

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

---

**TLAKOVÉ ZTRÁTY OHEBNÝCH VZDUCHOVODŮ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu doc. Ing. Vladimíru Zmrhalovi, Ph.D. za jeho rady a ochotu při vedení mé práce. Dále bych chtěl poděkovat celé své rodině za podporu při studiu a své přítelkyni za její trpělivost.

## SOUHRN

Cílem práce bylo vytvořit literární rešerši týkající se tlakových ztrát ohebných hadic používaných ve vzduchotechnice.

Druhým cílem byla experimentální část, kde byla měřena tlaková ztráta tlakových vzduchovodů. Součástí vyhodnocení experimentu bylo porovnání výsledků s podklady od výrobce. Měření bylo prováděno v několika napnutích hadice a byl zkoumán vliv tohoto natažení na tlakovou ztrátu.

## SUMMARY

The first goal of this diploma thesis was to create a literary overview about pressure losses in flexible air ducts.

The second goal was to experimentally measure pressure losses in flexible air ducts and compare results with datasheets of the manufacturer. The measurement was done at different tensions of air duct and the focus was put on revealing the relation between the tension and pressure loss.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Tlaková ztráta, ohebný vzduchovod, napnutí hadice, větrání.

## KEYWORDS

Pressure losses, flexible air ducts, tensions, ventilation.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Tlakové ztráty ohebných vzduchovodů“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Vladimíra Zmrhala, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 5. 1. 2020

Jan Zelingr

**OBSAH**

1.	ÚVOD .....	- 9 -
2.	TEORIE .....	- 9 -
2.1	Základní rovnice mechaniky tekutin .....	- 9 -
2.1.1	Stavová rovnice.....	- 9 -
2.1.2	Rovnice kontinuity.....	- 10 -
2.2	Vlastnosti vzduchu .....	- 10 -
2.2.1	Vlhkost vzduchu .....	- 10 -
2.2.2	Tlak vzduchu.....	- 11 -
2.2.2	Hustota vzduchu .....	- 12 -
2.3	Měření průtoku vzduchu .....	- 12 -
2.3.1	Clony.....	- 12 -
2.4	Tlakové ztráty.....	- 15 -
2.4.1	Energetická rovnice .....	- 16 -
2.4.2	Režim proudění.....	- 16 -
2.4.3	Tlakové ztráty třením.....	- 17 -
2.4.4	Tlakové ztráty místní .....	- 18 -
2.5	Ohebné vzduchovody .....	- 19 -
3.	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ TLAKOVÝCH ZTRÁT .....	- 20 -
3.1	Cíl měření.....	- 20 -
3.2	Popis experimentu.....	- 20 -
3.2.1	Měřicí místo .....	- 20 -
3.2.2	Schéma místa .....	- 21 -
3.3	Použité přístroje a měřidla .....	- 22 -
3.4	Měřené vzduchovody .....	- 23 -
3.4.1	ED Flex LT .....	- 23 -
3.4.2	Greyflex .....	- 24 -

3.4.3	Aluflex MI .....	- 25 -
3.4.4	Semiflex .....	- 26 -
3.5	Tabulka seznamu hadic .....	- 27 -
3.6	Podmínky v laboratoři.....	- 28 -
3.7	Popis měření.....	- 28 -
4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	- 29 -
4.1	Vyhodnocení závislosti tlakové ztráty na průtoku vzduchu .....	- 30 -
4.1.1	Vyhodnocení hadice ED FLEX LT .....	- 30 -
4.1.2	Vyhodnocení hadic Greyflex .....	- 31 -
4.1.3	Vyhodnocení hadic Aluflex .....	- 35 -
4.1.4	Vyhodnocení hadic Semiflex.....	- 38 -
4.2	Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle.....	- 41 -
4.2.1	Vyhodnocení hadic ED Flex LT .....	- 41 -
4.2.2	Vyhodnocení hadic Greyflex .....	- 42 -
4.2.3	Vyhodnocení hadic Aluflex .....	- 43 -
4.2.4	Vyhodnocení hadic Semiflex.....	- 44 -
4.2.5	Porovnání s pozinkovaným potrubím.....	- 45 -
5	ZÁVĚR .....	- 47 -
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	- 49 -
	SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK .....	- 51 -

## SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK

A	[1/K]	- psychrometrický součinitel ( $622 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ )
$A_{cl}$	[m <sup>2</sup> ]	- plocha otvoru clony
C	[-]	- součinitel průtoku
d	[m]	- vnitřní průměr potrubí
$d_{cl}$	[m]	- průměr otvoru clony
$d_h$	[m]	- hydraulický průměr potrubí
$D_{CT}$	[m]	- průměr měřicí tratě
g	[m/s <sup>2</sup> ]	- gravitační zrychlení
$h_b$	[mm]	- výška sloupce rtuti
$h_l$	[m]	- výška od nulové hladiny v místě 1
l	[m]	- délka potrubí
$\dot{M}$	[kg/s]	- hmotnostní průtok
p	[Pa]	- tlak
$p_b$	[Pa]	- barometrický tlak
$p_p$	[Pa]	- parciální tlak
$p_v$	[Pa]	- parciální tlak vodních par
$p''_{v,m}$	[Pa]	- parciální tlak sytých par při teplotě mokrého teploměru
$p_1$	[Pa]	- tlak v místě 1
$p_{1,cl}$	[Pa]	- tlak před clonou
r	[J/kg.K]	- měrná plynová konstanta
S	[m <sup>2</sup> ]	- plocha průřezu potrubí
T	[K]	- teplota vzduchu
$t_a$	[°C]	- teplota suchého teploměru
$t_m$	[°C]	- teplota mokrého teploměru
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /s]	- objemový průtok
w	[m/s]	- rychlost proudění
$w_{cl}$	[m/s]	- rychlost proudění clonou
$w_s$	[m/s]	- střední rychlost dle průřezu
$w_1$	[m/s]	- rychlost proudění v místě 1

$\beta$	[-]	- poměr průměrů
$\Delta p_{cl}$	[Pa]	- tlakový rozdíl clony
$\Delta h_1$	[mm]	- oprava na výšku vrchlíku
$\Delta p_{z1,2}$	[Pa]	- tlaková ztráta mezi úseky 1 a 2
$\varepsilon$	[-]	- expanzní součinitel
$\varepsilon_1$	[mm]	- ekvivalentní drsnost
$\kappa$	[-]	- Poissonova konstanta
$\lambda$	[-]	- součinitel třecích ztrát
$\mu$	[-]	- dynamická viskozita měřené tekutiny
$\xi$	[-]	- součinitel místních ztrát
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	- hustota tekutiny
$\rho_{Hg,0^\circ C}$	[kg/m <sup>3</sup> ]	- hustota rtuti při 0 °C (13 595,1 kg/m <sup>3</sup> )
$\tau$	[s]	- čas
$\nu$	[m <sup>2</sup> /s]	- kinematická viskozita



## 1. ÚVOD

Tato práce se zabývá především zkoumáním tlakové ztráty ohebných vzduchovodů – hadic. Tlaková ztráta je v praxi závislá na montáži vzduchovodu, která nemusí být vždy ideální. K tomu dochází v důsledku toho, že hadice jsou pružné a snadno deformovatelné. Lehce se zkroutí, obtížně se natahují a některé typy se mohou i „promáčknout“. To je velkou nevýhodou ohebných vzduchovodů.

Výrobce udává tlakové ztráty, které jsou z pravidla jen pro ideální stav – plně nataženou hadici. Proto je součástí práce především měření simulující situace, které jsou v praxi běžné.

Všechna experimentální činnost probíhala v laboratořích Ústavu techniky prostředí (Ú 12 116) na Fakultě strojní Českého vysokého učení technického v Praze.

## 2. TEORIE

V této kapitole jsou popsány základní principy proudění kapalin, vztahy pro výpočty vlastností vzduchu a principy tlakových ztrát.

### 2.1 Základní rovnice mechaniky tekutin

#### 2.1.1 Stavová rovnice

Mezi základní vlastnosti vzduchu, tedy stlačitelné tekutiny, patří jeho hustota, teplota a tlak. Pro vztahy mezi těmito veličinami platí stavová rovnice [1], [2]

$$p \frac{1}{\rho} = rT \quad (1),$$

kde

$p$	- tlak vzduchu [Pa]
$\rho$	- hustota vzduchu [ $\text{kg/m}^3$ ]
$r$	- měrná plynová konstanta [ $\text{J/kg.K}$ ]
$T$	- teplota vzduchu [K].

### 2.1.2 Rovnice kontinuity

Rovnice kontinuity nám říká, že hmotnostní průtok se v daném úseku potrubí nemění

$$\dot{M} = \dot{V}\rho = Sw\rho \quad (2),[1],$$

kde

$\dot{M}$  - hmotnostní průtok vzduchu [kg/s]

$\dot{V}$  - objemový průtok [m<sup>3</sup>/s]

$\rho$  - hustota vzduchu [kg/m<sup>3</sup>]

S - plocha průřezu potrubí [m<sup>2</sup>]

w - rychlost proudění [m/s].

Zároveň lze napsat podmínku kontinuity jako

$$\dot{M}_1 = \dot{M}_2 \quad (3),[1].$$

## 2.2 Vlastnosti vzduchu

### 2.2.1 Vlhkost vzduchu

Vlhkost vzduchu nám říká, kolik je ve vzduchu obsaženo vodní páry. Je to důležitý údaj, protože na něm závisí další vlastnosti vzduchu, například hustota. Vlhkost se dá měřit několika metodami, nejrozšířenější z nich je psychrometrická metoda. Tato metoda funguje na principu měření 2 teplot, suchého a mokrého teploměru. Rozdíl těchto teplot je psychrometrický rozdíl. Měření je popsáno Sprungovým vztahem [3]

$$p_v = p''_{v,m} - Ap_b(t_a - t_m) \quad (4),$$

kde

$p_v$  - parciální tlak vodních par [Pa]

$p''_{v,m}$  - parciální tlak sytých par při teplotě mokrého teploměru [Pa]

$p_b$  - barometrický tlak [Pa]

A - psychrometrický součinitel [1/K] ( $622 \cdot 10^{-6}$  1/K)

$t_a$  - teplota suchého teploměru [°C]

$t_m$  - teplota mokrého teploměru [°C].

A parciální tlak sytých par se stanoví ze vztahu [4]

$$p''_{v,m} = EXP \left( 23,58 - \frac{4044,2}{235,6+t_a} \right) \quad (5).$$

### 2.2.2 Tlak vzduchu

Tlak vzduchu, neboli atmosférický tlak, je tlak vyvolaný sloupcem vzduchu od místa měření až po horní hranici atmosféry [5]. Pro jeho měření se používají různé druhy barometrů, v laboratořích Ú 12 116 je staniční barometr. To je nádobkový manometr naplněný rtuť. Pro odečet tlaku slouží posuvný jezdec s noniem. Tím odečteme hodnoty  $h_b$  a výšku vrchlíku, z té následně podle tabulky 1 odečteme hodnotu  $\Delta h_1$ , což můžeme použít pro další výpočet [3]

$$\rho_{vzduchu} = \rho_{Hg,0^\circ C} \frac{(h_b + \Delta h_1)}{1000} g (1 - 0,000163 t_a) \quad (6), [6],$$

kde

$\rho_{Hg,0^\circ C}$  - hustota rtuti při 0 °C [kg/m<sup>3</sup>], (13 595,1 kg/m<sup>3</sup>)

$g$  - gravitační zrychlení [m/s<sup>2</sup>]

$t_a$  - teplota suchého teploměru [°C]

$h_b$  - výška sloupce rtuti [mm]

$\Delta h_1$  - oprava na výšku vrchlíku [mm].

Tabulka 1 – Tabulka kapilární deprese rtuti pro průměr trubice 7 mm [3]

$h_0-h_x$ [mm]	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8
$\Delta h_1$ [mm]	0,17	0,34	0,49	0,62	0,74	0,85	0,95	1,04	1,12

### 2.2.2 Hustota vzduchu

Pro běžné výpočty lze za hodnotu hustoty vzduchu dosadit hodnotu  $1,2 \text{ kg/m}^3$ . Pro přesnější výpočet při počítání vlhkého vzduchu je lepší použít následující vztah [6]

$$\rho = \frac{1}{287,11T} (p_b - 0,378p_p) \quad (7),$$

kde

T	- teplota vzduchu [K]
$p_b$	- barometrický tlak [Pa]
$p_p$	- parciální tlak [Pa].

### 2.3 Měření průtoku vzduchu

„Průtok je definován jako poměr množství tekutiny – objem  $V [\text{m}^3]$ , resp. hmotnost  $M [\text{kg}]$ , proteklé určitým průřezem za daný čas  $\tau [\text{s}]$ “ [citováno z [3]].

$$\dot{V} = \frac{dV}{d\tau} \quad \text{resp.} \quad \dot{M} = \frac{dM}{d\tau} \quad (8).$$

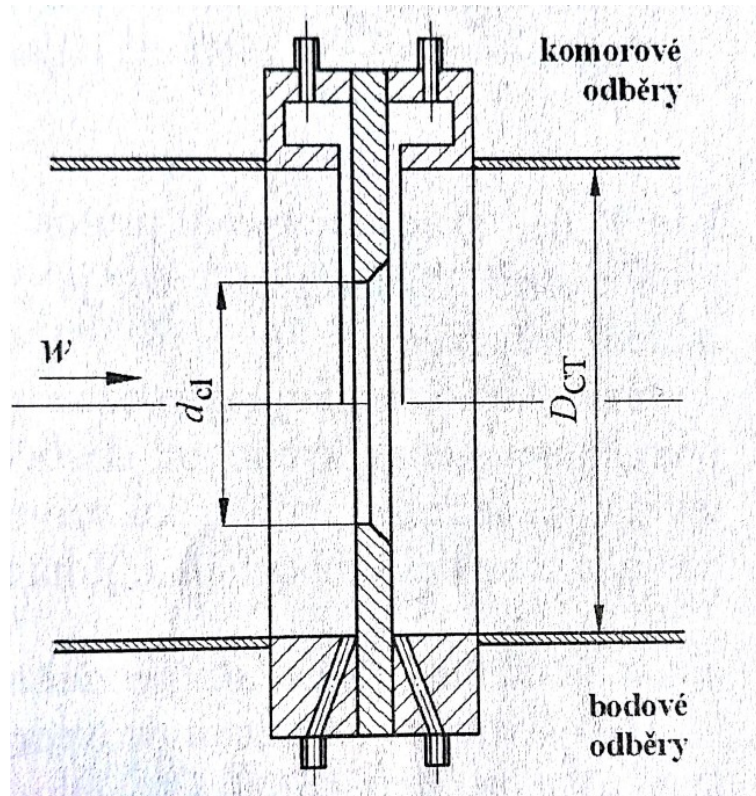
Pro měření průtoku vzduchu lze měřit několika různými způsoby, které se dají rozdělit do několika kategorií. Nejčastější dělení je na objemová, rychlostní a hmotnostní měřidla [7].

