

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE  
FAKULTA STROJNÍ  
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

---

**TLAKOVÉ ZTRÁTY KAPILÁRNÍCH ROHOŽÍ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

- ZADÁNÍ -

## **SOUHRN**

Diplomová práce se zaměřuje na problematiku modelování tlakových ztrát kapilárních rohoží. Konkrétně na modelování tlakových ztrát různě dlouhých, sériově zapojených rohoží (tzv. Tichelmannův způsob zapojení) v počtu 1 až 4 kusy. Teoreticko – metodická část práce je zaměřena na popis dílčích tlakových ztrát kapilární rohože s použitím dostupné literatury. Jednotlivé členy rovnice jsou detailně popsány tak, aby bylo možné tyto poznatky aplikovat pro vývoj matematického modelu.

Praktická část této práce je rozdělena na dvě části. V první je popsáno experimentální měření tlakové ztráty sériově zapojených rohoží. Měření slouží pro porovnání s matematickým modelem, jehož vývoj je popsán v druhé části. Matematický model vychází z rovnic popsaných v teoretické části práce. V závěru práce jsou porovnány výsledky, které byly získány výpočtem s použitím vytvořeného modelu s výsledky získanými experimentálním laboratorním měřením. Na základě konfrontace těchto výsledků je vyvozen závěr o použitelnosti modelu a jeho použití v praktických aplikacích.

## **SUMMARY**

This thesis focuses on the problem of modeling the pressure loss of capillary mat. Specifically, for the modeling of the pressure loss varying lengths serially connected mats (Tichelmann method) in the number of one to four mats. Theoretical - methodological part is focused on describing the equation of pressure losses capillary matting with the help of available literature. Individual parts of the equations are described in detail, so that they can apply this knowledge to the development of mathematical model.

The practical part is divided into two parts. In the first described experimental pressure loss measurement serially connected mats. This measurement is used to compare with the mathematical model, the development of which is described in the second part. This mathematical model based on the equations described in the theoretical part. Finally, they compared the results that were obtained by calculation of the model with experimental results obtained by laboratory measurements. Based on the confrontation of these results it is concluded that the applicability of this model and use this model in practical application.

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

V Praze 19. 6. 2015

Bc. Martin Horník

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu této diplomové práce doc. Ing. Vladimírovi Zmrhalovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a připomínky a rady při tvorbě mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu po celou dobu mého studia.

## OBSAH

SOUPIS POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	3
1. ÚVOD.....	4
2. TLAKOVÉ ZTRÁTY .....	5
2.1. Tlakové ztráty třením v potrubí.....	5
2.1.1. Součinitel třecích ztrát .....	5
2.2. Tlakové ztráty místními odpory .....	7
2.2.1. Součinitel místní tlakové ztráty .....	7
3. TLAKOVÁ ZTRÁTA KAPILÁRNÍ ROHOŽE.....	8
3.1. Rovnice pro výpočet tlakové ztráty.....	8
3.2. Výpočet jednotlivých tlakových ztrát .....	9
3.2.1. Tlaková ztráta třením v kapiláře .....	9
3.2.2. Tlaková ztráta třením v rozvodném potrubí .....	11
3.2.3. Tlaková ztráta třením ve sběrném potrubí .....	12
3.2.4. Tlaková ztráta třením v oblouku.....	12
3.2.5. Tlaková ztráta místní při odbočení proudu .....	13
3.2.6. Tlaková ztráta místní při spojení proudu .....	13
3.2.7. Tlaková ztráta v přímém směru při odbočení proudu.....	14
3.2.8. Tlaková ztráta v přímém směru při spojení proudu.....	15
4. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ .....	16
4.1. Metodika měření tlakové ztráty rohoží .....	16
4.2. Popis měřicí tratě.....	17
4.3. Měřené varianty .....	19
4.4. Přepočty výsledků měření na stejnou teplotu vody.....	20
4.5. Výsledky měření .....	21
5. MATEMATICKÝ MODEL .....	25

5.1.	Přístupy k řešení .....	25
5.2.	Vývoj matematického modelu .....	26
5.2.1.	Model pro jednu kapilární rohož. ....	26
5.2.2.	Model pro dvě rohože .....	31
5.2.3.	Model pro tři a čtyři rohože .....	38
6.	DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	40
6.1.	Vliv průměru kapiláry na tlakovou ztrátu .....	40
6.2.	Varianty se zapojením rohoží 2 a 1 m.....	42
6.3.	Varianty se zapojením rohoží 3 a 1 m.....	44
6.4.	Varianty se zapojením rohoží 4 a 1 m.....	46
6.4.1.	Porovnání variant 4 + 1 m a 1 + 4 m .....	48
7.	ZÁVĚR .....	50
8.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	52
9.	SEZNAM PŘÍLOH.....	53

**SOUPIS POUŽITÉHO ZNAČENÍ**

A	koeficient A	[-]
B	koeficient B	[-]
B	šířka kapilární rohože	[mm]
D	průměr potrubí	[m]
D <sub>obl</sub>	průměr oblouku	[m]
L	délka kapilární rohože	[mm]
M	hmotnostní průtok	[kg/s], [kg/h]
R	poloměr oblouku	[m]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
V	objemový průtok	[m <sup>3</sup> /s], [m <sup>3</sup> /h]
a	vzdálenost mezi kapilárami	[m], [mm]
d	průměr potrubí	[m], [mm]
h	výška vodního sloupce	[m], [mm]
i	číslo úseku	[-]
k	drsnost potrubí	[m]
l	délka	[m], [mm]
n	počet kapilár	[-]
t	tloušťka stěny	[m], [mm]
t <sub>a</sub>	teplota vzduchu	[°C]
t <sub>w</sub>	teplota vody	[°C]
w	rychlost proudění	[m/s]
Δh	rozdíl výšek vodního sloupce	[m], [mm]
Δp	tlaková ztráta	[Pa], [kPa]
λ	součinitel třecí ztráty	[-]
ζ	součinitel místní ztráty	[-]
ρ	hustota vody	[kg/m <sup>3</sup> ]
v	kinematická viskozita vody	[m <sup>2</sup> /s]
δΔp	rozdíl tlakových ztrát	[Pa], [kPa]
δV	změna průtoku	[m <sup>3</sup> /s], [m <sup>3</sup> /h]



## 1. ÚVOD

Kapilární rohož tvoří síť plastových trubiček tzv. kapilár, které mají velmi malý průměr – nejčastěji je vnější průměr 3,5 mm. V těchto kapilárách proudí chladicí nebo otopná voda. Návrh systému s kapilárními rohožemi obsahuje krom návrhu chladicího nebo tepelného výkonu i návrh hydraulický. Základním prvkem pro tento návrh, je znalost závislosti tlakové ztráty rohoží na požadovaném průtoku. V tomto kroku nastává největší problém, neboť většina výrobců buď ve svých podkladech tato data vůbec neuvádí, případně se jedná o data získaná analyticky bez experimentálního ověření těchto hodnot.

Problematika tlakových ztrát kapilárních rohoží již byla řešena v sérii článků [1, 2, 3]. Zmrhal (2012) se ve své práci zabývá řešením tlakových ztrát několika rohoží stejné délky, které jsou zapojeny Tichelmannovým způsobem. Pro toto zapojení je zde popsán zjednodušený výpočtový model, který uvažuje shodné průtoky v jednotlivých větvích každé rohože. Tento model však vzhledem k podmínce rovnosti tlakových ztrát jednotlivých větví nelze použít pro sériové zapojení několika rohoží různé délky. Pro tento případ je tedy nutné použít model, který bude respektovat rovnost tlakových ztrát příslušných větví a bude přepočítávat objemové průtoky kapilárami.

Tvorba tohoto modelu je hlavním cílem diplomové práce. Samotný matematický model bude vytvořen v programu Microsoft Excel, tento program byl zvolen z několika důvodů. Prvním důvodem je jeho snadná dostupnost, druhým důvodem je možnost provádět i složitější výpočty (cyklické výpočty) bez rozsáhlých znalostí programování. Což platí i při použití programovacího jazyka Visual Basic for Application, který je součástí tohoto programu.

Tvorba matematického modelu je však jen jedna část - aby bylo možné potvrdit platnost veškerých teoretických poznatků a ověřit správnou funkčnost modelu, je nutné provést laboratorní měření. Celkem bude provedeno 10 měření pro variantní zapojení různých délek kapilárních rohoží. Všechny zkoumané rohože budou shodného typu K.S 15 o průměru kapilár  $2,35 \pm 0,05$  mm, shodné šířce 920 mm a délkách 1 000 mm, 2 000 mm, 3 000 mm a 4 000 mm.

## 2. TLAKOVÉ ZTRÁTY

Tlakové ztráty v potrubí rozeznáváme dvojího druhu:

- Tlakové ztráty třením v potrubí
- Tlakové ztráty způsobené místními odpory

Součet obou těchto ztrát pak nazýváme celkovou tlakovou ztrátou v potrubí.

Tuto tlakovou ztrátu můžeme popsat obecně známým vztahem:

$$\Delta p_z = \Delta p_\lambda + \Delta p_\zeta \quad [\text{Pa}] \quad (1)$$

kde je  $\Delta p_z$  tlaková ztráta v potrubí [Pa]

$\Delta p_\lambda$  je tlaková ztráta třením v potrubí [Pa]

$\Delta p_\zeta$  je tlaková ztráta způsobená místními odpory [Pa]

### 2.1. TLAKOVÉ ZTRÁTY TŘENÍM V POTRUBÍ

Tlakové ztráty třením v potrubí  $\Delta p_\lambda$  lze vypočítat dle tzv. Weisbachova vztahu:

$$\Delta p_\lambda = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{w^2}{2} \rho \quad [\text{Pa}] \quad (2)$$

kde je  $\Delta p_\lambda$  tlaková ztráta třením v potrubí [Pa]

$\lambda$  součinitel třecích ztrát [-]

$l$  délka potrubí [m]

$d$  průměr potrubí [m]

$w$  rychlost proudění v potrubí [m/s]

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

#### 2.1.1. Součinitel třecích ztrát

Součinitel třecích ztrát lze stanovit dle mnoha různých vztahů. Prvním krokem pro správné stanovení však musí být stanovení režimu proudění. To se realizuje nazákladě výpočtu hodnoty Reynoldsova čísla dle vztahu:

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} \quad [-] \quad (3)$$

kde je	$w$	rychlost proudění v potrubí	[m/s]
	$d$	průměr potrubí	[m]
	$\nu$	kinematická viskozita	[m <sup>2</sup> /s]

Režimy proudění rozeznáváme tři:

- Proudění v laminární oblasti ( $Re < 2\,320$ )
- Proudění v přechodové oblasti ( $Re = 2\,320$  až  $Re = 6\,000$ )
- Proudění v turbulentní oblasti ( $Re > 6\,000$ )

Součinitel třecích ztrát v *laminární* oblasti závisí pouze na hodnotě Reynoldsova čísla a lze ho popsat například vztahem (4) uvedeným v [4].

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad [-] \quad (4)$$

kde je	$\lambda$	součinitel třecích ztrát	[-]
	$Re$	Reynoldsovo číslo	[-]

Pro přechodovou oblast je situace odlišná. Součinitel třecích ztrát zde závisí nejen na Reynoldsově čísle, ale i na drsnosti potrubí [4]:

$$\lambda = f(Re, k/d) \quad [-] \quad (5)$$

kde je	$k$	drsnost potrubí	[m]
	$d$	průměr potrubí	[m]

Pro oblast turbulentního proudění jmenujme vztah dle Colebrooka (6). Tento vztah patří mezi nejpřesnější, avšak jeho problém tkví v nutnosti iteračního výpočtu. Z tohoto důvodu se doporučuje [6] použít upravený vztah dle Swameeho (7).

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log \left( \frac{k}{3,71 \cdot d} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad [-] \quad (6)$$

kde je $\lambda$	součinitel třecích ztrát	[-]
$k$	drsnost potrubí	[m]
$d$	průměr potrubí	[m]

$$\lambda = \frac{1,306}{\left[ \ln \left( \frac{k}{3,7d} + \frac{5,74}{\text{Re}^{0,9}} \right) \right]^2} \quad [-] \quad (7)$$

kde je $k$	drsnost potrubí	[m]
$d$	průměr potrubí	[m]

Dalším možným způsobem získání hodnot součinitele třecí ztráty je provedení CFD simulace.

## 2.2. TLAKOVÉ ZTRÁTY MÍSTNÍMI ODPORY

Dalším typem tlakové ztráty v potrubí je tlaková ztráta místními odpory, kterou lze vypočítat dle vztahu:

$$\Delta p_{\zeta} = \zeta \cdot \frac{w^2}{2} \rho \quad [\text{Pa}] \quad (8)$$

kde je $\zeta$	součinitel místní tlakové ztráty	[-]
$w$	rychlost proudění v potrubí	[m]
$\rho$	hustota vody	[kg/m <sup>3</sup> ]

### 2.2.1. Součinitel místní tlakové ztráty

Součinitel místní tlakové ztráty se stanovuje pro jednotlivé elementy potrubí a lzeho zjistit několika způsoby. Prvním způsobem je měření vřazeného hydraulického odporu, který popisuje například [7], druhým způsobem je zjištění pomocí metod CFD.

### 3. TLAKOVÁ ZTRÁTA KAPILÁRNÍ ROHOŽE

Pro výpočet tlakové ztráty kapilární rohože bude uvažováno se souproudým tzv. Tichemannovým způsobem. Vzhledem k tomuto faktu musí v jednotlivých větvích (1 až n) platit rovnost tlakových ztrát.

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 = \dots = \Delta p_i = \Delta p_n \quad [\text{Pa}] \quad (9)$$

kde je  $\Delta p_1$  tlaková ztráta první větve kapilární rohože [Pa]

$\Delta p_2$  tlaková ztráta první větve kapilární rohože [Pa]

$\Delta p_i$  tlaková ztráta i – té větve kapilární rohože [Pa]

$\Delta p_n$  tlaková ztráta n – té větve kapilární rohože [Pa]

Protože tlakové ztráty jednotlivých větví jsou stejné, můžeme pro výpočet tlakové ztráty celé rohože použít výpočet jen pro jednu větev.

