



ČVUT

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE

Rychle rozmítaný divertor potlačující tepelné pulzy v tokamacích

Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská
ČVUT v Praze, Diplomová práce

student/autor: **Bc. Samuel Lukeš**

školitel: Res. Prof. Jan Horáček, dr. és. sc.

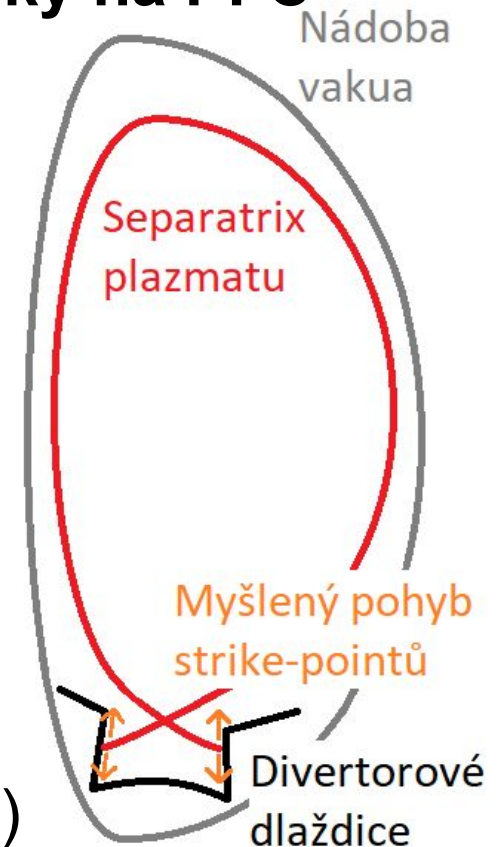
5. 2021

- Motivace
- Cíl
- Podklady
- Práce
- Pokračování
- Reference

- Přejít od výzkumných tokamaků k elektrárnám?
→ ... mnoho problémů ... např.: **tepelné toky na PFC**

- EU DEMO vs ITER:
15% větší rozměry
400% vyšší fúzní výkon
30% vyšší hustota plazmatu
→ vyšší (hustší) tepelné toky

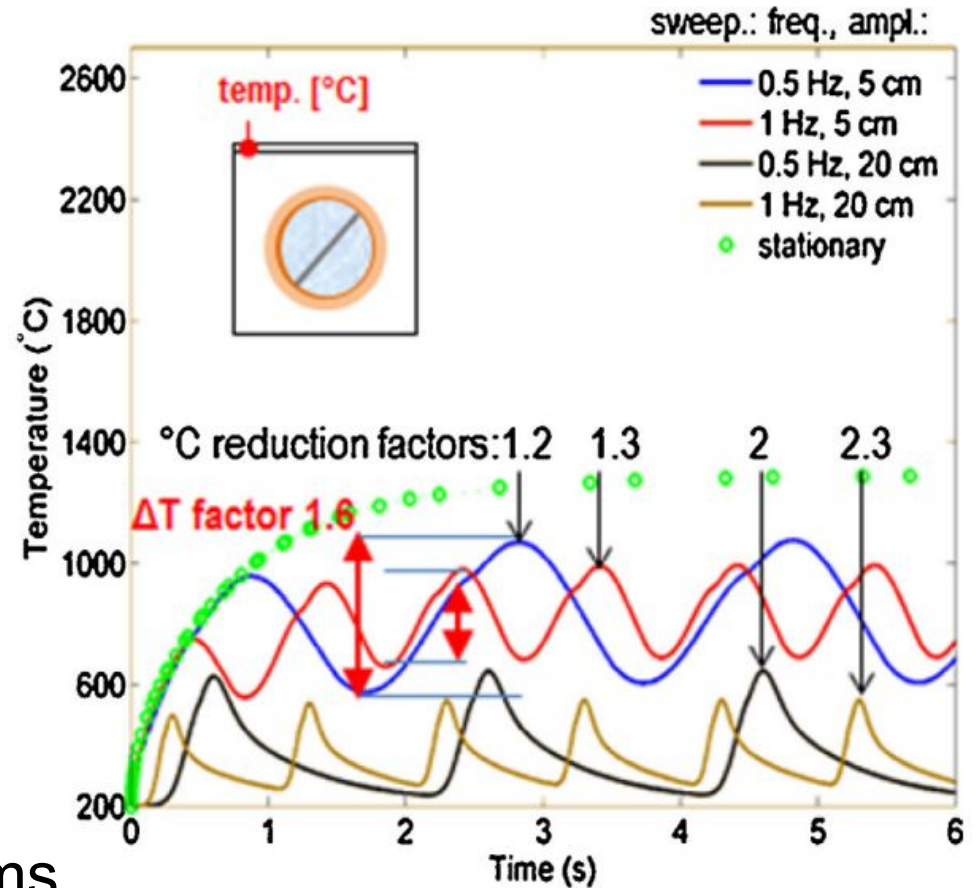
→ **Rozmírat nejzatíženější oblast (strike-point)
po méně zatížené (okolí se stejnou ochranou)**



- „Pomalé“ rozmítání úspěšné na mnoha tokamacích (i pro ITER)

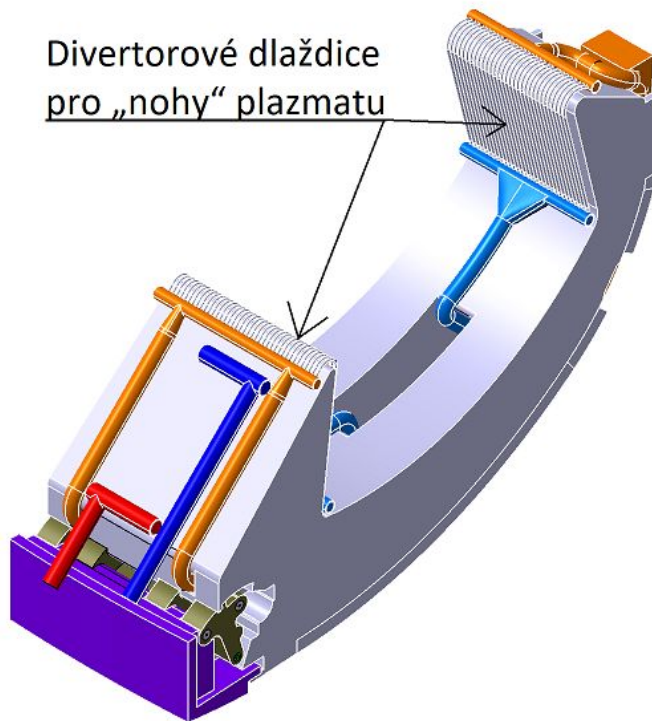
- Návrh pro DEMO →

- **Ale co nestability?**
DEMO: ELM ~5 ms
1Hz, 20cm → 4mm za 5ms
→ **Lokální tavení**



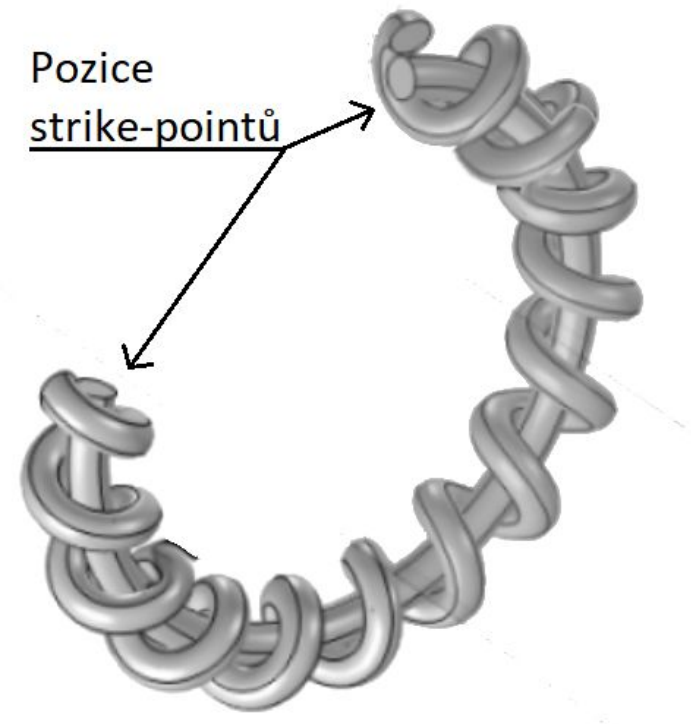
Porovnání teplot povrchu W divertoru pro 15 MW/m² [1]

