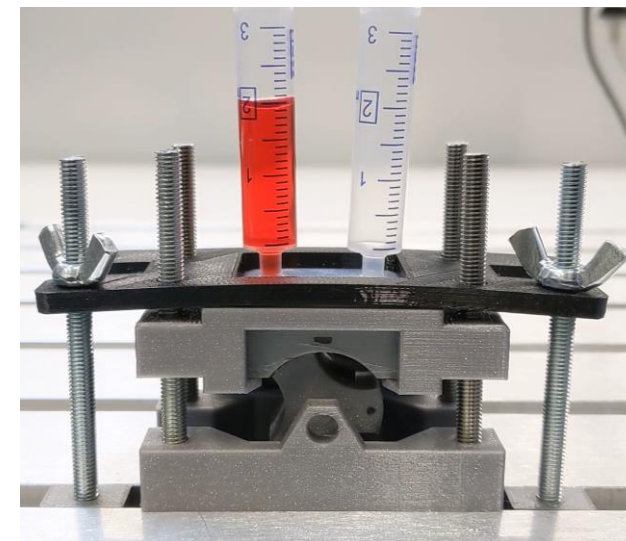
Mikro Intestino



Složení prototypu

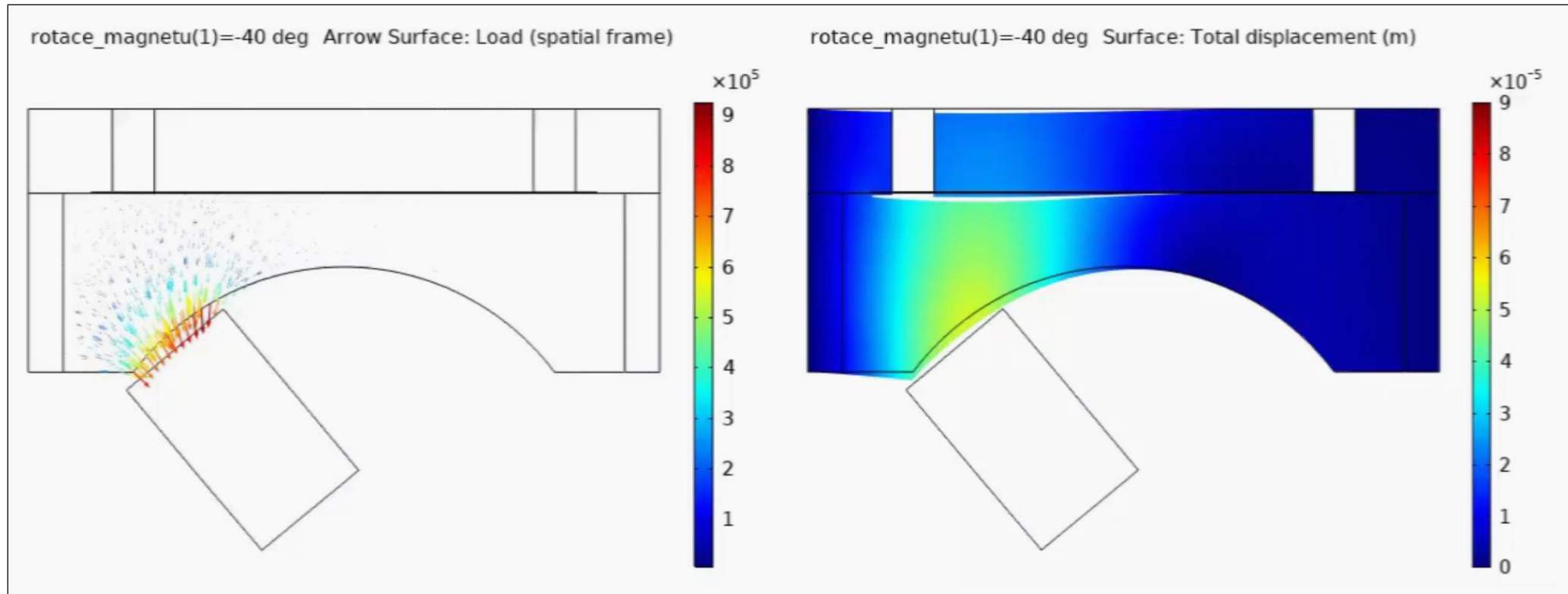


Prototyp μ Intestino



Experiment

Mikro Intestino



Rozložení objemových sil v doméně MRE.

Deformace celého silikonového kompozitu.

CIMRA

cimra.fel.zcu.cz/MRE.html