

Analýza proudového pole v cévním přístupu

Ing. Miloš Kašpárek

Anotace

Cévní přístup je pro hemodialyzované pacienty životně důležitý. Jeho životnost je ovlivněna mnoha hemodynamickými faktory, jako je tlak, průtokový režim, smykové napětí na stěny. Během hemodialýzy dochází ke změnám hemodynamických parametrů v důsledku průtoku z jehel zavedených do cévního systému. Především dochází ke změně smykového napětí, které ovlivňuje cévní stěnu. Jsou známy patologické účinky vysokého nebo nízkého WSS. Vliv proudu z žilní jehly na hemodynamické parametry není dostatečně prozkoumán. Abychom pochopili její možný vliv, byl proveden experiment in vivo a in vitro. Experiment in vivo sloužil k potvrzení existence zpětného proudění v oblasti arteriální jehly (odběrové). Použitou metodou bylo ultrazukové rychlostní profilování (dopplerovská ultrasonografie). In vitro experiment byl navržen pro měření rychlostních polí v cévním přístupu v oblasti arteriální jehly metodou stereo PIV. Tato metoda byla zvolena s ohledem na 3D charakter proudění v dané oblasti. Ze získaných rychlostních polí bylo dopočítáno tečné napětí na stěně. In vivo experiment ukázal, že u všech zařazených hemodialyzovaných pacientů byl patrný cyklický zvrát průtoku. Stereo PIV experiment in vitro odhalil oscilační charakter tečného napětí na stěně uvnitř modelu. Vysoké smykové napětí bylo dokumentováno před místem vpichu arteriální jehly. Hned za bodem vpichu byla během pulzu peristaltického čerpadla zjištěna oblast s velmi nízkým WSS. Minimální a maximální hodnota WSS během pulzu peristaltického čerpadla ve sledované oblasti byla -0,7 Pa a 6 Pa. Plošné rozložení tečného napětí na stěně s použitím kontinuálního čerpadla v mimotělním oběhu místo peristaltického čerpadla mělo podobné rozložení jako během pulzu peristaltického čerpadla. Hodnoty WSS však byly kontinuální a nekolísaly. WSS se pohybovala v rozmezí 4,8 Pa až 1,0 Pa.

