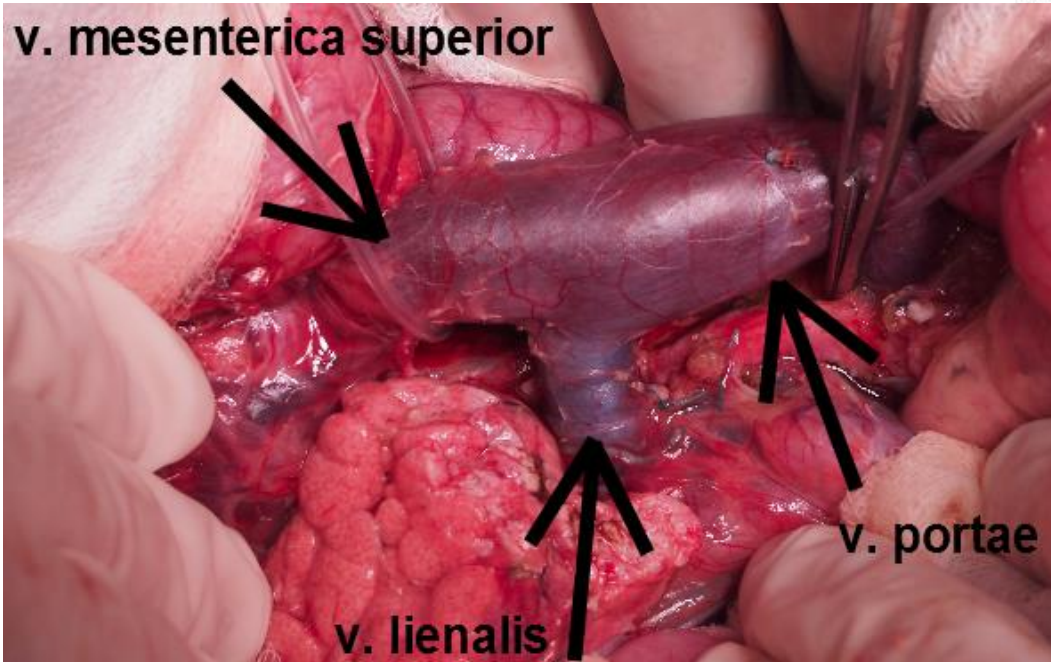
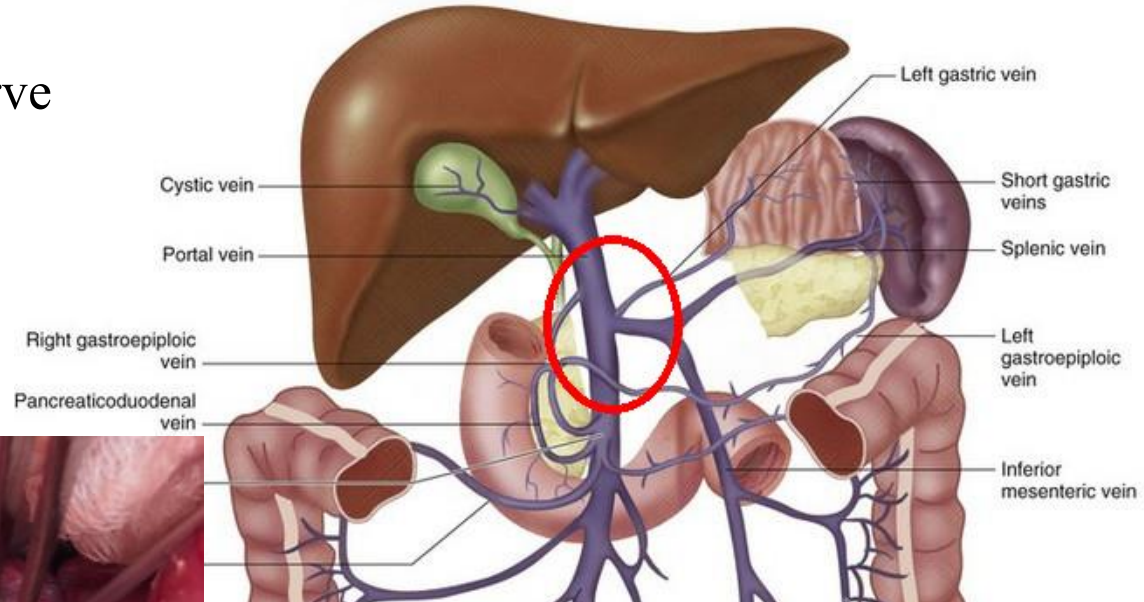


Rekonstrukce portálního řečiště v rámci chirurgického
řešení pokročilého karcinomu pankreatu
– experiment na velkém zvířeti
(biomechanická část)

Vimmr J., Jonášová A., Liška V., Pálek R., Třeška V.

- matematické modelování proudění krve v rekonstruované portální žíle
- ◆ analýza postoperační hemodynamiky
- ◆ posouzení rizika vzniku trombózy



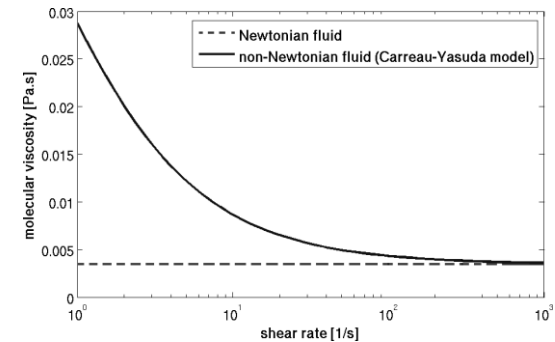
- proudění krve – laminární proudění nestlačitelné neneutonské kapaliny
 - ◆ nelineární systém Navierových-Stokesových rovnic ve 3D