- **Návrh „rychlého“ rozmítání pro tepelné pulzy**



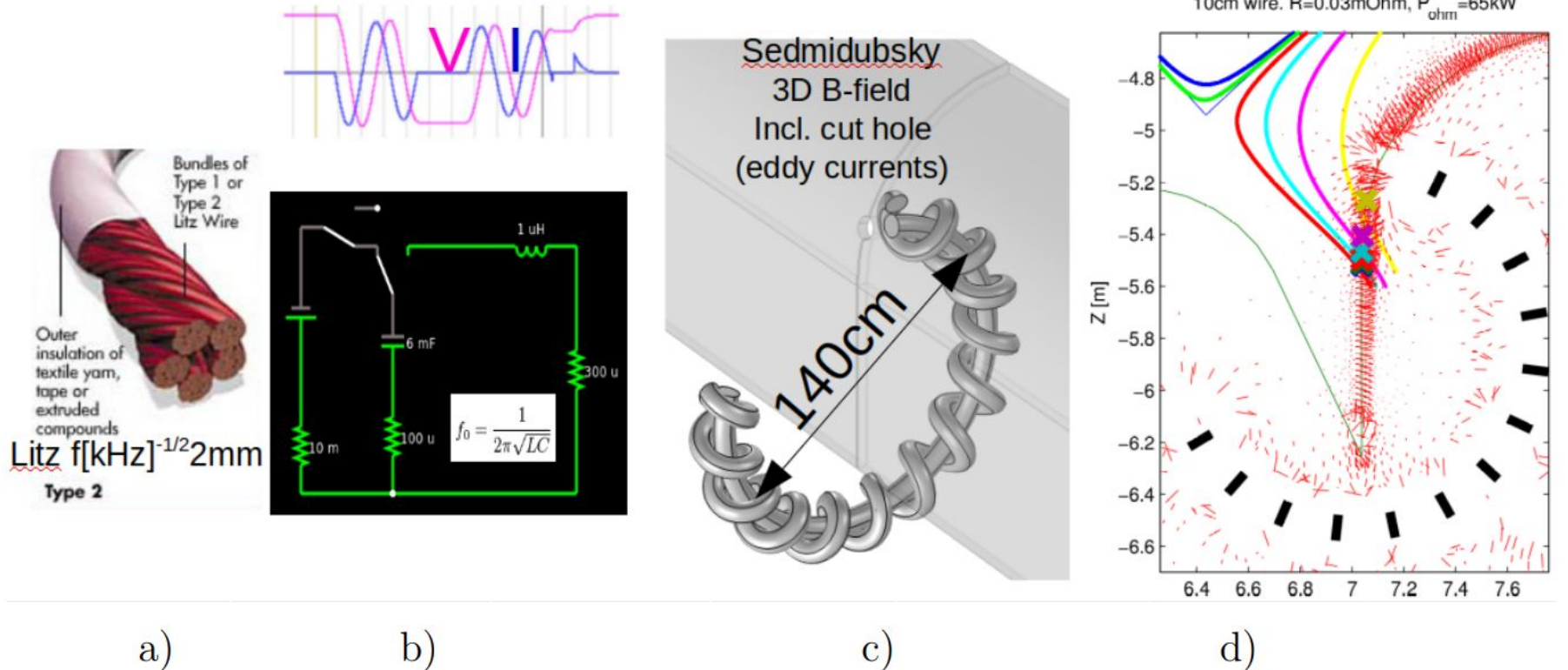
Kazeta divertoru reaktoru DEMO

+



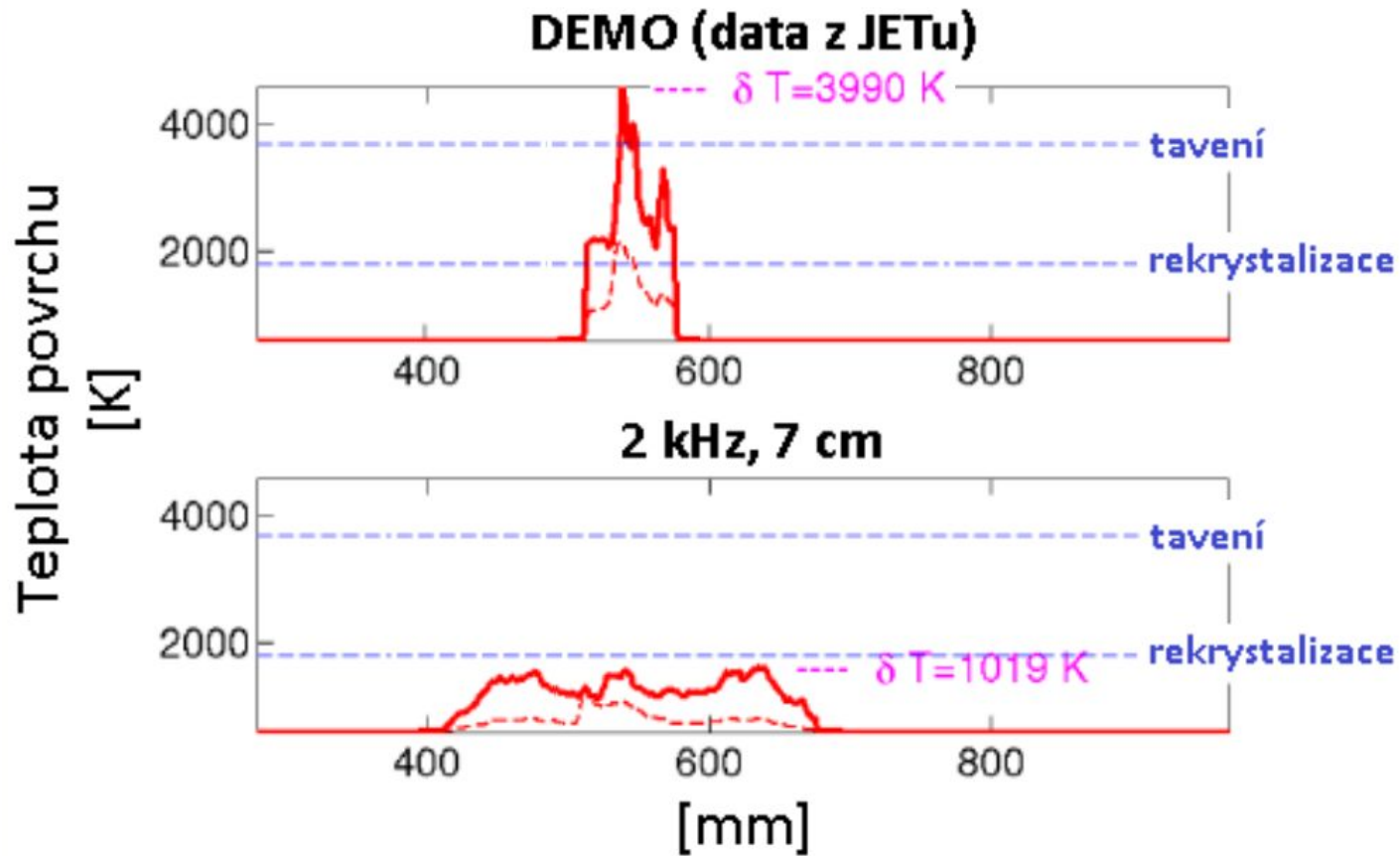
Poloidální cívka pro každý segment

- První návrh v [2, 3]



Návrh rychle rozmítaného divertoru. a) Použité vodiče. b) Rezonanční obvod. c) Simulovaná cívka pouze na outer strike-point. d) Poloidální řez ze simulace sledování magnetického pole. [2]

- DEMO během ELM $\sim 1 \text{ GW/m}^2$ po 5 ms [2]



Porovnání teplot povrchu divertoru po jednom ELM při rozmítání a bez [2]

- 2 kHz se utlumí:

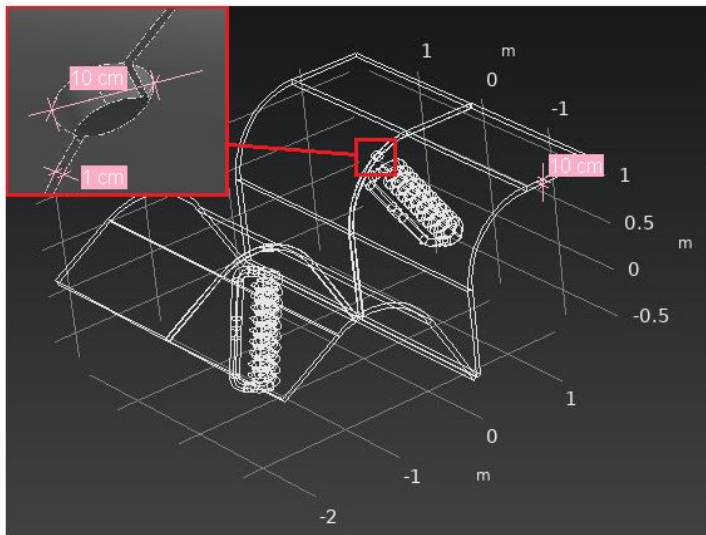
$$\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$$

$$\delta_{\text{měď}, 2 \text{ kHz}} = 1,5 \text{ mm}$$

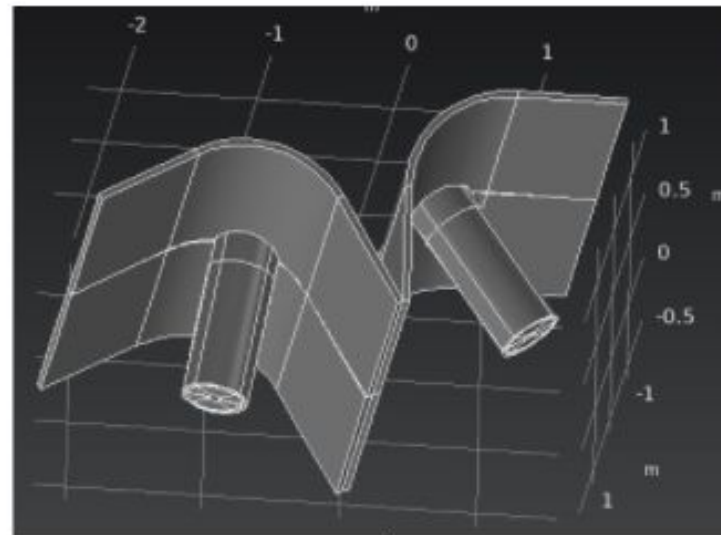


Připomenutí polohy cívky
vzhledem k W štítu

- Toho se dá využít [4]:



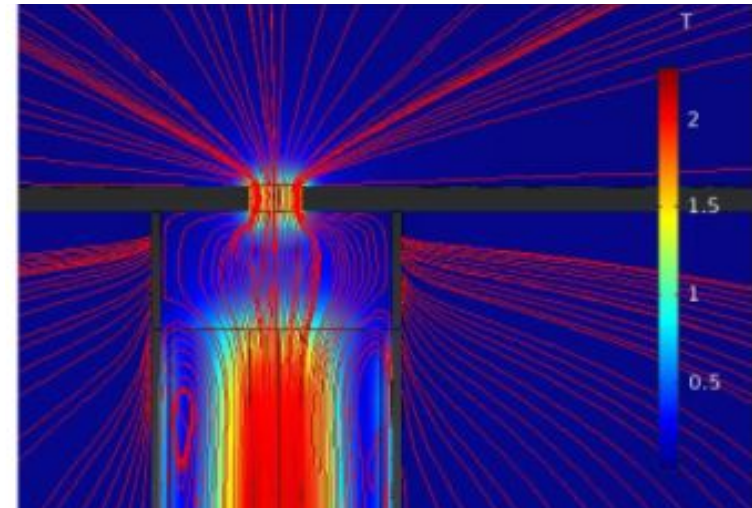
a)



b)

