

# Numerické simulace při návrhu tokamaku COMPASS-Upgrade

P. Bartoň<sup>1,2</sup>, J. Varju<sup>1</sup>, J. Převrátíl<sup>1</sup>, J. Havlíček<sup>1</sup>  
a tým COMPASS-U

1) Ústav fyziky plazmatu, Akademie věd České Republiky, Praha

2) Matematicko-fyzikální Fakulta, Karlova Univerzita, Praha

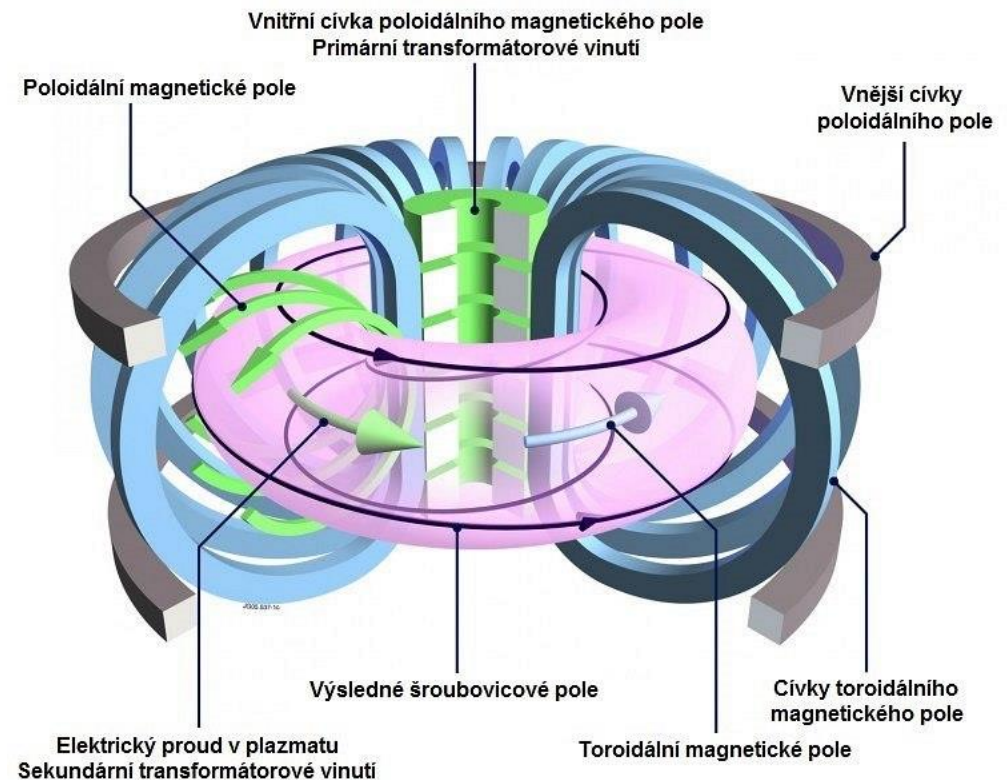


EUROPEAN UNION  
European Structural and Investment Funds  
Operational Programme Research,  
Development and Education



- Úvod do teorie Tokamaku
- Představení projektu COMPASS-U
- Ukázky použití COMSOLu na ÚFP
- Model vyhřívání komory

- Zařízení pro výzkum termojaderné fúze (slučování jader izotopů vodíku).
- Tokamak je schopný
  - udržet plazma v magnetickém poli a
  - zahřát ho na teplotu potřebnou k dosažení termojaderné fúze.
- Magnetické pole generují cívky tří skupin
  - toroidálního pole
  - poloidálního pole
  - ohmického ohřevu
- Reakce probíhá v čistém prostředí UHV vakuové komory



Obr. 1.: Ilustrace magnetických polí tokamaku [[doi:10.1155/2014/940965](https://doi.org/10.1155/2014/940965)]

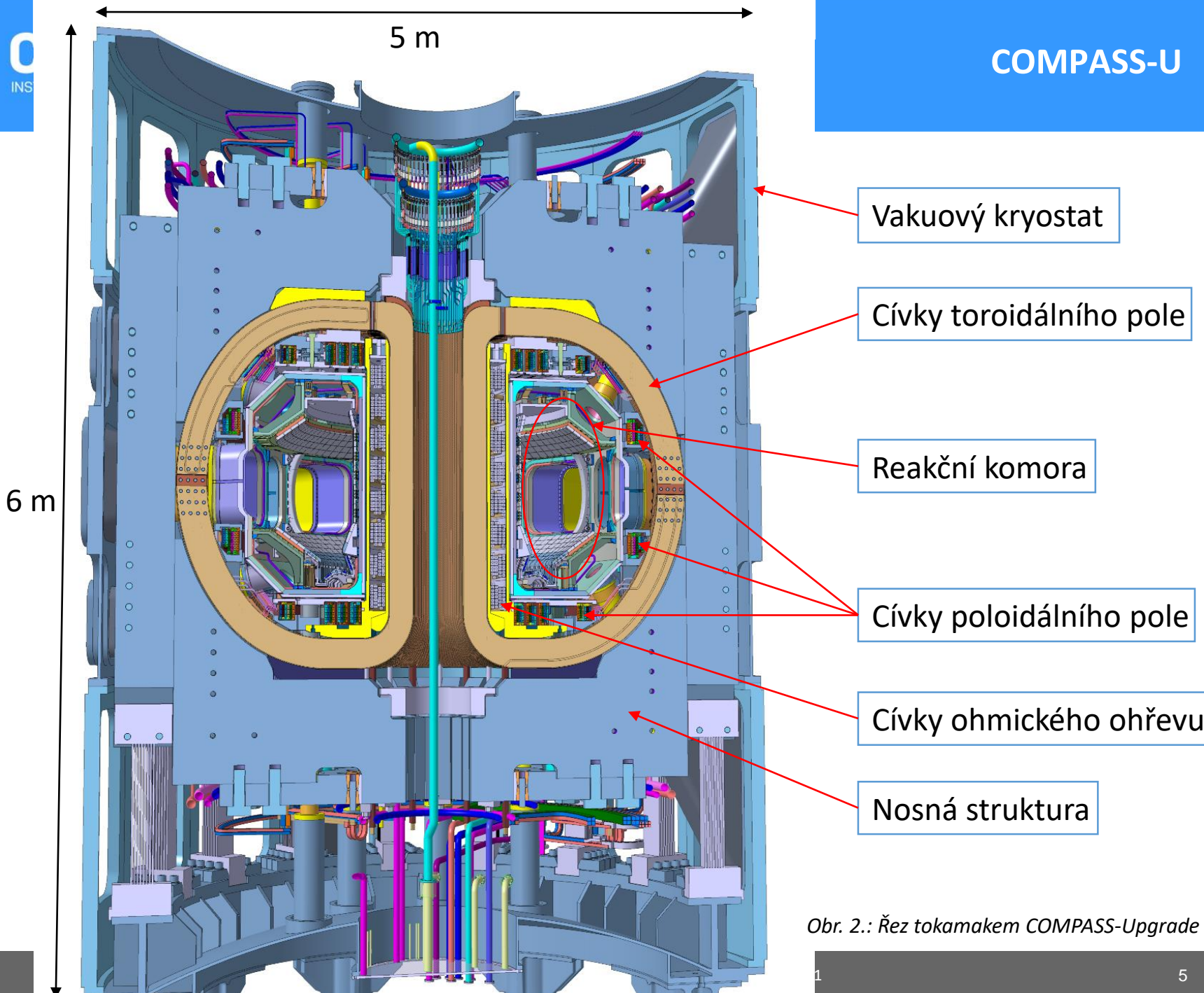
- COMPASS-U je nový tokamak ve výstavbě na Ústavu fyziky plazmatu AV ČR