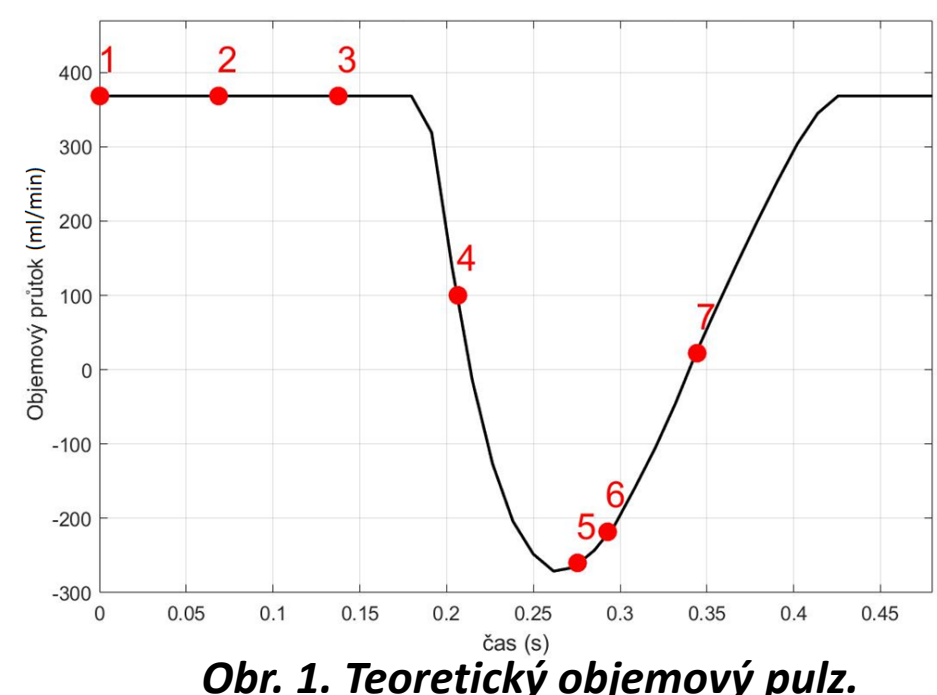
Úvod

- Hemodialýza je léčebná metoda využívaná u pacientů s chronickým selháním ledvin. Jedná se o metodu čištění krve. Krev je odváděna do mimotělního okruhu, kde je čištěna v dialyzátoru a následně navracena zpět do vaskulárního systému pacienta.
- Pro odběr dostatečného množství krve a opakované zavádění dialyzačních jehel je nutné vytvořit ve vaskulárním přístupu pacienta cévní přístup. Existuje několik typů cévních přístupů, ale v současné době je preferovaným přístupem arteriovenózní fistule (AVF). Jedná se o spojení arterie a povrchové žíly. Toto spojení zvýší průtok v žíle a způsobí zesílení žilní stěny, které umožňuje opakované zavádění jehel.
- Jedním ze základních problémů hemodialýzy je udržení funkčnosti cévního přístupu. Změny hemodynamických parametrů v cévním přístupu spojené s odebíráním a návratem krve mohou negativně ovlivnit životnost cévního přístupu. Hlavním hemodynamickým parametrem je tečné napětí na stěně, které je úzce spjato se vznikem stenóz a trombózy.
- V současné době jsou s výskytem cévních komplikací spojovány dva druhy hodnot tečného napětí na stěně: příliš vysoké a příliš nízké oscilační hodnoty tečného napětí na stěně.
- V této práci jsem se zaměřil na oblast cévního přístupu v místě zavedení arteriální jehly (odběrové). Důvodem zaměření na tuto oblast je využívání peristaltického čerpadla k odebírání a návratu krve z vaskulárního systému pacienta. Vlivem principu fungování peristaltického čerpadla **dochází** k pulznímu charakteru nasávání, při kterém dochází na krátkou dobu k reverznímu toku. To může mít potenciálně negativní dopad na stěnu cévního přístupu.
- Proudění krve a jeho dopady na životnost cévního přístupu v oblasti arteriální jehly (odběrové) nejsou dostatečně zmapovány.

Metodika

- Práce byla rozdělena na několik částí:
 - Vizualizace zpětného proudění během hemodialýzy.
 - Stanovení tvaru a velikosti pulzu peristaltického čerpadla na straně sání čerpadla.
 - Sestavení experimentální tratě pro měření rychlostních polí ve vybrané oblasti cévního přístupu.

- In vivo experiment: Vizualizace zpětného proudění během hemodialýzy byla provedena na pracovišti 1. lékařské fakulty Univerzity Karlovy. K vizualizaci byl použit dopplerovský ultrazvuk.



- Tvar a velikost objemového pulzu (Obr. 1.) byly stanoveny pomocí výpočtu z charakteristických rozměrů peristaltického čerpadla, pružné trubice a průtoku. Správnost výpočtu byla ověřena experimentálním měřením.
- Průběh objemového pulzu byl použit pro stanovení měřených bodů pulzu a synchronizaci laseru a peristaltického čerpadla při měření rychlostních polí.

- In vitro experiment: Pro měření rychlostních polí byla sestavena experimentální trať (Obr. 2.). Pro měření byla zvolena metoda stereo Particle Image Velocimetry (stereo PIV) a to vzhledem k 3D charakteru proudění v cévním přístupu.

- Pro získání kvalitních dat metodou stereo PIV je nutné zajistit čistý optický přístup bez optických deformací. To bylo docíleno srovnáním indexu lomu světla (Ri) pracovní kapaliny a materiálu modelu cévního přístupu. Na Obr. 3. je vizualizace optického přístupu do modelu s dvěma pracovními kapalinami s rozdílnými indexy lomu světla.

- Byl vyroben model cévního přístupu se vstupem pro obě hemodialyzační jehly. Model byl vyroben z materiálu Sylgard 184 (Ri 1,413). Průměr žíly modelu cévního přístupu byl 6 mm.