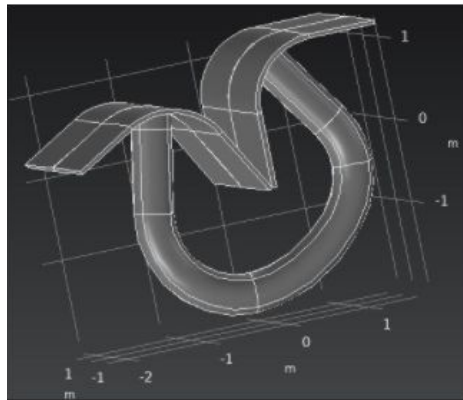
Nové uspořádání cívek. a) Bez magnetického stínění. b) Se stíněním. [4]

- **3× silnější pole**
na pozici strike-pointu

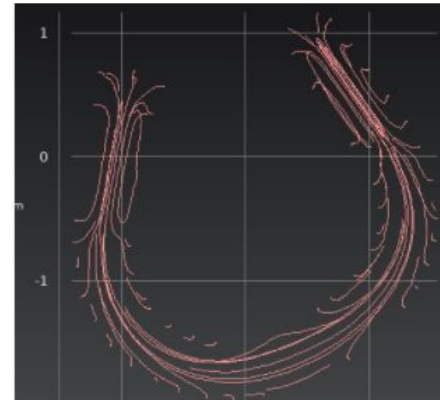


Magnetického pole v otvoru divertorových dlaždic zesílené vlivem magnetického siločárodu [4]

- **Stínění od okolních komponent**



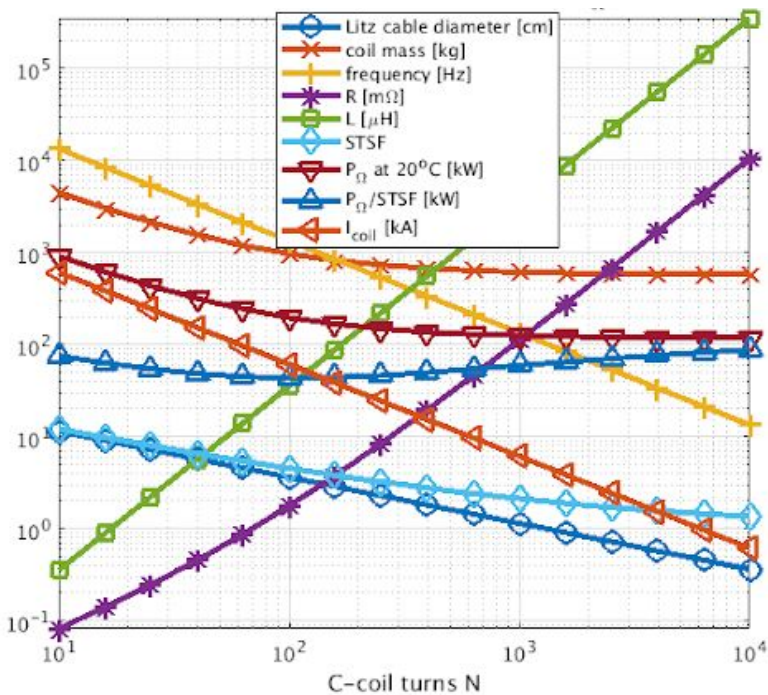
a)



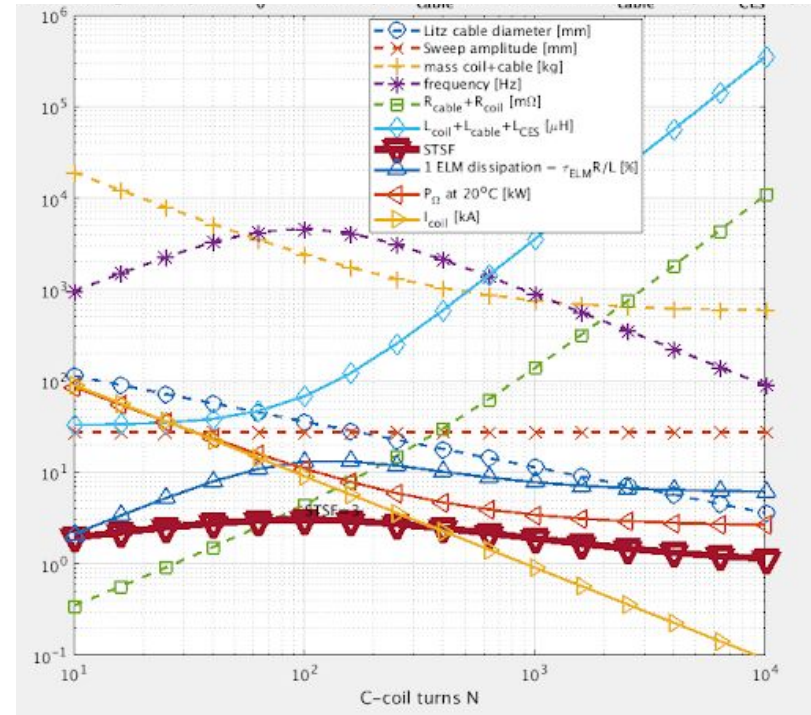
b)

a) Kompletně stíněné cívky. b) Zobrazení magnetických indukčních čar v trubici. [4]

- Vztahy mezi veličinami:



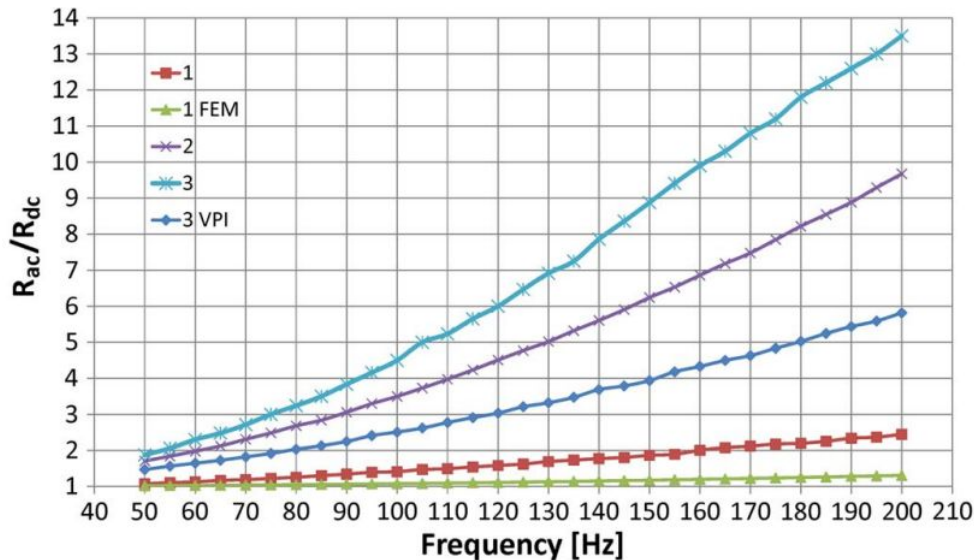
Veličiny jedné z 54 cívek na počtu závitů pro 1,6 kV kondenzátor.



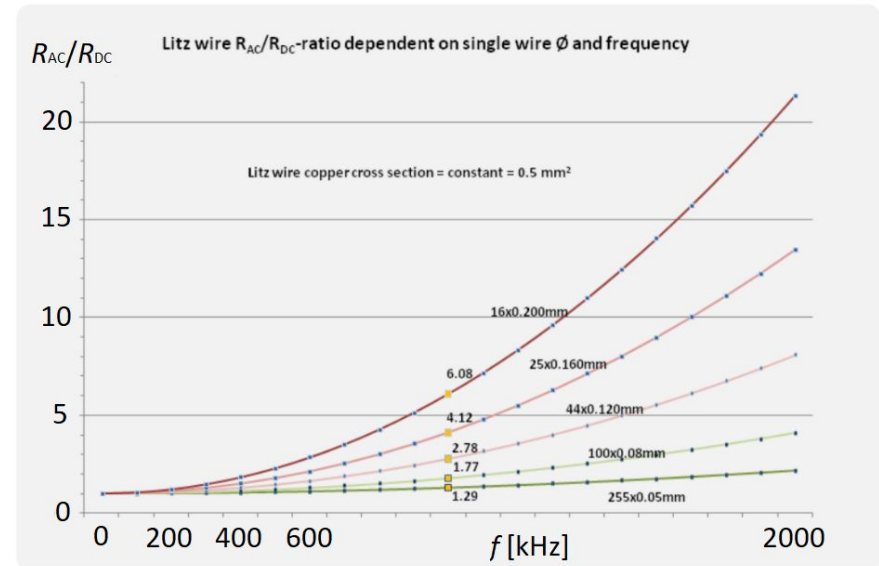
Veličiny jedné z 54 cívek na počtu závitů pro 18 kV kondenzátor.

→ **Zvýšit co nejvíce napětí kondenzátoru**

- Stranded wire (neizolovaný Litz wire):



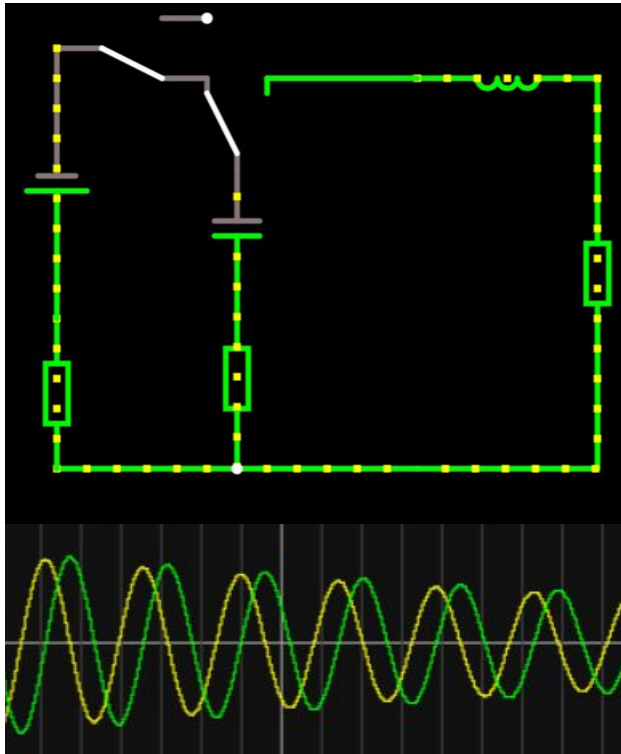
R_{AC}/R_{DC} pro 1 (izolované), 2 (zoxidované) a 3 (neizolované) stranded wire [5]