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0,$$

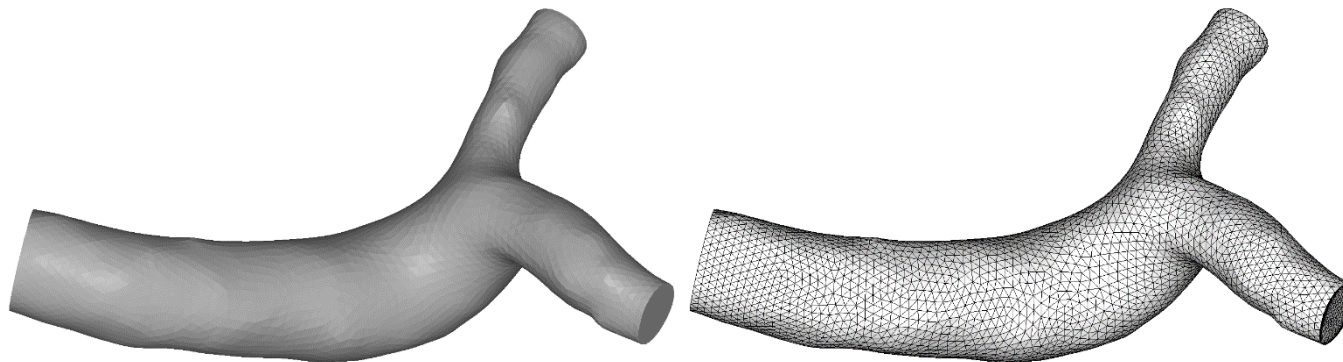
$$\frac{\partial v_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (v_i v_j) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\eta(\dot{\gamma}) \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right], \quad i, j = 1, 2, 3$$

- ◆ dynamická viskozita krve jako funkce smykové rychlosti – Carreau-Yasuda model [Cho & Kensey (1991)]

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left[1 + (\lambda \dot{\gamma})^a \right]^{\frac{n-1}{a}}$$



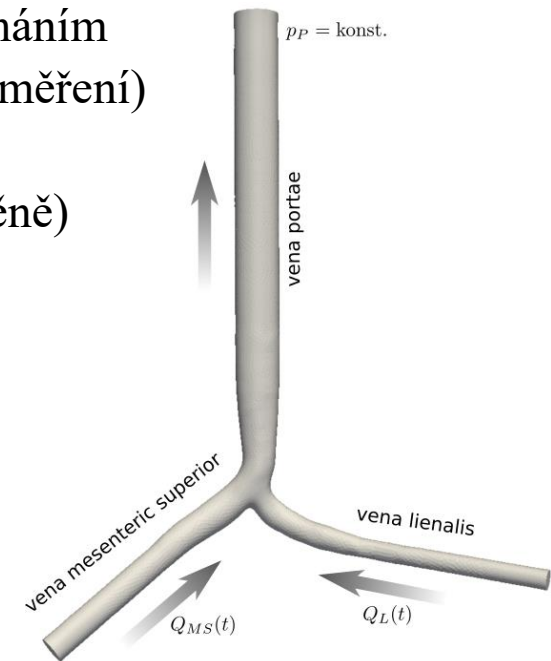
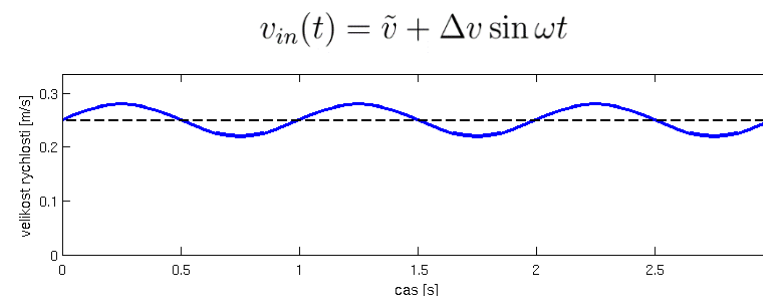
- ◆ geometrie modelů a generování sítí – sw Altair HyperMesh



[Cho & Kensey (1991)]

Cho, Y.I., Kensey, K.R., Effects of the non-Newtonian viscosity of blood on flows in diseased arterial vessels. Part I: Steady flows, *Biorheology* 28 (1991) 241-262.

- vlastní výpočetní software založený na projekční metodě a metodě konečných objemů (úspěšně užít na celé řadě úloh kardiovaskulární biomechaniky – bypassy, karotidy, portální řečiště ...)
- ◆ *vstupy* (vena mesenterica superior & vena lienalis):
 - mírně pulzační proudění způsobené tlukotem srdce/dýcháním
 - časově proměnné konstantní rychlostní profily (in-vivo měření)
- ◆ *výstup* (vena portae): konstantní tlak 500 Pa (cca 5 cmH₂O)
- ◆ *stěny*: nepropustné a nepoddajné (podmínka nulové rychlosti na stěně)



[Vimmr et al. (2013)]

Vimmr, J., Jonášová, A., Bublík, O., Numerical analysis of non-Newtonian blood flow and wall shear stress in realistic single, double and triple aorto-coronary bypasses, *International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering* 29 (10) (2013) 1057-1081.