#### 3.1. ROVNICE PRO VÝPOČET TLAKOVÉ ZTRÁTY

Rovnici pro výpočet tlakové ztráty rohože pro i-tou větev  $\Delta p_i$  uvádí [3] rovnice (10). Grafické znázornění jednotlivých složek uvádí Obr. 4.1.

$$\begin{aligned} \Delta p_i = & \Delta p_{t,d,i} + \Delta p_{t,D,r,c,i} + \Delta p_{t,D,s,c,i} + \Delta p_{m,obl,i} + \Delta p_{m,o,i} + \\ & + \Delta p_{m,s,i} + \Delta p_{m,o,p,c,i} + \Delta p_{m,s,p,c,i} \end{aligned} \quad [\text{Pa}] \quad (10)$$

kde je  $\Delta p_{t,d,i}$  tlaková ztráta třením v kapiláře [Pa]

$\Delta p_{t,D,r,c,i}$  tlaková ztráta třením v rozvodném potrubí [Pa]

$\Delta p_{t,D,s,c,i}$  tlaková ztráta třením ve sběrném potrubí [Pa]

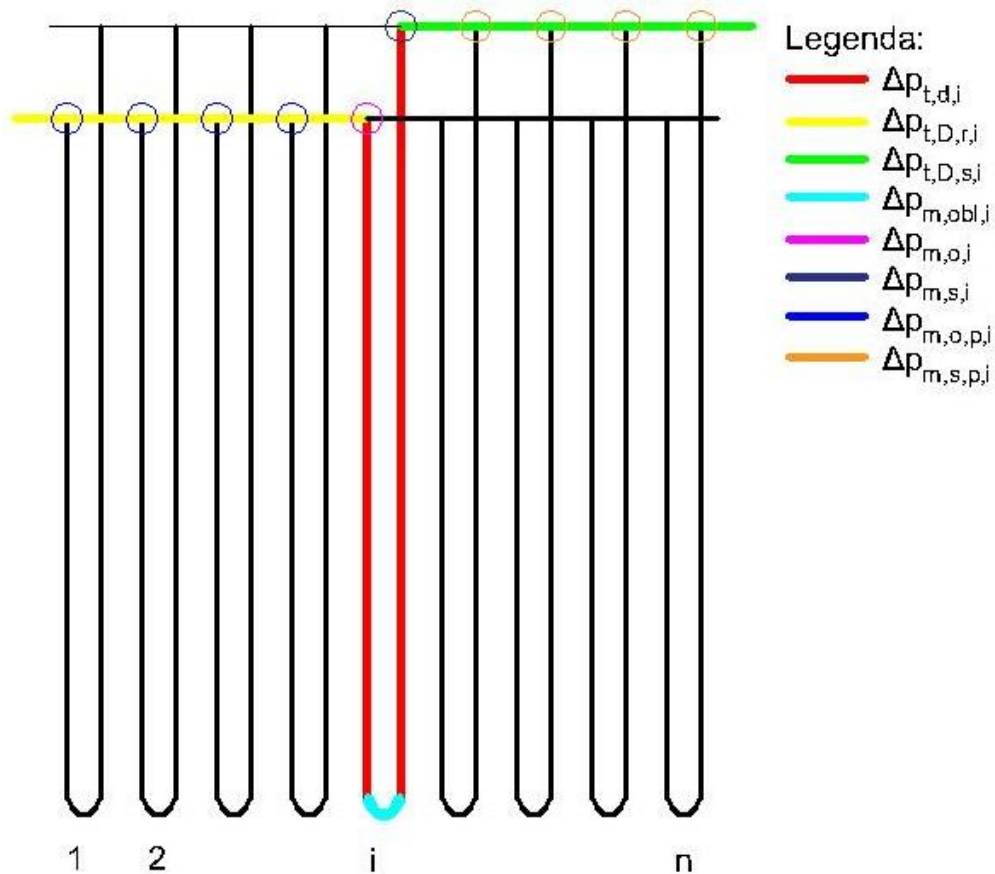
$\Delta p_{m,obl,i}$  tlaková ztráta třením v oblouku [Pa]

$\Delta p_{m,o,i}$  tlaková ztráta místní při odbočení proudu [Pa]

$\Delta p_{m,s,i}$  tlaková ztráta místní při spojení proudu [Pa]

$\Delta p_{m,o,p,c,i}$  tlaková ztráta místní při odbočení proudu  
v přímém směru [Pa]

$\Delta p_{m,s,p,c,i}$  tlaková ztráta v přímém směru při spojení  
proudu [Pa]



Obr. 4.1 – Grafické znázornění jednotlivých složek tlakové ztráty *i*-té větve

### 3.2. VÝPOČET JEDNOTLIVÝCH TLAKOVÝCH ZTRÁT

#### 3.2.1. Tlaková ztráta třením v kapiláře

Tlakovou ztrátu třením vypočteme dle Weisbachova vztahu viz rovnice (2). Jako délku a průměr potrubí zde uvažujeme příslušné rozměry kapiláry. Rychlost proudění v kapiláře  $w_{d,i}$  stanovíme dle vztahu:

$$w_{d,i} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{d,i}}{\pi \cdot d_{kap}} \quad [\text{m/s}] \quad (11)$$

kde je  $\dot{V}_{d,i}$  objemový průtok i-tou kapilárou [m<sup>3</sup>/s]  
 $d_{kap}$  průměr i-té kapiláry [m]

Vzhledem k malým rychlostem proudění v kapiláře a tím i nízkým hodnotám Reynoldsova čísla by bylo na místě uvažovat v kapiláře laminární proudění. Tento fakt však platí pouze v ideálním případě, kdy bychom měli kapiláru dokonale rovnou. V praxi je však kapilára různě deformovaná a proto dochází k mísení jednotlivých vrstev tekutiny a proudění tedy nelze považovat za laminární. Z těchto důvodů je nutné proudění v kapiláře považovat za neustálené. Pro výpočet součinitele třecích ztrát bude tedy použit vztah (12) publikovaný v [2]. Vztah je platný pro rozmezí  $100 < Re_d < 2\,000$ , kde  $Re_d$  je Reynoldsovo číslo v kapiláře.

$$\lambda_{neust} = \frac{64}{Re_d} + 0,0103 \exp\left(-\frac{1185}{Re_d}\right) \quad [-] \quad (12)$$

kde  $Re_d$  Reynoldsovo číslo v kapiláře [-]

$$Re_d = \frac{w_{d,i} \cdot d_{kap}}{\nu_w} \quad [-] \quad (13)$$

kde je  $w_{d,i}$  rychlost proudění v i-té kapiláře dle (11) [m/s]

$d_{kap}$  průměr kapiláry [m]

$\nu_w$  kinematická viskozita vody dle (15) [m<sup>2</sup>/s]

Kinematická viskozita vody  $\nu_w$  je závislá na její teplotě. Hodnotu lze určit dle následujícího vztahu [8]:

$$10^6 \cdot \nu_w = \frac{50,9}{(t_w + 26,83)} - 0,6 \quad [m^2/s] \quad (14)$$

$$\nu_w = \left( \frac{50,9}{(t_w + 26,83)} - 0,6 \right) \cdot \frac{1}{10^6} \quad [m^2/s] \quad (15)$$

kde  $t_w$  teplota vody [°C]

### 3.2.2. Tlaková ztráta třením v rozvodném potrubí

Tlakovou ztrátu třením v rozvodném potrubí pro  $i$ -tou větev  $\Delta p_{t,D,r,c,i}$  vypočítáme jako součet ztrát jednotlivých úseků rozvodného potrubí (viz Obr. 4.2) dle vztahu:

$$\Delta p_{t,D,r,c,i} = \sum_1^i \Delta p_{t,D,r,i} = \Delta p_{t,D,r,1} + \Delta p_{t,D,r,2} + \dots + \Delta p_{t,D,r,i} \quad [\text{Pa}] \quad (16)$$

kde je  $\Delta p_{t,D,r,1}$  tlaková ztráta 1. úseku rozvodného potrubí [Pa]

$\Delta p_{t,D,r,2}$  tlaková ztráta 2. úseků rozvodného potrubí [Pa]

$\Delta p_{t,D,r,i}$  tlaková ztráta  $i$ -tého úseku [Pa]

Ztrátu příslušných úseků vypočítáme dle Weisbachova vztahu. Součinitel třecích ztrát určíme pro tento příklad ze vztahu pro hydraulicky hladké potrubí, jedná se o tzv. Blasiovův vztah:

$$\lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\text{Re}_D}} \quad [-] \quad (17)$$

kde je  $\text{Re}_D$  Reynoldsovo číslo v úseku rozvodného potrubí [-]

Uvedený Blasiovův vztah je však platný pouze v rozsahu Reynoldsových čísel 5 000 až 1 000 000. Pro hodnoty nižších Reynoldsových čísel, které vznikají především v koncových úsecích potrubí, bude použit vztah pro laminární proudění:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}_D} \quad [-] \quad (18)$$

Rychlost proudění v příslušném úseku rozvodného potrubí  $w_{D,r,i}$  vypočteme pomocí objemového průtoku tímto úsekem a to pomocí vztahu:

$$w_{D,r,i} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{D,r,i}}{\pi \cdot D} \quad [\text{m/s}] \quad (19)$$



kde je	$\dot{V}_{D,r,i}$	průtok příslušným úsek rozvodným potrubím	$[\text{m}^3/\text{s}]$
	$D$	průměr rozvodného potrubí	$[\text{m}]$

### 3.2.3. Tlaková ztráta třením ve sběrném potrubí

$$\Delta p_{t,D,s,c,i} = \sum_i^n \Delta p_{t,D,s,i} = \Delta p_{t,D,s,i} + \Delta p_{t,D,s,i+1} + \dots + \Delta p_{t,D,s,n} \quad [\text{Pa}] \quad (20)$$

kde je	$\Delta p_{t,D,s,i}$	tlaková ztráta i-tého úseku	$[\text{Pa}]$
	$\Delta p_{t,D,s,n}$	tlaková ztráta n-tého úseku	$[\text{Pa}]$

Pro výpočet součinitele třecích ztrát platí stejná pravidla a vztahy jako pro potrubí rozvodné. Rychlost proudění úseku sběrného potrubí  $w_{D,r,i}$  opět stanovíme z objemového průtoku tímto úsekem:

$$w_{D,s,i} = \frac{4 \cdot \dot{V}_{D,s,i}}{\pi \cdot D} \quad [\text{m/s}] \quad (21)$$

kde je	$\dot{V}_{D,s,i}$	průtok příslušným úsekem rozvodného potrubí	$[\text{m}^3/\text{s}]$
	$D$	průměr rozvodného potrubí	$[\text{m}]$

### 3.2.4. Tlaková ztráta třením v oblouku

Pro stanovení tlakové ztráty v oblouku kapiláry byl použit vztah uvedený v [3], kterým se stanoví ekvivalentní součinitel tření  $\lambda_{ekv}$ :

$$\lambda_{ekv} = \frac{20}{\text{Re}_{obl}^{0,65}} \left( \frac{d}{2 \cdot R} \right)^{0,175} \quad [-] \quad (22)$$

s platností:

$$50 < \text{Re}_{obl} \sqrt{\frac{d}{2R}} < 600$$

pro

$$\frac{R}{d} \geq 3 \text{ a } \frac{l_{obl}}{D_{obl}} \geq 10$$

kde je	$Re_{obl}$	Reynoldsovo číslo při proudění v oblouku	[-]
	$d$	průměr kapiláry	[m]
	$R$	poloměr oblouku	[m]
	$l_{obl}$	délka oblouku	[m]
	$D_{obl}$	průměr oblouku	[m]

### 3.2.5. Tlaková ztráta místní při odbočení proudu

Tlaková ztráta je způsobena místním odporem při odbočení proudu tekutiny z rozvodného potrubí do  $i$ -té kapiláry. Hodnota tlakové ztráty se určí dle vztahu (8). Součinitel místní tlakové ztráty  $\zeta_{m,o,i}$  se stanoví dle vztahu (23), který byl publikován v [2] a je platný pro rozsah Reynoldsových čísel  $0 < Re_{D,r,i} < 27\,000$  a  $235 < Re_{d,i} < 2\,050$ .

$$\zeta_{m,o,i} = A_{m,o} \cdot Re_{D,r,i}^{B_{m,o}} \quad [-] \quad (23)$$

kde je	$A_{m,o}$	koeficient dle (24)	[-]
	$B_{m,o}$	koeficient dle (25)	[-]
	$Re_{D,r,i}$	Reynoldsovo číslo v $i$ -tém úseku rozvodného potrubí	[-]

$$A_{m,o} = 0,0114 \cdot Re_{d,i}^3 - 2,16 \cdot Re_{d,i}^2 + 45473 \cdot Re_{d,i} - 7021259 \quad [-] \quad (24)$$

kde je	$Re_{d,i}$	Reynoldsovo číslo v $i$ -té kapiláře	[-]
--------	------------	--------------------------------------	-----

$$B_{m,o} = -1,95 \quad [-] \quad (25)$$

### 3.2.6. Tlaková ztráta místní při spojení proudu

Tlaková ztráta místní při spojení proudu vzniká při výtoku tekutiny z kapiláry do sběrného potrubí a můžeme jí stanovit pomocí vztahu (8), součinitel místní ztráty pak ze vztahu:

$$\zeta_{m,s,i} = A_{m,s} \cdot Re_{D,s,i}^{B_{m,s}} \quad [-] \quad (26)$$

kde je  $A_{m,s}$  koeficient dle (27) [-]

$B_{m,s}$  koeficient dle (28) [-]

$Re_{D,s,i}$  Reynoldsovo číslo v i-tém úseku rozvodného potrubí [-]

$$A_{m,s} = 0,035 \cdot Re_{d,i}^3 - 69,25 \cdot Re_{d,i}^2 + 28329 \cdot Re_{d,i} - 3499676 \quad [-] \quad (27)$$

kde je  $Re_{d,i}$  Reynoldsovo číslo v i-té kapiláře [-]

$$B_{m,s} = -2,09 \quad [-] \quad (28)$$

Tento vztah platí opět v rozsahu Reynoldsových čísel  $0 < Re_{D,s,i} < 27\,000$  a  $235 < Re_{d,i} < 2\,050$ .

