



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

## POTLAČENÍ TURBULENTNÍHO PROUDĚNÍ V POTRUBÍ

TURBULENT FLOW SUPPRESSION IN PIPE

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jiří Jahn

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

BRNO 2021





# Zadání diplomové práce

|                   |  |
|-------------------|--|
| Ústav:            | Energetický ústav                        |
| Student:          | <b>Bc. Jiří Jahn</b>                     |
| Studijní program: | Strojní inženýrství                      |
| Studijní obor:    | Fluidní inženýrství                      |
| Vedoucí práce:    | <b>doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.</b> |
| Akademický rok:   | 2020/21                                  |

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## Potlačení turbulentního proudění v potrubí

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Turbulentní proudění v potrubí je spojeno s vysokými energetickými ztrátami. Při dopravě kapalin musíme tyto ztráty pokrýt z energie, kterou kapalině dodává čerpadlo. Při dopravě kapalin na dlouhé vzdálenosti je ztrátová energie velmi vysoká. Snížení ztrátové energie by to znamenalo významný přínos k energetickým úsporám.

V časopise SOVAK se objevil se zajímavý článek o potlačení turbulentního proudění v potrubí pomocí vestavby. To je zajímavá zpráva. Jde o to, co toto potlačení turbulence přináší. V článku je uvedeno, že to přináší snížení ztrát třením. Otázkou je jestli ztráta vytvořená vestavbou není tak vysoká, že se to vlastně nevyplatí.

### Cíle diplomové práce:

Cílem této práce je získat více informací ohledně uvedeného zařízení.  
Ověření uvedených informací numerickým modelováním proudění.  
Navrhnout případně vlastní tvar či způsob potlačení turbulence v potrubí.

### Seznam doporučené literatury:

Možnosti potlačení turbulence při průtoku potrubím. SOVAK: Časopis oboru vodovodů a kanalizací. Praha: Nakladatelství a vydavatelství Mgr. Pavel Fučík, 2019, 28(7-8), 58-59. ISSN 1210-3039.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá způsoby potlačení turbulentního proudění v potrubí. V první části práce jsou uvedeny různé způsoby tzv. laminarizace, kdy dojde k přetvoření turbulentního proudění na laminární, včetně výsledků experimentů, které daní autoři zveřejnili.

V další části jsou uvedeny výsledky z CFD. Výpočty byly provedeny u jedné z metod uvedených v první části práce a výsledky byly mezi sebou porovnány. Dále bylo navrženo několik možností, jak původní metodu vylepšit.

### **Klíčová slova**

Potlačení turbulence, laminarizace, laminární proudění, turbulentní proudění, energetické ztráty, vestavba, Reynoldsovo číslo.

## **ABSTRACT**

This thesis deals with ways to suppress turbulent flow in pipelines. In the first part various methods of laminarization are presented, when the turbulent flow is transformed into laminar flow, including the results of experiments published by the authors.

The next part presents the results from CFD. The calculations were performed for one of the methods mentioned in the first part and the results were compared with each other. In addition, several options have been suggested to improve the original method.

### **Key words**

Turbulence suppression, laminarization, laminar flow, turbulent flow, energy losses, plate obstacle, Reynolds number.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

JAHN, Jiří. Potlačení turbulentního proudění v potrubí [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132885>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jaroslav Štigler.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Potlačení turbulentního proudění v potrubí** vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Jaroslava Štiglera, Ph.D. s použitím odborné literatury, uvedené v seznamu.

---

Datum

---

*Jiří Jahn*



## OBSAH

|  |    |
|--|----|
| ÚVOD.....  | 11 |
| 1 HYDRAULICKÉ ZTRÁTY PŘI PROUDĚNÍ V POTRUBÍ.....                                 | 13 |
| 2 LAMINARIZACE.....  | 15 |
| 2.1 První metoda – pohyblivý segment potrubí.....                                | 16 |
| 2.1.1 Popis metody.....  | 16 |
| 2.1.2 Výsledky experimentu.....  | 17 |
| 2.1.3 Zhodnocení.....  | 21 |
| 2.2 Druhá metoda – laminarizace pomocí voštin.....                               | 22 |
| 2.2.1 Popis metody.....  | 22 |
| 2.2.2 Výsledky.....  | 24 |
| 2.2.3 Zhodnocení.....  | 29 |
| 2.3 Třetí metoda – injekce další kapaliny skrze prstencovou mezeru.....          | 30 |
| 2.3.1 Popis metody.....  | 30 |
| 2.3.2 Výsledky.....  | 31 |
| 2.4 Čtvrtá metoda – stacionární vestavba se sedmi dírami.....                    | 34 |
| 2.4.1 Popis metody.....  | 34 |
| 2.4.2 Výsledky.....  | 35 |
| 2.4.3 Zhodnocení (společně pro stacionární vestavbu a vstříkovací zařízení)..... | 38 |
| 2.5 Shrnutí.....   | 38 |
| 3 VÝPOČTOVÁ ČÁST.....  | 40 |
| 3.1 Zjednodušení problému na 2D.....   | 41 |
| 3.1.1 Výsledky pro $Re = 3800$ .....   | 42 |
| 3.1.2 Výsledky pro $Re = 8000$ .....   | 45 |
| 3.1.3 Výsledky pro $Re = 3000$ .....   | 48 |
| 3.1.4 Srovnání výsledků při $Re = 3000, 3800, 8000 - 2D$ .....                   | 51 |
| 3.2 Vestavba s jednou dírou – 3D.....  | 52 |
| 3.2.1 Výsledky pro $Re = 3800$ .....   | 52 |
| 3.2.2 Výsledky pro $Re = 8000$ .....   | 56 |
| 3.2.3 Výsledky pro $Re = 3000$ .....   | 59 |
| 3.2.4 Srovnání výsledků při $Re = 3000, 3800, 8000 - 3D$ .....                   | 61 |
| 3.3 Srovnání výsledků z výpočtů provedených na 2D a 3D modelu.....               | 62 |
| 3.4 Vestavba dle experimentu.....  | 64 |
| 3.4.1 Výsledky – vestavba 7 děr.....   | 65 |
| 3.4.2 Vyhodnocení.....   | 71 |
| 3.5 Vestavba s průměrem roztečné kružnice $D_R = 15 \text{ mm}$ .....            | 72 |
| 3.5.1 Vyhodnocení.....   | 76 |
| 4 NÁVRH VESTAVBY.....  | 78 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 4.1   | První fáze.....                                    | 78 |
| 4.1.1 | Návrh č. 1.....                                    | 78 |
| 4.1.2 | Návrh č. 2.....                                    | 79 |
| 4.1.3 | Srovnání návrhu č. 1 a 2 s původní vestavbou ..... | 80 |
| 4.2   | Druhá fáze .....                                   | 83 |
| 4.2.1 | Návrh č. 3.....                                    | 83 |
| 4.2.2 | Návrh č. 4.....                                    | 84 |
| 4.2.3 | Návrh č. 5.....                                    | 84 |
| 4.2.4 | Návrh č. 6.....                                    | 85 |
| 4.2.5 | Srovnání návrhů s původní vestavbou .....          | 85 |
| 4.3   | Tlakové ztráty u jednotlivých návrhů.....          | 88 |
|       | ZÁVĚR .....  | 90 |
|       | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....                      | 92 |
|       | SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....           | 93 |



## ÚVOD

Proudění tekutin může probíhat dvěma různými způsoby, a to laminárně, nebo turbulentně. V těchto dvou typech proudění je značný rozdíl, co se týče energetických ztrát při proudění v potrubních systémech. Při laminárním proudění se částice kapaliny pohybují ve vrstvách a vzájemně se nemísí, oproti tomu turbulentní proudění se vyznačuje chaotickým pohybem částic kapaliny.

Při turbulentním proudění v potrubí jsou energetické ztráty až několikanásobně vyšší než při proudění laminárním. V praxi se ve většině případů setkáváme s prouděním turbulentním, z toho plyne snaha o potlačení turbulence, takzvané laminarizace proudění. [1, 2]

Proudění je rozděleno pomocí Reynoldsova čísla  $Re$ , obecně se uznává pravidlo, že pro proudění v potrubí o hodnotě  $Re < 2320$  je proudění laminární, v rozmezí  $Re$  od 2320 až do 6000 se nachází přechodová oblast (rychlostní profil proudění není stabilní) a pro  $Re > 6000$  je proudění turbulentní. Avšak se ukázalo, že proudění může být laminární i při vyšších Reynoldsových číslech. Laminární proudění v potrubí může zůstat laminární i pro velmi dlouhé délky. Závisí ale na hladkosti potrubí, potrubí musí být rovné, bez armatur, přírub a dalších elementů, které mohou proudění narušit. Tyto nerovnosti v potrubí mohou být spouštěče turbulence. Platí, že čím je vyšší Reynoldsovo číslo, tím menší nerovnosti v potrubí mohou způsobit přechod laminárního proudění v turbulentní. [1, 3]

Laminarizací se snažíme přejít z již plně vyvinutého turbulentního proudění na proudění laminární a tento stav by měl vydržet co možná nejdéle, aby byla vůbec laminarizace ekonomicky přínosná, neboť při realizaci laminarizace pomocí různých zařízení, vznikají mnohdy velké ztráty už na těchto zařízeních. [1]

Řízení turbulence ke snížení tření na povrchu stěny je velmi zajímavé v široké škále technologických aplikací. Trubky a potrubí jsou hlavními prostředky pro distribuci tekutin v celé společnosti, od trubek s malým průměrem v rodinných domech až po potrubí v průmyslových závodech a další potrubí velkých rozměrů. Celkové náklady na čerpání přesahují miliardy eur ročně a ztráty způsobené třením v těchto tocích jsou odpovědné za významnou část celosvětové spotřeby energie. Tato energie tvoří významnou část provozních nákladů a tím je i zdrojem emisí uhlíku. V dnešní době se lidstvo snaží tyto emise snižovat všemi dostupnými prostředky, tím pádem by i proces laminarizace mohl být přínosem. Stále je však složité vytvořit zařízení, které by bylo využitelné v praxi a zároveň by bylo ekonomicky výhodné. V průběhu let bylo navrženo mnoho technik pro potlačení turbulence, nicméně v zařízeních použitých při experimentech bylo implementováno jen několik metod. Potenciál v tomto směru je obrovský, neboť by tato zařízení mohla najít uplatnění na mnoha místech (např. ve vodárenství, petrochemickém průmyslu a všude tam, kde je potřeba dopravy tekutin na dlouhé vzdálenosti), a v celosvětovém měřítku by mohla znamenat podstatnou úsporu energií. [4]

Jednou z technik laminarizace, které budou zmíněny, je urychlení proudu v blízkosti stěny potrubí pomocí posuvného segmentu. Segment v určitém místě tvoří stěnu trubky, při pohybu segmentu se díky snížení tření na stěně kapalina v blízkosti stěny urychlí a tímto

způsobem se dosáhne charakteristického rychlostního profilu. Dalším způsobem je umístění tzv. voštin po celém průměru trubky. V těchto případech se jedná buď o šestistěnné voštiny, které můžeme vidět například u včelích pláství, ale mohou mít také tvar čtyřúhelníku, popřípadě kruhu apod. Tyto voštiny pak mají různou délku, uprostřed proudu jsou delší, v blízkosti stěn pak kratší. Další možností je přidávání další kapaliny skrze prstencovou mezeru a posledním popsáním způsobem bude realizace laminarizace pomocí stacionární vestavby v trubce. Určitě by se našly i další možnosti potlačení turbulence, v této práci budou podrobněji popsány tyto čtyři.

## 1 HYDRAULICKÉ ZTRÁTY PŘI PROUDĚNÍ V POTRUBÍ

Laminární proudění se vyznačuje především prouděním ve vrstvách, které jsou na sebe rovnoběžné. Tekutina se mezi jednotlivými vrstvami nemísí. V důsledku tření o stěnu potrubí, dynamické viskozity a ulpívání tekutiny na stěnách se vytvoří parabolický rychlostní profil. Na hranicích jednotlivých vrstev proudění působí na element tekutiny dvě síly a element tak rotuje. Laminární proudění tak není potenciální proudění, protože rotor vektoru rychlosti je nenulový a tedy je laminární proudění současně i vírové. Tyto víry při laminárním proudění zanikají v důsledku tření, ale při vyšších rychlostech energie ve vírech postupně roste, až dojde k jevu, kdy setrvačné síly částic tekutiny převažují nad silou třecí a trajektorie částic kapaliny se začnou proplétat. Toto vše nastává při překročení tzv. kritické střední rychlosti a proudění se stává turbulentním. K určení o který typ proudění se jedná, se obecně používá hodnota Reynoldsova čísla. [3]

$$Re = \frac{v_s \cdot D_h}{\nu} \quad (1)$$

$v_s$  – střední rychlost proudění v daném profilu [m/s]

$D_h$  – hydraulický průměr (nebo charakteristický rozměr profilu) [m]

$\nu$  – součinitel kinematické viskozity [m<sup>2</sup>/s]

Při experimentech bylo zjištěno kritické Reynoldsovo číslo pro případ proudění v potrubí  $Re = 2320$ . Do této hodnoty  $Re$  se jednalo výhradně o laminární proudění. V rozmezí  $Re = 2320$  do  $Re = 5000-6000$  se jedná o tzv. přechodovou oblast, kdy se proudění může projevovat jako laminární, ale také jako turbulentní. Při vyšších  $Re$  se jedná o proudění turbulentní, v praxi ale mohou být tyto hodnoty nižší z důvodů různých nepřesností v potrubí a rušivých elementů. [3]

Při proudění skutečné tekutiny vznikají ztráty v důsledku tření o povrch potrubí a dalších obtékaných těles, ale také v důsledku tzv. vnitřního tření, které vzniká uvnitř kapaliny. Kapalina tak přichází o část kinetické energie, aby protekla potrubím požadovanou rychlostí, musí získat zpět kinetickou energii poklesem energie tlakové. Vznikne tak tlaková ztráta. [3]

Ztráty způsobené třením lze vypočítat pomocí Darcy-Weisbachova vztahu, v případě rovného úseku potrubí tento vztah vypadá následovně:

$$Y_z = \lambda \cdot \frac{L \cdot v_s^2}{D_h \cdot 2} \quad (2)$$

$Y_z$  – ztrátová měrná energie [J/kg]

$\lambda$  - součinitel tření [-]

$L$  – délka potrubí [m]

Pro výpočet ztrát je tedy potřeba znát hodnotu součinitele tření  $\lambda$ , který je závislý na hodnotě Reynoldsova čísla a drsnosti potrubí  $k$ . Hodnotu  $\lambda$  je také možné odečíst z Moodyho diagramu, který zobrazuje závislost těchto tří hodnot. Častěji se ale hodnoty součinitele tření počítají pomocí vztahů různých autorů, v případě laminárního proudění platí jednoduchý vztah:

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (3)$$

V případě turbulentního proudění je mnoho variant vzorců pro výpočet  $\lambda$ . Níže uveden je vzorec podle Churchilla. Tento vzorec je často používaný také v praxi, jeho výhodou je možnost použití pro výpočet ve všech oblastech turbulentního proudění, neboť některé vzorce platí pouze pro danou oblast turbulentního proudění. Jde o tři různé oblasti, oblast hydraulicky hladkého potrubí, přechodná oblast odporů a kvadratická oblast, ve kterých se může dané proudění nacházet. [5, 6]

$$\lambda = 8 \cdot \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + (A + B)^{-\frac{3}{2}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad (4)$$

$$A = \left[ -2 \cdot \ln \left( \left( \frac{k}{D} \right) + \left( \frac{7}{Re} \right)^{0,9} \right) \right]^{16} \quad (5)$$

$$B = \left( \frac{37530}{Re} \right)^{16} \quad (6)$$

Pomocí výše uvedených vzorců se běžně dopočítávají energetické ztráty v potrubí. Hodnoty součinitele tření jsou mimo jiné závislé také na velikosti  $Re$ , toto ovšem nemusí platit v případech, kdy je proudění ovlivněno zařízením pro laminarizaci proudu. V takových případech mohou být výsledné ztráty vzniklé třením menší než ty, které by vyšly při použití výše uvedených vzorců.

## 2 LAMINARIZACE

Potlačení turbulence neboli laminarizace, je proces, při kterém je snaha dosáhnout přechodu proudění z plně vyvinutého turbulentního na laminární a tím dosáhnout nižších energetických ztrát při dopravě tekutin.

Proudění v potrubí má vlastnost, díky které je obzvláště atraktivní pro způsob řízení turbulence. Tou vlastností je, že po úplném odstranění turbulence a vytvoření laminárního proudění je laminární stav stabilní vůči nekonečně malým poruchám v potrubí při všech rychlostech proudění. V důsledku toho, jakmile je dosaženo laminarizace, proudění zůstane laminární za předpokladu, že potrubí je rovné a hladké. Turbulence se obnoví, pouze pokud dojde k dostatečně silnému rušení některou z poruch v potrubí, zde platí, že čím vyšší je hodnota  $Re$ , tím menší je porucha dostatečná k obnovení turbulence. Není nutné aplikovat techniky řízení laminarizace v celém potrubí, ale místo toho stačí použít zařízení na vybraných místech (například za ohyby potrubí nebo armaturami), aby se zajistil laminární proud v přímých částech potrubí. [4]

Ukázalo se, že poměrně jednoduchá stálá modifikace rychlostního profilu proudění v trubce může vést k úplnému zhroucení turbulence a proudění se tak stane laminárním. Potlačení turbulence je možno dosáhnout různými způsoby (některé jsou dále popsány podrobněji), nicméně všechny fungují na principu upravení rychlostního profilu proudu tekutiny tak, aby došlo ke zpomalení jádra proudu a zároveň ke zrychlení tekutiny v blízkosti stěny. Docílíme tím vytvoření rychlostního profilu ve tvaru M, který se zdá být podstatný pro potlačení turbulence. [2, 4]

Dříve provedené výzkumy ukázaly, že modifikace rychlostního profilu v potrubí několika způsoby může vést k úplnému zhroucení turbulence a proudění může být nuceno k úplné laminarizaci i při vyšších Reynoldsových číslech. Byly představeny čtyři různé experimentální techniky pro úpravu rychlostního profilu turbulentního proudění, přičemž výsledný profil připomíná tvar písmene M. První technika využívá čtyři rotory umístěné uvnitř potrubí k intenzivnímu míchání proudu. Druhá technika používá stěnu (kolmou ke směru proudění) ke vstřikování další tekutiny přes 25 malých otvorů umístěných za sebou spirálovitě kolem potrubí. Třetí technikou bylo vstřikování tekutiny prstencovou mezerou u stěny, aby se urychlil tok blízko stěny. Čtvrtý přístup byl pomocí pohyblivého trubkového segmentu, který byl použit k lokálnímu zrychlení toku u stěny. Ve všech případech se ukázalo, že došlo k potlačení turbulence a proudění se nakonec stalo zcela laminárním, až při Reynoldsových číslech 100 000 v počítačových simulacích a 40 000 v laboratorních experimentech. Pokusy prokázaly, že k laminarizaci došlo jako přímý důsledek určité rychlosti a rozložení smykového napětí, zejména v oblasti stěny. [1, 4]

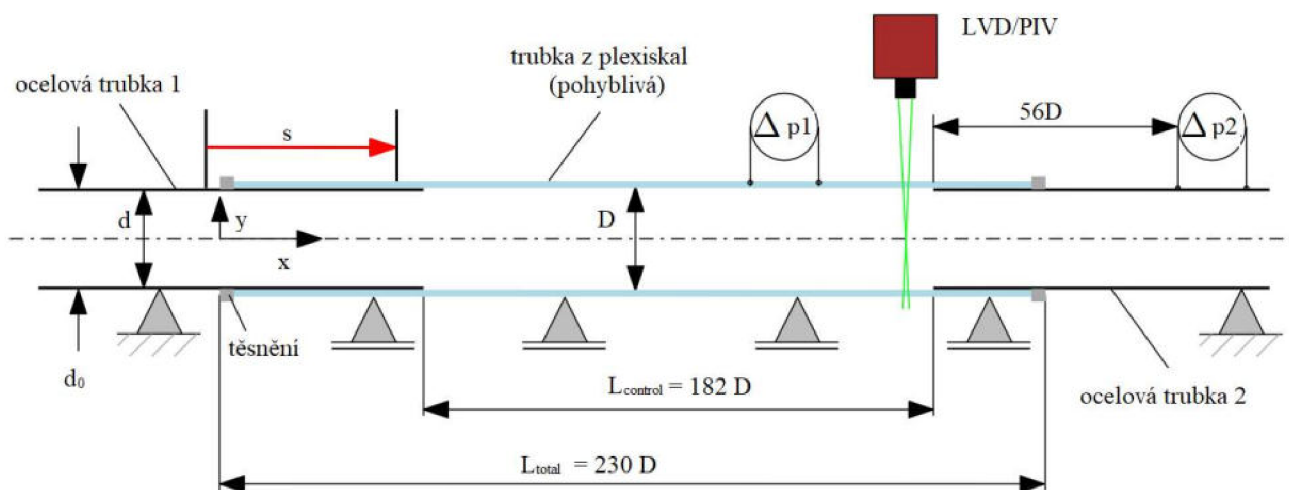
Níže jsou uvedeny výsledky experimentů, každý z experimentů používá pro laminarizaci proudu rozdílné zařízení

## 2.1 První metoda – pohyblivý segment potrubí

### 2.1.1 Popis metody

Za účelem dosažení potlačení turbulence tato metoda používá pohyblivý trubkový segment, který je krátce a rychle posunut ve směru proudu. Minimální délka a rychlost posunutí segmentu jsou určeny jako funkce Reynoldsova čísla. I když lze tuto metodu snadno použít při nízkých až středních rychlostech proudění, minimální délka proudu, po které musí akcelerace působit, se lineárně zvyšuje s Reynoldsovým číslem. V těchto experimentech bylo zpočátku turbulentní proudění potrubím narušeno impulzivním posunutím segmentu, který se pohyboval rovnoběžně s osou potrubí. V důsledku toho je tekutina v kontaktu s pohybujícím se segmentem vystavena dočasné úpravě okrajových podmínek, tedy na stěně potrubí není nulová rychlost proudění, a dochází k injekci hybnosti do oblasti blízké stěně. Poté, co se segment zastaví, proudění prochází postupnou laminarizací. Tato myšlenka potlačení turbulence pomocí pohyblivého segmentu na trubce vychází z použití hydrofobních povrchů pro snížení tření, kdy je podobně upravená okrajová podmínka, tedy že na stěnách kapalina neulpívá, ale probíhá zde částečný prokluz. [7]

Sestava sestavená pro experiment se skládá ze dvou přímých trubek z nerezové oceli (vnější průměr  $d_0 = 25,4 \pm 0,13$  mm, délka 2 m, tloušťka stěny  $0,4 \pm 0,04$  mm), které jsou spojeny koaxiální trubkou vyrobenou z plexiskla s mírně větším průměrem ( $D = 26 \pm 0,1$  mm, délka  $L_{\text{total}} = 230 D$ ). Tento segment (trubka z plexiskla) lze posouvat tam a zpět podél axiálního směru nastavitelnou rychlostí na předepsanou vzdálenost.



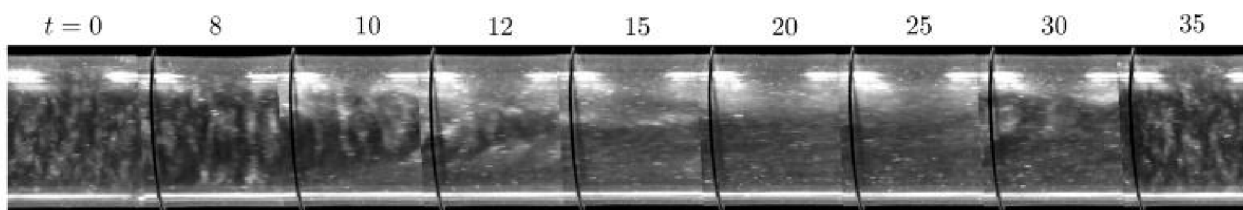
Obr. 2.1.1 – Náčrt sestavy – pohyblivý segment – převzato z [7]

Obrázek 2.1.1 zobrazuje náčrt zařízení a uspořádání měřicích zařízení použitých pro experiment. Na vstupu do ocelové trubky je zajištěn stálý průtok vody. Pohyblivý segment je částečně nasunut přes ocelové trubky na začátku a konci (na obrázku označeny jako ocelová trubka 1 a ocelová trubka 2). Ocelové trubky jsou připevněny k základně sestavy a částečně podírají trubku z plexiskla, která se může volně posouvat v axiálním směru. Čtyři polymerová pouzdra poskytují další oporu pohybující se části a pomáhají předcházet ohýbání a vibracím během pohybu. Dvě těsnění jsou umístěna do mezery mezi vnitřní stěnou

pohyblivé části a vnější části ocelových trubek, aby se zabránilo únikům kapaliny. Skutečná délka trubky, kterou lze pohybovat za účelem úpravy rychlostního profilu proudění, je  $L_{\text{control}} = 182 D$ . Jelikož ocelové trubky mají menší průměr než kontrolní část, na konci kontrolní části proud naráží na vzniklou překážku, ta ale zřejmě nenarušuje proudění natolik, že by nebylo schopno laminarizace. Byl použit lineární pohon (na obrázku není naznačen) zespol připevněný na pohyblivou část trubky. Pohon může pohybovat trubkou z plexiskla na nastavitelnou vzdálenost  $s \leq s_{\text{max}} = 1,5 \text{ m}$  při nastavitelné rychlosti stěny  $U_w \leq U_{w,\text{max}} = 5,5 \text{ m/s}$ . Maximální možné zrychlení je  $a = 50 \text{ m/s}^2$ . Aby bylo možné upravit Reynoldsovo číslo, tedy rychlost proudění, průtok je regulován pomocí ventilu umístěného před testovací částí v přívodním potrubí (není zobrazeno). Průtok je monitorován elektromagnetickým průtokoměrem. [7]

Při experimentu bylo použito několik metod pro měření a zachycení celého procesu. Pro stanovení tlakových ztrát byly použity dva tlakové snímače, první snímač diferenčního tlaku je namontován na segment z plexiskla 128D od počátku řízené oblasti (vzdálenost měřená při nulovém vysunutí segmentu,  $s = 0$ ) a měří tlakovou ztrátu  $\Delta p_1$ . Druhý senzor je namontován na ocelové trubce 2 56D za koncem řízené oblasti a měří tlakovou ztrátu  $\Delta p_2$ . Na dolním konci segmentu, 5 D před ocelovou trubkou 2, se měří rychlost na ose  $U_c$  pomocí jednosložkového systému LDV. Voda je naočkována neutrálně vznášejícími se dutými skleněnými kuličkami o průměru 13 mikrometrů. Systém 2D PIV je nastaven tak, aby sledoval proud podélného řezu pohyblivého segmentu trubky. Snímané okno je dlouhé 1,5 D a prochází středovou osou potrubí (měření pomocí PIV a LDV je soustředěno v jednom místě). Aby se snížilo zkreslení způsobené lomem světla, trubkový segment je uzavřený do obdélníkového vodou naplněného boxu z plexiskla. Kontinuální laser osvětluje měřicí rovinu a vytváří osvětlenou plochu o jmenovité tloušťce  $\approx 1 \text{ mm}$ . Snímky PIV se zaznamenávají vysokorychlostní kamerou namontovanou svisle nad boxem naplněným vodou. Po celé délce pohyblivé trubky je umístěn pásek LED a osvětluje proudění po celé délce, což umožňuje snadnou detekci laminárních a turbulentních stavů pouhým okem a kamerou. [7]

### 2.1.2 Výsledky experimentu

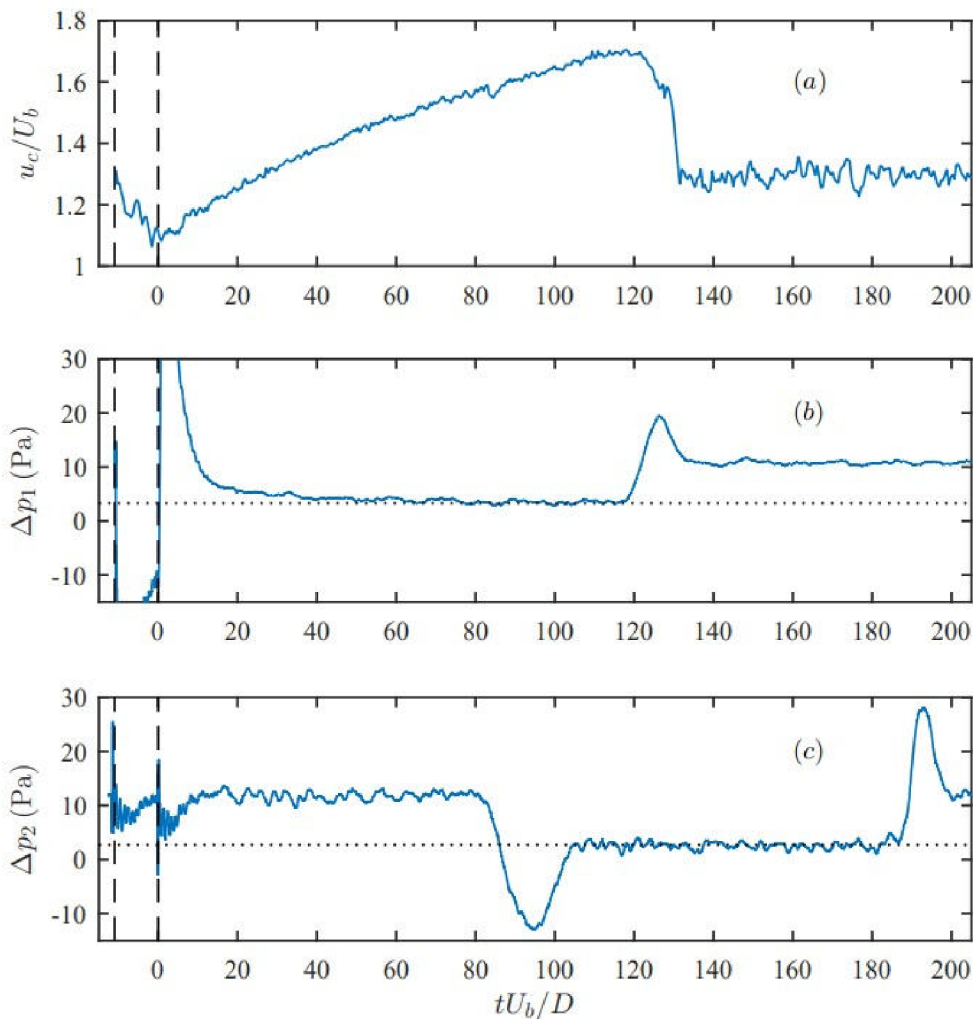


Obr. 2.1.2 – Průběh laminarizace – převzato z [7]

Na obrázku 2.1.2 vidíme průběh laminarizace, který je možný vidět i pouhým okem. V počátku experiment bylo nastaveno  $Re = 5000$  a postupně byla prodlužována délka posunu stěny  $s$ , zatímco rychlost stěny  $U_w$  se udržuje na stejné hodnotě jako střední rychlost  $U_b$ . Průtok je monitorován na dolním konci průhledného potrubí. Jak se délka posunu  $s$  prodlužuje, laminarizace nastává až do bodu, do kterého probíhá konzistentně a opakovaně a to pro  $s \geq 8D$ . Je důležité si uvědomit, že proces rozpadu turbulence probíhá poté, co se zeď zastaví, takže ovlivněná část kapaliny je posouvána po proudu při laminarizaci. Obrázek 2.1.2

ukazuje statické snímky z typického průběhu experimentu. Zpočátku plně turbulentní proudění při  $Re = 5\,000$  ( $t < 5$  s) je vystaven náhlému posunu stěny ( $5 < t < 7$  s) pro délku  $s = 9D$  a rychlost stěny  $U_w = U_b$ . Poté, co se zeď zastaví, jsou trubkou stále viditelné turbulentní struktury (druhý panel na obrázku 2.1.2). Přesto se postupně rozpadají a proud přechází do laminárního stavu. Jelikož k laminarizaci dochází pouze v posunuté části, nakonec je laminarizovaná část proudu nahrazena předřazeným turbulentním proudem ( $t > 30$  s). [7]

Graf 2.1.3 zobrazuje úplnou laminarizaci turbulentního proudění při  $Re = 8000$ , (a) poměr střední rychlosti a rychlosti na ose potrubí měřené pomocí metody PIV, (b) a (c) tlakovou ztrátu  $\Delta p_1$  a  $\Delta p_2$ . Posun stěny je  $s = 12D$  při  $U_w = U_c \approx 1,3U_b$ , kde  $U_c$  je časově středovaná rychlost v ose potrubí,  $U_w$  rychlost na stěně potrubí,  $U_b$  střední rychlost proudění. Svislé přerušované čáry představují první a poslední okamžik pohybu zdi. Tečkovaná čára označuje teoretický laminární pokles tlaku. Během pohybu stěny rychlost na ose prudce klesá z  $\approx 1,3U_b$  na  $\approx 1,1U_b$  (graf 2.1.4 (a),  $-10 < t < 0$ ), zatímco ze snímačů tlaku nejsou k dispozici žádné spolehlivé informace (signál zmizí z měřítka na obrázku 4 (b)), v důsledku otřesů a rychlému posunutí stěny. Ihned poté, co se zeď zastaví, se proud neustále vyvíjí směrem k parabolickému profilu. To je dobře zachyceno na grafu 2.1.3 (c), kde o něco později tlakové snímače zaznamenají průchod krátké oblasti, kde se proudění plně laminarizuje.

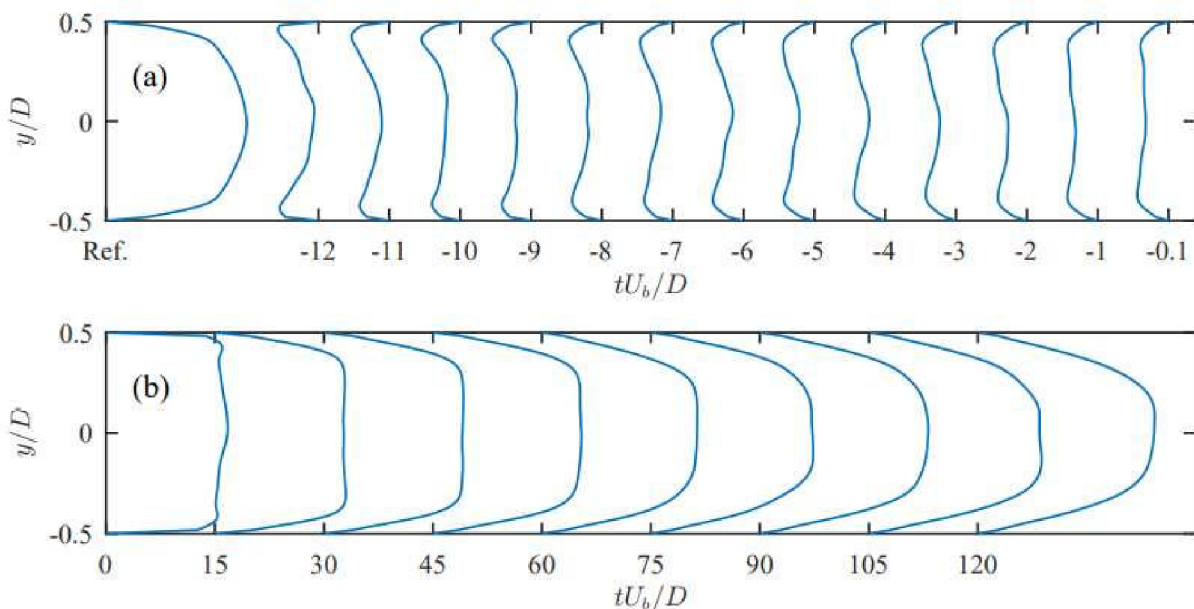


Graf 2.1.3 – Časové závislosti (rychlost, tlak) – převzato z [7]



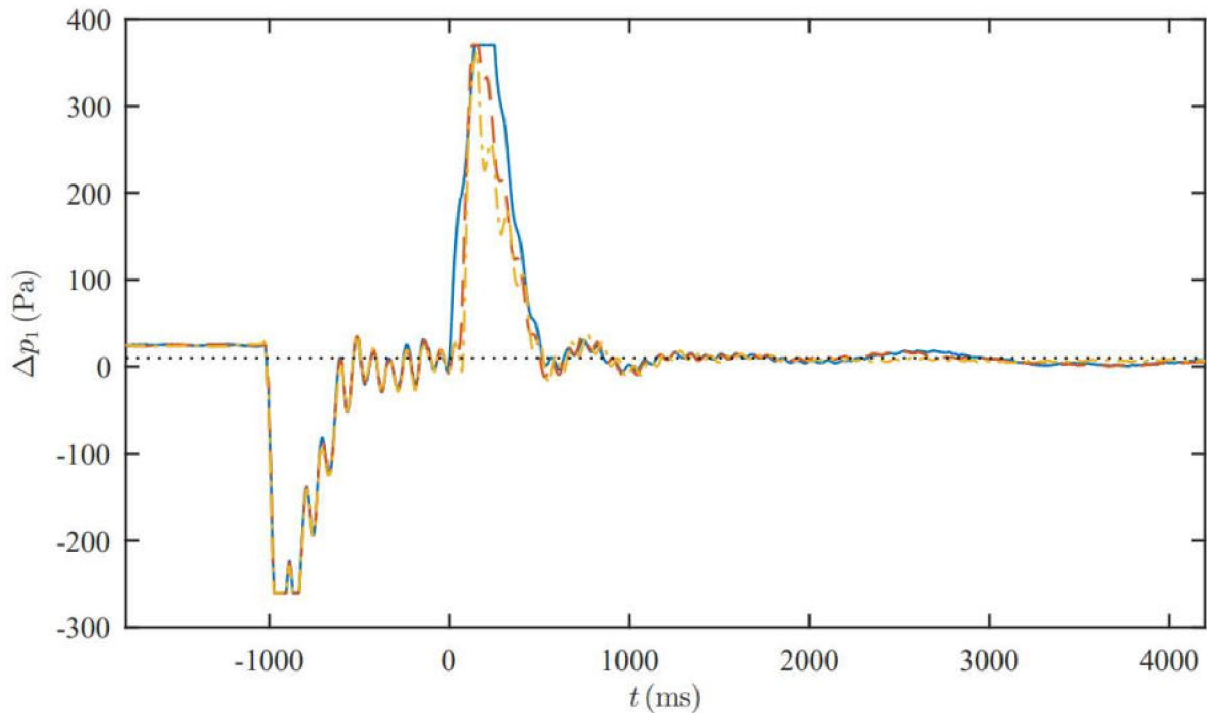
Velké překmity viditelné v tlakových signálech naznačují průchod turbulentně-laminárního rozhraní přes snímače. Stojí také za povšimnutí, že proudění zůstalo laminární i po přechodu přes rozhraní mezi pohyblivým segmentem a ocelovými trubkami.

Přesnější náhled do dynamiky během pohybu stěny poskytuje graf 2.1.4 (a). Zde je zobrazen časový vývoj rychlostního profilu při pohybu stěny měřený pomocí 2D PIV. Každý profil je označen hodnotou času uplynulého od zastavení pohybující se stěny. Profil označený jako Ref. představuje původní turbulentní proudění. Na začátku pohybu stěny ( $tU_b / D = -12$ ) je účinek pohybující se stěny omezen na oblast blízko stěny. Časem dojde k vývoji proudů a také proud v oblasti jádra je postupně ovlivňován novou okrajovou podmínkou. Vývoj proudů je znázorněn v grafu 2.1.4 (b). Ihned po zastavení stěny se obnoví okrajová podmínka nulové rychlosti na stěně a rychlostní profil dostane tvar podobný písmenu M. Od té doby se rychlostní profil vyvíjí směrem k parabolickému, a poměr rychlostí  $U_c / U_b$  dosahuje hodnoty až 1,7.



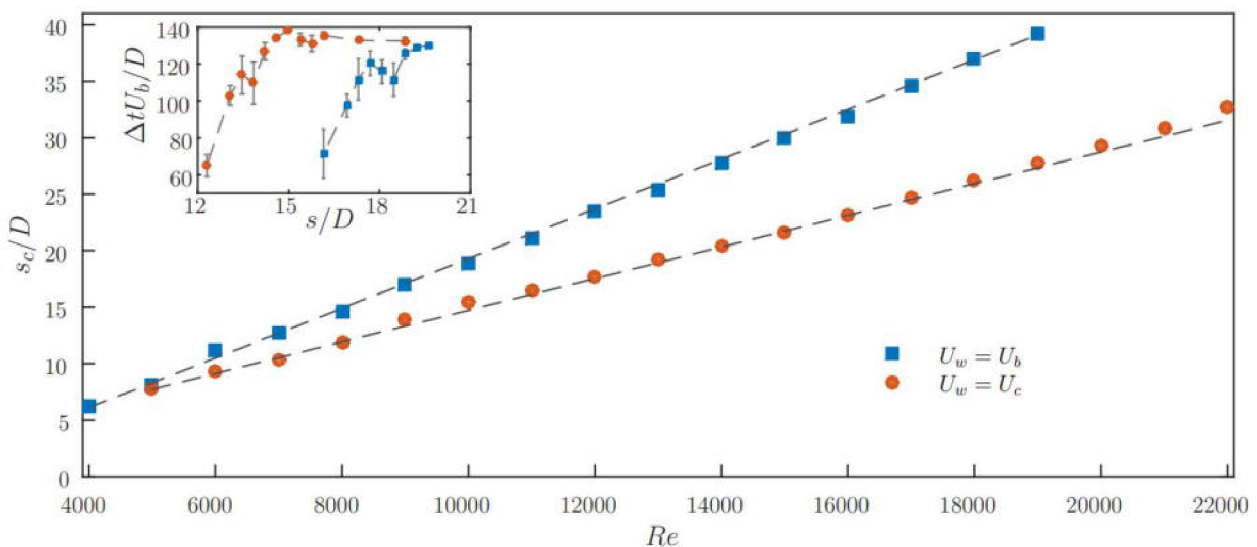
**Graf 2.1.4** – Rychlostní profily – převzato z [7]

Zdá se, že následný vývoj proudění závisí pouze na ustálené rychlosti stěny a na délce posunu během fáze pohybu stěny. Zrychlování a zpomalování při posunu stěny zřejmě nemá vliv na výsledky laminarizace, jak ukazuje graf 2.1.5. Zde jsou srovnávány tlakové ztráty  $\Delta p_l$  pro tři laminarizující případy při  $Re = 10\,000$  s hodnotami zrychlení posuvného segmentu  $|a| = 2, 5, 10 \text{ m/s}^2$ , platí pro plná (modrá), přerušovaná (červená), respektive tečkovaná čára (oranžová). Každý signál se získá zprůměrováním tří různých průběhů experimentu, aby se zvýraznily koherentní oscilace způsobené fyzickými vibracemi. Délka posunu stěny a rychlost stěny jsou  $s = 16D$  a  $U_w = U_c \approx 1,3U_b$ . Tečkovaná čára představuje pokles tlaku při laminárním proudění.



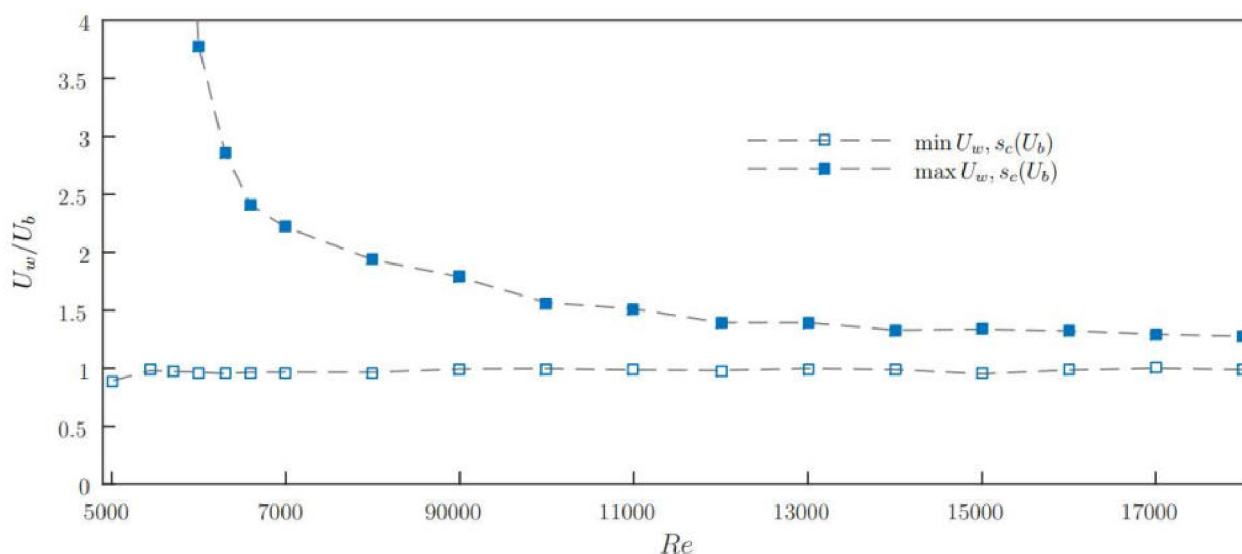
Graf 2.1.5 – Tlakové ztráty pro různá zrychlení segmentu - převzato z [7]

Dále je zkoumáno, jak délka posunu stěny  $s$  ovlivňuje proces laminarizace. V těchto experimentech je stav proudění monitorován pomocí LDV, aby se detekovaly laminární části proudu a změřily se jejich délky. Graf 2.1.6 ukazuje minimální délku posunu stěny požadovanou pro laminarizaci (dále jen kritická délka posunu stěny  $s_c$ ) v závislosti na Reynoldsově čísle pro dvě rychlosti stěny,  $U_w = U_b$  (modré čtverce) a  $U_w = U_c$  (červené kruhy). Pro  $Re = 5000$  není pozorován žádný rozdíl mezi těmito dvěma rychlostmi. Každý bod grafu odpovídá množině měření, kde je prodlužována délka  $s$  a udržována konstantní rychlost stěny. Vložka na grafu 2.1.6 ukazuje jeden takový datový soubor, kde je vynesena střední délka trvání laminárního proudění  $\Delta t$  proti délce posunu  $s$ , pro  $U_w = U_b$  (modré čtverce) a  $U_w = U_c$  (červené kruhy). Reynoldsovo číslo je  $Re = 10\,000$ . S prodlužujícím se posunem  $s$ , se prodlužuje doba trvání laminárního proudění a saturace.