- Unikátní parametry

- Torodiální magnetické pole  $B_t = 5 \text{ T}$
- Proud plazmatu  $I_p = 2 \text{ MA}$
- Doba trvání pulzu  $t_{\text{flat}} = 3 \text{ s}$
  
- Velký poloměr toroidu  $R = 89.5 \text{ cm}$
- Malý poloměr toroidu  $a = 27 \text{ cm}$
  
- Teplota vakuové komory  $T_{\text{vessel}} = 500 \text{ }^\circ\text{C}$

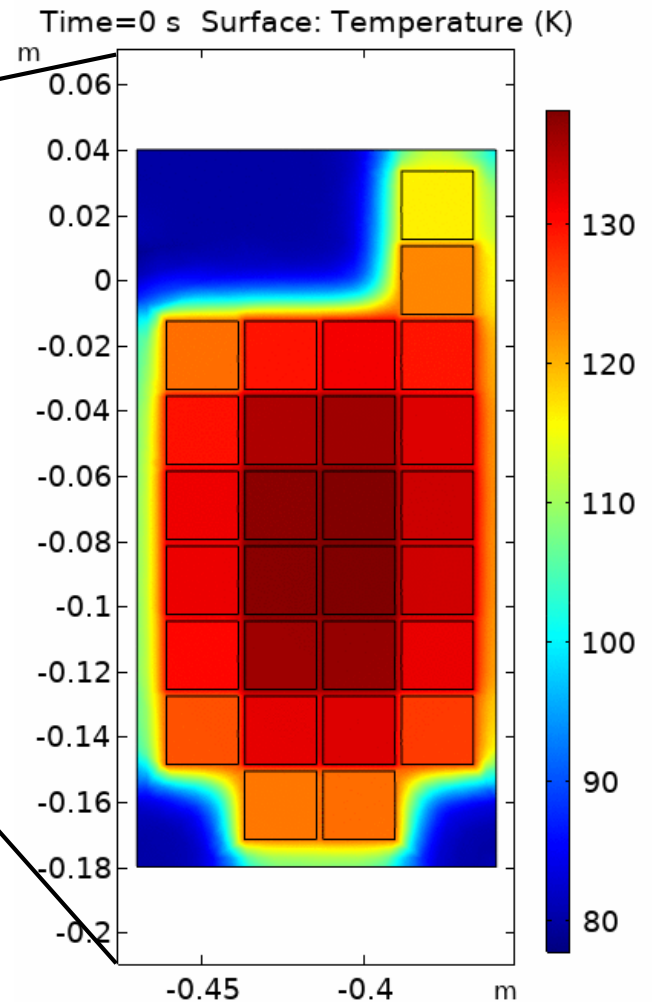
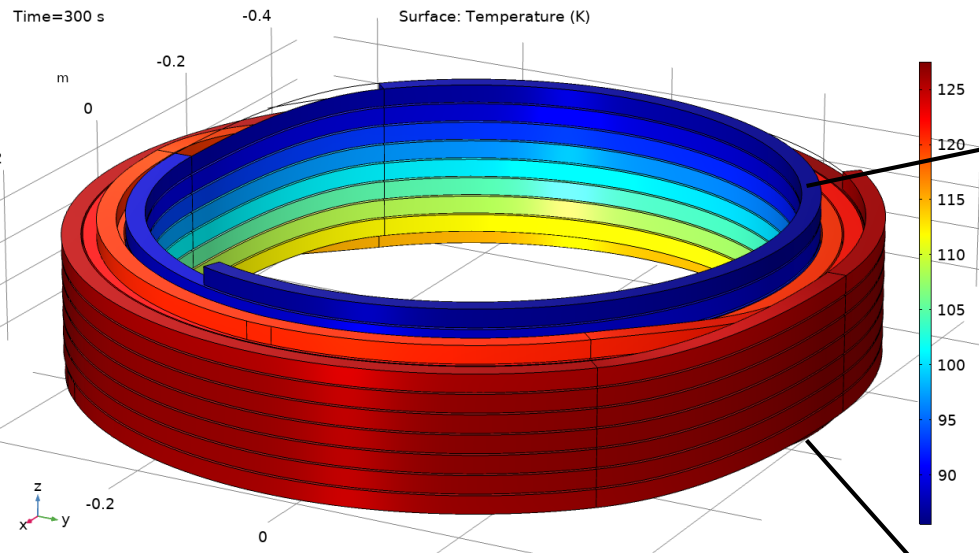
2.1 T	Stávající tokamak COMPASS
0.4 MA	
1 s	
56 cm	
23 cm	
150 °C	

- Pro dosažení požadovaných parametrů jsou měděné cívky zchlazené na **80 K** ( $\sim -200 \text{ }^\circ\text{C}$ )
- Aktuálně ve fázi návrh a tenderu prvních součástí, termín dokončení  $\sim 2022-2023$

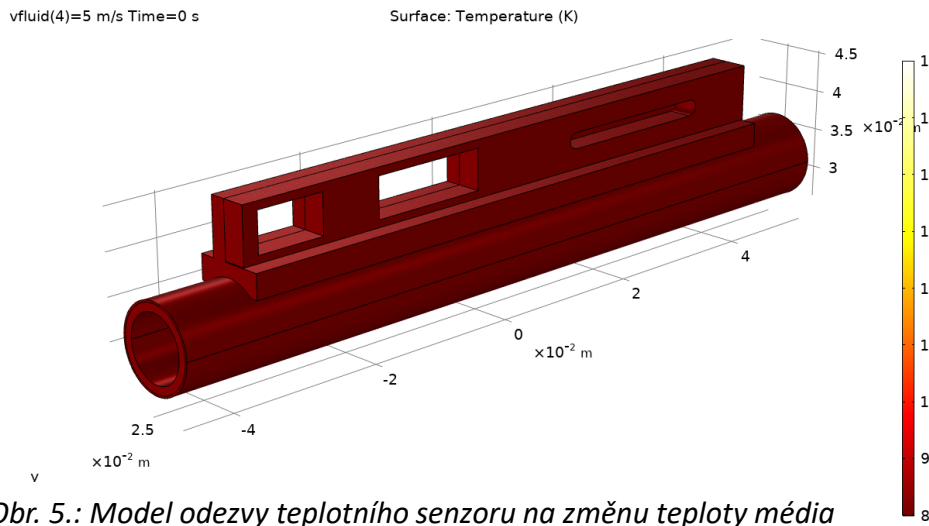


Obr. 2.: Řez tokamakem COMPASS-Upgrade

- COMSOL používáme pro jednodušší až středně-komplexní modely
  - Primární výhoda – COMSOL se lze jednoduše naučit, má velkou materiálovou knihovnu
  - Hlavní uživatelé jsou **fyzici** (bez specializace pro MKP výpočty)
- Hlavní oblasti použití COMSOLU
  - Termální výpočty – tepelné toky, stacionární teploty, přenosy tepla zářením
  - 1-D výpočty toku média potrubím
  - Elektromagnetické výpočty – joulovské teplo, rozložení proudové hustoty
  - Mechanické výpočty – napětí způsobené teplotním namáháním
  - Periodické děje