### 3.2.7. Tlaková ztráta v přímém směru při odbočení proudu

Odbočení části proudu tekutiny do kapiláry má samozřejmě vliv i na tekutinu, která proudí do úseku následujícího za odbočením do kapiláry. Tuto tlakovou ztrátu označujeme jako ztrátu v přímém směru při odbočení tekutiny. A její hodnotu stanovíme ze vztahu:

$$\Delta p_{m,o,p,c,i} = \sum_1^i \Delta p_{m,o,p,i} = \Delta p_{m,o,p,1} + \Delta p_{m,o,p,2} + \dots + \Delta p_{m,o,p,i} \quad [\text{Pa}] \quad (29)$$

kde je  $\Delta p_{m,o,p,1}$  tlaková ztráta v přímém směru při odbočení proudu v 1. úseku [Pa]

$\Delta p_{m,o,p,2}$  tlaková ztráta v přímém směru při odbočení proudu v 2. úseku [Pa]

$\Delta p_{m,o,p,i}$  tlaková ztráta v přímém směru při odbočení proudu v i-tém úseku [Pa]

Součinitel místní ztráty  $\zeta_{m,o,p}$  stanovíme ze vztahu (30) uvedeném v [2]. Platnost tohoto vztahu je dána hodnotami Reynoldsova čísla pro  $Re_{D,r,i} = 300$  až  $20\,000$  a  $Re_{d,i} = 500$  až  $2\,000$ .

$$\zeta_{m,o,p} = (A_{m,o,p} + B_{m,o,p} \cdot \ln \operatorname{Re}_{D,r,i})^{-1} \quad [-] \quad (30)$$

kde je  $A_{m,o,p}$  koeficient dle (31) [-]

$B_{m,o,p}$  koeficient dle (32) [-]

$$A_{m,o,p} = -0,000001 \cdot \operatorname{Re}_{d,i}^2 - 0,0008 \cdot \operatorname{Re}_{d,i} - 12,413 \quad [-] \quad (31)$$

$$B_{m,o,p} = 0,00000016 \cdot \operatorname{Re}_{d,i}^2 - 0,000088 \cdot \operatorname{Re}_{d,i} + 2,68 \quad [-] \quad (32)$$

### 3.2.8. Tlaková ztráta v přímém směru při spojení proudu

K další tlakové ztrátě dochází při spojení proudu tekutiny z kapiláry s proudem tekutiny ve sběrné trubce. Matematicky můžeme tuto tlakovou ztrátu vyjádřit vztahem:

$$\Delta p_{m,s,p,c,i} = \sum_i^n \Delta p_{m,s,p,i} = \Delta p_{m,s,p,i} + \Delta p_{m,s,p,(i+1)} + \dots + \Delta p_{m,o,p,n} \quad [\text{Pa}] \quad (33)$$

kde je  $\Delta p_{m,s,p,i}$  tlaková ztráta v přímém směru při spojení proudu v i-tém úseku [Pa]

$\Delta p_{m,s,p,(i+1)}$  tlaková ztráta v přímém směru při spojení proudu v úseku následujícím po i-tém [Pa]

$\Delta p_{m,s,p,n}$  tlaková ztráta v přímém směru při odbočení proudu v n-tém úseku [Pa]

Součinitel místní ztráty  $\zeta_{m,s,p}$  se stanoví dle vztahu [2]:

$$\zeta_{m,s,p} = \frac{A_{m,s,p}}{\operatorname{Re}_{D,s}} + B_{m,s,p} \quad [-] \quad (34)$$

kde je  $A_{m,s,p}$  koeficient dle (35) [-]

$B_{m,s,p}$  koeficient dle (36) [-]

$$A_{m,s,p} = 0,00000007 \cdot \operatorname{Re}_{d,i}^3 - 0,000346 \cdot \operatorname{Re}_{d,i}^2 + 0,945 \cdot \operatorname{Re}_{d,i} - 55,22 \quad [-] \quad (35)$$

$$B_{m,s,p} = -0,000022 \cdot \operatorname{Re}_{d,i} + 0,112 \quad [-] \quad (36)$$

## 4. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Aby bylo možné ověřit výsledky analytického modelu, bylo nejprve nutné provést experimentální měření tlakových ztrát.

### 4.1. METODIKA MĚŘENÍ TLAKOVÉ ZTRÁTY ROHOŽÍ

Metoda zjištění tlakové ztráty kapilární rohože vychází z postupu stanovení tlakové ztráty vřazeného hydraulického odporu v potrubí. Tento postup popisuje například skriptum [7]. Před a za vřazený hydraulický odpor (v našem případě kapilární rohože) jsou na rovných úsecích náběžného potrubí umístěny vždy dva tlakové odběry, které jsou umístěny ve známé vzdálenosti  $l_p$ . Tyto jednotlivé odběry snímají tlaky před a za vřazeným odporem, tedy tlaky  $p_{p1}$ ,  $p_{p2}$ , a  $p_{k1}$ ,  $p_{k2}$ .

Jednotlivé tlakové odběry jsou napojeny na obrácené U – manometry, na kterých se odečítají příslušné výšky vodního sloupce  $h_{p1}$ ,  $h_{p2}$ ,  $h_{k1}$  a  $h_{k2}$ . Z těchto hodnot se následně vypočítají rozdíly příslušných výšek  $\Delta h_1$  a  $\Delta h_2$  a dále pak rozdíly tlaků  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_2$  a to dle vztahu:

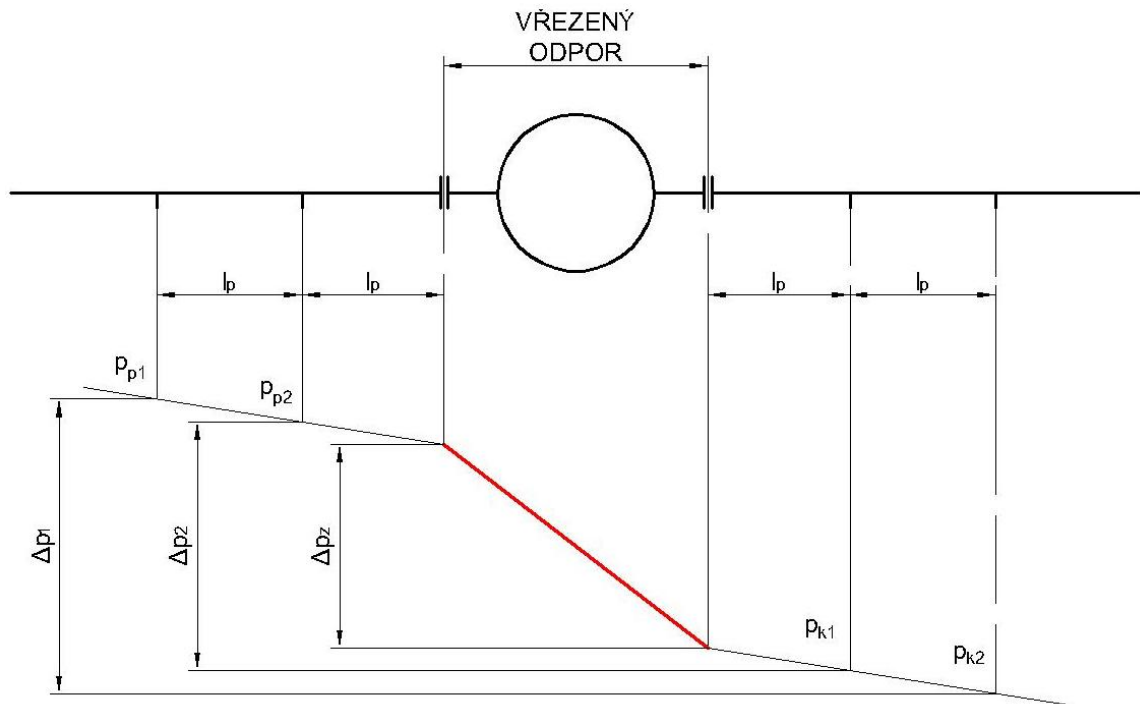
$$\Delta p_i = \frac{\Delta h_i}{1000} g \rho_{tw} = \frac{(h_{pi} - h_{ki})}{1000} g \rho_{tw} \quad [\text{Pa}] \quad (37)$$

kde je $h_{pi}$	výška vodního sloupce před vřazeným odporem	[mm]
$h_{ki}$	výška vodního sloupce za vřazeným odporem	[mm]
$\Delta h_i$	rozdíl příslušných výšek vodních sloupců	[mm]
$\rho_w$	hustota vody ve vodním sloupci U – manometru při teplotě $t_a$ stanovená dle vztahu (38), který byl publikován v [8]	[kg/m <sup>3</sup> ]

$$\rho_{tw} = 1000 - (t_w - 4) \cdot 0,097 + 0,0036 \cdot (t_w - 4) \quad [\text{kg/m}^3] \quad (38)$$

kde je $t_w$	teplota vody v U – manometru, která je shodná s teplotou okolního vzduchu $t_a$	[°C]
--------------	---	------

Při vyhodnocení tlakové ztráty  $\Delta p_z$  v místě vřazeného odporu se využije průběhů rozdílů tlaků před a za vřazeným odporem – tj. poklesu tlaku způsobeného vlivem třecích ztrát mezi jednotlivými odběry na náběžném potrubí. Průběh tlaků před a za vřazeným odporem ukazuje Obr. 5.1.



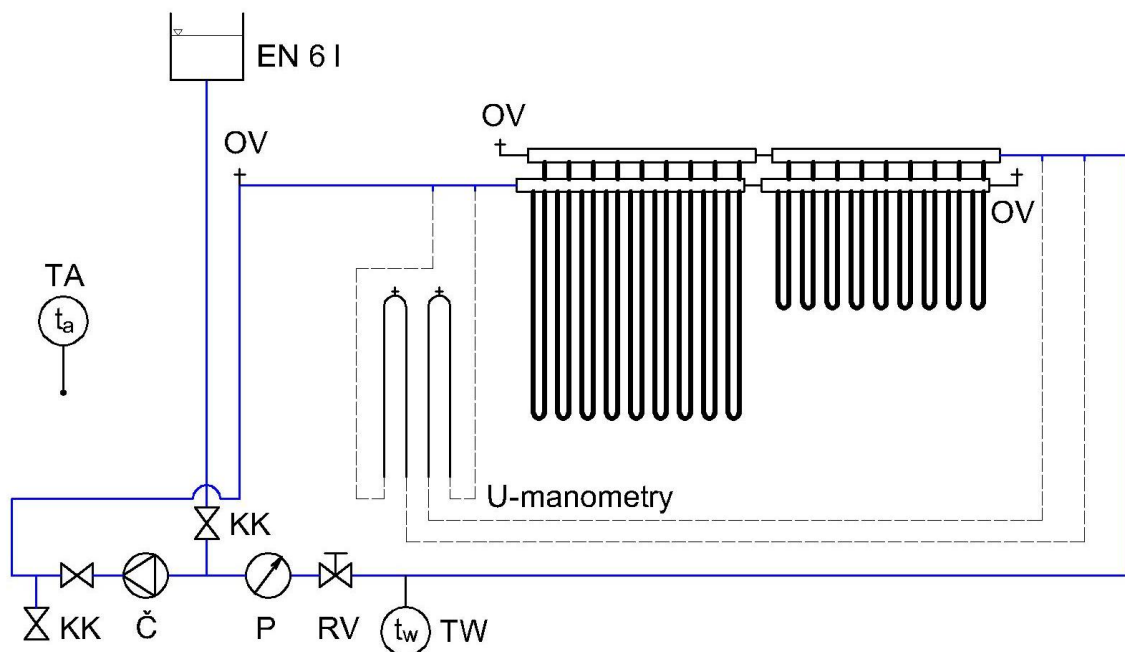
Obr. 5.1 – Průběh tlaků před a za vřazeným odporem

## 4.2. POPIS MĚŘÍCÍ TRATĚ

Měřicí trať byla postavena v halových laboratořích Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní ČVUT v Praze. Jednotlivými komponenty této tratě jsou: oběhové čerpadlo Grundfos UPS 25-80, průtokoměr Recordall M25 s impulzním výstupem, otevřená expanzní nádoba o obsahu 6 l, regulační ventil CRANE D931 DN20. Jako teplotonosná látka sloužila pro všechna měření voda, jejíž teplota byla měřena před vstupem do průtokoměru jímkovým čidlem. Tato teplota je pro další vyhodnocení měření velmi důležitá - neboť ovlivňuje jak viskozitu kapaliny, tak její hustotu a tím pádem i tlakové ztráty. Další měřenou teplotou, byla teplota okolního vzduchu – která byla měřena stíněným teploměrem (čidlo Pt100). Vzhledem k faktu, že teplota vody v U – manometrech je prakticky totožná s teplotou okolní vzduchu, bude pro výpočet hustoty jejich vodní náplně použita právě teplota  $t_a$ .

Pro záznam jednotlivých impulzů z průtokoměru byl použit měřicí přístroj AHLBORN Almero 2890-9. Impulzy byly zaznamenávány po dobu 1 minuty a následně vyhodnocena průměrná hodnota průtoku za tento časový interval. Dále tato měřicí stanice zaznamenávala i hodnoty z jednotlivých teplotních čidel.

Pro snímání před a za kapilárními rohožemi sloužila náběžná potrubí (Cu 22x1) se dvěma tlakovými odběry (mosazné trubičky o  $\varnothing$  6mm) ve vzdálenosti  $l_p = 100$  mm. Příslušné tlakové odběry byly proti sobě napojeny na dva obrácené U – manometry o výšce 2 000 mm a průměru skleněné trubice 10 mm. Celkem byly umístěny dva odběry před a dva odběry za sérii rohoží. Celé schéma měřicí trati znázorňuje Obr. 5.2, na Obr. 5.3 je vidět část postavené měřicí trati – kompletní fotodokumentaci pak obsahuje Příloha č. 1



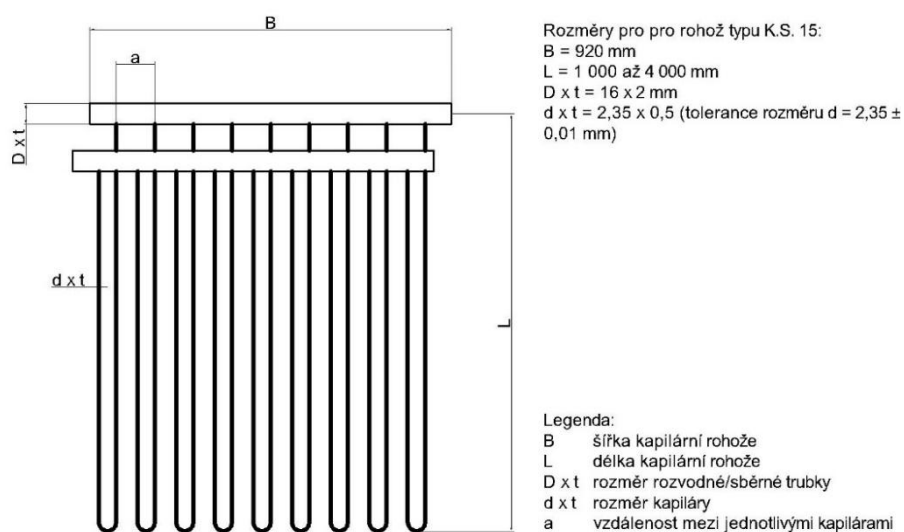
Obr. 5.2 – Schéma měřicí trati (Č – čerpadlo, EN – expanzní nádoba, KK – kulový kohout, OV – odvzdušňovací ventil, P – průtokoměr, RV – regulační ventil, TA – čidlo teploty okolního vzduchu, TW – čidlo pro měření teploty vody)



Obr. 5.3 – Fotografie měřicí trati

### 4.3. MĚŘENÉ VARIANTY

Pro všechny měřené varianty byly použity rohože KS.15 (náčrt viz Obr. 5.4) a to v délkách 1 000mm až 4 000mm. Celkový počet variant zapojení byl roven deseti. Konkrétní kombinace zapojení uvádí Tab. 5.1.