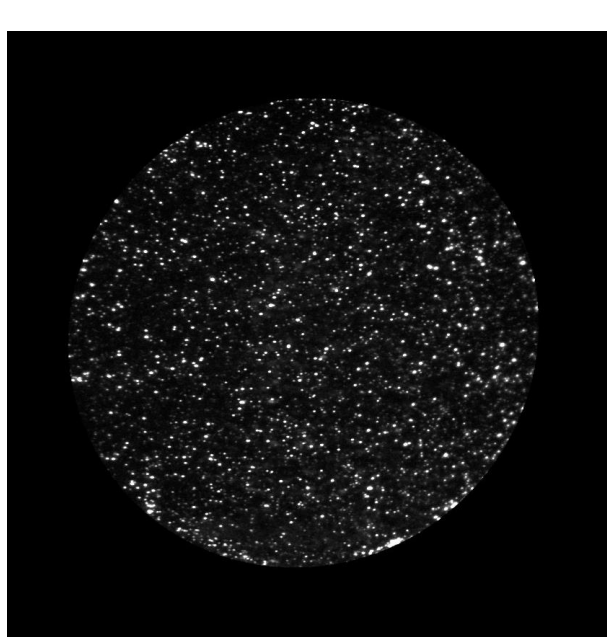
- Pracovní kapalina byla namíchána s ohledem na požadovaný index lomu světla a vlastnosti krve. Jednalo se o roztok voda-glycerín-jodid sodný v hmotnostním poměru 47,8:36,94:15,68. Ri pracovní kapaliny byl 1,41. Viskozita pracovní kapaliny byla 0,00431 Pa.s. Tato hodnota odpovídá viskozitě krve. Nenevtonské chování krve se výrazně projevuje v cévách s průměrem menším než 1 mm a proto bylo v této práci zanedbáno.

- Byly měřeny dva režimy. Tyto režimy se lišily použitím typem čerpadla v mimotělním okruhu. U prvního režimu bylo použito peristaltické čerpadlo. U druhého režimu bylo použito kontinuální čerpadlo.

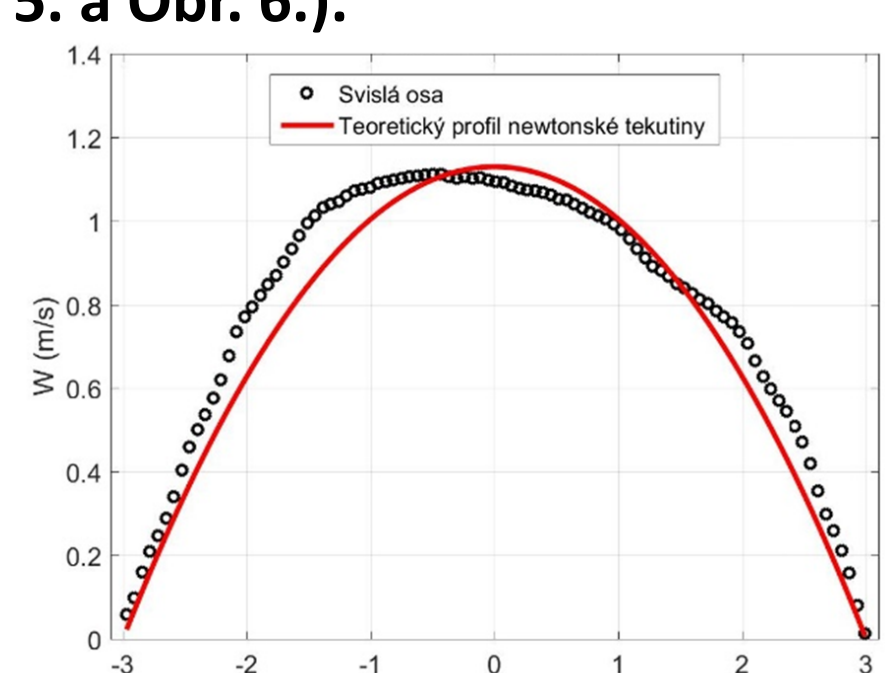
- Pro oba režimy byl nastaven průtok cévním přístupem 600 ml/min a mimotělním okruhem 200 ml/min. Pulzní charakter v cévním přístupu byl zanedbán. Toto zjednodušení je použito i v jiných studiích zabývajících se touto oblastí vaskulárního systému.

- Rychlostní pole byla měřena v 8 rovinách cévního přístupu, které mapovaly celou sledovanou oblast.