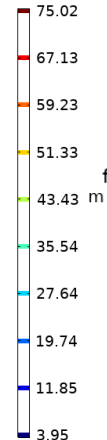
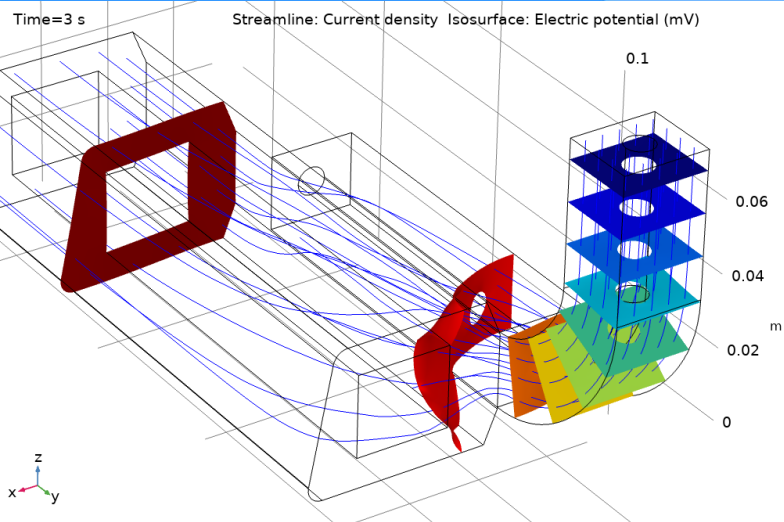


Obr. 3.: Model chlazení měděné cívk, geometrie

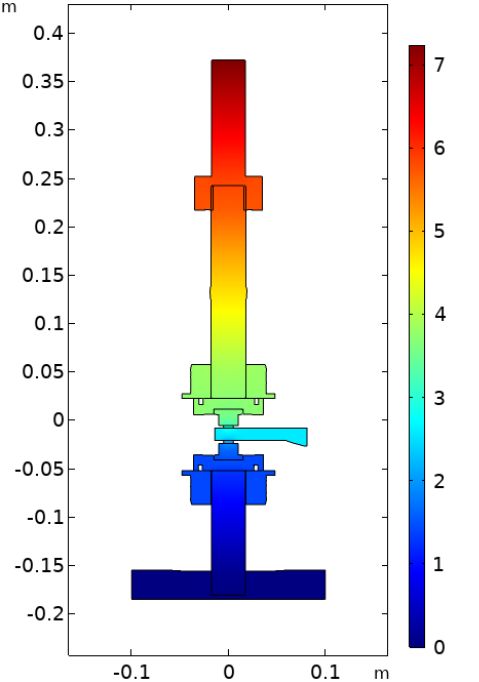


Obr. 4.: Model chlazení měděné cívk, výsledná teplota cívk v řezu

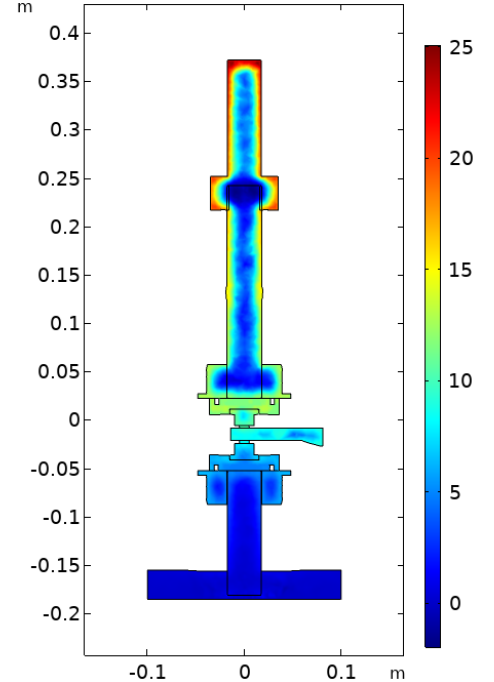
Obr. 5.: Model odezvy teplotního senzoru na změnu teploty média



freq(1)=0.1 Hz Surface: Electric potential (mV)

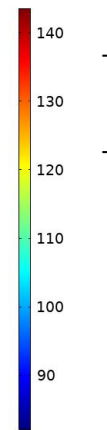
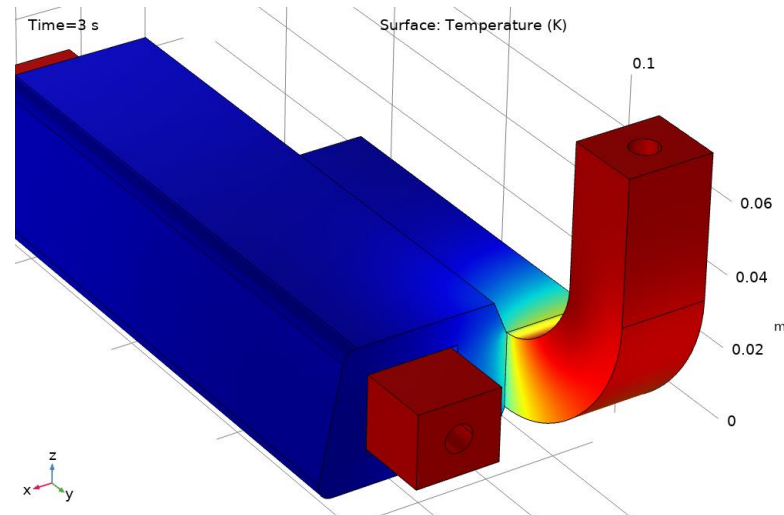


freq(2)=50 Hz Surface: Electric potential (mV)