Graf 2.1.6 – Závislost délky posunu stěny - převzato z [7]

Dále je zkoumán vliv rychlosti stěny, když je délka posunu konstantní. Pro každé  $Re$  je vybrána kritická délka posunu  $s_c$  pro  $U_w = U_b$  z grafu 2.1.6. Pro tuto délku posunu  $s_c$  a Reynoldsovo číslo je změněna rychlost stěny a určen rozsah rychlostí, ve kterém dojde k laminarizaci. Požadovaná minimální a maximální rychlost je dána příslušnými otevřenými a plnými symboly na obrázku 2.1.7. Každý datový bod je nalezen analogicky k hledání kritické délky posunu. Jak se zvyšuje Reynoldsovo číslo, povolený rozsah rychlostí posunu stěny rychle klesá, zatímco minimální rychlost se zdá být nezávislá na  $Re$ . Je zajímavé, že při nízkých Reynoldsových číslech ( $Re < 6000$ ) libovolně velké rychlosti stěny vedou k laminarizaci, při posunu stěny rovném kritické hodnotě získané s  $U_w = U_b$ . Maximální testovaná rychlost byla  $U_w = 40 U_b$  při  $Re = 5000$  (bod na obrázku není zobrazen) a průtok byl plně laminarizován. Zde bylo nutné zvýšit zrychlení na maximální povolenou hodnotu, aby bylo dosaženo předepsané rychlosti. [7]



Graf 2.1.7 – Závislost rychlosti stěny na velikosti  $Re$  - převzato z [7]

### 2.1.3 Zhodnocení

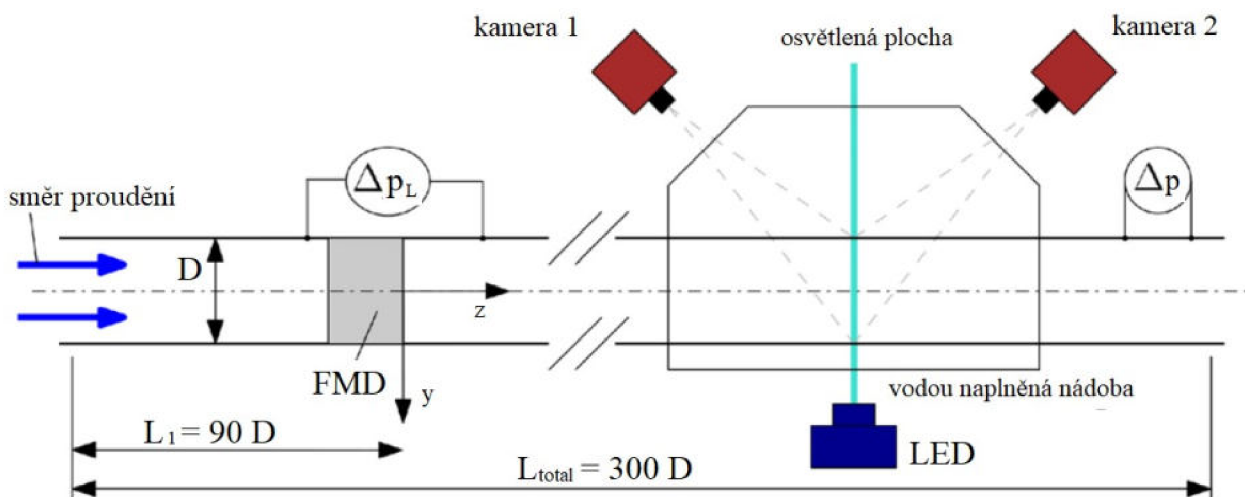
Ukázalo se, že při náhlém zrychlení tekutiny v blízkosti stěny klesá hladina turbulentních fluktuací exponenciálně. Zatímco při nízkém  $Re$  ( $\approx 5000$ ) libovolně velké rychlosti stěny vedou k laminarizaci proudění, při vyšších  $Re$  pouze rychlosti stěny blízké střední rychlosti proudění vedou k rozpadu turbulence. Kromě toho musí pohyb stěny potřebný k urychlení tekutiny působit po minimální dobu, aby byl vytvořen požadovaný rychlostní profil tvaru M. Z toho tedy plyne, že prvek působící potlačení turbulence musí působit na proudění po určité délce, která se lineárně prodlužuje s rostoucím  $Re$ . Laminarizace proudění touto metodou bylo dosaženo i při poměrně vysokých  $Re$ , ale ve všech případech po určité době došlo k návratu do turbulentního stavu proudění. [7]

## 2.2 Druhá metoda – laminarizace pomocí voštin

### 2.2.1 Popis metody

Tato metoda pro potlačení turbulence využívá zařízení, které má tvar včelích pláství neboli voštin. Voštiny vyrobené pomocí 3D tisku byly použity jako stacionární zařízení pro řízení proudění (FMD – zařízení pro řízení proudění) a upravují rychlostní profil proudu. V tomto experimentu byly porovnávány voštiny o konstantní délce po celém poloměru trubky a voštiny s proměnnou délkou napříč poloměrem. Je zde snaha navrhnout optimální tvar voštin pro maximální laminarizaci při minimální tlakové ztrátě.

Obrázek 2.2.1 zobrazuje náčrt zařízení použitého k testování různých FMD. Zařízení se skládá ze skleněné trubky s vnitřním průměrem  $D=30\text{mm}$ . Celková délka potrubí je  $300D = 9\text{m}$ . Voda je přiváděna ze zásobníku umístěného 20m nad potrubím a je dopravována gravitačně. Průtok a tím i Reynoldsovo číslo je možné nastavovat pomocí regulačního ventilu na přiváděcím potrubí. Měření rychlostního pole bylo provedeno pomocí metody PIV, rovina měření byla kolmá k proudu vody.



Obr. 2.2.1 – Náčrt sestavy – laminarizace pomocí voštin - převzato z [2]

Okolo polohy osvětlené plochy je trubka uzavřena hranolem naplněným vodou, aby se předešlo zkreslení lámáním světla. FMD (voštiny) je umístěno  $90D$  od vstupu do potrubí, je tak zajištěno úplné rozvinutí turbulence před vstupem do voštin. Pro měření tlakové ztráty  $\Delta p$  mezi dvěma tlakovými kohouty je použit snímač diferenčního tlaku. Vzhledem k tomu, že při turbulentním proudění vznikají mnohem větší ztráty při tření na povrchu potrubí než při laminárním proudění, a navíc se rozdíl zvětšuje se zvyšujícím se Reynoldsovým číslem, tlaková ztráta je použita pro přímou detekci stavu toku na základě obrovského rozdílu mezi třecími součiniteli ( $f_{\text{turb}}$  a  $f_{\text{lam}}$ ). Za tímto účelem byl snímač umístěn na dolním konci potrubí, jak je znázorněno na obrázku 2.2.1, a byl umístěn  $30D$  za voštinami ve směru proudění. Pro  $Re \leq 80000$ , poměr  $f_{\text{turb}}$  a  $f_{\text{lam}}$  může být vyjádřen pomocí Blasiusovy rovnice:



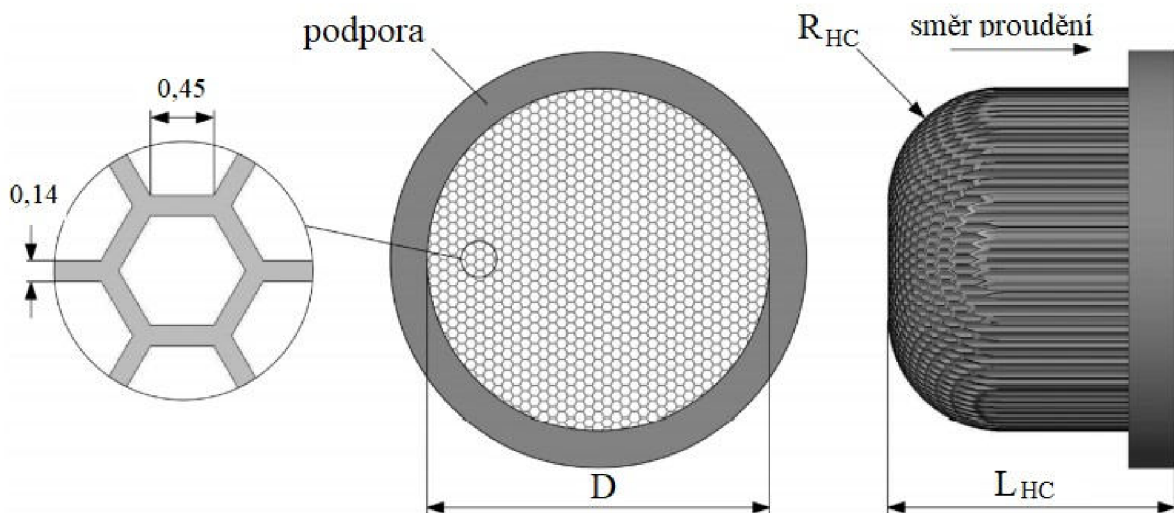
$$\frac{f_{lam}}{f_{turb}} = \frac{\frac{64}{Re}}{\frac{0,316}{Re^{0,25}}} \sim Re^{-0,75} \quad (7)$$

Z tohoto také plyne, že i při nízkých  $Re$  může potlačení turbulence způsobit velké snížení odporu. Dále bylo měřeno  $\Delta p_L$  podél FMD pro výpočet koeficientu poklesu tlaku  $K$  podle:

$$K = \frac{2\Delta p_L}{\rho U^2} \quad (8)$$

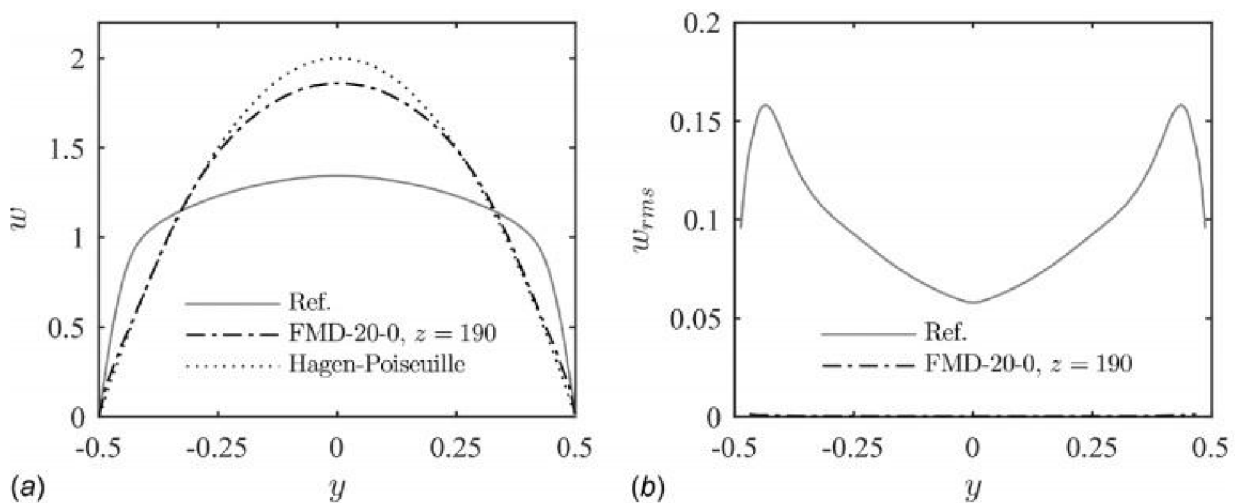
kde  $\rho$  je hustota kapaliny a  $U$  je střední rychlost proudění v potrubí. Při měření  $\Delta p_L$  byly oba tlakové snímače odděleny délkou  $12D$ , přičemž první snímač byl umístěn  $2D$  před voštinami.[2]

Aby bylo možné regulovat proud a docílit tak ploššího rychlostního profilu, musí stacionární FMD přeměrovat průtok tak, že proud je zpomalen ve středu potrubí a zrychlí blízko stěny ve srovnání s nekontrolovaným rychlostním profilem. Pro tento úkol byly použity voštiny s variabilní délkou po průřezu trubky. Tyto FMD se skládají z pravidelných šestihranných voštin. Podpěra slouží k uchycení FMD mezi dvě části potrubí v přírubové spojce potrubí. Buňky voštinového pláště mají délku strany  $l = 0,45$  mm a tloušťku stěny  $t = 0,14$  mm, jak je znázorněno v detailu obrázku. Hydraulický průměr jednoho článku je  $d_h = 4S/O = 0,78$  mm, kde  $S$  je plocha průřezu a  $O$  obvod buňky. Pórovitost voštin, tj poměr otevřené a blokové oblasti je  $\beta = 71,8\%$ . FMD jsou vytištěny s různými celkovými délkami ( $L_{HC}$ ) a různými celkovými tvary, tj. s radiálně se měnící délkou buněk. Délka buňky se mění v radiálním směru zkosením FMD s proměnným poloměrem  $R_{HC}$  od 0 do 14 mm. Kromě toho několik netvarovaných voštin (kde  $R_{HC} = 0$ ) s  $L_{HC} = 1, 3, 5, 7, 10, 15$  a 20 mm, s relativní délkou  $L_{HC} / d_h = 1,3-25,6$ , byly zkoumány pro srovnání. Pro každé konkrétní FMD je přiřazena zkratka podle konvence pojmenování FMD –  $L_{HC}$  –  $R_{HC}$ . [2]



Obr. 2.2.2 – Návrh voštin – převzato z [2]

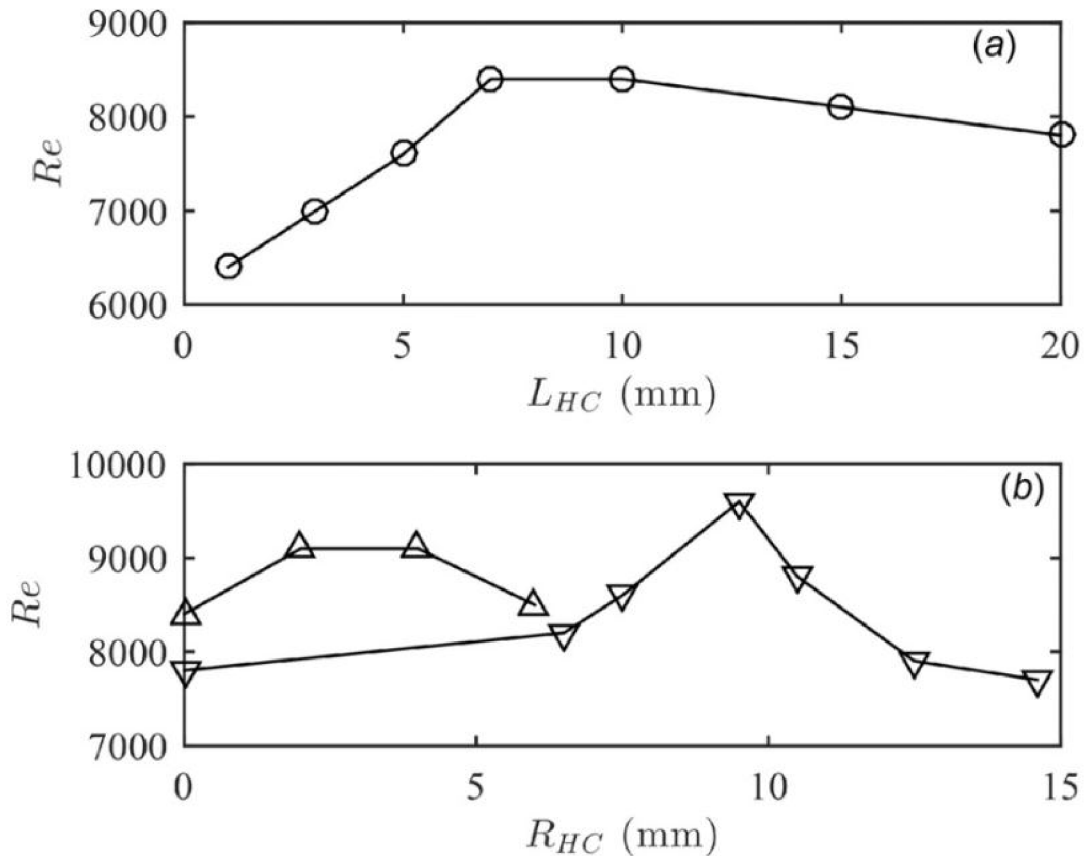
Určení úspěšnosti úpravy voštin je poměrně jednoduché. Pokud při  $z = 190D$  je pozorován laminární koeficient poklesu tlaku ( $f_{lam}$ ) a parabolický profil s výrazně sníženou intenzitou turbulence (jak je znázorněno na obr. 2.2.3), pak se laminarizace považuje za efektivní. V tomto experimentu byla snaha o nalezení optimálního tvaru voštin pro laminarizaci při nejvyšším možném  $Re$ , a zároveň optimalizovat zařízení tak, aby tlakový pokles na zařízení byl co nejmenší. V mnoha experimentech již byla zdůrazněna důležitost přísných tolerancí. I malé odchylky v rozměrech mohou způsobit odchylky koeficientu poklesu tlaku a mohou způsobit také změnu rychlostního profilu (zabránit laminarizaci). Z těchto měření je možné potvrdit, že drobné nedokonalosti mohou mít zásadní vliv na charakteristiky proudění za FMD. Jedna buňka, která je částečně blokována vzduchovou bublinou nebo nečistotami, může zcela zabránit laminarizaci. [2]



Obr. 2.2.3 – Rychlostní profily - převzato z [2]

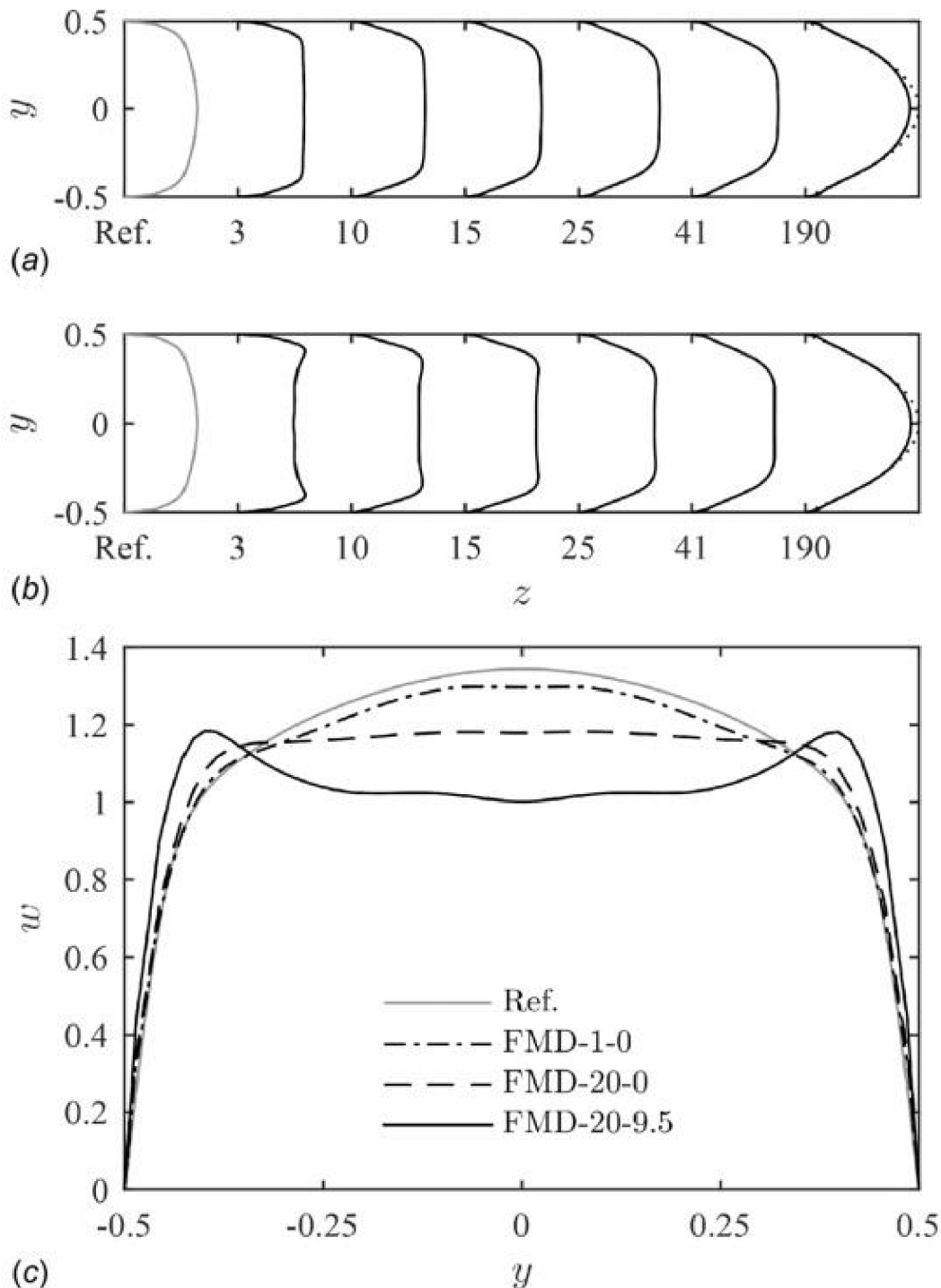
## 2.2.2 Výsledky

Při experimentu bylo měněno Reynoldsovo číslo v krocích po 100 a za FMD bylo pozorováno laminární nebo turbulentní proudění. Obrázek 2.2.4 (a) zobrazuje maximální hodnoty, při kterých bylo pozorováno laminární proudění (bylo naměřeno  $f_{lam}$ ), pro přímé voštiny ( $R_{HC} = 0$  mm) o délkách  $L_{HC} = 1-20$  mm. Již nejkratší voštiny s délkou  $L_{HC} = 1$  mm vykazují neočekávaně vysokou schopnost laminarizace proudění. Až do  $Re = 6400$  se proudění za voštinami stane laminárním a zůstane tak až do konce sledované části potrubí. Prodloužením FMD na 10 mm lze dosáhnout laminárního proudění dokonce až do  $Re = 8400$ . Další prodloužení už je nevýhodné, protože maximální hodnoty  $Re$  pro laminarizaci klesají. V dalším kroku byly voštiny upraveny zaoblením a znovu byly testovány v krocích po 100. Obrázek 2.2.4 (b) zobrazuje schopnost laminarizace pro dva vybrané příklady ( $L_{HC} = 10$  mm – znak trojúhelníku ležící na hraně,  $L_{HC} = 20$  mm – znak trojúhelníku ležící na špičce) s poloměrem zaoblení  $R_{HC}$ . Zaoblení může ještě více zlepšit schopnost laminarizace FMD. FMD s délkou  $L_{HC} = 10$  mm dosahuje laminarizace až při  $Re = 9100$  s  $R_{HC} = 2-4$  mm, FMD s délkou  $L_{HC} = 20$  mm dosahuje laminarizace při  $Re = 9600$  s  $R_{HC} = 9,5$ . Další zvýšení  $R_{HC}$  se opět nejeví jako prospěšné, protože maximální hodnoty pro laminarizaci se snižují s dalším zvyšováním  $R_{HC}$ .



Obr. 2.2.4 – Závislosti  $Re$  na délce a zaoblení voštin - převzato z [2]

Obrázky 2.2.5 (a) a (b) ukazují vývoj zprůměrovaného rychlostního profilu za přímým FMD ( $L_{HC} = 20$  mm) a za zaobleným FMD ( $R_{HC} = 9,5$  mm). V obou dvou případech FMD laminarizují proudění velmi podobně, v tomto případě při  $Re = 6000$ , je to ověřeno vývojem profilů směrem k parabolickému (laminárnímu) tvaru. Parabolický tvar je zřetelně vidět na  $z = 190$ , existuje však obzvláště pozoruhodný rozdíl v rychlostních profilech přímo za FMD, viditelných pro profily na  $z = 3$ . Zatímco profil pro přímé FMD je jasně plochý ve srovnání s referenčním profilem, profily za zaobleným FMD mají tvar písmene M.



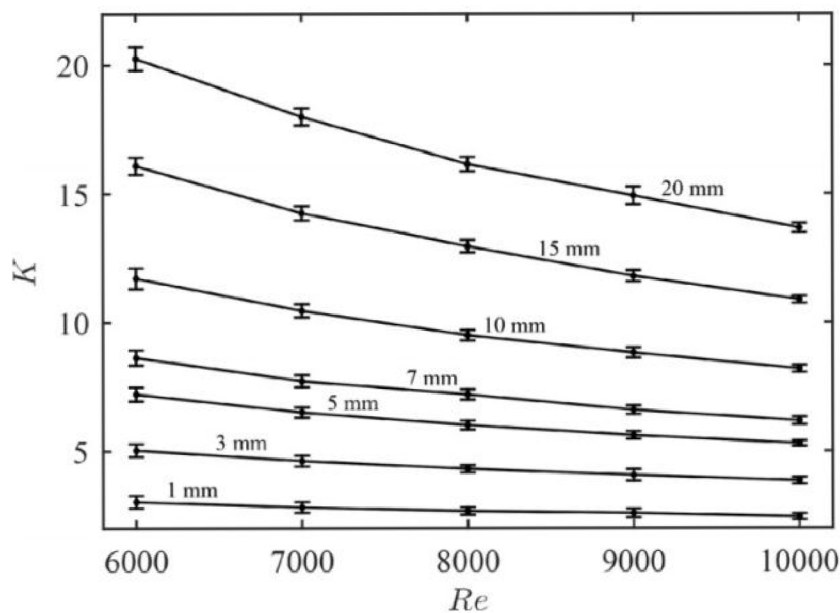
**Obr. 2.2.5** – Rychlostní profily – voštiny - převzato z [2]

Aby bylo možné kvantitativní srovnání zploštění profilu v důsledku přímého FMD a profilu ve tvaru M v důsledku zaobleného FMD, obr. 2.2.5 (c) zobrazuje čtyři různé rychlostní profily při  $z = 3$ . Referenční profil byl měřen v neovlivněném turbulentním proudění. Rychlostní profil pro FMD-1-0 vykazuje ve srovnání s tím mírné, ale ne příliš výrazné zploštění. U mnohem delšího FMD-20-0 je rychlostní profil téměř dokonale plochý ve střední oblasti průřezu. Voštiny se zaoblením FMD-20- 9,5 vytváří profil ve tvaru M. Profil ve tvaru M je způsoben překmitou rychlejší tekutiny v blízkosti stěny (vrchol při  $y = \pm 0,4$ ) a sníženou rychlostí ve středu (zde je výrazná plošina, kde  $w = 1$ ). Rychlostní profil

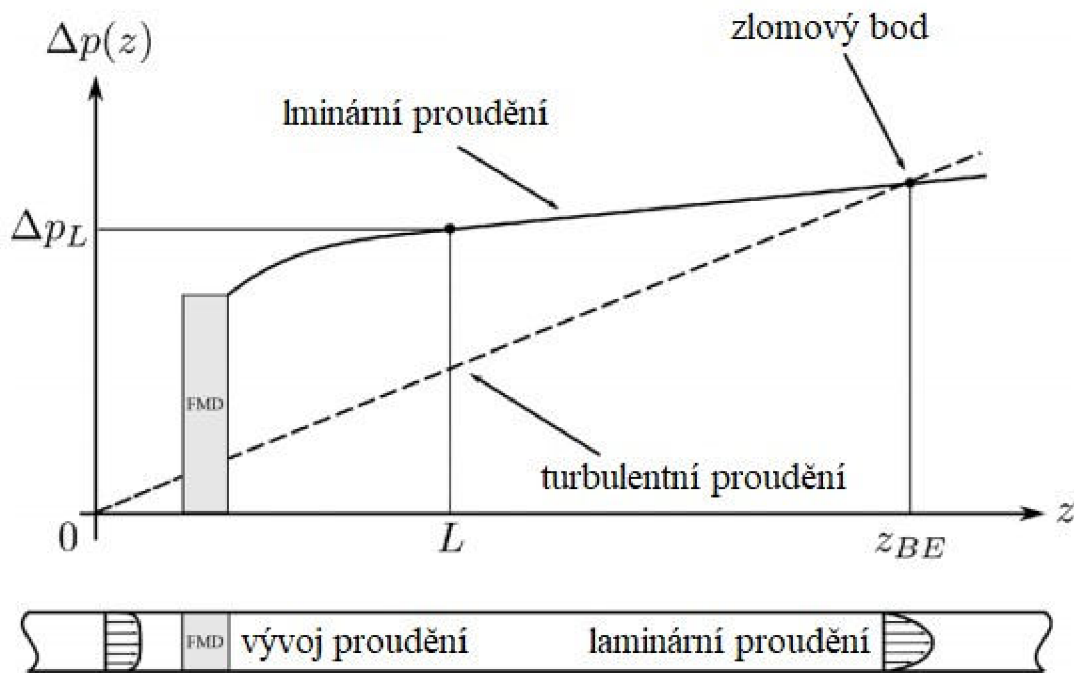


proudění ve tvaru písmene M poskytuje tu nejlepší schopnost laminarizace, která byla pozorována. Podle obr. 2.2.4 (b) může FMD-20-9,5 laminarizovat průtok až do  $Re = 9600$ , což je 23% nad netvarovaným FMD-20-0 a 14% nad nejlépe fungujícím netvarovaným FMD-10-0. Ačkoli s těmito absolutními hodnotami je třeba zacházet opatrně a mohou se u různých FMD lišit (s různě velkými voštinami atd.) a u různých průměrů potrubí, trend, že je výhodný tvar rychlostního profilu M ve srovnání s pouhým zploštěním profilu, je potvrzen i dalšími experimenty. [2]

V dalším kroku byl změřen pokles tlaku  $\Delta p$  přes FMD s délkou 1, 3, 5, 7, 10, 15 a 20 mm a byl vypočítán koeficient poklesu tlaku  $K$  podle rovnice (8). Obrázek 2.2.6 ukazuje  $K$  v rozsahu  $6000 \leq Re \leq 10\,000$ . Delší FMD vedou k většímu poklesu tlaku a celkově tento trend klesá s rostoucím Reynoldsovým číslem. Úprava průtoku pomocí pasivní překážky, jako jsou FMD, přináší další náklady na celkovou tlakovou ztrátu. Skutečné realizace čisté energetické úspory pro transport tekutiny lze dosáhnout pouze tehdy, když zisk v důsledku laminárního poklesu tlaku převyšuje celkovou ztrátu. Obrázek 2.2.7 zobrazuje kvalitativní chování tlakové ztráty  $\Delta p(z)$  vzhledem k tlakovému kohoutku umístěnému  $2D$  před voštinovou FMD. Plná čára představuje proudění s FMD, přerušovaná čára představuje proudění bez FMD. Přítomnost překážky má za následek náhlý skok tlaku. Pokud však skutečně dojde k laminarizaci, pak se v určitém bodě tlakové ztráty srovnají a díky FMD jsou následné ztráty menší. [2]



Obr. 2.2.6 – Závislost koeficientu  $K$  – převzato z [2]

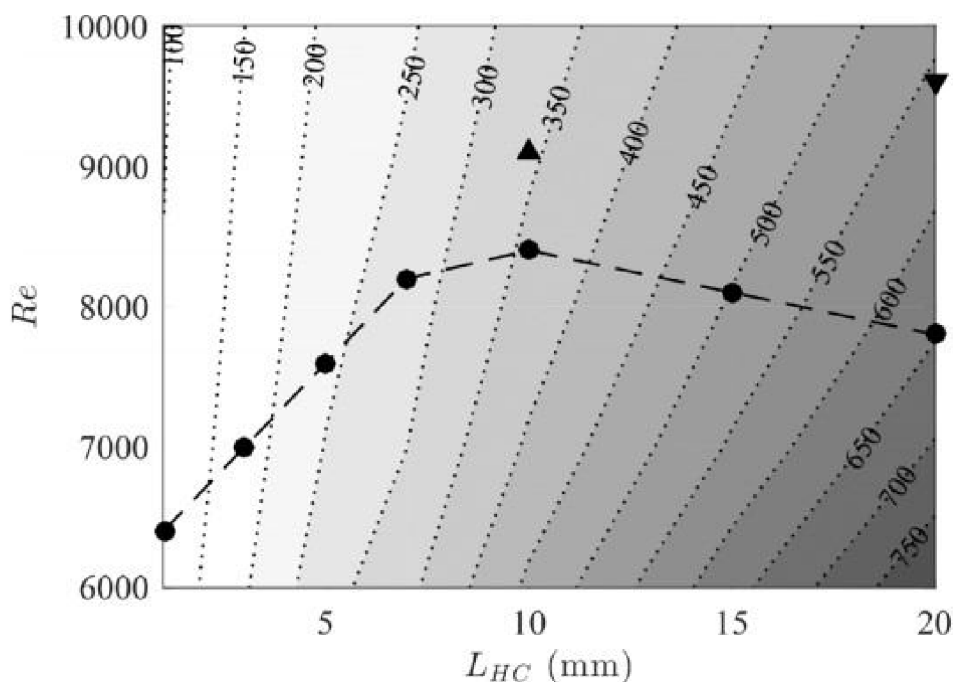


Obr. 2.2.7 – Průběh tlakové ztráty – převzato z [2]

Vzdálenost takového energetického bodu zlomu od FMD je vhodným měřítkem pro charakterizaci výkonnosti FMD. Obecně to závisí jak na Reynoldsově čísle, tak na celkové tlakové ztrátě způsobené FMD. Pro odhad vzdálenosti bodu zlomu  $z_{BE}$  hledáme průnik mezi  $\Delta p(z)$  bez FMD (přerušovaná čára, obr. 2.2.7) a  $\Delta p(z)$  s FMD (plná čára). Vzdálenost je tedy dána vztahem:

$$z_{BE} = \frac{\Delta p_L - L f_{lam}}{f_{tur} - f_{lam}} \quad (9)$$

Výsledky jsou uvedeny na obr. 2.2.8 společně s křivkou, která popisuje maximální  $Re$ , pro které FMD tvoří stabilní laminární proudění. Jak je vidět, FMD-1-0 může dosáhnout energetického bodu zlomu po délce téměř 100 D. FMD-10-0 poskytuje značně zvýšenou schopnost laminarizace, avšak bod zlomu nastává až po délce 360 D. FMD-10-2, který laminarizuje tok až k  $Re = 9100$ , potřebuje k dosažení  $z_{BE}$  o něco méně než 350 D. Jinými slovy, čistého energetického zisku lze dosáhnout pouze v případě, že je potrubí delší než 350 D. FMD-20-9,5, který laminarizuje průtok až k nejvyššímu  $Re = 9600$ , potřebuje k dosažení  $z_{BE}$  délku potrubí alespoň 550D. [2]



Obr. 2.2.8 – Energetický bod zlomu pro jednotlivé FMD – převzato z [2]

### 2.2.3 Zhodnocení

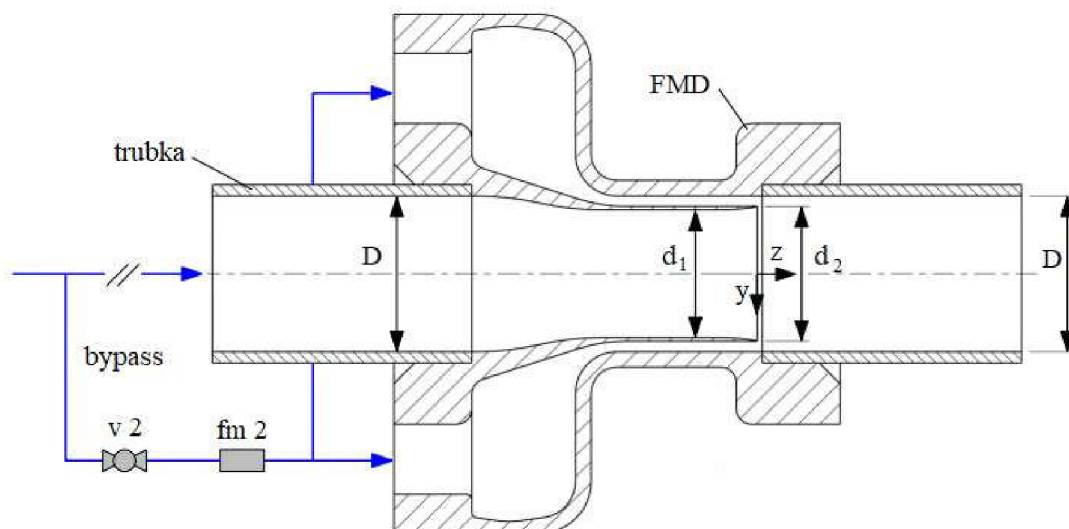
Při použití 3D vytištěných voštin pro řízení proudění se zjistilo, že voštiny se zaoblením, tedy s proměnnou délkou v příčném řezu lze použít k dosažení optimalizovaných rychlostních profilů pro maximální laminarizaci proudění. Maximálně dosažitelné Reynoldsovo číslo pro úplnou laminarizaci je řádově 10 000. I když je to stále relativně nízké Reynoldsovo číslo z hlediska průmyslových aplikací, dosažitelné snížení odporu je až pěti násobné. Odhad minimální vzdálenosti, kde lze dosáhnout čistého energetického zisku, je 100D pro nejkratší FMD-1-0 a 550D pro FMD-20-9,5 vykazující nejvyšší schopnost laminarizace. Ukázalo se, že ideálním rychlostním profilem pro laminarizaci není jen zploštělý profil, ale také specifický profil tvaru M, tj. s vysokou rychlostí blízko stěny a pomalejší ve středu trubky.

## 2.3 Třetí metoda – injekce další kapaliny skrze prstencovou mezeru

### 2.3.1 Popis metody

Toto zařízení umožňuje vstříkovat tekutinu do hlavního potrubí malou kruhovou soustřednou mezerou blízko stěny potrubí, jak je znázorněno na obrázku 2.3.1. Upravený rychlostní profil vycházející z tohoto zařízení je podobný jako při laminarizaci pomocí stacionárních zařízení (voštiny, vestavba), ale v tomto případě je možné kontinuálně pomocí ventilu v přívodním potrubí regulovat množství vstříkované kapaliny a tím ovlivnit rychlost v blízkosti stěny potrubí. V tomto případě je vstříkovaná kapalina odebírána pomocí obtoku z hlavního proudu určitou vzdálenost před FMD. Odebraná kapalina je následně vstříkována zpět do proudu. Zařízení by však mohlo být stejně dobře použito bez obtoku vstříkovaním kapaliny z vnější nádrže pomocí čerpadla. [4]

V tomto experimentu byla testována dvě různá zařízení systematickým obměňováním vstříkovaného průtoku při různých Reynoldsových číslech, jedno zařízení s prstencovou mezerou 1 mm a druhé s prstencovou mezerou 2 mm. V následujícím textu jsou tato zařízení označována jako 1 mm-FMD a 2 mm-FMD. Jak je znázorněno na obrázku 2.3.1, hlavní potrubí je mírně zúžené v krátkém rozsahu těsně před bodem vstříkování (1mm-FMD:  $d_1 = 26,6$  mm,  $d_2 = 28$  mm, plocha otevřené mezery  $A_1 = 91,1$  mm<sup>2</sup>; 2mm-FMD:  $d_1 = 24,6$  mm,  $d_2 = 26$  mm, plocha otevřené mezery  $A_2 = 175,9$  mm<sup>2</sup>).



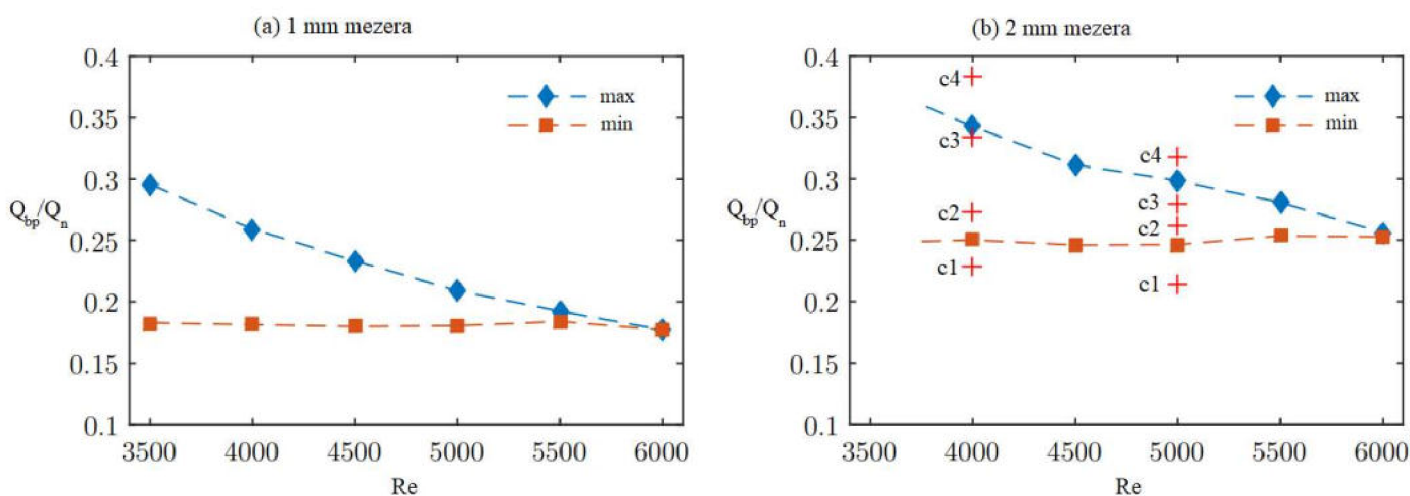
Obr. 2.3.1 – Náčrt zařízení pro injekci kapaliny do proudu – převzato z [4]

Na základě naměřeného průtoku obtoku  $Q_{bp}$  a plochy otevřené mezery lze vypočítat střední rychlost  $U_{inj}$  vstříkované kapaliny do proudu v rovině soutoku. Celkový průtok  $Q_m$  se měří v přívodním potrubí, zadané Reynoldsovo číslo platí tedy pro oblast před obtokem a za soutokem hlavního proudu s přiváděnou tekutinou. Reynoldsovo číslo  $Re_n$  a střední rychlost  $U_n$  v mírně zúžené části zařízení se počítá na základě  $d_1$  a tedy  $Q_m - Q_{bp} = Q_n$ . Ve všech uváděných měřeních byl průtok zvolen tak, aby  $Re_n$  (minimálně  $Re_n = 3000$ ) bylo dostatečně velké a aby bylo zajištěno plně vyvinuté turbulentní proudění, neboť už při  $Re_n = 2800$  bylo

pozorováno přerušované laminární proudění bez působení jakýchkoli uměle vytvořených sil. [4]

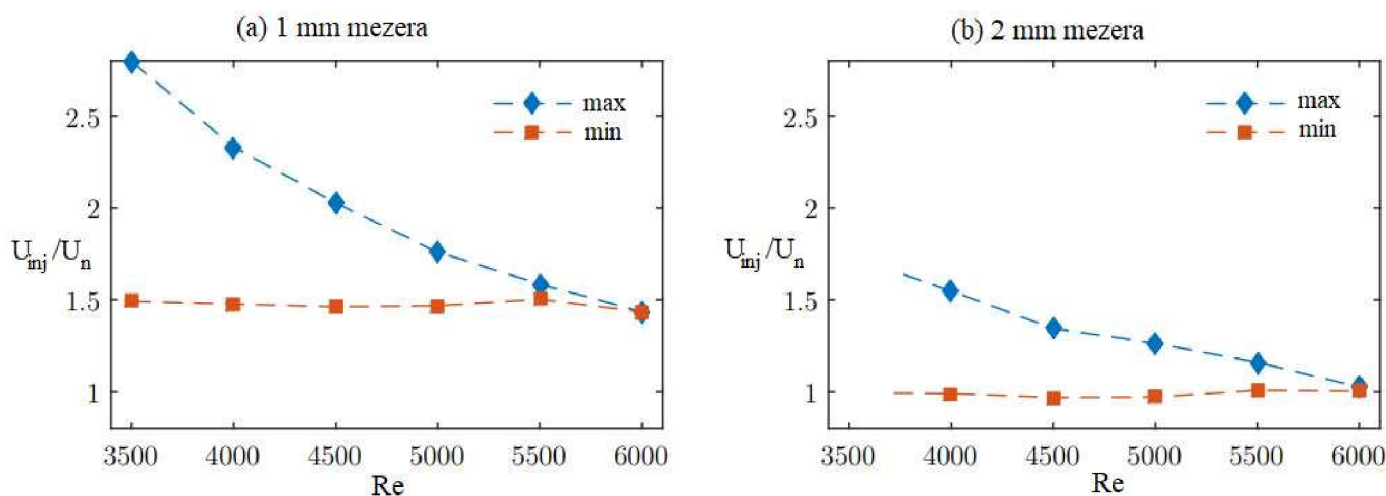
### 2.3.2 Výsledky

1 mm-FMD a 2 mm-FMD jsou zařízení, která umožňují vstříkovat kapalinu do hlavního potrubí přes prstencovou mezeru blízko stěny trubky, množství vstříkované kapaliny ( $Q_{bp}$ ), a tedy hodnotu zrychlení v blízkosti stěny potrubí lze ovládat a kontinuálně nastavovat ventilem v obtoku. Ke zjištění, které hodnoty středních rychlostí  $U_{inj}$  a objemových průtoku  $Q_{bp}$  vstříkovaného proudu vedou k úplné relaminarizaci, byla postupně zvyšována hodnota Reynoldsova čísla v krocích po 500 a také byla měněna rychlost průtokem, tj. množství tekutiny vstříkované mezerou  $Q_{bp}$ .