Obr. 5.4 – Náčrt rohože typu K.S 15



Tab. 5.1 – Zkoumané varianty

Var. č.	Počet rohoží	Délka rohoží [mm]			
		L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>
1	2	2 000	1 000	-	-
2	3	2 000	2 000	1 000	-
3	4	2 000	2 000	2 000	1 000
4	2	3 000	1 000	-	-
5	3	3 000	3 000	1 000	-
6	4	3 000	3 000	3 000	1 000
7	2	4 000	1 000	-	-
8	2	1 000	4 000	-	-
9	3	4 000	4 000	1 000	-
10	4	4 000	4 000	4 000	1 000

#### 4.4. PŘEPOČET VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ NA STEJNOU TEPLITU VODY

Již dříve bylo zmíněno, že teplota teplotnosné látky má vliv na její viskozitu, hustotu a tím pádem i na výsledné hodnoty tlakové ztráty. Vzhledem k faktu, že nelze zajistit u všech měření konstantní teplotu vody, je nutné naměřené hodnoty tlakových ztrát přepočítat. V této práci budou všechny výsledky přepočteny na teplotu vody 25 °C. Tento přepočet vychází z následujících rovnic:

$$\Delta p_{tw} = \Delta p_{t25} \quad [\text{Pa}] \quad (39)$$

$$\frac{64}{\text{Re}} \frac{l}{d} \frac{w^2}{2} \rho_{tw} + \zeta \frac{w^2}{2} \rho_{tw} = \frac{64}{\text{Re}} \frac{l}{d} \frac{w^2}{2} \rho_{t25} + \zeta \frac{w^2}{2} \rho_{t25} \quad [\text{Pa}] \quad (40)$$

$$\frac{64 \cdot v_{tw}}{w \cdot d} \frac{l}{d} \frac{w^2}{2} \rho_{tw} + \zeta \frac{w^2}{2} \rho_{tw} = \frac{64 \cdot v_{t25}}{w \cdot d} \frac{l}{d} \frac{w^2}{2} \rho_{t25} + \zeta \frac{w^2}{2} \rho_{t25} \quad [\text{Pa}] \quad (41)$$

$$v_{tw} \rho_{tw} = v_{t25} \rho_{t25} \quad [\text{kg/s.m}] \quad (42)$$

$$\frac{\Delta p_{t25}}{\Delta p_{tw}} = \frac{v_{t25} \rho_{t25}}{v_{tw} \rho_{tw}} \quad [-] \quad (43)$$

$$\Delta p_{t25} = \frac{v_{t25} \rho_{t25}}{v_{tw} \rho_{tw}} \Delta p_{tw} \quad [\text{Pa}] \quad (44)$$

kde je  $\Delta p_{tw}$  tlaková ztráta při teplotě vody  $t_w$  [Pa]

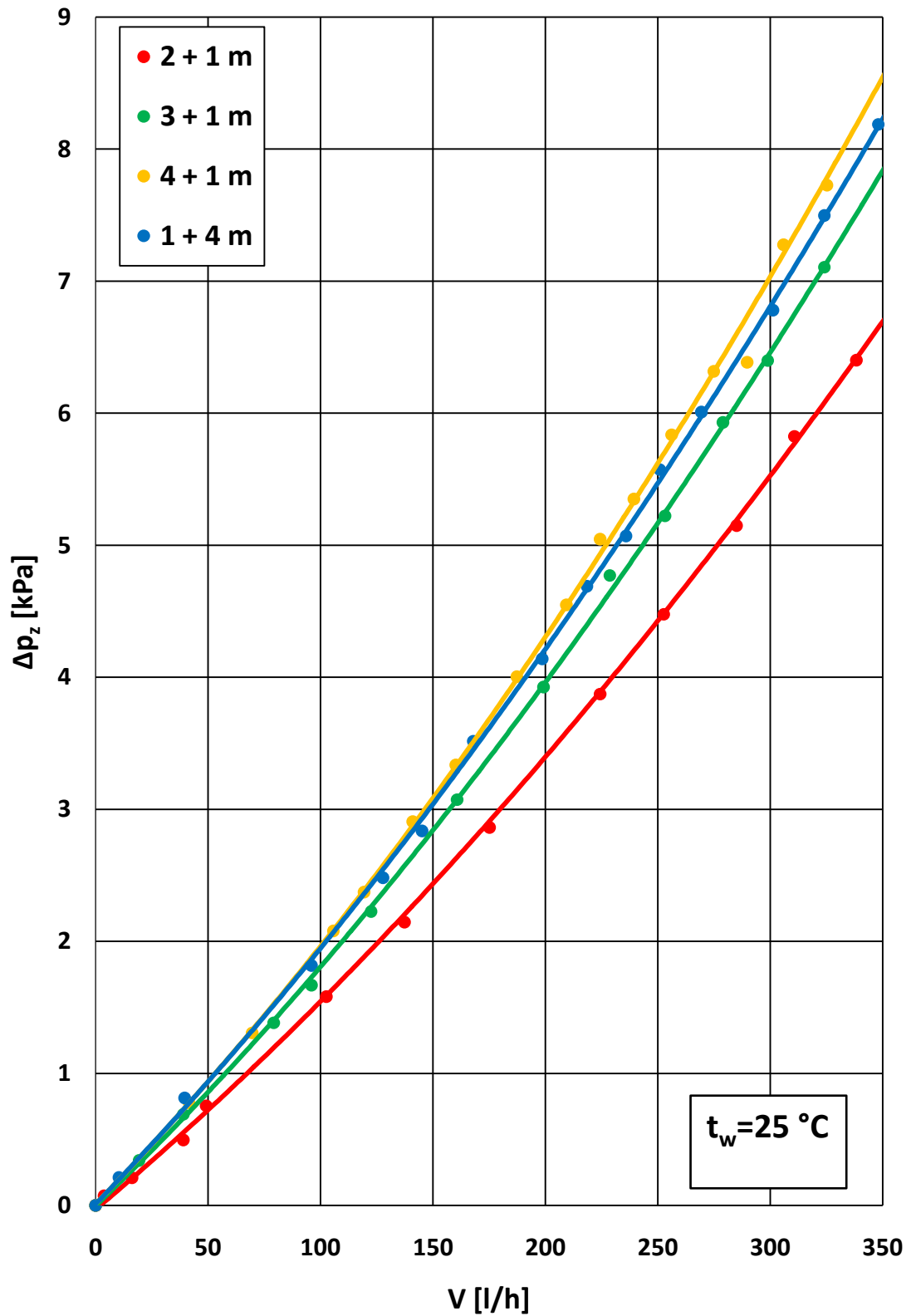
$\Delta p_{t25}$  tlaková ztráta při teplotě vody  $t_w = 25$  °C [Pa]

$\rho_{tw}$  hustota vody při teplotě vody  $t_w$  [kg/m<sup>3</sup>]

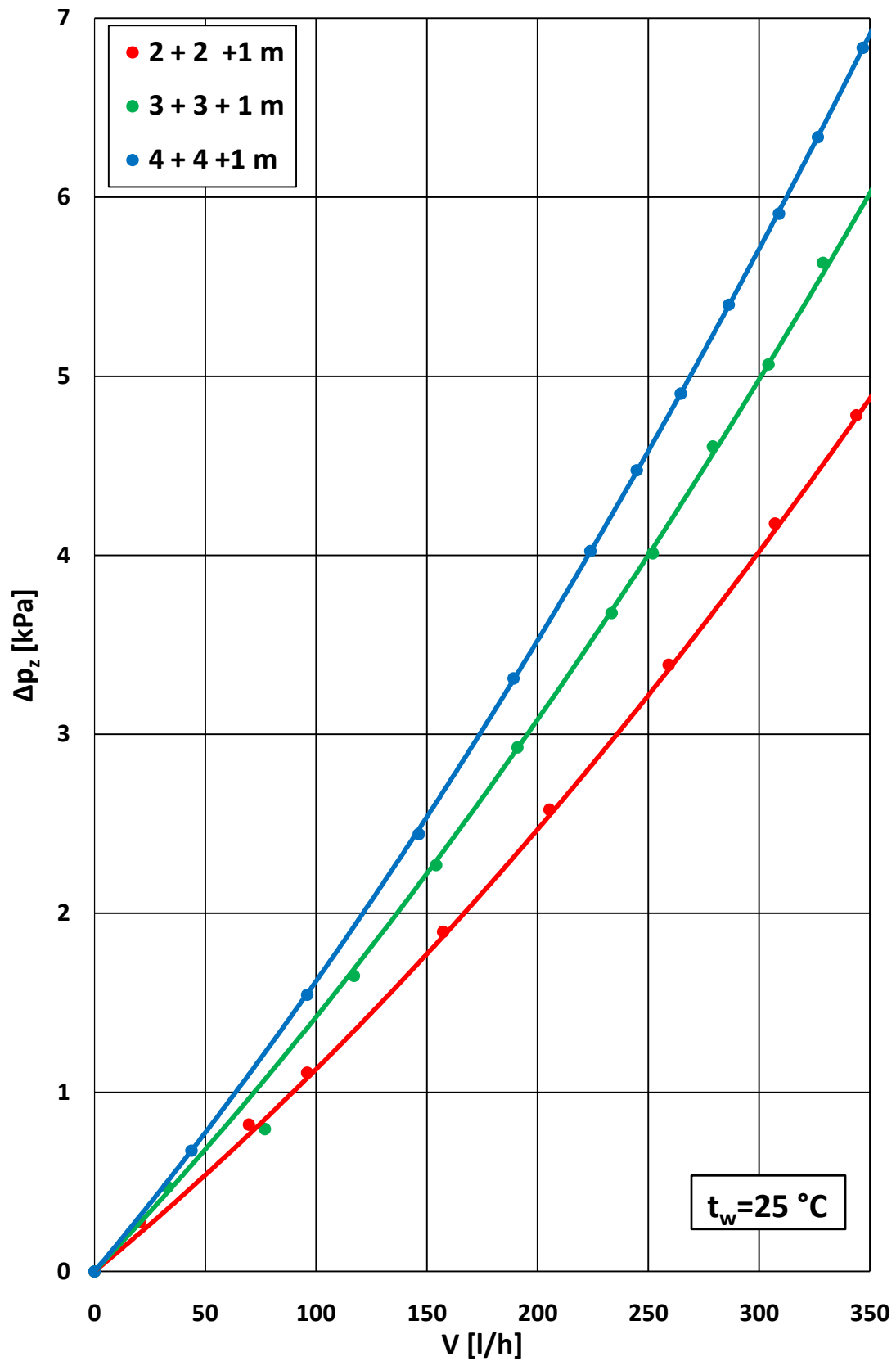
$\rho_{t25}$	hustota vody při teplotě vody $t_w = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
$\nu_{t_w}$	kinematická viskozita vody teplotě vody $t_w$	$[\text{m}^2/\text{s}]$
$\nu_{t25}$	kinematická viskozita vody teplotě vody $t_w = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$[\text{m}^2/\text{s}]$

#### 4.5. VÝSLEDKY MĚŘENÍ

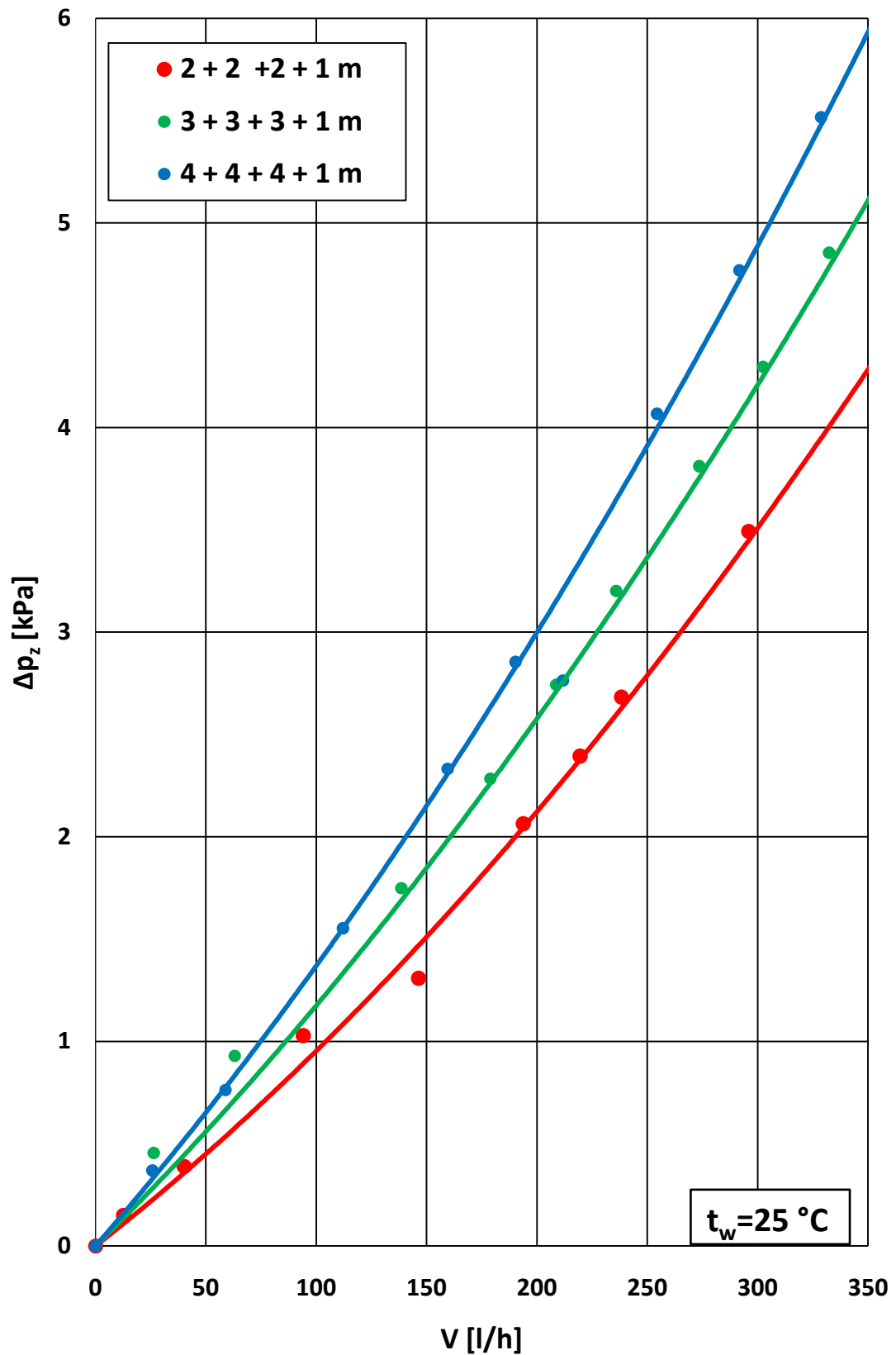
Výsledky měření tlakových ztrát příslušných varianty ukazují následující grafy (Obr. 5.4, Obr. 5.5 a Obr. 5.6). Všechny hodnoty jsou při shodné teplotě vody  $t_w=25^\circ\text{C}$ . Záznamy z jednotlivých měření jsou uvedeny v Příloze č. 2.