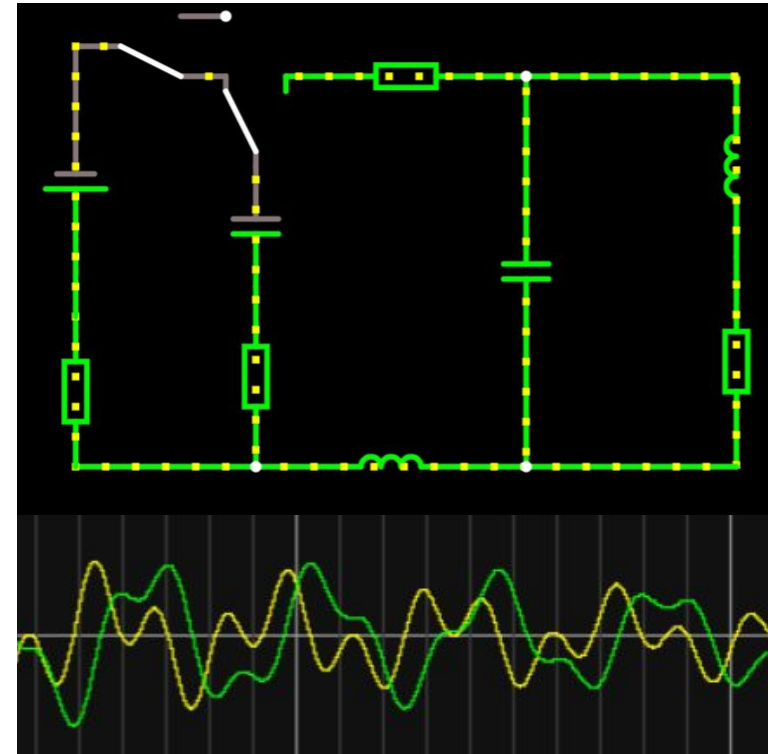
R_{AC}/R_{DC} pro Litz wire v závislosti na frekvenci, z elektrisola.com

→ $R_{AC}/R_{DC} = 1$ pro 2 kHz stranded wire

- RLC obvod:



a)

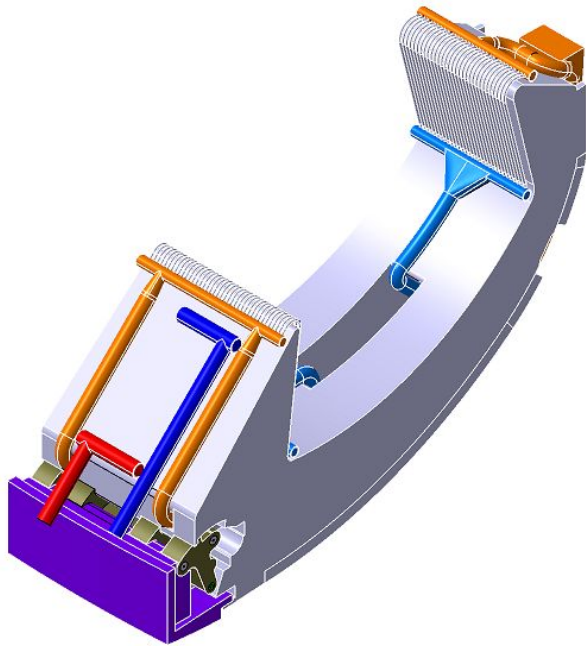


b)

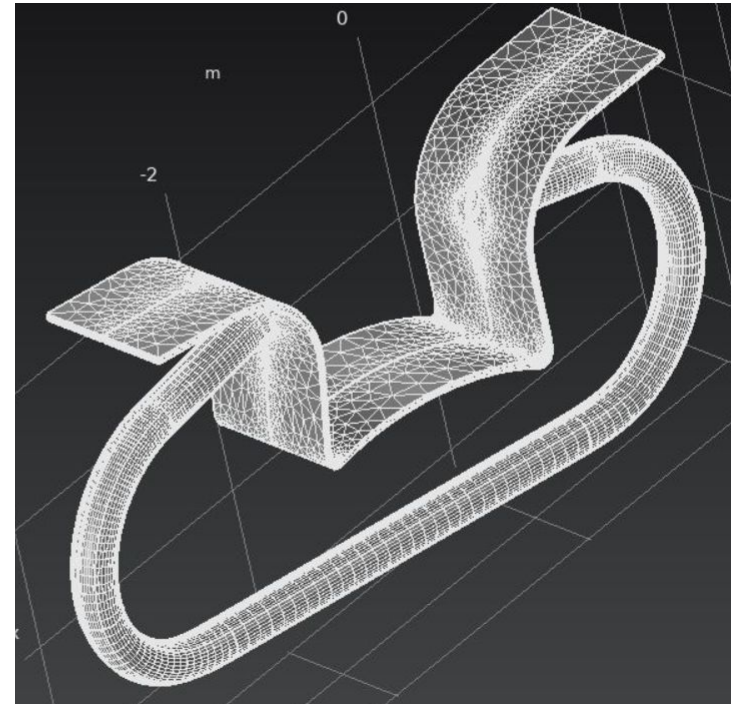
Vliv parazitních parametrů komponent. a) Ideální tlumený RLC obvod. b) Extrémní případ vlivu parazitních parametrů.

→ **Nutná znalost a analýza parazitních parametrů**

- DEMO kazeta (vnější i vnitřní terč):



a)



b)

Překreslení komplikovaného a) 3D modelu kazety do b) zjednodušené aproximace pro simulace

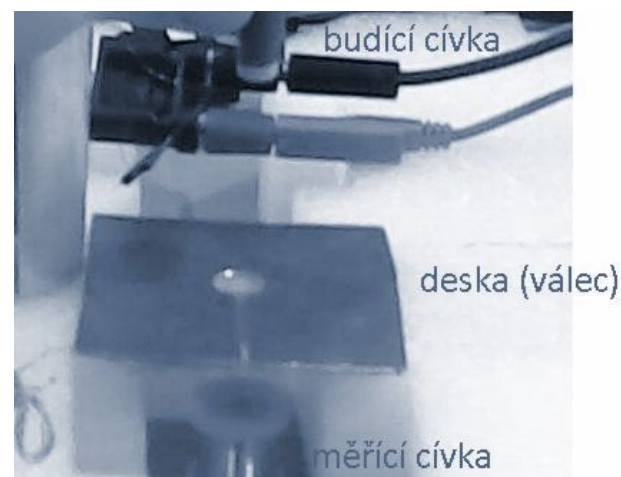
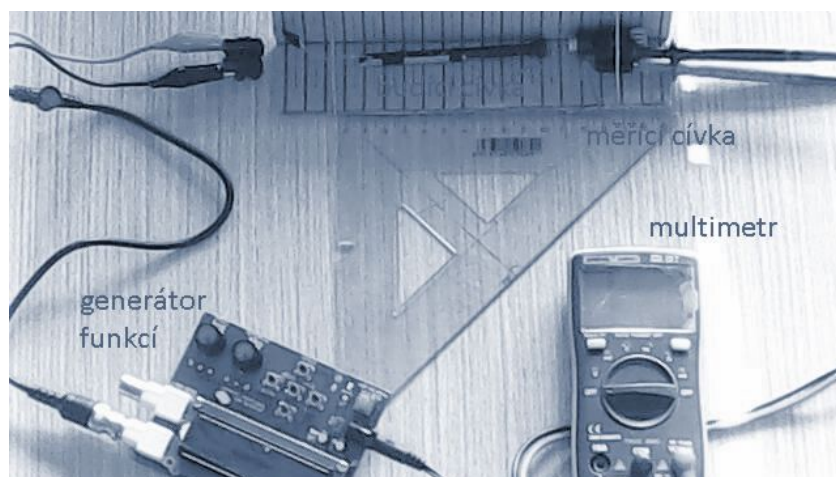
- Máme:
 - simulace cívek, obvodu, rozmítání
 - vodiče, kondenzátor: RLC parametry
 - ztráty (chlazení) = $\frac{1}{2} R_c \cdot I_c^2 \frac{3 \text{ ms ELM}}{50 \text{ ms inter-ELM}} \times 54$
~ 100 kW
 - $T_{\text{swept}}/T_{\text{non-swept}} = 1 + \sqrt{\frac{f_{\text{sweep}} \cdot A_{\text{sweep}} \cdot t_{\text{ELM}}}{\lambda_{\text{ELM}} \cdot 2}} \sim 3$

- Do června:
 - nejlepší uspořádání
 - (show-stopper v návrhu EU DEMO1)
 - cenově ohodnotit a ověřit
 - **system potlačení účinku tepelných pulzů**
 - (publikace ve vědeckém časopise)