Graf 2.3.2 – Pásmo úplné laminarizace – závislost průtoku na Re - převzato z [4]

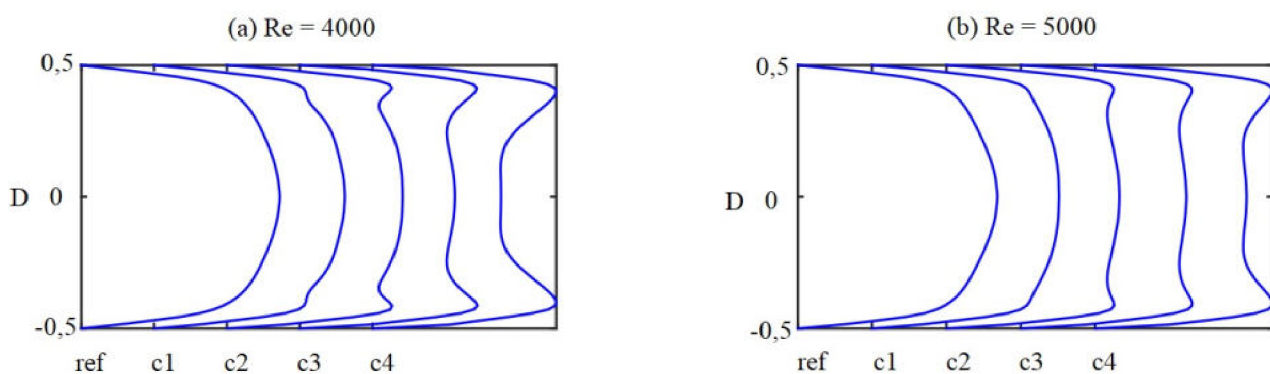
U dvojice grafů 2.3.2 svíslá osa představuje poměr průtoku skrze mezeru a průtoku hlavního proudu  $Q_{bp}/Q_n$ . Na vodorovných osách jsou hodnoty Reynoldsova čísla. Modrá a oranžová křivka tak vymezují pásmo, kde dochází k úplné laminarizaci.



Graf 2.3.3 – Pásmo úplné laminarizace – závislost rychlosti na Re – převzato z [4]

Dva grafy 2.3.3 znázorňující závislost poměru rychlostí (rychlosti vstříkovaného proudu  $U_{inj}$  a rychlosti hlavního proudu  $U_n$ ) na velikosti  $Re$ . Každý z grafů platí pro jednu variantu zařízení pro vstříkování.

Až do  $Re \approx 6000$  bylo možné najít rychlosti vstříkování pro obě šířky mezer, které způsobují kontinuálně laminární pole proudění v místě  $z = 150$  a i pro zbytek potrubí. Graf 2.3.2 ukazuje naměřené hodnoty poměru  $Q_{bp}/Q_n$  průtoků vstříkovaného proudu do hlavního proudu pro každou šířku mezery, které vedou k laminarizaci. Graf 2.3.2 zobrazuje příslušné poměry rychlostí  $U_{inj}/U_n$  vstříkovaného proudu do hlavního proudu. Na obou obrázcích jsou maximální a minimální poměry maximálního a minimálního průtoku (rychlosti), které by způsobily celkovou laminarizaci v potrubí za zařízením. Všechny poměry průtoků (rychlosti) mezi nimi také laminarizují průtok. Zatímco při nižších Reynoldsových číslech je pro relaminarizaci vhodný relativně široký rozsah poměrů průtoků, rozsah se s rostoucím Reynoldsovým číslem rychle zužuje. U obou zařízení je to spíše maximum poměrů průtoků, které od počátku klesá  $\sim 30\%$  (1 mm-FMD) a  $\sim 35\%$  (2 mm-FMD), zatímco minimální množství vstříkovaného průtoků zůstává relativně konstantní na 18 % a 25 % pro 1 mm-FMD a 2 mm-FMD. Pokud jde o rychlostní poměr, znamená to možné rychlosti vstříkování v širokém rozmezí 1,5–3 (1 mm-FMD) a 1-1,5 (2 mm-FMD) krát vyšších, než je střední rychlost proudění v potrubí při  $Re = 4000$ . Při  $Re = 6000$  se rychlosti vstříkování nezbytné pro celkovou laminarizaci zužují na 1,5 a 1 ve srovnání s rychlostí hlavního toku. U obou šířek mezer se křivky protínají mírně nad  $Re = 6000$ , což naznačuje, že u vyšších Reynoldsových čísel není u tohoto zařízení možná úplná laminarizace. Vizuální kontrola proudění za místem mísení proudu ( $0 < z \leq 50$ ) při Reynoldsových číslech a poměrech průtoků v pásmu úplné laminarizace ukazuje průběh, který je velmi podobný průběhu laminarizace za vestavbou, proudění v bezprostřední blízkosti zařízení pro vstříkování ( $0 < z \leq 10$ ) vykazuje turbulentní proudění a úroveň turbulence vypadají srovnatelné s úrovní před zařízením. Při  $Re \leq 6000$  všechny viditelné poruchy v poli proudění se rychle rozpadají, dokud není proud jasně laminární při  $z \approx 30 - 50$ . Dále zůstává proudění pro zbytek potrubí jednoznačně laminární. [4]



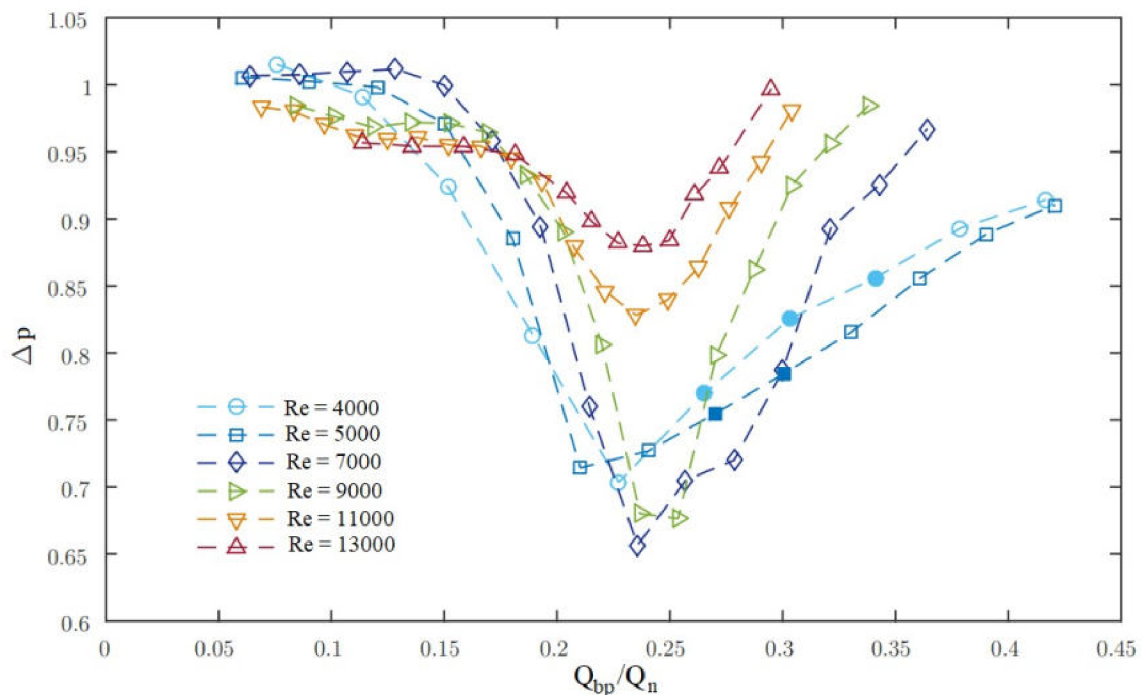
Graf 2.3.4 – Rychlostní profily – převzato z [4]

Na grafu 2.3.4 jsou rychlostní profily čtyř různých vstříkovacích rychlostí s 2 mm FMD ve vzdálenosti  $z = 2,5$  od počátku mísení proudů. Čtyři případy c1-c4 různých vstříkovacích rychlostí jsou v grafu 2.3.2 (b) označeny symboly + při  $Re = 4000$  a  $Re = 5000$ . c1 představuje případ, kdy je průtok vstříkované kapaliny těsně pod minimálním průtokem, který



je nezbytný pro úplnou laminarizaci. c2 a c3 představují případy, kdy je pozorována úplná laminarizace. U c4 je průtok již o něco vyšší než maximum, což znamená, že proudění vykazuje rysy laminarizace, ale nakonec se po určité vzdálenosti vrací k turbulentnímu proudění (podobně jako c1). Rychlostní profily jasně ukazují zvyšující se rychlost v blízkosti stěny v místech vstřikování tekutiny. Zatímco pro c1 je viditelný pouze malý hrb, pro c2-c4 je vrchol blízko stěny (stabilně při  $x \sim 0,41$  pro všechny rychlosti vstřikování a obě Reynoldsova čísla) výraznější. [4]

Aby bylo možné dále zkoumat vývoj průtoku přímo za vstřikovacím zařízením a detekovat časově a prostorově omezenou (částečnou) laminarizaci, byl měřen průměrný tlakový gradient po proudu mezi dvěma tlakovými snímači v místech  $z = 6$  respektive  $z = 29$  (tj. přes úsek  $23D$ ). Předpokládá se, že první tlakový snímač je dostatečně daleko od  $z = 0$ , aby se zabránilo přímému vlivu proudění ze vstřikovacího zařízení. Současně se předpokládá, že druhý tlakový snímač je dostatečně blízko zařízení, aby pokryl celou oblast přechodné laminarizace, která byla navržena z vizuálního pozorování proudění za vstřikujícím zařízením. [4]



**Graf 2.3.5** - Tlakový gradient za vstřikovacím zařízením – převzato z [4]

Naměřené hodnoty tlakového gradientu  $\Delta p$  s rychlostí proudění při několika Reynoldsových číslech je vynesena v grafu 2.3.5.  $\Delta p$  na vodorovné ose v grafu představuje poměr tlakových ztrát při měření se vstřikováním a bez vstřikování přídavné kapaliny, tedy  $\Delta p = \Delta p_{inj}/\Delta p_0$ . Vodorovná osa představuje poměr průtoku skrze mezeru ( $Q_{bp}$ ) a průtoku hlavního proudu ( $Q_n$ ). Tyto hodnoty byly naměřeny pro zařízení 2 mm-FMD. Vyplněné symboly v grafu představují měření, kdy došlo k úplné laminarizaci proudu. U většiny zobrazených případů bylo zjištěno významné snížení odporu při určitých rychlostech vstřikování. V případech, kdy vstřikovaný průtok byl o  $\sim 15\%$  větší než střední průtok, je možné pozorovat jasné snížení odporu. Nejvyšší pokles  $\Delta p$  byl zjištěn pro poměry průtoku

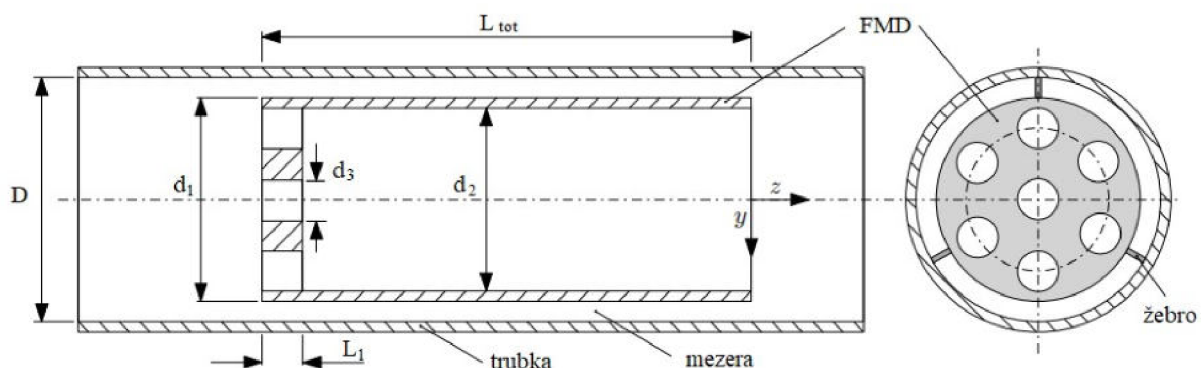
kolem 20 - 25%. S ještě vyšší rychlostí vstřikování se  $\Delta p$  vrací směrem k počáteční neregulované hodnotě. Pro  $Re = 4000$  a  $Re = 5000$   $\Delta p$  klesá až o  $\sim 30\%$  pro vstřikovací průtoky  $\sim 20\text{--}25\%$ . Zajímavé je, že maximální redukce odporu v úseku  $23D$  za místem vstřikování není dosažena pro ty rychlosti průtoku vstřikování, které jsou nezbytné pro úplnou laminarizaci v potrubí, ale pro rychlosti proudění, které jsou o něco vyšší. V případech, kdy je  $Re = 7000$  a  $Re = 9000$  je snížení odporu ještě větší (až na  $65\%$  nekontrolovaného proudění), a to navzdory skutečnosti, že se proudění později vrací k turbulentnímu stavu v místech vzdálenějších od místa injekce. Při  $Re = 11000$  a  $Re = 13000$  je pokles  $\Delta p$  již mnohem menší, stále však významný (o  $18\%$ , respektive  $12\%$ ). Měření však jasně ukazují přechodnou laminarizaci také při těchto vyšších Reynoldsových číslech, tj. dočasnou laminarizaci v prostorově omezené oblasti přímo za injekčním zařízením.

## 2.4 Čtvrtá metoda – stacionární vestavba se sedmi dírami

### 2.4.1 Popis metody

Tato metoda využívá k laminarizaci vestavbu ve tvaru trubky, přičemž vtoková strana je z části plná. V tomto případě jsou v plném konci vyvrtané díry kvůli propuštění části průtoku skrze vnitřek vestavby. Celá sestava pro experiment je velmi podobná jako v případě metody voštin. Až na několik detailů je sestava stejná jako na obrázku 2.2.1.

Vestavba (dále označována jako FMD) je vyrobena z tenkostěnné trubky o celkové délce  $L_{\text{tot}} = 200$  mm s vnějším průměrem  $d_1 = 28$  mm a vnitřním průměrem  $d_2 = 26$  mm. Pro usnadnění vizualizace proudění je trubka vyrobena z plexiskla. Trubka je na horním konci uzavřena deskou o tloušťce stěny  $L_1 = 5$  mm. Do této desky je vyvrtáno 7 děr o průměru  $d_3 = 3,3$  mm. Z toho plyne, že  $78,6\%$  plochy trubky je zablokováno a proud je rozdělen do dvou částí. Jedna část proudu prochází prstencovou mezerou o šířce 1 mm podél stěny trubky, zatímco druhá část proudu prochází sedmi dírami v desce. Zařízení lze namontovat soustředně uvnitř trubky v jakékoli axiální poloze pomocí tří žeber.



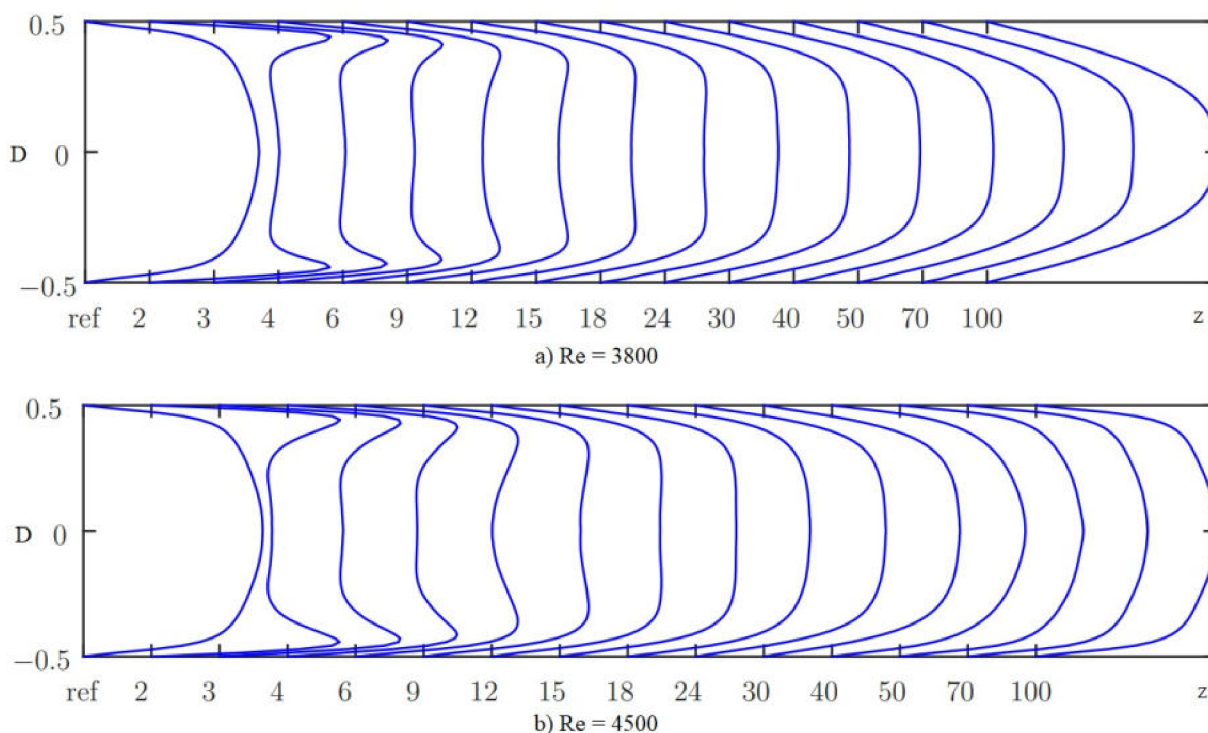
Obr. 2.4.1 – Náčrt vestavby – převzato z [4]



## 2.4.2 Výsledky

V tomto experimentu bylo FMD umístěno 80D od začátku rovného přívodního potrubí, takže proudění před vestavbou bylo plně vyvinuté. Proudění bylo sledováno po vzdálenost 150D za vestavbou. Reynoldsovo číslo bylo měněno v rozmezí od  $Re = 2500$  až do  $Re = 5000$ , zcela laminární proudění bylo pozorováno až při  $Re \approx 4200$  ve vzdálenosti 150D za vestavbou. Při  $Re > 4400$  bylo sledováno pouze turbulentní proudění.

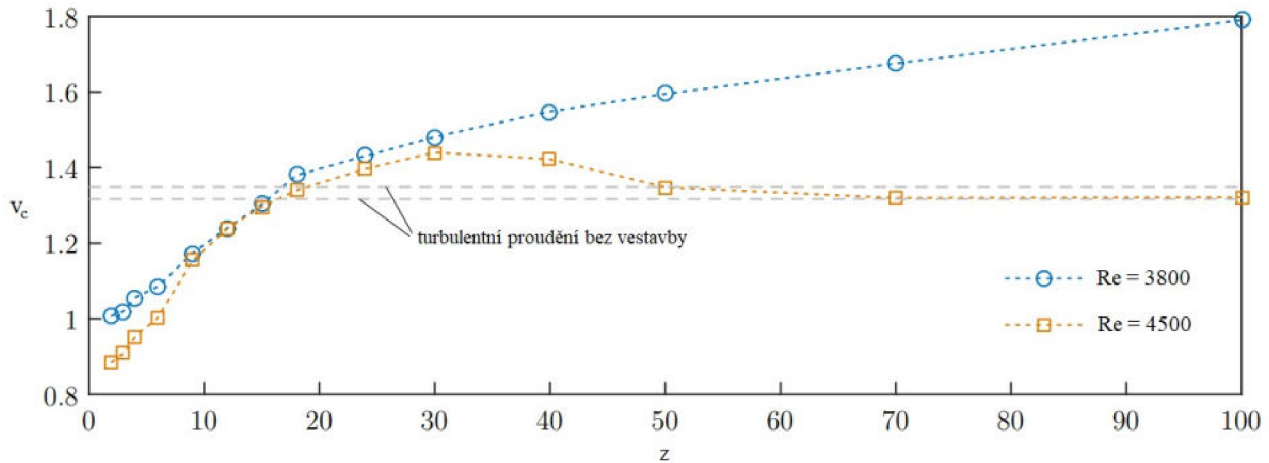
Na následujícím grafu jsou uvedeny dva příklady vývoje rychlostních profilů za vestavbou. Měření bylo provedeno na 14 místech podél potrubí, vodorovná osa grafů znázorňuje počet délek průměrů potrubí za vestavbou. Graf 2.4.2 a) zobrazuje rychlostní profily pro proudění při  $Re = 3800$  a obrázek 7 b) pro  $Re = 4500$ . Každý z rychlostních profilů byl počítán z 200 nezávislých měření. První z profilů, tedy profil v  $z = 0$ , znázorňuje plně vyvinutý profil turbulentního proudění. Z obrázků je tak patrné, že při  $Re = 3800$  se proudění laminarizuje, zatímco při  $Re = 4500$  se proudění vrací do turbulentního stavu.



**Graf 2.4.2** – Rychlostní profily – převzato z [4]

Zvláště pozoruhodným účinkem FMD na zprůměrované rychlostní profily je zvýšení gradientu rychlosti na stěně. Při  $z = 2$  vykazují profily u obou  $Re$  charakteristické překročení střední rychlosti proudu v blízkosti stěny (vrchol při  $D \pm 0,44$ ) a jasné snížení rychlosti v blízkosti osy potrubí. Ve středu proudu je rychlostní profil zploštělý, v těchto místech je axiální rychlost přibližně konstantní, tato plocha vzniká v místech od  $-0,32D$  po  $0,32D$ . Střed proudu je ještě více plochý při  $z = 3$  a  $4$ , kde se vrcholy překročení střední rychlosti mírně posunuly směrem ke středu ( $D \pm 0,43$ , respektive  $D \pm 0,41$ ). Zvýšení rychlostního gradientu v blízkosti stěny však nepřetrvává déle než několik průměrů potrubí. Při  $z \approx 15$  vrcholy úplně zmizely a vzniklá plocha pokrývá rozsah od  $-0,25D$  po  $0,25D$ . Současně se značně snížil

původně strmý gradient v axiální rychlosti blízko stěny. Pokud jde o rychlost na ose potrubí, hodnota neregulovaného turbulentního proudění je znovu dosažena kolem  $z = 15-18$ . Následně v obou případech stoupne hodnota  $v_c$  (rychlost v ose potrubí) nad hodnotu  $v_c$  při turbulentním proudění.



Graf 2.4.3 – Průběh rychlostí na ose potrubí – převzato z [4]

Ve vzdálenosti  $z > 30$  je vidět odlišné chování proudění při  $Re = 3800$  a  $Re = 4500$ . V případě nižšího  $Re$  se proudění vyvíjí směrem k laminárnímu (parabolickému) profilu. V místě  $z = 100$  dosáhla rychlost na ose hodnoty přibližně  $1,8 v_c$ . V druhém případě pro  $Re = 4500$  se však rychlost na ose zvyšuje pouze do vzdálenosti  $z \approx 30$ . Průměrná rychlost na ose v případě turbulentního proudění je jasně překročena při  $z > 20$ , následně však v rozmezí  $z = 30-40$  rychlost na ose začne klesat zpět k hodnotám neregulovaného proudění.

Scénář úplné laminarizace při  $Re = 3800$  a přechod zpět na turbulenci při  $Re = 4500$  je také patrný z axiálního vývoje intenzity turbulence, graf 2.4.4 znázorňuje hodnoty intenzity turbulence  $ti_w$  ve směru osy  $z$  tedy po směru proudu, kdežto graf 2.4.5 představuje průběh pro  $ti_{u,v}$  tedy hodnoty intenzity turbulence ve směru kolmém na osu potrubí.

$$ti_w = \frac{\sqrt{\overline{w'^2}}}{U} = \frac{w_{rms}}{U} \quad (10)$$

$$ti_{u,v} = \frac{\sqrt{\overline{u'^2} + \overline{v'^2}}}{2U} = \frac{u_{rms} + v_{rms}}{2U} \quad (11)$$

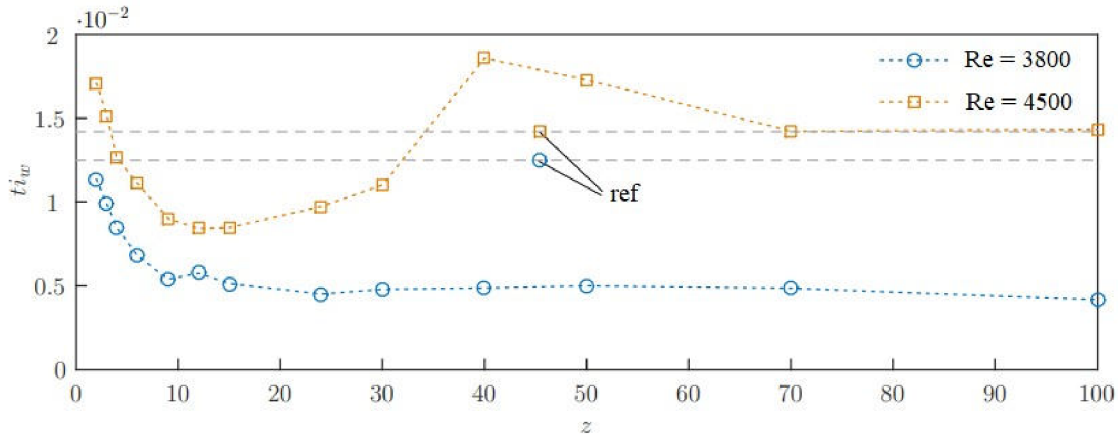
$\overline{w'}$  - časově středovaná hodnota fluktační složky rychlosti ve směru osy  $z$

$\overline{u'}$  - časově středovaná hodnota fluktační složky rychlosti ve směru osy  $x$

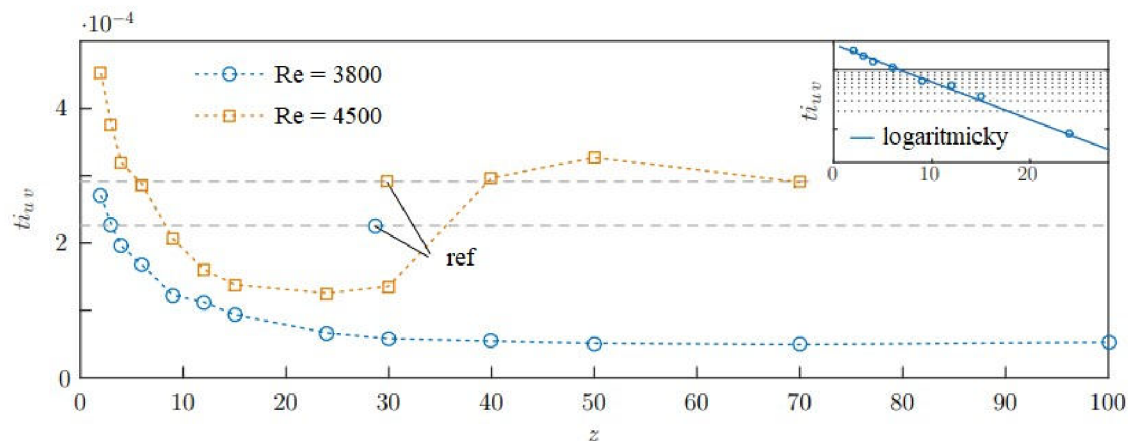
$\overline{v'}$  - časově středovaná hodnota fluktační složky rychlosti ve směru osy  $y$

$U$  – hodnota střední rychlosti proudění

$u_{rms}$ ,  $v_{rms}$ ,  $w_{rms}$  – hodnoty vířivosti ve 3 různých směrech (x, y, z)



Graf 2.4.4 – Intenzita turbulence  $t_{i_w}$  – převzato z [4]



Graf 2.4.5 – Intenzita turbulence  $t_{i_{u,v}}$  – převzato z [4]

Hodnoty „ref“ v grafech výše představují hodnoty intenzity turbulence při neregulovaném proudění (proudění v potrubí bez použití jakéhokoliv FMD). Přimo za zařízením jsou úrovně intenzity turbulence mírně zvýšeny nad turbulentním referenčním proudem. Je však třeba poznamenat, že v objemové oblasti průřezu přímo za FMD, mohou být zbývající odchylky proudu indukované děrovanou deskou na horním konci FMD stále významné, protože  $L_{tot} = 200$  mm a vestavba tak nemusí být dostatečně dlouhá na to, aby bylo proudění zcela uklidněné. Zvýšení intenzity turbulence tedy nelze jednoznačně připsat zrychlené části proudu procházejícího mezerou.

Již při  $z \geq 3$  ( $Re = 4500$ )  $t_{i_w}$  klesne pod úroveň nekontrovaného turbulentního proudění. Totéž platí pro  $t_{i_{u,v}}$  při  $z = 4$  ( $Re = 3800$ ) a  $z = 6$  ( $Re = 4500$ ). Zatímco pro  $Re = 3800$   $t_{i_{u,v}}$  exponenciálně klesá až do  $z \sim 30$ , kde je dosaženo stabilní úrovně nevyhnutelného šumu měření, kvalitativně podobný pokles  $t_{i_{u,v}}$  při  $Re = 4500$  je zaznamenán pouze do  $z = 15$ . Pro  $15 \leq z \leq 30$   $t_{i_{u,v}}$  je téměř konstantní. Následuje prudký nárůst, který dokonce vede k překročení nad úroveň nekontrovaného proudu pro  $40 \leq z < 70$ . Dále po

proudu se zdá, že proud opět připomíná nekontrolované turbulentní proudění.  $t_{iw}$  vykazuje kvalitativně velmi podobný vývoj, ale nárůst zpět na turbulentní úroveň při  $Re = 4500$  začíná o něco dříve (kolem  $z = 15$ ) a překmit nad turbulentní úrovní probíhá rychleji a výrazněji (+30% při  $z = 40$ ). Při  $Re = 3800$  se zdá, že  $t_{iw}$  dosahuje laminární úrovně v rozsahu  $z = 10-15$ . Zbývající kolísání rychlosti lze připsat šumu měření.

### 2.4.3 Zhodnocení (společně pro stacionární vestavbu a vstříkovací zařízení)

Zpočátku se může zdát, že laminarizace v důsledku zrychlení proudění v blízkosti stěny je protichůdná. Na výše uvedených zařízeních bylo demonstrováno, že plně turbulentní proudění v potrubí lze zcela laminarizovat poměrně jednoduchými prostředky. K potlačení nebo odstranění turbulence postačuje upravení rychlostního profilu ve směru proudu, ať už aktivně nebo pasivně. Předložené experimenty ukazují, že nástup laminarizace v plně vyvinutém turbulentním proudění potrubím nastává jako přímý důsledek konkrétního rozložení smykového napětí v oblasti stěny. Základní fyzikální mechanismus laminarizace je přičítán oslabení produkčního cyklu turbulencí v blízkosti stěny. K řízení proudění v těchto dvou případech byla použita dvě různá zařízení, stacionární vestavba (clona) a zařízení pro vstříkování další tekutiny prstencovou mezerou. Obě zařízení upravují rychlostní profil ve směru proudu tak, že se zpomaluje proud ve středu potrubí a zrychluje se proudění v oblasti blízké stěně. Za zařízeními je vytvořen laminární proud. Výkyvy jsou největší těsně za zařízeními a s rostoucí vzdáleností se v mnoha případech stává proudění opět turbulentní. Při  $Re = 6000$ , což je nejvyšší Reynoldsovo číslo, při kterém bylo dosaženo úplné laminarizace s uvedenými zařízeními, je podstatně snížena tlaková ztráta podél potrubí za zařízeními. Např. při  $Re = 13\ 000$ , kde se nachází přechodná (dočasná) laminarizace v prostorově omezené oblasti přímo za zařízeními, redukce odporu je stále vyšší než 10%. Budoucí výzkum by se měl zaměřit na možný zisk čisté energie a optimalizaci konkrétního návrhu, pokud jde o tlakovou ztrátu, aby bylo možné dosáhnout energetického bodu zlomu v těsné vzdálenosti za zařízeními. Chytřejší design může dále umožnit laminarizaci při mnohem vyšších Reynoldsových číslech. Za účelem stanovení možného potenciálu úspory nákladů předložené řídicí techniky je také nutné určit, na jaké vzdálenosti přetrvává laminární proudění při méně dokonalých podmínkách proudění v potrubí, neboť v těchto experimentech bylo použito stejné potrubí, na které nepůsobily žádné další rušivé faktory jako mohou být vibrace a podobně. [4]

## 2.5 Shrnutí

Z uvedených experimentů laminarizace proudění a jejich výsledků je jisté, že docílit laminarizace je možné i při reálných experimentech a ne pouze v počítačových simulacích. K docílení laminarizace se autoři experimentů snažili upravit rychlostní profil za použitým zařízením tak, aby došlo k narušení produkce turbulentních vírů v blízkosti stěny, kapalina v těchto místech je tedy urychlena nad hodnoty střední rychlosti proudění a v ideálním případě tak dojde k postupnému přechodu rychlostního profilu na laminární rychlostní profil.

Experimenty sice pracují s poměrně nízkými Reynoldsovými čísly, v praxi jsou rychlosti proudění při dopravě tekutin ve většině případů podstatně vyšší a tak i hodnoty  $Re$

dosahují podstatně vyšších hodnot, to ale neznamená, že by nemohla být laminarizace proudění v budoucnu použitelná i v praktických aplikacích, například pro snížení energetických ztrát při dopravě tekutin na dlouhou vzdálenost. Jak ukazují experimenty, při použití zařízení k laminarizaci je možné docílit poměrně vysokých úspor v podobě tlakových ztrát. Tlakové ztráty jsou v některých případech sníženy až o 35% v porovnání s prouděním v prázdné trubce bez použití některého ze zařízení. V mnoha případech ale toto snížení tlakových ztrát trvá jen po krátkou dobu (resp. vzdálenost) v místech za použitým zařízením. Tlaková ztráta vzniká i na samotných zařízeních, a to v mnoha případech velmi podstatná. Bylo by tedy potřeba docílit, aby použité FMD představovalo co nejmenší možnou tlakovou ztrátu, tedy upravit design zařízení tak, aby tuto podmínku splňoval co nejlépe. Dále by muselo splňovat podmínku co nejúčinnějšího potlačení turbulence, aby úspora vznikající v místech ovlivněných laminarizací byla co největší a probíhala na co nejdelší vzdálenosti potrubí.

K docílení energetických úspor tedy není potřeba úplné laminarizace, stačí pozitivně ovlivnit proudění a snížení ztrát může být i tak podstatné. K tomu, aby byl proud takto pozitivně ovlivněn je ale potřeba přesného zařízení. Z experimentů je také možno usoudit, že pro každé Reynoldsovo číslo je tvar takového zařízení jiný (resp. jinak ovlivňuje proudění, např. způsobí vyšší/nížší rychlost v blízkosti stěn potrubí). Z toho plyne, že by použité zařízení muselo být navrženo pro určité rychlosti proudění, popřípadě by muselo být schopno upravovat svůj vliv na proudění vzhledem k rychlosti proudu (velikosti  $Re$ ). Možnosti konstrukce takového zařízení jsou nekonečné, a tak je dost pravděpodobné, že nejideálnější tvar nebo způsob laminarizace zatím nebyl odzkoušen.

### 3 VÝPOČTOVÁ ČÁST

Podstatnou částí této práce jsou výpočty proudění skrze vestavbu sloužící pro potlačení turbulence. Výpočty byly provedeny v programu Ansys Fluent. V této části jsou uvedeny výsledky výpočtů, jsou zde také srovnány rozdíly mezi výsledky dosaženými pomocí CFD a výsledky dosaženými experimentálně, které jsou uvedeny v článku [4]. Snahou je ověřit funkčnost vestavby, a predikovat její působení na proudění v potrubí.

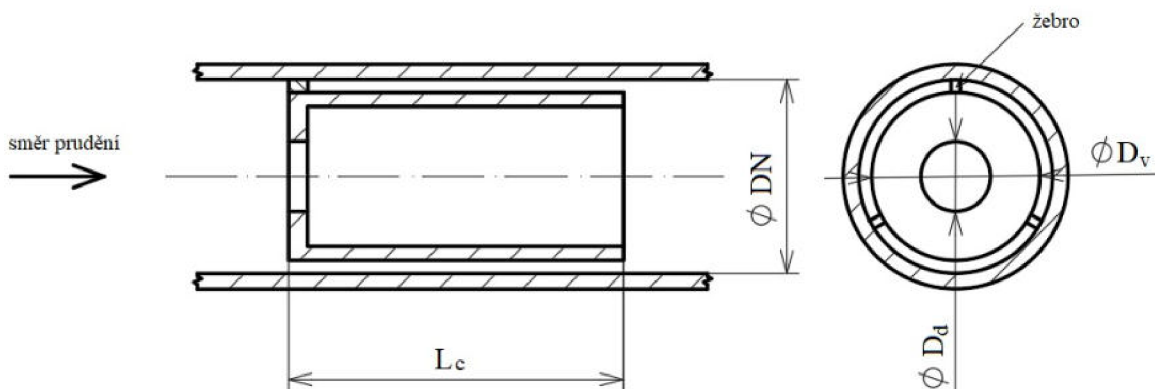
Pro výpočty byl zvolen model turbulence se zkratkou SST –  $k-\omega$ , všechny uvedené výsledky tedy byly dosaženy pomocí tohoto modelu, pokud není uvedeno jinak. Okrajově byly zkoušeny i jiné modely turbulence, tento se nakonec ukázal jako nevhodnější. Pro tuto problematiku by se měla používat metoda se zkratkou DNS (Direct numerical simulation) – tato metoda je pro problém laminarizace vhodná, neboť detailně popisuje průběh proudění, má však svou velkou nevýhodu oproti použitému modelu, kdy je potřeba pro tuto metodu mít vytvořenou velmi hustou výpočetní síť a z toho také plyne vysoká náročnost na výpočetní techniku, výpočty tak mohou trvat velmi dlouho. Množství provedených výpočtů pomocí modelu SST –  $k-\omega$  by tak nebylo reálné provést pomocí metody DNS, výpočetní čas by byl několikanásobně delší. Hlavním problémem u modelu SST -  $k-\omega$  je nemožnost získání parabolického (laminárního) rychlostního profilu. Při použití tohoto modelu při nižších Reynoldsových číslech, kdy by proudění mělo být jasně laminární, není dosaženo parabolického rychlostního profilu ani pro  $Re < 2000$ . Jako laminární profil, který je následně srovnáván se získanými rychlostními profily vytvořenými za vestavbou, je považován profil získaný z výpočtu pomocí výše zmíněného modelu při proudění prázdnou trubkou při  $Re = 1500$ . Doména trubky byla vytvořena dostatečně dlouhá, aby došlo k uklidnění a ustálení proudění v trubce a v místě vtoku do vestavby bylo proudění zcela vyvinuté a ustálené.

V prvotních výpočtech bylo vycházeno především z článku [1] a [4]. Byly vytvořeny modely vestavby, které se shodovaly, nebo byly velmi podobné vestavbám uváděným v těchto článcích. Výpočty byly provedeny pro několik různých Reynoldsových čísel, v pozdější fázi byla snaha navrhnout tvar vestavby, která by byla schopna ušetřit energii potřebnou k přepravě kapaliny. Jako proudící médium byla vždy uvažována voda. Všechny verze vestaveb byly modelovány pro potrubí s průměrem  $DN = 30$  mm, stejně tomu tak bylo v experimentu z článku [4].



### 3.1 Zjednodušení problému na 2D

V této části jsou srovnány výsledky získané z výpočtů vestavby, kterou bylo možno zjednodušit na 2D problém a výpočet tak provést s axisymetrickou součástí. Obrázek 3.1.1 zobrazuje náčrt této vestavby umístěné v trubce.



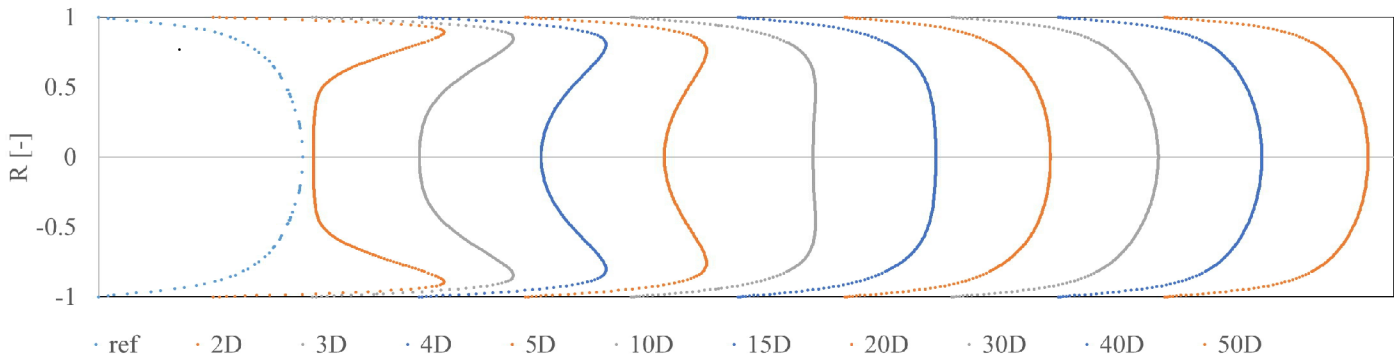
Obr. 3.1.1 - Náčrt vestavby s jednou dírou (není v měřítku)

Vestavba je vlastně tenkostěnná trubka, s tloušťkou stěny 1 mm a s polo uzavřeným koncem, o menším průměru než je vnitřní průměr potrubí. Mezera mezi trubkou a vestavbou je v tomto případě 1 mm, respektive průměr  $D_v = DN - 2 \text{ mm} = 28 \text{ mm}$ . Celková délka vestavby  $L_c = 200 \text{ mm}$  a průměr vstupní díry do vestavby  $D_d = 8,74 \text{ mm}$  – tento průměr plyne z článku [4], kde byla popisována vestavba se sedmi dírami, a plocha průřezu trubky, kterou vestavba bránila, činila 78,6 %. Z tohoto byl dopočítán průměr jedné díry (plocha jedné díry = součet ploch všech sedmi děr). Je nutno podotknout, že ve výpočtech byla zanedbána žebra, která drží vestavbu pevně v ose trubky. Žebra byla zanedbána, aby byla možnost zjednodušení problému na 2D a výpočet tak mohl být proveden na axisymetrické součásti. Žebra umístěná v tomto místě, by neměla mít velký vliv na proudění, a tak bylo usouzeno, že v tomto případě je zanedbání možné. Celková délka výpočetní domény je 2300 mm, tedy necelých 77D (průměrů potrubí). Počátečních 20D délky domény představuje trubku před vestavbou, tato délka by měla být dostatečná pro vývin proudění od vstupu do trubky. Následuje pak vestavba o délce  $200 \text{ mm} = 6,66D$ . Za vestavbou tedy zbývá délka 50D pro vývin a ustálení proudění.

Takto zjednodušená vestavba byla počítána jako 2D problém, byly provedeny výpočty pro tři různé rychlosti proudění, které odpovídaly Reynoldsovým číslům 3000, 3800 a 8000. Výsledky těchto výpočtů a jejich porovnání je uvedeno níže.

### 3.1.1 Výsledky pro $Re = 3800$

Na grafu 3.1.2 je znázorněn průběh rychlostních profilů (dále také RP), po délce trubky za vestavbou. První z profilů „ref“ znázorňuje plně vyvinutý RP při nekontrolovaném proudění, který byl získán výpočtem v Ansys Fluent, kdy vstupní rychlost do trubky odpovídala  $Re = 3800$ . Hodnoty rychlostí byly vzaty z místa dostatečně vzdáleného od vstupu do výpočetní domény, kde bylo proudění už zcela ustálené a rychlostní profil se už dále nevyvíjel. Tento profil by tak měl odpovídat plně vyvinutému proudění v trubce při  $Re = 3800$  bez ovlivnění některými přípravky pro laminarizaci. Značky na spodní ose (2D, 3D atd.) znázorňují vzdálenost místa měření rychlostního profilu od konce vestavby, tedy 2D znamená vzdálenost dvou průměrů potrubí za vestavbou. V tomto případě byl vývoj RP sledován na vzdálenosti 50D za koncem vestavby, později byl proveden ještě jeden výpočet na delší doméně, kde se sledovalo proudění za vestavbou na délce 90D, tento výpočet potvrdil, že se rychlostní profil dále za FMD již nevyvíjí a tak byla vzdálenost 50D brána jako dostatečná pro plné vyvinutí rychlostních profilů.