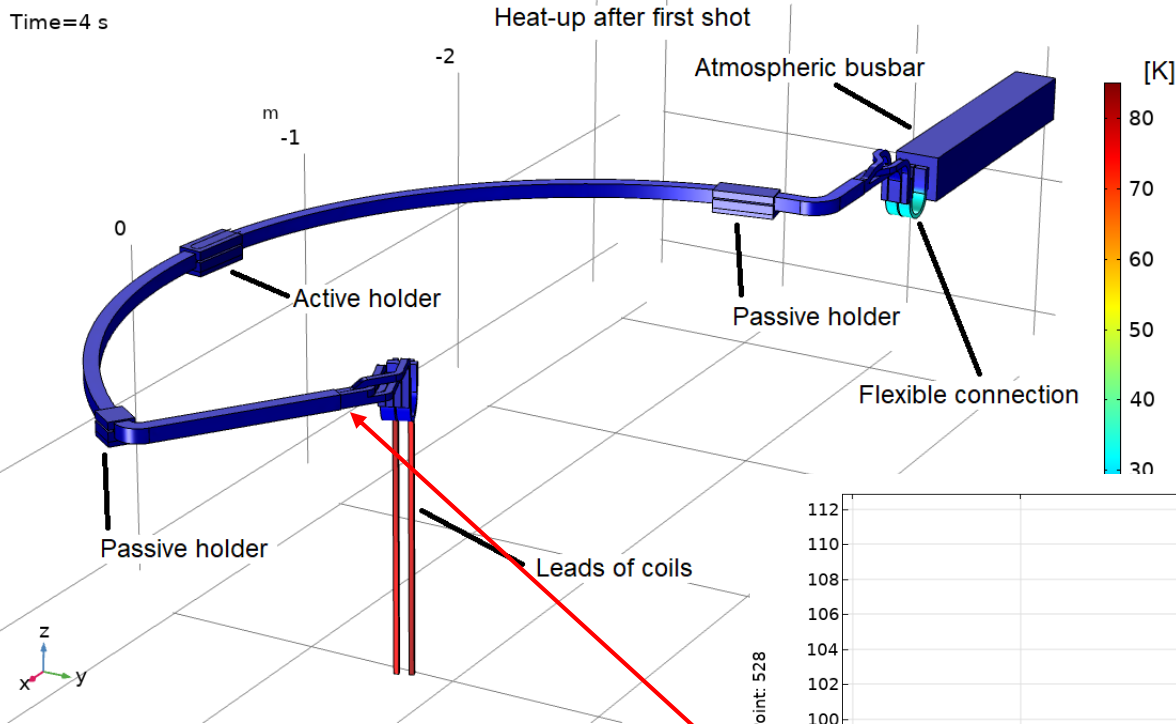
Obr. 8.: Analýza vlivu skin efektu na rozložení proudu v testovacím přístroji vysokoproudých kontaktů

Obr. 6.: Model připojení vodiče cívky, rozložení proudové hustoty

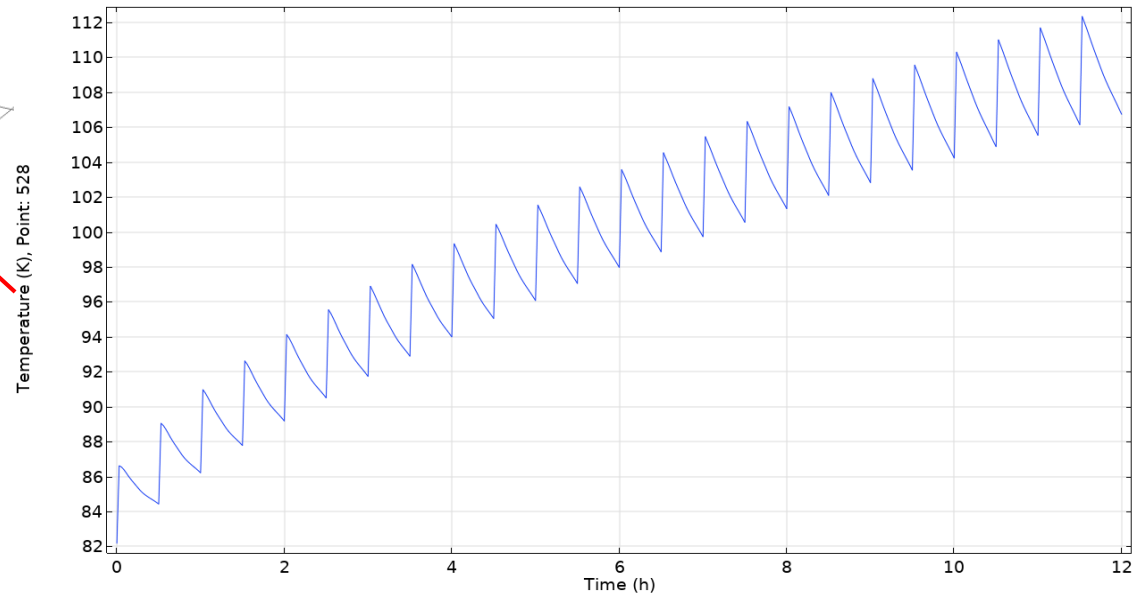


Obr. 7.: Model připojení vodiče cívky, výsledné oteplení





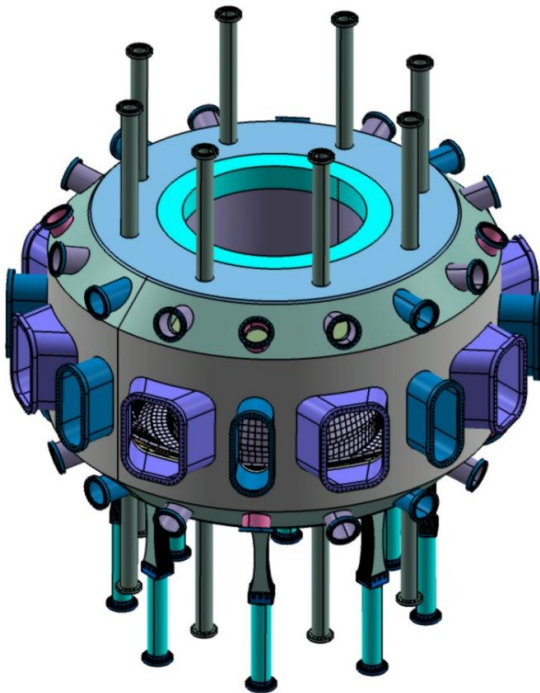
Obr. 9.: Sestava přívodního vedení k jedné z cívek ohmického ohřevu



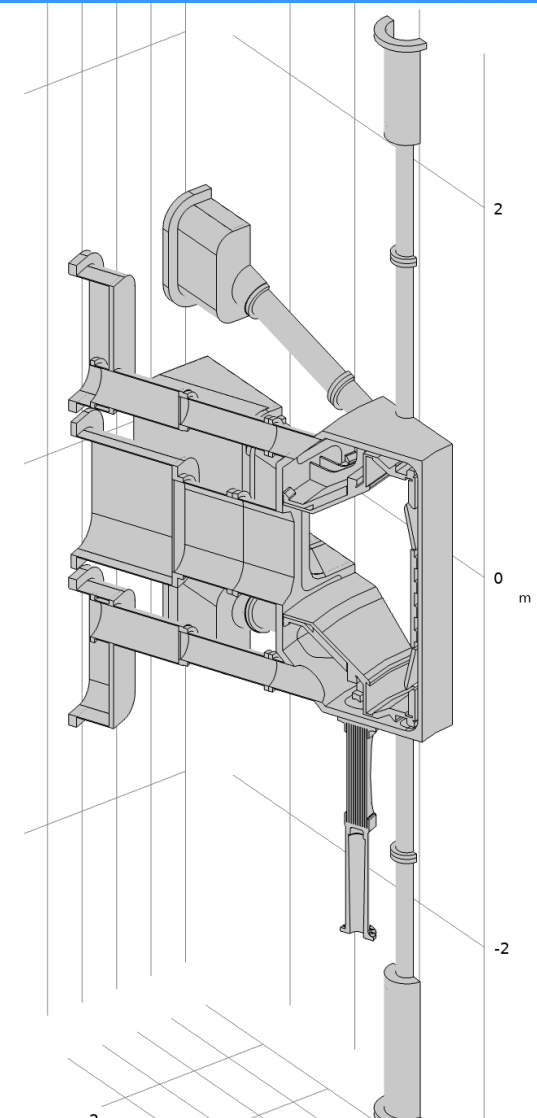
Obr. 10.: Vývoj teploty v průběhu dne provozu zařízení, 24 pulzů po 30 minutách

