

# ŠÍŘENÍ TEPLA TKÁNÍ PO INTERAKCI S LASEROVÝM ZÁŘENÍM

J.URZOVÁ

ČVUT v Praze, Fakulta biomedicínského inženýrství

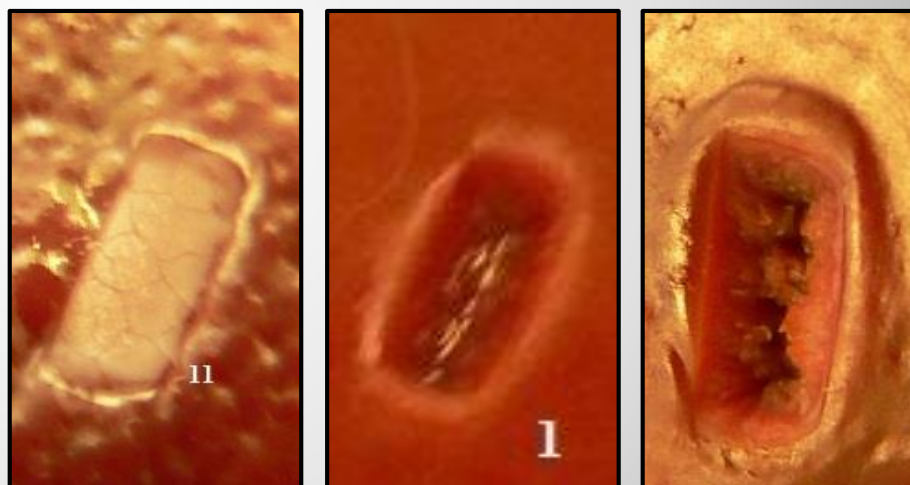
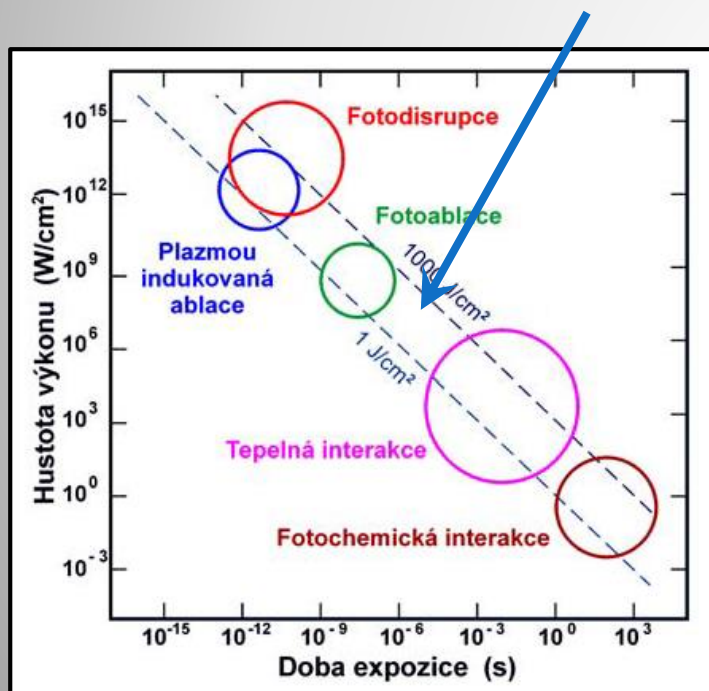




**Společné pracoviště Fakulty biomedicínského inženýrství ČVUT a 1.lékařské fakulty UK v Praze**

# Interakce laser – tkáň

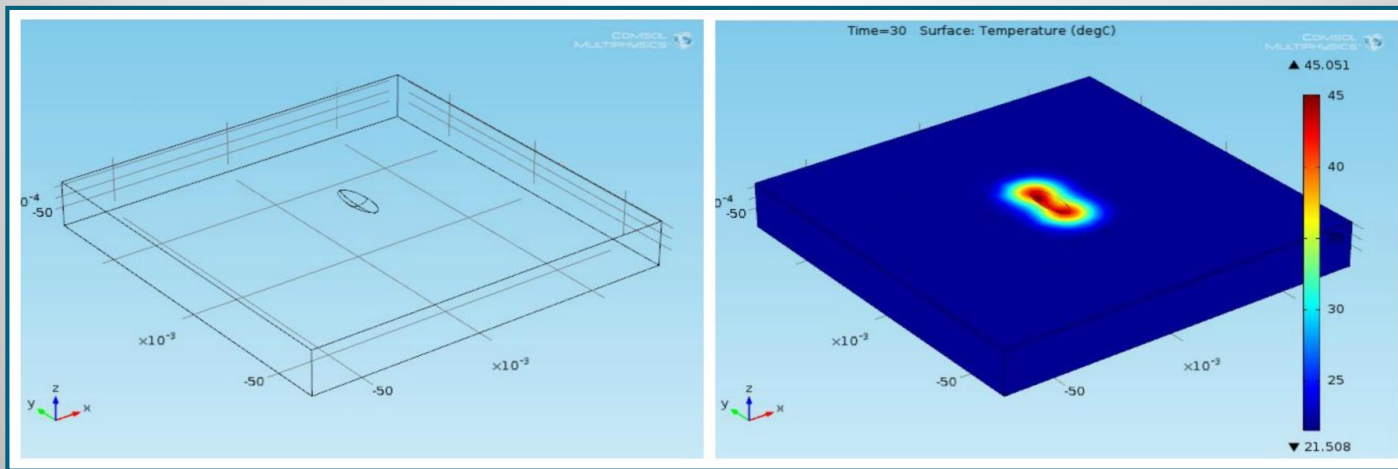
- Medicínské aplikace – zubní vrtačka, odstraňování nežádoucí tkáně
- Průběh a výsledek interakce závisí na typu tkáně a parametrech laseru (plošná hustota energie, doba expozice, opakovací frekvence).
- Náš výzkum – rozhraní mezi fotoablací a tepelnou interakcí.