My se však zaměříme jen na jednu metodu, a to clony.

#### 2.3.1 Clony

Clony patří mezi rychlostní měřidla a fungují jako škrticí orgán. „Tato měřidla jsou založena na závislosti tlakové ztráty zúženého průřezu kanálu na protékajícím množství“ [citováno z [3]]. Clony jsou škrticí orgány se stálým průtočným průřezem [3].

Clona je prvek normovaného tvaru dle ČSN ISO 5167-1. Jde o tenkou kovovou desku, která má ostré hrany a má kuželové rozšíření otvoru. Tlak před a za clonou se snímá pomocí vyvrtaných otvorů v přírubě, kterými je clona připevněna [3].



Obrázek 1 – Škrticí orgán (clona)[3]

Následující vztahy v této kapitole jsou všechny citovány z normy ČSN ISO 5167-1 nebo ze zdroje [3].

Průtok je dán vztahem

$$\dot{V} = A_{cl} w_{cl} = \frac{\pi d_{cl}^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p_{cl}}{\rho}} \quad (9),$$

kde

- $A_{cl}$  - plocha otvoru clony [m<sup>2</sup>]
- $d_{cl}$  - průměr otvoru clony [m]
- $w_{cl}$  - rychlost proudění clonou [m/s]
- $\Delta p_{cl}$  - tlakový rozdíl clony [Pa]
- $\rho$  - hustota vzduchu [kg/m<sup>3</sup>].

Úhrnný součinitel průtoku vyjadřující vliv kontrakce a nižší rychlosti

$$\alpha = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \quad (10),$$

kde

C - součinitel průtoku [-]

$\beta$  - poměr průměrů [-].

Poměr průměrů se stanoví

$$\beta = \frac{d_{cl}}{D_{cl}} \quad (11),$$

kde průměry jsou označeny jako na obrázku 1.

Objemový průtok škrticím orgánem se vypočítá

$$\dot{V} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon \frac{\pi d_{cl}^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p_{cl}}{\rho}} \quad (12),$$

kde

$\varepsilon$  - expanzní součinitel [-].

Součinitel průtoku je funkcí Reynoldsova čísla a geometrie clony. Pro malé průtoky je velmi závislý na Reynoldsově čísle. Lze ho vypočítat jako

$$C = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,184\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5} \left(\frac{10^6}{Re}\right)^{0,75} \quad (13),$$

kde

Re - Reynoldsovo číslo [-].

Reynoldsovo číslo lze stanovit ze vztahu

$$Re = \frac{4\dot{V}\rho}{\pi D_{CT}\mu} \quad (14),$$

kde

- $\dot{V}$  - objemový průtok clonou [ $m^3/s$ ]
- $D_{CT}$  - průměr clonkové tratě [m]
- $\mu$  - dynamická viskozita měřené tekutiny [-].

Expanzní součinitel lze určit podle

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35\beta^4) \frac{\Delta p_{cl}}{\kappa p_{1,cl}} \quad (15),$$

kde

- $\kappa$  - Poissonova konstanta [-]
- $p_{1,cl}$  - tlak před clonou [Pa].

Poissonova konstanta se určuje podle počtu atomů plynu. Pro vzduch je rovna hodnotě 1,4 [-].

## 2.4 Tlakové ztráty

Při proudění tekutin potrubím dochází k tlakovým ztrátám, které jsou způsobeny třením molekul tekutiny. Tyto molekuly se třou jak o sebe navzájem (vnitřní tření), tak i o vnitřní povrch potrubí. K tomu dochází vlivem rozdílných rychlostí částic. Tím dochází k přeměně mechanické energie na teplo. Dochází k ohřevu tekutiny a jeho okolí. Takto vzniklé teplo (hydraulická ztráta) se projevuje jako pokles tlaku ve směru proudění v celé délce potrubí. Největší podíl na vzniku ztrátové energie mají vlastnosti tekutiny, drsnost a geometrie potrubí a režim proudění [8],[9].

Tlakové ztráty se dají eliminovat dodržováním základních pravidel. Např. minimalizováním tvarových kusů, zmenšením vzdálenosti mezi prvky nebo snížením drsnosti potrubí [9].

### 2.4.1 Energetická rovnice

Výpočty tlakové ztráty vycházejí ze zákona zachování energie proudící tekutiny. Pro reálnou tekutinu se zpravidla používá rozšířená verze Bernoulliovy rovnice, která popisuje energii tekutiny, jež proudí mezi místy 1 a 2 [1].

$$p_1 + h_1 \rho g + \frac{\rho}{2} w_1^2 = p_2 + h_2 \rho g + \frac{\rho}{2} w_2^2 + \Delta p_{z1,2} \quad (16),$$

kde

$p_1$	- tlak v místě 1 [Pa]
$h_1$	- výška od nulové hladiny v místě 1 [m]
$\rho$	- hustota tekutiny [kg/m <sup>3</sup> ]
$g$	- gravitační zrychlení [m/s <sup>2</sup> ]
$w_1$	- rychlost proudění v místě 1 [m/s]
$\Delta p_{z1,2}$	- tlaková ztráta mezi úseky 1 a 2 [Pa].

### 2.4.2 Režim proudění

Charakter proudění se dá rozdělit na 2 typy – laminární a turbulentní. U laminárního proudění probíhá pohyb částic tekutiny v jednotlivých vrstvách, které se vzájemně nemísí. U proudění turbulentního, které vzniká při vyšších rychlostech, se částice tekutiny pohybují chaotickým (neuspořádaným) pohybem napříč celým průřezem. K určení režimu proudění slouží Reynoldsovo číslo [1],[9]

$$Re = \frac{w_s d_h}{\nu} \quad (17),$$

kde

$w_s$	- střední rychlost dle průřezu [m/s]
$d_h$	- hydraulický průměr potrubí [m]
$\nu$	- kinematická viskozita [m <sup>2</sup> /s].



Zda je proudění laminární nebo turbulentní slouží kritická hodnota  $Re_{krit}$ .  $Re_{krit} = 2300$ . Pokud je  $Re \leq Re_{krit}$ , proudění je laminární. Turbulentní proudění je pro  $Re \geq 3000$ . Mezi těmito hodnotami jde o přechodovou oblast, kde turbulentní proudění není zcela vyvinuté. Tyto hodnoty platí pro potrubí kruhového průřezu [1].

Ve vzduchotechnickém potrubí jde z velké části o proudění turbulentní [1].

### 2.4.3 Tlakové ztráty třením

K tlakovým ztrátám třením dochází v rovných úsecích potrubí, které tekutinu vede. Vzduchovod klade proudící tekutině odpor a tím dochází k poklesu tlaku, který lze stanovit z Weisbachova vztahu [1],[9]

$$\Delta p_{tr} = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2}{2} \rho \quad (18),$$

kde

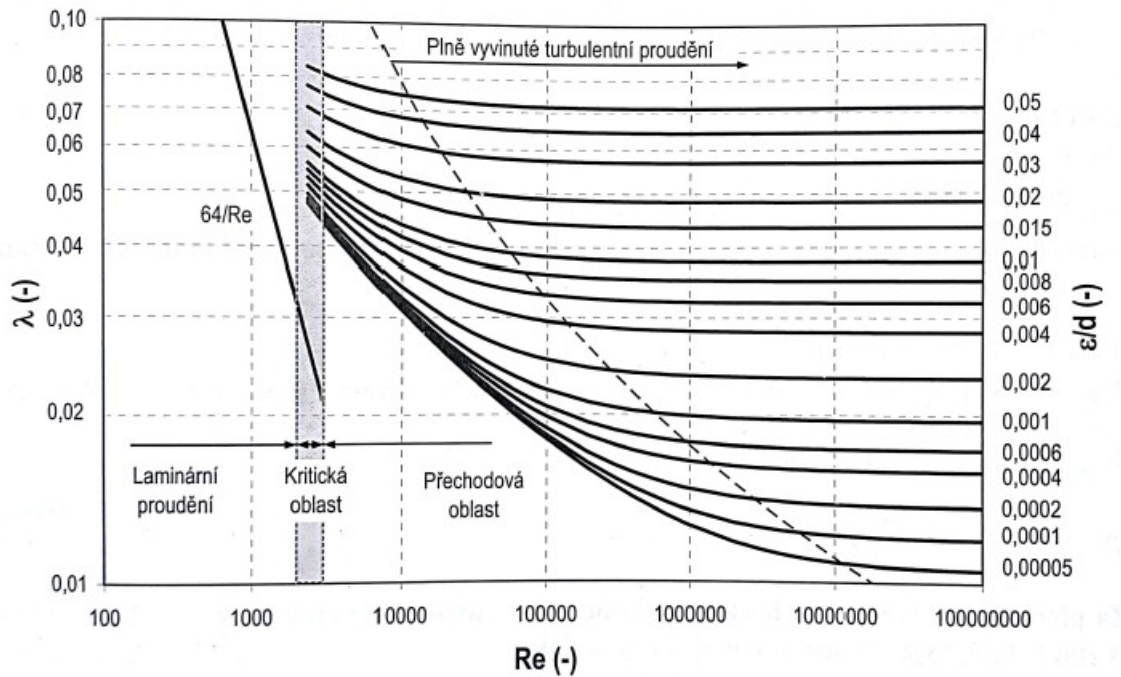
$\lambda$	- součinitel třecích ztrát [-]
$l$	- délka potrubí [m]
$d$	- vnitřní průměr potrubí [m]
$w$	- rychlost proudění tekutiny [m/s]
$\rho$	- hustota tekutiny [kg/m <sup>3</sup> ].

Součinitel třecích ztrát je závislý na Reynoldsově čísle a v případě turbulentního proudění i na poměrné drsnosti vnitřních stěn potrubí [1]

$$\lambda = f\left(Re, \frac{\varepsilon}{d}\right) \quad (19).$$

Přesné vztahy pro výpočty  $\lambda$ , v závislosti na typu proudění a typu potrubí jsou popsány v literatuře [10].

Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle je znázorněna na Moodyho diagramu na obr. 2.



Obrázek 2 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle [1]

#### 2.4.4 Tlakové ztráty místní

Tlakové ztráty místní jsou způsobeny v konkrétní části vzduchovodu. V tomto místě dochází k ovlivnění směru proudění, a tím i ke vzniku vírů. V důsledku toho dochází k další ztrátě mechanické energie. Těmito oblastmi jsou ohyby, rozšíření a zúžení potrubí, odbočky, klapky, regulátory, filtry, atd [8],[1].

$$\Delta p_{\text{míst}} = \xi \frac{w^2}{2} \rho \quad (20),$$

kde

$\xi$  - součinitel místních ztrát [-].

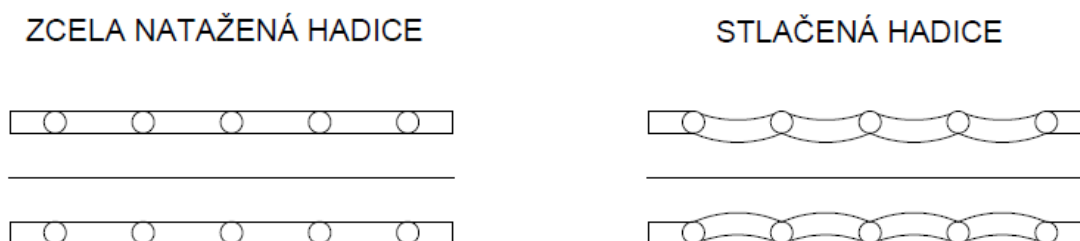
Místní ztráty se často přepočítávají na tlakové ztráty třením. Výrobci jednotlivých komponentů udávají vztahy pro tento přepočet na ekvivalentní délku.

## 2.5 Ohebné vzduchovody

Stejně tak jako u jakýchkoliv vzduchovodů, dochází k tlakovým ztrátám i u hadic. Ty jsou na zvyšování tlakové ztráty ještě náchylnější než např. plechové potrubí. Protože je potrubí flexibilní, nemusí být vždy instalováno v plně nataženém stavu. Často se stává, že je potrubí stlačeno v různých mírách. To vede k nadměrné tlakové ztrátě, zvýšení výkonu ventilátoru, snížení průtoku tekutiny a zvýšení hluku.

Existují rovnice a koeficienty, kterými se dají tlakové ztráty počítat. Problémem je ale neznalost ekvivalentní drsnosti  $\varepsilon_1$ . Tyto hodnoty nejsou pro hadice dostupné [11]. I jednotlivé zdroje se v těchto hodnotách liší. Například  $\varepsilon_1=0,15$  mm pro pozinkovaný plech,  $\varepsilon_1=0,007$  mm pro plastové potrubí,  $\varepsilon_1$  je 0,6 až 6 mm uvádí zdroj[1]. Rozsah 1,0 až 4,6 mm pro plastové potrubí udává literatura [11]. Další zdroje uvádějí opět jiné hodnoty. Tato čísla se liší více než čtyřikrát, a tak se i další výsledky výrazně liší, řádově o desítky procent [11]. Na této hodnotě je závislý součinitel třecích ztrát, který se proto nedá přesně stanovit.

Pokud je hadice více stlačena roste ekvivalentní drsnost. Zároveň se zmenšuje vnitřní průměr, viz obrázek 3.



Obrázek 3 – Ukázka stlačení hadice

V literatuře se dají dohledat výsledky mnoha experimentů, kde se tlakové ztráty měří. Ty jsou ovšem provedeny pouze na některých typech hadic, různých průměrech a v konkrétních napnutích potrubí, a proto se nedají použít celoplošně v praxi.