# Model vyhřívání vakuové komory

- Model určený k ověření návrhu,
  - je vyhřívání komory dostatečně homogenní a
  - jaká jsou mechanická napětí od teplotních nehomogenit?
- Model 1/16 geometrie se symetrií
- Rovnice vedení tepla + přenos tepla zářením + 1-D model toku média

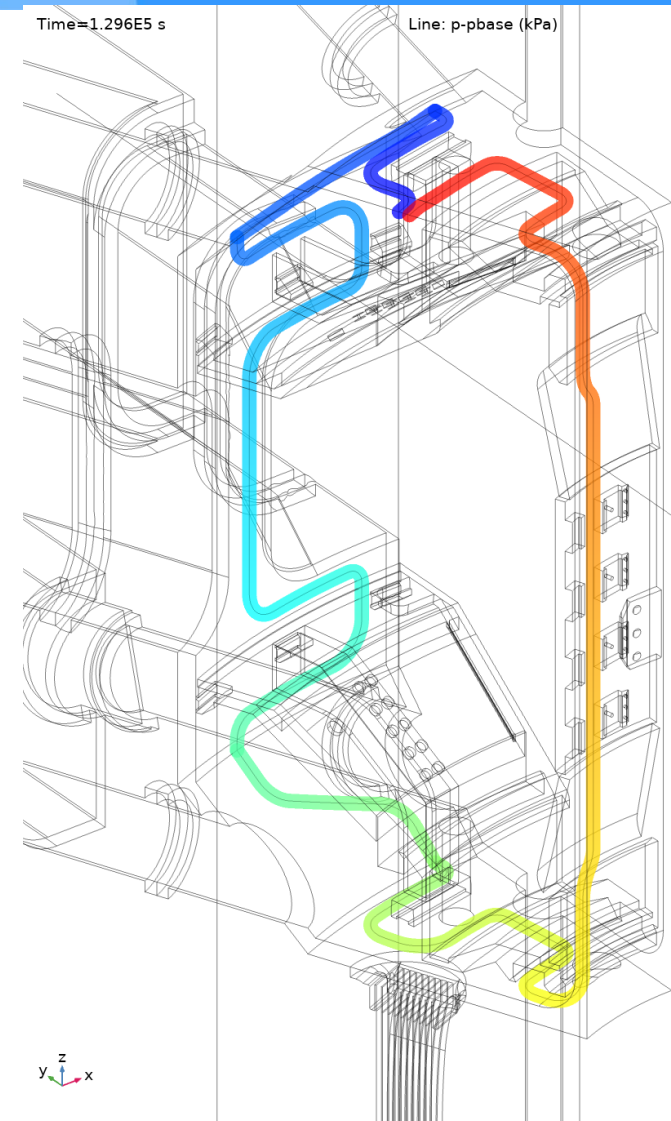


Obr. 11.: Render modelu geometrie vakuové komory



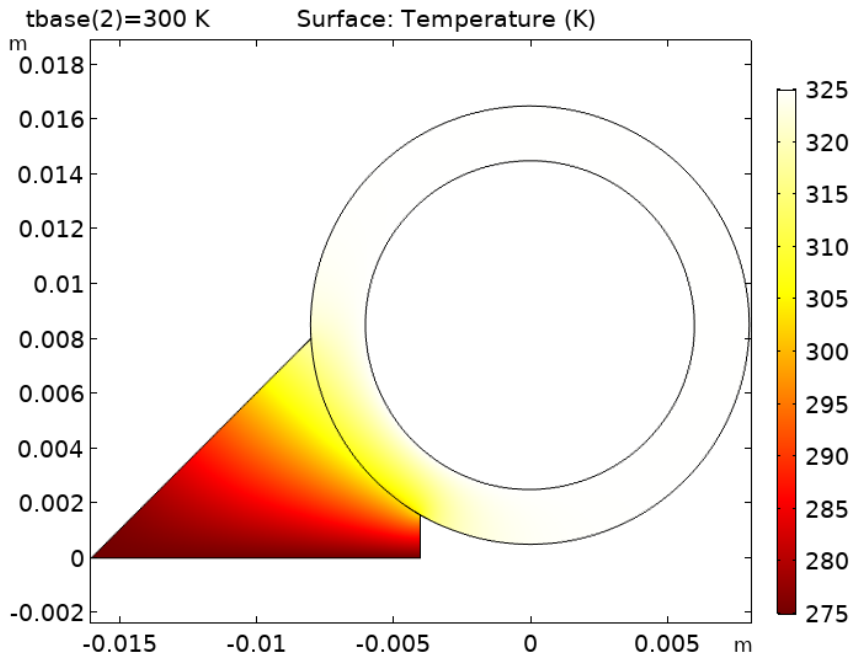
Obr. 12.: Geometrie modelu komory v COMSOLu

- **Vedení tepla** (Heat transfer in solid)
  - Materiál komory Inconel 625 (COMSOL knihovna)
  - Fixní teploty
    - Konec portu 300 K
    - Noha komory 80 K
  
- **1-D model toku média** (Nonisothermal pipe flow)
  - Vyhřívací medium Hélium (knihovna Coolprop)
    - Vstupní tlak 60 bar
    - Tlakový spád 0.3 bar
  - Trubka  $\varnothing 12$  mm
  - Vstupní teplota
    - 0 – 24 h – lineární nárůst z 320 K na 800 K
    - 24 h – 36 h – konstantní výhřev na 800 K
  
- **Model záření** (Surface-to-surface radiation)
  - Emisivita na celém vnitřním povrchu 0.4
  - Sektorová symetrie

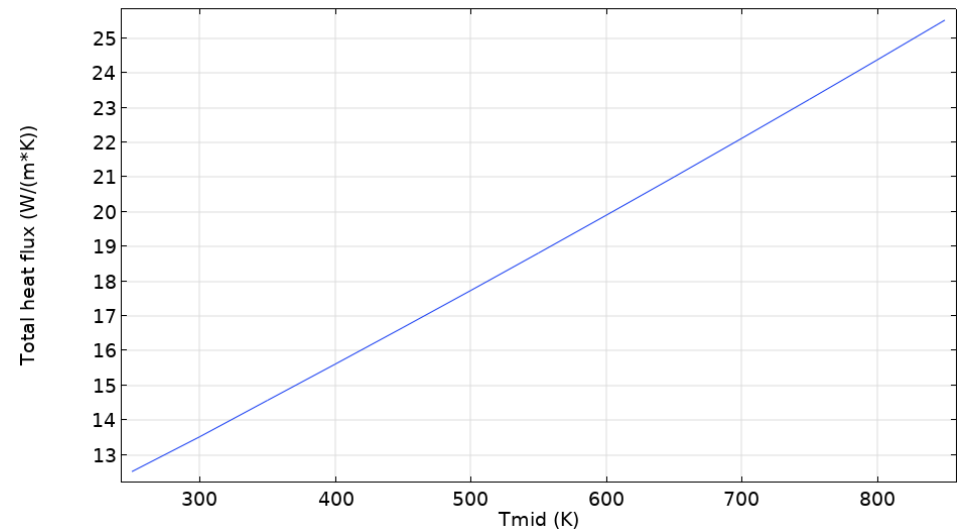


Obr. 13.: Geometrie kanálu ohřevového média

- Trubka bude přivařená na povrchu, tepelný kontakt nebude dokonalý.
- Tepelná vodivost vyhodnocena v 2-D submodelu a naimportována jako koeficient do hlavního modelu (*přímá editace dotyčných rovnic*)