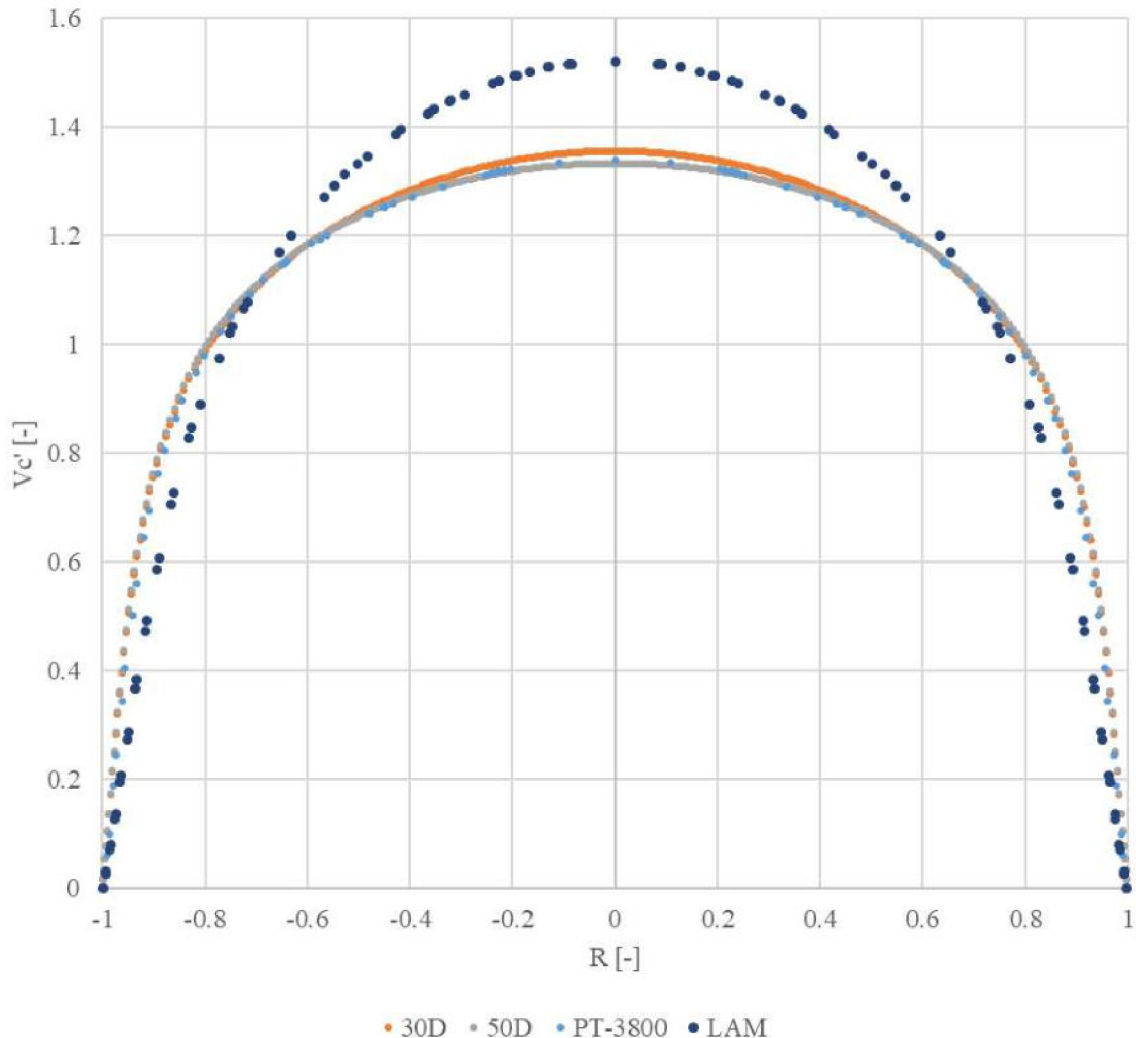


**Graf 3.1.2** – Rychlostní profily – vestavba s jednou dírou –  $Re = 3800$  – 2D

Na druhém až čtvrtém RP je zřetelné zrychlení proudu v místech blízkým stěně potrubí, kdy je rychlost proudění blíže u stěny vyšší než ve středu proudu. RP tak získávají charakteristický tvar písmene M. Ve vzdálenosti 10D za FMD je proud více vyrovnaný a rychlostní špičky v blízkosti stěny tak zanikají. Další RP zaznamenávají postupný vývoj proudu a rychlost proudění na ose potrubí stále roste. Postupný vývoj RP se zpomaluje a mezi posledními RP, 40D a 50D, je rozdíl minimální. Délka výpočetové domény by tak měla být dostatečná pro predikci následného chování proudění, v tomto případě se rychlostní profil dále nevyvíjí.

Graf 3.1.3 níže, znázorňuje taktéž rychlostní profily pro stejnou vestavbu, počítanou jako 2D součást při  $Re = 3800$ . Vodorovná osa znázorňuje průměr trubky, resp.  $R =$  poloměr trubky, svislá osa představuje normovanou rychlost  $v_c'$ , ta je vztažena na střední rychlost proudu, lze tak porovnávat rychlostní profily pro různé rychlosti proudění. Rychlostní profil s popisem PT (prázdná trubka) znázorňuje již výše zmíněný plně vyvinutý RP v potrubí bez použití vestavby. Jde tedy o turbulentní rychlostní profil při  $Re = 3800$ . RP s popisem LAM znázorňuje profil, získaný z výpočtu pomocí modelu SST -  $k-\omega$ , který, jak bylo již zmíněno, nevytvoří zcela parabolický (laminární) RP ani při nižších Reynoldsových číslech. Tento RP tak odpovídá profilu získaného z výpočtu provedeného v prázdném potrubí při  $Re = 1500$ .

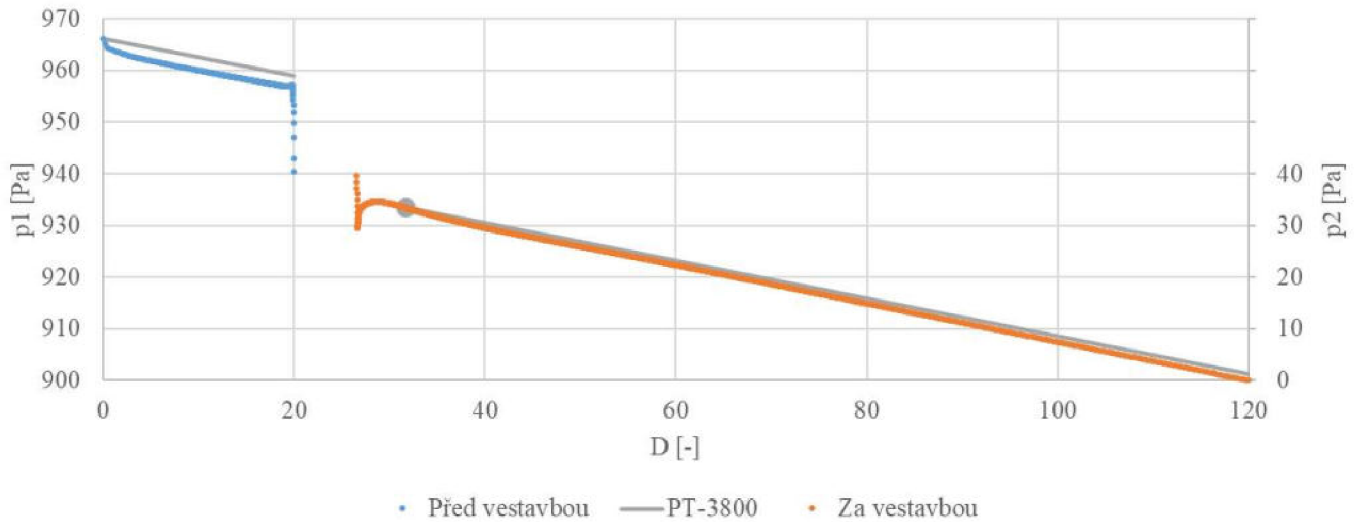




**Graf 3.1.3** – Rychlostní profily –  $Re = 3800$  – srovnání s LAM – 2D

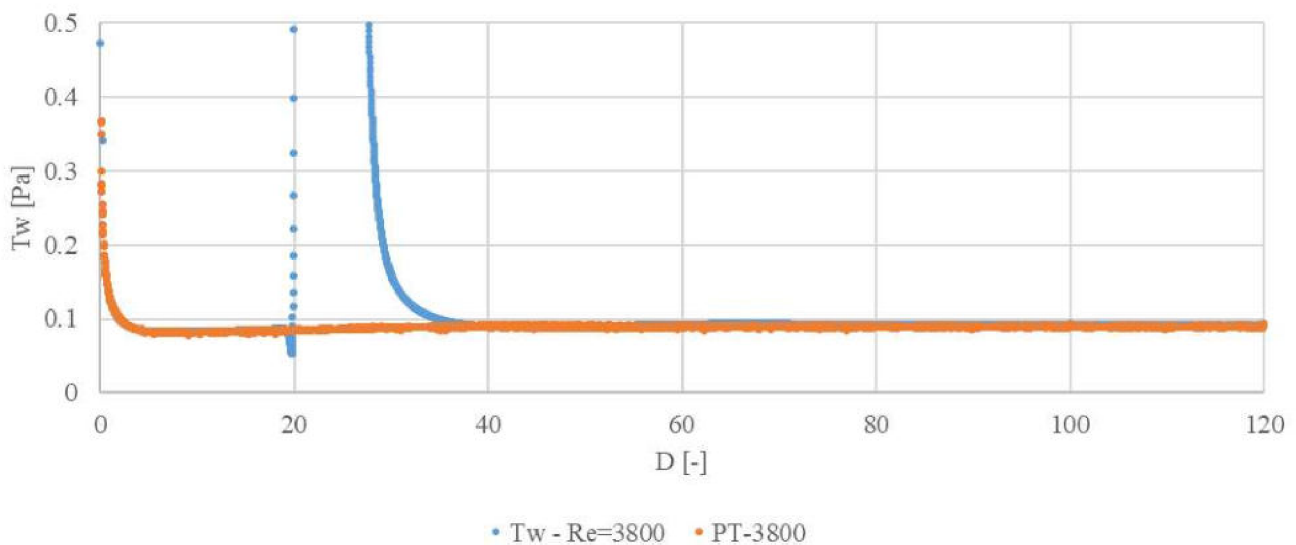
Jsou zde také zobrazeny dva RP, ty jsou z míst ve vzdálenosti 30 a 50 průměrů za FMD. V grafu je vidět, že RP 30D naznačuje přiblížení se k laminárnímu průběhu a vzdálení se tak od profilu turbulentního proudění, následující RP 50D ale jasně ukazuje, že se proudění vrací zpět k turbulentnímu průběhu, rychlost v blízkosti osy potrubí dokonce lehce poklesne pod hodnoty rychlostí profilu nekontrolovaného proudění.

Na grafu 3.1.4 je zobrazen tlakový průběh po celé délce výpočetní domény. V levé části grafu se nachází modrá křivka, která představuje tlakový spád před vestavbou. K modré křivce náleží svislá osa vlevo. Šedá přímka naznačuje průběh tlaku v potrubí při nekontrolovaném proudění, tyto hodnoty byly vzaty z míst, kde bylo proudění již zcela ustálené, změna tlaku je lineární. U modré křivky je viditelný zpočátku prudký pokles, je to místo vtoku do potrubí a proudění se teprve začíná ustalovat. Ve srovnání s šedou přímkou je průběh modré křivky rovnoběžný, pokud zanedbáme počátek. V místě 20D nastává prudký pokles tlaku, je to totiž místo, kde je umístěna vestavba. Ta má délku 200 mm a tak tedy končí v místech 26,67D, kde navazuje oranžová křivka. Průběh tlaku v místě vestavby byl vynechán, vestavba představuje velkou tlakovou ztrátu a je tedy v těchto místech prudký pokles tlaku, graf by byl tímto příliš zkreslený a nečitelný.



**Graf 3.1.4 – Průběh tlaku –  $Re = 3800 - 2D$**

Oranžová křivka značí průběh tlaku za vestavbou a náleží jí svislá osa na pravé straně. Od místa  $5D$  za vestavbou, tedy v místě  $31,67D$  na grafu, začíná šedá přímka zmíněná už dříve, její počátek značí šedá tečka. Oranžová křivka z počátku značí prudký pokles tlaku a následný skok zpět k vyššímu tlaku, toto je způsobeno koncem vestavby, kdy se v těchto místech schází dva proudy, rychlý proud proudící v mezeře mezi stěnou trubky a vestavbou a proud pomalý přicházející ze středu vestavby. Tlak byl měřen v místech blízko stěny potrubí a v těchto místech je přímo za vestavbou nejvyšší rychlost, která postupně s vývojem RP klesá. Od místa  $5D$  za vestavbou se zdá být oranžová křivka téměř rovnoběžná s šedou přímkou. Z tohoto je možné usoudit, že vestavba v tomto případě nijak neovlivnila proudění v místech za vestavbou, co se týče tlakových ztrát. Pokles tlaku za vestavbou je tak totožný jako bez použití vestavby, navíc vznikla obrovská tlaková ztráta na vestavbě, která by se musela navíc kompenzovat.

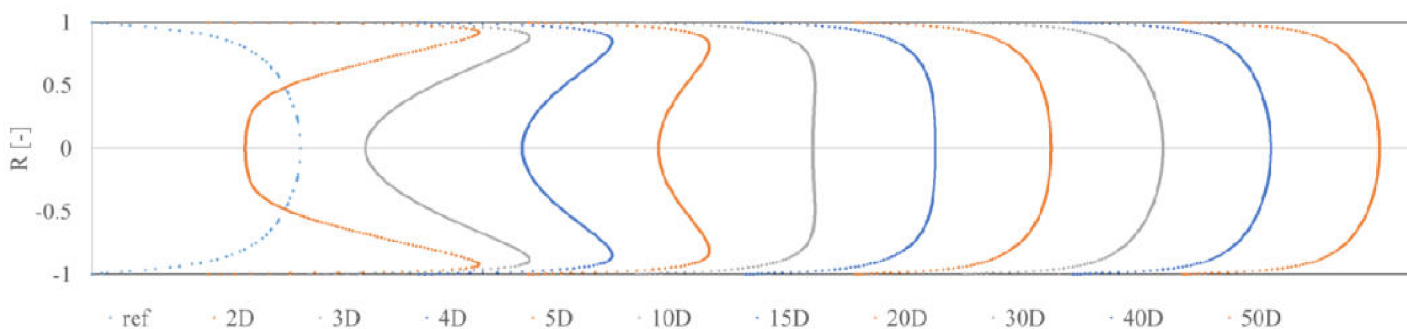


**Graf 3.1.5 – Průběh smykového napětí na stěně potrubí –  $Re = 3800 - 2D$**

Graf 3.1.5 zobrazuje průběh smykového napětí na stěně potrubí  $\tau_w$  po délce výpočetní domény pro případ výpočtu na 2D modelu a při rychlosti proudění odpovídající  $Re = 3800$ . Oranžová křivka představuje průběh v potrubí bez vestavby při  $Re = 3800$ . Modrá křivka platí pro průběh  $\tau_w$  v trubce s umístěnou vestavbou. Od místa vtoku vody do potrubí do místa 20D, kde je počátek vestavby, se křivky překrývají, není ani důvod proč by tomu mělo být jinak. V místě vestavby (20D -26,67D) jsou hodnoty  $\tau_w$  velmi rozdílné od hodnot mimo vestavbu a tak tyto hodnoty na vestavbě nejsou v grafu uvedeny z důvodu lepší čitelnosti grafu, navíc tyto hodnoty nejsou příliš vypovídající a jsou tak nepotřebné. Během krátké vzdálenosti za koncem vestavby se hodnoty  $\tau_w$  znovu setkají s hodnotami z PT-3800 a obě křivky se i v místech za vestavbou překrývají. V tomto případě tak vestavba nemá vliv na snížení hodnot smykového napětí za vestavbou.

### 3.1.2 Výsledky pro $Re = 8000$

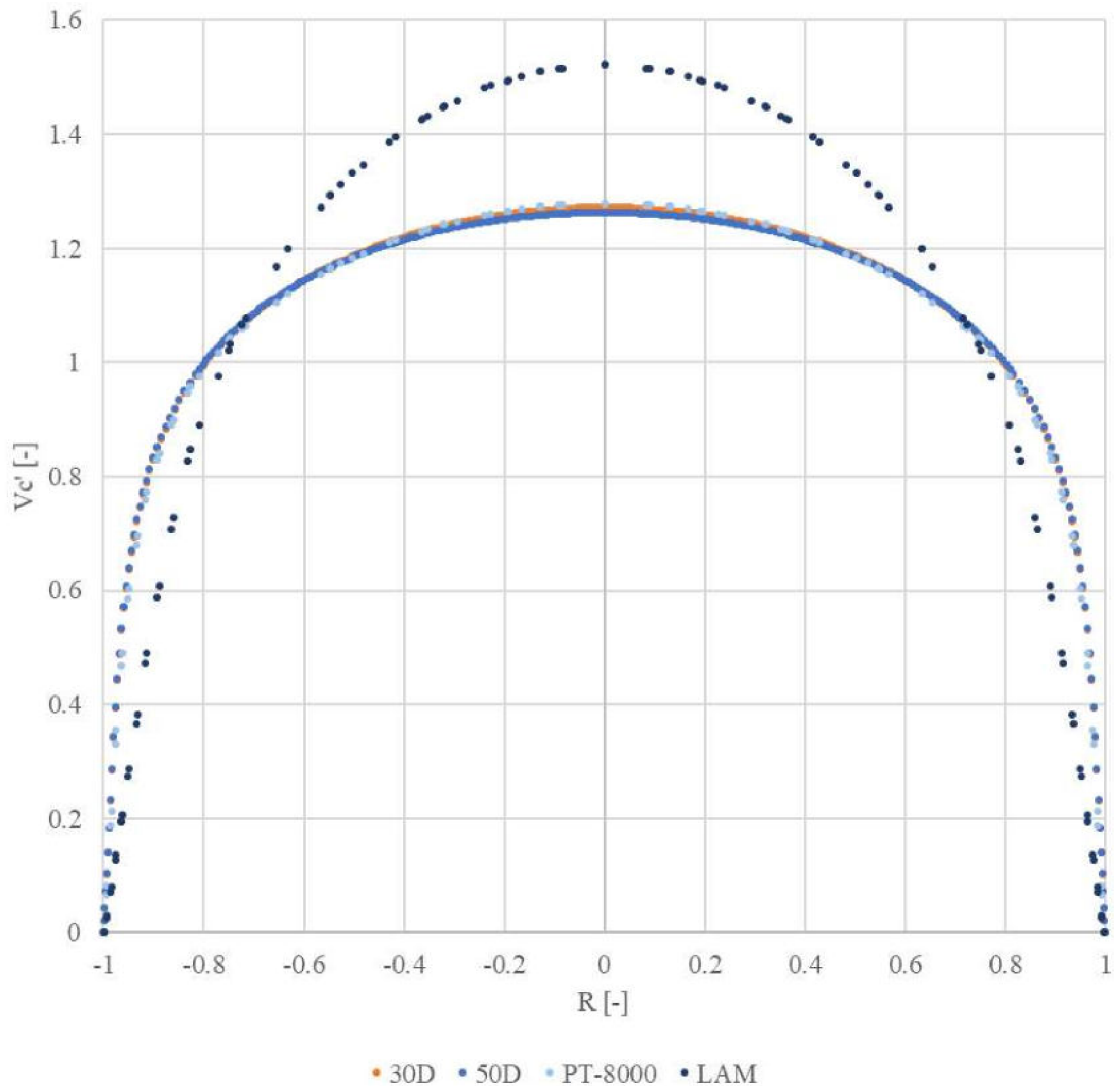
Zde jsou uvedeny výsledky z výpočtu vestavby s jednou dírou, případ byl stejně jako předešlý zjednodušen na 2D problém. Rychlost proudění v potrubí odpovídalo  $Re = 8000$ .



Graf 3.1.6 - Rychlostní profily – vestavba s jednou dírou –  $Re = 8000$  – 2D

Graf 3.1.6 zobrazuje průběh RP po délce potrubí za FMD. Rychlostní profily 2D a 3D vykazují velké rozdíly mezi rychlostmi ve středu proudění a v blízkosti stěny. Nejvyšší rychlosti v blízkosti stěny odpovídají několikanásobku průměrné rychlosti ve středu potrubí. Postupně se rychlost po průřezu ustaluje a v místě 10D je RP plochý, rychlosti jsou na většině průřezu stejné. Rychlost v ose potrubí stále narůstá až do místa 30D, kde je nejvyšší normovaná rychlost na ose potrubí  $v_{co}' = 1,2712$ . U rychlostních profilů v místech 40D a 50D mají klesající tendenci, u profilu 40D je  $v_{co}' = 1,2642$  a pro 50D je  $v_{co}' = 1,2627$ . V případě RP „ref“ získaného z výpočtu v prázdné trubce při  $Re = 8000$  je  $v_c' = 1,2728$ , rychlostní profily za FMD se k laminárnímu stavu nepřiblížily, hodnoty rychlostí jsou velmi podobné hodnotám v případě turbulentního proudění bez vestavby.

Na grafu 3.1.7 jsou taktéž rychlostní profily pro FMD s jednou dírou, kde výpočet byl proveden jako 2D při  $Re = 8000$ . Rychlostní profily za vestavbou 30D a 50D se z části překrývají s rychlostním profilem z prázdného potrubí, RP za vestavbou jsou dokonce více ploché než RP turbulentního proudění. RP představující laminární profil tak je daleko od dosažení a v grafu tak pouze slouží k lepšímu srovnání.

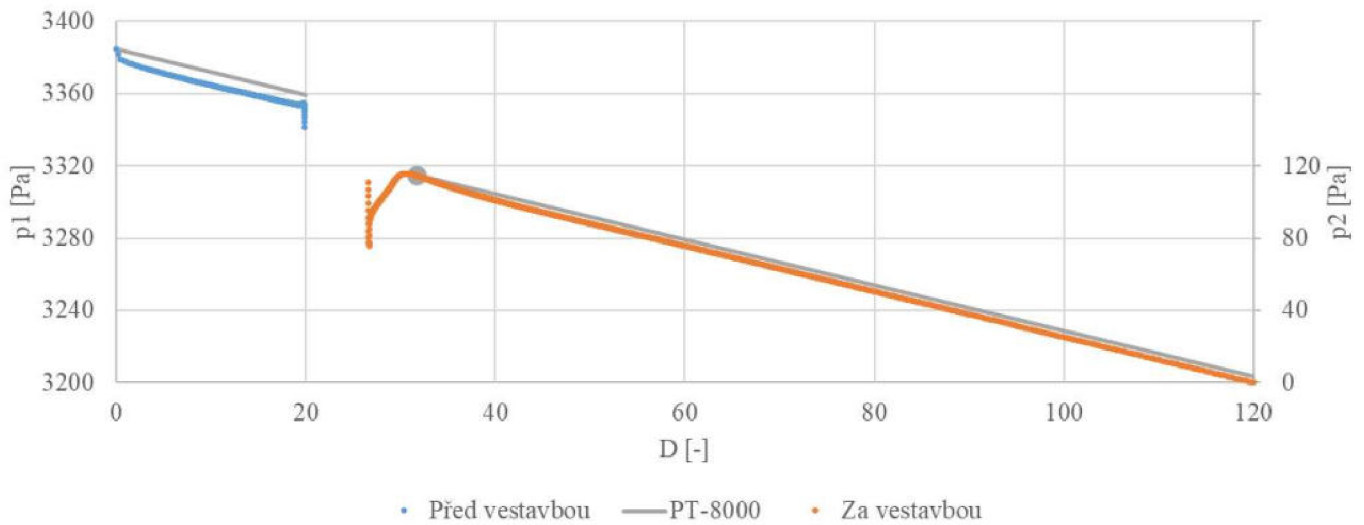


**Graf 3.1.7 - Rychlostní profily –  $Re = 8000$  – srovnání s LAM – 2D**

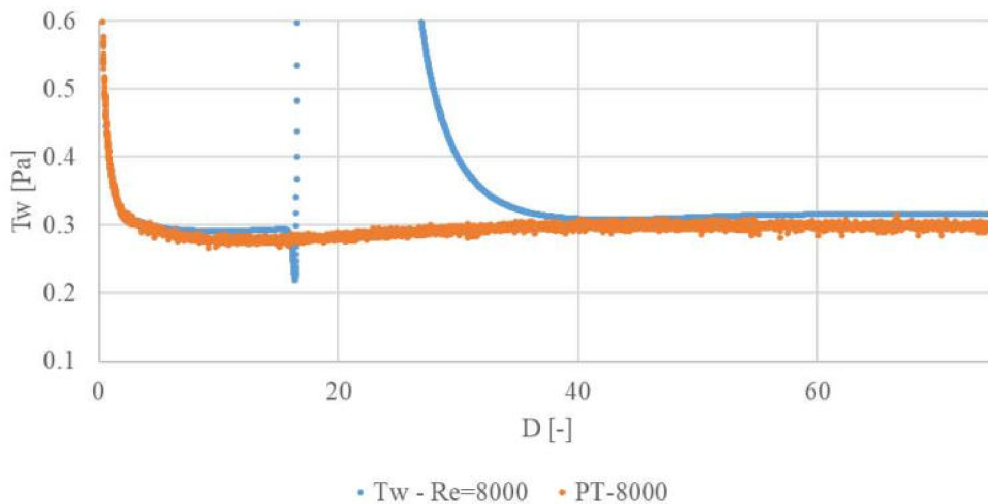
Níže uvedený graf 3.1.8 zobrazuje průběh tlaku po délce celé výpočetní domény pro případ proudění rychlostí odpovídající  $Re = 8000$ . Modrá křivka představuje část potrubí před vestavbou a náleží jí svislá osa v levé straně grafu. Na této křivce je viditelný prvotní pokles tlaku na vstupu do potrubí, dále je křivka rovnoběžná s šedou přímkou. Na konci modré křivky, těsně před začátkem vestavby je vidět prudký pokles tlaku, který pokračuje po celé délce vestavby.

Oranžová křivka zobrazuje průběh tlaku v části potrubí za vestavbou. Náleží k ní svislá osa v pravé části grafu. Na začátku křivky je zobrazen prudký pokles tlaku a následný růst způsobený v místě konce vestavby. Od místa 5D za vestavbou se ale křivka zdá být přímá a

kopíruje šedou přímku, se kterou se překrývá. To znamená, že FMD v tomto případě nevykazuje pozitivní účinek při měření tlakové ztráty.



**Graf 3.1.8 – Průběh tlaku –  $Re = 8000 - 2D$**



**Graf 3.1.9 - Průběh smykového napětí na stěně potrubí –  $Re = 8000 - 2D$**

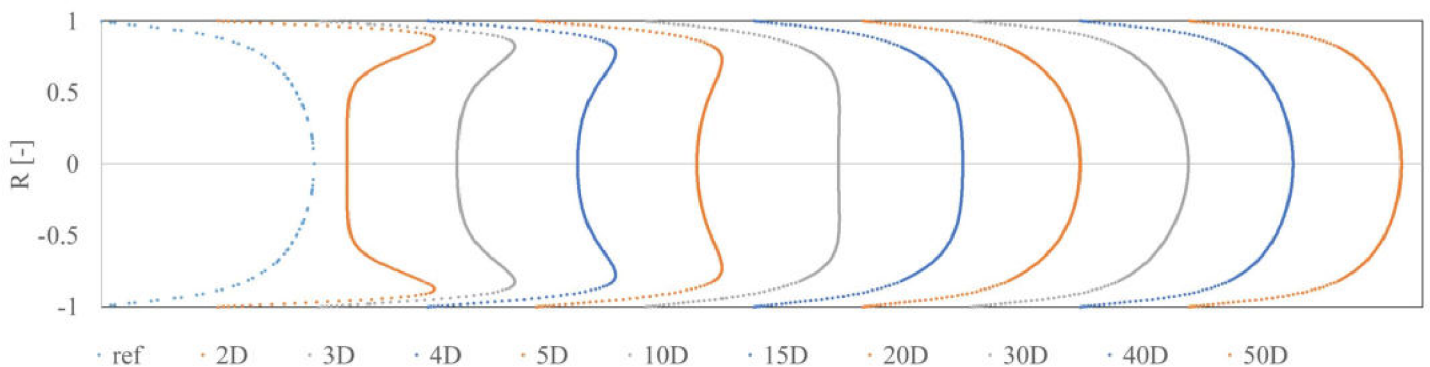
Na grafu 3.1.9 je znázorněn průběh smykového napětí  $\tau_w$  v potrubí s vestavbou modrou křivkou. Oranžová křivka představuje průběh potrubím bez použití vestavby. Už v první části grafu, v místě asi  $16D$  od vstupu do potrubí, je možné si všimnout, že modrá křivka v těchto místech vykazuje vyšší hodnoty než křivka prázdného potrubí. Tento rozdíl je zapříčiněn tím, že proudění, v případě výpočtu s vestavbou, je již vyvinuté na rozdíl od proudění v prázdné trubce, u které stále dochází k postupnému zvyšování hodnoty  $\tau_w$ . V místech okolo  $40D$  je proudění v prázdné trubce zcela vyvinuté a drží si přibližně konstantní hodnotu smykového napětí na stěně. V těchto místech se obě křivky částečně překrývají, za FMD je viditelný mírný pokles hodnot smykového napětí, ale dále za vestavbou dojde k vyvinutí proudění a je vidět mírný nárůst nad hodnoty z prázdného potrubí. Tento výpočet byl jedním z prvních prováděných a tak byl proveden na kratší doméně než výpočty následující, proto vodorovná osa představující délku potrubí končí v místech  $76D$  neboť celková délka původní výpočtové



domény byla 2300mm, další výpočty byly prováděny na delší výpočtové doméně. Na výsledcích to ale nic nemění, neboť za vestavbou byl dostatečný prostor pro vývin proudění a i z těchto dat je možné vidět, že průběh  $\tau_w$  se od míst 60D nemění. Z těchto dat tedy můžeme usoudit, že použití FMD nebylo užitečné a hodnoty smykového napětí za FMD se nesnížily, naopak mírně vzrostly, což by znamenalo zhoršení proudění za vestavbou oproti nekontrolovanému proudění.

### 3.1.3 Výsledky pro $Re = 3000$

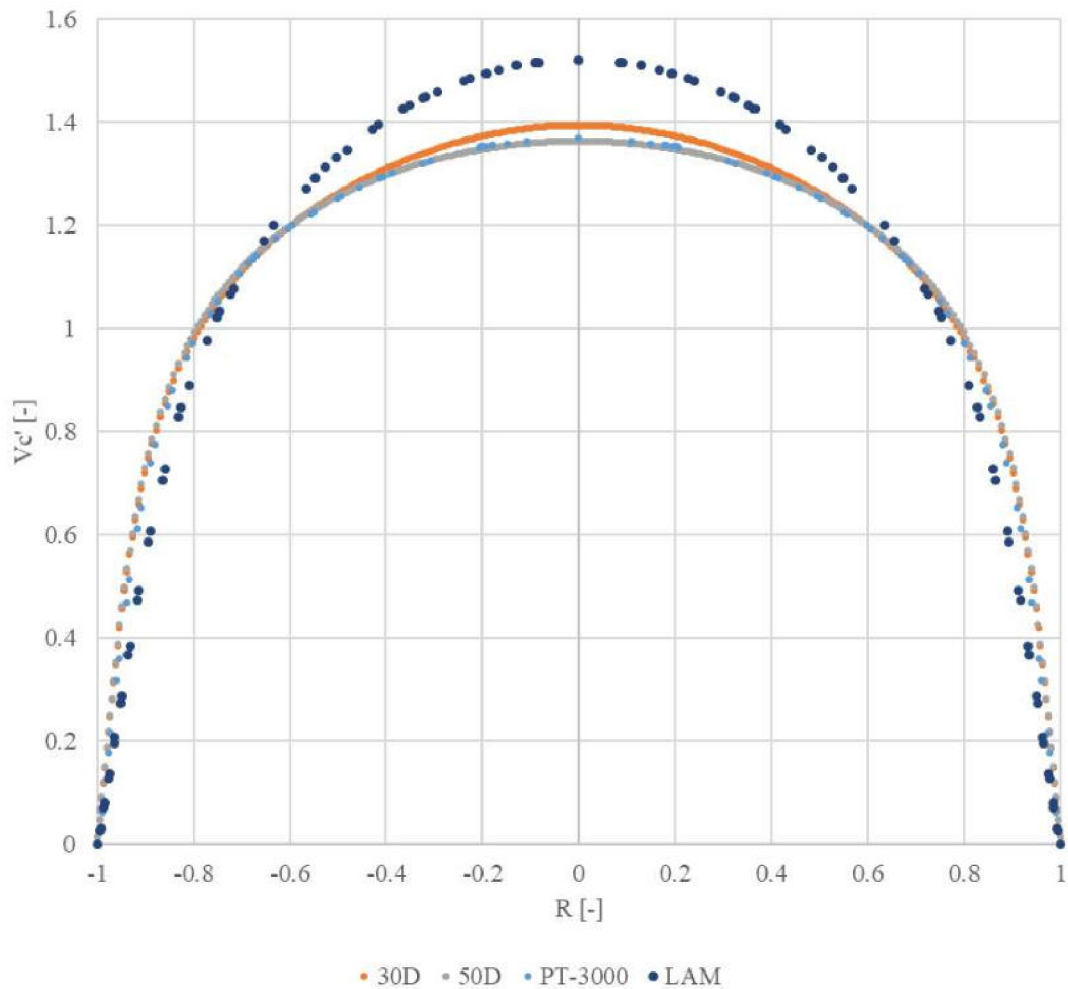
Po dosažení výsledku z výpočtu při Reynoldsových číslech 3800 a 8000 byl ještě dodatečně proveden výpočet pro  $Re = 3000$ . Hodnota 3800 Reynoldsova čísla totiž byla, v případě provedeného experimentu hodnotou kritickou (hodnota  $Re$ , při které došlo k úplné laminarizaci, při vyšší hodnotě  $Re$  došlo už pouze k částečné laminarizaci), jehož výsledky byly uvedeny v předešlé části práce [4]. Příklad proudění při  $Re = 3000$  byl tedy počítán především pro ověření, jestli nejde o kritickou hodnotu i v případě výpočtů CFD.



**Graf 3.1.10** - Rychlostní profily – vestavba s jednou dírou –  $Re = 3000$  – 2D

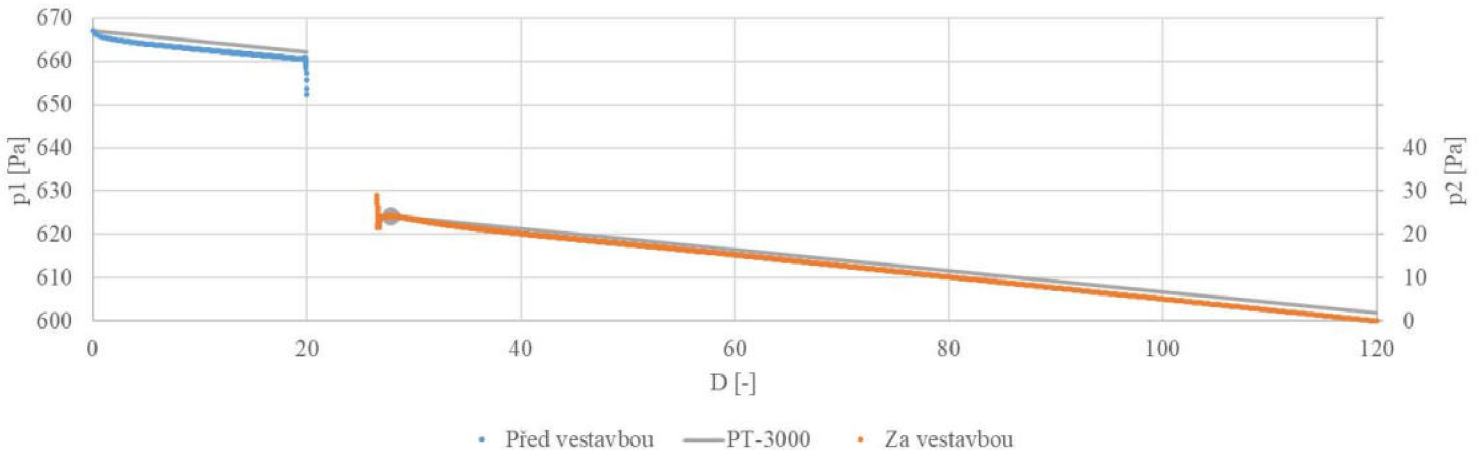
Na grafu 3.1.10 je zobrazen průběh rychlostních profilů za vestavbou. Průběh je velmi podobný předešlým případům při vyšším  $Re$ , viditelné rozdíly jsou především u prvních profilů. Díky nižší střední rychlosti je rozdíl mezi rychlostmi v blízkosti stěny a středu proudu menší, než v případech pro  $Re = 3800$  a  $Re = 8000$ . Následuje velmi podobný vývoj, kdy nejvyšší rychlost na ose potrubí je v místě 30D za vestavbou.

Na grafu 3.1.11 jsou zobrazeny rychlostní profily v porovnání s profily turbulentního a laminárního proudění. Rychlostní profil v místě 30D je jediným RP, kde normovaná rychlost na ose potrubí  $v_{co}'$  je vyšší než v případě profilu vycházejícího z prázdné trubky bez použití FMD. Tomu tak bylo i v předešlých případech, následně však rychlost  $v_{co}'$  klesá a rychlostní profil v místě 50D už kopíruje RP nekontrolovaného proudění PT-3000.



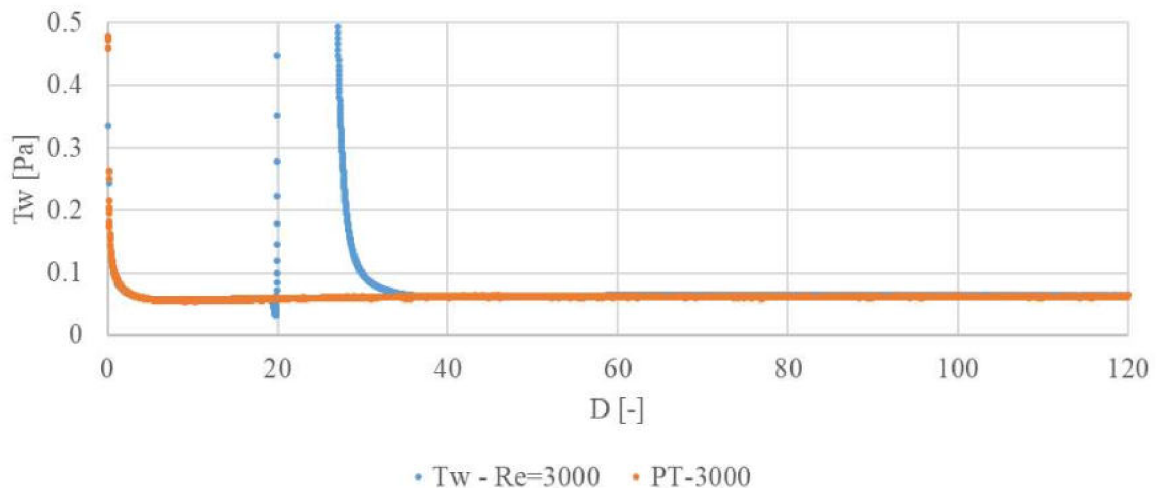
**Graf 3.1.11 - Rychlostní profily –  $Re = 3000$  – srovnání s LAM – 2D**

Graf 3.1.12 zobrazuje průběh tlaku na výpočetní doméně, výsledky v případě nejnižší počítané rychlosti proudění, tj. při  $Re = 3000$ , se příliš neliší od dvou předešlých případů s vyšší střední rychlostí proudění. Oranžová křivka představující tlakový spád za vestavbou v místech 40D od počátku domény zaznamenává prudší pokles tlaku oproti nekontrolovanému proudění, které je znázorněno šedou přímkou. O něco dál za FMD se proudění uklidní a tlaková ztráta začíná být stálá, ale pořád je o něco málo vyšší než při proudění bez vestavby. Tlaková ztráta po délce trubky je tak vyšší při použití FMD, než při proudění prázdnou trubicou i přes zanedbání ztrát vytvořené samotnou vestavbou omezující proudění.



**Graf 3.1.12 – Průběh tlaku –  $Re = 3000$  – 2D**

Na grafu níže je průběh smykového napětí na stěně  $\tau_w$ , oranžová křivka představuje průběh při nekontrolovaném proudění při  $Re = 3000$ , tato křivka téměř po celé délce překrývá modrou křivku představující průběh v potrubí s použitím vestavby. Z tohoto grafu je tedy možné usoudit, že vestavba nemá vliv na smykové napětí, alespoň v tomto případě.

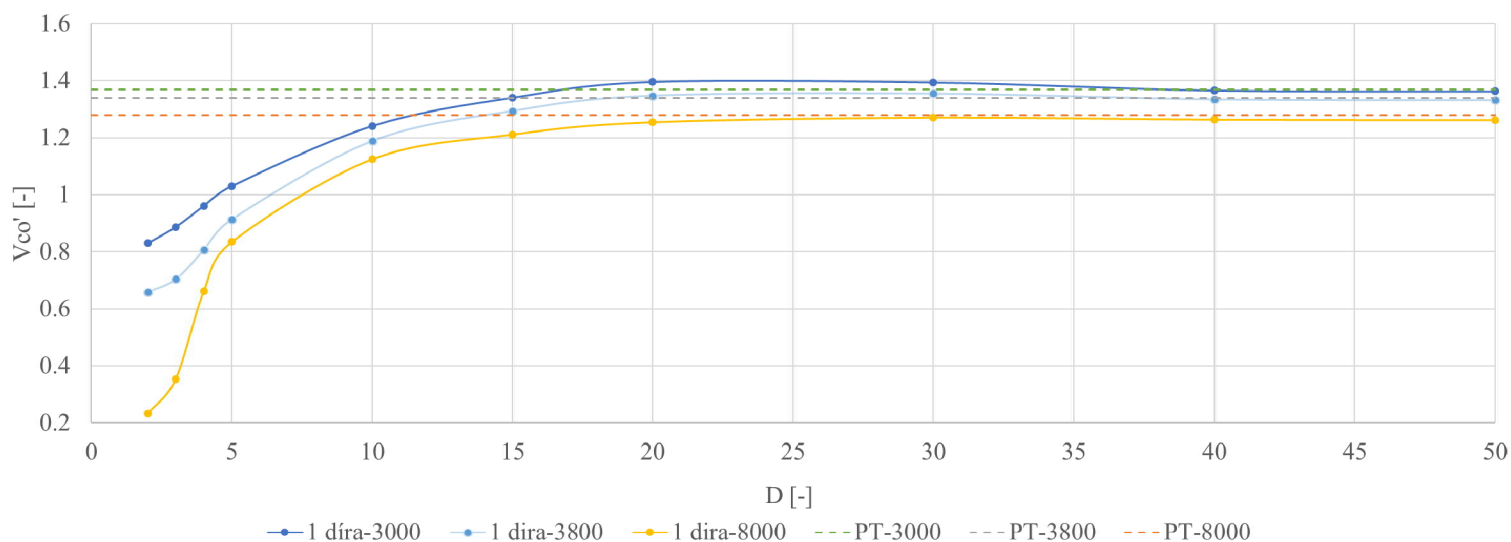


**Graf 3.1.13 - Průběh smykového napětí na stěně potrubí –  $Re = 3000$  – 2D**



### 3.1.4 Srovnání výsledků při $Re = 3000, 3800, 8000 - 2D$

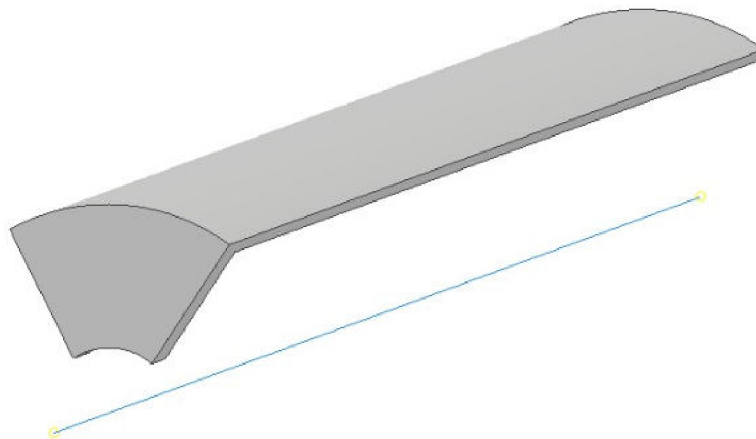
Graf 3.1.14 znázorňuje průběh rychlostí na ose potrubí v případě FMD s jednou dírou uprostřed a výpočtem provedeným na axisymetrické součásti jako 2D problém. Vodorovná osa představuje vzdálenost od konce vestavby v hodnotách průměrů potrubí  $D$ . Na svislé ose jsou vyvedeny normované rychlosti, vždy se jedná o rychlosti v ose potrubí, tedy ve středu proudu. Čárkované čáry představují hodnoty rychlostí v ose potrubí bez použití vestavby, tedy v prázdné trubce (PT-3800 =>  $Re = 3800$  atd.). V případě světle modré křivky se jedná o použití vestavby a střední rychlosti proudění odpovídající  $Re = 3800$ . Zpočátku se rychlost na ose potrubí rychle zvyšuje, v místě okolo  $20D$  přesáhne hodnotu prázdné trubky, trend ale nezůstává stejný a rychlost v místě  $40D$  je už hodnota stejná jako v případě prázdné trubky. Žlutá křivka znázorňuje stejný případ ale pro střední rychlost proudění odpovídající  $Re = 8000$ . Zde je na počátku za vestavbou ještě prudší zvýšení rychlosti, od vzdálenosti  $5D$  už ale žlutá křivka téměř kopíruje modrou, v případě  $Re = 8000$  ale není ani v jednom místě překročena rychlost odpovídající prázdné trubce při stejném  $Re$ . Tmavě modrá křivka představující průběh v případě  $Re = 3000$  je velmi podobný průběhu pro případ  $Re = 3800$ . Je zde ale o něco viditelnější překročení rychlosti v ose potrubí nekontrolovaného proudění v místech  $20D-30D$ . Od vzdálenosti  $40D$  za FMD se proudění zdá stejné jako bez ovlivnění FMD.