### **3. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ TLAKOVÝCH ZTRÁT**

#### **3.1 Cíl měření**

Cílem měření je experimentálně zjistit tlakové ztráty ohebných hadic a zjistit závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu ( $\Delta p = f(V)$  [Pa]). A také vyhodnotit závislost součinitele tření na Reynoldsově čísle ( $\lambda = f(Re)$ ).

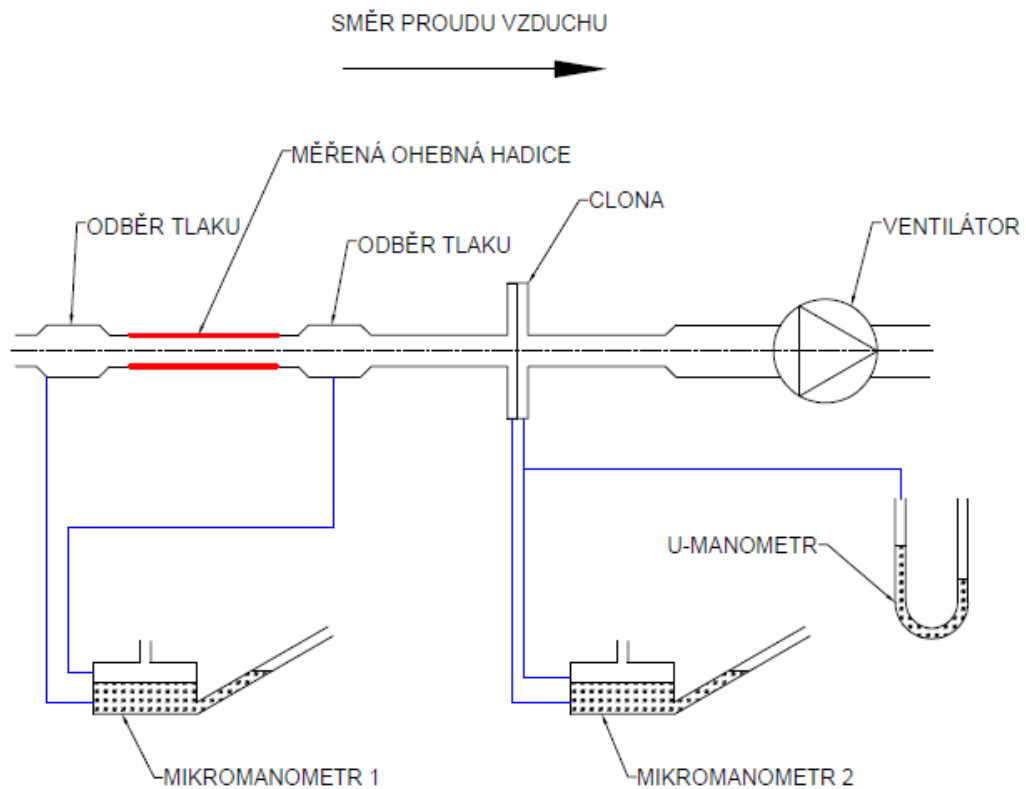
#### **3.2 Popis experimentu**

##### **3.2.1 Měřicí místo**

Měření probíhalo v halových laboratořích Ústavu techniky prostředí, které se nachází v areálu ČVUT v Dejvicích. Měření probíhalo na sestavené trati dle schématu níže. U měřené trati byl vyhrazen stůl, kde byly umístěny všechny měřicí přístroje a ovládání ventilátoru.

### 3.2.2 Schéma místa

Na schématu je červenou barvou vyznačen měřený ohebný vzduchovod, u kterého bylo nataženo délkové měřidlo. Modrou barvou jsou nakresleny všechny hadičky pro odběry tlaků.



Obrázek 4 – Schéma měřicí trati



*Obrázek 5 – Ukázka zapojení*

### 3.3 Použité přístroje a měřidla

a) Ventilátor K315 L EC

Ventilátor značky Systemair s maximálním průtokem vzduchu  $1732 \text{ m}^3/\text{h}$   
( $800 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $\Delta p_c = 600 \text{ Pa}$ ) [12]

b) Clonková trať pro měření průtoku vzduchu  $d_{cl} = 49,99 \text{ mm}$ ,  $D_{CT} = 106,7 \text{ mm}$

c) 2x mikromanometr

d) U-trubice

e) Staniční barometr

f) Assmanův psychrometr

g) Měřicí pásmo

### 3.4 Měřené vzduchovody

Experiment byl proveden na celkem 10 ohebných vzduchovodech značky Elektrodesign. Byly vybrány 4 typy, které se dále liší v použitých průměrech. Všechny hadice mají kruhový průřez. Jejich přesné parametry jsou uvedeny v následujících kapitolách.

#### 3.4.1 ED Flex LT

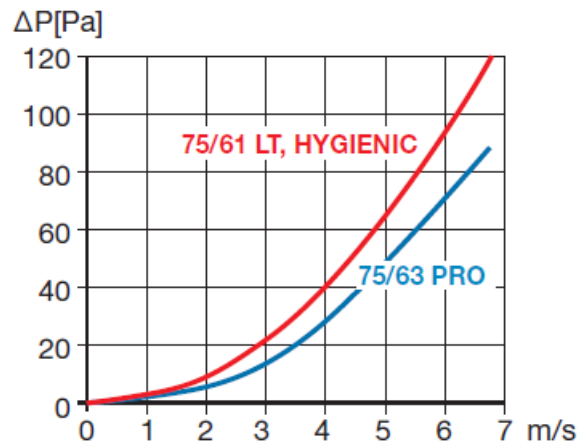
Při experimentu byla použita hadice ED FLEX 75/61 LT délky 11 m. Jedná se o flexibilní hadici z polyethylenu, která je vyrobena s hladkým povrchem uvnitř, který se snadno čistí, a tak je vzduchovod hygieničtější [13].

Tento vzduchovod není stlačitelný a výrobce ho prodává smotaný, viz obrázek 6. To usnadňuje manipulaci při montáži.



Obrázek 6 – Ukázka hadice ED Flex LT [13]

Následující graf popisuje tlakovou ztrátu ohebné hadice tak, jak ji udává výrobce. Graf je pro 10 m dlouhé potrubí.



Obrázek 7 – Tlaková ztráta dle výrobce, ED Flex [13]

### 3.4.2 Greyflex

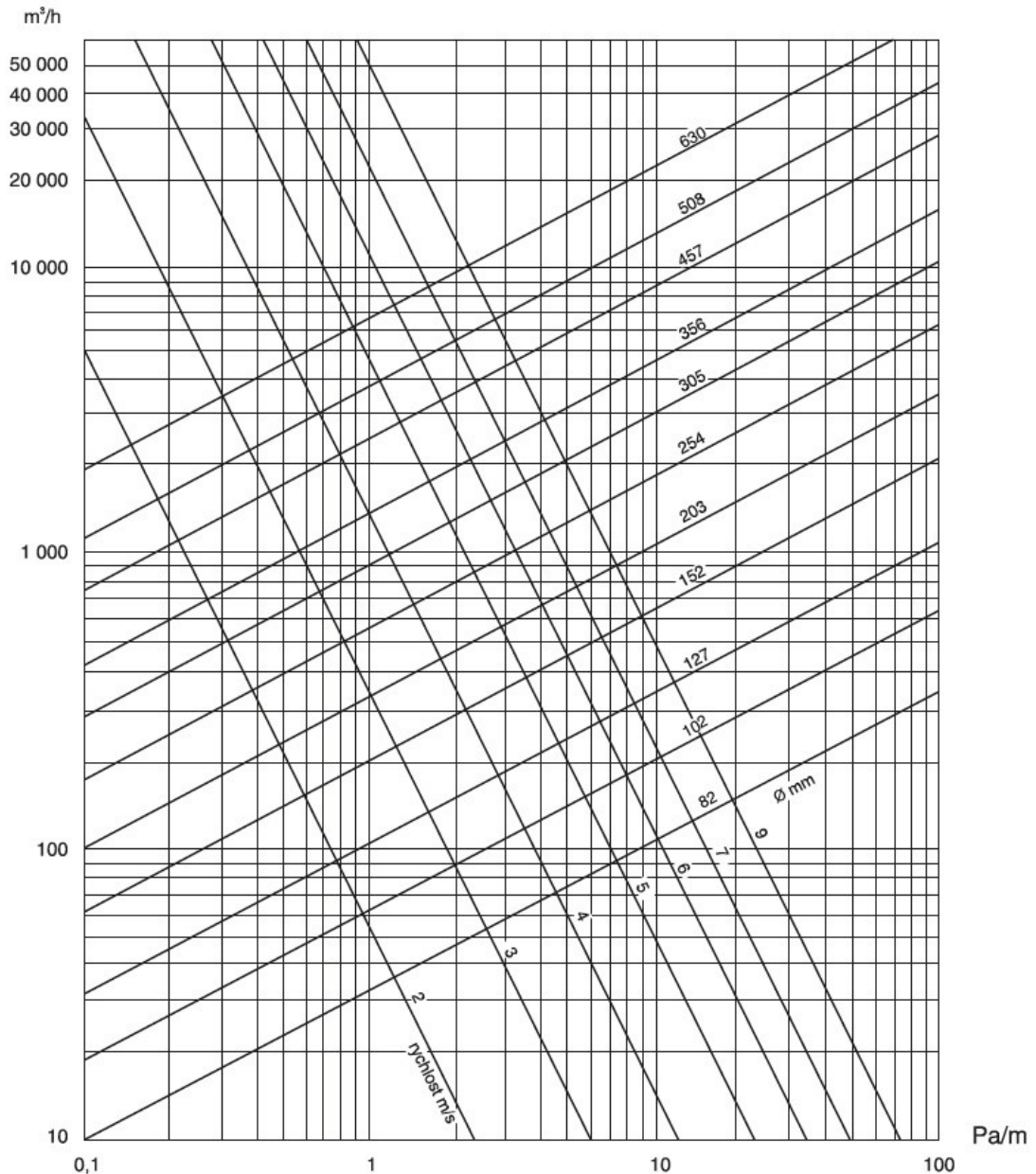
Hadice Greyflex je vyrobena ze dvou vrstev PVC s polyamidovou tkaninou a je zpevněna ocelovým drátem vinutým do spirály. Je velmi odolná proti mechanickému poškození. Provozní teplota hadice je -30 až +70 °C a maximální rychlost proudění vzduchu je 30 m/s [14].

Tento typ hadice byl použit ve 3 průměrech (80 mm, 100 mm a 125 mm) v délce 10 m.



Obrázek 8 – Hadice Greyflex [14]





Obrázek 9 – Tlaková ztráta dle výrobce, Greyflex[14]

### 3.4.3 Aluflex MI

Tato ohebná hadice je vyrobena z vrstveného hliníkového laminátu a je vyztužena ocelovým drátem. Konstrukce hadice je velmi podobná jako typ Greyflex. Maximální rychlost proudění je opět 30 m/s a teplota použití je -30 až +150 °C. Vzduchovod je vhodný pro nižší tlaky [15].

Graf pro odečet tlakové ztráty podle výrobce je stejný jako u typu hadice Greyflex.

Průměry použité pro experiment jsou 80 mm, 100 mm a 125 mm v délce 10 m.



Obrázek 10 – Hadice Aluflex MI [15]

#### 3.4.4 Semiflex

Semiflex je hadice vyrobená z hliníkové fólie a má velmi pevné falcování „Tripllock“. Kvůli tomuto je obtížné hadici plně natáhnout, ovšem pak zůstává v nataženém stavu. Hadice je polotuhá, to v praxi znamená, že drží svůj tvar. Je ale hodně náchylná na promáčknutí a jiné deformování, ke kterému může dojít i při opatrné manipulaci [16].

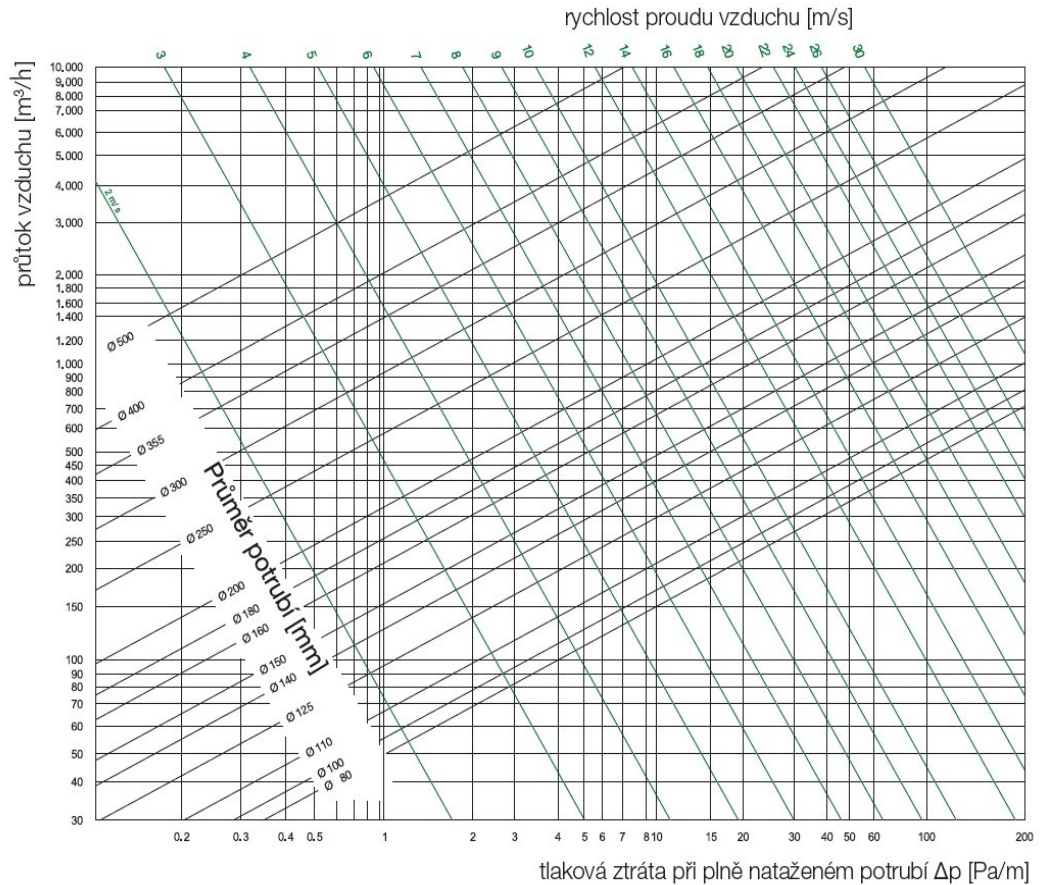
Provozní podmínky jsou max. rychlost do 25 m/s a teplota -25 až +200 °C. Kvůli tomuto je hadice mimo jiné vhodná i pro vložkování komínů a odtah spalin [16].