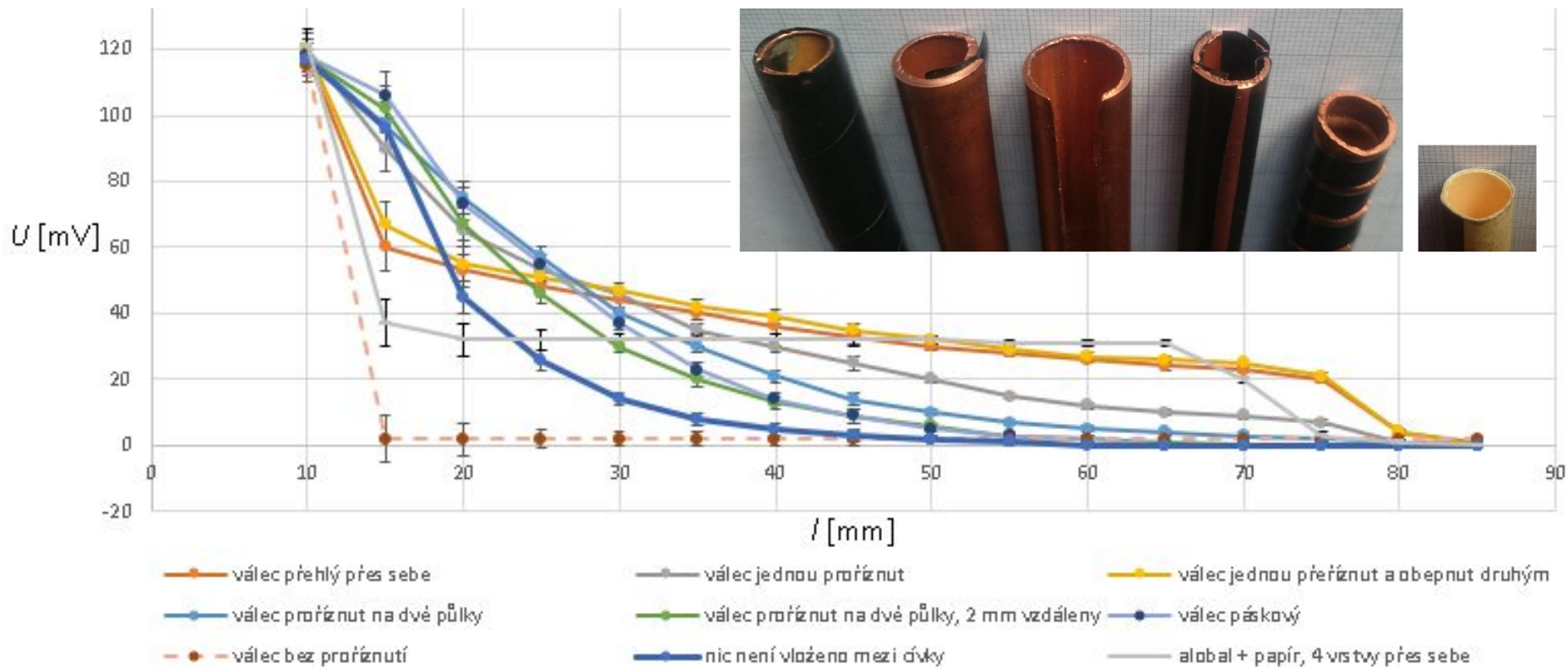
- [1] F. Maviglia, et al.: *Limitations of transient power loads on DEMO and analysis of mitigation techniques*. Fusion Engineering and Design, 109-111, 1067-1071, (2016)
- [2] J. Horacek: *Heat transport in tokamak plasma boundary*. Res.Prof. thesis: long A4 version, (2019)
- [3] R. Duban: *Study of new technique for distribution of tokamak divertor plasma heat flux by fast swept magnetic coil*.
Master's thesis, CTU in Prague, FNSPE, (2017)
- [4] S. Lukes: *Využití jevu vířivých proudů k usměrnění vysokofrekvenčního magnetického pole*. Student's project, CTU in Prague, FNSPE, (2021), Dostupné z: [PRPL20/21](#)
- [5] H. Hamalainen, et al.: *AC Resistance Factor of Litz-Wire Windings Used in Low-Voltage High-Power Generators*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 61, 693-700, (2014)

M.j.:

- Nutné podélné přerušení trubice
- Trubice výrazně posílí mag. pole za vodivou překážku
- Stínění mag. pole vně trubice
- Výstupní mag. pole závisí na celkové délce trubice i na její „kvalitě“. Nezávisí na ohnutí trubice



Dvě nezávislé experimentální sestavy

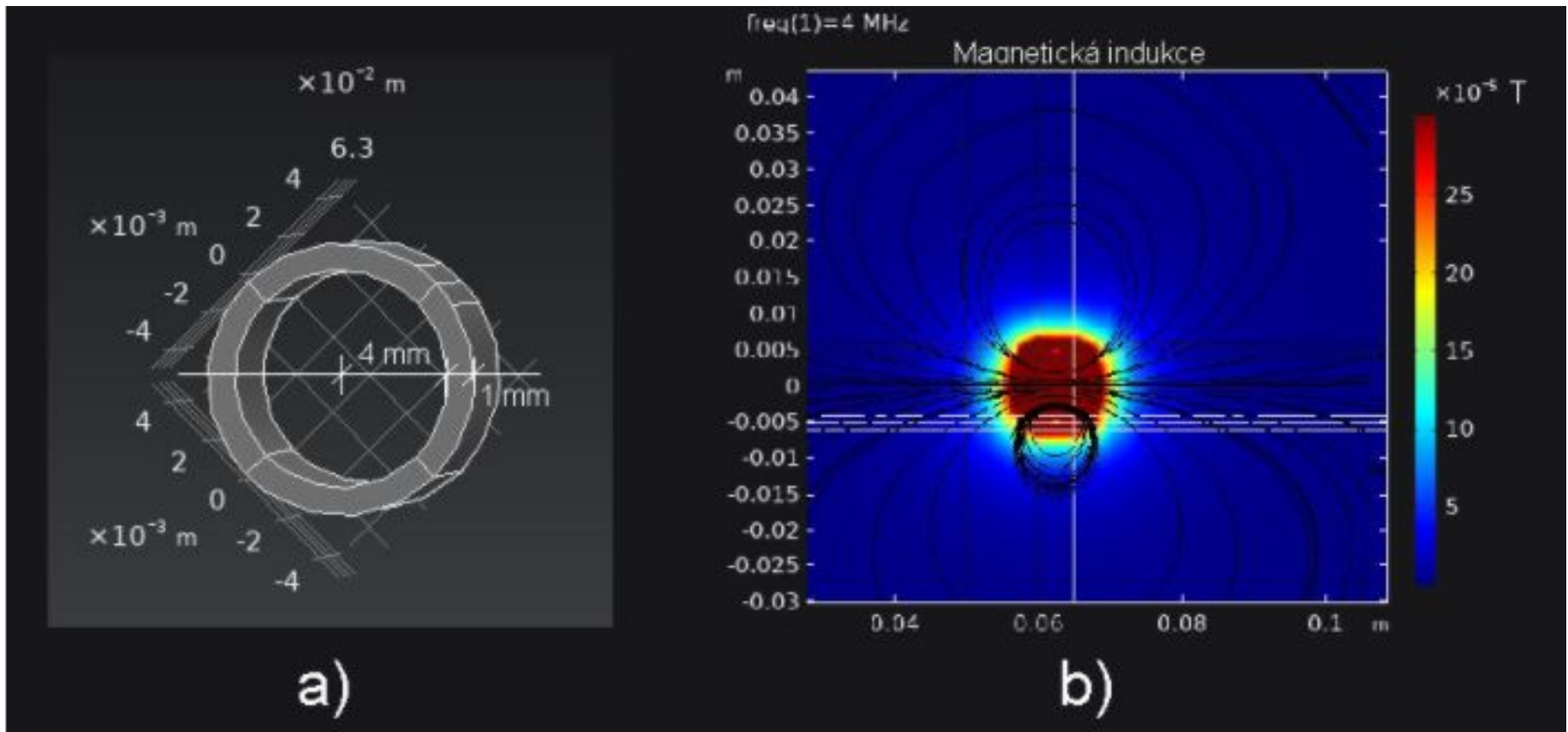


Závislost naměřeného napětí U na vzájemné vzdálenosti cívek l pro různé válce mezi nimi.

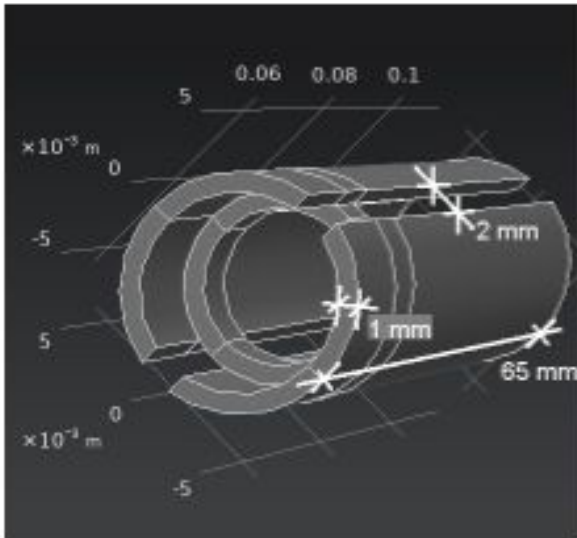
➔ Závisí zejména na tloušťce přerušení trubice.

Obdobné uspořádání jako v experimentech:

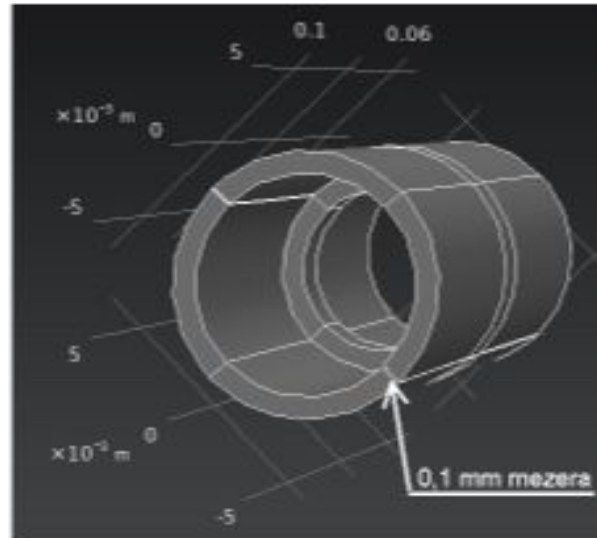
- 4 MHz, měď. cívka o poloměru 4 mm



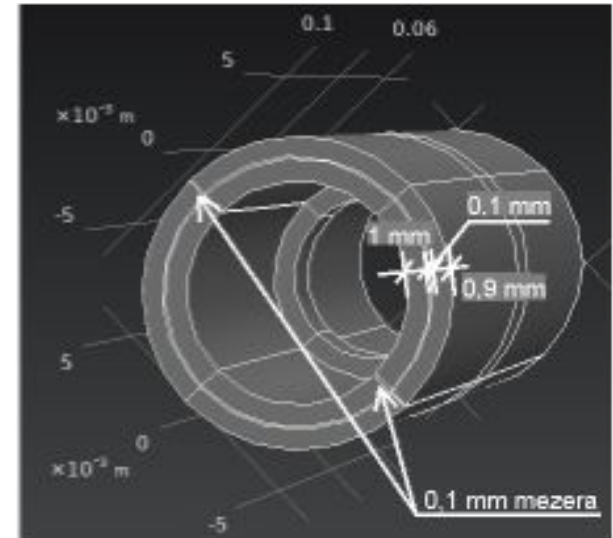
3 trubice testované v experimentech:



a)