**Graf 3.1.14** – Normovaná rychlost na ose potrubí  $v_{co}^1$  –  $Re = 3000; 3800; 8000 - 2D$

### 3.2 Vestavba s jednou dírou – 3D

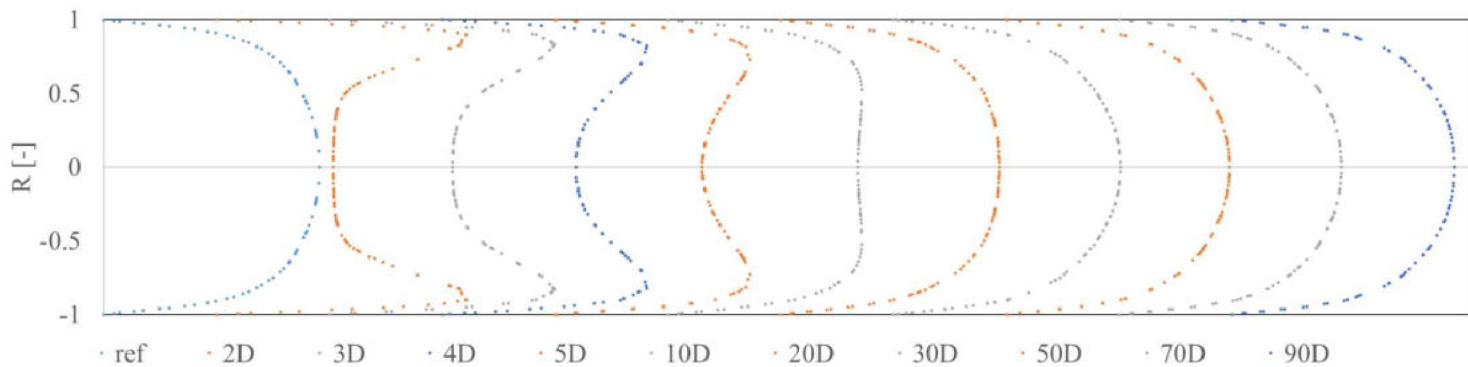
Simulace proudění skrze FMD s jednou dírou (náčrt je uveden v předešlé části včetně rozměrů) byla provedena také na 3D modelu. Pro snížení výpočetní náročnosti nebyla počítána celá vestavba na plném průměru trubky, ale model byl zmenšen na 1/6 tedy byl vytvořen podélný výřez o velikosti 60°, vytvořený 3D model použitý při výpočtech je na obrázku 3.2.1, kde modrá čára představuje osu potrubí. Níže jsou uvedeny výsledky taktéž pro tři různé rychlosti proudění skrze tuto vestavbu, ty odpovídají Reynoldsovým číslům 3800, 8000 a 3000.



Obr. 3.2.1 – 3D model 1/6 vestavby s jednou dírou

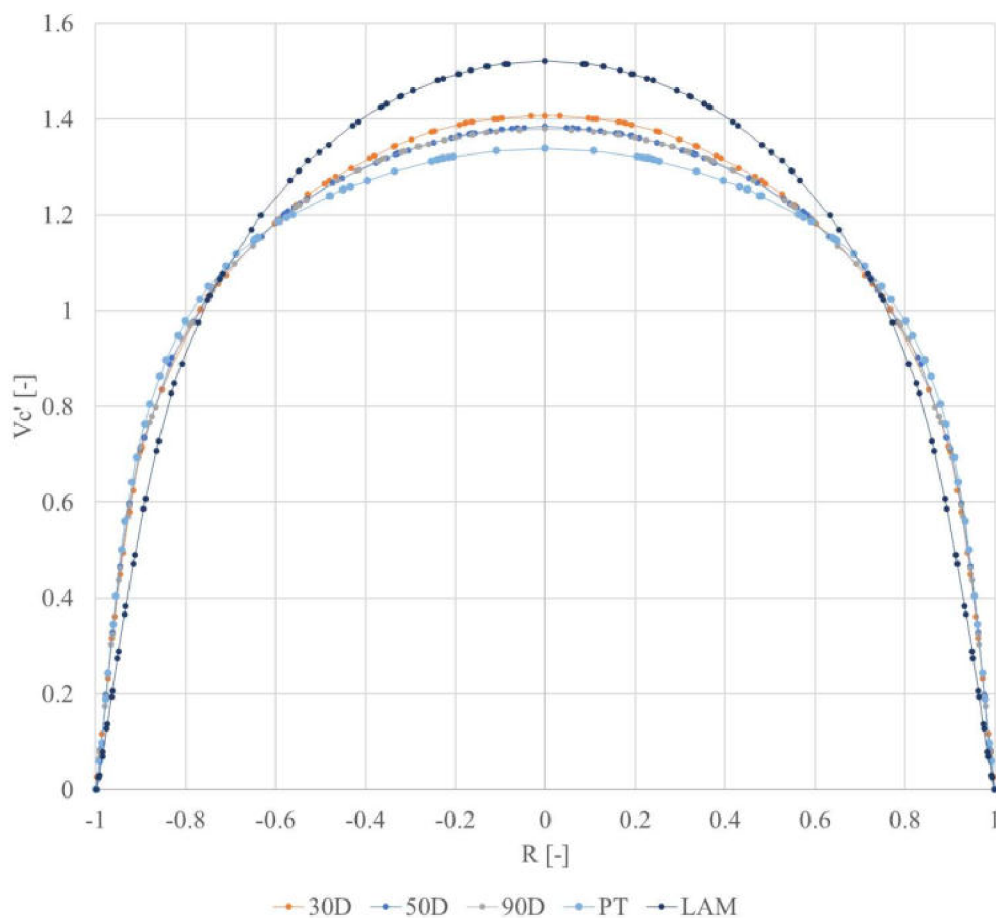
#### 3.2.1 Výsledky pro $Re = 3800$

V této části jsou uvedeny výsledky z výpočtů provedených na 3D modelu, zde konkrétně pro rychlost odpovídající  $Re = 3800$ . Na grafu 3.2.2 je znázorněn průběh a vývoj rychlostních profilů po délce potrubí. Postupný vývoj, kdy v místech v blízkosti konce vestavby je rychlost proudění v blízkosti stěny vyšší než rychlost středu proudu a vytváří tak profil podobný písmenu M, je velmi podobný případu předešlého, kde byl výpočet proveden na axisymetrické součásti ve 2D. Rozdíly ale zde přeci jen jsou, v místech 20D za vestavbou dojde k překročení rychlosti v ose v porovnání s referenčním profilem. Postupný růst rychlosti na ose potrubí trvá až do míst okolo 30D za vestavbou, dále pak dochází k mírnému poklesu rychlosti, v místech 70D až 90D je už rychlost stálá a nijak se nemění, zůstala však nad hodnotou referenčního profilu, tedy nekontrolovaného proudění.



**Graf 3.2.2** - Rychlostní profily – vestavba s jednou dírou –  $Re = 3800$  – 3D

Na grafu 3.2.3 jsou srovnány jednotlivé RP, profil se zkratkou LAM představuje laminární průběh v prázdné trubce při  $Re = 1500$  a slouží ke srovnání. Profil se zkratkou PT znázorňuje ustálený průběh nekontrolovaného proudění při  $Re = 3800$ . Profil znázorněný oranžovou barvou představuje RP v místě 30D za vestavbou, zde je vidět, že došlo ke značnému přiblížení se k laminárnímu průběhu a vzdálení se od profilu PT. Rychlostní profily v místech 50D a 90D se z části překrývají, to znamená, že rychlost v těchto místech je už ustálená, oproti RP 30D se sice nejvyšší rychlosti ve středu proudu snížily, ale stále jsou značně nad hodnotami rychlostí nekontrolovaného RP.



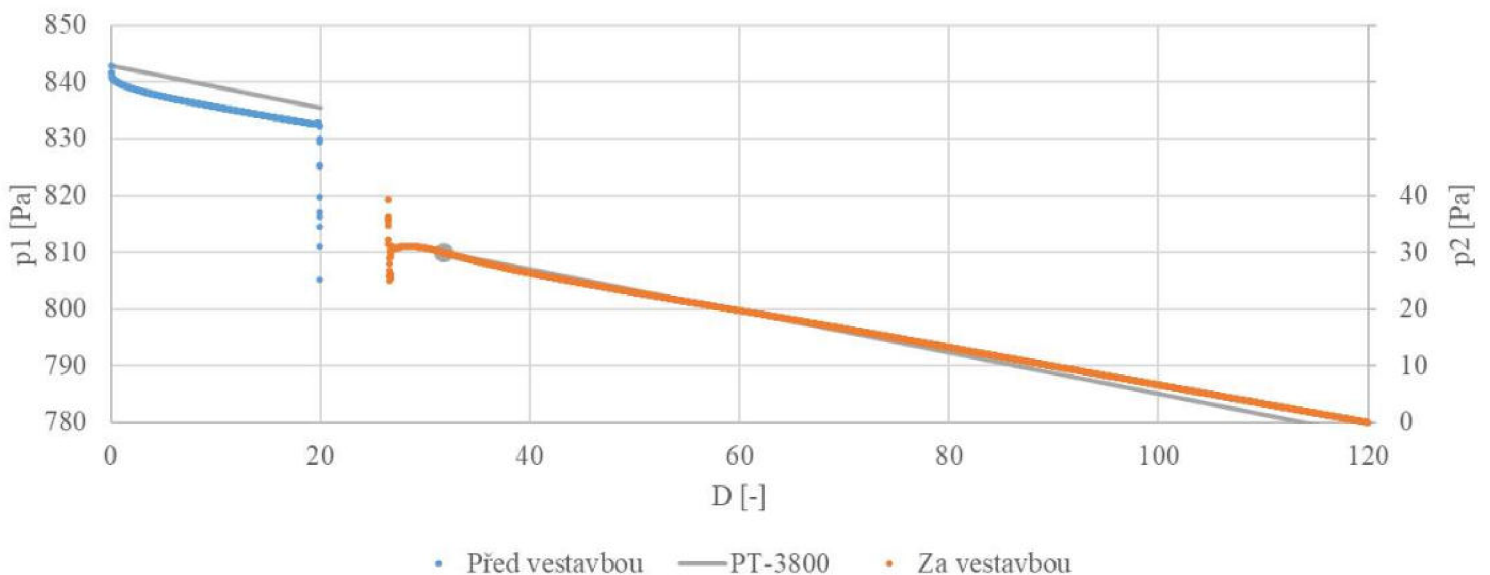
**Graf 3.2.3** - Rychlostní profily –  $Re = 3800$  – srovnání s LAM – 3D

Pro profil v místě 90D za vestavbou platí, že nejvyšší normovaná rychlost na ose potrubí je  $v_{co}' = 1,3796$ , oproti tomu tato rychlost pro profil PT je  $v_{coTURB}' = 1,3393$ . Rychlostní profil představující laminární proudění má tuto hodnotu normované rychlosti na ose potrubí  $v_{coLAM}' = 1,5214$ . Z tohoto je možné dopočítat o kolik procent se profil v místě 90D přiblížil k laminárnímu průběhu.

$$\frac{v_{co}' - v_{coTURB}'}{v_{coLAM}' - v_{coTURB}'} = \frac{1,3796 - 1,3393}{1,5214 - 1,3393} = 0,2213 \Rightarrow 22,13\%$$

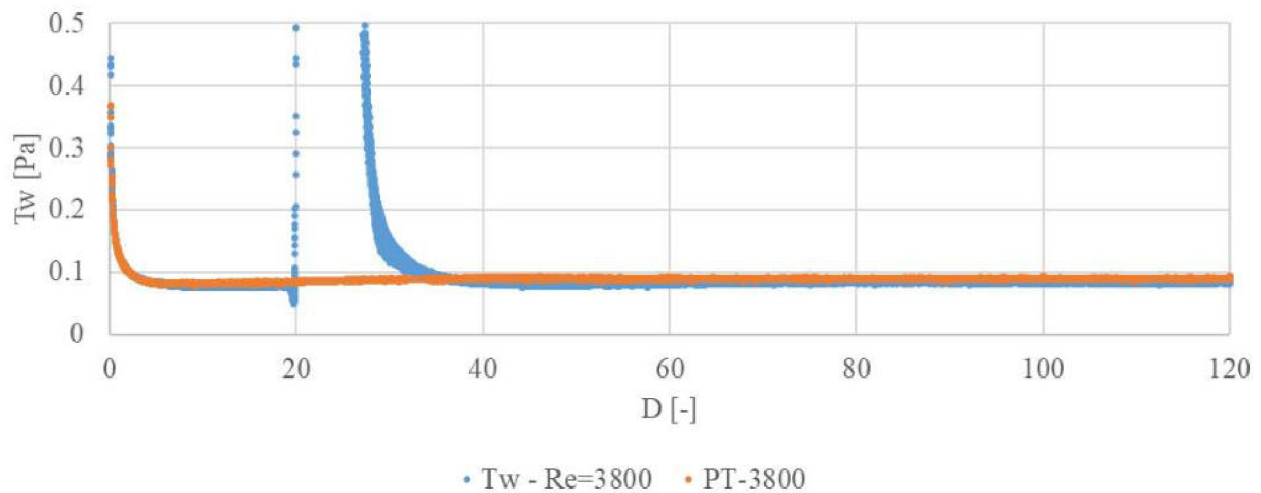
Vychází tedy, že s pomocí vestavby bylo docíleno přiblížení se k laminárnímu průběhu rychlosti o 22%. Toto je tedy velký rozdíl oproti výpočtu provedeném ve 2D, kde rychlostní profil ve vzdálenosti 50D za vestavbou byl položen níže než profil proudění v prázdné trubce a zdálo se tak, že vestavba nemá žádný pozitivní vliv na proudění.

Graf 3.2.4 zobrazuje průběh tlaku po délce výpočetní domény, tyto výsledky pochází z výpočtu provedeného na 3D modelu. Modrá křivka průběhu tlaku na vstupu do potrubí je rovnoběžná s šedou přímkou, tedy s průběhem nekontrolovaného proudění, tomu by tak i mělo bezesporu být. Výjimkou je pouze místo vtoku do potrubí, kde je prudší pokles tlaku. U oranžové křivky je nyní rozdíl oproti předešlým případům. Šedá přímka se totiž dostává pod oranžovou křivku, má tedy prudší spád a to značí vyšší tlakové ztráty. Zde je tedy vidět malý rozdíl v tlakovém spádu při porovnání průběhu v potrubí bez použití FMD a s použitím FMD. Vestavba tak má pozitivní vliv na tlakový spád, vliv je to ale velmi malý v tomto případě by potrubí za FMD muselo mít minimální délku téměř 23 000D, aby byla vyrovnána tlaková ztráta vzniklá na vestavbě.



**Graf 3.2.4 – Průběh tlaku – Re = 3800 – 3D**

Graf 3.2.5 ukazuje průběh  $\tau_w$  na stěnách potrubí s použitím FMD (modrá křivka) a bez použití FMD (oranžová křivka). Z výsledků v tomto případě je patrné, že rozdíl ve smykových napětích vznikl. V místě asi 45D je vidět propad modré křivky, kdy se hodnota  $\tau_w$  dostane na její minimum, z tohoto je možné usoudit, že vestavba ovlivnila smykové napětí na stěně potrubí, alespoň v blízkém místě za koncem vestavby. Hodnota smykového napětí v případě použití vestavby se ale i nadále drží pod hodnotou smykového napětí v prázdném potrubí.

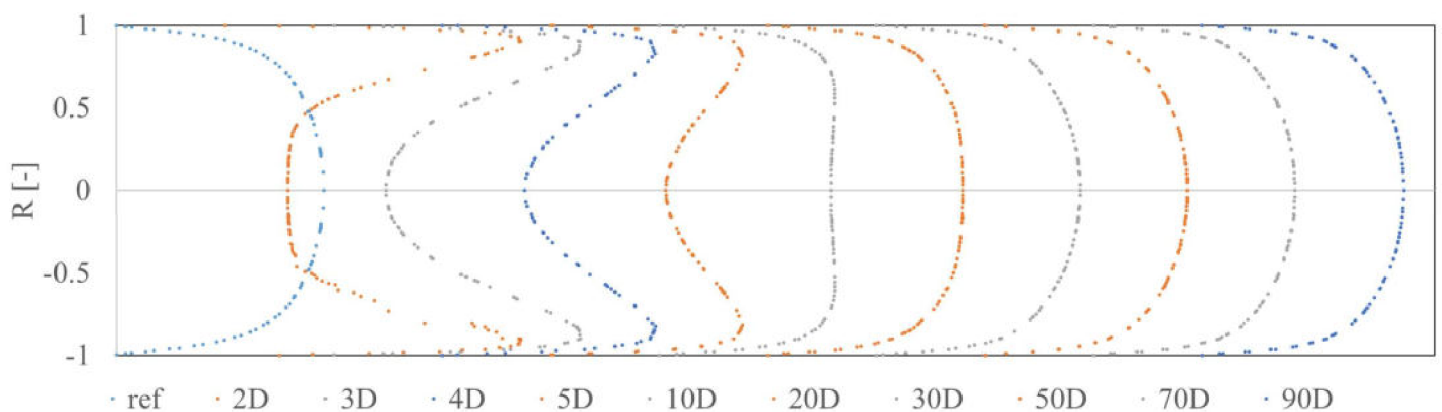


**Graf 3.2.5** - Průběh smykového napětí na stěně potrubí –  $Re = 3800 - 3D$

### 3.2.2 Výsledky pro $Re = 8000$

V této části práce jsou uvedeny výsledky z výpočtů provedených na 3D modelu vestavby s jednou dírou, zde konkrétně pro rychlost odpovídající  $Re = 8000$ .

Na grafu 3.2.6 je znázorněn průběh a vývoj rychlostních profilů po délce potrubí, nejvzdálenější místo sledování rychlostních profilů je 90D za vestavbou. V tomto grafu nejsou vidět žádné výraznější rozdíly oproti výsledkům z výpočtů provedených na 2D modelu. RP ve vzdálenosti 2D vypadá velmi podobně, rychlosti u stěny potrubí vysoce převyšují rychlosti ve středu proudu, je to z důsledku vyšší rychlosti proudění. Rychlost ve středu proudu ale prudce narůstá a v místě 10D taktéž dojde k vytvoření plochy uprostřed proudu. K překročení rychlosti na ose potrubí nekontrolovaného turbulentního proudění dojde ale o něco později než v případě výsledků pro  $Re = 3800$ , někde v místech okolo 25D dojde k překročení této rychlosti, ne však o tolik jako v předešlém případě. Rychlostní profily v místech 50D a dále jsou již beze změn, pouze v místech 30D až 50D došlo k mírnému poklesu rychlostí ve středu proudu. Hodnoty rychlostí na ose potrubí pro případy 50D, 70D a 90D jsou však stále vyšší než hodnoty profilu nekontrolovaného proudění.



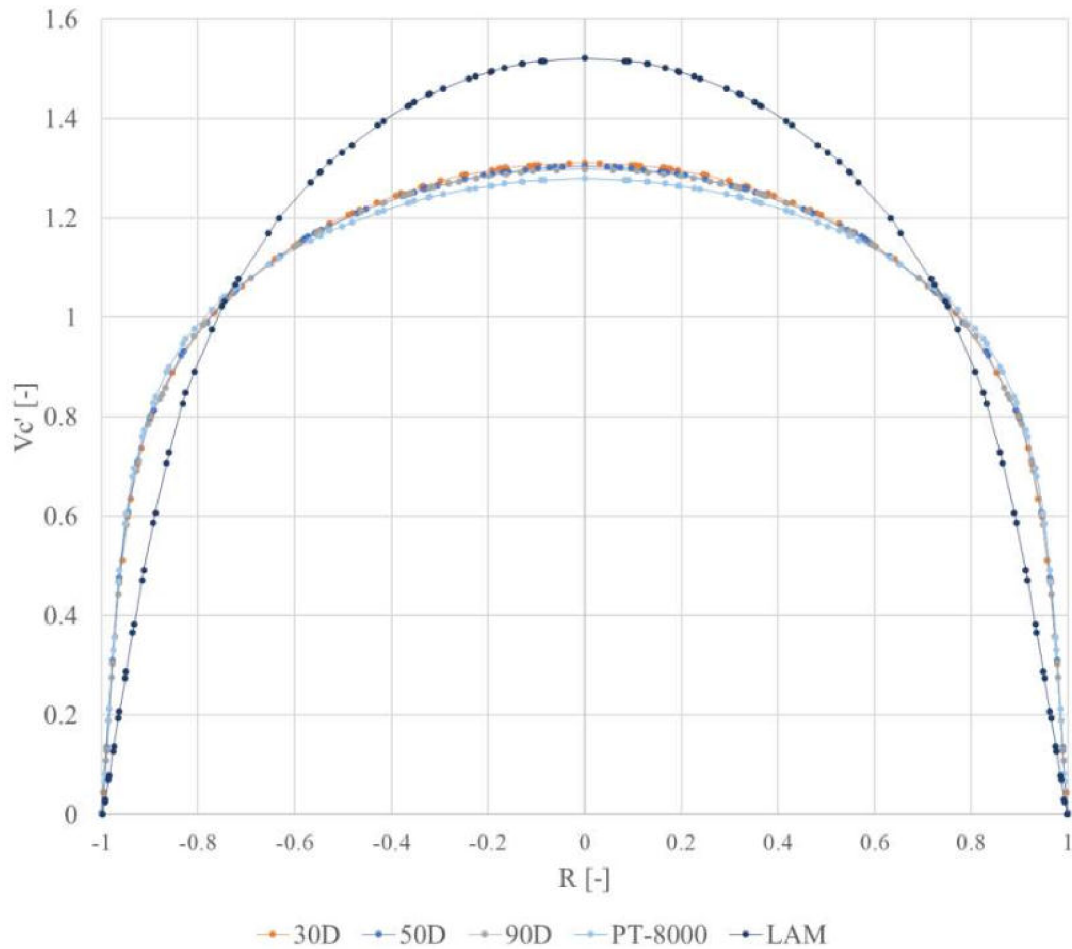
**Graf 3.2.6** - Rychlostní profily – vestavba s jednou dírou –  $Re = 8000$  – 3D

Graf 3.2.7 zobrazuje rychlostní profily z několika různých vzdáleností za FMD, ke srovnání jsou zde uvedeny dva RP, první s názvem PT-8000 představuje RP nekontrolovaného proudění při  $Re = 8000$ , druhý s názvem LAM představuje RP nekontrolovaného proudění při  $Re = 1500$ , tedy představuje profil laminárního proudění. V tomto případě, kdy je rychlost proudění vyšší oproti předešlému případu, jsou rozdíly normovaných rychlostí u jednotlivých RP hůře viditelné. Stále však platí, že nejvyšší normovaná rychlost na ose potrubí se vyskytuje v případě profilu 30D. Dále je zde mírný pokles těchto rychlostí, v místě 90D jsou už rychlosti ustálené a normovaná rychlost na ose potrubí v místě 90D je  $v_{co}' = 1,2984$ . Hodnota této rychlosti pro případ ( $Re = 8000$ ) turbulentního proudění je  $v_{coTURB}' = 1,2788$ . Hodnota v případě laminárního proudění zůstává samozřejmě stejná jako v předchozím případě. Je to možné dopočítat, jak moc bylo přispěno k potlačení turbulence touto vestavbou:

$$\frac{v_{co}' - v_{coTURB}'}{v_{coLAM}' - v_{coTURB}'} = \frac{1,2984 - 1,2788}{1,5214 - 1,2788} = 0,0808 \Rightarrow 8,08\%$$

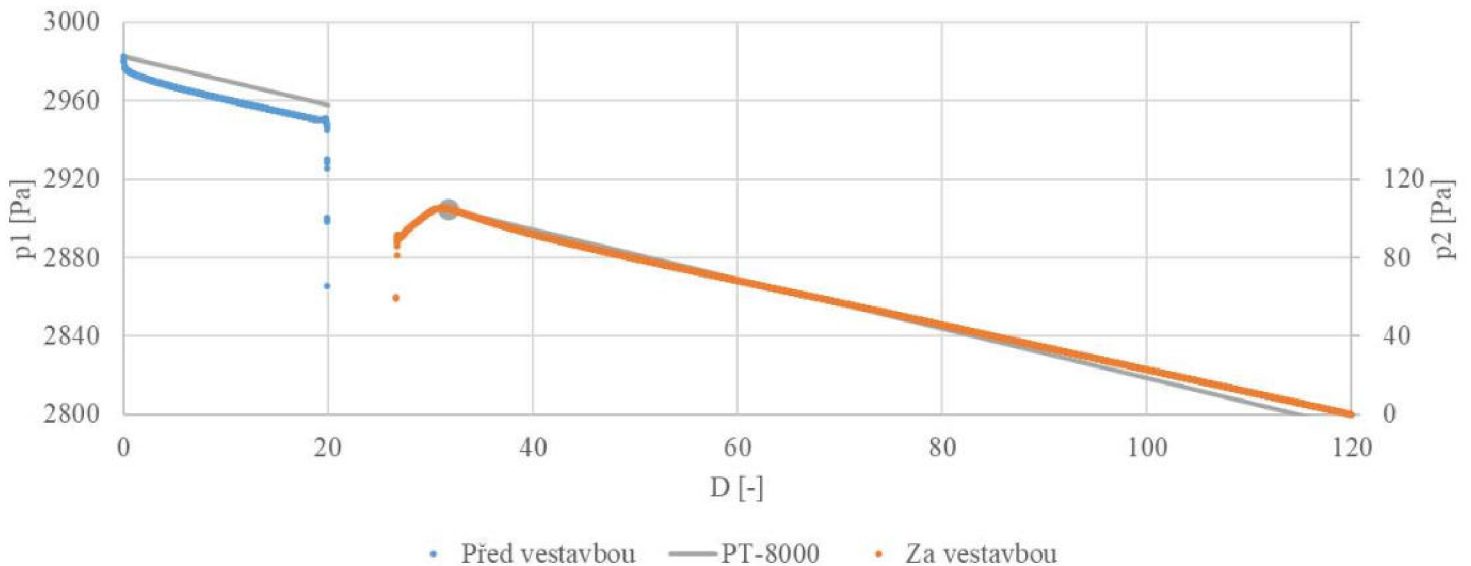


Tato skutečnost, že u předešlé vestavby bylo přiblížení se k laminárnímu profilu na hodnotě 22% a v tomto případě jde jen o 8%, by mohla napovídat něco o funkčnosti vestavby při vyšších Reynoldsových číslech, zřejmě tak bude schopnost vestavby potlačit turbulenci a snížit tak ztráty velmi záviset na rychlosti proudění v potrubí.



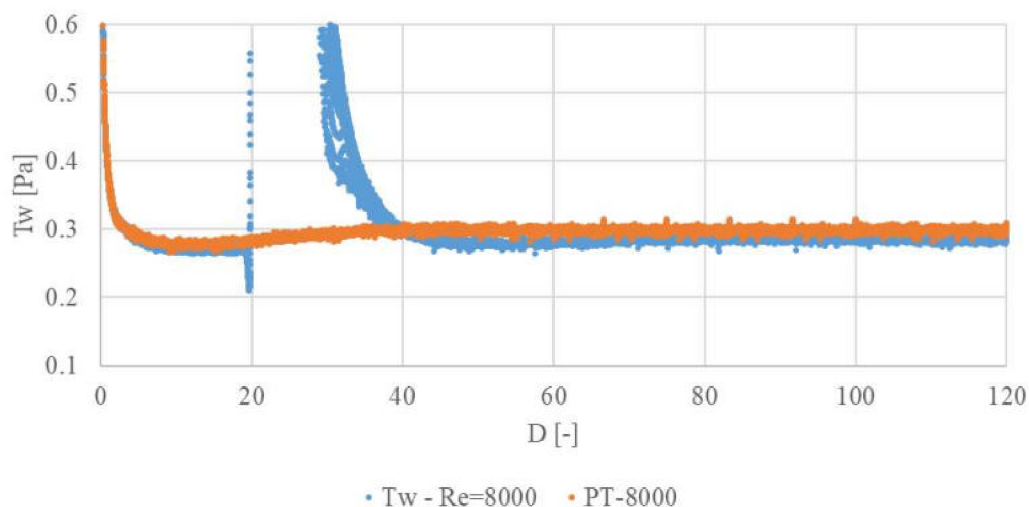
Graf 3.2.7 - Rychlostní profily –  $Re = 8000$  – srovnání s LAM – 3D

Graf 3.2.8 zobrazuje průběh tlaku v potrubí s použitím FMD pro případ proudění s rychlostí odpovídající  $Re = 8000$ . U oranžové křivky je možné sledovat podobný vývoj jako u grafu 3.2.4. Je zde také mírně odlišný sklon od šedé přímky představující tok potrubím bez použití FMD. Rozdíl však není příliš velký a tak FMD příliš nepřispívá ke snížení tlakových ztrát. V tomto případě by musela být délka potrubí za vestavbou alespoň  $24\ 000D$  aby byla vyrovnána tlaková ztráta vzniklá na vestavbě.



**Graf 3.2.8** – Průběh tlaku –  $Re = 8000$  – 3D

V případě proudění při  $Re = 8000$  dochází k výraznému poklesu smykového napětí hlavně v místech okolo  $50D$  od počátku domény, tedy zhruba  $25D-30D$  za FMD (graf 3.2.9). Následuje malé stoupání na ustálenou hodnotu, tato hodnota je ale stále menší než v případě oranžové křivky, tedy proudění bez použití vestavby. U oranžové křivky je znatelné postupné vyvíjení se proudění, kdy z počátku hodnoty smykového napětí prudce klesají a následuje pomalý růst, ustálená hodnota je až někde v místech  $40D$  od počátku vestavby.

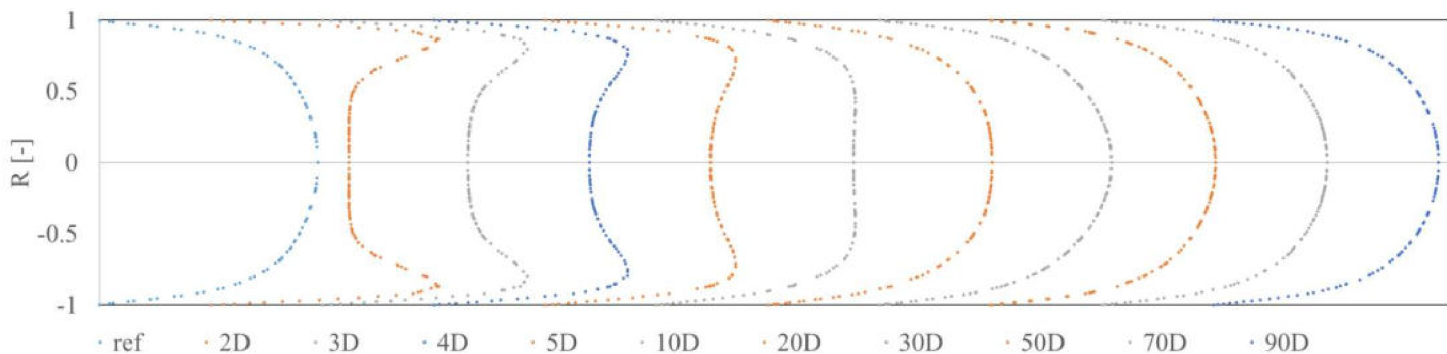


**Graf 3.2.9** - Průběh smykového napětí na stěně potrubí –  $Re = 8000$  – 3D



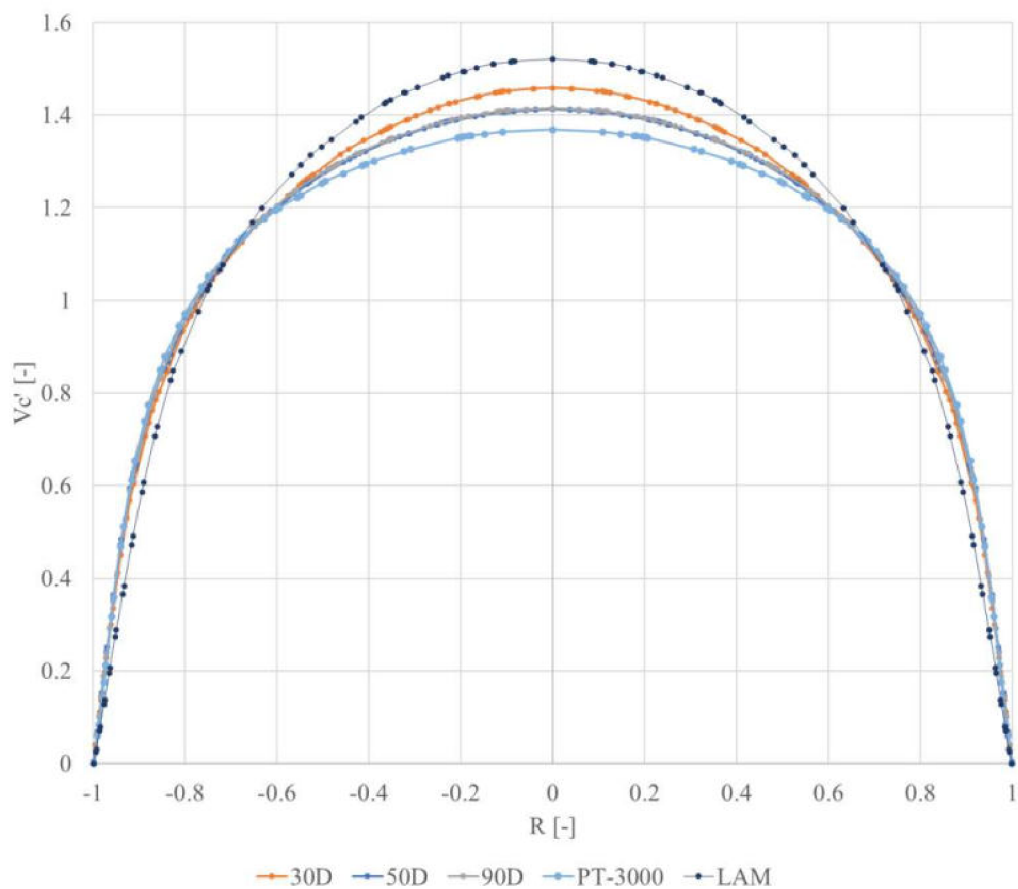
### 3.2.3 Výsledky pro $Re = 3000$

Na rychlostních profilech v grafu 3.2.10 je znát velmi podobný průběh vývoje jako pro případy vyšších rychlostí proudění, zde je však velmi nápadný rozdíl rychlostního profilu v místě 30D, který se výrazně liší od profilu představujícího nekontrované proudění „ref“.



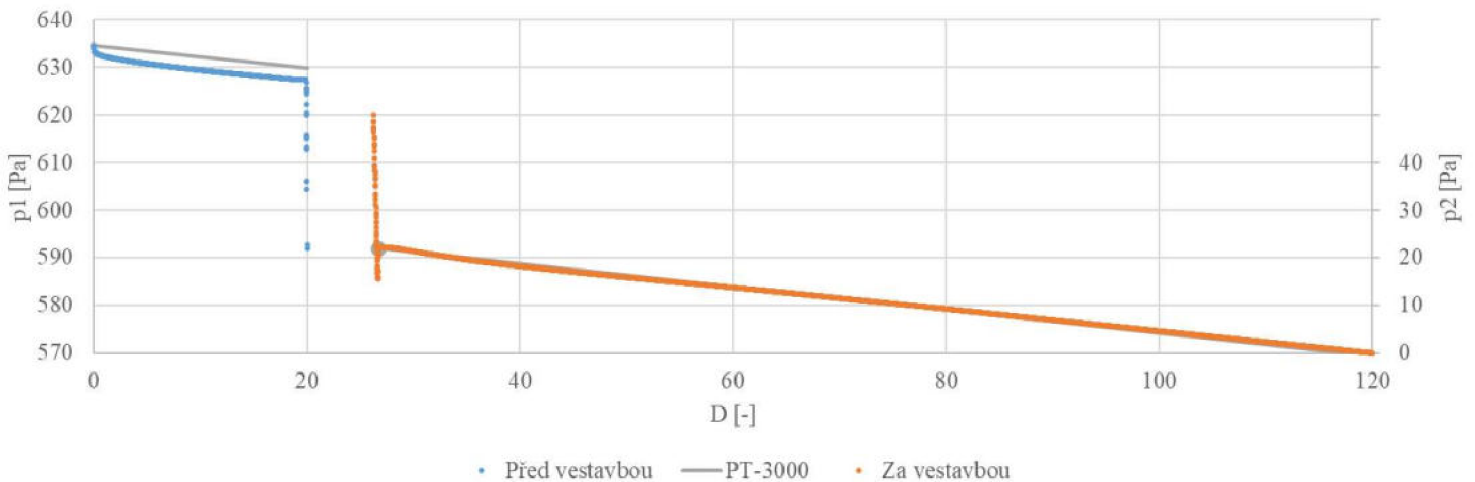
**Graf 3.2.10** - Rychlostní profily – vestavba s jednou dírou –  $Re = 3000$  – 3D

Oranžový RP 30D v grafu 3.2.11 tuto skutečnost jasně ukazuje. Hodnota normované rychlosti v ose potrubí je značně nad rychlostním profilem PT-3000 (nekontrované proudění při  $Re = 3000$ ). Rychlostní profil 30D se blíží profilu představující laminární proudění (LAM).



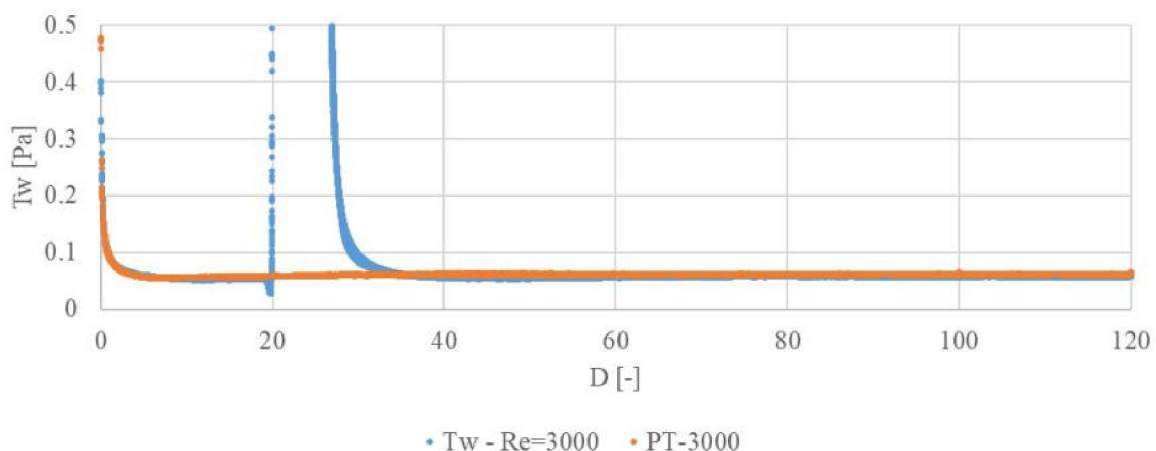
**Graf 3.2.11** - Rychlostní profily –  $Re = 3000$  – srovnání s LAM – 3D

V potrubí za vestavbou je nejvyšších rychlostí na ose dosaženo přibližně ve vzdálenosti právě 30D za vestavbou, dále tato rychlost klesá a RP 50D se blíží zpět k profilu představující turbulentní proudění. Skutečnost, že se rychlostní profily 50D a 90D překrývají, nasvědčuje tomu, že se proudění dále nevyvíjí a hodnoty rychlostí v ose potrubí jsou nad hodnotami nekontrolovaného RP. Tyto výsledky tak nasvědčují tomu, že by mohlo dojít alespoň k částečné laminarizaci proudění při použití této vestavby.



**Graf 3.2.12 - Průběh tlaku – Re=3000 – 3D**

Graf 3.2.12 zobrazuje tlakovou ztrátu na celé výpočetní doméně. V levé části grafu modrá křivka představuje část domény před FMD, následně je oblast FMD z grafu vynechána, neboť na vestavbě je obrovská tlaková ztráta v porovnání se ztrátami po délce potrubí. V části grafu za FMD se zdá, že oranžová křivka zcela překrývá šedou přímku znázorňující průběh tlaku podél potrubí bez použití vestavby. Je zde ale malý rozdíl, výsledky výpočtů ukazují hodnotu tlakové ztráty podél potrubí bez použití vestavby  $\Delta p_{PT} = 8,1 \text{ Pa/m}$  a při použití vestavby to je  $\Delta p_{VST} = 7,68 \text{ Pa/m}$ . Je to tedy rozdíl zhruba 5%, ale zapříčiněním ztráty vzniklé na FMD se použití vestavby pro snížení tlakových ztrát podél potrubí vyplatí až pro dlouhé délky potrubí. Proudění by si tedy muselo udržet tyto vlastnosti získané pomocí použití vestavby po velmi dlouhou dobu, aby došlo ke kompenzaci tlakové ztráty na vestavbě.

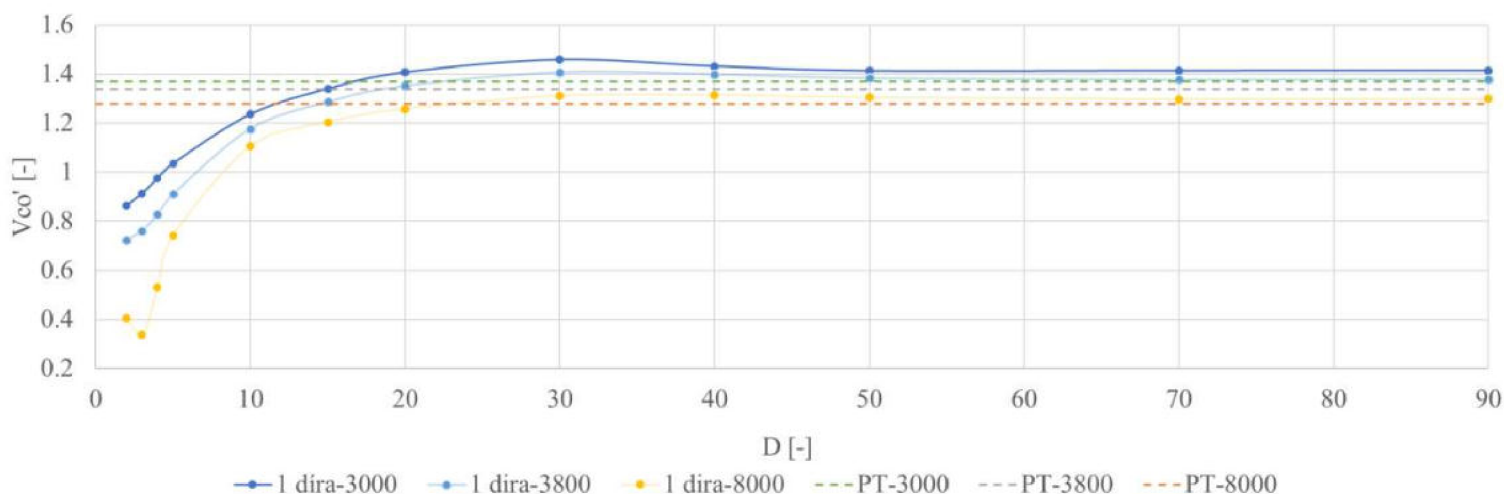


**Graf 3.2.13 - Průběh smykového napětí na stěně potrubí – Re = 3000 – 3D**

Na grafu průběhu smykového napětí podél stěny (graf 3.2.13) potrubí je viditelné, že se smykové napětí na stěně prázdného potrubí příliš neliší od potrubí s použitím vestavby. V místě začátku vestavby, tj. 20D, hodnoty smykového napětí rostou do několiknásobně vyšších hodnot, svíslá osa je přizpůsobena aby byl graf co nejlépe čitelný, z toho důvodu nejsou hodnoty smykového napětí v místě vestavby viditelné.

### 3.2.4 Srovnání výsledků při $Re = 3000, 3800, 8000 - 3D$

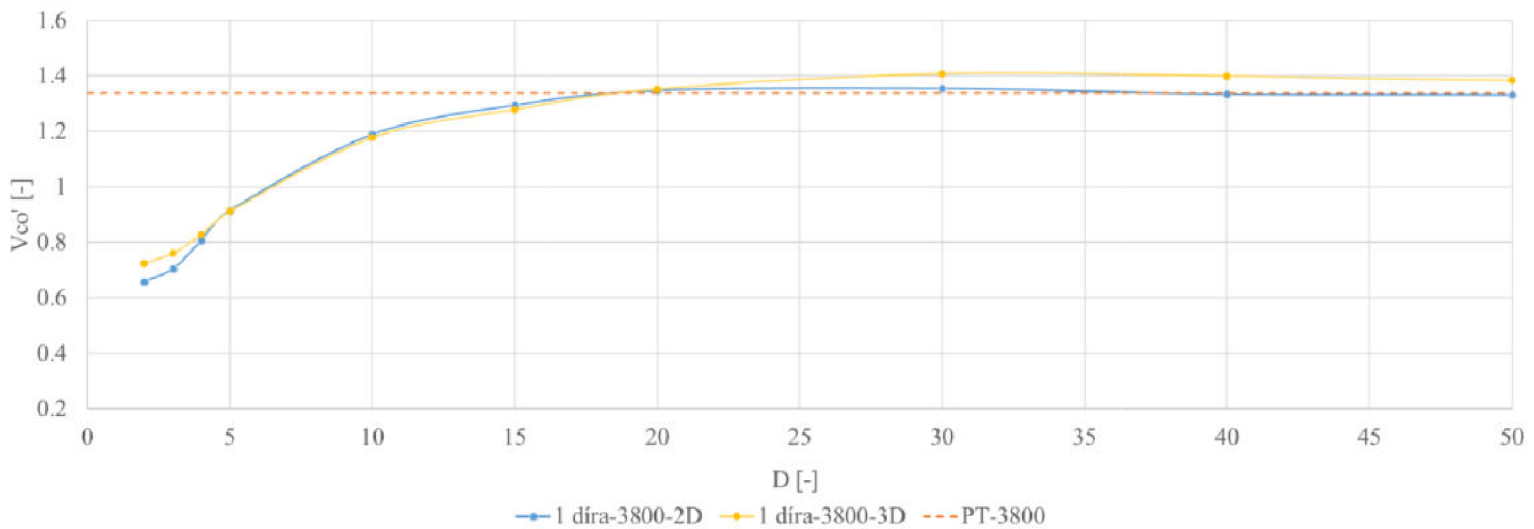
Na tomto grafu 3.2.14 jsou zobrazeny hodnoty normovaných rychlostí na ose potrubí pro dříve uvedené případy ( $Re = 3800$  – světle modrá křivka,  $Re = 8000$  – žlutá křivka,  $Re = 3000$  – tmavě modrá křivka). Hodnoty pochází z výpočtů provedených ve 3D. Čárkované čáry, zelená, šedá a oranžová, představují průběh rychlostí na ose trubky pro případy proudění bez použití vestavby při rychlostech odpovídajících  $Re = 3000$ ,  $Re = 3800$  a  $Re = 8000$ . V případě žluté křivky, odpovídající výpočtu s FMD při  $Re = 8000$ , je z počátku překvapivé, že v místě 3D za vestavbou došlo ještě k částečnému poklesu této rychlosti. Dále už nastává prudký růst a v místě zhruba 20D dochází k překročení  $v_{coTURB}$ . Rychlost se dále už příliš nemění, dojde pouze k pozvolnému poklesu v místech mezi 30D a 50D, od místa 50D se zdá být rychlost ustálená, důležitým faktorem je, že se ustálila nad hodnotou turbulentního proudění. V případě světle modré křivky jde o hodnoty z výpočtu při  $Re = 3800$ , zpočátku je vidět prudký růst rychlostí na ose potrubí, k překročení hodnoty nekontrolovaného proudění taktéž nastává v místě okolo 20D. V místě asi 30D dojde rychlost na maximální hodnotu a nastává pokles až do vzdálenosti 50D za FMD. Od tohoto bodu se zdá být rychlost ustálená, stále se však drží nad hodnotou nekontrolovaného proudění. Tmavě modrá křivka odpovídající proudění skrze vestavbu při  $Re = 3000$  téměř kopíruje světle modrou křivku. V místech okolo 30D je nejvyšší hodnota  $v_{co}$  a výrazně přesahuje hodnoty rychlostí proudění v prázdné trubce. Dále za vestavbou rychlosti  $v_{co}$  poklesnou, ale ustálí se nad hodnotami nekontrolovaného proudění.