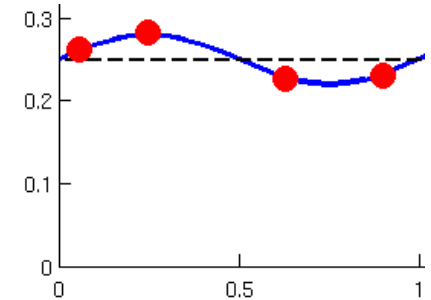
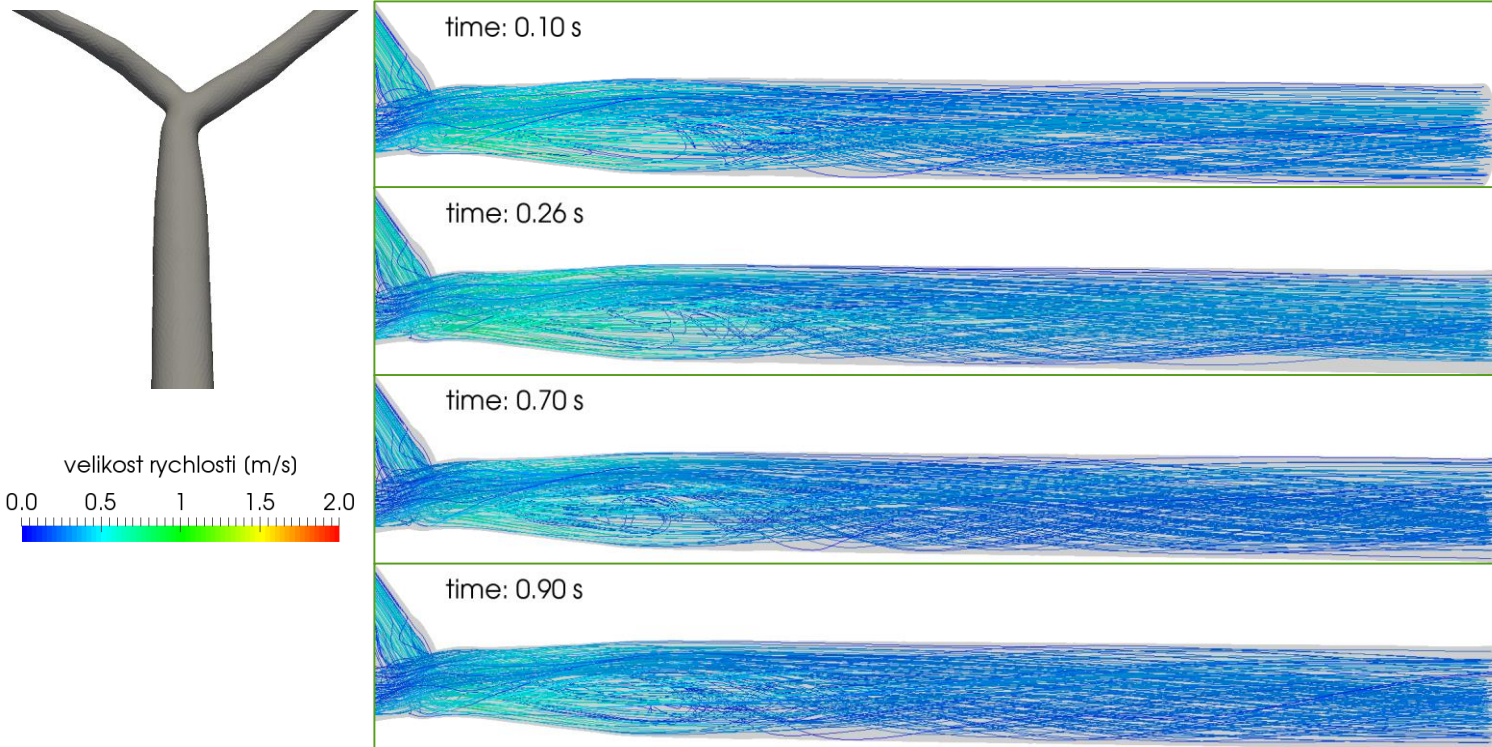
[Jonášová et al. (2014)]

Jonášová, A., Bublík, O., Vimmr, J., A comparative study of 1D and 3D hemodynamics in patient-specific hepatic portal vein networks, *Applied and Computational Mechanics* 8 (2) (2014) 177-186.

[Jonášová & Vimmr (2016)]

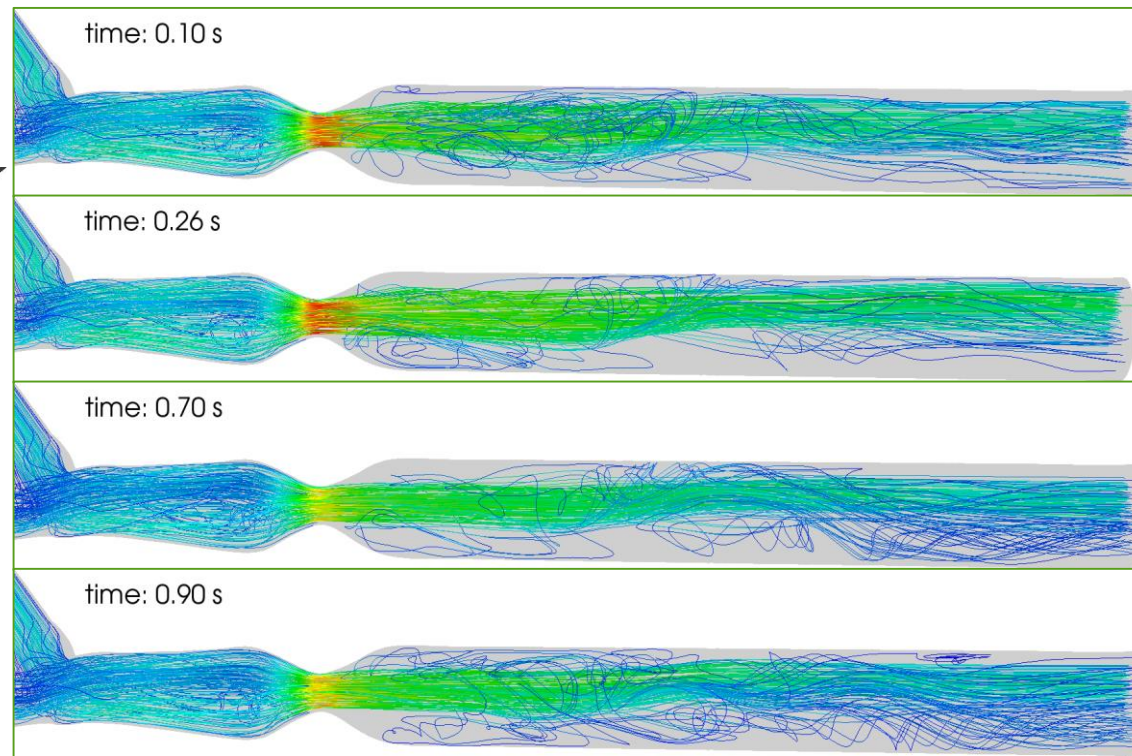
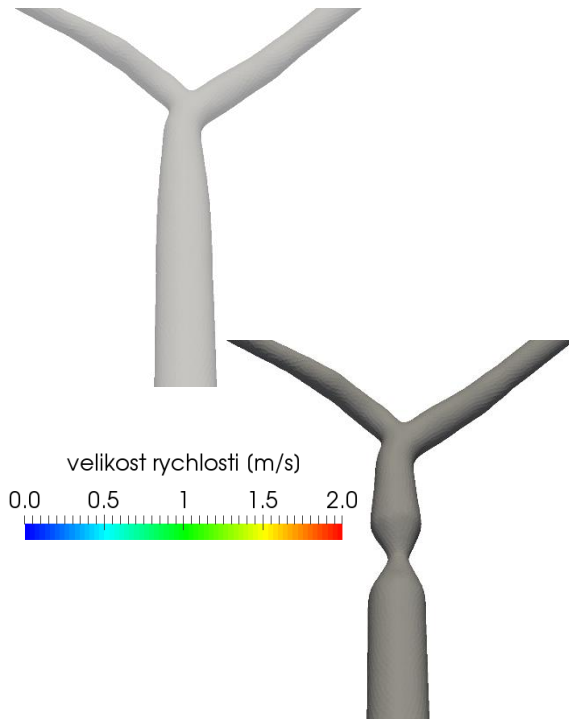
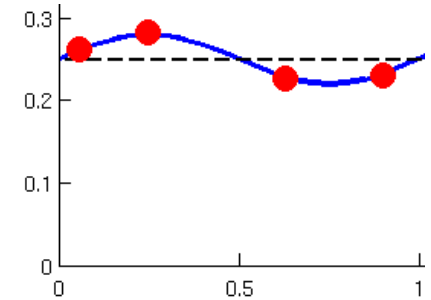
Jonášová, A., Vimmr, J., Noninvasive assessment of carotid artery stenoses by the principle of multiscale modelling of non-Newtonian blood flow in patient-specific models, *Applied Mathematics and Computation*, 2016. (submitted)