Pro experiment byly použity průměry 80 mm, 100 mm, 125 mm v délkách 5 m.



Obrázek 11 – Semiflex [16]

Tlakovou ztrátu pro hadice Semiflex udává výrovce takto (obrázek 12). V grafu však byla chyba v uvedených jednotkách.



Obrázek 12 – Tlaková ztráta dle výrobce, Semiflex [16]

### 3.5 Tabulka seznamu hadic

V následující tabulce jsou všechny použité hadice při experimentálním měření, a to včetně označení, které je dále používáno a vyskytuje se takto i na přiloženém CD. Poslední 4 řádky tabulky označují měření tlakové ztráty samostatné clonkové trati daného průměru.

Tabulka 2 – Seznam hadic

	výrobce	označení	vnější průměr	vnitřní průměr	délka
			[mm]	[mm]	[m]
1.1	Electrodesign	ED FLEX LT	75	61	11
2.1	Electrodesign	Greyflex 82	82	80	10
2.2	Electrodesign	Greyflex 102	102	100	10
2.3	Electrodesign	Greyflex 127	127	125	10
3.1	Electrodesign	Aluflex MI 82	82	80	10
3.2	Electrodesign	Aluflex MI 102	102	100	10
3.3	Electrodesign	Aluflex MI 127	127	125	10
4.1	Electrodesign	Semiflex 80/5		80	5
4.2	Electrodesign	Semiflex 100/5		100	5
4.3	Electrodesign	Semiflex 125/5		125	5
5.1				60	
6.1				80	
7.1				100	
8.1				125	

### 3.6 Podmínky v laboratoři

Podmínky v laboratoři se během měření lehce měnily, a tudíž během experimentu bylo potřeba několikrát měřit teplotu suchého a mokrého teploměru a na staničním barometru odečítat výšku sloupce  $h_b$  a výšku vrchlíku rtuti  $\Delta h_1$ . Tyto hodnoty byly odečítány vždy před měřením každé z hadic, aby bylo měření co nejpřesnější.

### 3.7 Popis měření

Před začátkem jednotlivých měření je potřeba nainstalovat měřený ohebný vzduchovod na trať. K tomu slouží objímky s gumovým těsněním, které upevňují hadici ve správné poloze. Dále je nutné spojit vzduchovod s pevným potrubím, kde je na clonkové trati odebírán statický tlak. Toto spojení musí být těsné, aby nedocházelo k úniku vzduchu. Každé spojení bylo tedy omotáno hliníkovou lepicí páskou a ještě byl použit rychloupínací pásek se zámkem. Ten dělá spojení pevnější a potrubí se dá lépe napnout, aniž by došlo k porušení spoje. Před finálním upevněním spoje je vhodné vyznačit si místo, kde je přechod mezi hadicí a pevným dílem. Délku vzduchovodu musíme následně změřit a u pevnějších hadic nelze konec pevného kusu potrubí dobře „nahmatat“.

Každý vzduchovod byl měřen ve 3 polohách. V první byl natažen na maximální délku a v následujících dvou povolen vždy o cca 20 cm. Když je ohebný vzduchovod povolen, je potřeba rovnoměrně rozdělit jeho provedení do částí mezi objímky, které ho podepírají.

Pokud máme připraven vzduchovod, změřenou měřicím pásmem jeho délku a odečteny všechny hodnoty podmínek v laboratoři (kapitola 3.6), můžeme provést samotné měření. Před spuštěním ventilátoru ještě sklopíme mikromanometry do potřebné pozice. Mikromanometr 1, kterým měříme tlakovou ztrátu hadice do pozice 1:8 a mikromanometr 2, kterým měříme tlakovou ztrátu clony do pozice 1:4. Dále dáme mikromanometry do vodorovné polohy pomocí vestavěné vodováhy a odečteme klidové hodnoty. Pak můžeme spustit ventilátor a pomocí otáčením potenciometru měnit průtok vzduchu. Měření provedeme pro 15 až 20 různých průtoků vzduchu a při každém nastavení odečteme hodnoty z mikromanometrů a U-manometru. Vždy je potřeba počkat na ustálení proudění a až poté odečítat a zaznamenávat hodnoty manometrů. Po ukončení měření nastavíme hadice do další pozice a měření opakujeme.

Posledním úkonem je změřit tlakovou ztrátu samostatné trati bez hadice. To jsou hodnoty, které budeme odečítat od předchozích měření.

Měření takto opakuje pro všechny hadice.

## 4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ

Všechny naměřené hodnoty jsou v tabulce (Tabulka 7), která je na příloženém CD. Tabulka je velmi rozsáhlá, a proto nejsou v následujících kapitolách kompletní výsledky.

Ve všech následujících grafech je použita následující legenda:

- a) červeným čtverečkem je značena hadice plně natažená,
- b) zeleným trojúhelníčkem je vyznačen stav, kdy byl vzduchovod povolen o přibližně 20 cm,
- c) fialovým křížkem je značen stav zkrácený o dalších cca 20 cm,
- d) tmavě modrým kosočtvercem jsou vytvořeny křivky podle podkladů výrobce,

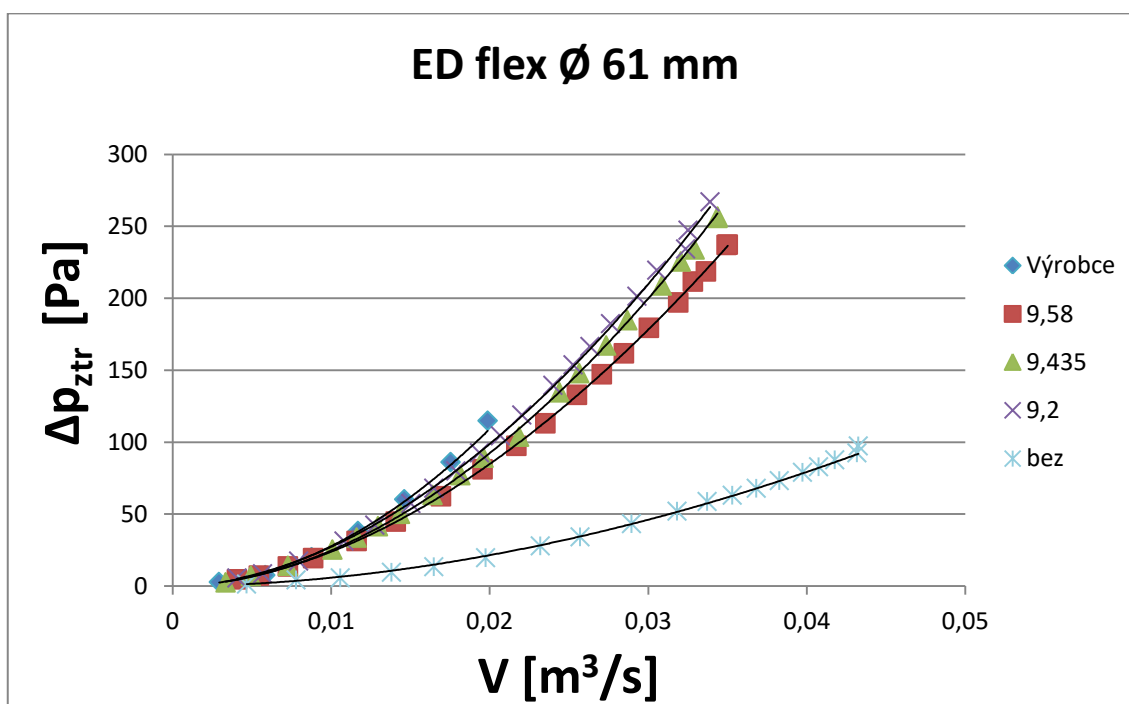
- e) světle modrá hvězdička vyjadřuje měření tlakové ztráty samostatné měřicí tratě bez hadice.

Zároveň čísla psaná v legendě jsou délky ohebného potrubí uvedené v metrech.

#### 4.1 Vyhodnocení závislosti tlakové ztráty na průtoku vzduchu

V této kapitole jsou shrnuty výsledky zkoumající vliv tlakové ztráty na natažení hadic.

##### 4.1.1 Vyhodnocení hadice ED FLEX LT



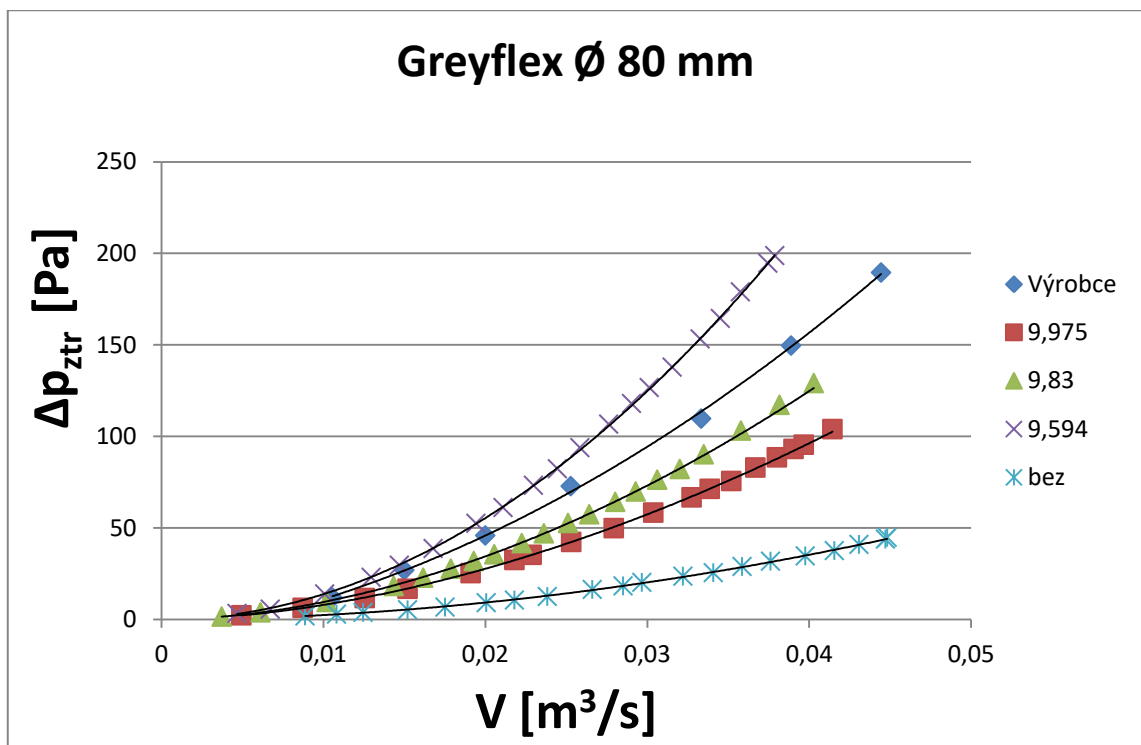
Obrázek 13 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, ED Flex Ø61 mm

Z grafu je patrné, že křivka, kterou výrobce poskytuje, je pro malý rozsah průtoků. Křivku si však můžeme představit v prodloužení zobrazeného trendu. Zároveň můžeme vidět, že všechny naměřené křivky leží v oblasti menších průtoků (do 0,01 m<sup>3</sup>/s) na křivce výrobce a poté se nachází pod ní. To je výsledek, který je v rozporu s očekáváním. Jev se dá vysvětlit buď nepřesným odečítáním z grafu výrobce nebo špatným změřením délky hadice. Délka hadice hraje ve výsledcích velkým vliv. Pokud

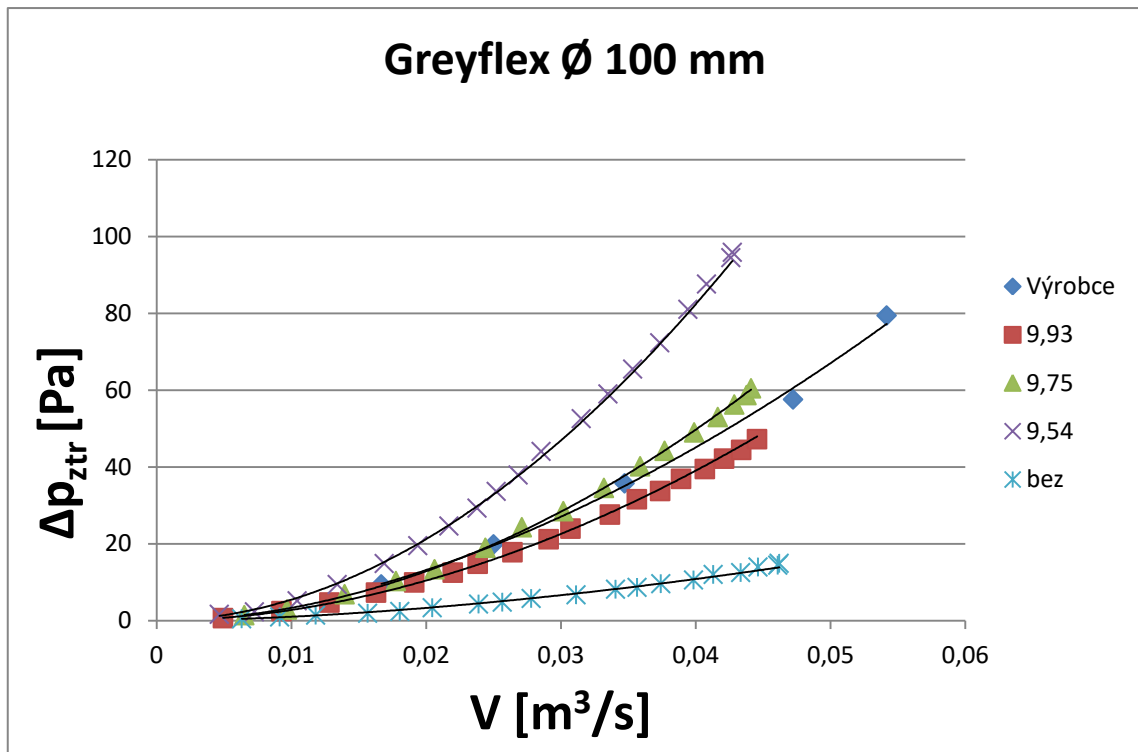
bychom ale křivku výrobce chtěli mít ve shodě s plně nataženou hadicí našeho měření, museli bychom délku hadice změřit až o 1,5 m kratší, a to je nepravděpodobné.