Tepelná interakce a kombinace tepelné interakce a ablace (stopa: 8 × 20 mm)

# Modelování teplotních profilů

- COMSOL Multiphysics, modul „*Bioheat Transfer*“, mód „*Conduction*“
- Tepelná interakce – rovinný model s ozařováním povrchu
- Fotoablace – nerovinný model s kráterem, ozařování vnitřku kráteru
- Experimentální ověření modelu

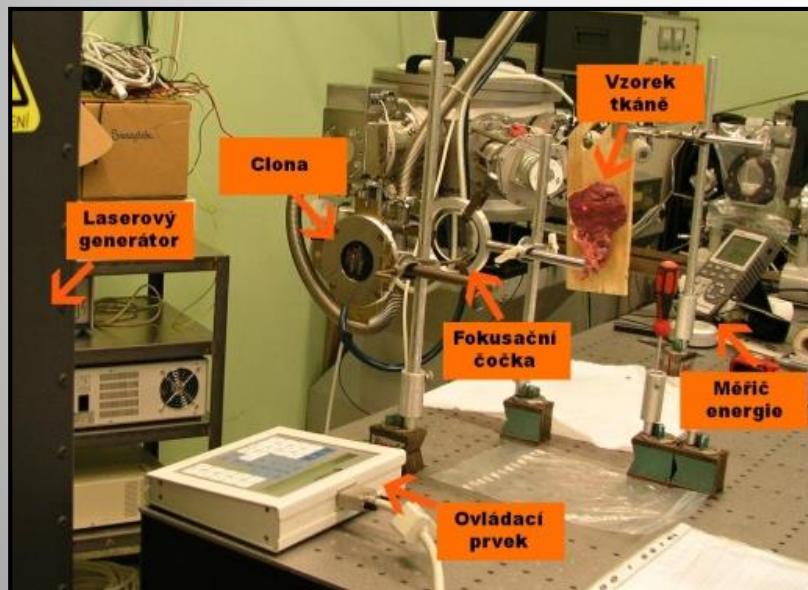


Model rozvoje teplotního pole vytvořený v programu COMSOL, vlevo geometrie vzorku s ablačním kráterem, vpravo grafický výstup s vyznačením dosažených teplot

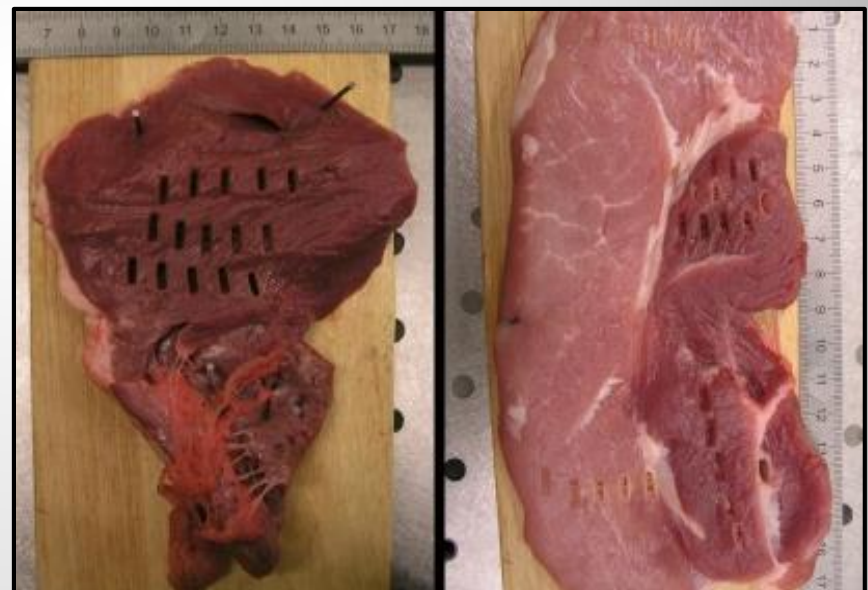


# Ablační krátery

- Zdroj: KrF excimerový laser (248 nm), délka pulsu 25 ns, 1 – 50 Hz
- Tkáně: svalovina (srdeční a kosterní), tuk, játra, kůže, kost (žebra)
- Cíl: 1) Určit ablační hloubku = hloubku tkáně odebrané na 1 puls  
2) Popsat tvar kráteru pro tvorbu geometrie modelu