- pre- a post-operační stav u prasete R2 (zachování průsvitu portální žíly)
 - ◆ dominantní vliv geometrie na podobu proudového pole
 - ◆ vznik složitých tokových struktur („jet flow“, recirkulace, ...)
 - ◆ výrazné lokální nárůsty ve velikosti rychlosti (až 10-násobné)

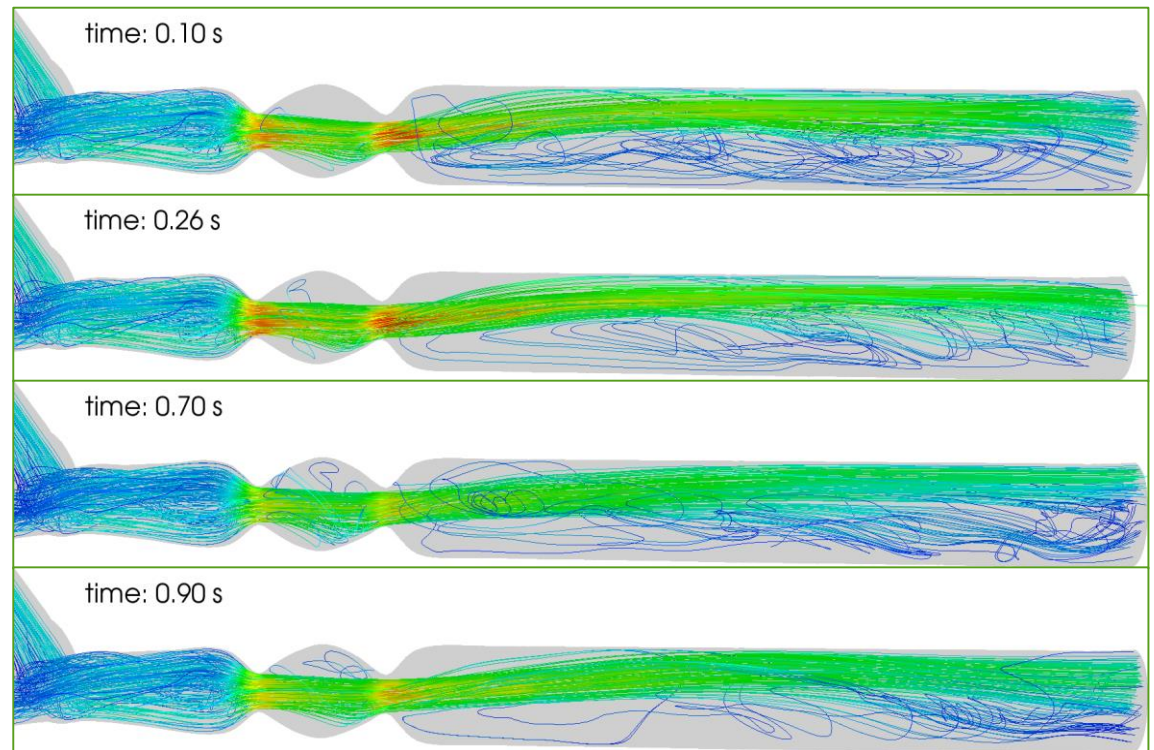
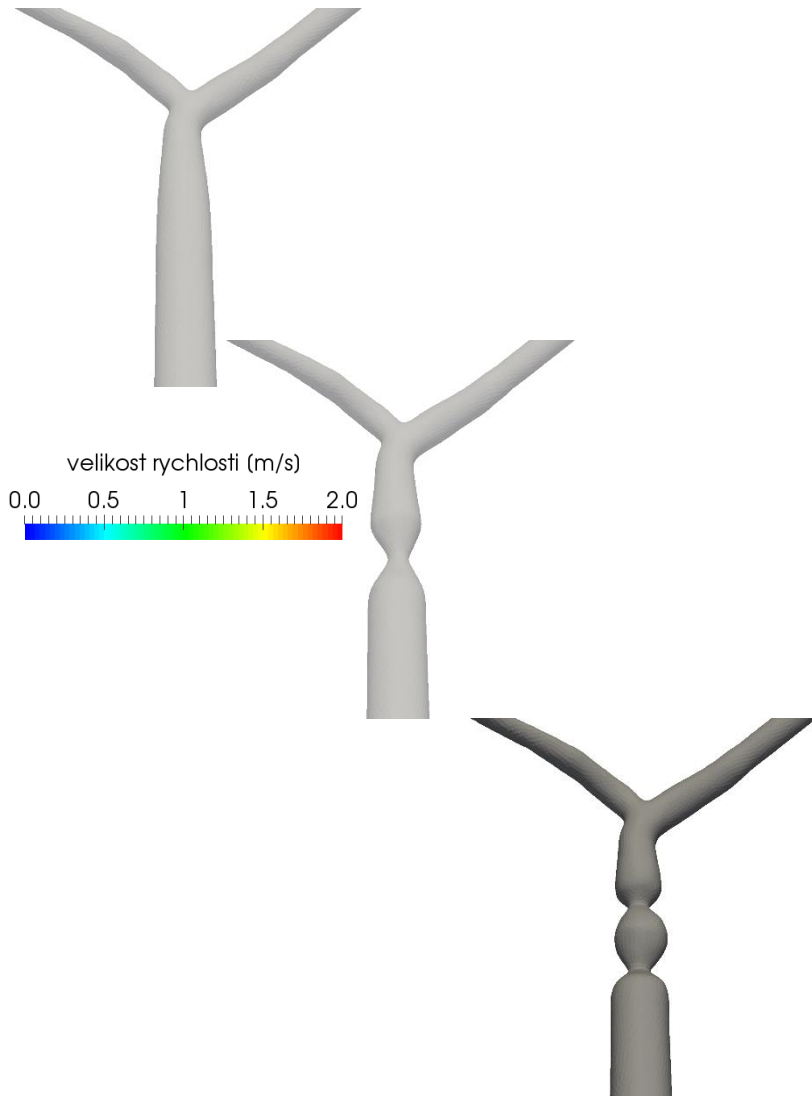
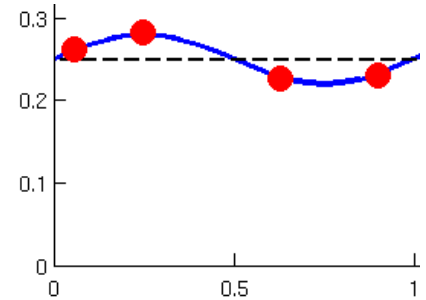