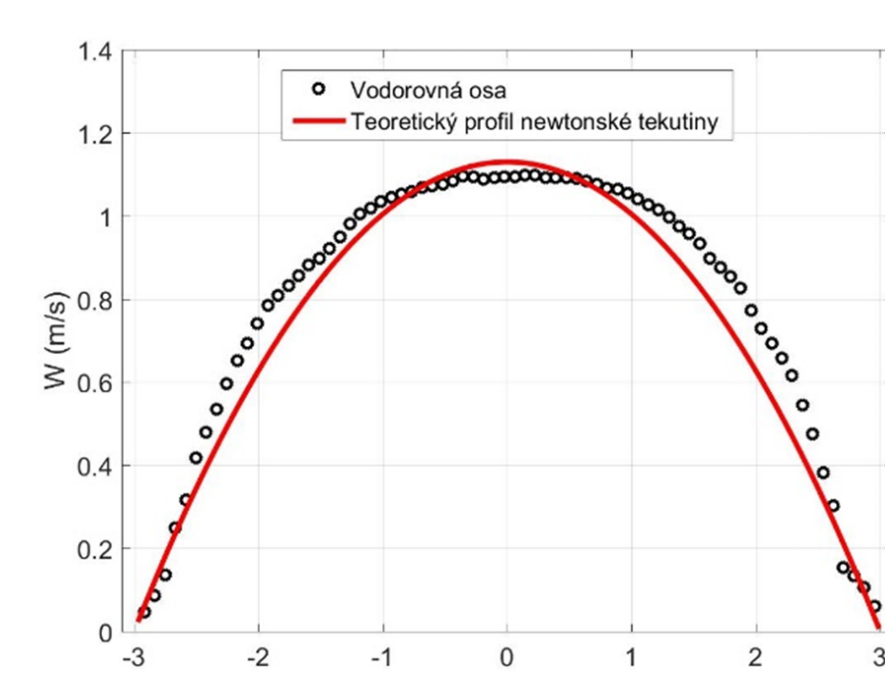
- Bylo provedeno kontrolní měření na rovném úseku modelu bez jehel. Nastavený průtok cévním přístupem byl 1065 ml/min (Re 1082). Změřené laminární profily byly porovnány s teoretickým laminárním profilem (Obr. 5. a Obr. 6.).



Obr. 4. Transformovaný snímek měřené oblasti.

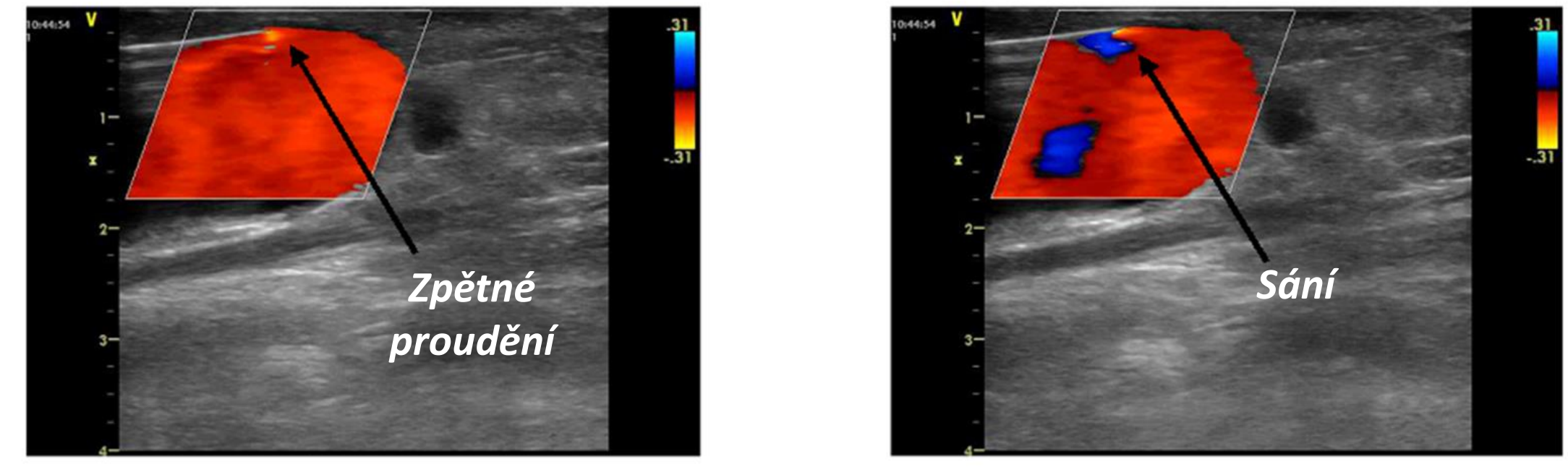


Obr. 5. Porovnání naměřené a teoretického rychlostního profilu - vodorovná osa.