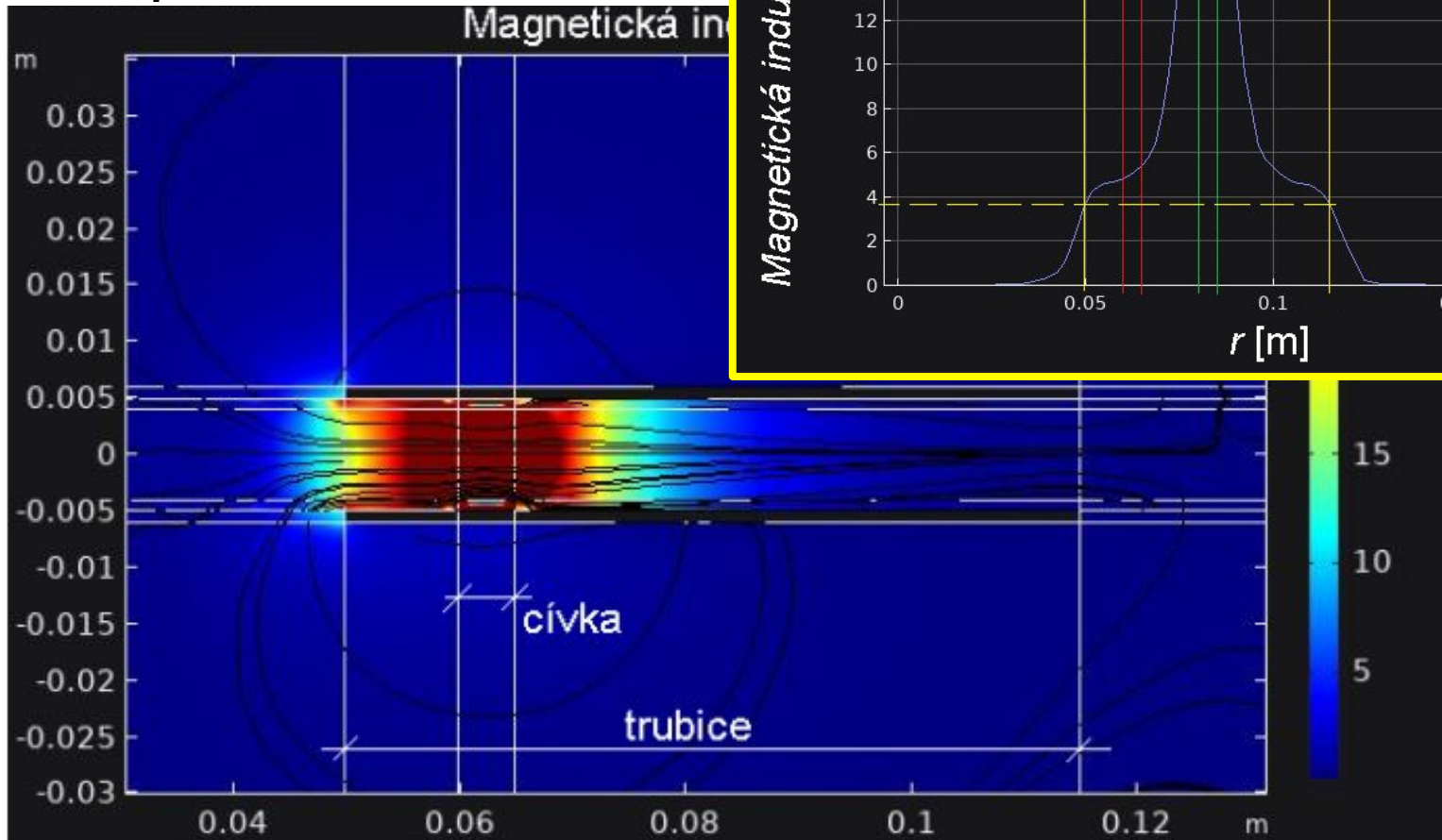
b)



c)

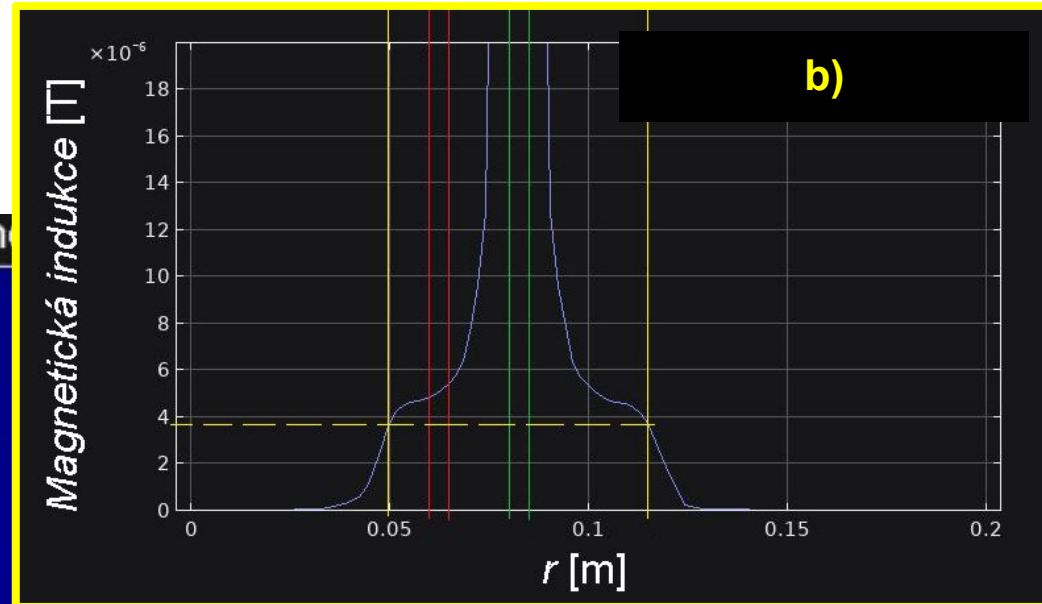
Trubice odpovídají měření 22.12.2020 a) válec rozřízný na dvě poloviny (2 mm od sebe), b) válec jednou proříznutý a c) válec jednou proříznutý a obepnutý druhým.

Princip siločárovodu:

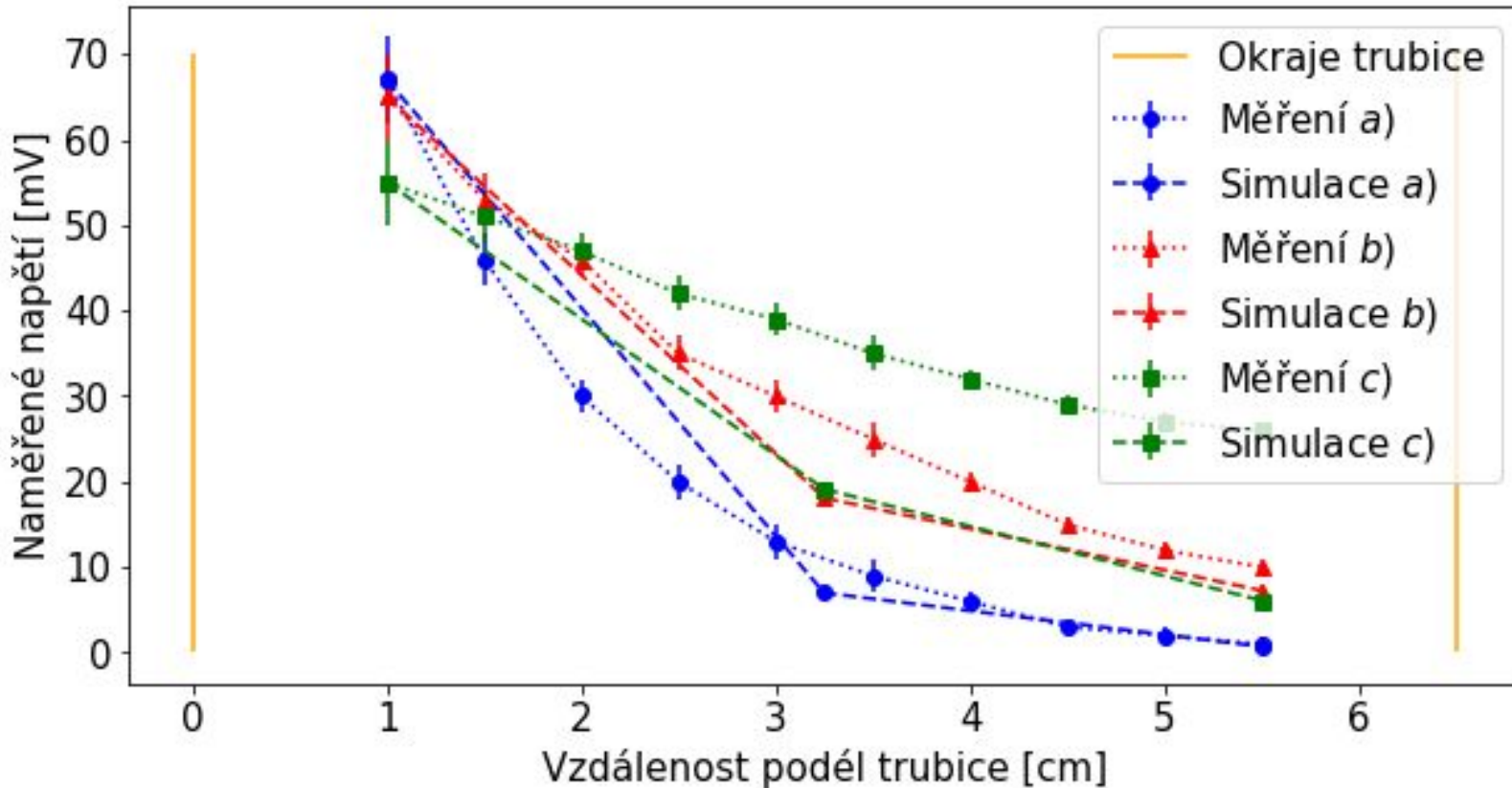


a)

Řez uspořádání s cívkou na okraji zobrazující „omezení“ magnetického pole pouze do prostoru trubice a) a graf magnetického pole podél osy pro cívku uprostřed b).