Výsledky – proudové pole

- pre- a post-operační stav u prasete R2 (zachování průsvitu portální žíly)
 - ◆ dominantní vliv geometrie na podobu proudového pole
 - ◆ vznik složitých tokových struktur („jet flow“, recirkulace, ...)
 - ◆ výrazné lokální nárůsty ve velikosti rychlosti (až 10-násobné)



- pre- a post-operační stav u prasete R2 (zachování průsvitu portální žíly)
 - ◆ dominantní vliv geometrie na podobu proudového pole
 - ◆ vznik složitých tokových struktur („jet flow“, recirkulace, ...)
 - ◆ výrazné lokální nárůsty ve velikosti rychlosti (až 10-násobné)



- vznik trombu ovlivňuje celá řada biologických, chemických a fyzikálních faktorů

- vliv hemodynamiky**

- ◆ **nepřirozená stimulace endotelu cévní stěny**

- nízké hodnoty smykového napětí na stěně (WSS), oscilační charakter WSS

$$\text{TAWSS} = \frac{1}{T} \int_0^T |\tau_w| dt$$

(time-averaged WSS)

$$\text{OSI} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\left| \int_0^T \tau_w dt \right|}{\int_0^T |\tau_w| dt} \right)$$

(oscillatory shear index)

- ◆ **aktivace trombocytů v důsledku abnormálních hodnot WSS**

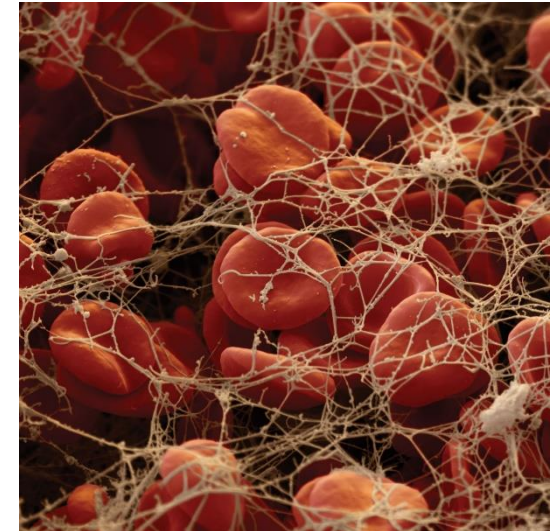
- velmi vysoké hodnoty WSS

- ◆ **místa se zvýšenou agregací krevních částic** [Buchanan et al. (2000)]