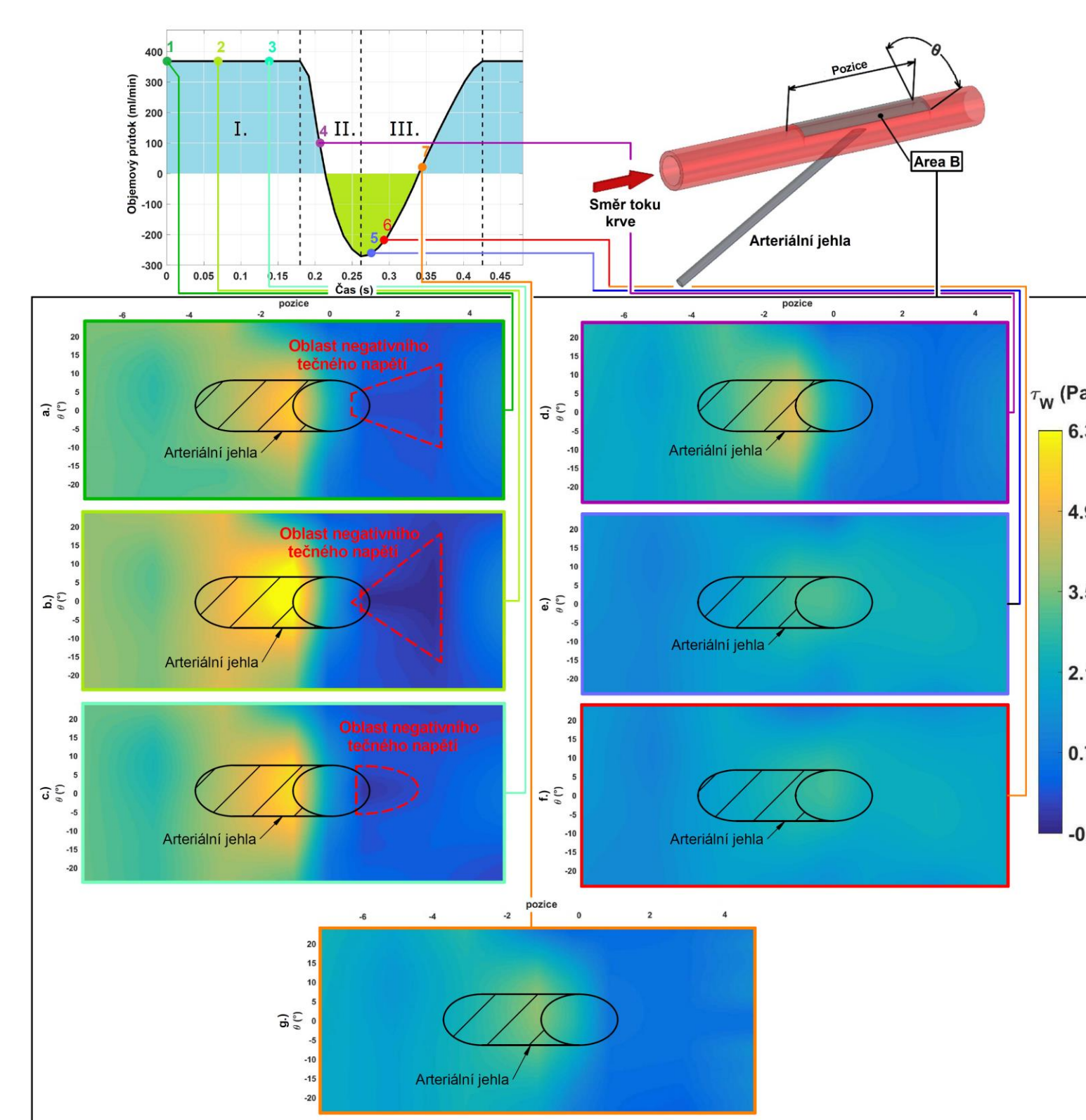
Obr. 6. Porovnání naměřené a teoretického rychlostního profilu - svislá osa.