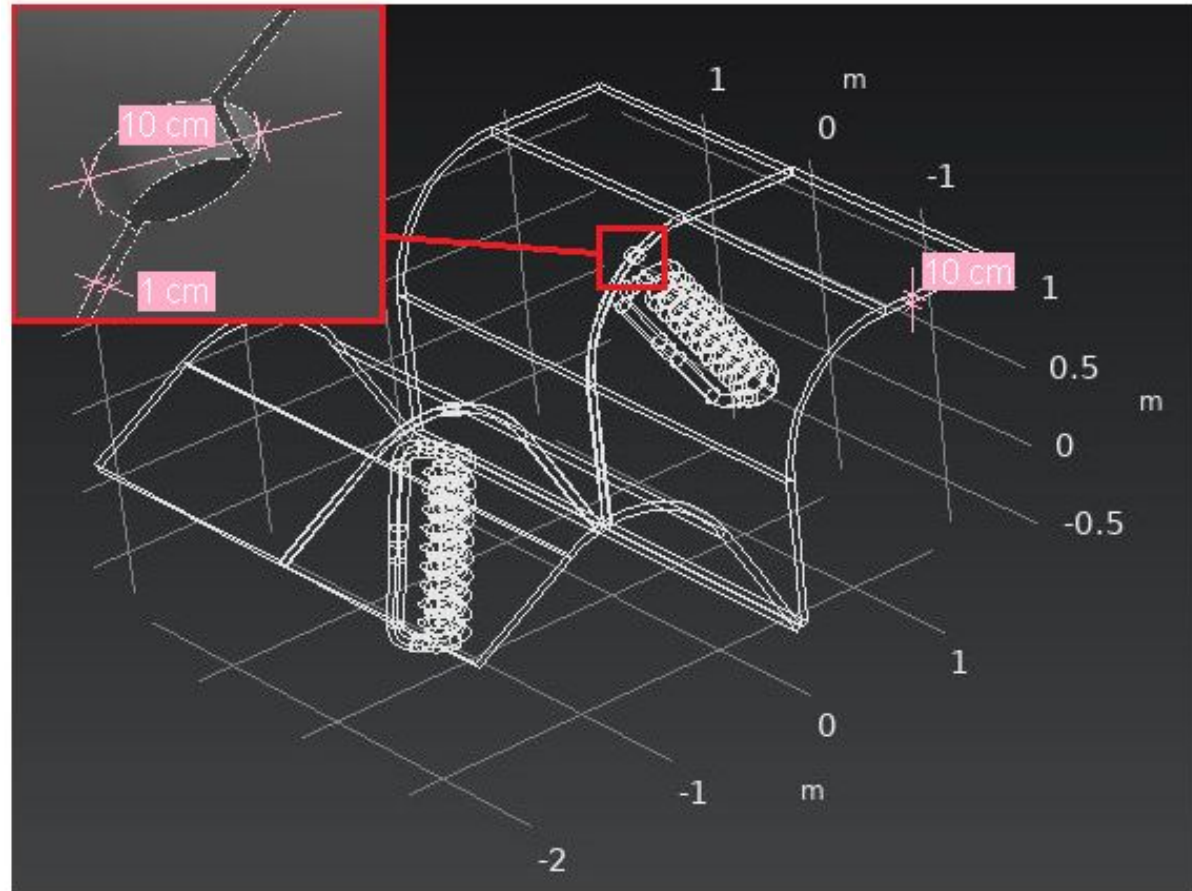
Srovnání:



Srovnání simulace s měřením závislosti indukovaného napětí v cívce, která je umístěná před trubicí s budící cívkou, na hloubce zasunutí budící cívky v trubicí.

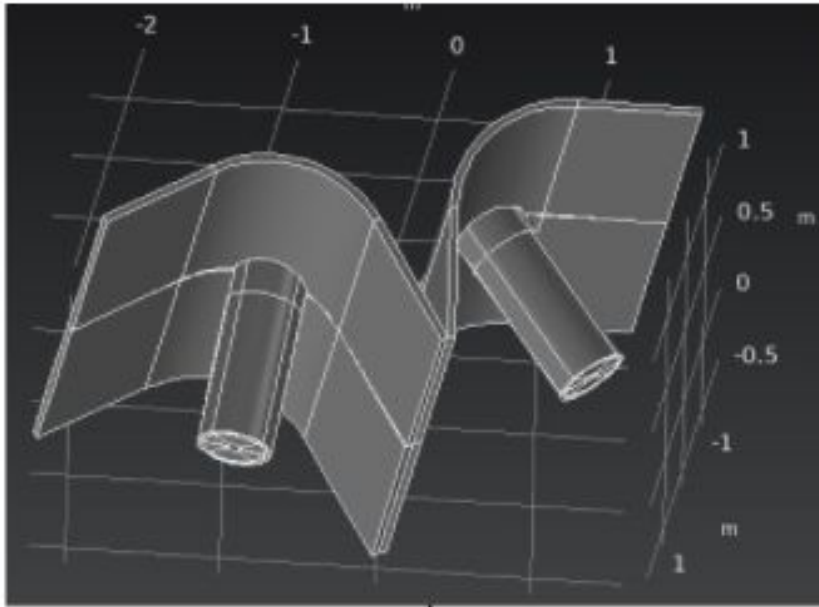
Původní funkční model:

- 1,7 MHz, 210 kA

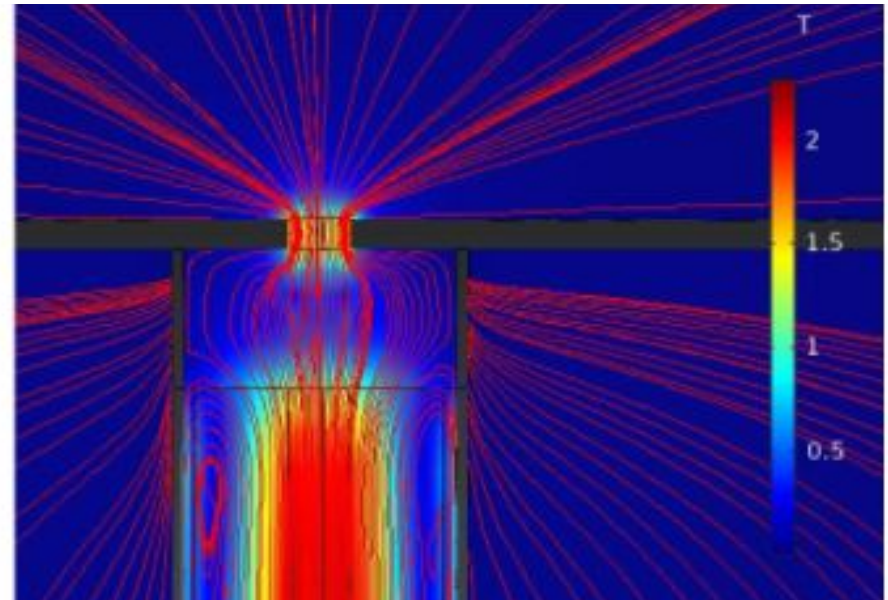


-> $B_{X\text{-point}} = 2,0 \text{ mT}$

Přidání válců kolem cívek:



a)

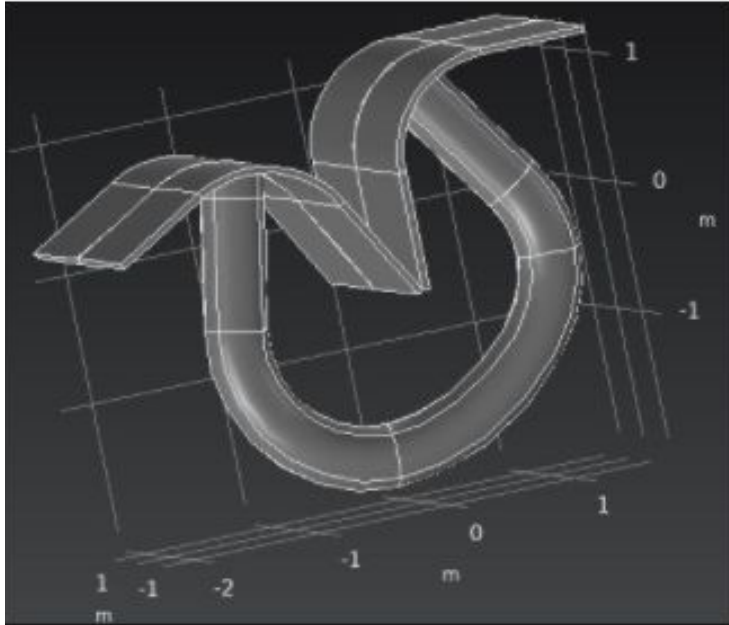


b)

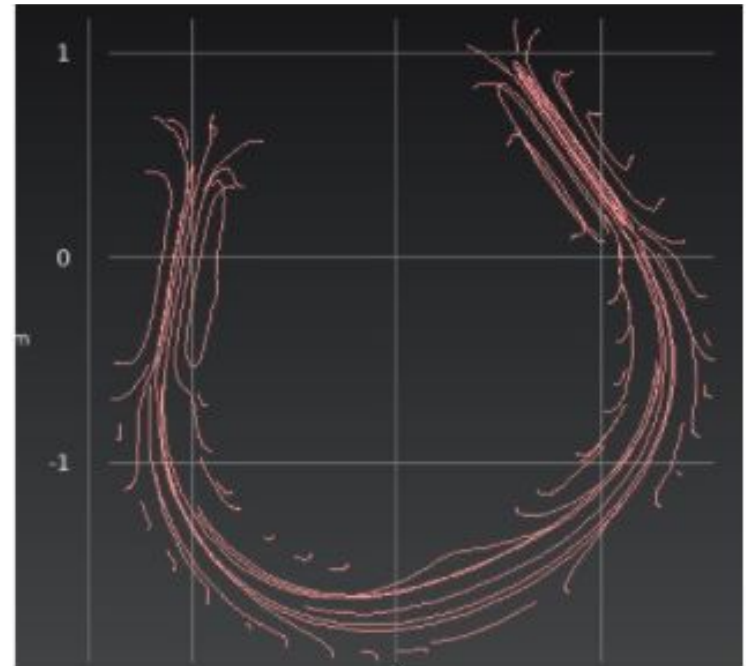
a) Pohled na model s cívkami v trubicích. b) Detail na zúžení pole při průchodu otvorem.