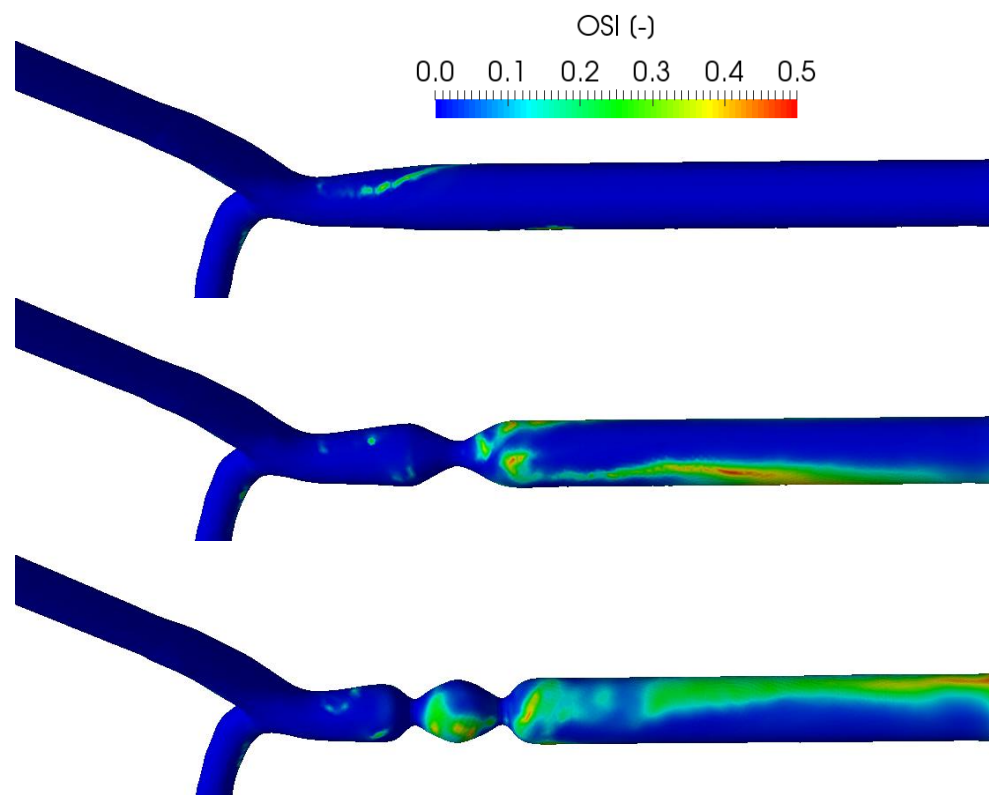
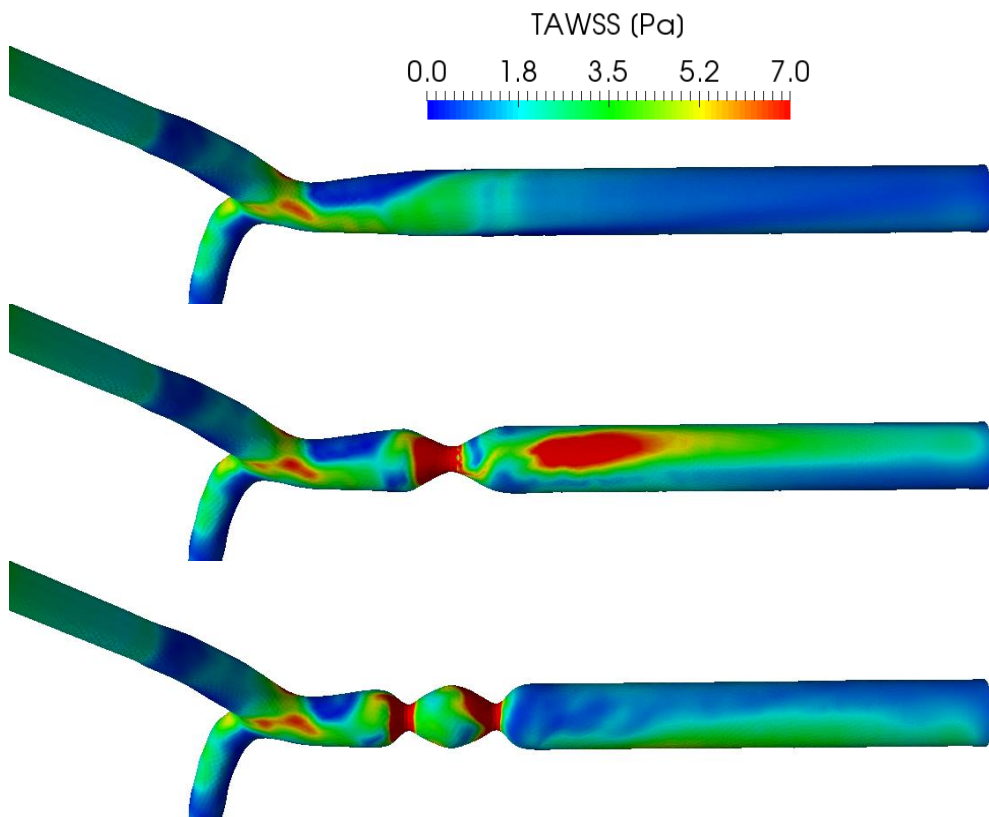
- (mezičásticové kolize – zvýšená pravděpodobnost aktivace trombocytů)

- abnormálně dlouhá doba setrvání částic (residence time)

- výrazné oscilace WSS



- pre- a post-operační stav u prasete R2 – indikace abnormalit:
 - ◆ smykové napětí na stěně: nízké (TAWSS < 0,5) a velmi vysoké (TAWSS > 6 Pa)
 - ◆ oscilační smykový index: výrazná oscilace proudu (OSI > 0,3)



- extrémní hodnoty WSS v oblasti našití štěpu (místa až 40-násobné překročení hranice 2 Pa)
- rozložení WSS v portální žile výrazně určeno podobou proudového pole, zejména pak přítomností „jet flow“ a recirkulacemi
- oscilace WSS v portální žile spojené s „jet flow“ a recirkulacemi
- lokální výskyt zpětného proudění (OSI > 0,4) po celé délce portální žíly

- indikátory pro posouzení doby setrvání krevních částic (*residence time*)
 - relative residence time (RRT) [Himburg et al. (2004)]