Výsledky

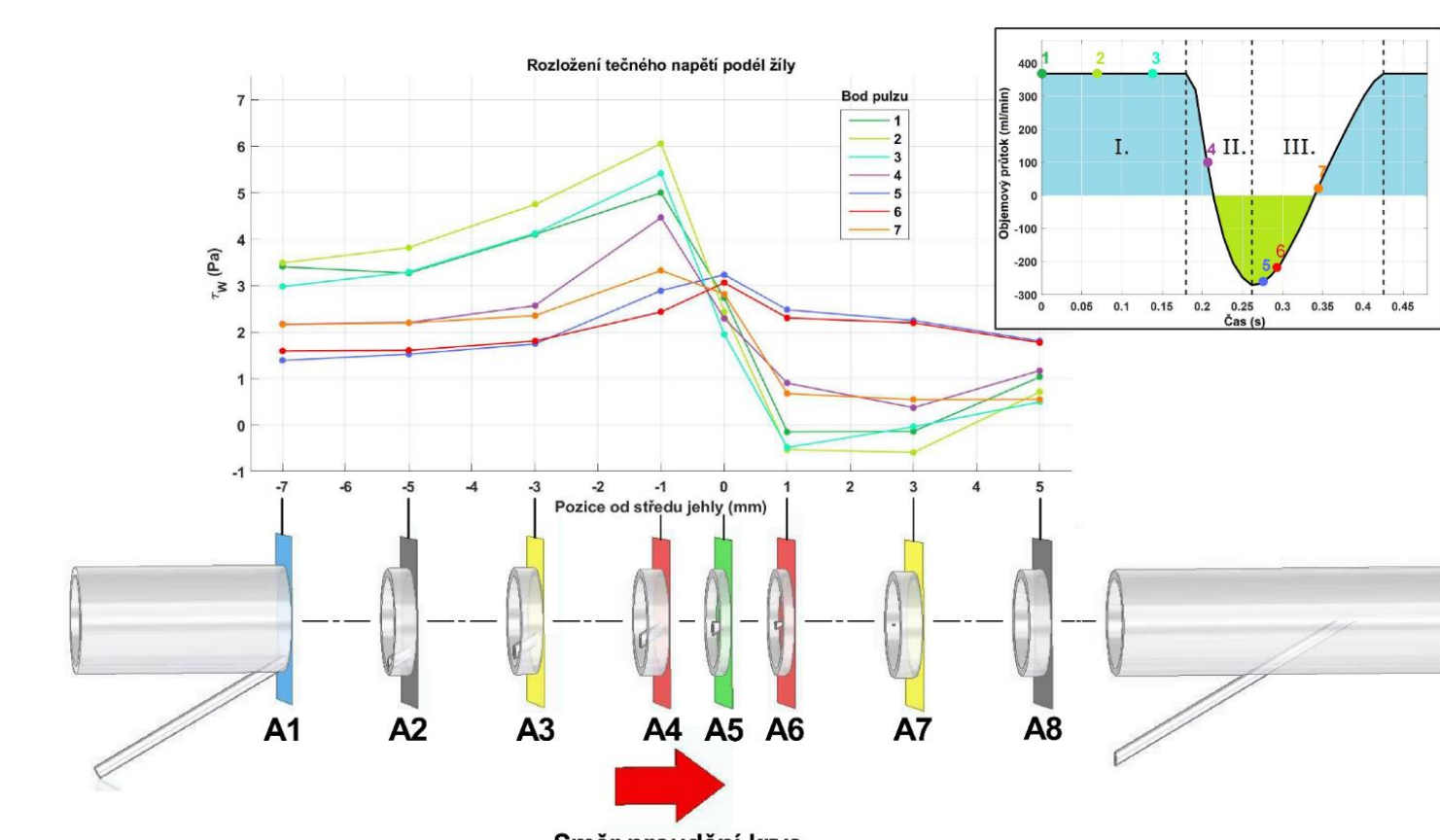


Obr. 7. Vizualizace proudění v cévním přístupu.