Jestli-že se zaměříme jen na samotné měření, vidíme, že s povoláním ohebného vzduchovodu tlaková ztráta roste. Zkrácení o 14,5 cm způsobí u této hadice nárůst ztráty 10 %.

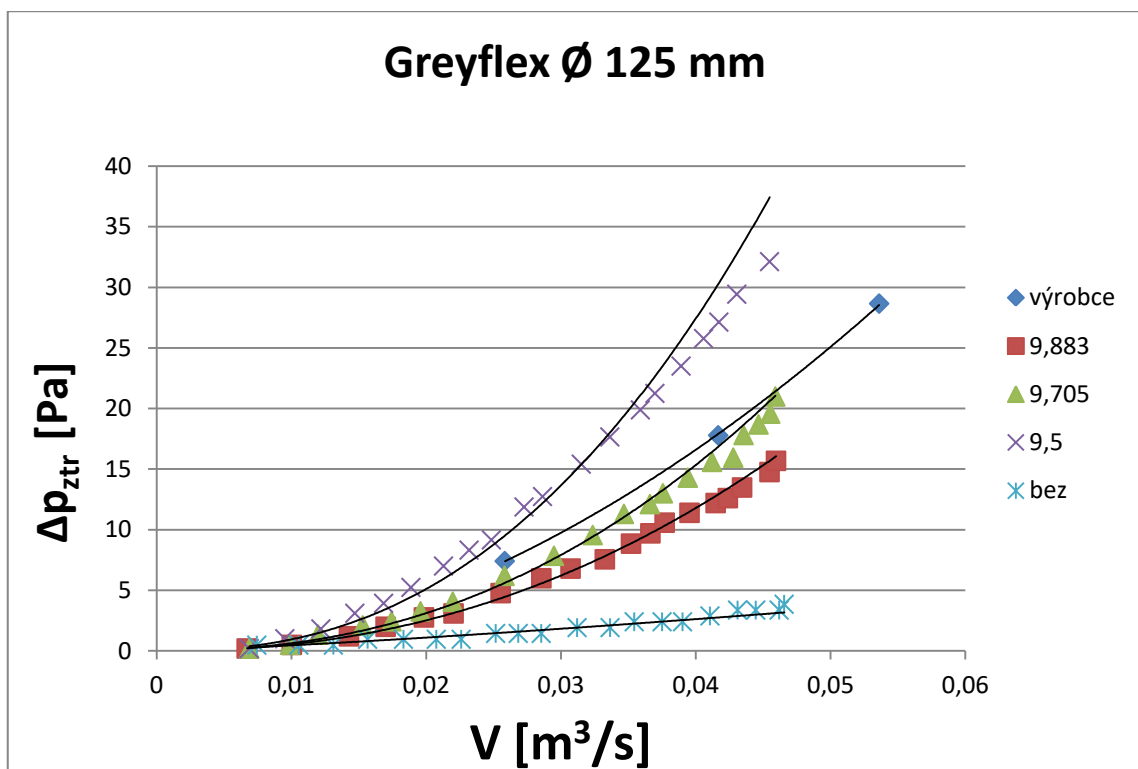
#### 4.1.2 Vyhodnocení hadic Greyflex



Obrázek 14 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu,  
Greyflex Ø 80 mm



Obrázek 15 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu,  
Greyflex Ø 100 mm



Obrázek 16 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu,  
Greyflex Ø 125 mm



Při pohledu na grafy na obr. 14 až 16 vidíme, že při neúplném natažení hadic dochází i tohoto typu k velmi výraznému nárůstu tlakové ztráty. Při povolení vzduchovodu o 17,8 cm, tedy o 1,8 % z původní délky 9,883 m, došlo k nárůstu o přibližně 30 %.

Při měření, kde bylo ohybné potrubí zkráceno o 3,88 %, došlo k nárůstu ztráty až 1,5x. To platí bez ohledu na průměr potrubí. Tyto hodnoty jsou velmi vysoké. V reálné instalaci by nárůst nemusel být tak vysoký. Potrubí, které bylo měřeno v nenapnutém stavu, se mezi podpěrami prohýbalo. Tím došlo k navýšení tlakové ztráty, ke kterému by při použití více pomocných podpěr nemuselo dojít.

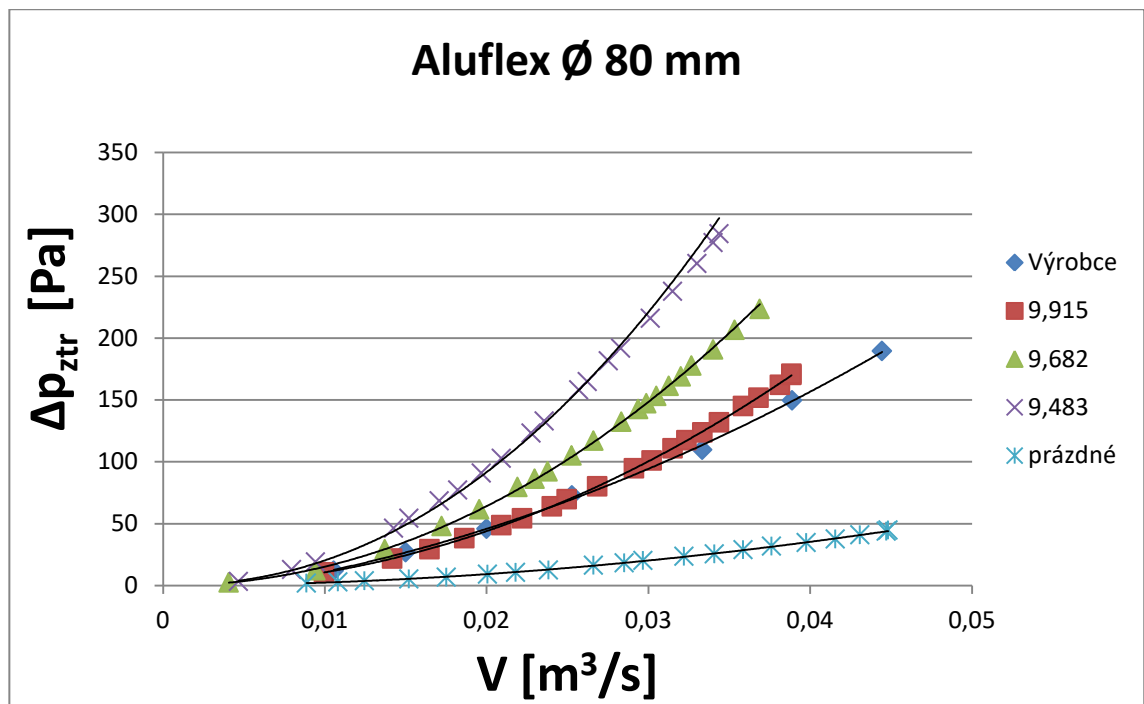
Křivka získaná od výrobce je v podobné poloze vůči ostatním výsledkům jako při měření hadice ED FLEX LT. Opět pro to existuje stejné vysvětlení. Je možné, že výrobce neudává hodnoty zcela přesné, v podkladech sám píše, že hodnoty jsou orientační a shodné pro 3 typy potrubí podobných vlastností [14]. Odečet pro průměr potrubí 125 mm není z podkladů pro malé průtoky možný.

Tabulka 3 – Rozdíl tlakových ztrát v procentech, Greyflex  $\varnothing$  80 mm

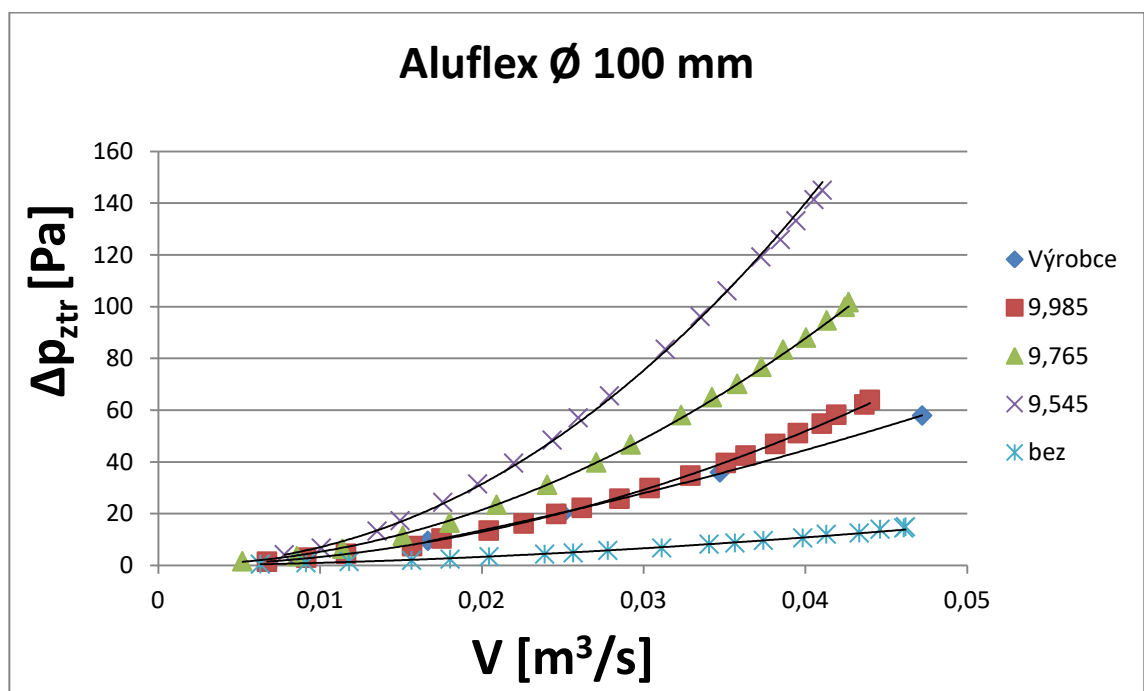
průtok V [m <sup>3</sup> /s]	napnuté $\Delta p_{ztr}$ [Pa]	1. povolení		2. povolení	
		$\Delta p_{ztr}$	rozdíl	$\Delta p_{ztr}$	rozdíl
		[Pa]	[%]	[Pa]	[%]
0,006689	0,2	0,3	24,3	0,4	78,0
0,010033	0,5	0,6	27,8	1,0	92,5
0,014276	1,2	1,4	19,1	2,3	87,3
0,016996	2,0	2,1	7,6	3,4	72,9
0,019838	2,8	3,1	10,6	5,0	81,2
0,022036	3,1	3,9	25,9	6,5	108,9
0,02553	4,8	5,5	14,5	9,2	93,6
0,02855	6,0	7,1	17,9	12,1	102,0
0,030717	6,8	8,4	23,1	14,5	112,8
0,033261	7,6	10,0	32,8	17,5	131,9
0,035203	8,9	11,4	29,2	20,1	127,2
0,036641	9,7	12,5	29,2	22,2	128,4
0,037699	10,6	13,4	26,5	23,8	124,4
0,039543	11,4	14,9	31,1	26,7	133,9
0,041481	12,2	16,7	36,7	29,9	145,4
0,042387	12,6	17,5	39,0	31,6	150,2
0,043442	13,5	18,6	37,5	33,5	148,3
0,045479	14,8	20,6	39,6	37,4	153,5
0,04596	15,7	21,1	34,6	38,4	144,7

Z tabulky je vidět nárůst tlakové ztráty pro hadici Greyflex průměru 80 mm. Rozdíl se pohybuje při komprimování délky o 14,5 cm okolo 35 %. Při povolení hadice o 38,1 cm došlo k nárůstu ztráty až o 150 %.

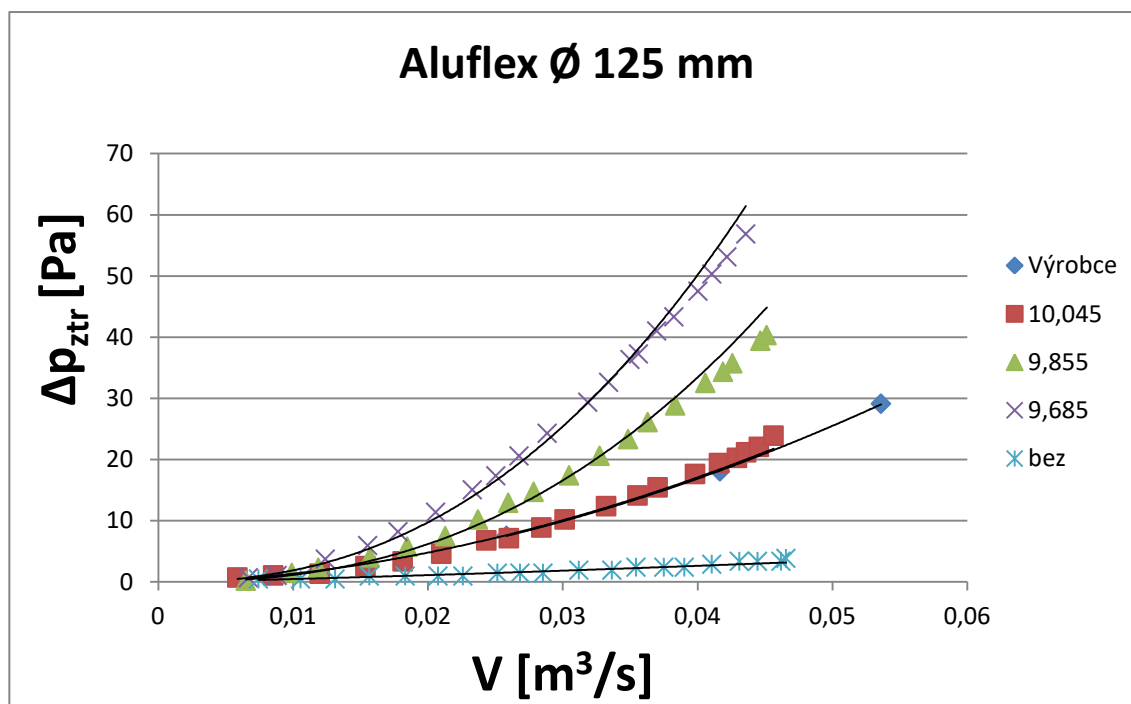
## 4.1.3 Vyhodnocení hadic Aluflex



Obrázek 17 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, Aluflex Ø 80 mm



Obrázek 18 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, Aluflex Ø 100 mm



Obrázek 19 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, Aluflex Ø 125 mm

Z obrázků 17 až 19, kde jsou grafy vyhodnocení měření pro vzduchovody Aluflex, je patrné, že měření plně nataženého potrubí je ve shodě s výrobcem. Křivky se od sebe odchyľují minimálně.