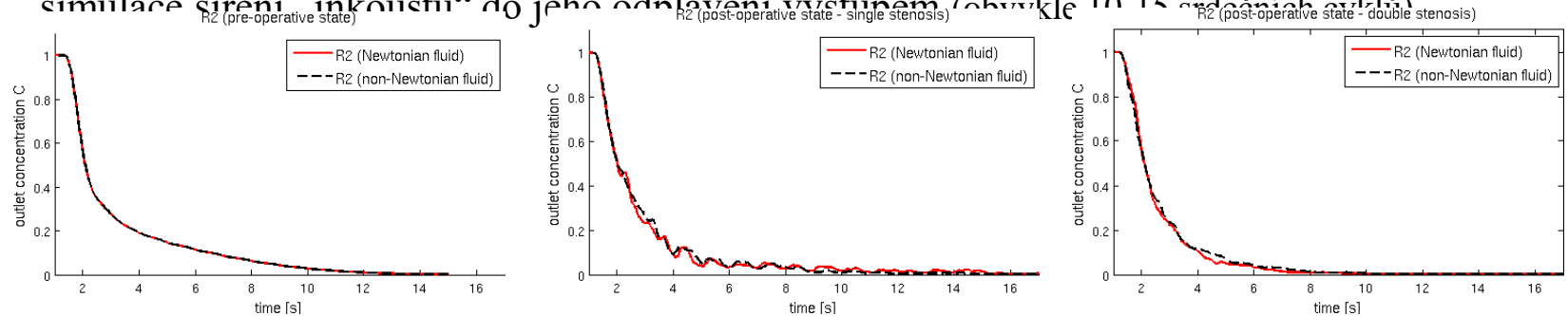
$$RRT = \frac{1}{(1 - 2 \cdot OSI) \cdot TAWSS}$$

kde OSI je oscilační smykový index a TAWSS je časově zprůměrované smykové napětí na stěně

- stanovení *residence time* (RT_c) na základě doby potřebné pro odplavení virtuálního „inkoustu“ s koncentrací $C \in \langle 0; 1 \rangle$ [Rayz et al. (2010)]

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla C = 0$$

- počáteční naplnění celého modelu „inkoustem“ ($C = 1$), na vstupu předepsáno $C = 0$
- doba setrvání RT_c měřena po dobu, kdy $C > 0,02$ (hraniční koncentrace zohledňující uplívání na stěně)
- simulace šíření „inkoustu“ do jeho odplavení výstupem (obvykle 10-15 arduálních cyklů)



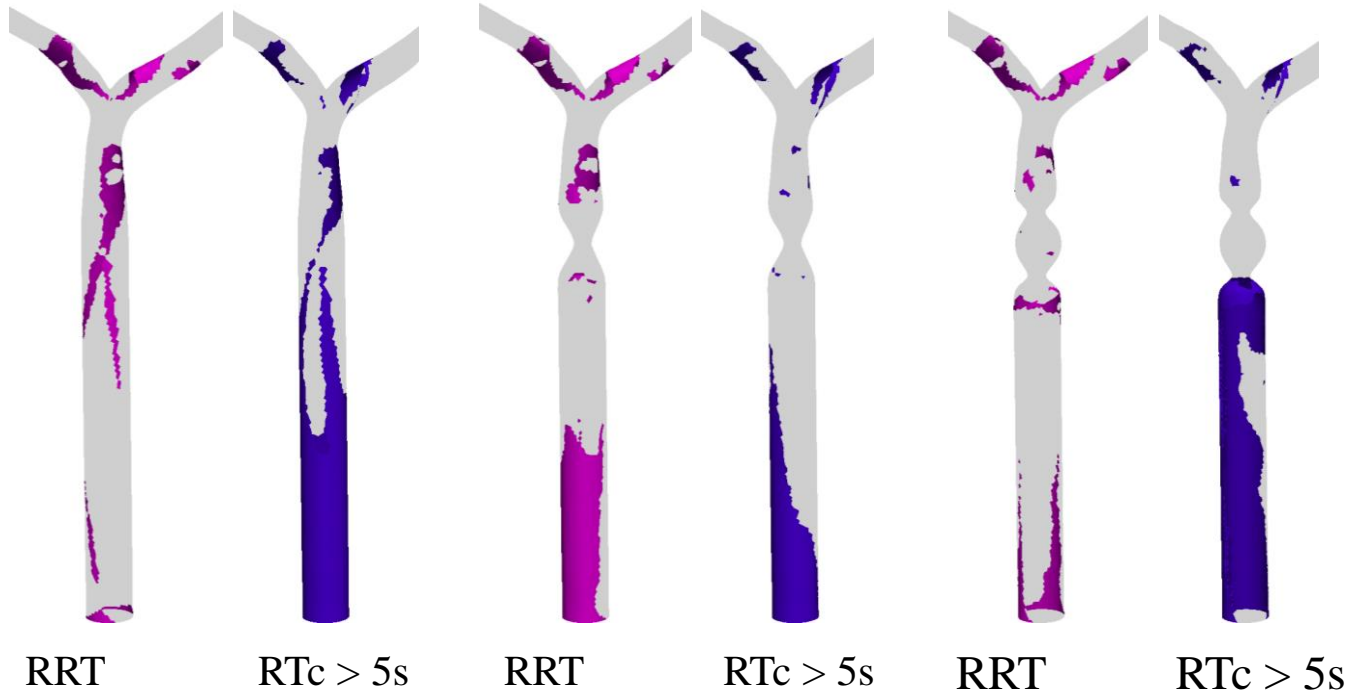
[Himburg et al. (2004)]

Himburg, H.A., Grzybowski, D.M., Hazel, A.L., LaMack, J.A., Friedman, M.H., Spatial comparison between wall shear stress measures and porcine arterial endothelial permeability, *Am. J. Physiol.-Heart. Circ. Physiol.* 286 (2004) 1916–1922.