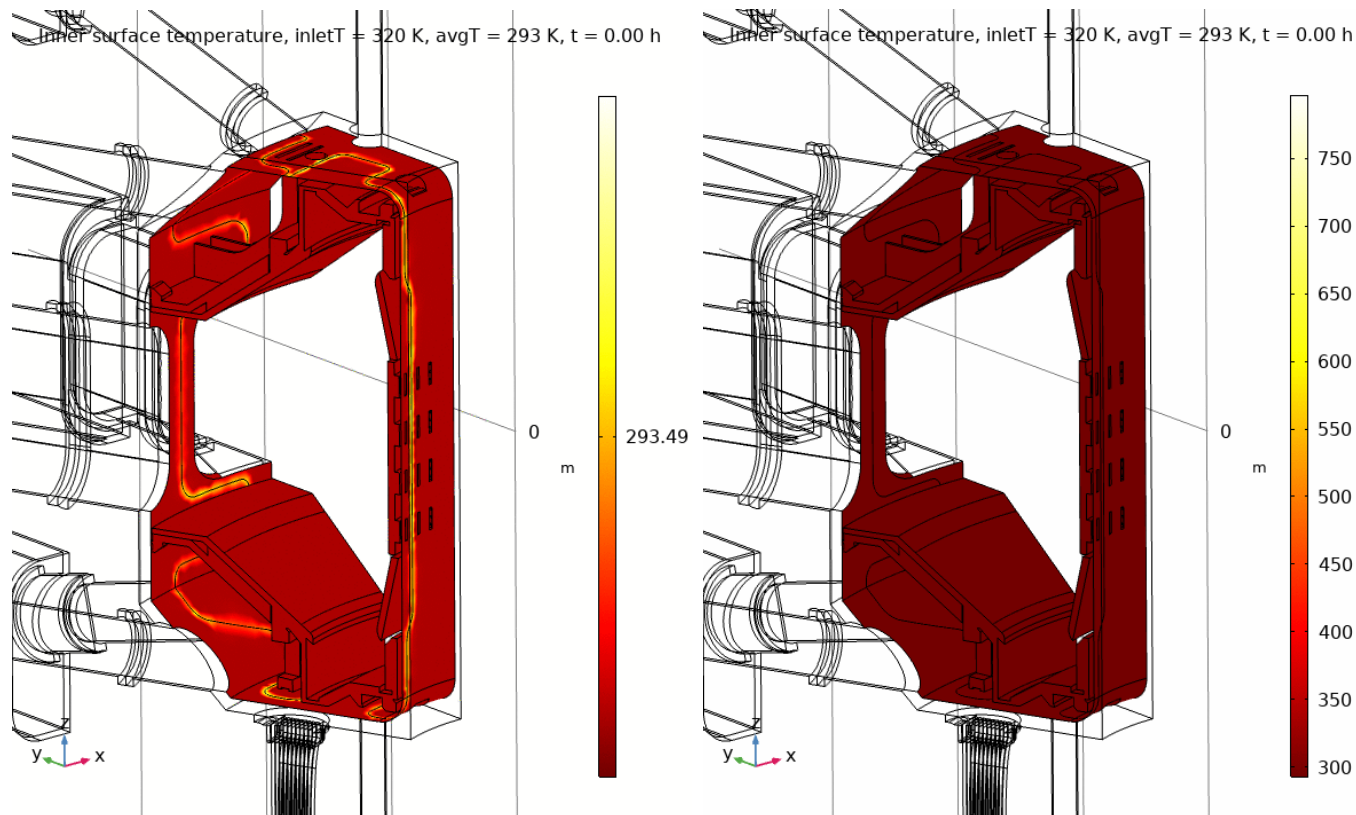


Obr. 14.: Geometrie 2D modelu sváru vyhřívacího kanálu

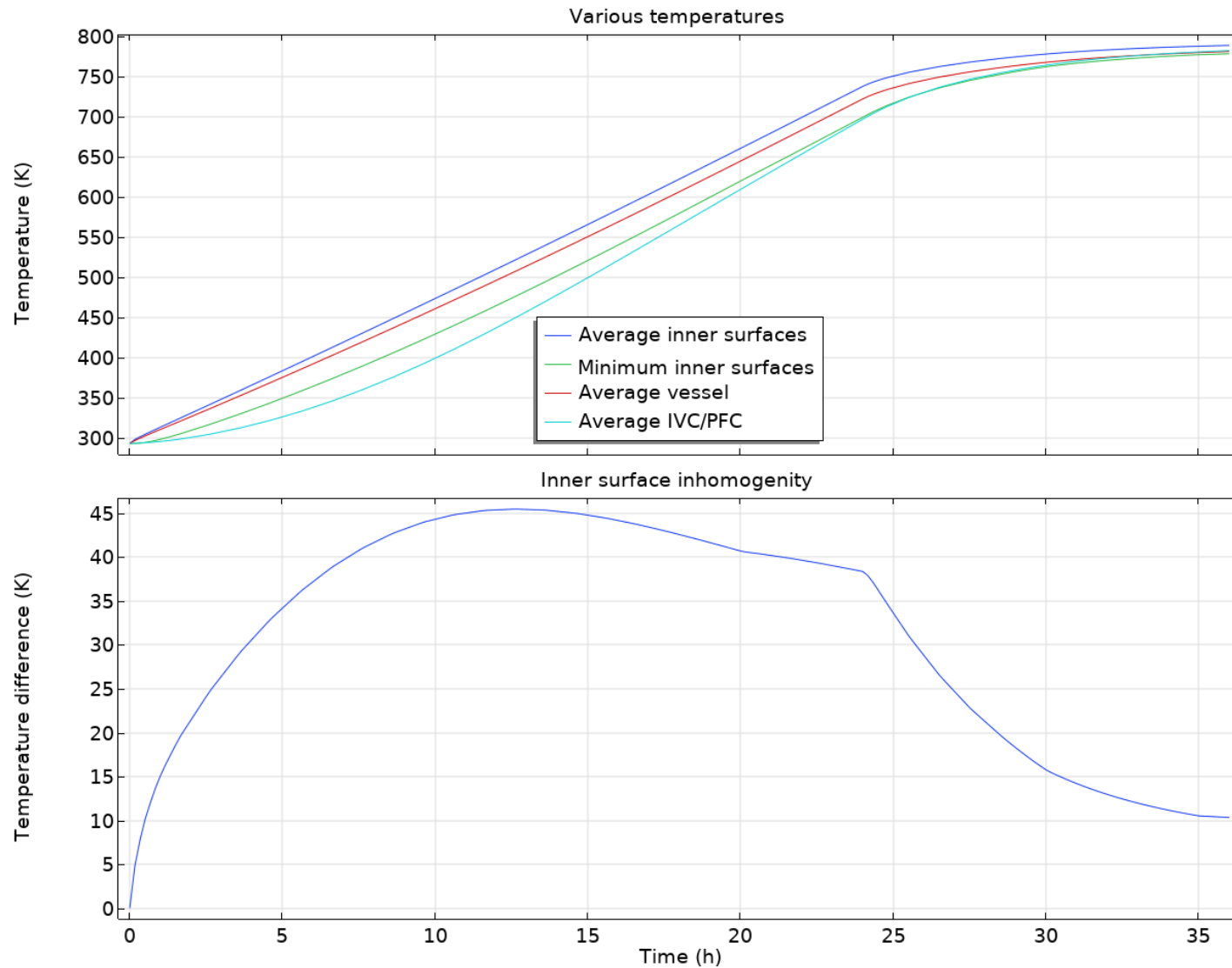


Obr. 15.: Výsledná teplotní vodivost v závislosti na pracovní teplotě

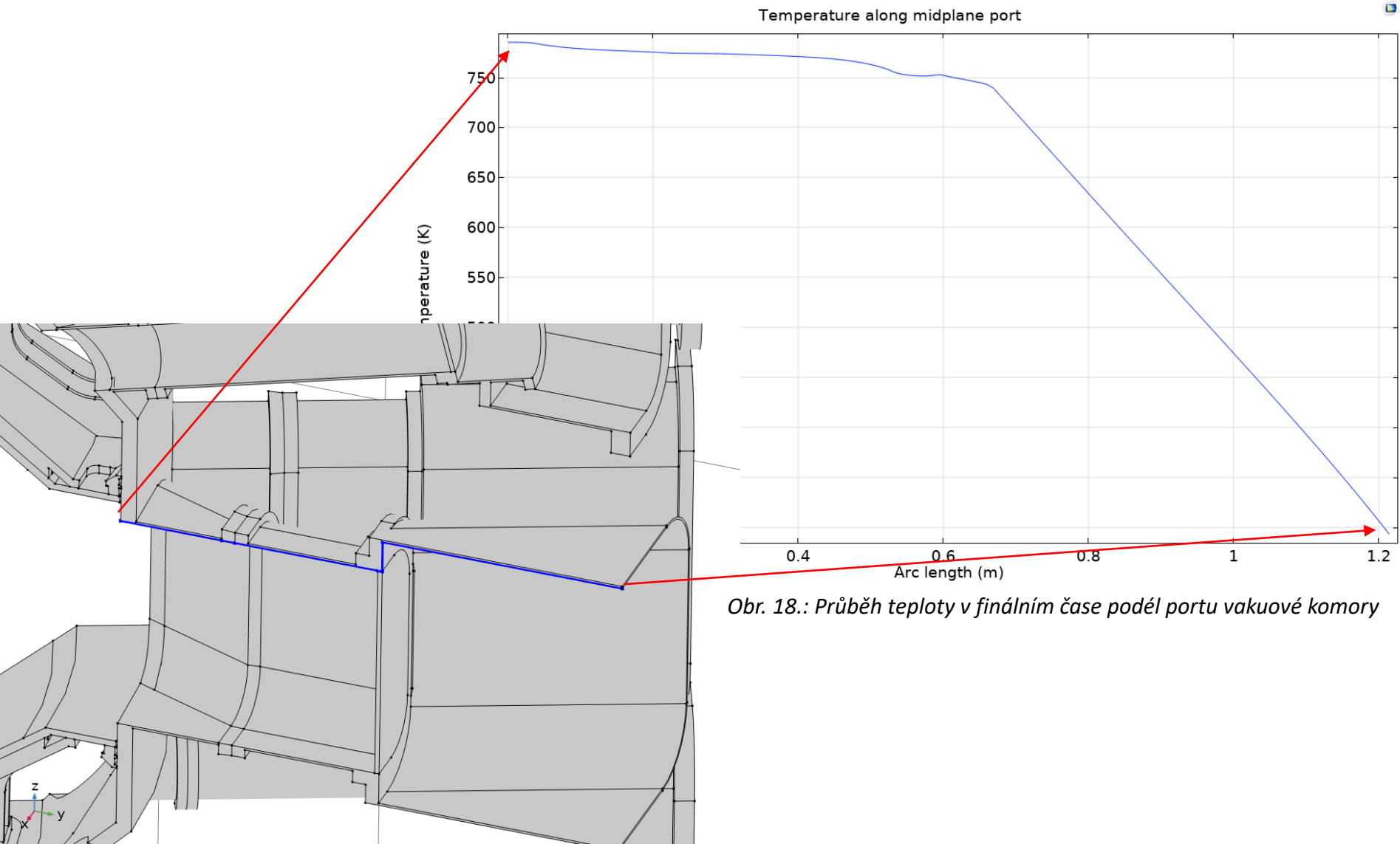
- Doba běhu výpočtu modelu ~ 12 hodin (síť s 202 000 prvků)
- Dva výpočetní kroky
  - Stacionární krok pro inicializaci nonisothermal pipe flow
  - Časový výpočet ohřevu s krokem 10 minut



Obr. 16.: Vývoj teploty vnitřního povrchu vakuové komory, „běžící“ teplotní škála vs fixní teplotní škála