Experimentální aparatura



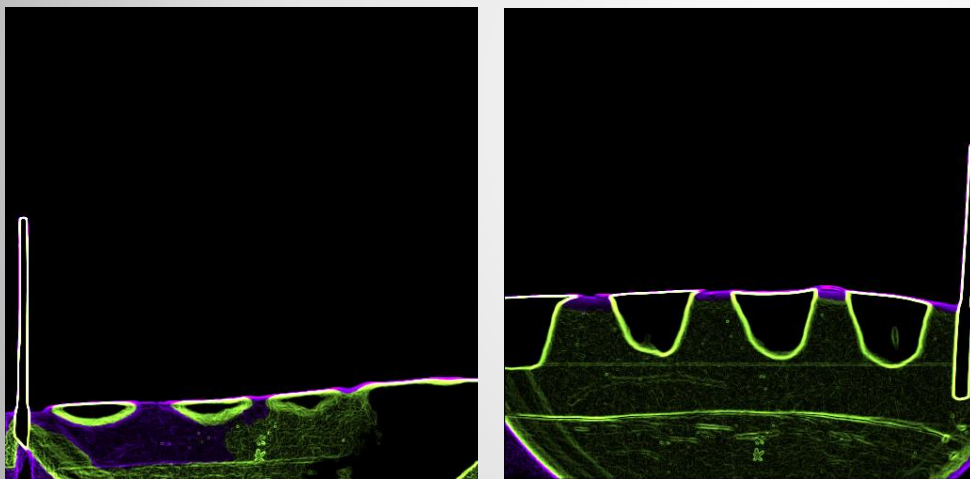
Ablační krátery ve vepřové srdeční a kosterní svalovině

Šíření tepla tkání po interakci s laserovým zářením



# Určení tvaru a hloubky kráterů

- Nová experimentální metoda – přesné zobrazení profilu kráteru
- CT snímky vzorků s kontrastní látkou (jodid draselný)
- Odečtení hloubky s využitím programu MATLAB



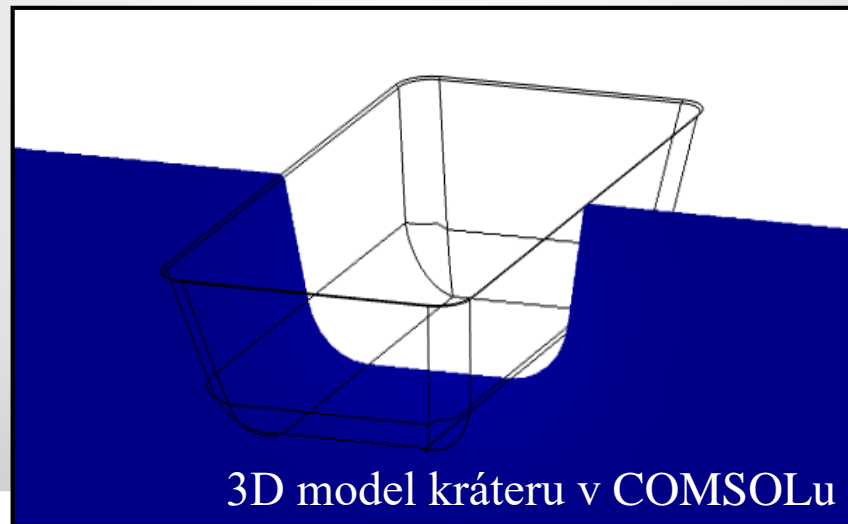
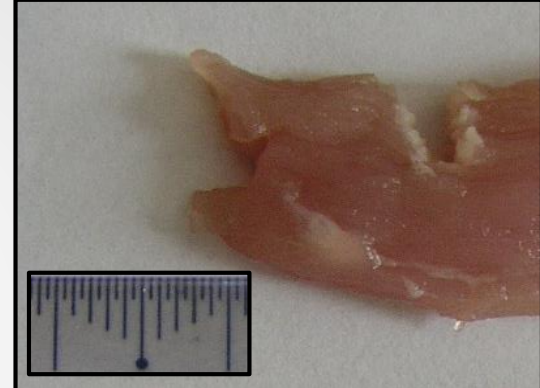
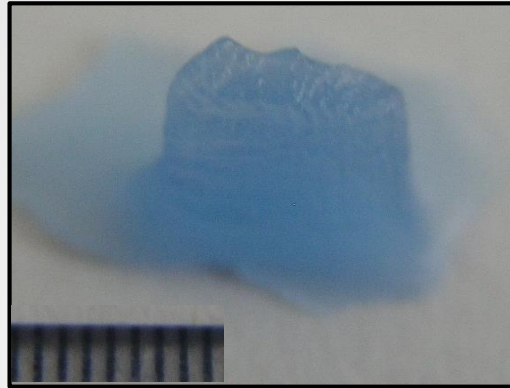
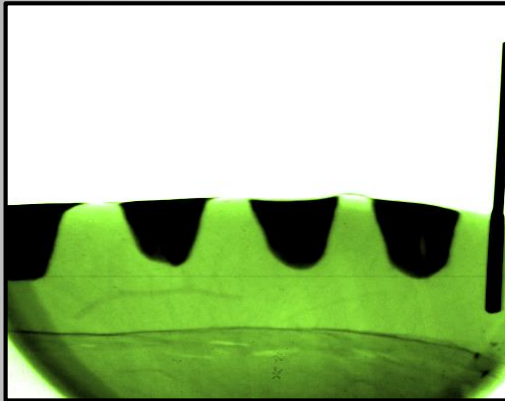
CT snímky profilu kráterů, které umožňují určit ablační hloubku a popsat profil kráteru.