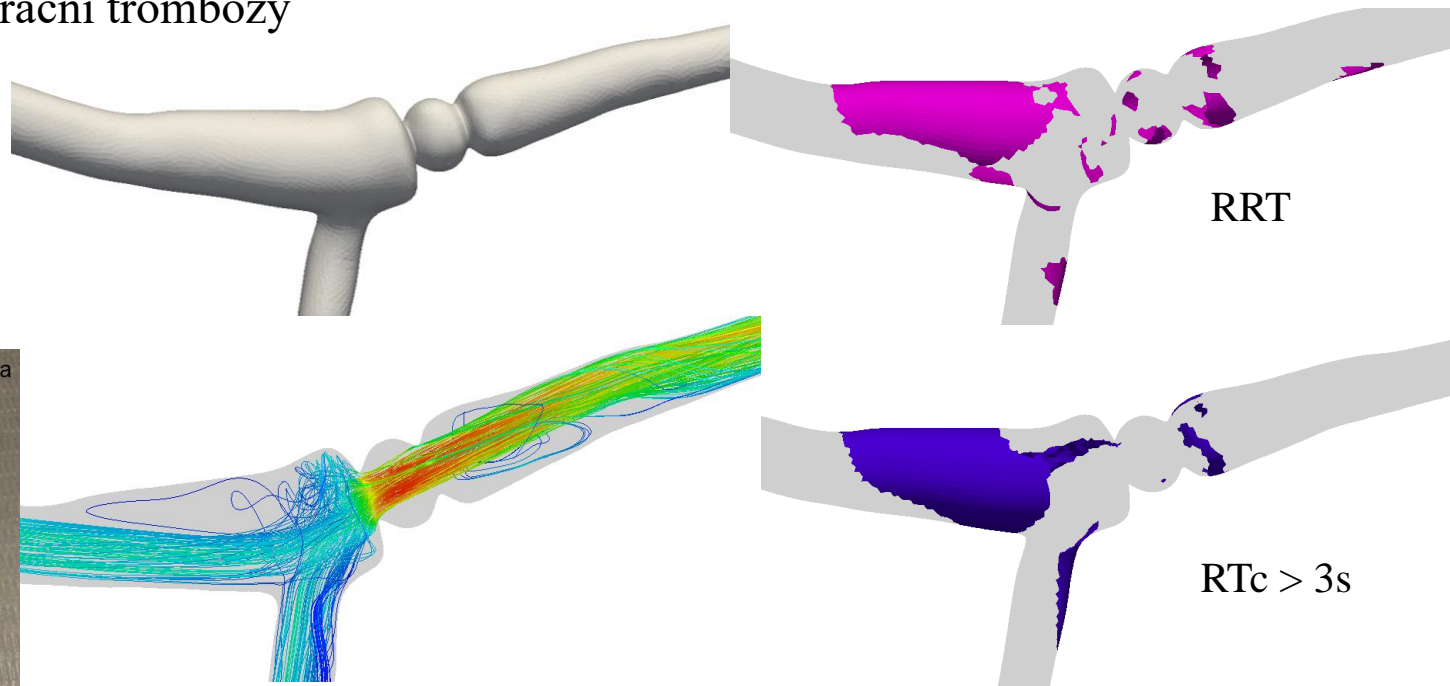
[Rayz et al. (2010)]

Rayz, V.L., Boussel, L., Ge, L., Leach, J.R., Martin, A.J., Lawton, M.T., McCulloch, C., Saloner, D., Flow residence time and regions of intraluminal thrombus deposition in intracranial aneurysms, *Ann. Biomed. Eng.* 38(10) (2010) 3058-3069.

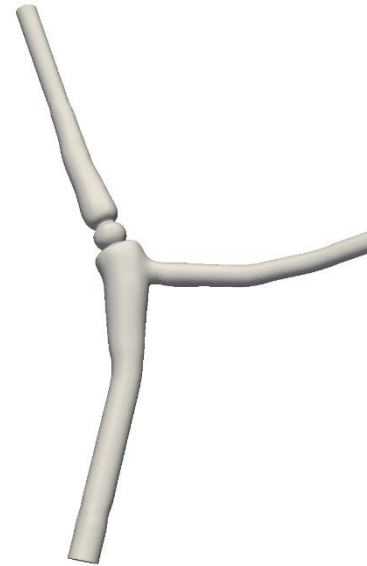
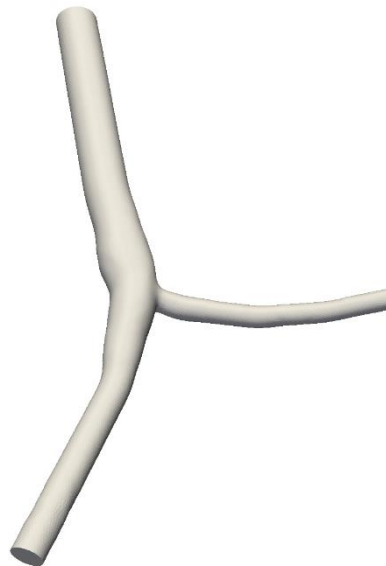
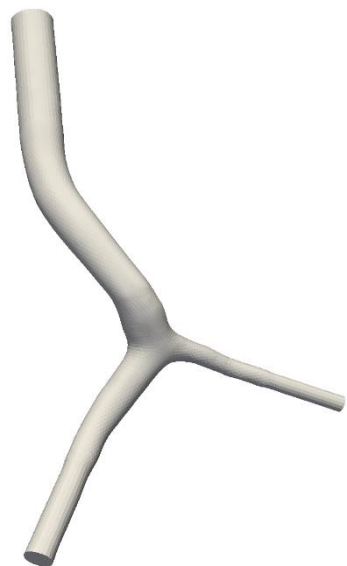
Výsledky – RRT a RTc



- prase O7 – výskyt postoperační trombózy



- realizovány numerické simulace proudění krve v modelech portálních žil
- dominantní vliv geometrie na podobu proudového pole a výskyt míst s potenciálním výskytem trombózy
 - ◆ způsob našití štěpu (jednoduchá vs. dvojitá „stenóza“) – výrazný dopad na podobu „jet flow“ a lokalizaci recirkulačních zón
 - ◆ post-operační vasokonstrikce/vasodilatace portální žíly – změna tokových podmínek
- metodika pro identifikaci míst náchylných k trombóze
 - ◆ residence time (RRT vs. RT_c) – velice podobné výsledky
 - ◆ nutnost validace numerických výsledků s in-vivo pozorováními



Děkuji za pozornost.