- Vizualizace proudění v cévním přístupu během hemodialýzy (Obr. 7.) provedená in vivo experimentem ukazuje pulzní charakter proudění proudu odebírané krve.
- Během vizualizace bylo zachyceno zpětné proudění z arteriální jehly, které ovlivňuje hemodynamické parametry v cévním přístupu.

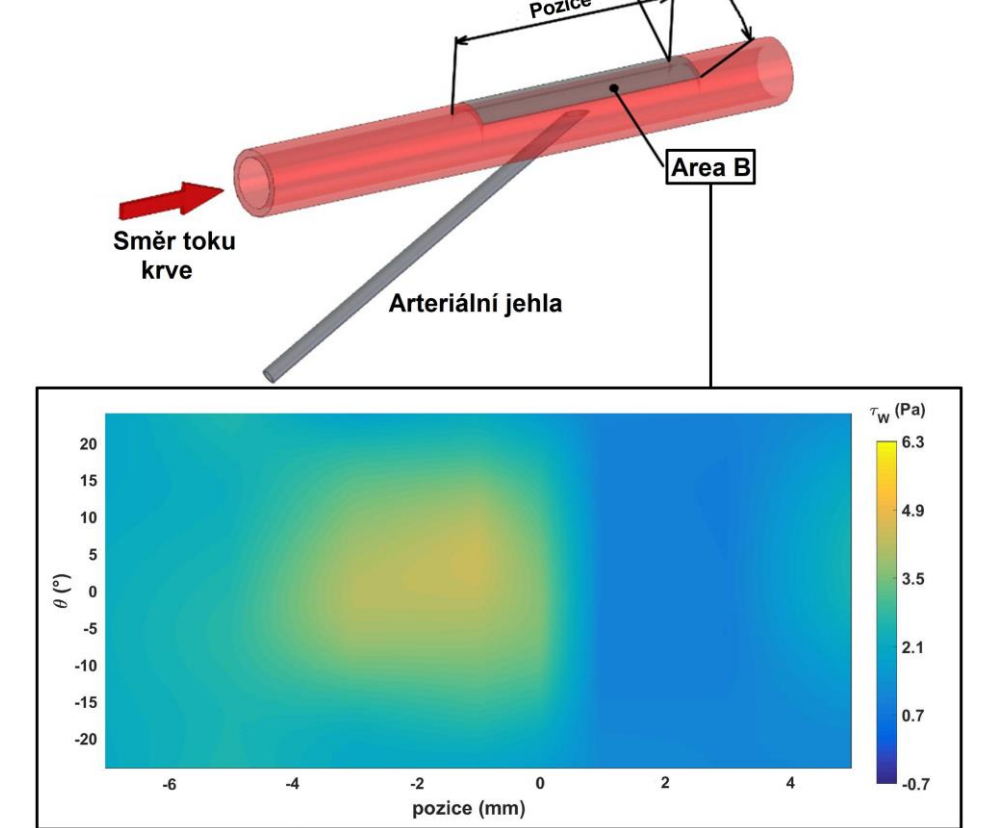


Obr. 8. Rozložení WSS ve sledované oblasti B pro vybrané body pulzu.