Obr. 5.4 – Naměřené hodnoty tlakových ztrát pro variantní zapojení 2 kapilárních rohoží



Obr. 5.5 – Naměřené hodnoty tlakových ztrát pro variantní zapojení 3 kapilárních rohoží



Obr. 5.6 – Naměřené hodnoty tlakových ztrát pro variantní zapojení 3 kapilárních rohoží

## 5. MATEMATICKÝ MODEL

Pro sestavení matematického modelu pro výpočet tlakových ztrát kapilárních rohoží jsou důležité dvě základní rovnice. První je rovnice popisující tlakové ztráty jednotlivých větví rohože – tedy rovnice (10). Druhou je rovnice kontinuity, kterou můžeme zapsat ve tvaru:

$$\dot{M}_{vstup} = \dot{M}_{výstup} = \sum_1^n \dot{M}_i \quad [\text{kg/s}] \quad (45)$$

kde je $\dot{M}_{vstup}$	hmotnostní průtok na vstupu do kapilární rohože	[kg/s]
$\dot{M}_{výstup}$	hmotnostní průtok na výstupu do kapilární rohože	[kg/s]
$\dot{M}_i$	hmotnostní průtok i-tou kapilárou	[kg/s]

za předpokladu konstantní hustoty -  $\rho = \text{konst.}$ , můžeme tuto rovnici zapsat ve tvaru:

$$\dot{V}_{vstup} = \dot{V}_{výstup} = \sum_1^n \dot{V}_i \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (46)$$

kde $\dot{V}_{vstup}$	je objemový průtok na vstupu do kapilární rohože	[m <sup>3</sup> /s]
$\dot{V}_{výstup}$	je objemový průtok na výstupu do kapilární rohože	[m <sup>3</sup> /s]
$\dot{V}_i$	je objemový průtok i-tou kapilárou	[m <sup>3</sup> /s]

### 5.1. PŘÍSTUPY K ŘEŠENÍ

V úvodu této práce bylo zmíněno, že pro modelování tlakových ztrát kapilárních rohoží existují dva přístupy k řešení:

#### a) Přibližný výpočet

V literatuře [3] bylo dokázáno že, u celkové tlakové ztráty kapilární rohože tvoří dominantní složku této ztráty, tření v kapiláře. V případě sériového zapojení rohoží se

stejnou délkou kapiláry lze tedy uvažovat stejný průtok jednotlivými kapilárami. Při uvažování konstantní hustoty tekutiny  $\rho = \text{konst.}$ , lze tento vztah zapsat:

$$\dot{V}_1 + \dot{V}_2 + \dots + \dot{V}_i + \dots + \dot{V}_n \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (47)$$

Tento přístup, však nelze použít pro sériové zapojení rohoží s různou délkou kapilár.

### b) Iterační výpočet

Tento přístup plně respektuje rovnost tlakových ztrát jednotlivých větví dle rovnice (10) a přepočítává průtok jednotlivými kapilárami. Proto lze tento přístup použít i proto výpočet sériově zapojených kapilárních rohoží s různou délkou kapiláry. Z tohoto důvodu bude k řešení tlakových ztrát použit tento přístup. Oproti přibližnému přístupu má iterační výpočet nevýhody ve složitosti řešení a s tím související časové náročnosti, naopak jeho výhodou je právě možnost použití pro výpočet zapojení rohoží nestejně délky.

## 5.2. VÝVOJ MATEMATICKÉHO MODELU

Jak bylo řečeno, iterační výpočet je mnohem složitější, než výpočet přibližný, proto bylo nutné při vývoji matematického výpočetního modelu postupovat po částech, a jednotlivé části modelu dále rozšiřovat. Pro vytvoření analytického modelu byl použit software Microsoft Excel ve verzi 2013 a doplňkem Visual Basic for Application 7.1. U všech výpočtů bylo uvažováno s konstantní hustotou tekutiny, a proto lze hmotnostní průtok nahradit průtokem objemovým. Objemový průtok je také jednou ze základních vstupních veličin výpočet tlakové ztráty rohoží, z jeho hodnoty se dále stanovuje rychlost proudění a s pomocí další vztahů i výsledné tlakové ztráty (viz předchozí kapitola), proto budou u popisů jednotlivých modelů detailně popsány vztahy pro stanovení jeho hodnoty. Konkrétně objemových průtoků v kapiláře, rozvodném a sběrném potrubí.

### 5.2.1. Model pro jednu kapilární rohož.

První verze matematického modelu byla sestavena pouze pro jednu kapilární rohož. Konkrétně pro rohož K.S 15 o rozměrech 920 x 2 000. Účelem této první verze bylo odladění rovnice (10) v prostředí Excel VBA. Výpočet pro jednu rohož byl zvolen

proto, že není nutné používat iterační výpočet a tím je mnohem jednodušší odhalit chybu v samotné složité rovnici pro výpočet tlakové ztráty jedné větve kapilární rohože. Pro ověření správnosti výpočtu bylo využito experimentálně získaných hodnot, které byly publikovány v [1].

Pro výpočet byla zvolena první větev. Průtok jednotlivými kapilárami rohože budeme v tuto chvíli předpokládat všude stejný. Průtok jednou kapilárou můžeme tedy vyjádřit vzorcem:

$$\dot{V}_{kap} = \frac{\dot{V}_{vstup}}{n} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (48)$$

kde je  $\dot{V}_{vstup}$  objemový průtok celou rohoží  $[\text{m}^3/\text{s}]$

$n$  celkový počet kapilár (pro jednu rohož  $n = 30$ )  $[-]$

Vzhledem k tomu, že pro výpočet byla zvolena první větev, bude pro výpočet třetí ztráty v rozvodném potrubí započítán pouze 1. úsek tohoto potrubí, ve kterém je průtok roven celkovému průtoku kapilární rohoží (viz. Obr. 6.1). Místní tlaková ztráta v přímém směru při odbočení proudu je v tomto případě rovna nule. Upravená rovnice pro výpočet tlakové ztráty  $\Delta p_z$  jedné rohože bude tedy vypadat takto:

$$\begin{aligned} \Delta p_z = & \Delta p_{t,d,1} + \Delta p_{t,D,r,1} + \sum_1^{n=30} \Delta p_{t,D,s,i} + \Delta p_{m,obl,1} + \Delta p_{m,o,1} + \\ & + \Delta p_{m,s,1} + \sum_1^{n=30} \Delta p_{m,s,p,i} \end{aligned} \quad [\text{Pa}] \quad (49)$$

kde je  $\Delta p_{t,d,1}$  tlaková ztráta třením v 1. kapiláře  $[\text{Pa}]$

$\Delta p_{t,D,r,1}$  tlaková ztráta třením v 1. úseku rozvodného potrubí  $[\text{Pa}]$

$\sum_1^{n=30} \Delta p_{t,D,s,i}$  celková tlaková ztráta třením v rozvodném rozvodném potrubí  $[\text{Pa}]$

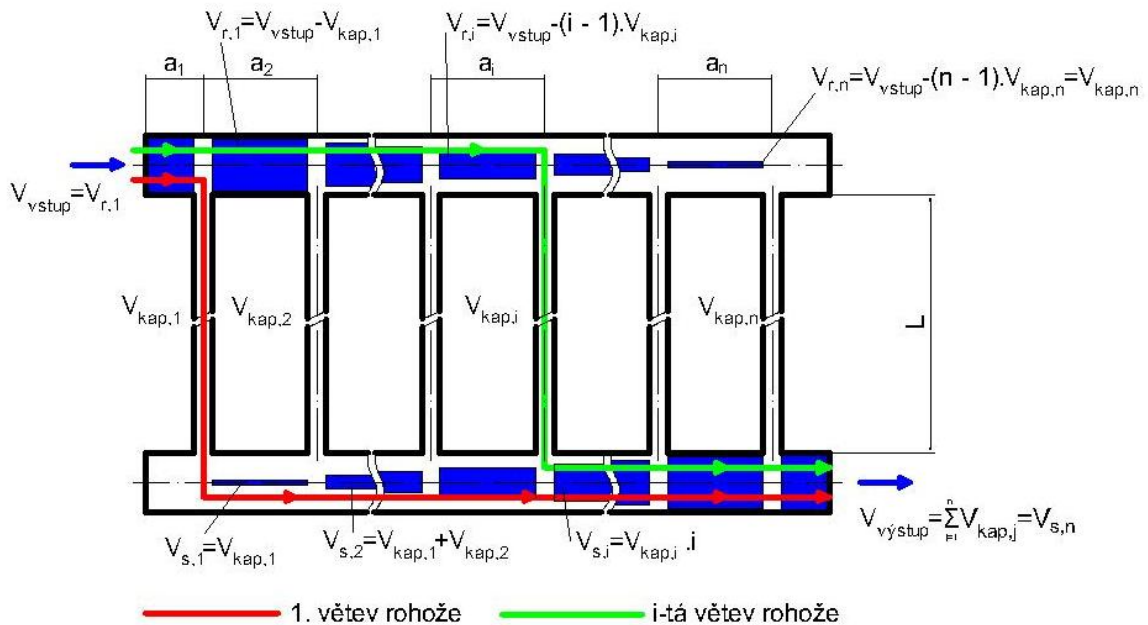
$\Delta p_{m,obl,1}$  tlaková ztráta v oblouku u 1. kapiláry  $[\text{Pa}]$

$\Delta p_{m,o,1}$  tlaková ztráta místní při odbočení proudu do 1. kapiláry  $[\text{Pa}]$



$\Delta p_{m,s,1}$  tlaková ztráta místní při spojení proudu  
z 1. kapiláry [Pa]

$\sum_1^{n=30} \Delta p_{m,s,p,i}$  celková tlaková ztráta při odbočení  
proudu v přímém směru [Pa]



Obr. 6.1 – Průběh průtoků v rozvodném a sběrném potrubí kapilární rohože

Průtok prvním úsekem sběrného potrubí bude roven průtoku kapilárou (viz Obr. 6.1). Z důvodů předpokladu stejných průtoků v jednotlivých kapilárách této rohože lze průtok v každém úseku sběrného potrubí vypočítat dle vzorce:

$$\dot{V}_{s,i} = i \cdot \dot{V}_{kap} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (50)$$

kde je  $i$  číslo úseku sběrného potrubí [-]

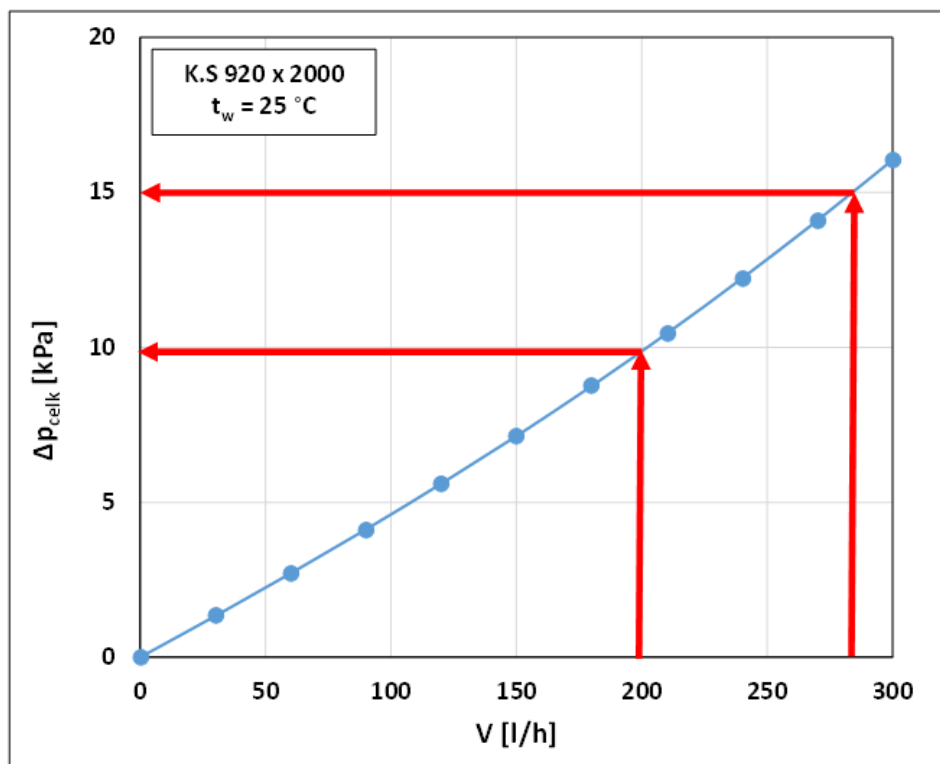
$\dot{V}_{kap}$  objemový průtok kapilárou [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Celkový průtok kapilární rohoží byl zvolen v rozmezí 0 až 300 l/h s odstupňováním po 30 l/h. tento rozsah byl zvolen s ohledem na to, aby bylo možné lépe porovnat vypočítané hodnoty s experimentálně získanými hodnotami, které byly uvedeny v [1]. Veškeré výpočty byly provedeny pro teplotu vody  $t_w = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ . V tabulce

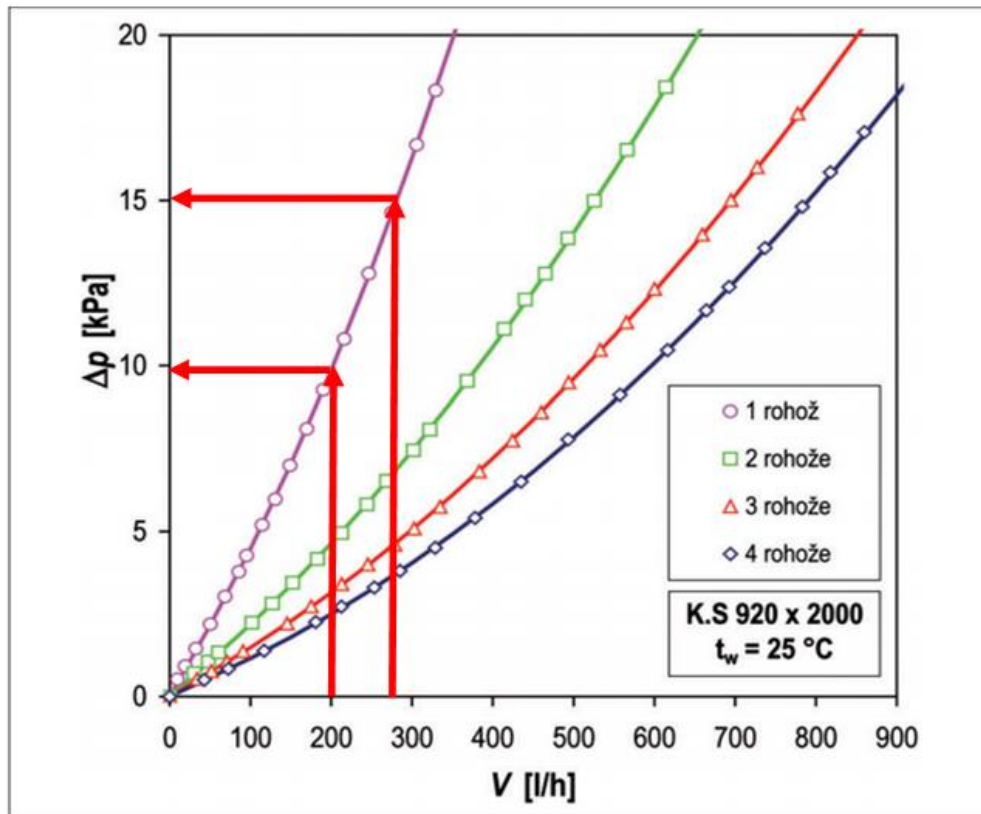
Tab 6.1 můžeme vidět vypočtené hodnoty tlakové ztráty rohože K.S 920 x 2 000. Grafy jsou vidět na Obr. 6.2, výsledky experimentálního měření pak na Obr. 6.3.