CT přístroj PHYWE XR 4.0 expert X-ray unit

# Geometrie modelu pro kráter

- Vytvořena na základě CT snímků, odlitků a řezů reálných kráterů.



3D model kráteru v COMSOLu

Šíření tepla tkání po interakci s laserovým zářením



# Fyzika - Pennesův model

- Základní model pro studium přenosu tepla v tkáních.
- Vychází z rovnice pro přenos tepla vedením v pevných látkách, která je doplněna o další členy.

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda \nabla^2 T - \rho_b c_b \omega_b (T - T_{art}) + \rho SAR + Q_{met}$$

- hustota  $\rho$  [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- měrná tepelná kapacita  $c_p$  [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
- tepelná vodivost  $\lambda$  [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]
- teplotní difuzivita  $a$  [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]
- $a = \frac{\lambda}{\rho c_p}$
- Vliv krevní perfúze
- Absorpční rychlost přívodu energie elektromagnetickým zářením
- Příspěvek metabolických dějů v tkáni





# Fyzikální podstata modelu

- Zjednodušená Pennesova rovnice, neuvažujeme odvod tepla krevní perfúzí ani metabolické děje.
- Objemová hustota výkonu dopadajícího záření je popsána vztahem

$$Q(x, y, z) = Q_0 A_c (1 - R_c) \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{sgn} \left[ \frac{\sqrt{2}}{2} \left( \left| \frac{x}{a} - \frac{y}{b} \right| - \left| \frac{x}{a} + \frac{y}{b} \right| - 1 \right) \right] \right\} e^{-A_c |z|}$$

$Q_0$  – plošná hustota výkonu vysílaného záření

$R_c$  – reflexní koeficient tkáně (určen experimentálně)

$A_c$  – absorpční koeficient tkáně (určen experimentálně)

$a, b$  – rozměry stopy paprsku

$e^{-A_c |z|}$  – proces absorpce popsáný pomocí Lambert-Beerova zákona



# Fyzikální podstata modelu

- Laser pracuje v pulsním režimu – krátké pulsy se zvolenou frekvencí
- Pulsní funkce – popisuje časový průběh dodávané energie, násobí se jí vztah pro hustotu výkonu záření.

$$p(t) = \frac{1}{2} \left\{ \operatorname{sgn} \left[ \sin \left( -\frac{\pi(3t_1 + t_2)}{2(t_1 + t_2)} \right) - \sin \left( \frac{2\pi t}{t_1 + t_2} - \frac{\pi(3t_1 + t_2)}{2(t_1 + t_2)} \right) \right] + 1 \right\}$$

$t_1$  – doba, kdy dochází k dodávání energie (laser svítí),  
pro daný model konstantou a jeho hodnota je 25 ns.

$t_2$  – doba, kdy nedochází k dodávání energie (laser nesvítí),  
proměnný parametr modelu a závisí na frekvenci

- Okrajové podmínky:

Hlubší vrstvy vzorku – plně tepelně izolováno  $n.(\lambda \nabla T) = 0$

Vnější povrch – sdílení tepla volnou konvekcí  $n.(\lambda \nabla T) = h(T_{ext} - T)$

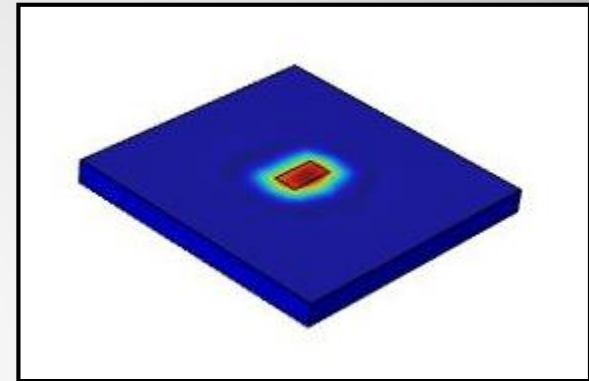
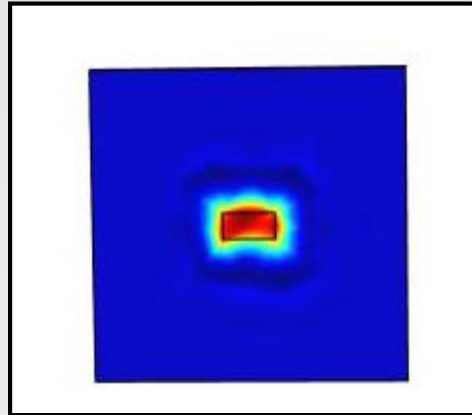
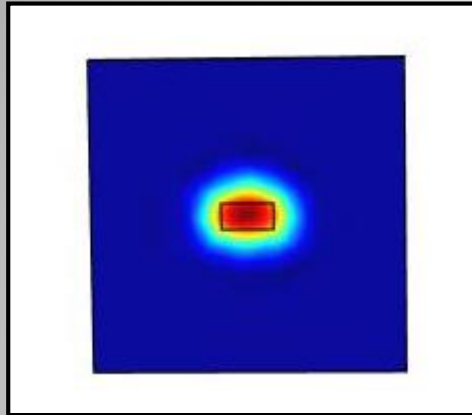