Z grafů lze vyčíst, že povolení hadice, které bylo 19 cm a poté dalších 17 cm, způsobilo nárůst tlakové ztráty rovnoměrně. To u předchozích typů ohebných vzduchovodů nebylo možné tvrdit. Zároveň je procentuální rozdíl vnesen do tabulky 4. Ta ukazuje, že rozdíl v procentech je dvojnásobný.

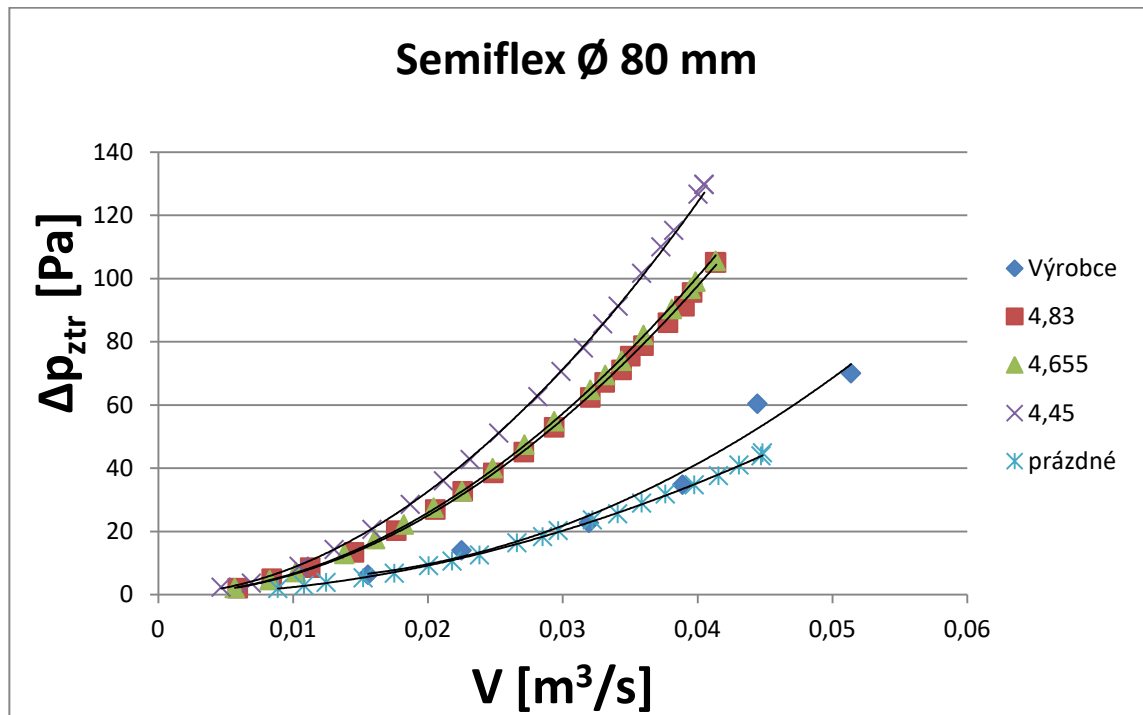
Tabulka 4 – Rozdíl tlakových ztrát v procentech, Aluflex Ø 125 mm

průtok V [m <sup>3</sup> /s]	napnuté	1. povolení		2. povolení	
	$\Delta p_{ztr}$	$\Delta p_{ztr}$	rozdíl	$\Delta p_{ztr}$	rozdíl
	[Pa]	[Pa]	[%]	[Pa]	[%]
0,006	0,7	0,3	-57,0	0,5	-26,2
0,009	1,1	0,8	-27,3	1,3	21,6
0,012	1,3	1,8	31,6	2,9	114,9
0,015	2,6	3,3	26,1	5,2	102,4
0,018	3,4	4,9	44,6	7,7	129,5
0,021	4,6	7,0	50,7	10,9	136,7
0,024	6,8	10,0	46,8	15,5	128,2
0,026	7,1	11,7	63,9	18,1	153,6
0,028	8,9	14,5	63,4	22,4	151,2
0,030	10,2	16,8	64,4	25,7	151,7
0,033	12,4	21,3	71,7	32,3	161,1
0,036	14,1	25,1	77,5	38,0	168,6
0,037	15,5	27,7	79,3	41,8	170,6
0,040	17,6	33,1	87,4	49,6	181,3
0,042	19,4	36,8	89,3	55,0	183,3
0,043	20,3	39,7	95,8	59,3	192,4
0,044	21,2	41,3	94,7	61,6	190,5
0,045	22,1	43,5	96,9	64,7	193,3
0,046	23,9	46,1	92,7	68,5	186,6

Model Aluflex lze z měření vyhodnotit jako nejvíce předvídatelný. Celé měření tohoto typu vyšlo dle předpokladů.

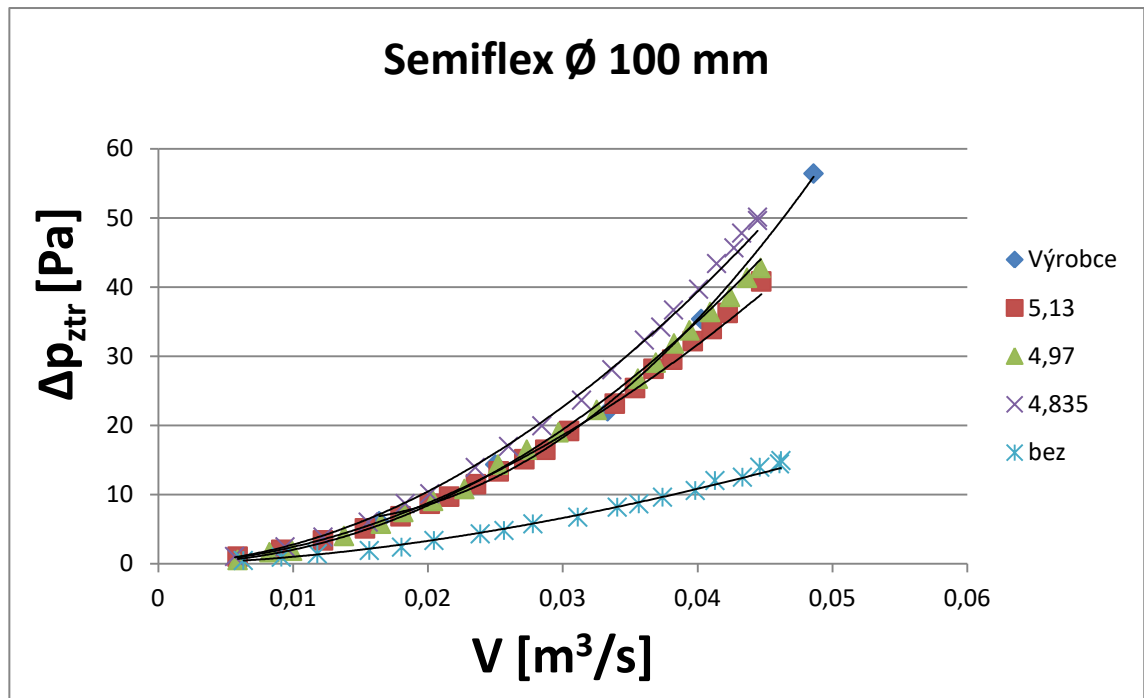
#### 4.1.4 Vyhodnocení hadic Semiflex

Hadice Semiflex byly měřeny v poloviční délce než ostatní modelové řady.

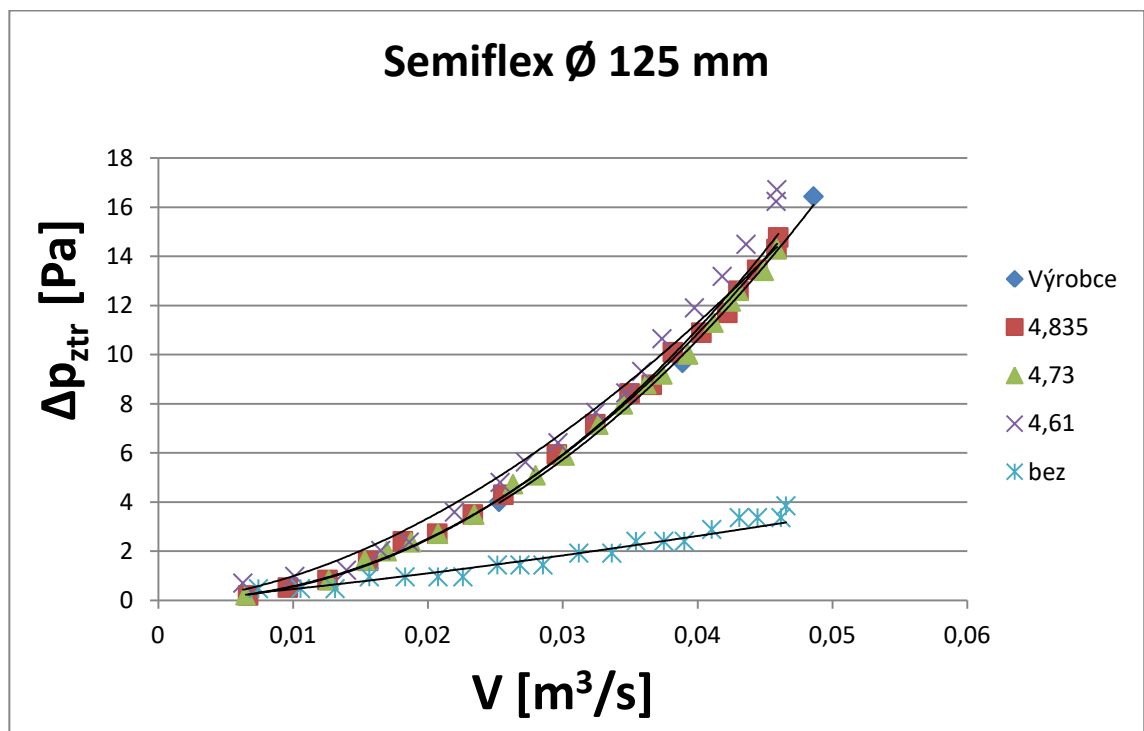


Obrázek 20 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu,  
Semiflex Ø 80 mm

Graf z měření hadice Semiflex o průměru 80 mm vychází odlišně od grafů dalších průměrů. To je dle mého názoru způsobeno špatnou instalací potrubí. Tato hadice se velmi snadno poškodí. Byla montována na měřicí trať jako první, a proto z neznalosti materiálu došlo k poškození pláště na několika místech. Promáčknutí hadice, které není na koncích potrubí, je nevratné. Stejně tak vzduchovod se nedá vrátit do původního stavu, ve kterém byl zakoupen a zůstává natažen.



Obrázek 21 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu,  
Semiflex Ø 100 mm



Obrázek 22 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu,  
Semiflex Ø 125 mm

Na obrázku 21 a 22 vidíme tlakové ztráty hliníkového potrubí Semiflex průměrů 100 a 125 mm. Měřená potrubí byla délky 5 m, což je polovina ostatních modelů, velikost komprese se tedy také zmenšila – přibližně na 10 až 15 cm. Z grafů je patrná jen malá změna rozdílu tlaků, proto můžeme soudit, že u tohoto ohebného vzduchovodu nehraje komprese velkou roli.