Tab. 6.1 – Výsledky výpočtu tlakové ztráty rohože K.S 920 x 2 000

$V_{\text{vstup}}$ [l/hod]	$\Delta p_{\text{celk}}$ [kPa]
0	0,00
30	1,33
60	2,71
90	4,12
120	5,60
150	7,14
180	8,75
210	10,45
240	12,23
270	14,10
300	16,05

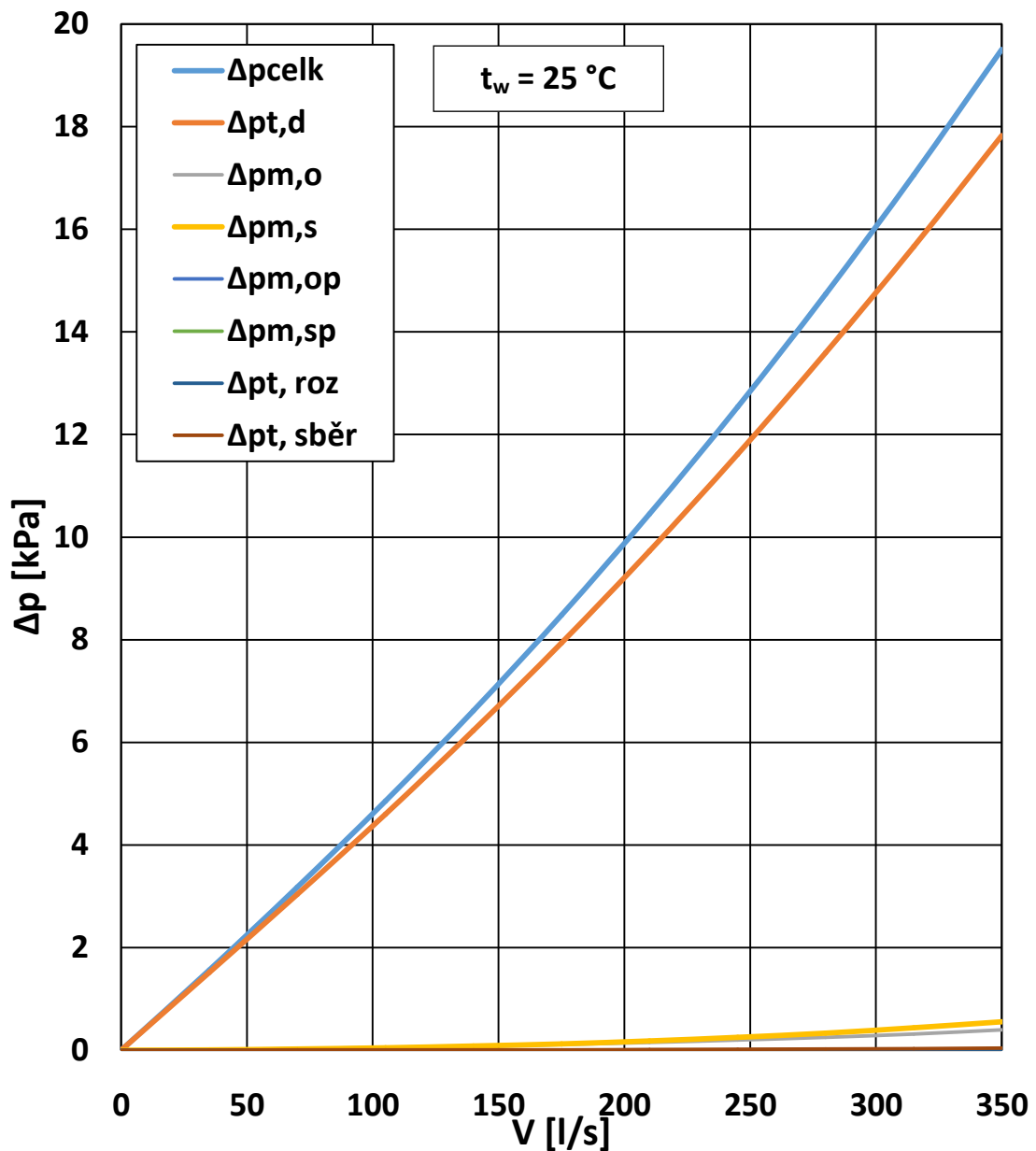


Obr. 6.2 – Graf závislosti tlakové ztráty rohože K.S 920 x 2 000 na průtoku získaný výpočtem. Červené šipky ukazují dva kontrolní odečty pro porovnání s experimentálně naměřenými hodnotami



Obr. 6.3 – Graf závislosti tlakové ztráty rohože na průtoku získaný výpočtem experimentálním měřením [1]

Z grafů vypočtených a naměřených hodnot je patrné, že hodnoty tlakových ztrát jsou stejné a tedy můžeme říci, že matematický model pro rohož K.S 920 x 2 000 funguje dobře a lze s ním dále pracovat pro iterační výpočty sériově zapojených kapilárních rohoží. Pokud se na celkovou tlakovou ztrátu podíváme z hlediska jednotlivých složek, zjistíme, že dominantní je tlaková ztráta třením v kapiláře – což je vidět na Obr. 6.4.



Obr. 6.4 – Graf zobrazující jednotlivé složky celkové tlakové ztráty kapilární rohože K.S 920 x 2 000

### 5.2.2. Model pro dvě rohože

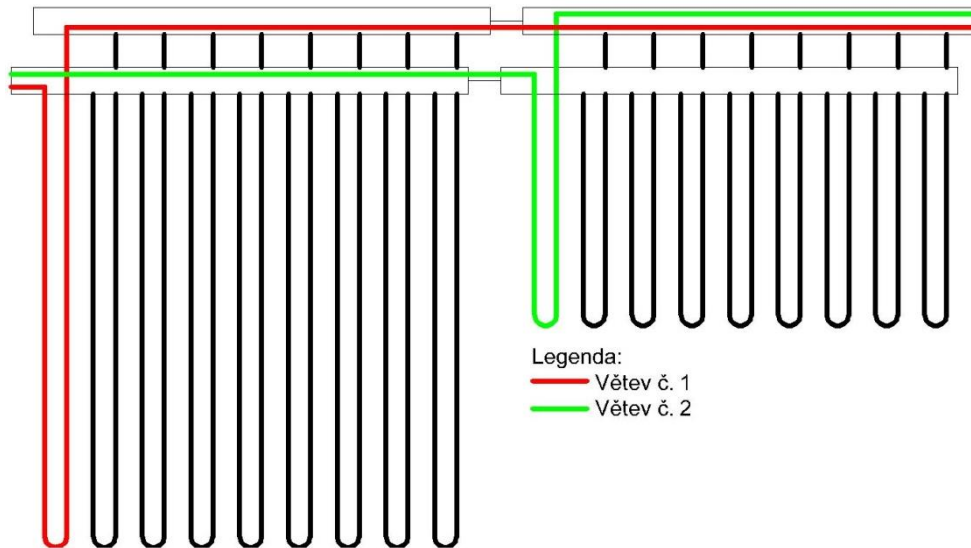
Pro výpočet tlakové ztráty dvou sériově zapojených kapilárních rohoží o různé délce kapiláry je nutné použít iterační výpočet. Základ toho modelu vychází z modelu pro jednu rohož, avšak je nutné některé předpoklady změnit a doplnit.

První změnou je fakt, že díky připojení další rohože nám vzniká další větev. Celkem tedy máme dvě větve (viz Obr. 6.5), které musejí mít shodnou tlakovou ztrátu, matematicky lze tuto podmínku zapsat jako:

$$\Delta p_1 = \Delta p_2 \quad [\text{Pa}] \quad (51)$$

kde  $\Delta p_1$  tlaková ztráta 1. větve [Pa]

$\Delta p_2$  tlaková ztráta 2. větve [Pa]



Obr. 6.5 – Znázornění větví pro výpočet tlakové ztráty dvou rohoží

Rovnice pro výpočet tlakové ztráty jednotlivých větví lze zapsat ve tvaru:

Pro 1. větev:

$$\begin{aligned} \Delta p_1 = & \Delta p_{t,d,1} + \Delta p_{t,D,r,c,1} + \Delta p_{t,D,s,c,1} + \Delta p_{m,obl,1} + \Delta p_{m,o,1} + \\ & + \Delta p_{m,s,1} + \Delta p_{m,s,p,c,1} + \Delta p_{t,D,s,c,2} + \Delta p_{m,s,p,c,2} \end{aligned} \quad [\text{Pa}] \quad (52)$$

kde je  $\Delta p_{t,d,1}$  tlaková ztráta třením v kapiláře 1. rohože [Pa]

$\Delta p_{t,D,s,c,1}$  celková tlaková ztráta třením ve sběrném potrubí 1. rohože [Pa]

$\Delta p_{t,D,s,c,1}$  celková tlaková ztráta třením v rozvodném potrubí 1. rohože [Pa]

$\Delta p_{m,obl,1}$  tlaková ztráta místní v oblouku 1. rohože [Pa]

$\Delta p_{m,o,1}$  tlaková ztráta místní odbočením proudu u 1. rohože [Pa]

$\Delta p_{m,s,1}$	tlaková ztráta místní spojením proudu u 1. rohože	[Pa]
$\Delta p_{m,s,p,c,1}$	celková místní ztráta spojením proudu v přímém směru u 1. rohože	[Pa]
$\Delta p_{t,D,s,c,2}$	je tlaková ztráta třením ve sběrném potrubí u 2. rohože	[Pa]
$\Delta p_{m,s,p,c,2}$	tlaková ztráta místní spojením proudu v přímém směru u 2. rohože	[Pa]

Pro 2. větev:

$$\Delta p_2 = \Delta p_{t,D,r,c,1} + \Delta p_{m,r,p,c,1} + \Delta p_{t,d,2} + \Delta p_{t,D,s,c,2} + \Delta p_{t,D,r,c,2} + \Delta p_{m,obl,2} + \Delta p_{m,o,2} + \Delta p_{m,s,2} + \Delta p_{m,s,p,c,2} \quad [\text{Pa}] \quad (53)$$

kde	$\Delta p_{t,D,s,c,1}$	celková tlaková ztráta třením v rozvodném potrubí 1. rohože	[Pa]
	$\Delta p_{m,r,p,c,1}$	celková místní ztráta odbočením proudu v přímém směru u 1. rohože	[Pa]
	$\Delta p_{t,d,2}$	tlaková ztráta třením v kapiláře 2. rohože	[Pa]
	$\Delta p_{t,D,s,c,2}$	celková tlaková ztráta třením ve sběrném potrubí 2. rohože	[Pa]
	$\Delta p_{t,D,r,c,2}$	celková tlaková ztráta třením v rozvodném potrubí 2. rohože	[Pa]
	$\Delta p_{m,obl,2}$	tlaková ztráta místní v oblouku 2. rohože	[Pa]
	$\Delta p_{m,o,2}$	tlaková ztráta místní odbočením proudu u 2. rohože	[Pa]
	$\Delta p_{m,s,2}$	tlaková ztráta místní spojením proudu u 2. rohože	[Pa]
	$\Delta p_{m,s,p,c,2}$	celková místní ztráta spojením proudu v přímém směru u 2. rohože	[Pa]

Protože kapilární rohože nemají stejnou délku nelze za předpokladu splnění podmínky rovnosti tlakových ztrát jednotlivých větví uvažovat shodný průtok kapilárami těchto větví a platí tedy rovnice (54). Tento fakt je dán tím, že dominantní složkou celkové tlakové ztráty kapilární rohože je tlaková ztráta třením v kapiláře – jak můžeme vidět na Obr. 6.4.

$$\dot{V}_{kap1} \neq \dot{V}_{kap2} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (54)$$

kde je  $\dot{V}_{kap1}$  průtok kapilárou větve u 1. rohože  $[\text{m}^3/\text{s}]$

$\dot{V}_{kap2}$  průtok kapilárou větve u 2. rohože  $[\text{m}^3/\text{s}]$

Pro zjednodušení výpočtu průtoků v jednotlivých úsecích rozvodných a sběrných potrubí budeme uvažovat, že průtok kapilárami v rohoži stejné délky je shodný. Díky tomuto zjednodušení můžeme průtoky v rozvodném a sběrném potrubí rohoži stanovit takto:

#### a) 1. větev - rozvodné potrubí 1. rohože

Zde potřebujeme pro určení tlakové ztráty třením znát průtok pouze v prvním úseku rozvodného potrubí, pro objemový průtok tedy platí stejný vztah jako u modelu pro jednu kapilární rohož:

$$\dot{V}_{r,1} = \dot{V}_{vstup} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (55)$$

kde je  $\dot{V}_{vstup}$  objemový průtok celou rohoží  $[\text{m}^3/\text{s}]$

#### b) 1. větev - sběrné potrubí 1. rohože

Z důvodů zjednodušení můžeme uvažovat, že v každém úseku se objemový průtok navýší o hodnotu průtoku kapilárou rohože č. 1. Toto lze matematicky zapsat jako:

$$\dot{V}_{s,1,i} = i \cdot \dot{V}_{kap1} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (56)$$

kde je  $i$  číslo úseku sběrného potrubí  $[-]$

$$\dot{V}_{kap1} \quad \text{objemový průtok kapilárou u 1. rohože} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Číslo úseku  $i$  nabývá v tomto případě hodnot 0 až  $n$ , kdy  $n = 30$  a je to počet kapilár 1. rohože. Průtok posledním úsekem sběrného potrubí 1. rohože potom můžeme vyjádřit jako:

$$\dot{V}_{s,1,c} = n \cdot \dot{V}_{s,1,i} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (57)$$

### c) 1. větev - sběrné potrubí 2. rohože

U sběrného potrubí 2. rohože je nutné si uvědomit, že je napojeno na poslední úsek sběrného potrubí 1. rohože. Tato hodnota se dále konstantně navyšuje o průtok kapilárou druhé rohože  $\dot{V}_{kap2}$ .

$$\dot{V}_{s,2,i} = \dot{V}_{s,1,c} + (i \cdot \dot{V}_{kap2}) \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (58)$$

kde je  $i$  číslo úseku sběrného potrubí [-]

$$\dot{V}_{kap2} \quad \text{objemový průtok kapilárou u 2. rohože} \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Číslo úseku  $i$  nabývá v tomto případě hodnot 0 až  $n$ , kdy  $n = 30$  a je to počet kapilár 2. rohože. Průtok posledním úsekem sběrného potrubí 2. rohože potom můžeme vyjádřit jako:

$$\dot{V}_{s,2,c} = \dot{V}_{s,1,c} + (n \cdot \dot{V}_{kap2}) \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (59)$$

Z rovnice kontinuity musí platit podmínka:

$$\dot{V}_{vystup} = \dot{V}_{s,2,c} = \dot{V}_{vstup} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (60)$$

### d) 2. větev - rozvodné potrubí 1. rohože

U průtoků úseky rozvodného potrubí můžeme z důvodů zavedeného zjednodušení uvažovat konstantní úbytek objemového průtoku.

$$\dot{V}_{r,1,i} = \dot{V}_{vstup} - (i-1) \cdot \dot{V}_{kap1} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (61)$$



kde je  $i$  číslo úseku rozvodného potrubí [-]

Průtok posledním úsekem rozvodného potrubí 2. rohože se stanoví ze vztahu:

$$\dot{V}_{r,1,c} = \dot{V}_{vstup} - n \cdot \dot{V}_{kap1} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (62)$$

kde je  $n$  počet kapilár 1. rohože [-]

### e) 2. větev - rozvodné potrubí 2. rohože

U rozvodného potrubí je pro potřeby výpočtu tlakové ztráty znát pouze průtok prvním úsekem tohoto potrubí. Vzhledem k sériovému zapojení rohoží, je tento průtok rovem hodnotě průtoku v posledním úseku rozvodného potrubí 1. rohože. A tedy:

$$\dot{V}_{r,2,i} = \dot{V}_{r,1,c} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (63)$$

### f) 2. větev - sběrné potrubí 2. rohože

Stanovení této hodnoty je naprosto totožné se se stanovením průtoku sběrným potrubím u 2. rohože pro 1. větev.