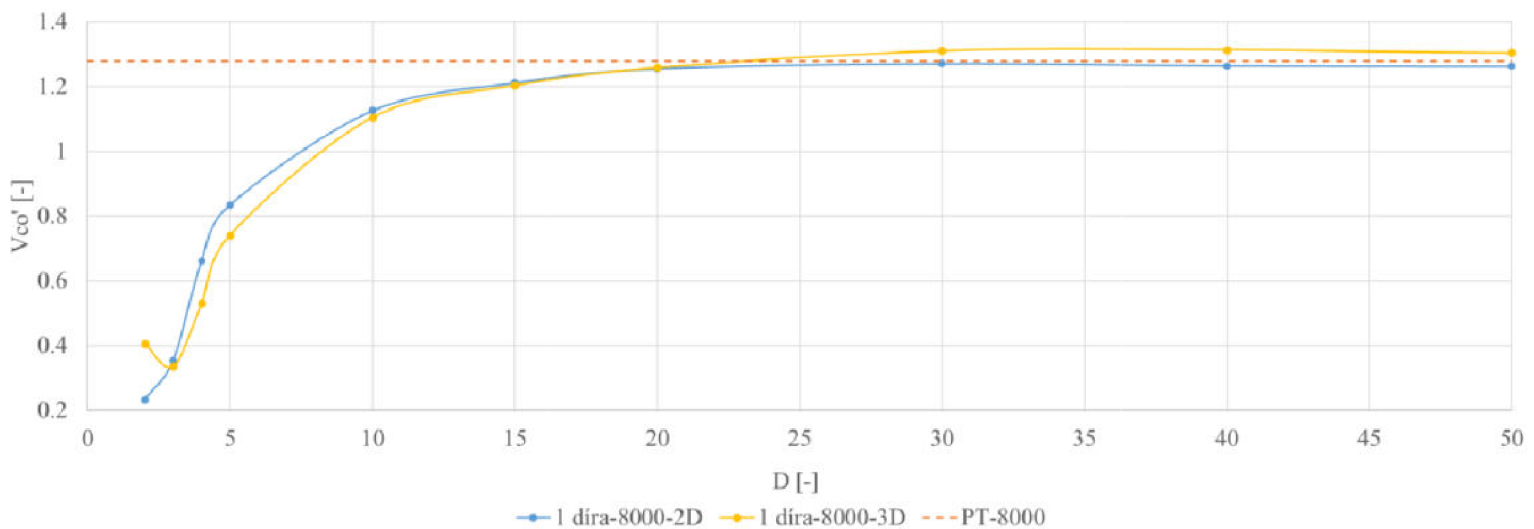
Graf 3.2.14 – Normovaná rychlost na ose potrubí –  $Re = 3800; 8000; 3000 - 3D$

### 3.3 Srovnání výsledků z výpočtů provedených na 2D a 3D modelu

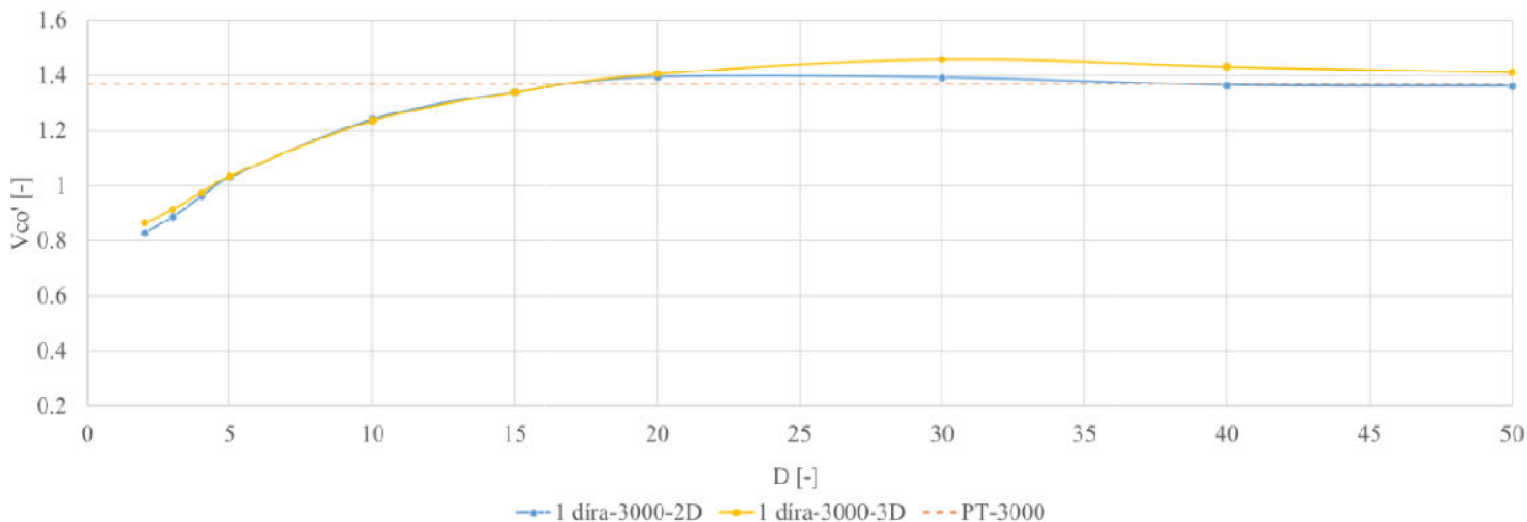
Pro srovnání výsledků vycházejících z výpočtů na 2D a 3D modelech jsou vhodné tyto dva grafy níže. Graf 3.3.1 porovnává oba případy pro rychlost odpovídající  $Re = 3800$ . Graf 3.3.2 zase porovnává případy pro vyšší rychlost, tedy pro  $Re = 8000$ . Poslední graf 3.3.3 dává do souvislosti oba případy výpočtů provedených na 2D a 3D modelech při rychlosti proudění odpovídající  $Re = 3000$ .



Graf 3.3.1 – Normovaná rychlost na ose potrubí –  $Re = 3800$  – srovnání 2D a 3D



Graf 3.3.2 – Normovaná rychlost na ose potrubí –  $Re = 8000$  – srovnání 2D a 3D



Graf 3.3.3 – Normovaná rychlost na ose potrubí –  $Re = 3000$  – srovnání 2D a 3D

U grafu 3.3.1 je vidět, že modrá křivka (řešení ve 2D) zpočátku začíná na menších rychlostech v ose potrubí, to tedy znamená, že rychlosti v blízkosti stěny potrubí musely být vyšší než u případu řešeného ve 3D. Od místa 4D za FMD jsou ale obě křivky téměř shodné a překrývají se až do bodu 20D. Zde nastává zlom, přičemž modrá křivka ztrácí rostoucí tendenci a už pouze kopíruje čárkovanou čáru představující rychlosti při proudění bez použití FMD. Žlutá křivka naopak ještě chvíli roste až do místa 30D, dostane se tak nad hodnoty nekontrolovaného proudění.

Graf 3.3.2 představující případ pro vyšší rychlosti proudění v trubce, má velmi podobný průběh jako graf předešlý. V prvním sledovaném místě za vestavbou 2D je hodnota normované rychlosti na ose nižší u modré křivky představující řešení na 2D modelu. To se ale velmi rychle změní a již v dalším sledovaném bodě je rychlost na ose nižší u křivky žluté. Dále křivky postupují velmi podobně, rychlosti prudce narůstají, a žlutá křivka se drží stále pod modrou. K protnutí křivek znovu dojde až někde v místech mezi 15 a 20D. Od tohoto místa přestává modrá křivka stoupat a kopíruje čárkovanou čáru představující nekontrolované proudění. Žlutá křivka protne i čárkovanou čáru a stoupne nad hodnoty nekontrolovaného proudění. Následuje ještě mírný pokles, ale pod hodnoty nekontrolovaného proudění už křivka nepoklesne a drží si stálý odstup.

Poslední graf 3.3.3 porovnává výsledky proudění skrze FMD při  $Re = 3000$ . Žlutá křivka znázorňuje výsledky výpočtu provedeného ve 3D, modrá křivka výsledky výpočtu ve 2D. V počátku grafu, kde 0 na vodorovné ose představuje konec vestavby, se obě křivky z velké části překrývají, tedy průběh rychlostí je stejný. Toto platí až do místa 20D za FMD, kde u modré křivky dochází k zastavení růstu rychlosti a následnému poklesu až na hodnoty rychlostí v prázdné trubce. Žlutá křivka v tomto místě má stále rostoucí tendenci a nejvyšší rychlost je v místě 30D za vestavbou, také následuje mírný pokles, ale hodnoty na které rychlost poklesne, jsou stále vyšší než v případě nekontrolovaného proudění.

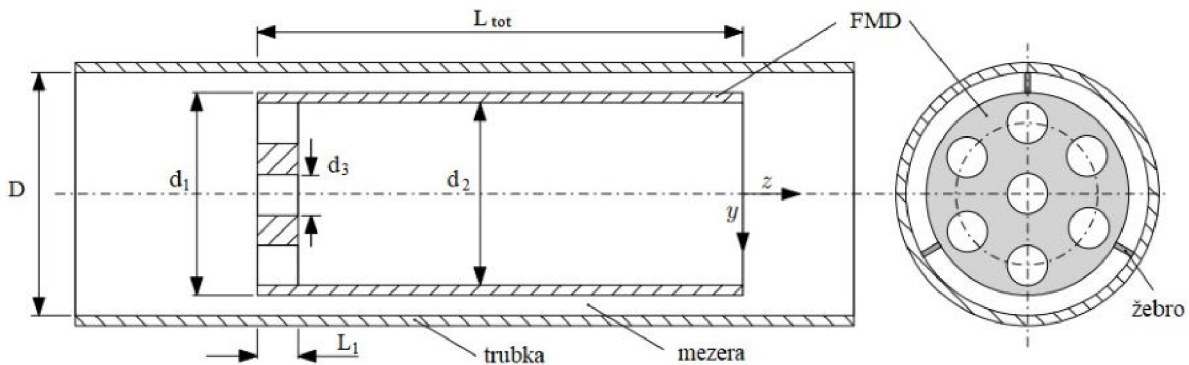
Z tohoto je tedy možné usoudit, že řešení ve 2D se nejspíš příliš nehodí pro řešení laminarizace, neboť zde nejsou ani viditelné náznaky toho, že by byl proud za vestavbou



některým pozitivně ovlivněn, kdežto u výsledků získaných z výpočtů řešených jako 3D tyto náznaky viditelné jsou a to např. v podobě překročení ustálených hodnot rychlostí na ose potrubí pro proudění v prázdné trubce a při použití vestavby, nebo při porovnání smykových napětí v případě pro  $Re = 8000$ , kde je rozdíl smykových napětí jasně viditelný u výpočtu na 3D modelu, kdežto u výpočtů provedených ve 2D u hodnot smykového napětí nejsou pozorovány žádné známky pozitivního vlivu vestavby.

### 3.4 Vestavba dle experimentu

V dalším kroku bylo provedeno několik výpočtů na FMD téměř identickém experimentu uvedeného v článku [4]. Rozměry vestavby zůstaly zachovány, jsou uvedeny na straně 34, společně s výsledky, které autoři experimentu zveřejnili. Na obrázku 3.4.1 je zobrazen náčrt FMD.



Obr. 3.4.1 – Náčrt vestavby – vestavba 7 děr

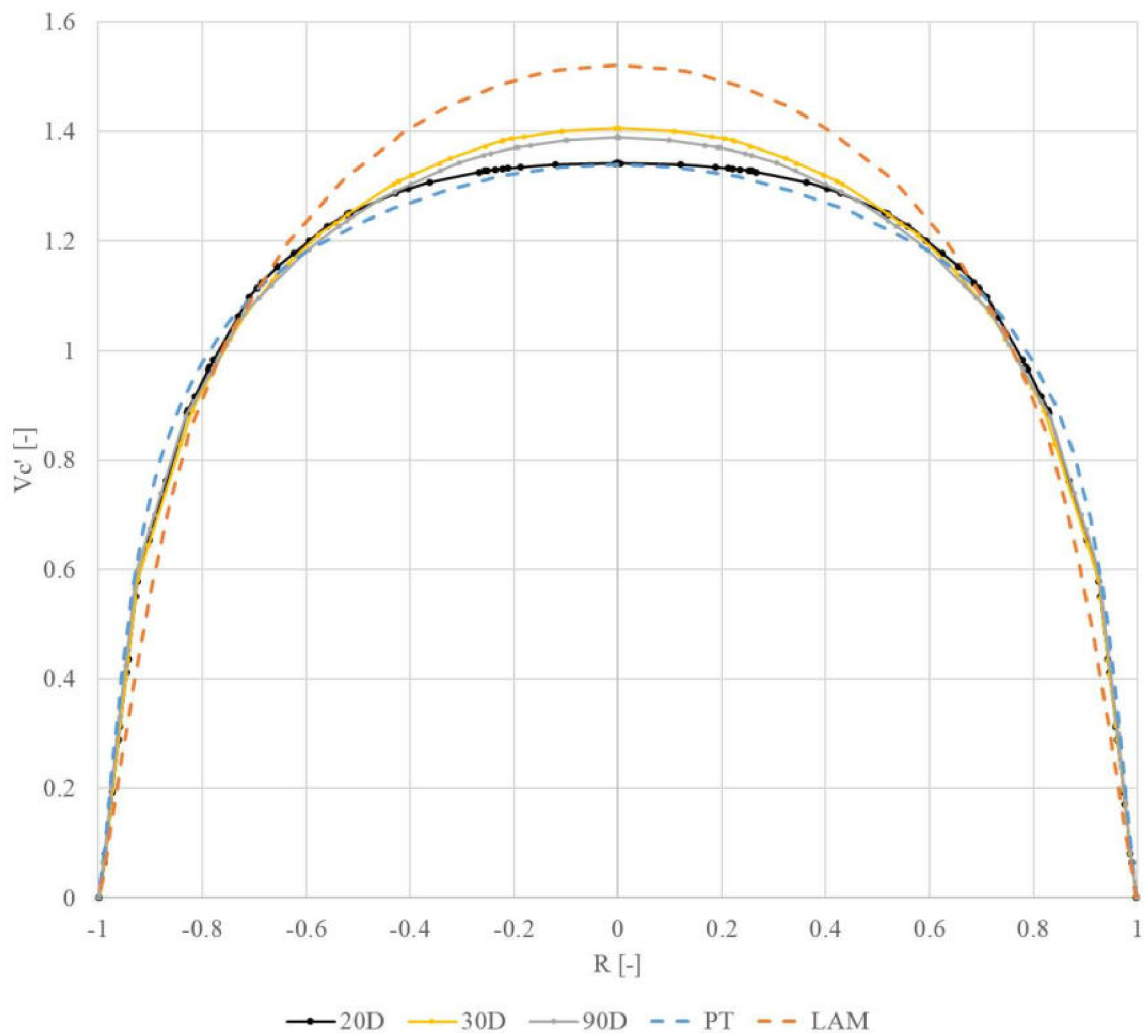
Byly vytvořeny tři varianty vestavby, u kterých je rozdílným rozměrem pouze průměr roztečné kružnice, na které leží šest rovnoměrně rozmístěných děr. V případě experimentu z článku [4] nebyla velikost roztečné kružnice přesně uvedena. První varianta tedy byla navržena s průměrem  $D_R = 22,7$  mm, v tomto případě jsou díry umístěny tak, že v místě vtoku do vestavby stěny šesti děr ležících na roztečné kružnici navazují na vnitřní stěnu vestavby. U dalších dvou variant jsou průměry roztečné kružnice rovny 18 mm a 15 mm.

Výpočty byly prováděny na 3D modelu, pro úsporu buněk obsažených ve výpočetní síti a výpočetního času byl výpočet proveden na 1/6 vestavby, zároveň byla zanedbána žebra držící vestavbu uprostřed potrubí. Model vestavby byl vytvořen v modeláři Inventor a převeden do ANSYS Workbench, kde pomocí modelu FMD byla vytvořena výpočetní doména, která představuje část trubky s vestavbou. Celková délka výpočetní domény je  $120D$ , v tomto případě kdy  $D = 30$  mm je to délka 3,6 m. Prostor před vestavbou je o délce  $20D$  následuje 200 mm dlouhá vestavba a za vestavbou tedy zbývá prostor o délce zhruba  $93D$ . Toto by mělo být dostačující pro vývoj proudění za vestavbou a zároveň to není omezující délka, co se výpočetního času týče.

### 3.4.1 Výsledky – vestavba 7 děr

V této části jsou uvedeny výsledky výpočtů provedených na vestavbě obdobné jako v případě experimentu uvedeného v článku [4]. Na této vestavbě je umístěno sedm děr na jejím čele. Výpočty byly provedeny pro tři různé variace vestaveb, u kterých se měnil pouze průměr roztečné kružnice, na které je rozmístěno šest děr. Každá z vestaveb byla podrobena výpočtu s rychlostí proudění odpovídající  $Re = 3800$  a  $8000$ .

Uvedené výsledky platí pro případy, kdy byly hodnoty středních rychlostí proudění odpovídající Reynoldsovu číslu  $Re = 3800$ . V případě experimentu z článku [4] se jedná o hodnotu  $Re$ , kdy ještě bylo dosaženo úplné laminarizace pomocí vestavby s průměrem roztečné kružnice  $D_R = 22,7$  mm. Vyšší odzkoušená hodnota  $Re = 4500$  již nebyla natolik pozitivně ovlivněna pomocí vestavby, aby došlo k úplné laminarizaci a po určitém úseku potrubí se zpět vyvinula turbulence.

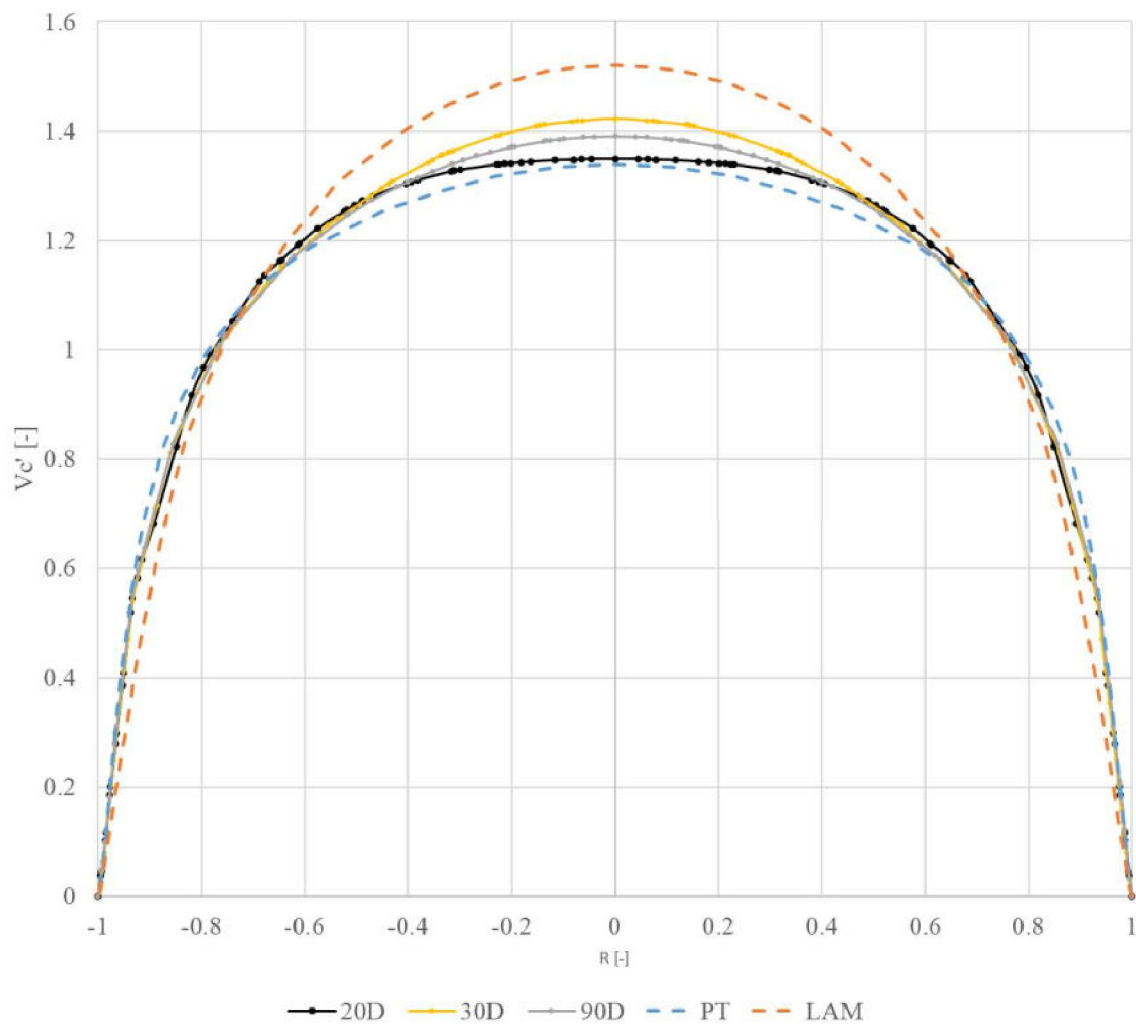


Graf 3.4.2 - Rychlostní profily –  $D_R = 22,7$  mm – srovnání s LAM

Příložený graf 3.4.2 zobrazuje normované rychlostní profily za FMD pro případ vestavby s průměrem  $D_R = 22,7$  mm. Rychlostní profil značený modrou čárkovanou čarou označený PT představuje profil nekontrolovaného proudění získaný výpočtem při rychlosti

odpovídající  $Re = 3800$ , tedy profil turbulentního proudění. Pro srovnání je v grafu uveden také rychlostní profil značeným jako LAM, vykreslený oranžovou čárkovanou čarou, a ten představuje naopak průběh laminárního proudění. Tyto dva profily (PT a LAM) jsou vykresleny i v následujících grafech pro lepší porovnání průběhu rychlostí za FMD.

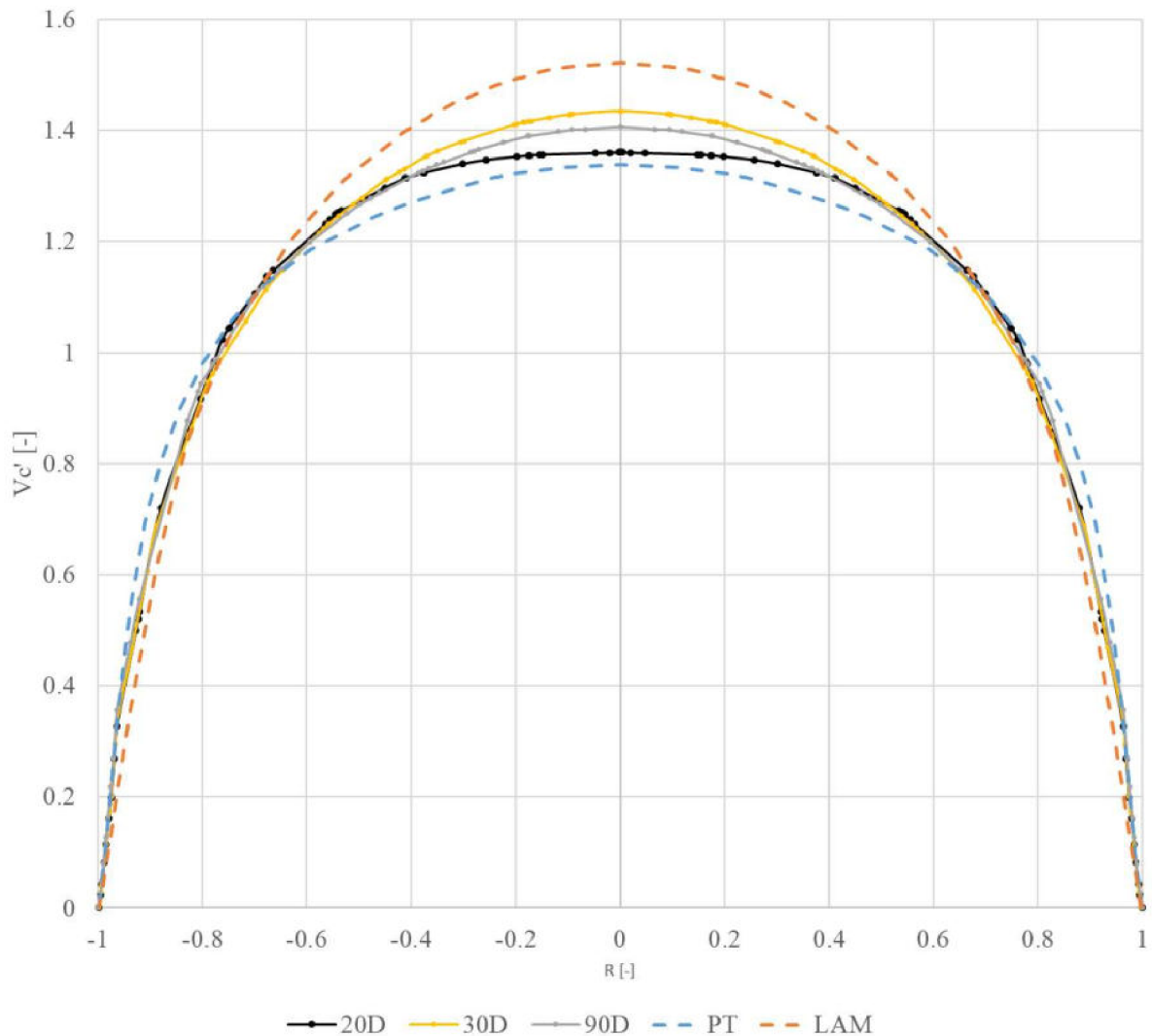
Také jsou zde vykresleny tři křivky spojitou čarou. Rychlostní profil značen černou barvou a popiskem 20D představuje RP získaný z místa za vestavbou ve vzdálenosti 20D, vzdálenost je měřena od konce FMD. Rychlostní profil za FMD postupně přechází z RP ve tvaru písmene M, podobně jako v předešlých případech např. graf 3.2.10 na straně 59, a přibližuje se tvaru vyvinutého rychlostního profilu, ať už turbulentního nebo laminárního proudění. V tomto případě RP 20D je hodnota rychlosti na ose potrubí téměř totožná s rychlostí nekontrolovaného proudění. Profil se dále vyvíjí a v místě 30D za vestavbou dosahuje maximální hodnoty rychlosti na ose potrubí  $v_{co}' = 1,405$ . Následuje mírný pokles  $v_{co}'$  v místě 90D na hodnotu 1,389. Tento pokles proběhne z velké části v místech mezi 30D až 50D, dále je už rychlost ustálená. Hodnota  $v_{co}'$  pro simulovaný laminární profil je 1,521 a v případě turbulentního proudění při rychlosti proudění  $Re = 3800$  je  $v_{co}' = 1,339$ . Hodnota rychlosti na ose potrubí pro ustálené proudění za FMD se značně liší od hodnot získaných z proudění prázdným potrubím, ale zdaleka nedosahuje hodnot laminárního proudění.



Graf 3.4.3 - Rychlostní profily – DR = 18 mm – srovnání s LAM

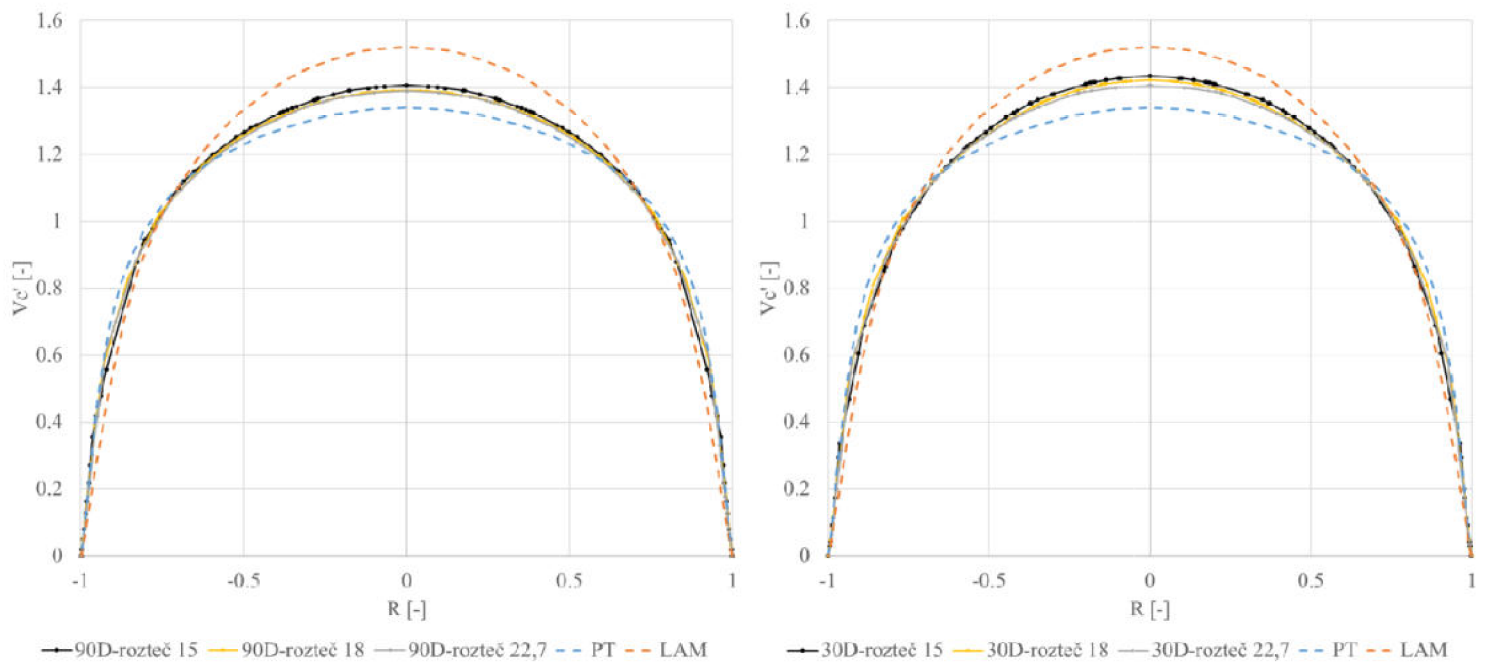


U dalšího grafu 3.4.3 platí vše stejně jako grafu předešlého, jedná se ale o normované rychlostní profily pro případ, kdy díry leží na roztečné kružnici o průměru  $D_R = 18$  mm. Na první pohled je graf téměř totožný, hodnoty normovaných rychlostí na ose potrubí jsou velmi blízké předešlému případu. V místě  $30D$  za vestavbou je taktéž nejvyšší dosažená rychlost na ose potrubí, toto obecně platí téměř pro všechny provedené výpočty. V tomto případě to je hodnota  $v_{co}' = 1,423$  a pro vzdálenost  $90D$  za vestavbou je hodnota  $v_{co}' = 1,391$ . Je zde tedy mírné zvýšení obou rychlostí.



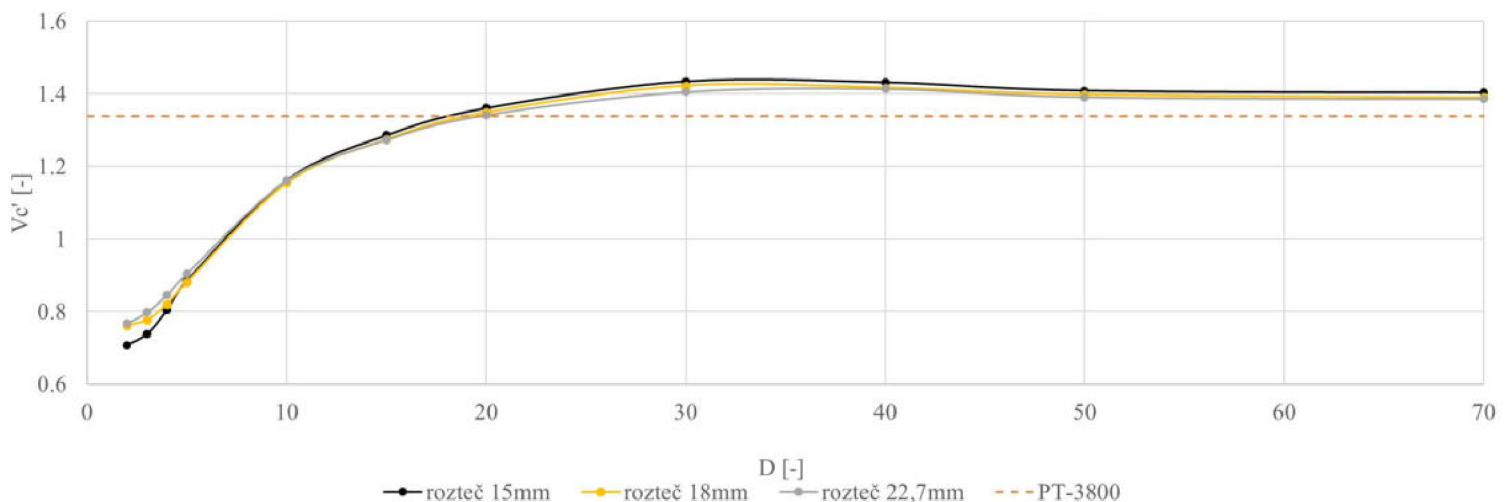
**Graf 3.4.4 - Rychlostní profily –  $D_R = 15$  mm – srovnání s LAM**

Pro graf 3.4.4 platí to stejné jako pro předešlé dva grafy a tento je pro případ roztečné kružnice s rozměrem 15 mm. V tomto případě je už i rychlost na ose potrubí v místě  $20D$  vzdálená od hodnot nekontrovaného proudění a nepřekrývá se s touto křivkou. Hodnota  $v_{co}'$  v místě  $30D$  je 1,434, následně hodnota klesá až na ustálenou hodnotu v místě  $90D$  kde  $v_{co}' = 1,406$ .



**Graf 3.4.5** – RP – různé rozteče – vzdálenost 90D    **Graf 3.4.6** – RP – různé rozteče – vzdálenost 30D

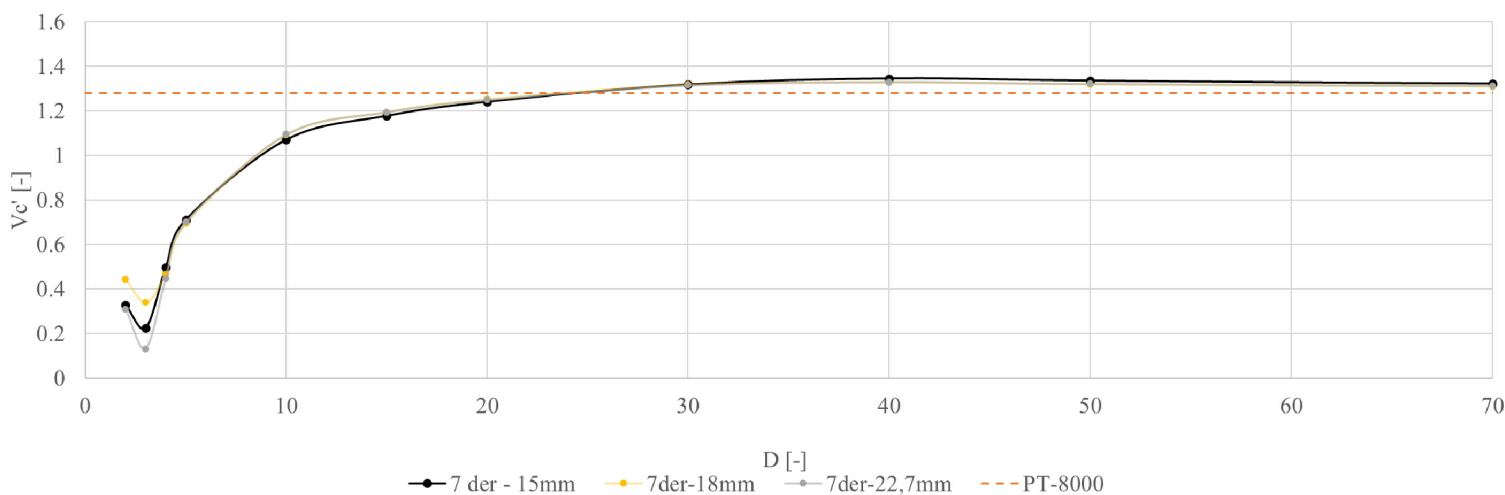
Grafy 3.4.5 a 3.4.6 zobrazují RP v určitých místech pro všechny tři verze FMD s různými průměry roztečné kružnice. Graf napravo obsahuje rychlostní profily z míst 30D za vestavbami a graf nalevo zase z míst 90D za vestavbami, kde je rychlost ustálená. Pro oba grafy platí, že křivka černé barvy odpovídá případu vestavby s nejmenším průměrem roztečné kružnice a to je 15 mm, profil žluté barvy odpovídá vestavbě s průměrem roztečné kružnice 18mm a profil šedé barvy odpovídá vestavbě s  $D_R = 22,7$  mm. Na obou grafech je jasné viditelné, že RP značený černou barvou dosahuje nejvyšších hodnot. O něco menších hodnot dosahuje RP žluté barvy a nejnižších hodnot RP šedé barvy. Dá se tedy říct, že v těchto třech případech hodnoty rychlostí klesají se zvětšujícím se průměrem roztečné kružnice resp. nejmenší průměr roztečné kružnice, je neúčinnější z tohoto pohledu.



**Graf 3.4.7** – Normované rychlosti na osách potrubí – 3 různé průměry  $D_R$  –  $Re = 3800$

V grafu 3.4.7 je znázorněn průběh rychlostí na osách potrubí při použité jednotlivých modifikací vestavby se sedmi na čele vestavby. Křivka značená černou barvou odpovídá vestavbě s průměrem roztečné kružnice  $D_R = 15$  mm, žlutá platí pro  $D_R = 18$  mm atd. V grafu je také oranžová čárkovaná čára představující hodnotu rychlosti v ose potrubí při vyvinutém turbulentním proudění bez použití vestavby při  $Re = 3800$ . Vodorovná osa představuje délku potrubí za vestavbou a je v rozmezí od nuly do  $70D$ , hodnoty rychlostí na ose ve vzdálenosti  $90D$  jsou téměř totožné jako v místech  $70D$  a tak nejsou v grafu uvedeny, aby byl graf přehlednější.

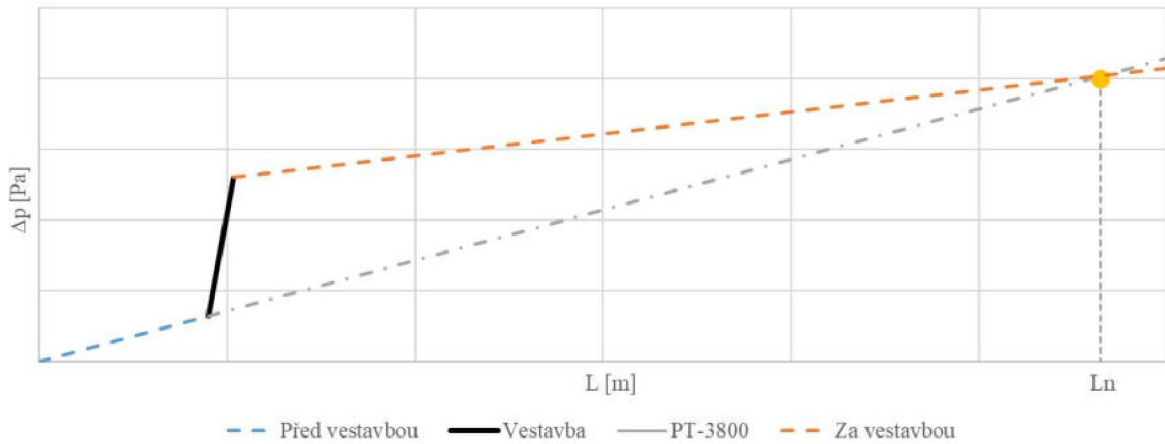
Křivky se v několika místech kříží a překrývají, je ale zajímavé, že v těsné blízkosti za FMD je pro případ černé křivky, tedy křivky odpovídající nejmenšímu průměru roztečné kružnice, hodnota rychlosti na ose potrubí nejmenší. Je tomu tak jen prvních několik délek  $D$  za vestavbou a po  $5D$  se černá křivka sbíhá se žlutou. Nejnižší rychlost v ose potrubí tak znamená nejvyšší rychlost v blízkosti stěny potrubí, z toho plyne, že v těchto případech je účinnější zvýšit rychlost v místech blízko stěny potrubí a docílit tak silnějšího potlačení turbulence. Alespoň v těchto třech případech platí, že rychlejší proudění v blízkosti stěny znamená silnější potlačení turbulence, je ale otázkou zda další urychlení proudění blízko stěny potrubí přinese pozitivní účinek. Dále se všechny tři křivky sbíhají a navzájem překrývají. V místě  $30D$  je možné vidět rozdíl rychlostí u jednotlivých vestaveb, černá křivka dosahuje nejvyšší hodnoty a šedá naopak hodnoty nejnižší, tento fakt se nezmění ani po ustálení rychlostí ve vzdálenosti  $50D$  a dále za FMD.



**Graf 3.4.8** - Normované rychlosti na osách potrubí – 3 různé průměry  $D_R$  –  $Re = 8000$

Pro graf 3.4.8 platí vše stejně jako v případě grafu 3.4.7, výsledné hodnoty ale odpovídají proudění při  $Re = 8000$ . Při této rychlosti proudění jsou výsledné křivky pro jednotlivé FMD velmi podobné a po většinu průběhu se překrývají. V počátku grafu je ale zcela zřejmé, která vestavba zapříčiní nejnižší rychlosti na ose potrubí v místech těsně za vestavbou. Nejnižších hodnot dosahuje šedá křivka, která následně od míst asi  $5D$  za vestavbou zcela kopíruje žlutou křivku. V místech  $70D$  za FMD dosahují obě tyto křivky (šedá a žlutá) totožných hodnot. Nepatrně odlišná je křivka černá, u té jsou hodnoty rychlosti na ose potrubí v těsné blízkosti za vestavbou někde uprostřed mezi hodnotami šedé a žluté křivky. V místech asi  $40D$ , kde jsou dosaženy maximální rychlosti na osách potrubí u všech

tří verzí vestavby, je na tom nejlépe černá křivka, tedy FMD s průměrem roztečné kružnice 15 mm, stejně jako v předešlém případě, kde byly vestavby posuzovány při rychlosti proudění  $Re = 3800$ . Tato vestavba je neúčinnější i ve větší vzdálenosti, v místech  $70D$  dosahuje o něco málo vyšších rychlostí.