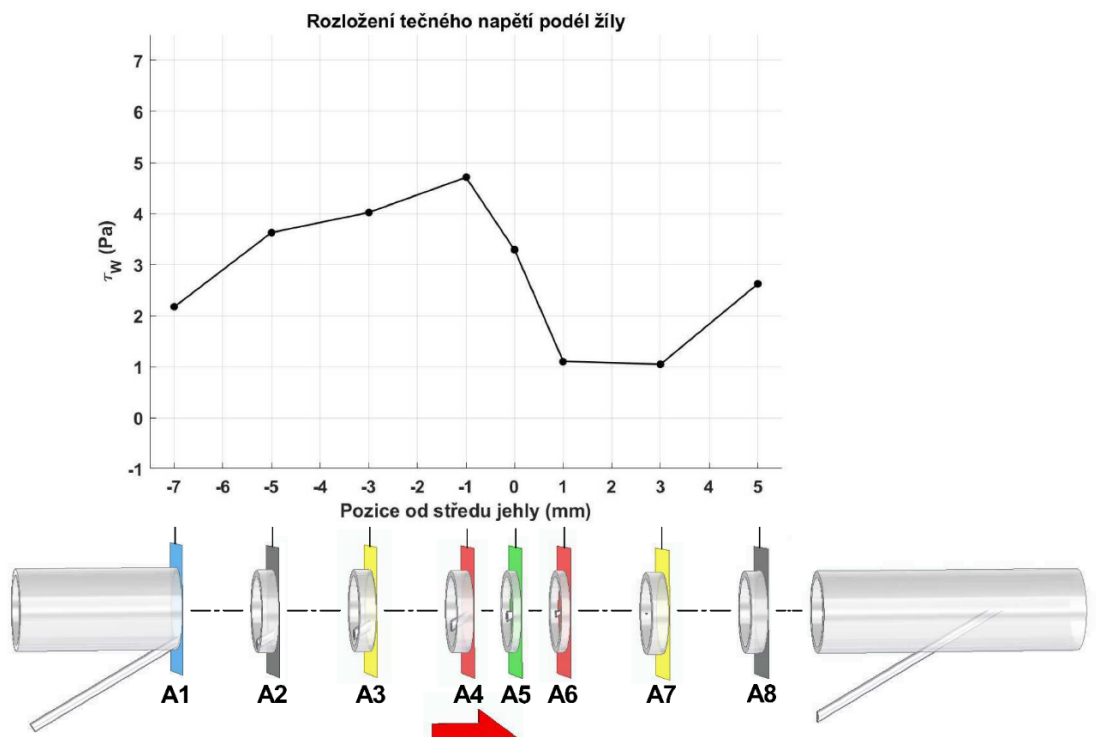


Obr. 9. Rozložení WSS podél stěny během jednotlivých bodů pulzu pro sledovaný bod stěny.

- Na Obr. 10. je rozložení WSS ve sledované oblasti se zapojením kontinuálního čerpadla v mimotělním okruhu.
- Toto rozložení WSS je velmi podobné jako rozložení WSS u bodu pulzu 4 se zapojením peristaltického čerpadla v mimotělním okruhu.
- Maximální hodnoty WSS dosahuje v oblasti před jehlou. V oblasti za jehlou dochází k poklesu WSS, kde hodnoty WSS nabývají minimálních hodnot.
- Za použití kontinuálního čerpadla nedochází k oscilaci WSS.
- Na Obr. 11. je znázorněn průběh WSS podél sledované oblasti v bodě cévní stěny zvoleným přímo nad jehlou.
- Z rozložení tečného napětí je vidět, že hodnoty za jehlou klesají, ale nedostávají se pod hodnoty 1 Pa.



Obr. 10. Rozložení WSS ve sledované oblasti B.



Obr. 11. Rozložení WSS podél stěny pro sledovaný bod stěny.

Závěr

- Z rozložení tečného napětí na stěně při použití peristaltického čerpadla v mimotělním okruhu byla identifikována oblast oscilačního nízkého napětí na stěně. Oblast se nachází za arteriální jehlou. Jedná se o oblast, kde může potenciálně vzniknout stenóza. Díky stenóze může dojít k zásadnímu poškození cévního přístupu nebo jeho zániku.
- Při použití kontinuálního čerpadla nebylo nalezeno potenciálně nebezpečné tečné napětí.
- Hlavním kladem peristaltického čerpadla je tlaková diference, která umožňuje odebírat krev z vaskulárního systému pacienta. Další výhodou tohoto typu čerpadla je snadná sterilizace. Přesto je na místě přemýšlet, zda toto čerpadlo nenahradit, či nezmiřit technickým zásahem jeho vliv na žilní stěnu cévního přístupu.
- Peristaltické čerpadlo by bylo možné nahradit odstředivým čerpadlem, které je již v některých lékařských aplikacích využíváno. Nevýhodou by byla nutnost provést konstrukční změny hemodialyzačního přístroje. Také při zastavení čerpadla může dojít ke zpětnému toku systémem, kterému je třeba zabránit. Další možností pro zmírnění dopadu peristaltického čerpadla je umístění tlumivého prvku do hemodialyzačního setu, který by tlumil pulzní charakter čerpadla.