### g) Průtoky kapilárami $\dot{V}_{kap1}$ a $\dot{V}_{kap2}$

Stanovení průtoku kapilárami příslušných větví je nejsložitější částí výpočtu. Jak už bylo řečeno, průtok kapilárou má největší vliv na tlakové ztráty. Tento průtok také ovlivňuje ztráty v rozvodném a sběrném potrubí. Vzhledem k platnosti rovnice kontinuity zavedeného zjednodušení uvažováním shodných hodnot průtoků kapilárami u rohoží stejných délek musí platit vztah:

$$\dot{V}_{vstup} = n \cdot \dot{V}_{kap1} + n \cdot \dot{V}_{kap2} = \dot{V}_{vystup} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (64)$$

kde  $n$  počet kapilár jedné rohože [-]

Z této rovnice plyne, že průtoky  $\dot{V}_{kap1}$  a  $\dot{V}_{kap2}$  jsou vzájemně v interakci – tedy, že zvýšení jedné hodnoty vyvolá snížení druhé a naopak. Dále můžeme říct, že tlaková ztráta tvoří na průtoku závislost ve tvaru paraboly 2. stupně - tlaková ztráta tedy roste

s rostoucím průtokem, respektive s 2. mocninou rychlostí. Právě z těchto skutečností vychází princip celého výpočtu.

V první kroku je třeba stanovit základní hodnoty obou průtoků. K tomuto výpočtu slouží postup uvedený v modelu pro jednu rohož – že průtok všemi kapilárami v systému je shodný. Pro první výpočet tzv. nultou iteraci bude použit vztah (64), který spočítá alespoň velice přibližné hodnoty těchto průtoků.

$$\dot{V}_{kap1} = \dot{V}_{kap2} = \frac{\dot{V}_{vstup}}{2 \cdot n} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (65)$$

kde  $n$  počet kapilár jedné rohože [-]

Díky tomuto kroku je možné spočítat první hodnoty tlakové ztráty jednotlivých větví. Tyto hodnoty se samozřejmě z výše popsanych důvodů velice liší. Program však díky tomuto kroku získal vstupní údaje pro výpočet nové hodnoty průtoků  $\dot{V}_{kap1}$ .

Úprava hodnoty průtoků  $\dot{V}_{kap1}$  probíhá tak, že program nejprve porovná obě vypočtené hodnoty tlakových ztrát  $\Delta p_1$  a  $\Delta p_2$  a rozdíl těchto hodnot označí jako  $\delta \Delta p$ . Zápis tohoto úkonu tedy zní:

$$\delta \Delta p = \Delta p_1 - \Delta p_2 \quad [\text{Pa}] \quad (66)$$

Na základě velikosti tohoto rozdílu určí velikost změny průtoků  $\dot{V}_{kap1}$  a to dle vztahu (67). Fyzikálně spolu tyto dvě hodnoty nesouvisí – jedná se pouze o pomocný vztah pro jednoduché určení potřebné změny průtoků. Hodnota  $10^{10}$  byla zjištěna v průběhu tvorby modelu experimentálně. Vyšší hodnoty nemají na přesnost výsledku vliv a pouze zpomalují výpočet, hodnoty nižší sice výpočet nepatrně zrychlí, ale zvyšuje se riziko správného dopočtu pro malé změny průtoků a tím i pád celého programu.

$$\delta \dot{V}_{kap1} = \frac{\delta \Delta p}{10^{10}} \quad [\text{m}^3/\text{s}] \quad (67)$$

V další fázi program na základě kladné, nebo záporné hodnoty  $\delta \Delta p$  rozhodne, zda má vypočtenou hodnotu  $\delta \dot{V}_{kap1}$  přičíst, nebo odečíst k hodnotě  $\dot{V}_{kap1}$  a následně dojde ke změně této hodnoty.

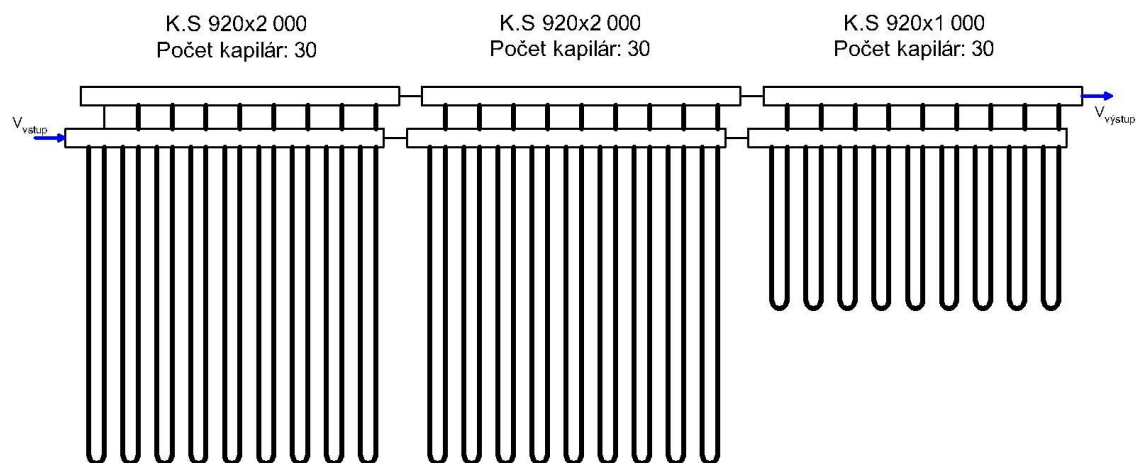
Z rovnice (64) plyne, že průtoky oběma kapilárami jsou vzájemně provázány, z tohoto důvodu dojde při změně hodnoty  $\dot{V}_{kap1}$  k přepočtu hodnoty  $\dot{V}_{kap2}$ . Po tomto přepočtu znovu proběhne celý výpočet tlakových ztrát jednotlivých větví a celý cyklus se opakuje, dokud není splněna podmínka rovnosti obou tlakových ztrát. Tato podmínka je nastavena na odchylku  $\pm 0,5$  Pa. Odchylka je nutná vzhledem k technickým omezením VBA, pokud by tato podmínka nebyla stanovena, systém by teoreticky mohl počítat donekonečna. Velikost odchylky na 0,5 Pa byla zvolena jako rozumný kompromis mezi rychlostí výpočtu a přesností.

I přesto, že se jedná o relativně složitý výpočet, je rychlost celého výpočtu na dobré úrovni. Výpočet pro jednu hodnotu trvá přibližně 5 sekund, pro 22 hodnot, které byly počítány pro účel porovnání s experimentálním měřením, trval celý výpočet cca 90 sekund.

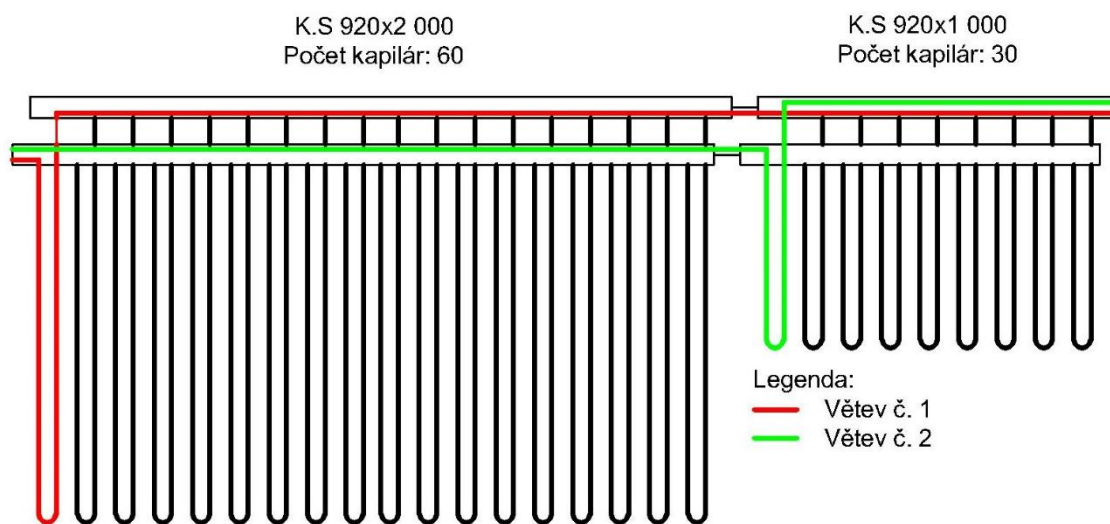
Přesnosti výpočtu matematického modelu včetně porovnání výsledků s naměřenými daty bude věnována zvláštní kapitola.

### 5.2.3. Model pro tři a čtyři rohože

Pro výpočet tlakových ztrát tří a čtyř sériově zapojených kapilárních rohoží se využívá matematického modelu pro dvě rohože, který byl popsán výše. Tento model je možné použít proto, že v každé zkoumané variantě se vyskytují pouze dvě různé délky kapilárních rohoží. Díky tomuto faktu je možné zavést zjednodušení, které předpokládá, že dvě rohože stejné délky zapojené sériově za sebou se při výpočtu chovají jako jedna rohož, avšak s dvojnásobným počtem kapilár. Takže analytický model může fungovat na základě stejného principu. Reálné zapojení vidíme na Obr. 6.6, předpokládané zjednodušení pak na Obr. 6.7.



Obr. 6.6 – Reálné zapojení 3 kapilárních rohoží



Obr. 6.7 – Předpokládané zapojení pro matematický model s vyznačením jednotlivých výpočetních větví

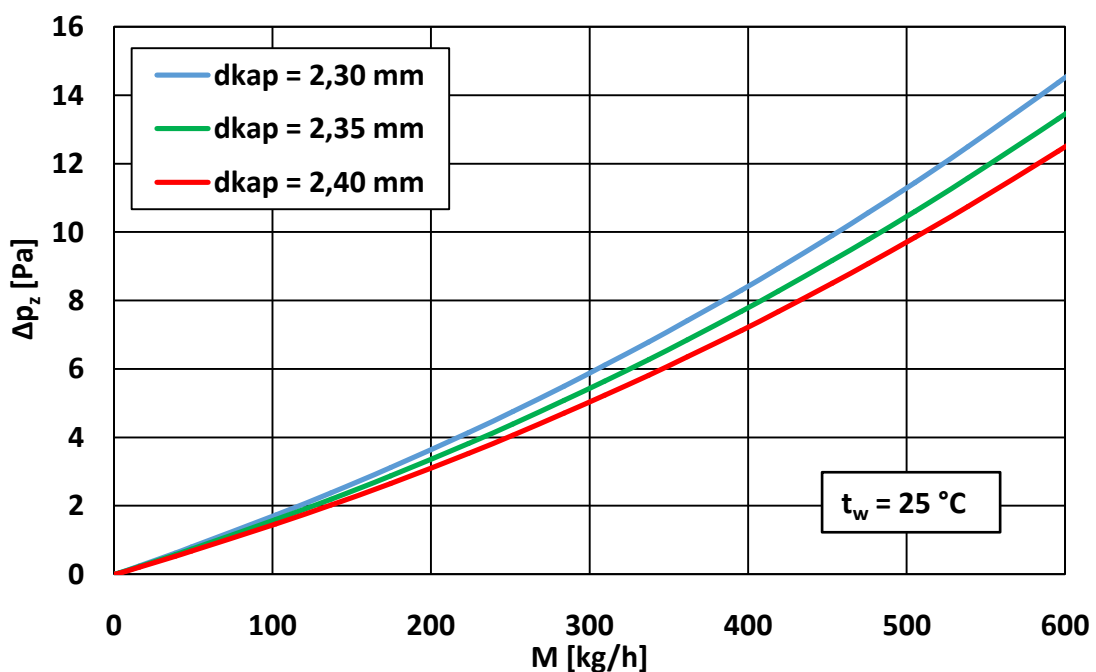
## 6. DISKUZE VÝSLEDKŮ

V této kapitole budou prezentovány výsledky výpočtu matematického modelu pro jednotlivé varianty a bude provedena konfrontace s hodnotami, které byly získány experimentálním měřením. Tím dojde k ověření správnosti výpočtu celého modelu.

### 6.1. VLIV PRŮMĚRU KAPILÁRY NA TLAKOVOU ZTRÁTU

Před samotnou interpretací výsledků jednotlivých variant zapojení a jejich porovnání s naměřenými hodnotami, je nutné poukázat ještě na jednu věc, kterou je vliv rozměrů kapiláry na průběh tlakové ztráty.