$$\rightarrow B_{X\text{-point}} = 6,5 \text{ mT}$$

Kompletní „siločárovod“:



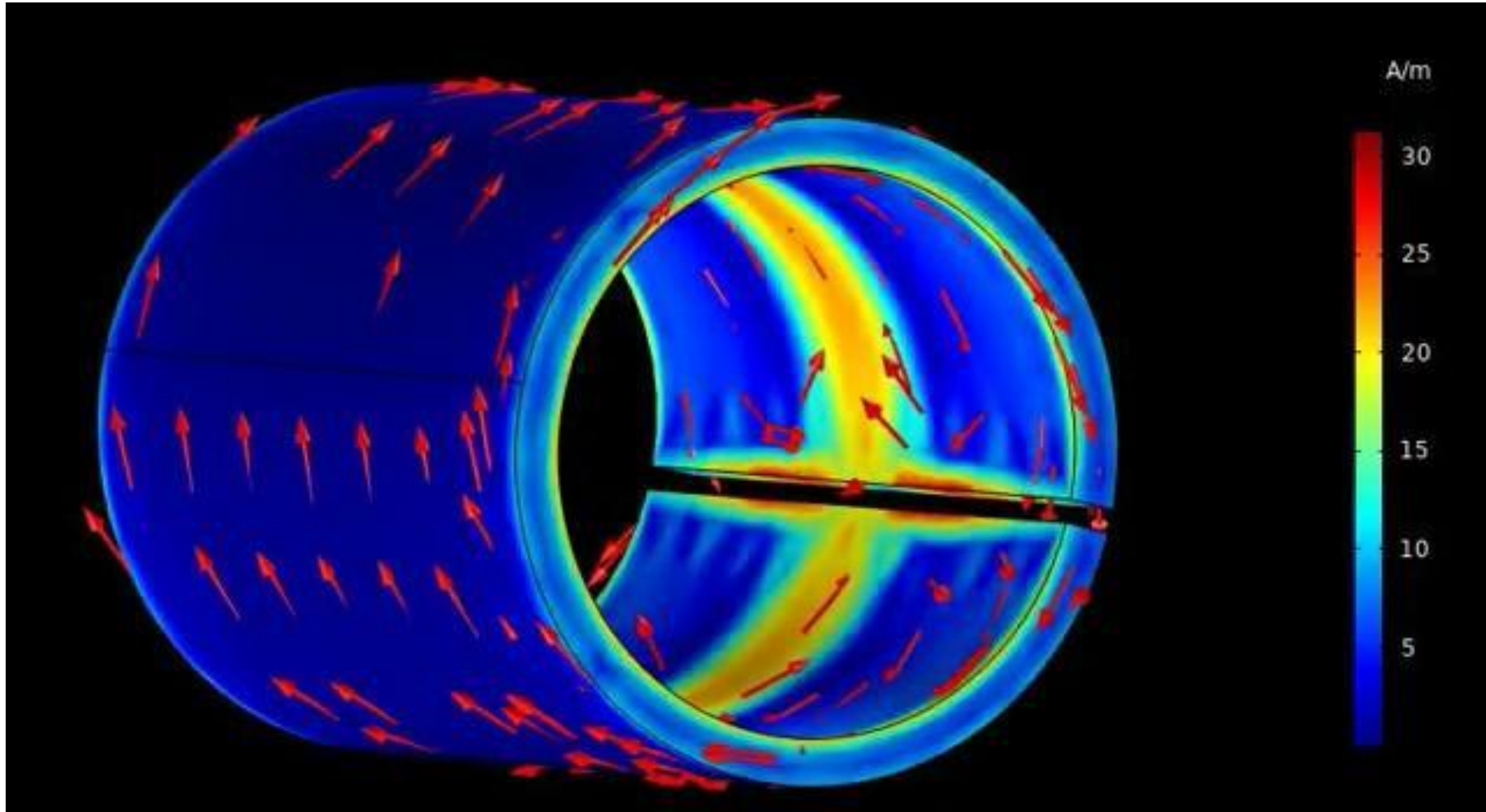
a)

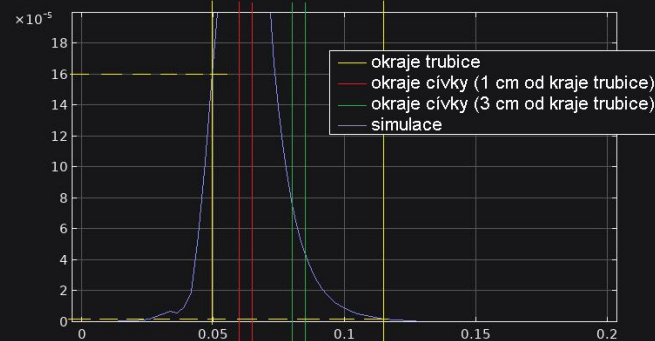


b)

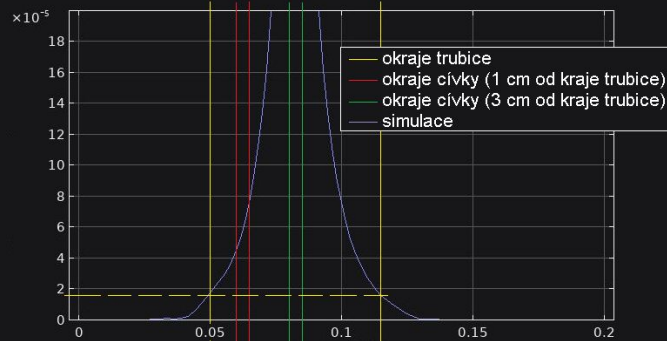
a) Pohled na model s kompletně stíněnými cívkami. b) Zobrazení magnetických indukčních čar v trubici.

$$\rightarrow B_{X\text{-point}} = 6,0 \text{ mT}$$

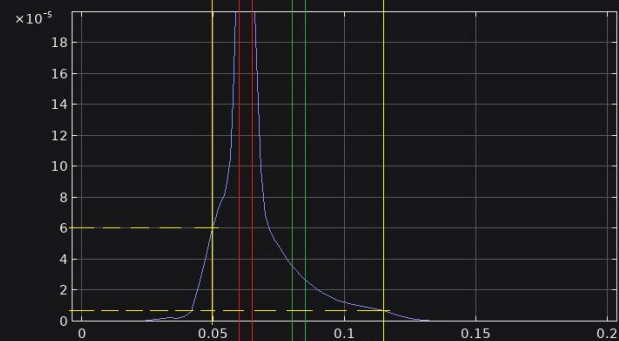




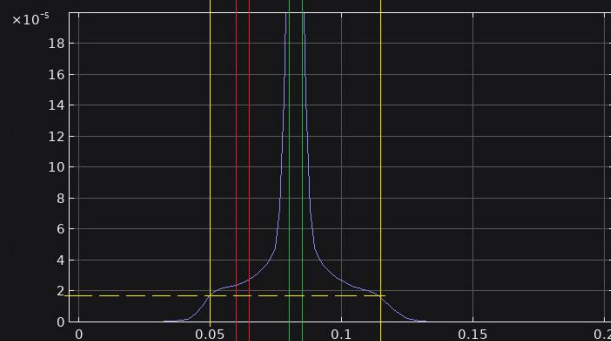
a)



d)



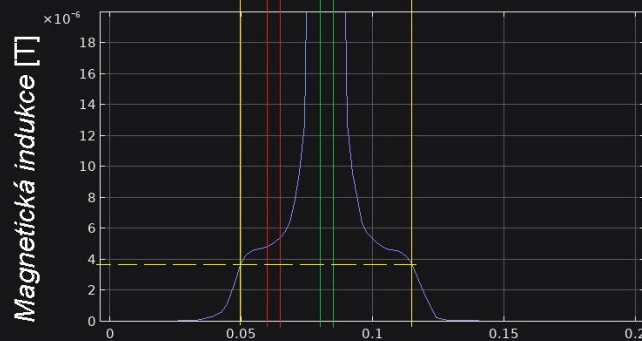
b)



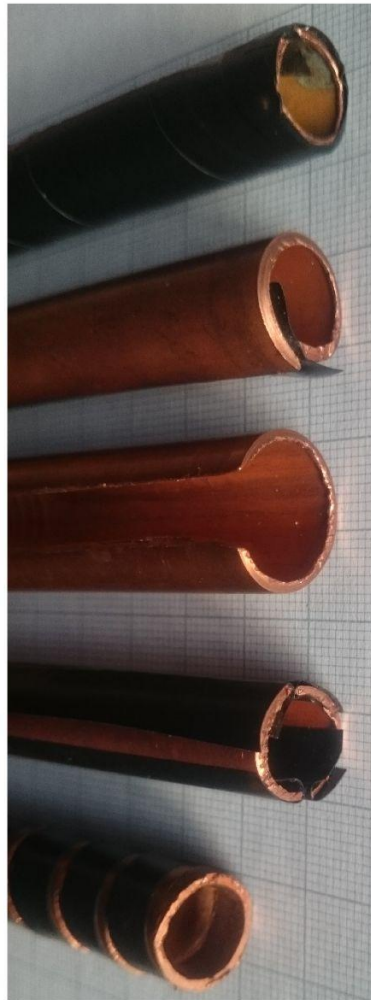
e)



c)



f)



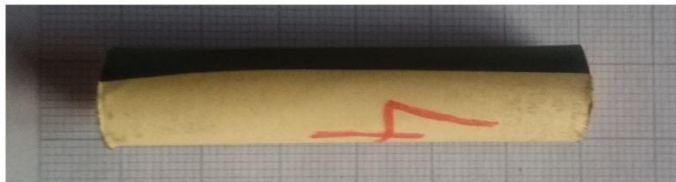
válec jednou prořízlý
(strany staženy k sobě a páskou odděleny)

válec přehnutý přes sebe
(strany přehnuty přes sebe a odděleny páskou)

sekundární válec pro obepnutí jiného
(využit v kombinaci s 1. válcem)

válec rozřízlý na dvě poloviny
(jednou byly stěny přimáčklé k sobě, podruhé byly odděleny 2 mm)

páskový válec
(měděný pásek namotán na stejný průměr jako ostatní)



4 vrstvy alobal+papír
(alobal byl motán současně s papírem, aby došlo k oddělení jednotlivých vrstev alobalo)