*Tabulka 5 – Rozdíl tlakových ztrát v procentech, Semiflex Ø 125 mm*

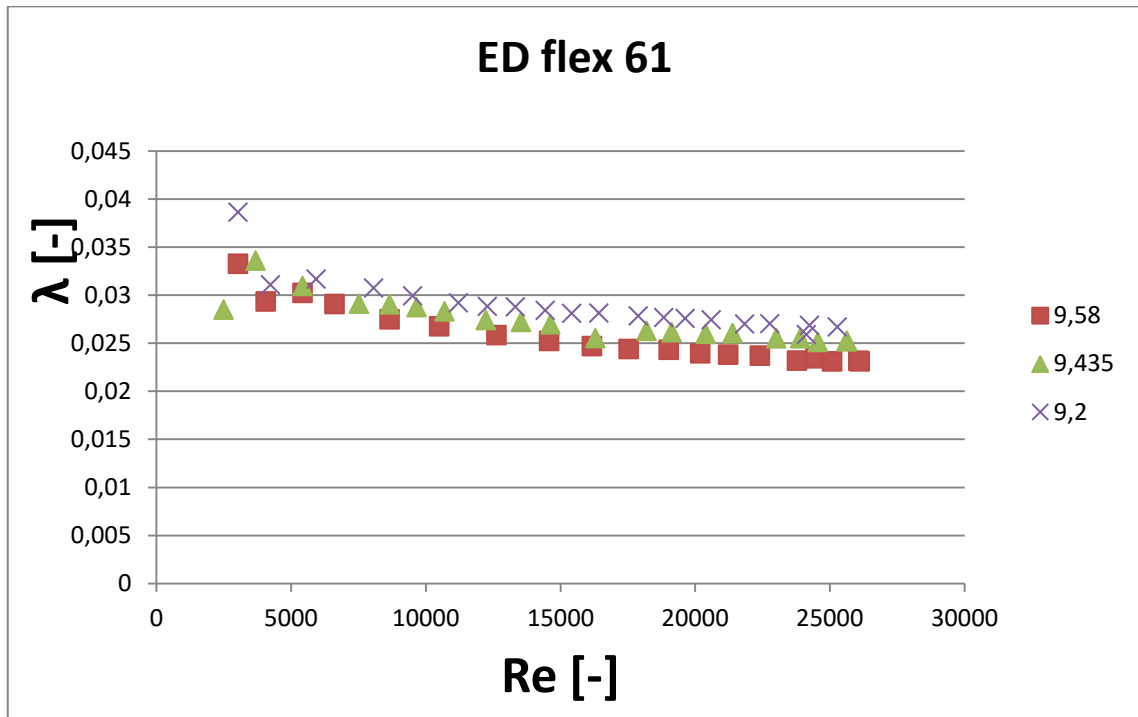
průtok V [m <sup>3</sup> /s]	napnuté $\Delta p_{ztr}$ [Pa]	1. povolení		2. povolení	
		$\Delta p_{ztr}$ [Pa]	rozdíl [%]	$\Delta p_{ztr}$ [Pa]	rozdíl [%]
0,007	0,2	0,2	20,9	0,5	137,4
0,010	0,5	0,5	1,9	0,9	75,8
0,013	0,8	0,9	12,7	1,5	76,9
0,016	1,6	1,5	-8,1	2,2	33,7
0,018	2,4	2,0	-15,0	2,8	17,1
0,021	2,7	2,7	-0,6	3,6	30,7
0,023	3,5	3,5	-0,5	4,4	25,4
0,026	4,3	4,2	-1,6	5,2	20,0
0,030	5,9	5,7	-3,4	6,7	11,9
0,032	7,2	7,0	-2,9	7,8	9,0
0,035	8,4	8,2	-3,0	8,9	6,0
0,037	8,8	9,0	2,6	9,7	10,2
0,038	10,1	9,8	-2,6	10,4	3,1
0,040	10,9	11,0	1,2	11,4	5,1
0,042	11,7	12,2	3,9	12,4	6,1
0,043	12,6	12,7	0,5	12,9	2,0
0,044	13,5	13,6	0,7	13,6	1,0
0,046	14,3	14,5	1,3	14,4	0,5
0,046	14,8	14,6	-1,3	14,4	-2,2

V tabulce 5 se nacházejí ve sloupcích s procenty i záporná čísla. To je způsobeno nepřesnostmi při odečítání hodnot z mikromanometrů. Stejně tak hodnoty v prvních řádcích tabulky, které jsou vysoké, jsou vlivem nízkého průtoku vzduchu potrubím zavádějící. Celkově se hodnoty liší od měření v nataženém stavu minimálně, a tak lze závěr, že u tohoto typu hadice nehraje komprese významný vliv, zopakovat.



## 4.2 Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle

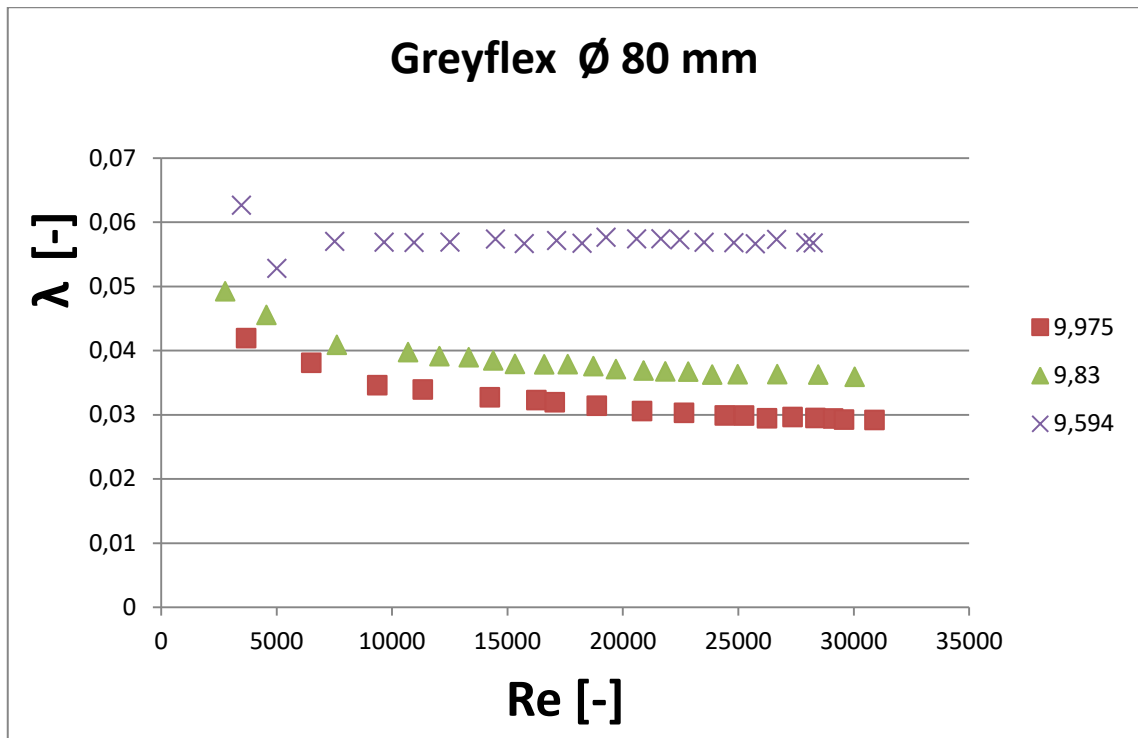
### 4.2.1 Vyhodnocení hadic ED Flex LT



Obrázek 23 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle,  
ED Flex LT Ø 61 mm

U ohebného vzduchovodu ED Flex LT došlo k nárůstu  $\lambda$  řádově o 0,01. S rostoucím Reynoldsovým číslem součinitel třecích ztrát mírně klesá.

#### 4.2.2 Vyhodnocení hadic Greyflex

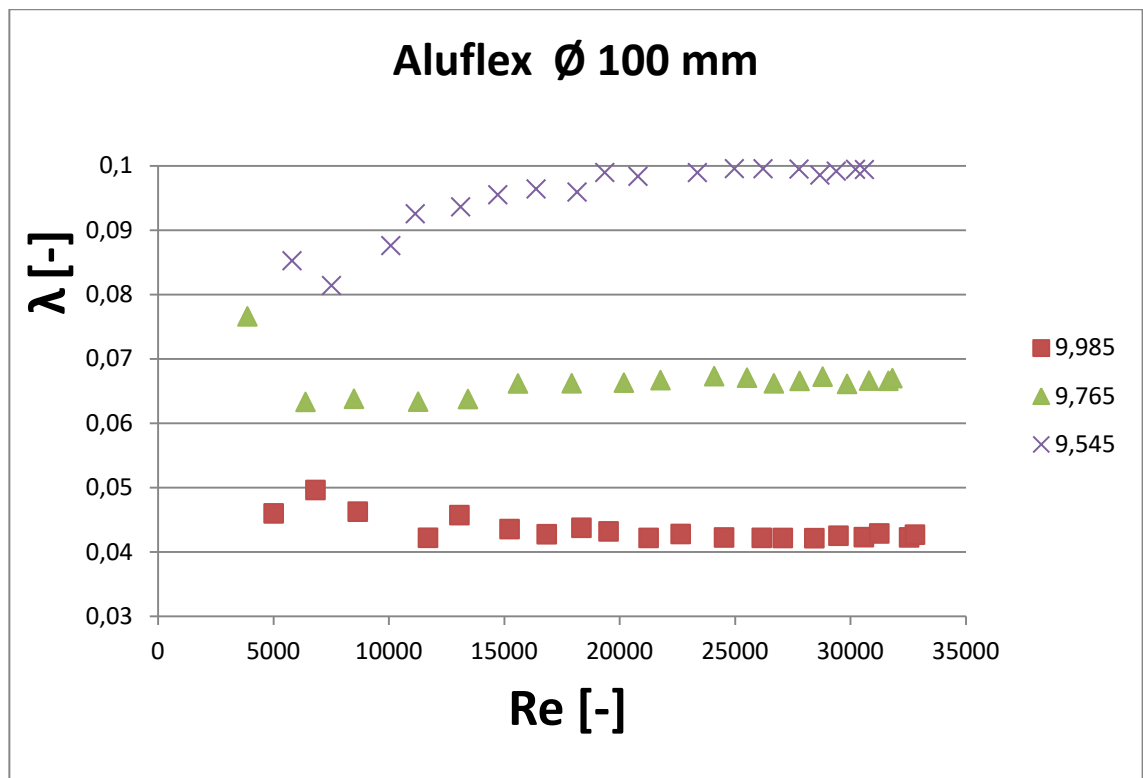


Obrázek 24 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle, Greyflex Ø 80 mm

Na grafu (obrázek 24) vidíme závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle. U hadic Greyflex dochází k výraznějšímu nárůstu  $\lambda$  až u druhého stlačení. U plného natažení jsou hodnoty  $\lambda$  okolo 0,03. Při stlačení hadice o 3,8 % došlo k nárůstu tohoto součinitele skoro dvojnásobně.

Graf pro průměr hadice Ø 125 mm je s tímto z většiny shodný. U průměru 100 mm došlo ale k většímu nárůstu u druhého povolení hadice. Hodnoty  $\lambda$  vycházejí nad hodnotou 0,06.

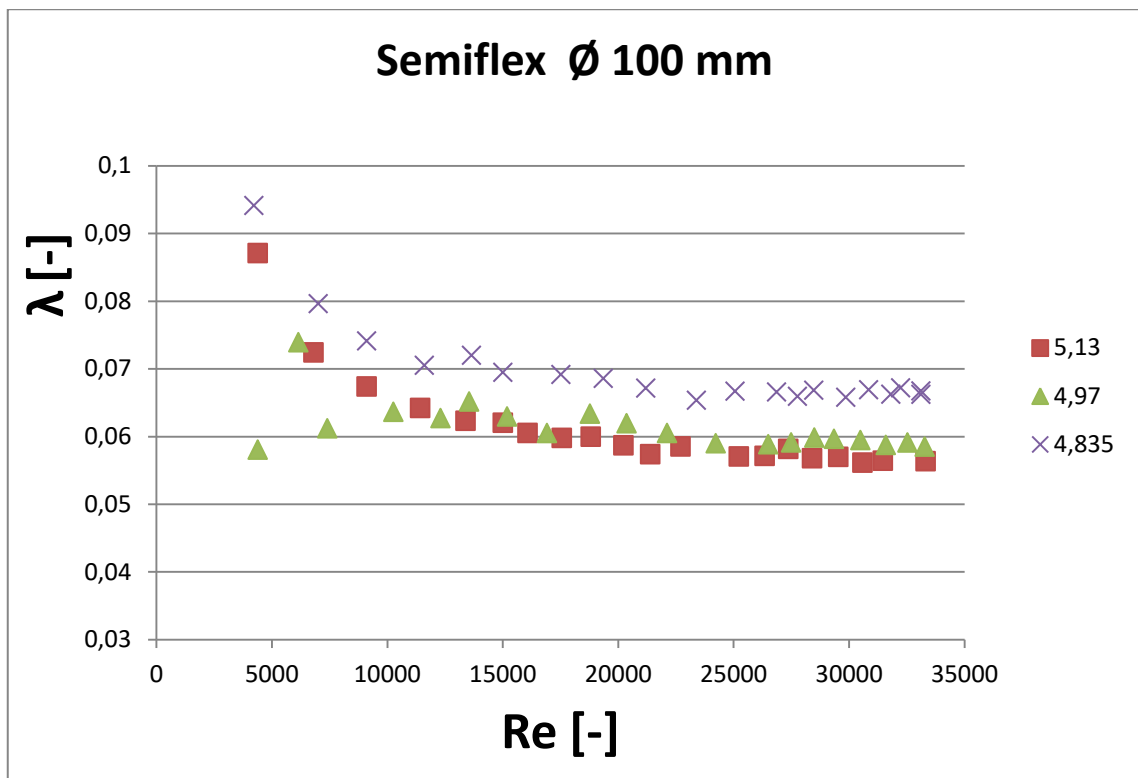
### 4.2.3 Vyhodnocení hadic Aluflex



Obrázek 25 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle,  
Aluflex Ø 100 mm

Pro hadice Aluflex byl vybrán jeden zástupce z daných 3 průměrů, protože všechny 3 grafy vyšly totožně. Z kapitoly 2.4.3 víme, že  $\lambda$  je funkcí  $Re$  a poměrné drsnosti vnitřních stěn potrubí  $\varepsilon/d$ . Z grafu je vidět, že součinitel třecích ztrát pro jednotlivé délky natažení neroste.