# Zadávané hodnoty parametrů modelu

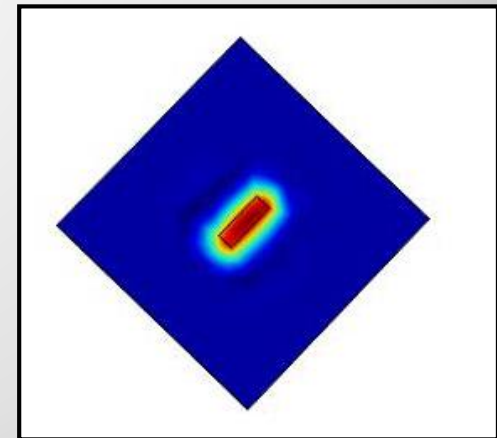
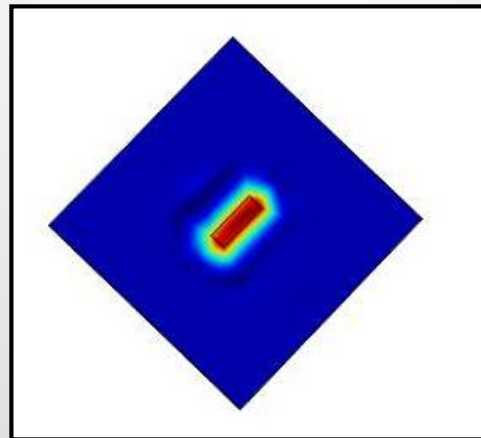
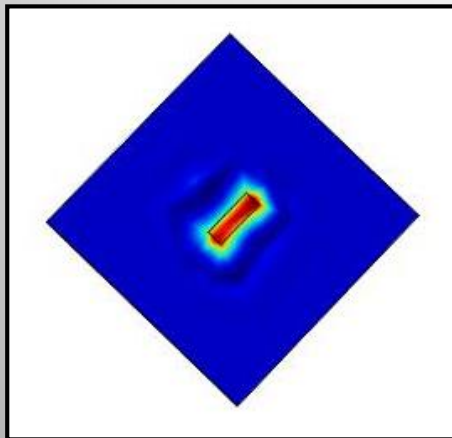
Parametr	Značka	Jednotka	Hodnota
Tepłota tkáňe	$T$	K	294
Okolní teplota	$T_{ext}$	K	294
Tloušťka vrstvy	$l$	mm	10
Hustota tkáňe	$\rho$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1036 – 1049
Měrná tepelná kapacita tkáňe	$c_p$	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	3 430 – 3 730
Tepelná vodivost tkáňe	$\lambda = k$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	0,48 – 0,56
Rychlost krevní perfuze	$\omega_b$	$\text{s}^{-1}$	0 (neživá tkáň)
Absorpční koeficient tkáňe	$A_c$	$\text{m}^{-1}$	2800 - 5500
Reflexní koeficient tkáňe	$R_c$	-	0,1
Plošná hustota energie	$\psi$	$\text{mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$	60 - 130
Šířka stopy paprsku	$a$	mm	8,5 – 12,5
Výška stopy paprsku	$b$	mm	13 – 20,5