**Graf 3.4.9** – Průběh tlakových ztrát podél potrubí

Průběh tlakových ztrát podél potrubí je předním ukazatelem, jestli se podařilo docílit energetické úspory pomocí použití vestavby v potrubí, či nikoliv. Graf 3.4.9 představuje závislost tlakové ztráty  $\Delta p$  na délce potrubí  $L$ . Část potrubí před vestavbou je značena modrou čárkovanou čarou. Tlaková ztráta na vestavbě může být velmi značná, tuto ztrátu značí tlustá černá čára. Oranžová čárkovaná čára znázorňuje průběh tlakové ztráty za vestavbou a šedá čerchovaná čára znázorňuje průběh tlakové ztráty nekontrolovaného proudění. Ztráty za vestavbou by měly být oproti proudění prázdným potrubím nižší, proto je i sklon oranžové čáry menší v porovnání s čarou znázorňující proudění prázdným potrubím. Žlutý bod v místě, kde se protínají obě tyto křivky, značí minimální vzdálenost od počátku vestavby, kterou musí pozitivně ovlivněné proudění překonat k tomu, aby dorovnálo ztrátu způsobenou samotnou vestavbou, která se od tohoto místa stává užitečnou. Vzdálenost  $L_n$  je měřena od začátku vestavby. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty získané z výpočtů provedených na třech různých variantách vestavby s rozdílným průměrem roztečné kružnice  $D_R$ , výsledky platí pro proudění o střední rychlosti odpovídající  $Re = 3800$ .

|                                | $\Delta p_v$ [Pa] | $z_m$ [Pa/m] | $L_n$ [m] |
|--------------------------------|-------------------|--------------|-----------|
| Vestavba - $D_R=15\text{mm}$   | 730               | 10,59        | 549       |
| Vestavba - $D_R=18\text{mm}$   | 783               | 10,68        | 632       |
| Vestavba - $D_R=22,7\text{mm}$ | 847               | 10,46        | 580       |
| Prázdné potrubí                | -                 | 11,92        | -         |

**Tab. 3.4.10** – Tlakové ztráty – vestavby s různou roztečí –  $Re = 3800$

$$L_n = [\Delta p_v : (z_{mx} - z_{mv})] \quad (22)$$

$D$  – průměr potrubí [m]

$L_n$  – délka návratnosti [m]

$\Delta p_v$  – tlaková ztráta na vestavbě [Pa]

$z_m$  – tlaková ztráta vztažena na jeden metr délky potrubí [Pa/m]

$z_{mx}$  – tlaková ztráta vztažena na jeden metr délky potrubí [Pa/m]

$z_{mv}$  – tlaková ztráta vztažena na jeden metr délky potrubí při proudění za vestavbou [Pa/m]

V tabulce jsou uvedeny hodnoty tlakové ztráty na jednotlivých vestavbách  $\Delta p_v$  a hodnoty tlakové ztráty vztažené na jeden metr potrubí pro proudění za vestavbou a také pro případ prázdné trubky  $\Delta p_m$ . V posledním sloupci jsou uvedeny dopočtené hodnoty délky návratnosti  $L_n$  tj. délky, po kterou si musí proudění za vestavbou udržet svoji získanou vlastnost, kdy jsou délkové ztráty nižší než při proudění potrubím bez vestavby. Tlaková ztráta na vestavbě je vždy měřena jako rozdíl tlaků v místě 2D před začátkem vestavby a v místě 3D za koncem vestavby.

Nejvyšší tlakovou ztrátu představuje vestavba s průměrem roztečné kružnice  $D_R = 22,7$  mm. Ta ale naopak má nejlepší výsledek, co se týče délkové ztráty při proudění za ní. Nejnižší tlakovou ztrátu způsobuje vestavba s  $D_R = 15$  mm, délková ztráta se od předešlé vestavby příliš neliší a tak ve výsledku je tato vestavba z pohledu návratnosti nejlepší. Nejhůře v délkové návratnosti dopadla vestavba s  $D_R = 18$  mm, způsobená tlaková ztráta není sice nejvyšší, ale délkové ztráty za ní už nejvyšší jsou a tak ve výsledku je i délková návratnost nejhorší.

### 3.4.2 Vyhodnocení

Při hodnotách  $Re = 3800$  platilo, že čím nižších rychlostí na ose potrubí těsně za vestavbou daná vestavba dosáhla, tím vyšších hodnot dosahovala na konci výpočetní domény (v místech ustáleného proudění). Nejlepší variantou tak byla vestavba s průměrem roztečné kružnice  $D_R = 15$  mm. Při porovnávání při vyšší rychlosti proudění, kde bylo  $Re = 8000$ , tato vestavba nedosahovala nejnižších rychlostí těsně za FMD, její hodnoty byly někde uprostřed mezi dalšími dvěma variantami. Ovšem nejvyšších hodnot rychlostí v místech 40D za FMD opět dosáhla varianta s  $D_R = 15$  mm a i výsledné hodnoty ustáleného proudění v místech 70D a dále za vestavbou byly nejvyšší u této varianty. Z těchto výsledků, je tedy možné usoudit, že pro různé rychlosti proudění můžou být účinné různé rozměry dané vestavby. Dosažení příliš nízké rychlosti v místech blízkých stěně potrubí přímo za vestavbou, kde rychlostní profil má tvar písmene M, může mít za následek minimální ovlivnění proudění za vestavbou, nebo vůbec žádné. Zřejmě tedy záleží i na hodnotách rychlostí na vrcholcích pomyslného písmene M. Při proudění rychlostí  $Re = 8000$  tedy nejspíš došlo k tomu, že rychlost na ose potrubí těsně za vestavbou s průměrem  $D_R = 18$  mm došlo k nedostatečnému zrychlení proudění v těchto místech, naopak u vestavby s průměrem  $D_R = 22,7$  mm došlo až k přílišnému urychlení. Z těchto variant se tak zdá být varianta s  $D_R = 15$  mm nejlepší co se týče potlačení turbulence minimálně v těchto dvou případech proudění ( $Re = 3800$  a  $Re = 8000$ ).

Tlakové ztráty za jednotlivými variantami se liší jen minimálně, značně se však liší hodnoty ztrát, které vznikly přímo na vestavbách. Ztráty vzniklé na vestavbě mohou hrát velkou roli v rozhodování, zda vestavbu pro úsporu energie použít, nebo se její použití nevyplatí. Pokud by byla vestavba navržena tak, že ztráty na samotné vestavbě by byly co nejmenší, mohlo by její použití znamenat zisk energie už po velmi krátké vzdálenosti proudění za FMD a tak by bylo využití v praxi mnohem reálnější. Ze tří variant FMD s různým průměrem roztečné kružnice dopadla i v tomto případě nejlépe vestavba s průměrem  $D_R = 15$  mm.

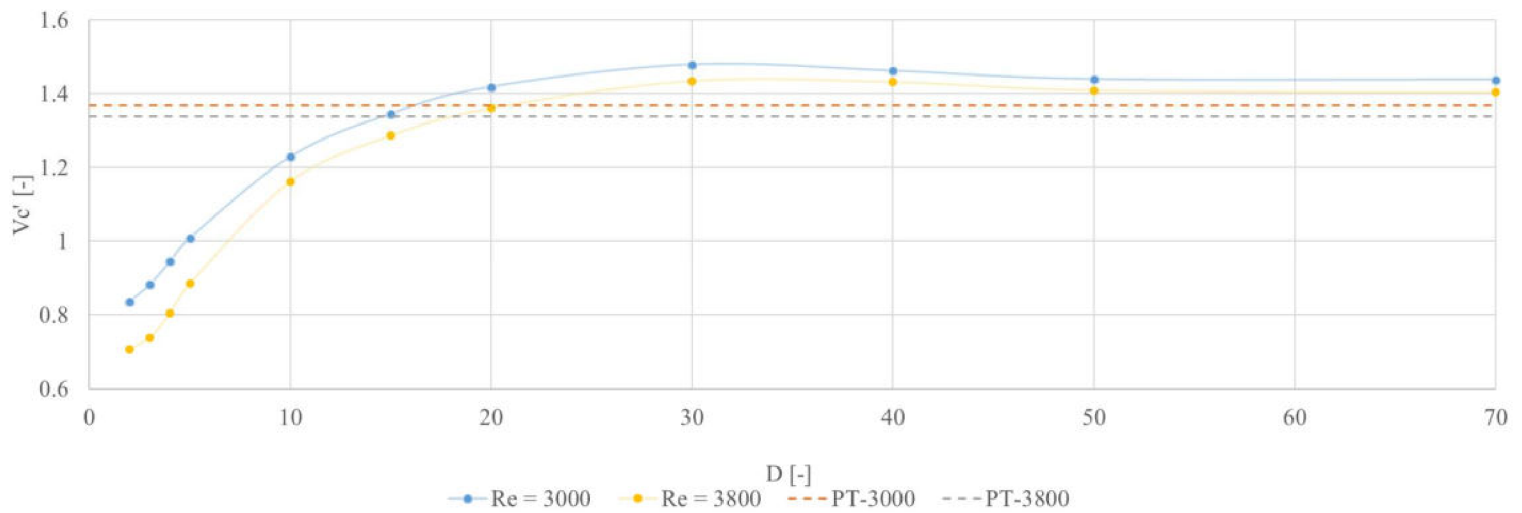
### 3.5 Vestavba s průměrem roztečné kružnice $D_R = 15$ mm

Z předešlých výsledků bylo usouzeno, že výpočty pro další rychlosti proudění (Reynoldsova čísla) skrze vestavbu budou prováděny pouze na vestavbě s průměrem roztečné kružnice  $D_R = 15$  mm. Byly tedy provedeny výpočty s touto vestavbou pro rychlosti odpovídající  $Re = 3000, 3800, 6000, 8000, 12000$  a  $20000$ . Nejnižší hodnota  $Re = 3000$  byla zvolena, aby bylo ověřeno proudění při nízkých  $Re$  v přechodné oblasti, další rychlost odpovídající  $Re = 3800$  byla v experimentu [4] označena jako hraniční, kdy při této rychlosti došlo k úplné laminarizaci, při vyšší rychlosti už bylo docíleno pouze částečné laminarizace.  $Re = 6000$  je někdy uváděno jako horní hranice přechodné oblasti proudění, a proto byla zvolena i tato rychlost. Hodnota  $Re = 8000$  je tedy někde na začátku turbulentní oblasti proudění a proto byl výpočet proveden i pro tuto rychlost proudění, následující dvě rychlosti při  $Re = 12\ 000$  a  $Re = 20\ 000$  jsou už poněkud vyšší hodnoty a byly zvoleny proto, aby byla možnost porovnat chování i při vyšších Reynoldsových číslech, stále to však nejsou hodnoty, kterých je dosahováno v praktických aplikacích.

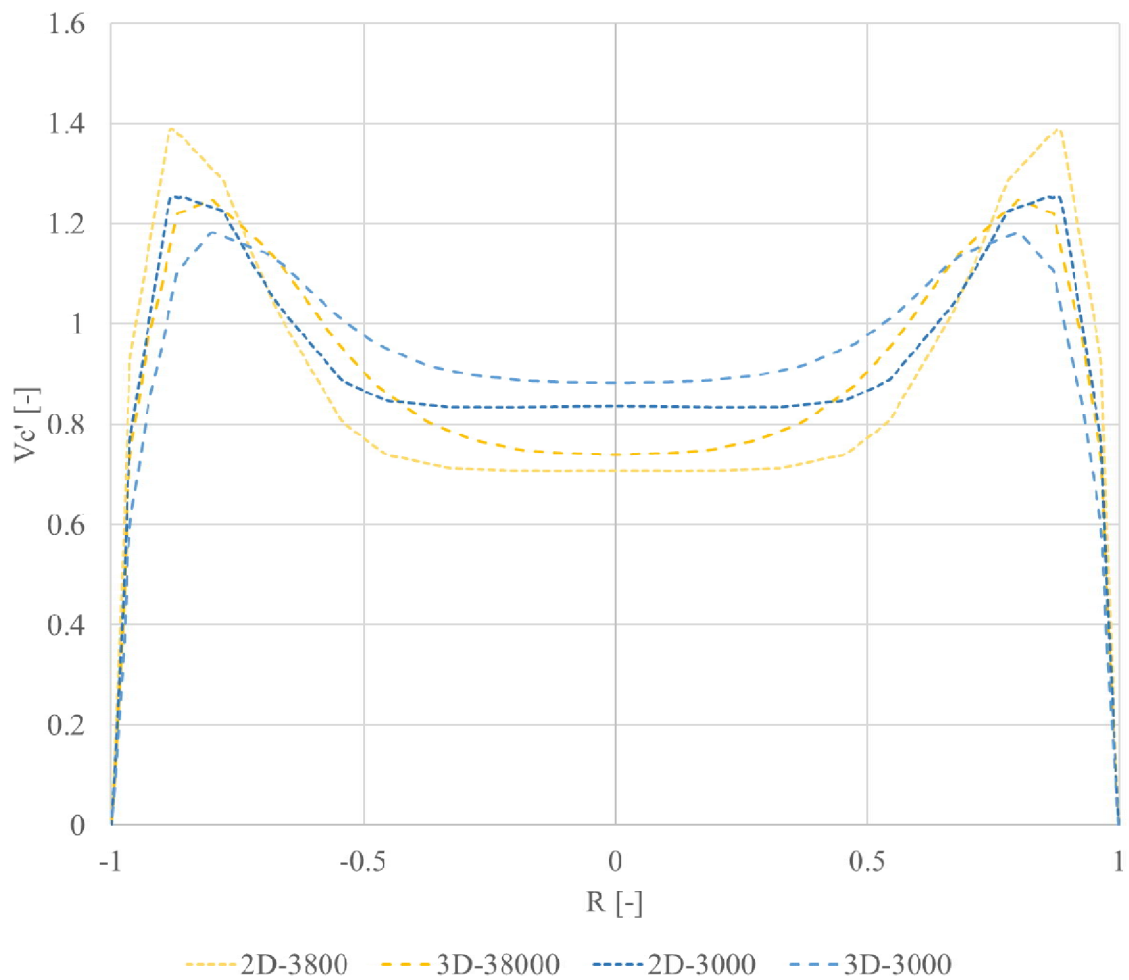
Zde jsou uvedeny grafy znázorňující průběh normovaných rychlostí na osách potrubí, na každém z grafů jsou dvě křivky, každá z křivek představuje výsledky proudění při určité rychlosti, v popiskách grafů jsou vždy uvedeny hodnoty Reynoldsova čísla, které náleží dané křivce. Čárkované přímkové v grafech vždy představují hodnoty rychlostí na osách potrubí již vyvinutého nekontrolovaného proudění pro dané Reynoldsovo číslo (např. PT – 3000 = > nekontrolované proudění při  $Re = 3000$  atd.).

Graf 3.5.1 uvádí výsledky výpočtů pro  $Re = 3000$  a  $3800$ . V místech těsně za vestavbou je průběh obou křivek velmi podobný, při vyšší střední rychlosti proudění jsou dosahovány nižší hodnoty rychlostí na ose, to také znamená, že rychlosti v blízkosti stěny potrubí jsou v případě  $Re = 3800$  vyšší. Na grafu 3.5.2 jsou zobrazeny rychlostní profily v místech 2D a 3D za vestavbou pro tyto dvě rychlosti proudění. Je tady vidět, že tomu tak opravdu je, tedy že v případě  $Re = 3800$  jsou rychlosti blízko u stěny potrubí vyšší než v případě proudění při  $Re = 3000$ . Průběh křivek v grafu ZCV je velmi podobný i dále za vestavbou, v místech mezi 15-20D hodnoty rychlostí na osách se potkávají s hodnotami nekontrolovaného proudění. V místě 30D za FMD je dosaženo maximálních rychlostí (v případě  $Re = 3800$  v místě přibližně 35D). Dále obě křivky klesají, v místech 50D za vestavbou se pokles zastaví a dále už jsou rychlosti stále.



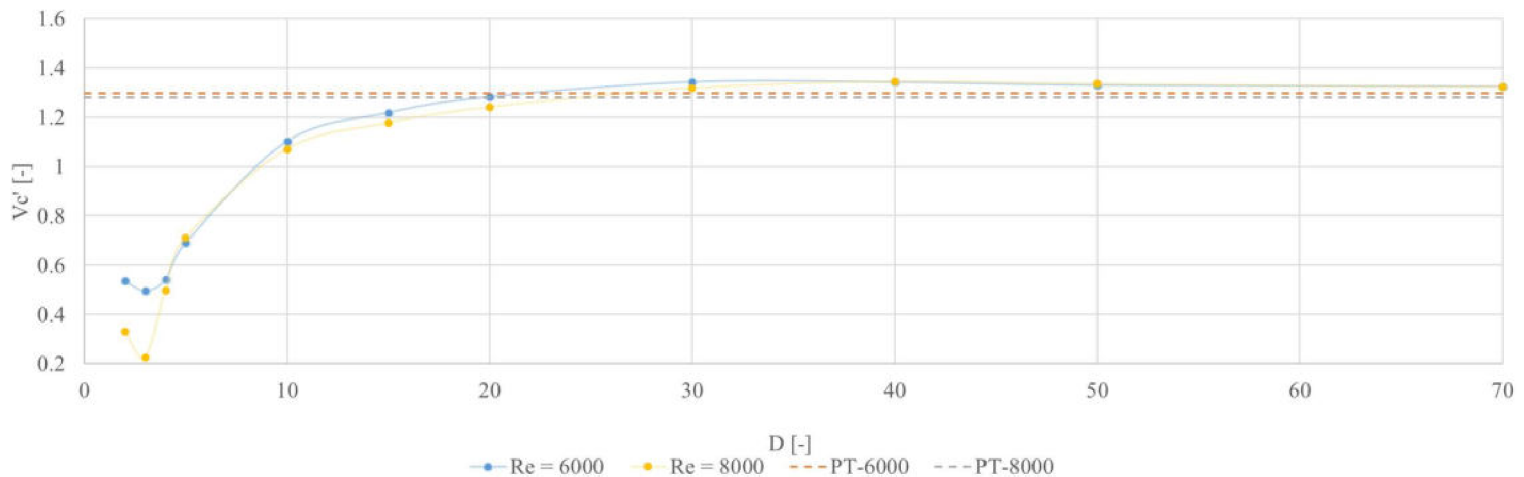


**Graf 3.5.1** - Normované rychlosti na osách potrubí – Re = 3000/3800



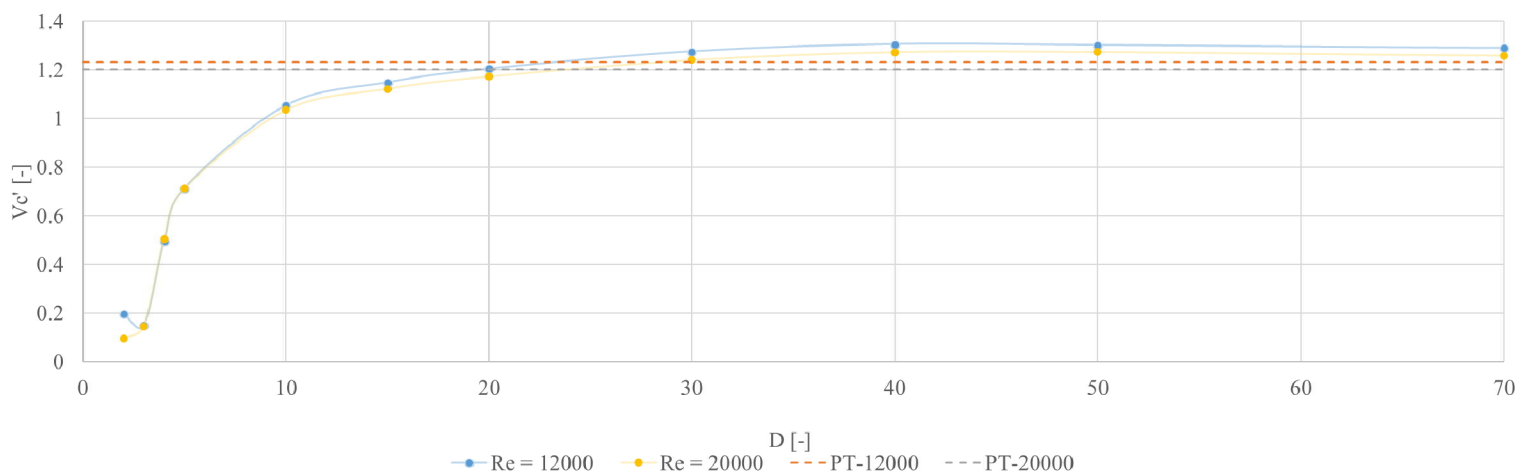
**Graf 3.5.2** – Normované rychlostní profily – Re = 3000/3800

V případech vyšších rychlostí proudění odpovídajících Reynoldsovým číslům 6000 a 8000 (graf 3.5.3) je průběh  $v_{co}'$  podél potrubí odlišný oproti předešlým případům. Zajímavé je, že vestavba způsobuje těsně za ní to, že v místě 2D je rychlost na ose potrubí vyšší než v místě 3D, dále už rychlosti stoupají podobně jako v předešlém případě, rozdílem však zde je, že při  $Re = 8000$  dosáhne  $v_{co}'$  v místě 5D za vestavbou vyšší hodnoty než při proudění  $Re = 6000$ . V místě 30D se modrá křivka dostane na své maximum, dále jen lehce poklesne a poté už se ustálí. V případě žluté křivky, tedy proudění při  $Re = 8000$ , je maximum  $v_{co}'$  dosaženo až v místě asi 40D a je zde dosaženo téměř stejných hodnot  $v_{co}'$  jako u modré křivky. Na žluté křivce není znatelný žádný další růst ani pokles.



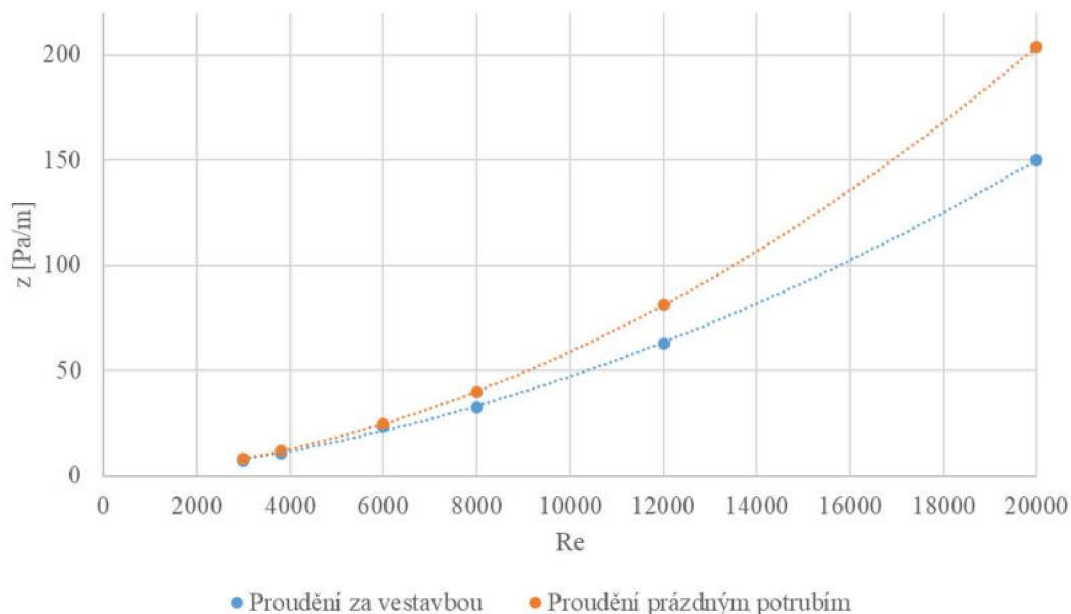
Graf 3.5.3 - Normované rychlosti na osách potrubí – Re = 6000/8000

Graf 3.5.4 zobrazuje křivky průběhu  $v_{co}'$  pro případy proudění při  $Re = 12000$  a  $20000$ . V případě modré křivky (náležící proudění při  $Re = 12000$ ) se v počátku sledované oblasti těsně za vestavbou objevuje stejný jev jako u předešlých nižší  $Re$ , tedy že v místě 2D za vestavbou je  $v_{co}'$  menší než v místě 3D. Žlutá křivka se v těchto místech podobá naopak spíše případům velmi nízkých  $Re$  (3000 a 3800). Každopádně od místa 3D se obě křivky překrývají a je tomu tak až do míst 10D, kde modrá křivka má silnější tendenci stoupat. Obě křivky dosáhnou svého maxima v místě asi 40D za vestavbou a dále se už dosažené hodnoty  $v_{co}'$  nijak zásadně nemění.



Graf 3.5.4 - Normované rychlosti na osách potrubí – Re = 12000/20000





**Graf 3.5.5 – Ztráty při proudění v závislosti na Re**

V grafu 3.5.5 je naznačen průběh tlakových ztrát  $z$  vztažených na jeden metr délky potrubí, v závislosti na Reynoldsově čísle resp. na rychlosti proudění. Oranžová křivka vyznačuje tento průběh při proudění prázdným potrubím bez použití vestavby, modrá křivka naopak znázorňuje tento průběh při proudění s použitím FMD. Hodnoty vyznačené body byly vždy odečteny z míst, kde bylo proudění již uklidněné, v případech s použitou vestavbou byly tyto hodnoty odečteny v místech 70D za vestavbou a dále. Z grafu je vidět, že čím vyšší je  $Re$  daného proudění, tím větší je rozdíl ztrát mezi potrubím s vestavbou a bez ní.

| Re    | $\Delta p_v$ [Pa] | $z_{mv}$ [Pa/m] | $z_{mx}$ [Pa/m] | $U_c$ [%] | $L_n$ [m] |
|-------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------|-----------|
| 3000  | 505               | 7,46            | 8,21            | 9,1       | 673       |
| 3800  | 730               | 10,59           | 11,92           | 11,2      | 549       |
| 6000  | 1535              | 23,29           | 25,00           | 6,8       | 898       |
| 8000  | 2474              | 32,76           | 40,13           | 18,4      | 336       |
| 12000 | 5094              | 63,07           | 81,20           | 22,3      | 281       |
| 20000 | 15250             | 150,28          | 204,00          | 26,3      | 284       |

**Tab. 3.5.6 – Ztráty v potrubí při různých  $Re$  – vestavba s  $D_R = 15$  mm**

$\Delta p_v$  – tlaková ztráta na vestavbě [Pa]

$z_{mx}$  – tlaková ztráta vztažena na jeden metr délky potrubí [Pa/m]

$z_{mv}$  – tlaková ztráta vztažena na jeden metr délky potrubí s použitím vestavby [Pa/m]

$U_c$  – úspora tlakového spádu při porovnání proudění potrubím s vestavbou a bez ní [%]

$L_n$  – délka návratnosti [m]

V příložené tabulce jsou přesné hodnoty ztrát při proudění v potrubí s FMD a bez něj, tyto hodnoty jsou použity v grafu 3.5.5. Jsou zde také uvedeny tlakové ztráty vzniklé na vestavbě  $\Delta p_v$  pro jednotlivá Reynoldsova čísla. Tyto ztráty vzniklé na vestavbě byly měřeny stejně jako v předešlých případech, je to tedy rozdíl tlaků v místech 2D před vestavbou a 3D za ní. Hodnoty délky návratnosti  $L_n$  byly spočteny podle rovnice (22).

Ztráty na vestavbách jsou samozřejmě s rostoucím  $Re$  vyšší. Ovšem celková úspora tlakového spádu  $U_c$  roste zároveň s  $Re$  až na jeden případ, kdy při  $Re = 6000$  je hodnota  $U_c$  nejnižší ze všech případů. Úspora energie tedy nejlépe vychází pro nejvyšší počítanou rychlost proudění a to je při  $Re = 20\,000$ , kdy úspora energie dosahuje 26 % při použití FMD oproti nekontrolovaného proudění. Délka potřebná k navrácení ztracené energie vlivem ztrát přímo na vestavbě, se taktéž s rostoucím  $Re$  zkracuje, vyčnívá pouze případ proudění při  $Re = 6000$ . Nejlépe tato délka vychází pro proudění při  $Re = 12\,000$ , kdy je potřeba 281 metrů délky potrubí pro dosažení návratnosti vestavby. Při vyšší hodnotě  $Re$  je hodnota  $L_n$  o 3 metry delší, navzdory tomu, že procentuální úspora je vyšší pro případ  $Re = 20\,000$ , je tomu tak kvůli obrovské ztrátě vzniklé na samotné vestavbě, ovšem v případě dlouhého rovného potrubí za vestavbou by při vyšším  $Re$  docházelo k vyšší úspoře a ve finále by mohla být vestavba mnohem užitečnější při vyšším  $Re$  i přesto, že její délka návratnosti je delší.

### 3.5.1 Vyhodnocení

V případech proudění při  $Re = 3000$  a  $3800$  je zajímavé, že proudění za vestavbou svou maximální hodnotu rychlosti na ose potrubí  $v_{co}'$  dosáhne v místech asi  $30D$  a zároveň tyto hodnoty jsou výrazně vyšší než v případě proudění prázdným potrubím. Znepokojivý je ale následný pokles na nižší hodnoty rychlostí, avšak pořád jde o hodnoty vyšší než v případě nekontrolovaného proudění avšak pouze o pár procent. Otázkou však je, jestli je toto prvotní vystoupaní do vyšších hodnot náznakem laminarizace, nebo nikoliv. V případech vyšších Reynoldsových čísel tento jev není natolik viditelný, hodnoty rychlostí na osách potrubí vystoupají většinou jen lehce nad hodnoty nekontrolovaného proudění, kde se následně drží. Tento jev by tak mohl naznačovat následné vyvíjení proudění směrem k laminárnímu, které je v těchto dvou případech ( $Re = 3000$ ,  $Re = 3800$ ) potvrzeno experimentem [2]. V případech vyšších  $Re$ , je ale možné, že by stačilo vhodně upravit rozměry vestavby, aby bylo docíleno stejného, nebo podobného průběhu rychlostí na ose potrubí jako v případech nízkých  $Re$ . Ani toto ale nemusí znamenat jasný úspěch v případě laminarizace, v grafu 3.5.4 je možné vidět v případě proudění  $Re = 20\,000$  velmi podobný průběh jako při nízkých  $Re$ , ale nenásleduje žádný výraznější překmit přes hodnotu turbulentního proudění ani přes ustálenou hodnotu v tomto případě. Je nutno ale podotknout, že průběh se podobá jen málo, hodnoty normovaných rychlostí na ose potrubí  $v_{co}'$  jsou v počátcích těsně za vestavbou výrazně nižší než při Reynoldsových číslech  $3000$  a  $3800$ , pokud by tedy bylo dosaženo podobných hodnot  $v_{co}'$  jako například v případě proudění při  $Re = 3000$ , mohla by laminarizace proběhnout i při vyšším  $Re$ .

Zajímavý je také průběh ztrát v potrubí při různých rychlostech proudění. Z výpočtů vychází, že čím vyšší je rychlost proudění, tím větší úspory energie mohou vzniknout. Platí to i pro délku návratnosti  $L_n$ , která je nejkratší pro případy nejvyšších počítaných  $Re$ , tedy že při  $Re = 20\,000$  stačí pro dosažení bodu návratnosti  $284m$  potrubí za vestavbou, pro případ

proudění při  $Re = 3800$  je potřebná délka téměř dvojnásobná. Hodnota  $U_c$  byla vyhodnocována v místech, kde byla rychlost proudění již ustálená, tedy v místech  $70D$  za vestavbou a dále. V případě  $Re = 3000$ , kdy bylo v místech  $30D$  za vestavbou dosaženo výrazného přesažení normované rychlosti na ose potrubí v porovnání s nekontrolovaným prouděním, je délková ztráta v místě  $30 - 40D$  za vestavbou vyšší než v místech ustálené rychlosti. V tomto úseku je hodnota  $U_c$  asi  $13,2 \%$ , zatímco v místech  $70D$  a dále za vestavbou je tato hodnota pouze  $9,1 \%$ . Pokud by proudění bylo schopné zůstat ve stejném stavu jako v místech  $30D$  za vestavbou, znamenalo by to podstatně vyšší úspory energie a byla by potřeba menší délky potrubí pro zpětné získání energie ztracené na vestavbě samotné.

## 4 NÁVRH VESTAVBY

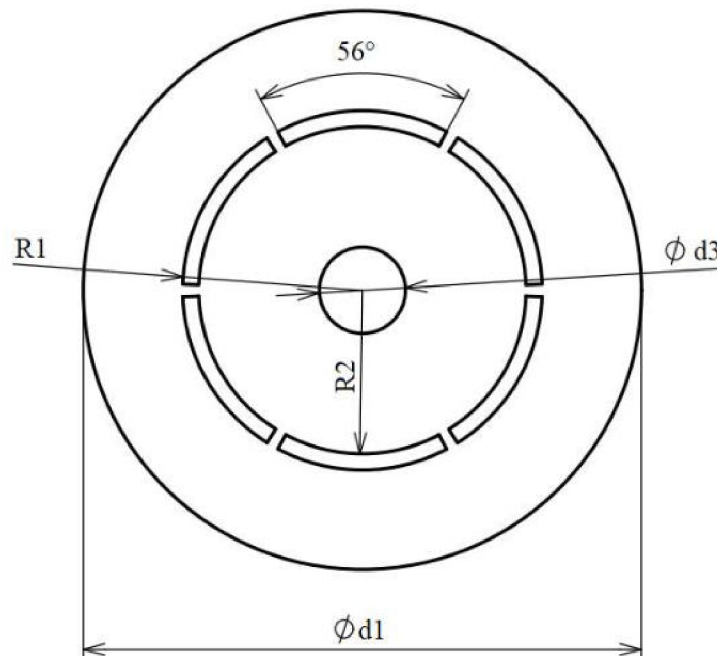
Vestavba uvedena v článku [4] je schopna zcela laminarizovat proudění pouze do hodnoty  $Re = 3800$ , při vyšších hodnotách už nenastane úplná laminarizace, ale stále vznikají menší tlakové ztráty podél potrubí než při proudění prázdným potrubím. Vestavba stejné geometrie byla propočítávána i v této diplomové práci, tato vestavba ale představuje velkou překážku pro proudění v potrubí a tak na ní vzniká obrovská tlaková ztráta. Bylo by tedy velmi vhodné navrhnout tvar vestavby, který by byl schopen proud laminarizovat stejně dobře, a zároveň by na této vestavbě nevznikaly tak velké ztráty.

### 4.1 První fáze

Nejdříve byly provedeny dva návrhy (detailněji popsány níže), oba jsou od sebe velmi odlišné, oba návrhy jsou srovnávány s původní vestavbou se sedmi kruhovými dírami a s průměrem roztečné kružnice 15 mm.

#### 4.1.1 Návrh č. 1

Při prvním návrhu byla vestavba pozměněna jen málo. Šest kruhových děr rozmístěných na roztečné kružnici na čele vestavby bylo nahrazeno šesti úzkými mezerami viz. obrázek 4.1.1.



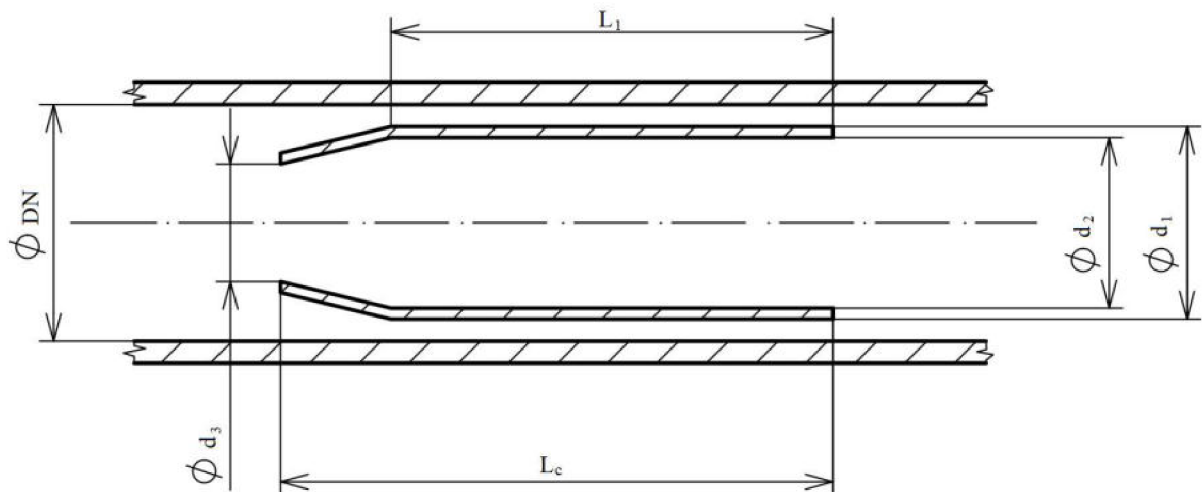
Obr. 4.1.1 – Pohled na čelo vestavby – návrh č. 1

Všechny ostatní rozměry byly zachovány, celková délka vestavby  $L_c = 200$  mm, mezera mezi stěnou potrubí a stěnou vestavby byla zachována na 1 mm  $\Rightarrow d_1 = 28$  mm. Průměr díry ve středu vestavby  $d_3 = 3,3$  mm. Navržené mezery, které nahradily původně 6 děr o průměru

$d_3$  zhruba odpovídají ploše nahrazených děr, velikosti poloměrů jsou tedy  $R1 = 9$  mm a  $R2 = 8,25$  mm. Přiložený obrázek není v měřítku, slouží pouze pro nastínění geometrie vestavby.

#### 4.1.2 Návrh č. 2

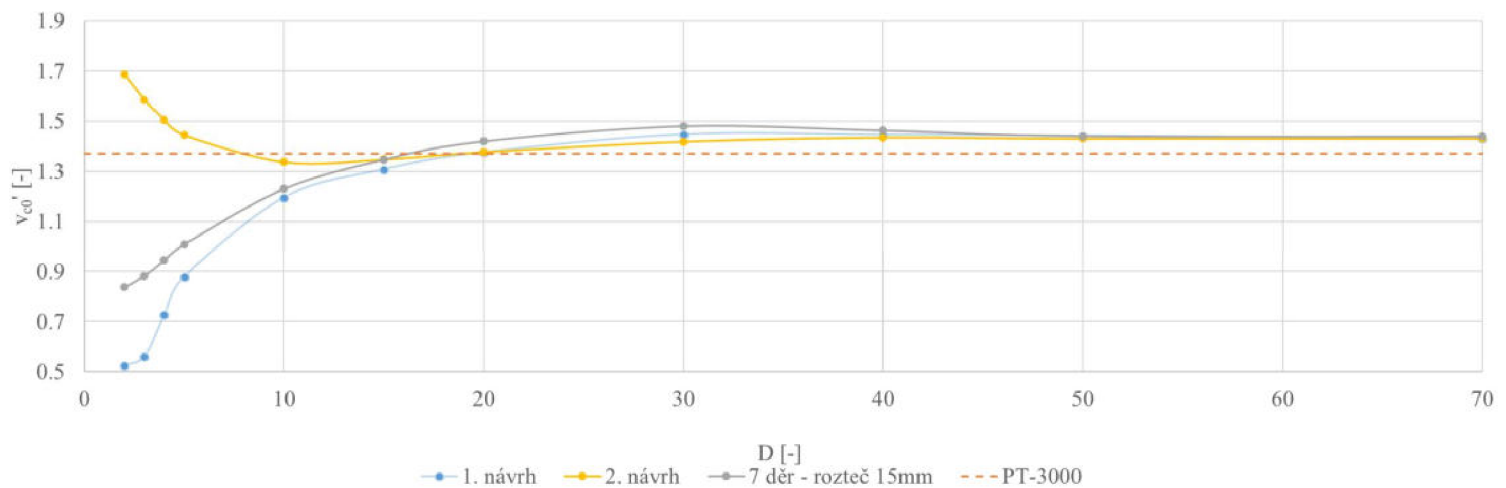
Druhý návrh také vychází z geometrie původní vestavby, celková délka  $L_c$  zůstala zachována. Stejně zůstaly i vnější a vnitřní průměry vestavby  $d_1 = 28$  mm => mezera mezi stěnou potrubí a stěnou vestavby je 1 mm,  $d_2 = 26$  mm a tak i tloušťka stěny vestavby zůstává rovna 1 mm. Délka  $L_1$  byla navržena na 190 mm, délka náběhové části vestavby je tedy 10 mm. Průměr  $d_3$  byl uzpůsoben tak, že tvoří polovinu plochy průřezu potrubí, v případě potrubí s DN = 30 mm vychází  $d_3 = 21,2$  mm. Obrázek 4.1.2 znázorňuje řez vestavbou podél osy potrubí, obrázek není v měřítku.



Obr. 4.1.2 – Podélný řez potrubím s vestavbou – návrh č. 2

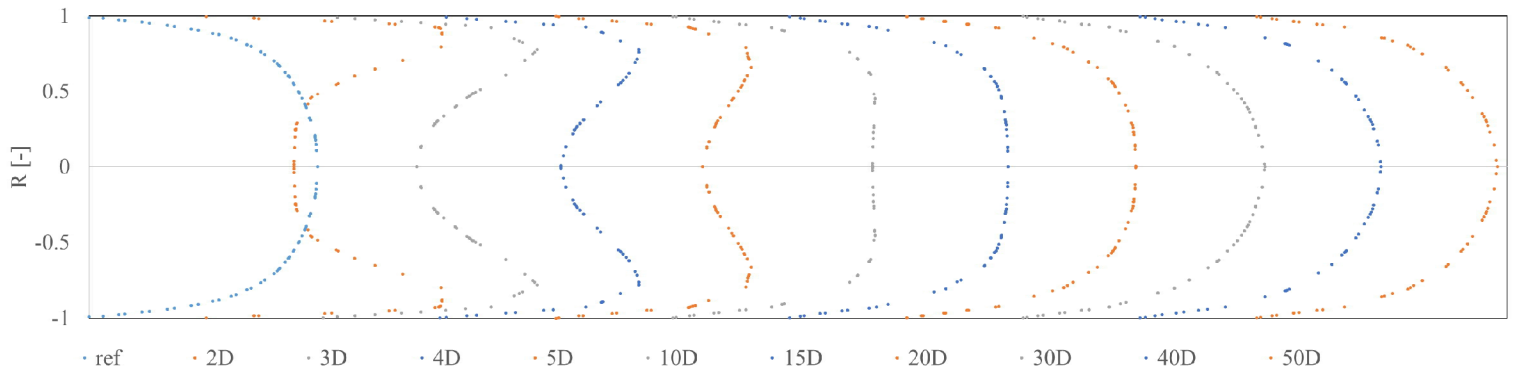
### 4.1.3 Srovnání návrhu č. 1 a 2 s původní vestavbou

Výsledky návrhů č. 1 a č. 2 byly porovnávány s výsledky z výpočtů vestavby vytvořené podle geometrie použité v experimentu [4]. Jde o vestavbu s dírami rozloženými na roztečné kružnici s průměrem 15 mm, výsledky této vestavby poukázaly na její nejlepší vlastnosti mezi ostatními vestavbami s jiným průměrem roztečné kružnice. Výpočty byly provedeny pro proudění při  $Re = 3000$ .

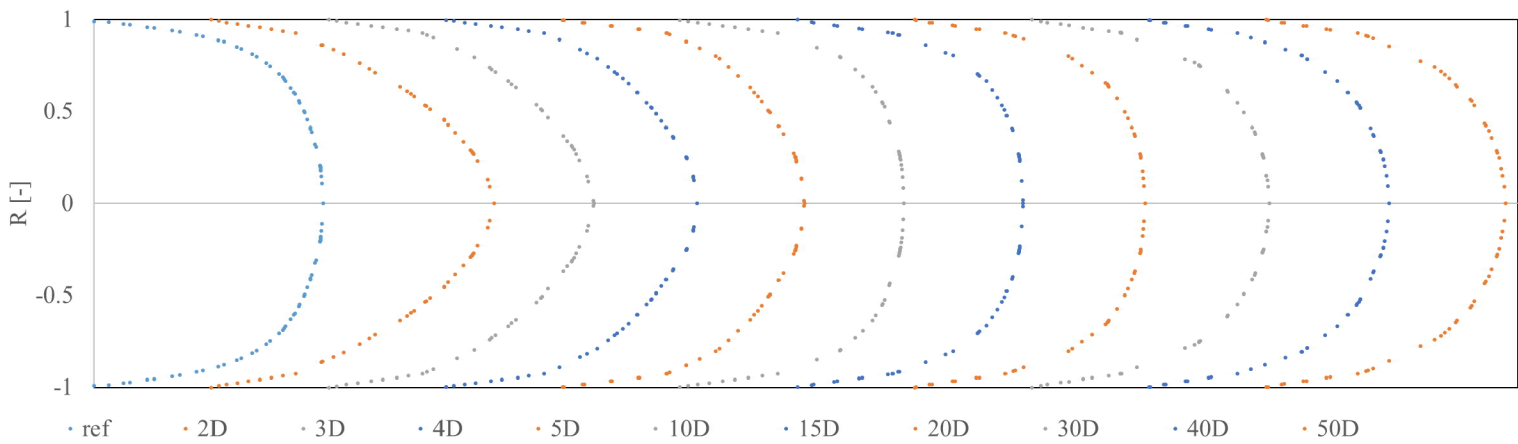


**Graf 4.1.3** - Normované rychlosti na osách potrubí – návrh 1 + návrh 2 + 7 děr – rozteč 15mm

V grafu 4.1.3 jsou srovnány hodnoty normovaných rychlostí na osách potrubí, modrá křivka platí pro návrh č. 1, žlutá pro návrh č. 2 a šedá křivka představuje proudění skrze vestavbu se sedmi dírami a s průměrem roztečné kružnice 15 mm. Oranžová čárkovaná čára platí pro nekontrolované proudění. V případě vestavby ve tvaru prvního návrhu, tedy modré křivky, jsou hodnoty  $v_{co}'$  ve vzdálenosti  $2D - 5D$  velmi nízké v porovnání s šedou křivkou. Ve vzdálenosti  $10D$  a dále za vestavbou už modrá křivka kopíruje šedou křivku, ale hodnoty  $v_{co}'$  jsou stále o něco nižší než v případě šedé křivky. Průběh u návrhu č. 1 také postrádá překmit na maximální hodnotu v místě zhruba  $30D$  za vestavbou a následný mírný pokles, jako tomu bylo v případě vestavby se sedmi dírami. Oproti tomu modrá křivka sice dosáhne maximálních hodnot v místě  $30D$ , ale dále už si drží hodnotu  $v_{co}'$  konstantní. Průběh u návrhu č. 2 je v počátcích úplně odlišný od předešlých průběhů. Nejvyšších hodnot dosahují rychlosti na ose potrubí přímo na konci vestavby a následně žlutá křivka strmě klesá až pod hodnoty nekontrolovaného proudění, postupně však křivka mírně stoupá, až dosáhne stejných hodnot jako další dva případy uvedené v grafu. Od místa  $50D$  jsou hodnoty  $v_{co}'$  u všech vestaveb konstantní.