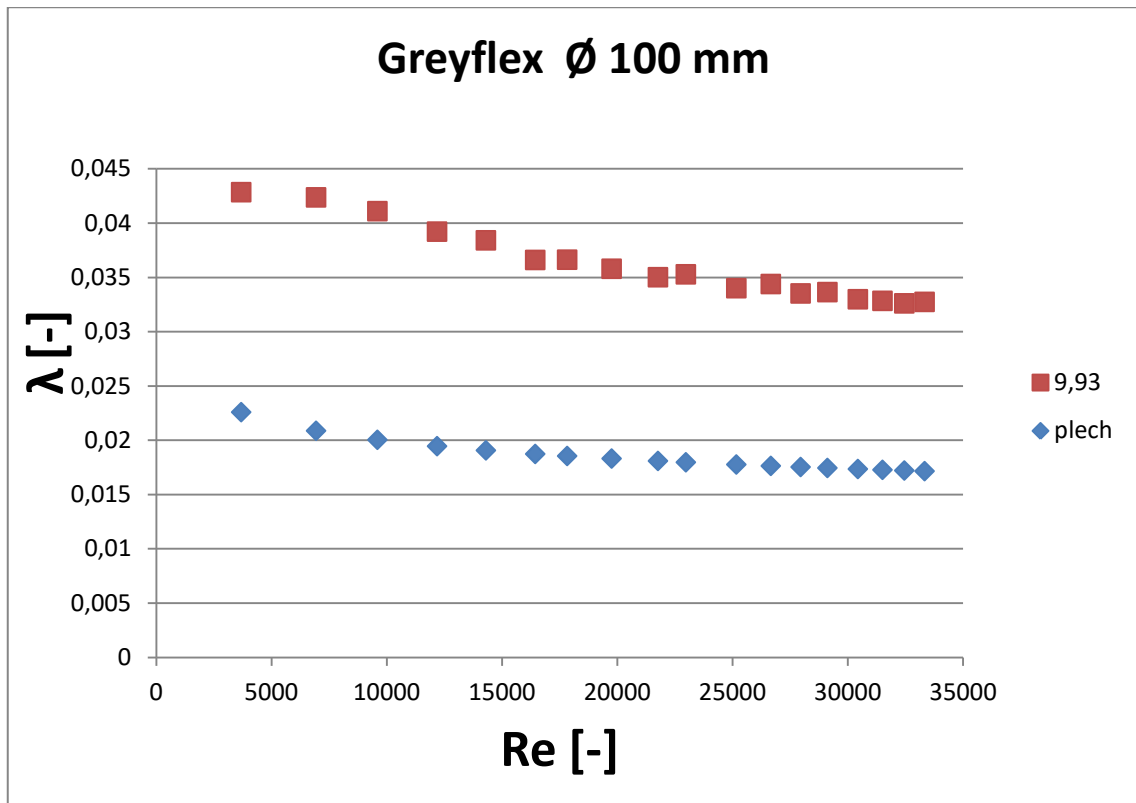
#### 4.2.4 Vyhodnocení hadic Semiflex



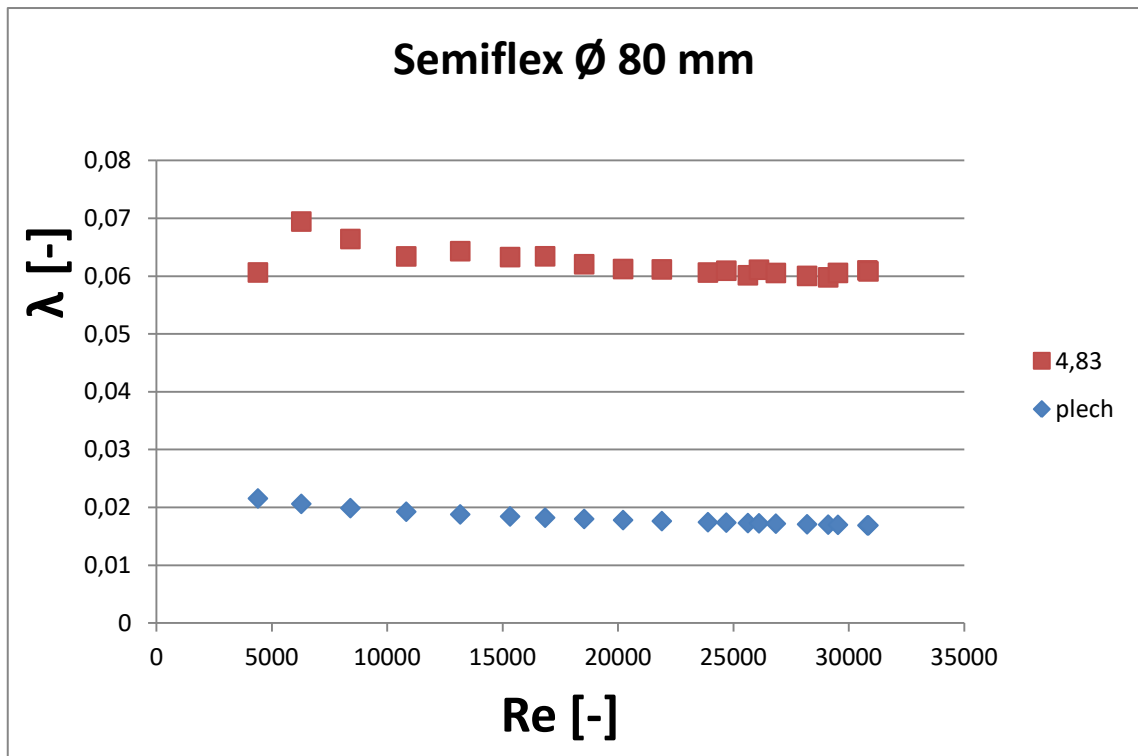
Obrázek 26 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle, Semiflex Ø 100 mm

Součinitel tlakových ztrát u hadic Semiflex je vyšší. Hodnoty  $\lambda$  okolo 0,06 bylo dosaženo už v plně napnutém stavu. Stejné hodnoty  $\lambda$  se u hadic Greyflex a Aluflex objevovaly až u zmenšené délky hadice od cca 30 až 40 cm. Nárůst v porovnání s ostatními byl jen do 0,1, což je nejméně ze všech měření.

#### 4.2.5 Porovnání s pozinkovaným potrubím



Obrázek 27 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle, Greyflex Ø 100 mm



*Obrázek 28 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle,  
Semiflex Ø 80 mm*

Pozinkovaný plech, ze kterého se vyrábí vzduchotechnické potrubí, tvoří ve vzduchovodu hladký povrch. Ekvivalentní drsnost stěn je 0,15 mm. Proto v grafu vidíme i nízké hodnoty součinitele třecích ztrát. Ten se pohybuje okolo hodnoty 0,02. Ta je shodná pro všechny typy měřených hadic bez ohledu na jejich průměr. Součinitel třecích ztrát u ohebných vzduchovodů je pak 2x až 3x vyšší v porovnání s měřením ohebných hadic v plně nataženém stavu.

## 5 ZÁVĚR

Cílem měření bylo zjistit závislost tlakové ztráty na vlivu deformace ohebných hadic. Toto měření bylo provedeno na 4 typech vzduchovodů různých průměrů. Výsledky ukázaly, že součinitel tlakových ztrát je na vlivu natažení hadice závislý. Záleží však více na typu ohebného vzduchovodu než na průměru.

Hadice Greyflex a Aluflex, které jsou vyrobeny z materiálu (polyamidová tkanina a hliník) vyztuženého drátem, jsou na nárůst tlakové ztráty vlivem nenapnutí závislé velmi. Při nedokonalém natažení dojde k malým průhybům mezi zpevňovacím drátem, které vnitřní povrch potrubí udělají méně hladkým. První zkrácení, které bylo při měření použito, bylo u těchto typů v rozmezí 1,5 až 2,3 %. Druhé stlačení bylo mezi 1,9 a 3,9 %. Zjištěná tlaková ztráta vzrostla i při takto malé změně délky o více než 100 %.

U hadic typu ED Flex LT a Semiflex dochází k nárůstu ztrát také, nikoliv ale tak výrazným způsobem. Poslední dva zmíněné modely jsou stálejšího tvaru. Zůstávají pružné a ohebné, ale nedají se stlačovat. Jedna z hadic je dodávána natažená, druhá se po natažení již nedá komprimovat. To zjednodušuje manipulaci s potrubím, a tak se dá hadice snadněji instalovat do provozu. Tlaková ztráta je pak způsobena více ohyby hadice než samotným špatným napnutím. Při měření se procentuální rozdíl v délce pohyboval okolo 2,5 % při prvním stlačení a okolo 5 % při stlačení druhém. U hadic ED Flex a Semiflex došlo k nárůstu tlakové ztráty nejprve o jednotky procent, poté téměř o 30 %.

Následující tabulka shrnuje celé měření.

Tabulka 6 – Výsledky měření

průměr [mm]		ED Flex LT		Greyflex		Aluflex		Semiflex	
61	zkrácení hadice [%]	-1,5	-4,0	-	-	-	-	-	-
	nárůst tlakové ztráty [%]	8,4	16,2	-	-	-	-	-	-
80	zkrácení hadice [%]	-	-	-1,5	-3,8	-2,3	-4,4	-3,6	-7,9
	nárůst tlakové ztráty [%]	-	-	25,7	108,5	47,4	117,9	2,7	28,3
100	zkrácení hadice [%]	-	-	-1,8	-3,9	-2,2	-4,4	-3,1	-5,8
	nárůst tlakové ztráty [%]	-	-	24,6	106,0	66,5	153,9	2,5	22,0
125	zkrácení hadice [%]	-	-	-1,8	-3,9	-1,9	-3,6	-2,2	-4,7
	nárůst tlakové ztráty [%]	-	-	26,7	116,7	57,5	141,7	0,4	24,7

V tabulce 6 jsou všechny uvedené hodnoty v vztaženy ke stavu plně nataženému tak, jak byl během měření stanoven.



**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] F. Drkal and V. Zmrhal, “Větrání,” *České Vysok. učení Tech. v Praze*, 2018.
- [2] M. Barták, “Úvod do přenosových jevů pro inteligentní budovy.”
- [3] T. Matuška, *Experimentální metody v technice prostředí*. Czech Technical University in Prague, 2005.
- [4] P. D. doc. Ing. Vladimír Zmrhal, “Podklady pro experimentální metody - Tlaková ztráta vzduchovodu.”
- [5] “Tlak vzduchu - Meteocentrum.cz.” [Online]. Available: <https://www.meteocentrum.cz/zajimavosti/encyklopedie/atmosfericky-tlak>. [Accessed: 02-Jan-2020].
- [6] P. Vybíral, “Podklady pro Experimentální metody - Emise.”
- [7] A. Slováček, “Měření průtoku plynů,” 2012.
- [8] F. Nesvadba, “Hydraulické ztráty v plastovém potrubí,” *České vysoké učení technické*, 2016.
- [9] L. Soukup, “Tlakové ztráty a tepelný výkon hydraulických kostek lineární integrované hydraulické jednotky,” 2012.
- [10] I. E. Idelchik, “Handbook of hydraulic resistance. 3rd.” Redding: Begell House Publishers, 1994.
- [11] B. Abushakra, I. S. Walker, and M. H. Sherman, “Compression effects on pressure loss in flexible HVAC ducts,” *HVAC R Res.*, vol. 10, no. 3, pp. 275–289, 2004.
- [12] “K 315 L EC | K EC | Systemair je předním výrobcem v oblasti výrobků pro vytápění, větrání a klimatizaci s působností ve více než 50 zemích celého světa.” [Online]. Available: <https://shop.systemair.com/cs-CZ/k--315--l--ec/p101545>. [Accessed: 28-Dec-2019].
- [13] “ED flex 75/61 LT flexibilní potrubí, 50 m - ELEKTRODESIGN ventilátory spol. s r.o.” [Online]. Available: <http://www.elektrodesign.cz/web/cs/product/ed->

flex-75-61-lt-flexibilni-potrubi-50-m. [Accessed: 30-Dec-2019].

- [14] “GREYFLEX 082 ohebná PVC hadice (10 m) - ELEKTRODESIGN ventilátory spol. s r.o.” [Online]. Available:  
<http://www.elektrodesign.cz/web/cs/product/greyflex-082-ohebna-pvc-hadice-10-m>. [Accessed: 30-Dec-2019].
- [15] “ALUFLEX MI 082 ohebná Al hadice (10 m) - ELEKTRODESIGN ventilátory spol. s r.o.” [Online]. Available:  
<http://www.elektrodesign.cz/web/cs/product/aluflex-mi-082-ohebna-al-hadice-10-m>. [Accessed: 31-Dec-2019].
- [16] “SEMIFLEX 080/5 STANDARD ohebná Al hadice (5 m) - ELEKTRODESIGN ventilátory spol. s r.o.” [Online]. Available:  
<http://www.elektrodesign.cz/web/cs/product/semiflex-080-5-standard-ohebna-al-hadice-5-m>. [Accessed: 31-Dec-2019].

**SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK**

Obrázek 1 – Škrticí orgán (clona)[3] .....	- 13 -
Obrázek 2 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle[1] .....	- 18 -
Obrázek 3 – Ukázka stlačení hadice .....	- 19 -
Obrázek 4 – Schéma měřicí trati.....	- 21 -
Obrázek 5 – Ukázka zapojení .....	- 22 -
Obrázek 6 – Ukázka hadice ED Flex LT [13] .....	- 23 -
Obrázek 7 – Tlaková ztráta dle výrobce, ED Flex [13] .....	- 24 -
Obrázek 8 – Hadice Greyflex [14].....	- 24 -
Obrázek 9 – Tlaková ztráta dle výrobce, Greyflex[14] .....	- 25 -
Obrázek 10 – Hadice Aluflex MI [15].....	- 26 -
Obrázek 11 – Semiflex [16].....	- 26 -
Obrázek 12 – Tlaková ztráta dle výrobce, Semiflex [16].....	- 27 -
Obrázek 13 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, ED Flex Ø61 mm .....	- 30 -
Obrázek 14 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, Greyflex Ø 80 mm.....	- 31 -
Obrázek 15 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, Greyflex Ø 100 mm ....	- 32 -
Obrázek 16 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, Greyflex Ø 125 mm ....	- 32 -
Obrázek 17 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, Aluflex Ø 80 mm .....	- 35 -
Obrázek 18 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, Aluflex Ø 100 mm .....	- 35 -
Obrázek 19 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, Aluflex Ø 125 mm .....	- 36 -
Obrázek 20 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, Semiflex Ø 80 mm.....	- 38 -
Obrázek 21 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, Semiflex Ø 100 mm....	- 39 -
Obrázek 22 – Závislost tlakové ztráty na průtoku vzduchu, Semiflex Ø 125 mm....	- 39 -
Obrázek 23 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle, ED Flex LT Ø 61 mm .....	- 41 -
Obrázek 24 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle, Greyflex Ø 80 mm .....	- 42 -
Obrázek 25 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle, Aluflex Ø 100 mm .....	- 43 -
Obrázek 26 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle, Semiflex Ø 100 mm .....	- 44 -
Obrázek 27 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle, Greyflex Ø 100 mm .....	- 45 -

Obrázek 28 – Závislost součinitele třecích ztrát na Reynoldsově čísle, Semiflex Ø 80 mm .....	- 46 -
Tabulka 1 – Tabulka kapilární deprese rtuti pro průměr trubice 7 mm [3] .....	- 11 -
Tabulka 2 – Seznam hadic .....	- 28 -
Tabulka 3 – Rozdíl tlakových ztrát v procentech, Greyflex Ø 80 mm .....	- 34 -
Tabulka 4 – Rozdíl tlakových ztrát v procentech, Aluflex Ø 125 mm.....	- 37 -
Tabulka 5 – Rozdíl tlakových ztrát v procentech, Semiflex Ø 125 mm.....	- 40 -
Tabulka 6 – Výsledky měření .....	- 48 -
Tabulka 7 – Tabulka naměřených hodnot a výpočtů.xlsx.....	přiložené CD