# Výstupy pro tepelnou interakci



Porovnání tkání: srdce (vlevo) a tuk

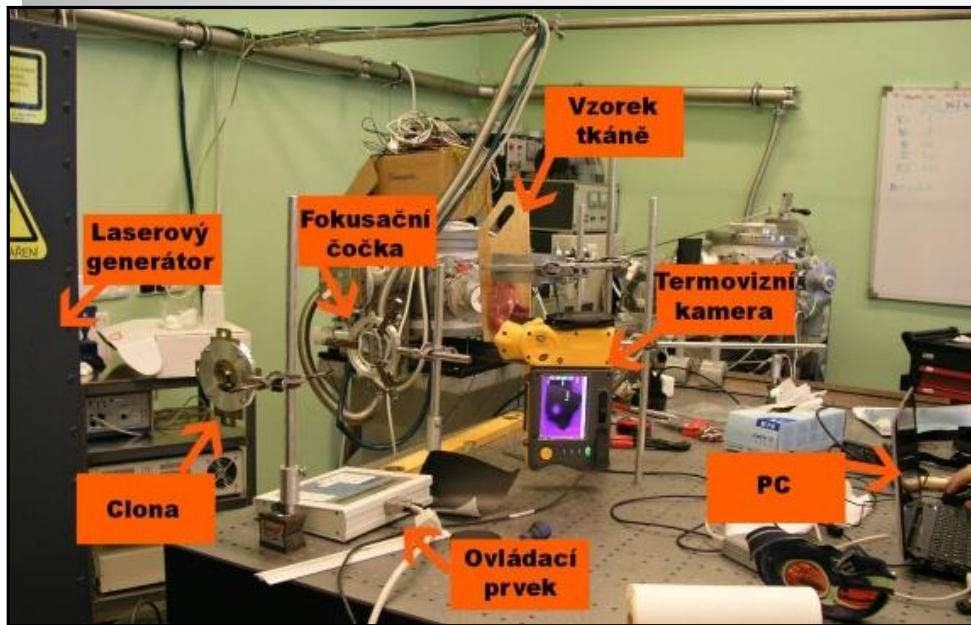


Časový rozvoj po 5 sekundách (svalovina)

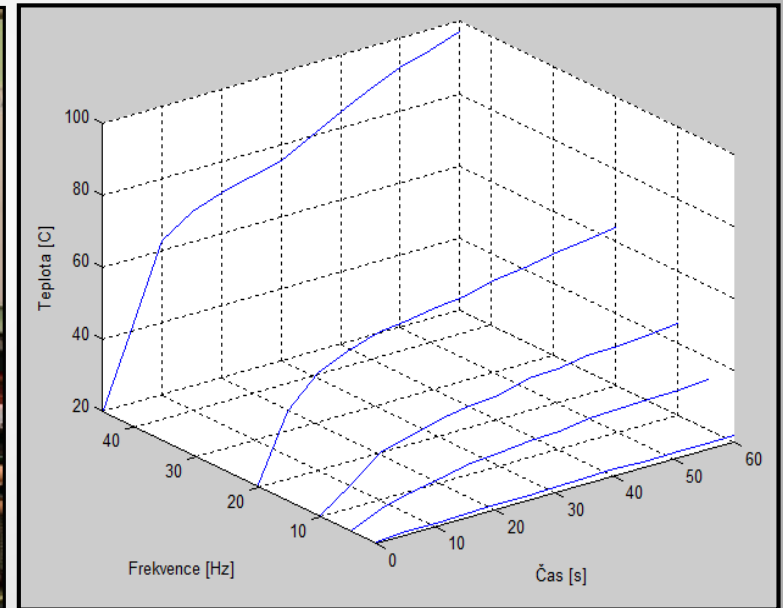
Šíření tepla tkání po interakci s laserovým zářením

# Experimentální ověření modelu

- Pomocí termokamery FLUKE TI55/20FT (citlivost  $\leq 0,050$  °C)
- Porovnávání skutečných dosažených teplot a modelu