**Graf 4.1.4 – Vývoj RP za vestavbou – návrh č. 1**

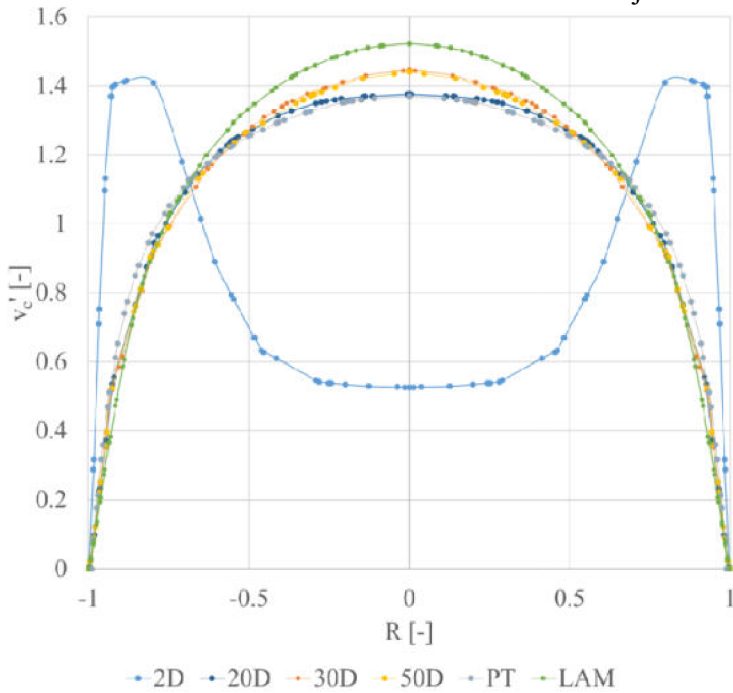


**Graf 4.1.5 – Vývoj RP za vestavbou – návrh č. 2**

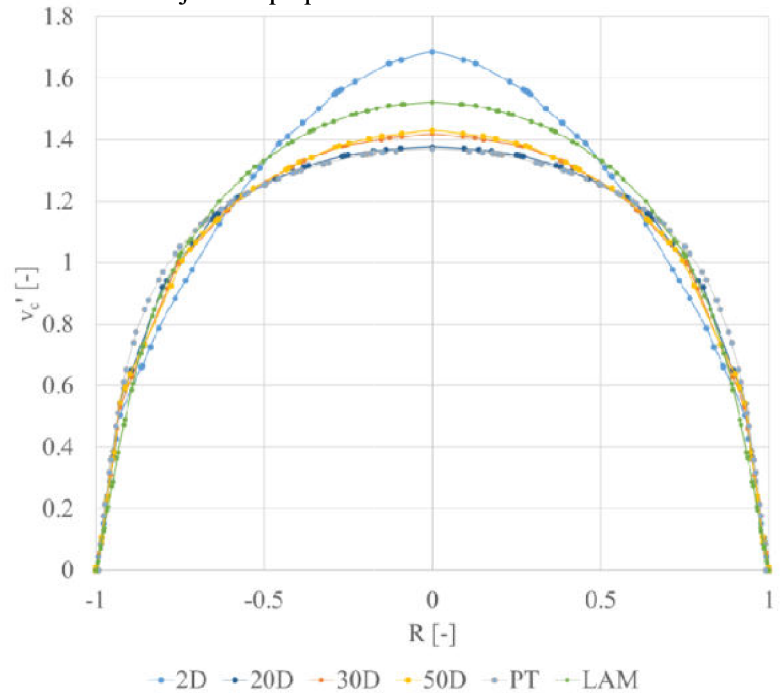
Grafy 4.1.4 a 4.1.5 zobrazují vývoj rychlostních profilů za jednotlivými vestavbami. V případě návrhu č. 1 jsou RP přímo za FMD velmi podobné případům proudění skrze původní FMD. Rychlostní profily mají charakteristický tvar písmene M (dle článku [4] je toto charakteristický a důležitý rys pro následnou laminarizaci proudění), ve vzdálenost 10D je RP uprostřed proudu plochý a postupně se vyvíjí směrem k profilu laminárního proudění. V místě 50D za vestavbou je RP nejvíce podobný profilu laminárního proudění. U návrhu č. 2 je vývoj RP za vestavbou zcela odlišný, v žádném místě nedošlo k vytvoření profilu ve tvaru M. Profil v místě 2D je svým tvarem velmi blízký parabole (profilu laminárního proudění), postupně se ale vrací zpět k tvaru turbulentního profilu.



Grafy 4.1.6 a 4.1.7 také zobrazují rychlostní profily za navrženými vestavbami. Zelený RP představuje profil laminárního proudění, naopak šedý RP představuje profil nekontrolovaného proudění. V případě návrhu č. 1 je zřetelný tvar písmene M v místě 2D za vestavbou, vrcholy tohoto profilu dosahují vyšších hodnot než v případě původní vestavby. Tmavě modrý profil z místa 20D je téměř totožný s profilem nekontrolovaného proudění, ale vývoj proudění pokračuje a oranžový a žlutý profil z míst 30D a 50D za vestavbou jsou o něco blíže laminárnímu RP. U návrhu č. 2 světle modrý RP z místa 2D za vestavbou dosahuje mnohem vyšší maximální normované rychlosti  $v_c'$  než v případě laminárního RP, tmavě modrý RP je ale už zase zpět téměř totožný s profilem nekontrolovaného proudění. Ve vzdálenostech 30D a 50D za vestavbou jsou RP téměř totožné jako v případě návrhu č. 1.



Graf 4.1.6 – RP za vestavbou – návrh č.1

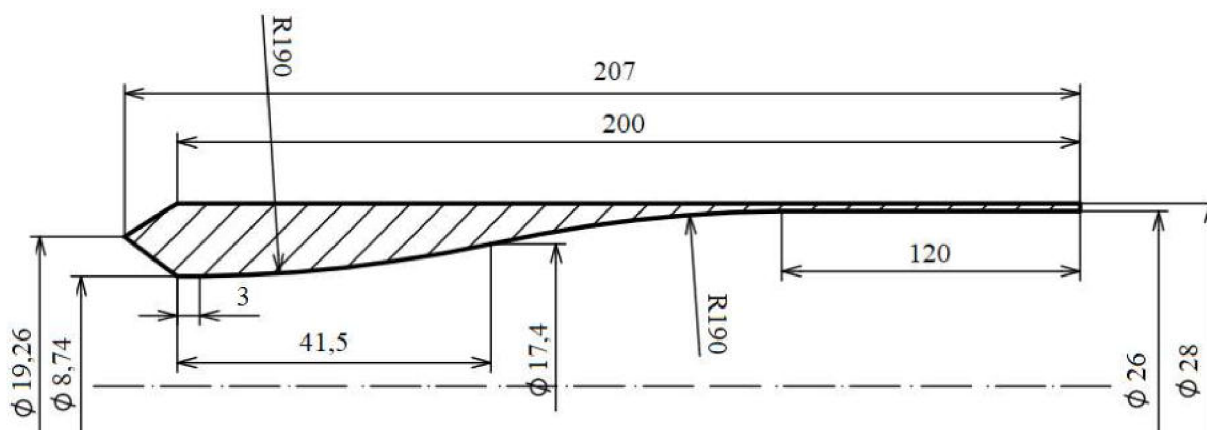


Graf 4.1.7 – RP za vestavbou – návrh č.2

## 4.2 Druhá fáze

Dále byly navrženy další čtyři varianty vestaveb, navzájem se od sebe příliš neliší, byl zde pozorován především vliv náběhové hrany na čele vestavby. Byla zde snaha zachovat rozměry původní vestavby, docílit alespoň stejné laminarizace jako v případě původní vestavby a zároveň co nejvíce snížit ztráty vzniklé na FMD. Následující obrázky návrhů jsou pouze ilustrační, nejde tedy o technické výkresy a rozměry nejsou v měřítku.

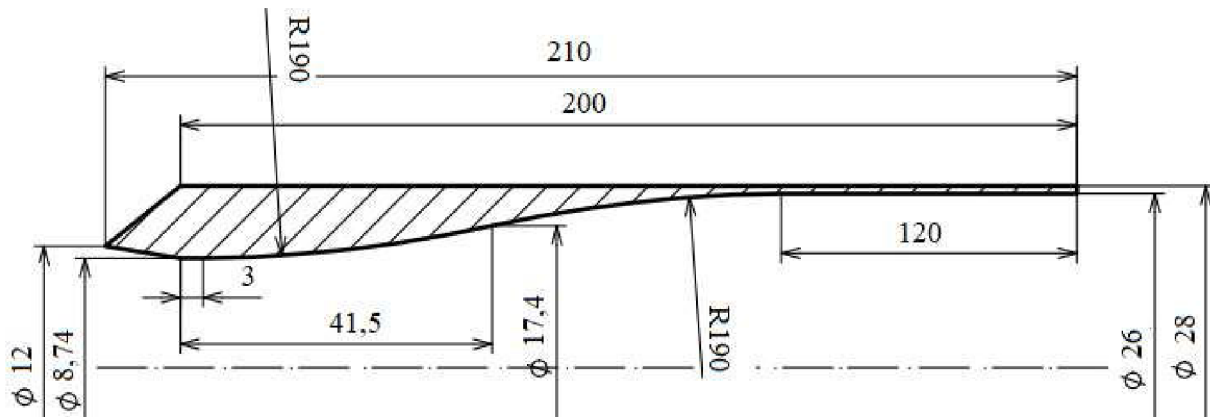
### 4.2.1 Návrh č. 3



Obr. 4.2.1 – Podélný řez vestavbou – návrh č. 3

Na vestavbě č. 3 je vstupní průměr 8,74 mm, tento rozměr odpovídá svou plochou průtočné ploše v případě původní vestavby se sedmi dírami. Tento rozměr byl také zachován při prvotních výpočtech prováděných na 2D modelech. Čelo vestavby je opatřeno výběžkem, který by měl snížit ztráty oproti původnímu rovnému čelu. Průměr na špičce výběžku je 19,26 mm, kruh o tomto průměru má poloviční obsah oproti kruhu o průměru 30 mm, při výpočtech byla vždy použita trubka o vnitřním průměru 30 mm a tak tento výběžek rozděluje průtočnou plochu na dvě stejné části. Geometrie uvnitř vestavby byla upravena, aby vznikaly co možná nejmenší ztráty, ale zároveň byly zachovány rozměry na konci vestavby. Celková délka vestavby je 207 mm, původní vestavba měla celkovou délku 200 mm, rozdíl dělá pouze výška výběžku na čele vestavby.

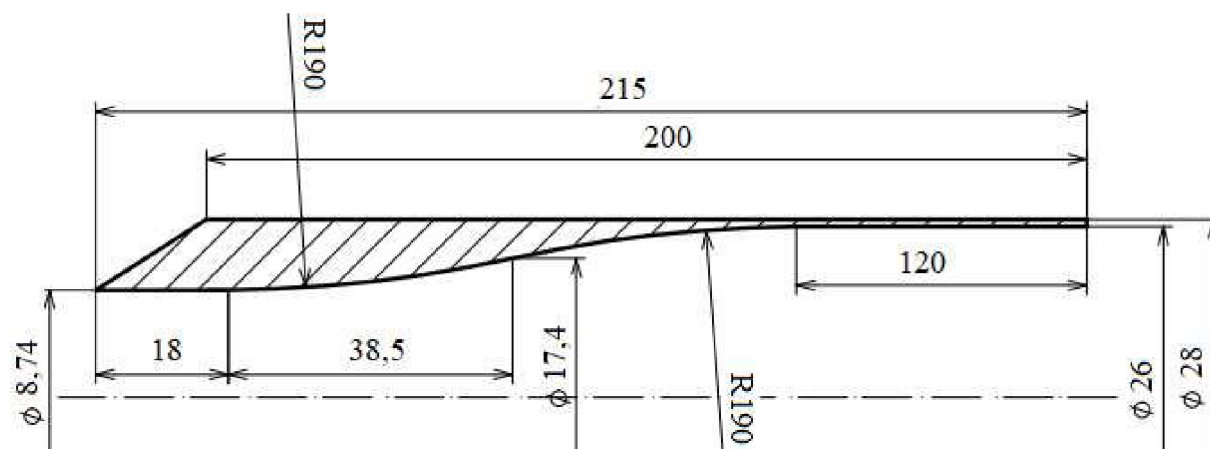
#### 4.2.2 Návrh č. 4



Obr. 4.2.2 – Podélný řez vestavbou – návrh č. 4

Geometrie návrhu č. 4 se liší oproti návrhu č. 3 pouze tvarem výběžku. Stejně jsou rozměry uvnitř vestavby a na jejím konci. Celková délka vestavby je v tomto případě 210 mm, výběžek na čele vestavby je vysoký 10 mm a průměr na vrcholku výběžku je 12 mm, tento rozměr je menší než u předešlé varianty, a to proto, že zde byla snaha dostat do mezery mezi trubicou a vestavbou větší množství proudící kapaliny oproti návrhu č. 3.

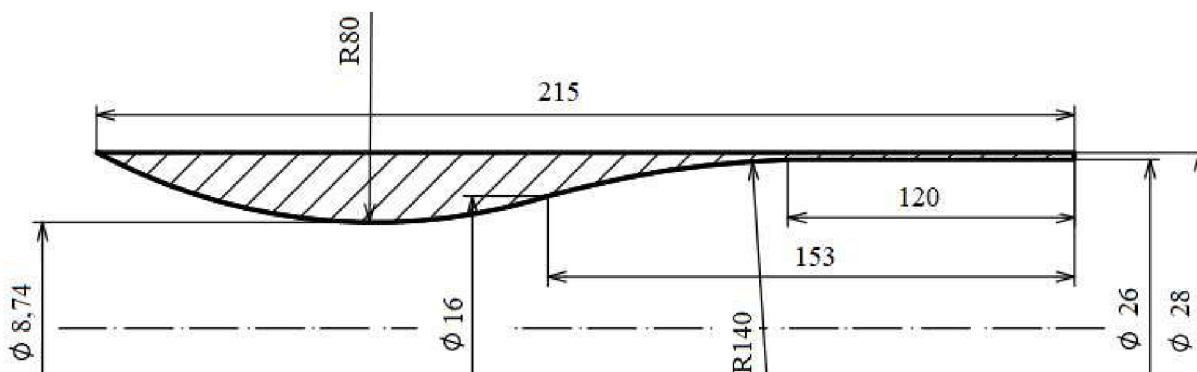
#### 4.2.3 Návrh č. 5



Obr. 4.2.3 – Podélný řez vestavbou – návrh č. 5

Na obrázku 4.2.3 je náčrt 5. návrhu geometrie vestavby. Zde byl vrchol výběžku na čele vestavby ještě více posunut směrem k ose vestavby, vtok do vestavby je stále řešen dírou o průměru 8,74mm, u tohoto návrhu platí stejný průměr také pro vrchol výběžku, vtok do vestavby je tak tvořen 18 mm dlouhou dírou o konstantním průměru, následuje pozvolné rozšiřování a posledních 120 mm délky vestavby zůstává o konstantním průměru 26 mm. U této vestavby je celková délka ještě o něco větší a to je 215 mm, rozdíl tvoří pouze délka výběžku.

#### 4.2.4 Návrh č. 6

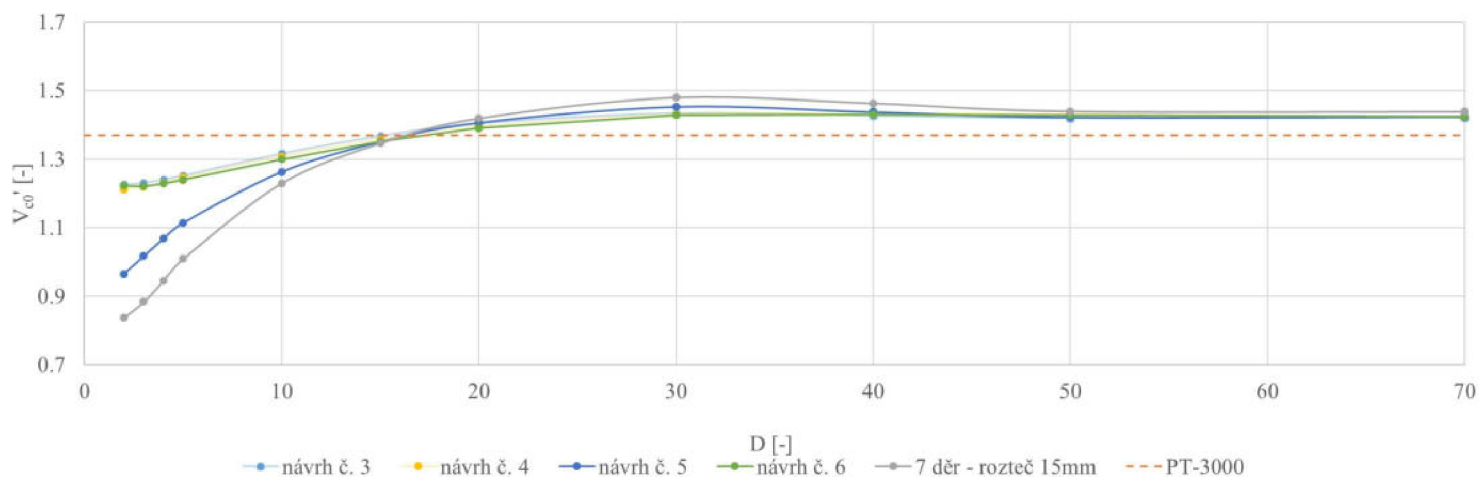


Obr. 4.2.4 – Podélný řez vestavbou – návrh č. 6

V případě posledního návrhu byl tvar pozměněn razantněji, celá vnější strana vestavby tvoří přímku, špička výběžku má tedy průměr 28 mm. Od špičky čela vestavby pomalu přechází radiusem do středu, minimální průtočný průměr zůstal zachován na 8,74 mm. Následuje postupné rozevírání vestavby a konec je řešen stejně jako v předešlých případech. Celková délka vestavby je v tomto návrhu 215 mm.

#### 4.2.5 Srovnání návrhů s původní vestavbou

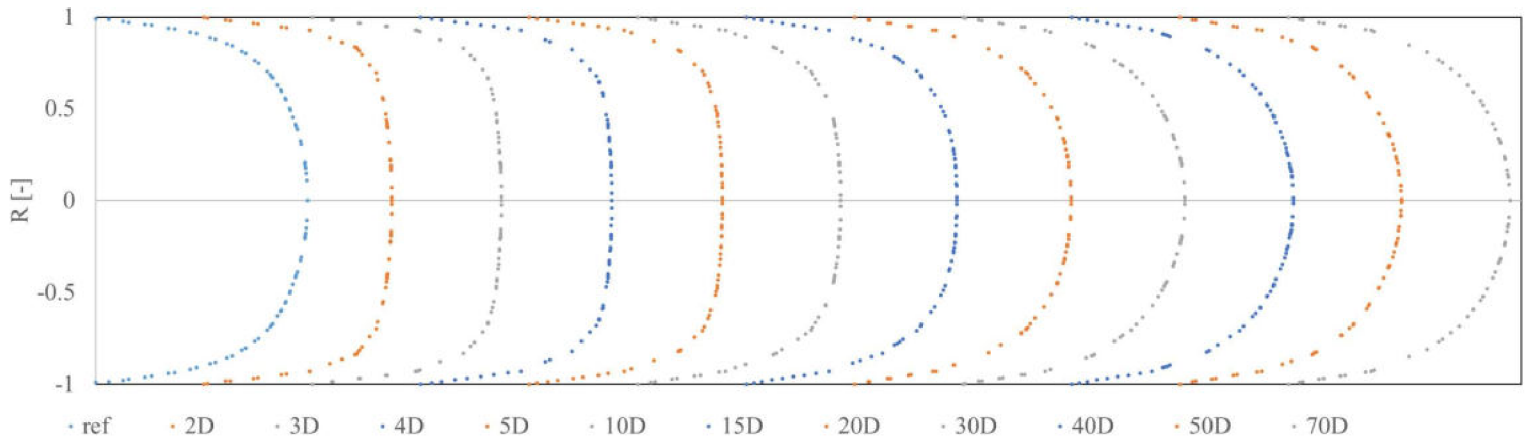
Výsledky získané z výpočtů provedených na geometriích vestaveb č. 3, 4,5 a 6 jsou zde, stejně jako dva předešlé návrhy, porovnány s výsledky z původní vestavby. Výpočty byly provedeny také pro rychlost proudění odpovídající  $Re = 3000$ .



Graf 4.2.5 - Normované rychlosti na osách potrubí – návrh č. 3, 4,5 a 6 + 7 děr – rozteč 15mm

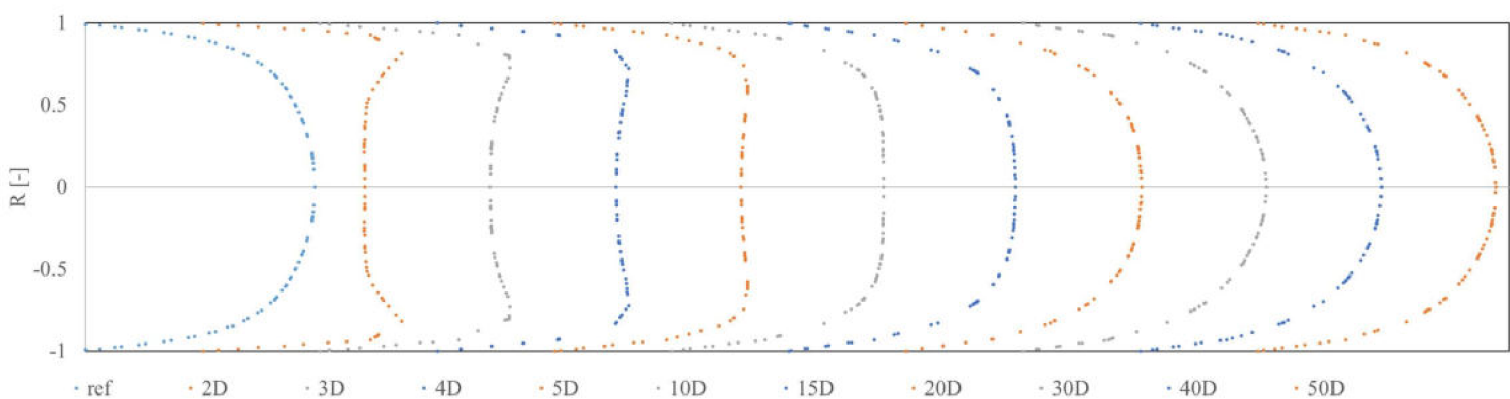
V grafu 4.2.5 je oranžovou čárkovanou čarou (PT-3000) naznačen průběh rychlosti na ose potrubí nekontrolovaného proudění. Šedá křivka znázorňuje výsledky z původní vestavby, ostatní křivky patří k navrženým geometriím. Světle modrá křivka (návrh č. 3) je po celé délce téměř kopírována žlutou křivkou (návrh č. 4) a zelenou křivkou (návrh č. 6), v místech těsně za FMD jsou rychlosti pro tyto tři varianty mnohem vyšší než v případě šedé křivky (původní vestavby). V místech zhruba 30D dosahují tyto tři křivky svého maxima, následně se už hodnoty rychlostí na ose potrubí nemění a zůstávají konstantní i pro zbytek sledované

části potrubí. U těchto křivek především chybí překmit přes ustálené hodnoty rychlostí, jako tomu je v případě původní vestavby, u které v místě 30D dojde k dosažení nejvyšší rychlosti a následnému poklesu na ustálenou rychlost. Toto by zřejmě znamenalo neschopnost laminarizace proudění u těchto vestaveb. Tmavě modrá křivka (návrh č. 5) dosahuje v blízkosti za FMD nižších hodnot než předešlé dvě varianty, stále jsou však tyto hodnoty vyšší než v případě původní vestavby. V místě 30D tato křivka dosahuje svého maxima, její maximální hodnota se nachází někde mezi původní vestavbou a předešlými návrhy. V místě asi 50D navazuje tato křivka na křivky ostatních návrhů a ustálí se na stejné hodnotě jako předešlé případy.



Graf 4.2.6 – Vývoj RP za vestavbou – návrh č. 3

Graf 4.2.6 znázorňuje rychlostní profily v určitých místech za FMD č. 3. Pro ostatní uváděné vestavby je tento průběh téměř totožný (platí pro návrhy č. 4 a 6) a tak zde nejsou uvedeny jejich průběhy. V porovnání s původní vestavbou je zde na první pohled viditelná absence rychlostního profilu ve tvaru písmene M, který je dle autorů [4] důležitý pro laminarizaci proudu. Rychlostní profil je zpočátku velmi plochý a postupně se vyvíjí, ve vzdálenosti 50D a více jen o něco málo převyšuje profil nekontrolovaného proudění.

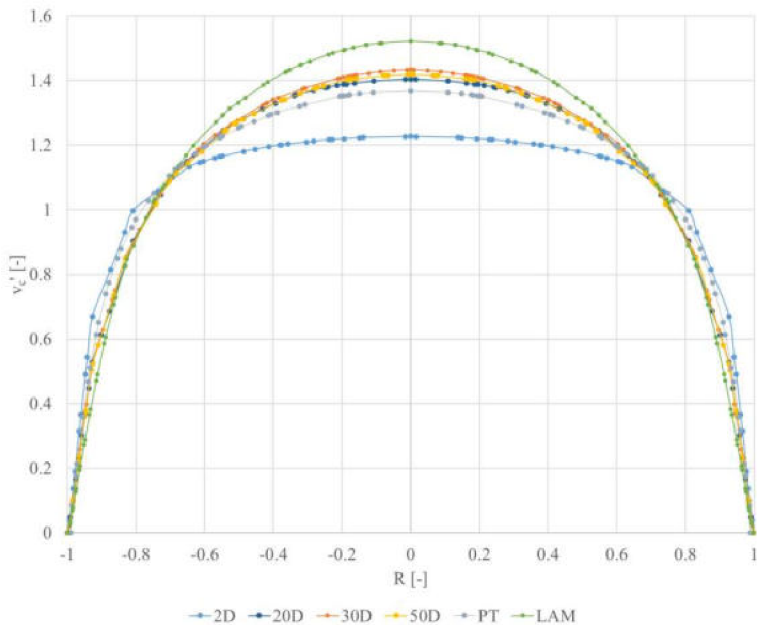


Graf 4.2.7 – Vývoj RP za vestavbou – návrh č. 5

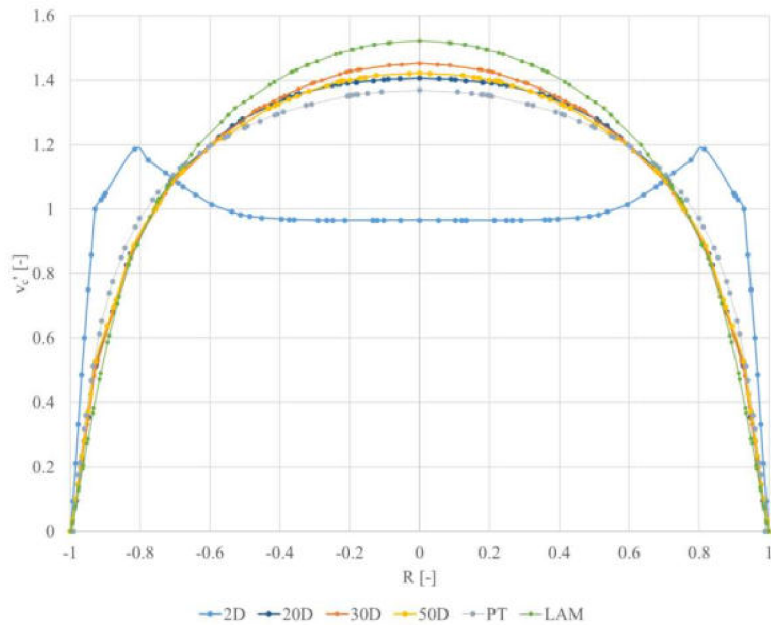
V grafu 4.2.7 je průběh rychlostních profilů pro případ vestavby návrh č. 5. Zde je viditelný rozdíl především na prvních RP přímo za vestavbou. RP v místě 2D má charakteristický tvar písmene M, i když jeho vrcholy (maximální rychlosti v místech blízko stěny potrubí) nedosahují tak vysokých hodnot jako v případě původní vestavby.



Graf 4.2.8 detailněji zobrazuje RP v místech za vestavbou, zde je vidět, že k malému překmitu rychlosti přes ustálenou hodnotu dochází, v místě 30D za vestavbou je rychlostní profil o něco málo blíže laminárnímu RP než v místě 50D. RP v místě 50D je už ustálený a dále za vestavbou se nevyvíjí, minimálně tedy do místa 90D, kam byl sledován průběh proudění.



**Graf 4.2.8** – RP za vestavbou – návrh č. 3



**Graf 4.2.9** – RP za vestavbou – návrh č. 5

Graf 4.2.9 napravo platí pro návrh vestavby č. 5. Zde je jasně vidět profil tvaru M, který vznikl 2D za vestavbou. V porovnání s grafem nalevo je viditelný rozdíl v maximální hodnotě normované rychlosti v ose potrubí, vestavba č. 5 dosahuje vyšší hodnoty v místě 30D.

### 4.3 Tlakové ztráty u jednotlivých návrhů

Tabulka 4.3.1 uvádí výsledky tlakových ztrát pro všechny uvedené návrhy. Výpočty na navržených vestavbách byly prováděny jen při rychlosti proudění odpovídající  $Re = 3000$ . Pro vestavbu s geometrií návrhu č. 2 byl proveden výpočet také při  $Re = 8000$ , aby se potvrdilo či vyvrátilo podobné chování jako v případě FMD se sedmi dírami a průměrem roztečné kružnice 15mm (původní vestavby) a to, že při vyšším  $Re$  roste i procentuální úspora energie.

| Návrh č.      | $\Delta p_v$ [Pa] | $z_{mv}$ [Pa/m] | $z_{mx}$ [Pa/m] | $U_c$ [%] | $L_n$ [m] |
|---------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------|-----------|
| 1             | 782,7             | 7,22            | -               | 12,1      | 791       |
| 2             | 12,1              | 7,20            | -               | 12,3      | 12        |
| 3             | 298,2             | 7,44            | -               | 9,4       | 387       |
| 4             | 315,4             | 7,3             | -               | 11,1      | 346       |
| 5             | 534,3             | 7,3             | -               | 11,1      | 587       |
| 6             | 309,2             | 7,32            | -               | 10,8      | 347       |
| 2 – $Re=8000$ | 89,7              | 32,6            | -               | 18,8      | 11,9      |
| PT - 3000     | -                 | -               | 8,21            | -         | -         |
| PT - 8000     | -                 | -               | 40,13           | -         | -         |

Tab. 4.3.1 – Tlakové ztráty pro navržené vestavby –  $Re = 3000$

$\Delta p_v$  – tlaková ztráta na vestavbě [Pa]

$z_{mx}$  – tlaková ztráta vztažena na jeden metr délky potrubí [Pa/m]

$z_{mv}$  – tlaková ztráta vztažena na jeden metr délky potrubí při proudění za vestavbou [Pa/m]

$U_c$  – úspora tlakového spádu při porovnání proudění přes potrubí s vestavbou a bez ní [%]

$L_n$  – délka návratnosti [m]

Hodnoty  $L_n$  uvedené v tabulce byly počítány dle rovnice (22) na straně 70. V posledních dvou řádcích tabulky jsou uvedeny hodnoty tlakových ztrát na metru potrubí dopočítané pro případy nekontrolovaného proudění při  $Re = 3000$  a  $Re = 8000$ . Ve druhém sloupci tabulky jsou uvedeny tlakové ztráty vzniklé na jednotlivých vestavbách. Nejhůře dopadla vestavba č. 1, v porovnání s původní vestavbou je tato ztráta o více než 50% větší (výsledky v tab. 3.4.10 na str. 70). Hodnota délkové ztráty  $z_{mv}$  je sice druhá nejnižší, na druhou stranu je ztráta na vestavbě tak vysoká, že délka návratnosti v tomto případě dopadla nejhůře. Jako druhá nejhorší co do velikosti ztráty na vestavbě je návrh č. 5, vytváří podobně velkou ztrátu jako vestavba původní, v případě délkových ztrát je srovnatelná s FMD č. 4 a 6, hodnota délky návratnosti je druhá nejvyšší a to přesně 587 metrů potrubí. Návrhy č. 3, 4 a 6 jsou si velmi podobné geometrií, ale především výsledky. Ztráty na těchto vestavbách se liší jen minimálně, také hodnoty  $z_{mv}$  si jsou hodně podobné, zde se mírně odlišuje pouze vestavba č. 3. Hodnoty délky návratnosti taktéž dosahují velmi podobných výsledků.

Nejlépe ve všech ukazatelích dopadla vestavba č. 2, ztráta vznikající na ní je ze všech uvedených zdaleka nejmenší, taktéž délkové ztráty vznikající za vestavbou jsou podle



výsledků nejmenší a to vede na délkovou návratnost  $L_n = 12$  m v případě potrubí s  $DN = 30$  mm rovných 400 průměrů  $D$ , což je hodnota několikanásobně menší než v ostatních případech. Proto byl také v případě této vestavby proveden výpočet i při proudění o rychlosti odpovídající  $Re = 8000$ , aby bylo zjištěno, jestli je chování této vestavby podobné jako v případě vestavby původní, tedy že v případě rychlejšího proudění dochází ke větší procentuální úspoře a délka návratnosti se zkracuje. Toto bylo potvrzeno a procentuální úspora je srovnatelná s původní vestavbou. Podle článku [4] se mohou tlakové ztráty s rostoucím Reynoldsovým číslem snižovat, tedy že procentuální úspora při vyšším  $Re$  je vyšší, stejně jako vyšlo i v tomto případě. Otázkou tedy je, do jaké hodnoty  $Re$  by tato vestavba byla schopna fungovat a při jakém  $Re$  by bylo nejvhodnější tuto vestavbu použít.

## ZÁVĚR

Při výpočtech prováděných v této práci byl použit model turbulence se zkratkou SST k-omega. V případě výpočtů, které se snaží dosáhnout laminarizace proudění je tento model krajně nevhodný ze své podstaty, což výsledky uvedené v této práci z části potvrzují. Tento model byl zvolen především kvůli své podstatně menší náročnosti na výpočetní čas oproti obvykle používaným modelům při výpočtech laminarizace. Byla snaha zjistit, jestli je možno předpovědět potlačení turbulence i pomocí tohoto modelu a zkrátit tak čas při návrhu zařízení pro potlačení turbulence. Pomocí těchto výpočtů nebylo dosaženo úplné laminarizace a vytvoření laminárního profilu za vestavbou ani v případě vestavby, u které byla autory článku [4] ověřena její funkčnost a bylo pomocí ní experimentálně dosaženo úplné laminarizace do určitého Reynoldsova čísla. V případě této vestavby bylo ale dosaženo značného překročení rychlosti na ose potrubí (tedy přiblížení se k laminárnímu rychlostnímu profilu) v určitých místech za vestavbou. Po chvíli hodnota této rychlosti klesla zpět, ale stále byla vyšší než při proudění o stejné rychlosti v potrubí bez vestavby. Tato situace byla podobná u více variant a také pro různé rychlosti proudění. Zůstává však otázkou, zda je toto překročení rychlosti na ose prázdného potrubí známkou např. částečné laminarizace nebo nikoli. Výsledky z výpočtů provedených na původní vestavbě, u které byla laminarizace dosažena při experimentu, nasvědčují tomu, že při dodržení vzniku rychlostního profilu ve tvaru M a zároveň překročení ustálené rychlosti v určitých místech za vestavbou nad hodnotou ustáleného proudění, dojde k alespoň částečné laminarizaci.

První výpočty byly zaměřeny na porovnání s výsledky vycházejících z výpočtů, kde byla použita vestavba z experimentu se sedmi kruhovými dírami na čele, zjednodušená na vestavbu s jednou dírou kvůli možnosti vytvoření 2D modelu pro tuto zjednodušenou vestavbu. Byl vytvořen také 3D model této vestavby a výsledky byly mezi sebou porovnány. Z grafu 3.3.3 je jasně vidět, že při  $Re = 3000$  došlo v případě výpočtů na 3D modelu ke značnému překročení rychlosti na ose potrubí oproti případu proudění prázdným potrubím v místech asi 30D za vestavbou. V případě výsledků z 2D modelu v těchto místech došlo také k překročení této rychlosti, ovšem jen minimálně. Dále tak bylo usouzeno, že nemá smysl se zabývat modelováním laminarizace na 2D modelech ani v případech, kdy je možné daný problém zjednodušit na 2D.

Dále už tedy byly výpočty prováděny pouze ve 3D. Nejdříve byl vytvořen model vestavby identický s vestavbou z experimentu [4]. Z popisu vestavby v tomto článku nebylo zcela jasné, jaký je průměr roztečné kružnice, na které je rovnoměrně rozmístěno šest děr na čele vestavby se sedmou dírou uprostřed. Byly tedy zvoleny tři různé průměry roztečných kružnic a ostatní rozměry zůstaly identické. Nejlépe z těchto tří variant dopadla vestavba s nejmenším průměrem roztečné kružnice, tedy vestavba s průměrem roztečné kružnice 15 mm. Její maximální hodnota rychlosti na ose potrubí byla ze všech tří variant nejvyšší, zároveň na této vestavbě vznikala nejmenší tlaková ztráta. Po tomto zjištění byly provedeny výpočty s touto vestavbou i při vyšších rychlostech proudění a později byla tato vestavba porovnávána s ostatními navrženými modely.

V poslední fázi práce bylo vytvořeno několik geometrií vestaveb, které byly podrobeny výpočtům a proběhlo vyhodnocení stejné jako u předešlé vestavby, tedy hodnocena byla

především schopnost překročit rychlost na ose potrubí oproti proudění v prázdném potrubí, vývoj rychlostních profilů po délce potrubí a tlakové ztráty vznikající na vestavbě a za ní. Z navržených geometrií představují nejzajímavější výsledky hlavně návrhy č. 2 a 5. V případě návrhu č. 2 byl průběh rychlostí na ose potrubí za vestavbou úplně odlišný od vestavby původní. V grafu 4.1.3 je vidět, že maximální hodnota na ose potrubí byla dosažena v bezprostřední blízkosti za vestavbou, ale následně tato hodnota prudce klesala a nakonec byla menší než ve většině jiných případů. Velmi zajímavých výsledků bylo dosaženo v případě tlakových ztrát vznikajících za vestavbou. Ve většině případů bylo dosaženo alespoň malé úspory energie ve formě délkových ztrát v potrubí, tedy proudění za vestavbou vykazovalo menší tlakové ztráty oproti nekontrolovanému proudění stejné rychlosti. Zde je ovšem podstatným ukazatelem použitelnosti vestavby tlaková ztráta způsobena samotnou vestavbou. Ztráty na vestavbách byly mnohdy velmi vysoké a tak v porovnání uspořenou energií za vestavbou byly zanedbatelné. K energetickému zisku by ve většině případů došlo až po stovkách metrů potrubí, po tuto vzdálenost by muselo být potrubí co nejvíce přímé, bez armatur a dalších rušivých elementů. Geometrie nově navržené vestavby č. 2 způsobovala velmi malou tlakovou ztrát, zároveň také dopadla nejlépe v porovnání se všemi dalšími variantami v délkových ztrátách, tedy délková ztráta při proudění za touto vestavbou byla nejmenší ze všech zkoušených variant. Zatímco ostatní varianty potřebovaly k vykompenzování ztrát vzniklých přímo na vestavbě stovky metrů potrubí, tato vestavba by to mohla dokázat už po dvanácti metrech (při rychlosti proudění odpovídající  $Re = 3000$ ). Bylo potvrzeno, jak také autoři uváděli v článku [4], že se zvyšující se rychlostí proudění může dojít k procentuálně větší úspoře energie, v případě návrhu č. 2, tato úspora při proudění o  $Re = 3000$  dosahovala 12,3% oproti proudění v potrubí bez vestavby, a v případě  $Re = 8000$  šlo už o 18,8%. V případě původní vestavby bylo dosaženo až 26% úspory tlakové energie při rychlosti proudění odpovídající  $Re = 20\,000$ , proudění při vyšších  $Re$  již nebylo počítáno. Zároveň se také s rostoucím  $Re$  mírně zkracuje délka potrubí potřebná k vykompenzování ztrát vzniklých na vestavbě samotné. Ve schopnosti laminarizace proudu by ale nejspíš dopadla geometrie vestavby č. 5, ta splňuje základní předpoklady pro laminarizaci proudění za vestavbou (vytvořený rychlostní profil tvaru M za vestavbou viz. Graf 4.2.7, značné překročení rychlosti na ose potrubí oproti proudění v prázdném potrubí viz graf 4.2.5).

Pomocí zveřejněných výsledků z experimentu [4] tedy byly určeny podmínky, při jejichž splnění by mělo být dosaženo alespoň částečné laminarizace. Tyto podmínky, tedy překročení hodnoty rychlosti na ose potrubí v prázdné trubce a zároveň vytvoření rychlostního profilu ve tvaru M, nejlépe z navržených vestaveb splňoval návrh č. 5. U tohoto návrhu by mělo dojít k alespoň částečné laminarizaci, což by bylo vhodné ověřit provedením experimentu, nebo provést výpočet pomocí metody DNS, kterou lze problém laminarizace přesně spočítat. Návrh č. 2 ani jednu z těchto podmínek nesplňoval, ale i přesto vykazoval snížení tlakových ztrát v místech za vestavbou a zároveň ztráta vzniklá na této vestavbě je velmi malá, zde by chtělo výsledky také ověřit nejlépe experimentálně, neboť při těchto výsledcích by vestavba mohla představovat použitelnou metodu snížení ztrát v praxi. Zároveň při pohlednutí na oba případy návrhů č. 2 a 5 to vypadá, že v případě, kdy usilujeme o úplnou laminarizaci proudění, vzniknou i poměrně velké ztráty na dané vestavbě, která tuto laminarizace dokáže vyvodit. Na počátku návrhu zařízení by tedy bylo vhodné rozhodnout, jestli hledáme zařízení pro laminarizaci proudu, nebo pro snížení ztrát při proudění, neboť se zdá, že tyto dvě funkce se navzájem částečně vylučují.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Možnosti potlačení turbulence při průtoku potrubím. SOVAK. 2019, 28(7-8), 58,59.
- [2] KUHNEN Jakob, Davide SCARSELLI a Bjorn HOF. Relaminarization of Pipe Flow by Means of 3D-Printed Shaped Honeycombs. Journal of Fluids Engineering [online]. 2019, 7 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: arXiv:1809.07625 [physics.flu-dyn]
- [3] ŠKORPÍK, Jiří. Vznik tlakové ztráty při proudění tekutiny, Transformační technologie, 2010-12, [last updated 2019-10-07]. Brno: Jiří Škorpík, [on-line] pokračující zdroj, ISSN 1804-8293. Dostupné z <https://www.transformacni-technologie.cz/38.html>.
- [4] J. KUHNEN, D. SCARSELLI, M. SCHANER a B. HOF. Relaminarization by steady modification of the streamwise velocity profile in a pipe [online]. 2018 [cit. 2021-3-8]. Dostupné z: arXiv:1802.01331v1 [physics.flu-dyn]
- [5] ŠTEFAN, D. Hydraulické ztráty v potrubí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.
- [6] Součinitel ztráty třením. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2021-5-4]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Sou%C4%8Dinitel\\_ztr%C3%A1ty\\_t%C5%99en%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Sou%C4%8Dinitel_ztr%C3%A1ty_t%C5%99en%C3%AD)  
A
- [7] D. SCARSELLI, J. KUHNEN a B. HOF. Relaminarising pipe flow by wall movement. Journal of Fluids Engineering [online]. 2018, 13 [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: arXiv:1807.05357 [physics.flu-dyn]

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

| Symbol          | Veličina  | Jednotka |
|-----------------|---|----------|
| Re              | Reynoldsovo číslo                                     | -        |
| R               | poloměr   | m        |
| $v_s$           | střední rychlost                                      | m/s      |
| $D_h$           | hydraulický průměr                                    | m        |
| $\nu$           | souč. kinematické viskozity                           | $m^2/s$  |
| $Y_z$           | ztrátová měrná energie                                | J/kg     |
| $\lambda$       | součinitel tření                                      | -        |
| D               | průměr potrubí  | m        |
| L               | délka potrubí   | m        |
| k               | drsnost potrubí                                       | m        |
| t               | čas   | s        |
| p               | tlak  | Pa       |
| $U_w$           | rychlost posuvu stěny                                 | m/s      |
| $U_b$           | střední rychlost proudění                             | m/s      |
| $U_{inj}$       | rychlost vstříkované kapaliny                         | m/s      |
| $s_c$           | délka posuvu stěny                                    | m        |
| f               | součinitel tření                                      | -        |
| $\rho$          | hustota   | $kg/m^3$ |
| $\Delta p$      | rozdíl tlaků  | Pa       |
| K               | koeficient poklesu tlaku                              | -        |
| $z_{BE}$        | vzdálenost bodu zlomu                                 | m        |
| Q               | objemový průtok                                       | $m^3/s$  |
| $v_c'$          | normovaná rychlost                                    | -        |
| $v_{co}'$       | normovaná rychlost na ose potrubí                     | -        |
| z               | vzdálenost  | m        |
| $t_i$           | intenzita turbulence                                  | -        |
| $v_{rms}$       | vířivost  | $s^{-1}$ |
| $\overline{w'}$ | časově středovaná hodnota flukтуаční rychlosti        | m/s      |
| $T_w$           | smykové napětí  | Pa       |
| $\Delta p_v$    | tlaková ztráta na vestavbě                            | Pa       |
| $z_{mx}$        | tlaková ztráta vztažena na délku potrubí              | Pa/m     |
| $z_{mv}$        | tlaková ztráta vztažena na délku potrubí za vestavbou | Pa/m     |
| $U_c$           | úspora tlakové energie                                | %        |
| $L_n$           | délka návratnosti                                     | m        |