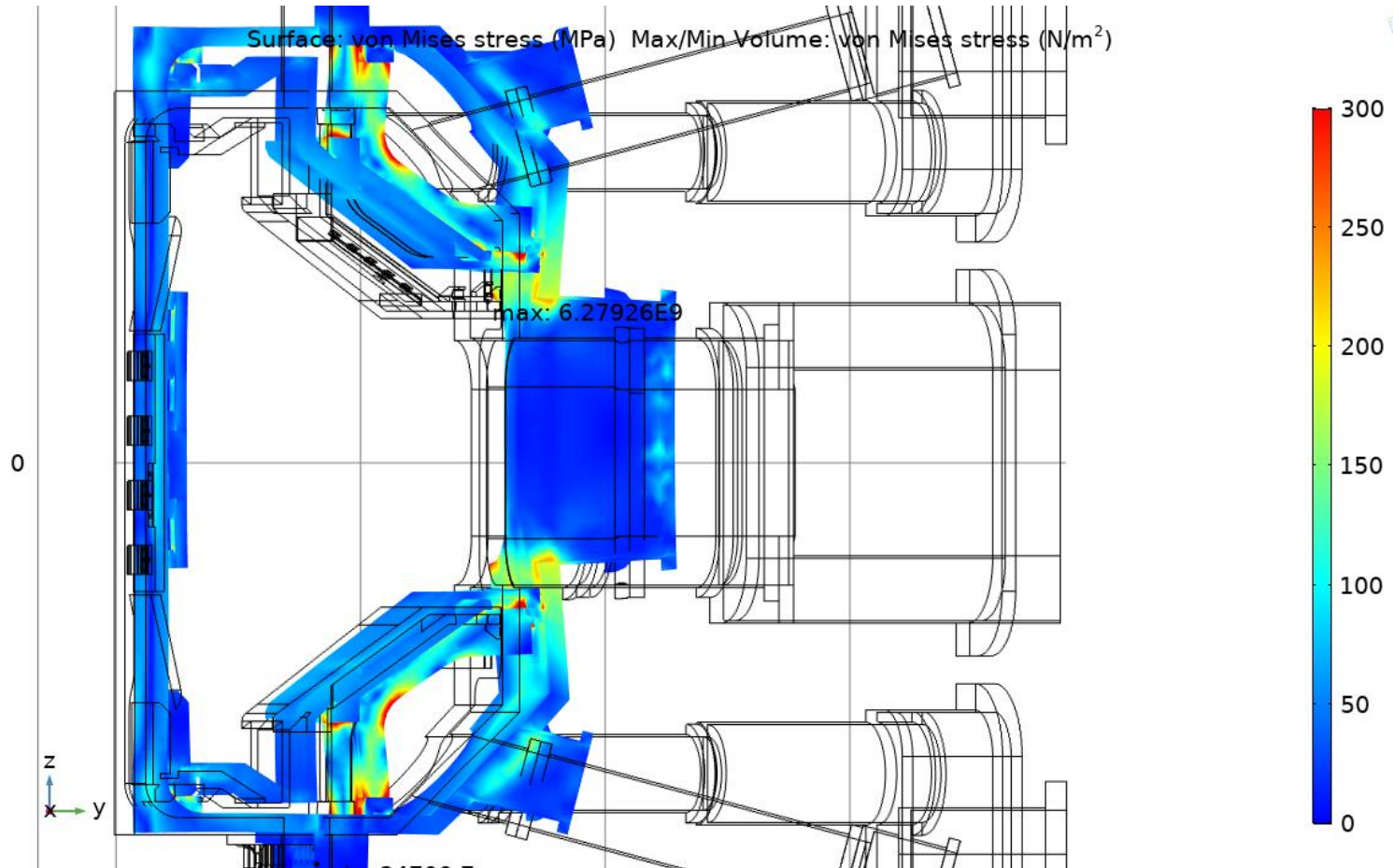
Obr. 17.: Vývoj teploty různých součástí komory, maximální nehomogenita na vnitřním povrchu komory



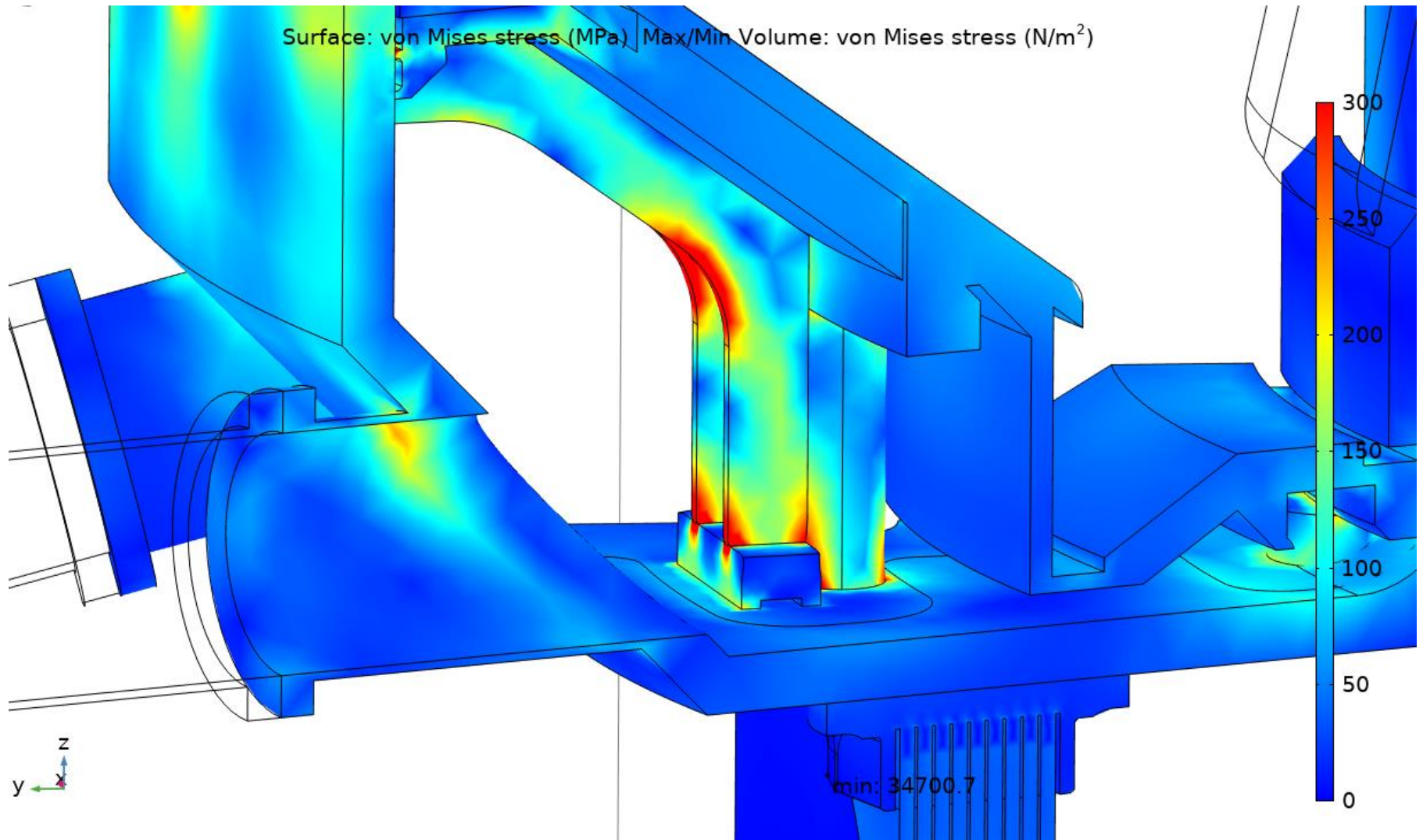
Obr. 18.: Průběh teploty v finálním čase podél portu vakuové komory



- Pevnostní výpočet provedený pouze pro vybrané časové kroky
- Bez kontaktů (pevné spojení všech součástí)



Obr. 19.: Napětí vyvolané teplotními nehomogenitami v čase  $t = 12$  h



Obr. 20.: Napětí vyvolané teplotními nehomogenitami v čase  $t = 12$  h, zoom na držák vnitřních komponent komory

- Na ÚFP používáme COMSOL pro velké množství různorodých modelů
- Využíváme všechny zakoupené moduly, nejčastěji
  - Vedení tepla, přenos tepla zářením, 1-D model toku kapaliny
  - Elektromagnetické výpočty
  - Mechanické výpočty (optimalizace kontaktů, tepelného namáhání).
- Byl představen jeden z větších modelů – vyhřívací systém vakuové komory