Aparatura pro snímání povrchového teplotního pole

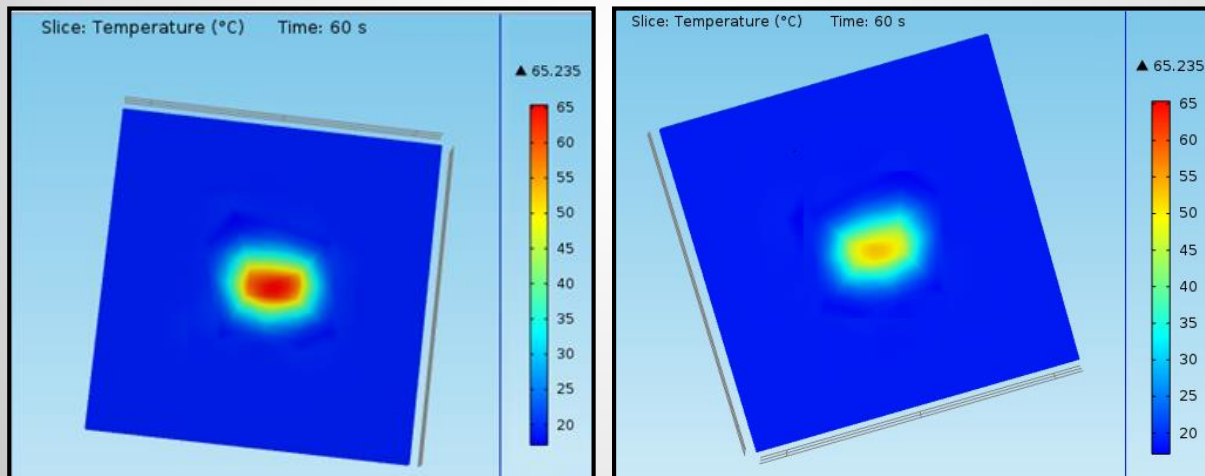


Závislost maximální povrchové teploty na frekvenci

Šíření tepla tkání po interakci s laserovým zářením

# Termovizní ověření modelu

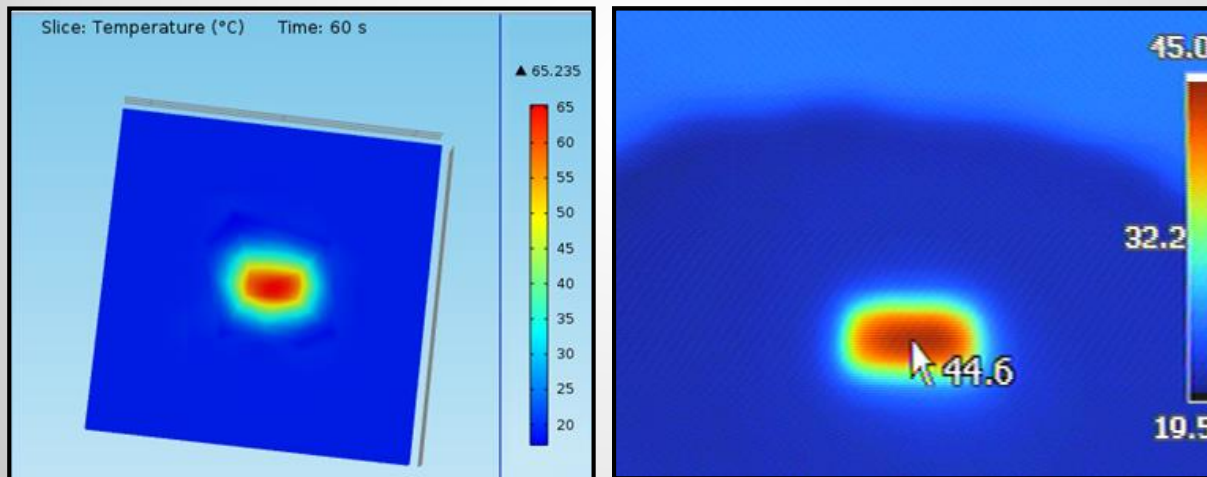
- Grafickým výstupem programu COMSOL jsou vykreslená teplotní pole ve vybrané barevné škále nebo sestava izoterm.
- Teoretické výstupy lze porovnávat se záznamem termovizní kamery.



Přední (vlevo) a zadní strana vzorku tkáně s modelovaným rozložením teplotního pole pro hustotu energie  $62 \text{ mJ.cm}^{-2}$  a opakovací frekvenci 10 Hz

# Termovizní ověření modelu

- Grafickým výstupem programu COMSOL jsou vykreslená teplotní pole ve vybrané barevné škále nebo sestava izoterm.
- Teoretické výstupy lze porovnávat se záznamem termovizní kamery.

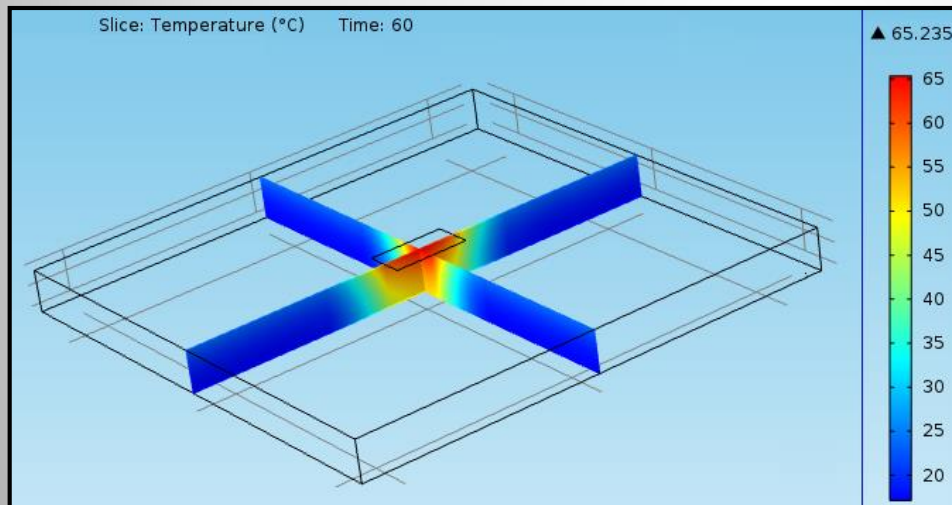


Srovnání modelu (vlevo) a skutečného záznamu teplotního pole pro hustotu energie  $62 \text{ mJ}\cdot\text{cm}^{-2}$  a opakovací frekvenci 10 Hz



# Hlubkové ověření modelu

- Termokamera snímá pouze povrch ozářené tkáně, pokud chceme přesnější ověření modelu, můžeme využít příčného řezu.
- Při vyhodnocování posuzujeme strukturální změny tkáně, ke kterým dochází při dosažení hraničních teplot.



Příčný řez modelovanou tkání

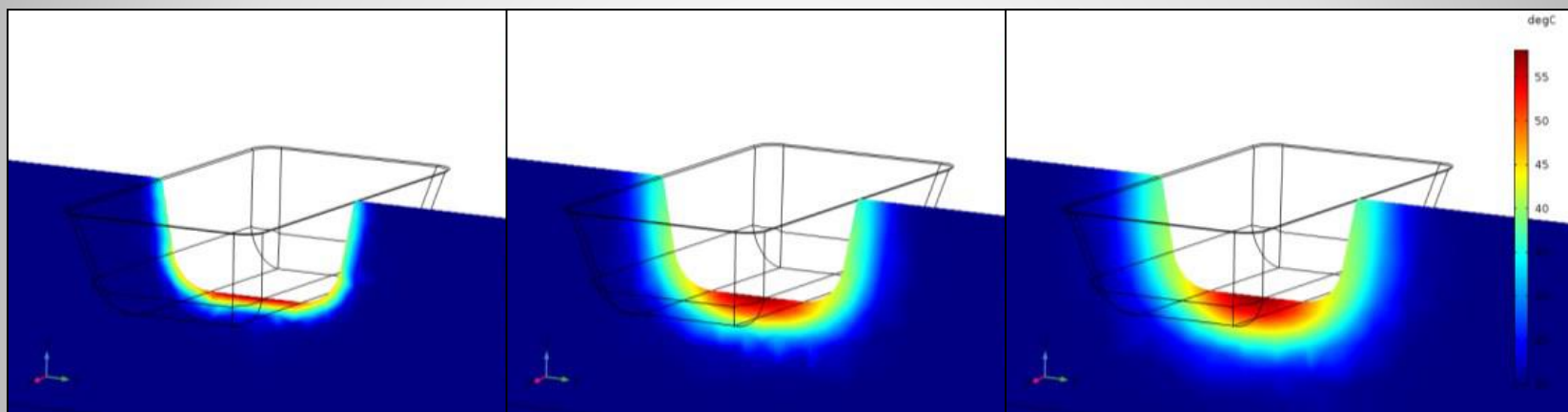


Typické změny tkáně při tepelné interakci



# Výstupy modelu

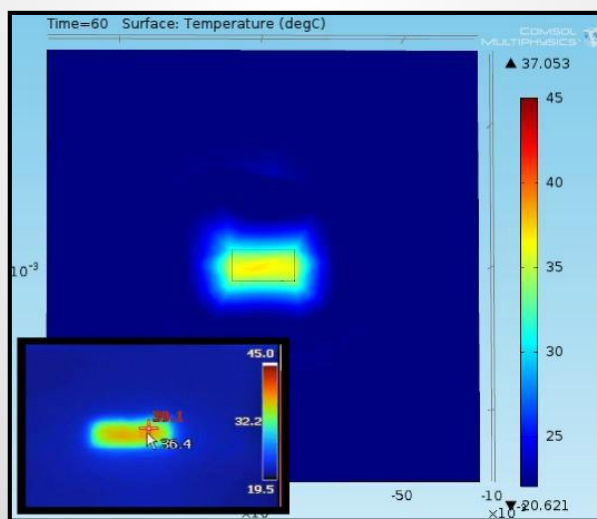
- Průběh rozvoje teplotního pole v ablačním kráteru v průběhu jednoho pulsu

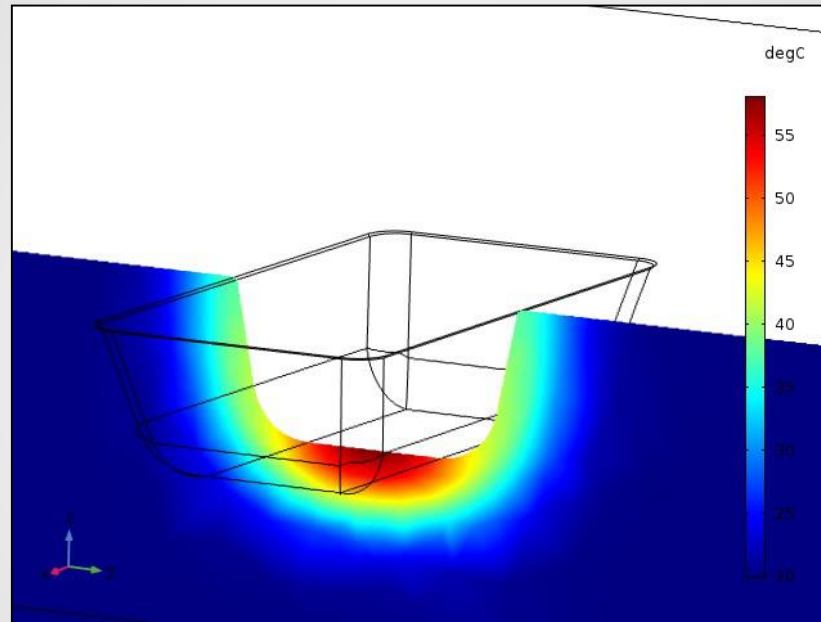


- GIF - dynamicky

# Závěr

- Vytvořený model velmi dobře odpovídá realitě a je použitelný pro předpovídání průběhu teplot při zákroku.
- Umožňuje řešit zadání pro různé typy a parametry laseru a tkáně.
- Je možné zohlednit změny parametrů tkáně v průběhu zákroku (teplotní i časová závislost).





**Děkuji za pozornost**

Šíření tepla tkání po interakci s laserovým zářením