Výrobci u vnitřního průměru kapiláry uvádějí možnou odchylku  $\pm 0,05$  mm, vnitřní průměr se tedy může pohybovat v rozmezí 2,30 mm a 2,40 mm. Tato skutečnost, vzhledem k dominantní roli tlakové ztráty třením v kapiláře, má významný vliv na celkovou tlakovou ztrátu. Pro zobrazení vlivu průměru kapiláry na celkovou tlakovou ztrátu byly pomocí modelu provedeny výpočty pro variantu zapojení 2 + 1 m s uvažovanými vnitřními průměry kapilár 2,30 mm, 2,35 mm a 2,40 mm. Výsledky tohoto výpočtu ukazuje Tab. 7.1 a Obr. 7.1.



Obr. 7.1 Porovnání tlakové ztráty rohoží při zapojení 2 + 1 m pro různé vnitřní průměry kapilár.

Tab 7.1 Výsledky výpočtu tlakové ztráty varianty 2 + 1 m pro různé průměry kapilár

Průtok soustavou	$d_{\text{kap}} = 2,30 \text{ mm}$	$d_{\text{kap}} = 2,35 \text{ mm}$	$d_{\text{kap}} = 2,40 \text{ mm}$	Odchylka mezi 2,30 a 2,40 mm	Odchylka mezi 2,30 a 2,40 mm
M	$\Delta p_z$	$\Delta p_z$	$\Delta p_z$	-	-
kg/h	kPa	kPa	kPa	kPa	%
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3,6	0,04	0,04	0,03	0,01	21,95
16,1	0,24	0,22	0,20	0,04	16,32
38,9	0,62	0,57	0,53	0,10	15,57
49,0	0,80	0,73	0,67	0,12	15,43
102,2	1,74	1,60	1,47	0,26	15,05
136,9	2,38	2,19	2,03	0,35	14,91
174,6	3,11	2,87	2,65	0,46	14,79
223,6	4,13	3,82	3,53	0,60	14,62
251,7	4,76	4,39	4,06	0,69	14,54
284,0	5,50	5,08	4,70	0,79	14,43
309,7	6,11	5,65	5,23	0,88	14,37
337,2	6,78	6,27	5,81	0,97	14,31
361,7	7,41	6,85	6,35	1,06	14,27
395,8	8,30	7,68	7,12	1,18	14,21
419,1	8,94	8,27	7,67	1,27	14,17
453,2	9,90	9,16	8,50	1,40	14,11
475,9	10,56	9,78	9,08	1,49	14,08
505,2	11,45	10,60	9,84	1,61	14,04
538,6	12,49	11,57	10,74	1,75	14,00
595,4	14,36	13,30	12,36	2,00	13,94
630,7	15,58	14,44	13,42	2,17	13,91
676,7	17,25	15,99	14,86	2,39	13,86

Výsledky výpočtů potvrzují významný vliv průměru kapiláry na celkovou tlakovou ztrátu kapilární rohože. Jak je vidět v Tab 7.1 rozdíl tlakových ztrát vypočtených pro průměr kapiláry 2,30 mm a pro průměr 2,40 mm může být až 22 %, s tím, že průměrná odchylka se pohybuje kolem 14 %.

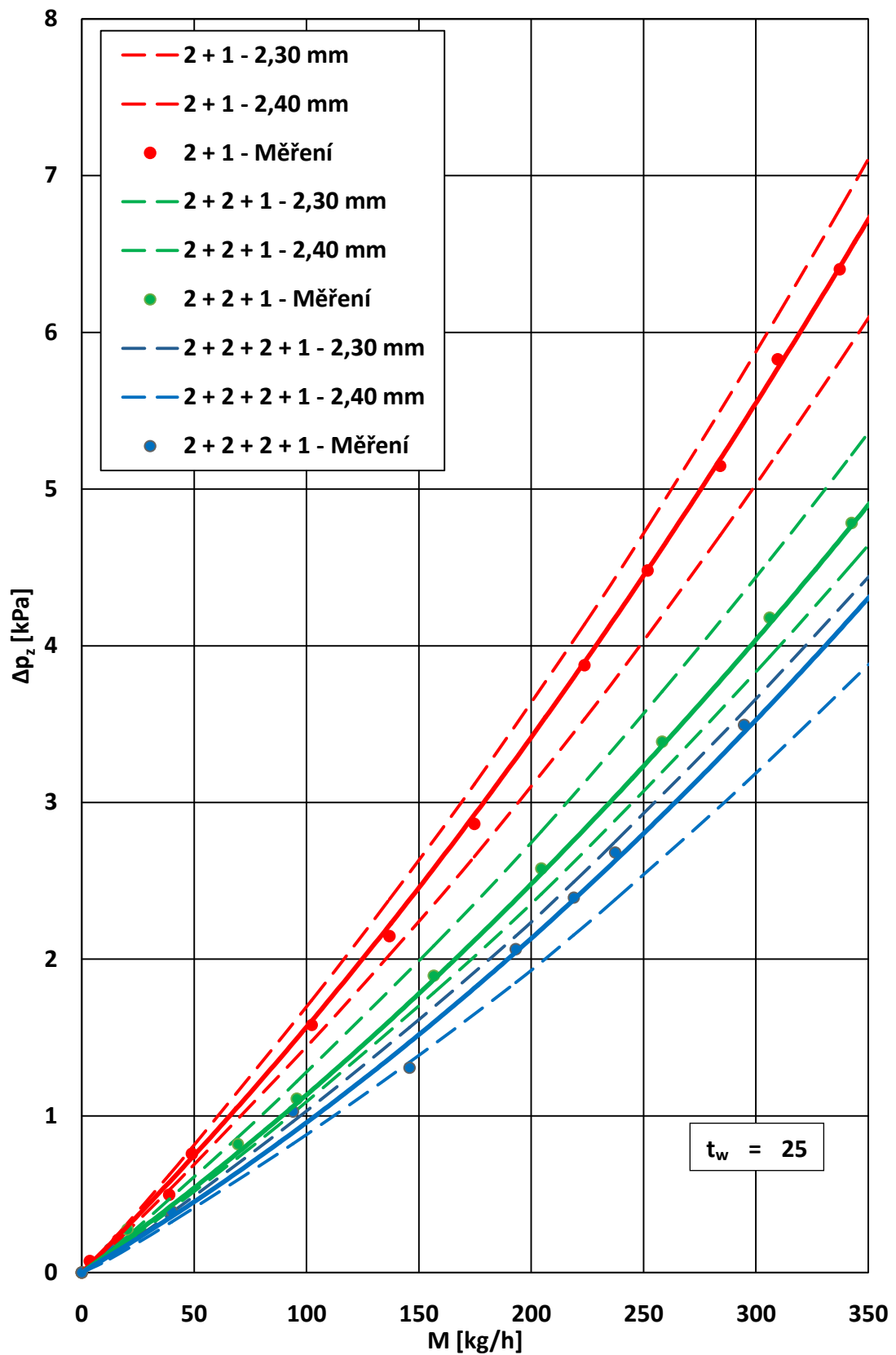
## 6.2. VARIANTY SE ZAPOJENÍM ROHOŽÍ 2 a 1 m

Pro tyto dvě délky kapilárních rohoží byly sestaveny celkem tři varianty zapojení a to konkrétně varianty: 2 + 1 m, 2 + 2 + 1 m a 2 + 2 + 2 + 1 m. Pokud se podíváme na odchylky hodnot vypočtených a získaných experimentálním měření, které uvádí Tab. 7.2 vidíme, že nejvyšší průměrné odchylky vykazuje zapojení pro 2 + 2 + 2 + 1 m, nejmenší naopak varianta 2 + 2 + 1 m

*Tab.7.2 – Odchylky naměřených a vypočtených hodnot pro varianty zapojení kapilárních rohoží délky 2 m a 1m. Výsledky jsou získány za vstupních podmínek  $t_w = 25\text{ }^\circ\text{C}$  a  $d_{kap} = 2,35\text{ mm}$*

Průtok	Odchylka	Odchylka	Odchylka
M	2 + 1	2 + 2 + 1	2 + 2 + 2 + 1
[kg/h]	[%]	[%]	[%]
0	0	0	0
35	4,10	7,18	17,37
70	4,42	1,57	11,52
105	3,34	0,27	8,52
140	2,27	0,84	6,67
175	1,42	0,77	5,52
210	1,00	0,59	4,52
245	0,99	0,50	3,50
280	1,05	0,12	2,95
315	1,23	0,38	2,70
350	1,47	0,96	2,70
Prum	<b>2,13</b>	<b>1,32</b>	<b>6,60</b>

Samotné hodnoty odchylek však nejsou pro zhodnocení přesnosti výpočtu zcela relevantní, a to z důvodů rozměrové nestálosti vnitřního průměru kapiláry, které bylo popsáno výše. Aby bylo možné správnou funkci modelu objektivně posoudit, je třeba provést výpočet pro vnitřní průměr kapiláry 2,30 mm a 2,40 mm. Následně můžeme výsledek výpočtu považovat za uspokojivý, pokud se hodnoty získané experimentálním měřením pohybují v pásmu, které je vymezeno těmito dvěma hodnotami. Graf, který toto zobrazuje pro variantní zapojení rohoží o délkách 2 m a 1 m, je zobrazen na Obr. 7.2.



Obr. 7.2 – Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro varianty zapojení rohoží délky 2 a 1 m



Porovnání na Obr. 7.2 ukazuje, že pro všechny varianty zapojení 2 metrových rohoží se naměřené hodnoty pohybují v pásmu, ve kterém lze výsledky považovat za uspokojivé a tedy, že matematický model pro tyto varianty funguje dobře.

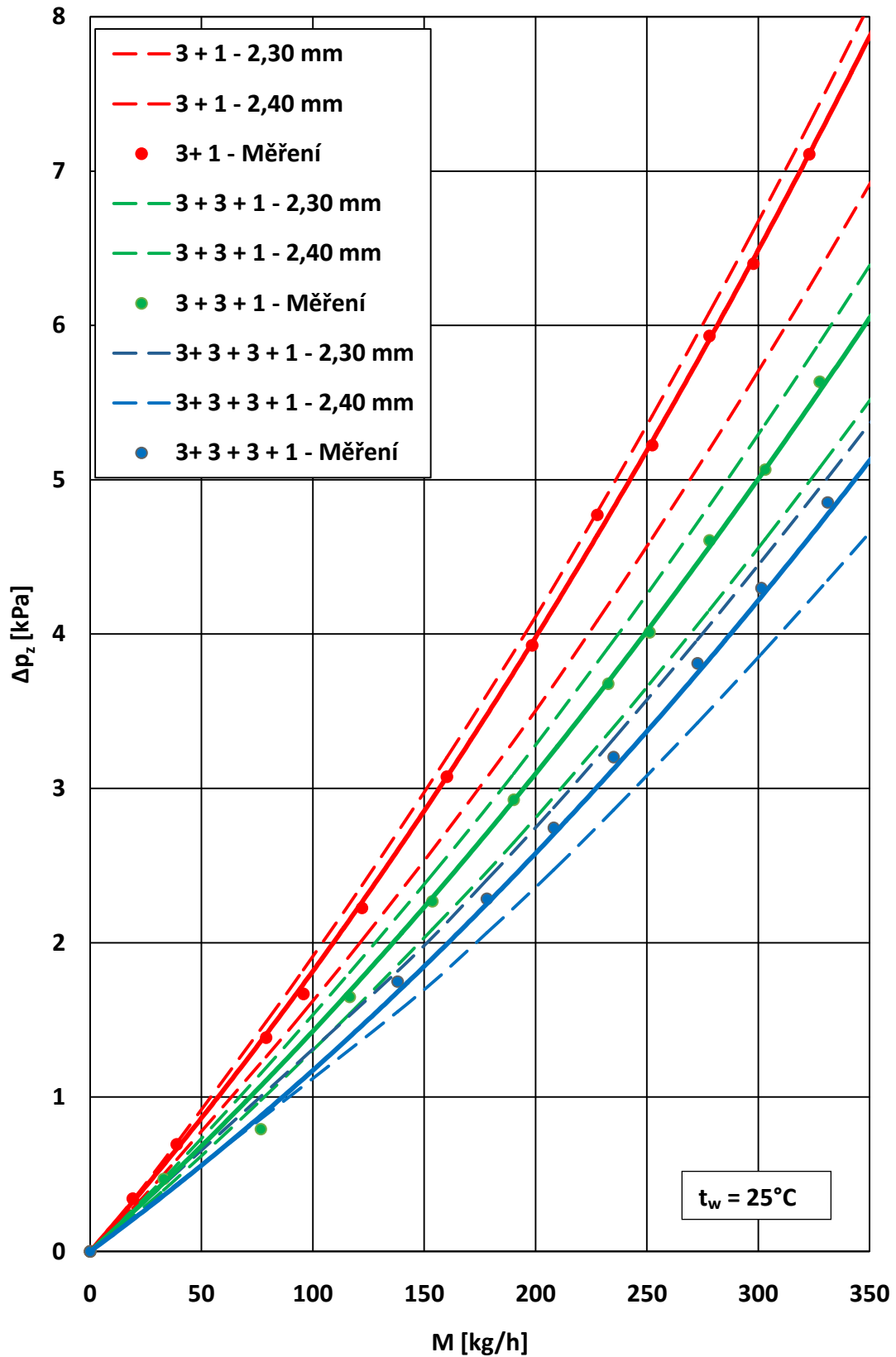
### 6.3. VARIANTY SE ZAPOJENÍM ROHOŽÍ 3 a 1 m

Pro délky 3 a 1 m kapilárních rohoží byly experimentálně měřeny tyto kombinace zapojení: 3 + 1 m, 3 + 3 + 1 m a 3 + 3 + 3 + 1 m. Pokud se podíváme na odchylky hodnot, které uvádí Tab. 7.3 vidíme, že nejvyšší průměrnou odchylku mezi naměřenými hodnotami a hodnotami vypočítanými pro průměr kapiláry  $d_{kap} = 2,35$  mm vykazuje zapojení pro 3 + 3 + 3 + 1 m (8,5 %), nejmenší naopak varianta 3 + 3 + 1 m (0,5 %).

*Tab.7.3 – Odchylky naměřených a vypočtených hodnot pro varianty zapojení kapilárních rohoží délky 3 m a 1m. Výsledky jsou získány za vstupních podmínek  $t_w = 25$  °C a  $d_{kap} = 2,35$  mm*

Průtok	Odchylka	Odchylka	Odchylka
M	3+1	3 + 3 + 1	3 + 3 + 3 + 1
kg/h	%	%	%
0	0,0	0,0	0,0
35	2,4	0,9	5,4
70	0,4	1,0	5,1
105	4,1	0,6	2,4
140	6,3	0,0	0,6
175	7,3	0,6	3,5
210	7,2	0,7	6,3
245	6,4	0,5	9,4
280	5,3	0,3	12,9
315	3,9	0,0	17,0
350	2,2	0,2	22,3
Prum	<b>4,5</b>	<b>0,5</b>	<b>8,5</b>

Na výsledky porovnání je opět nutný pohled s ohledem na nestálou hodnotu vnitřního průměru kapiláry. Grafické porovnání můžeme vidět na Obr. 7.3. Z tohoto porovnání je patrné, že hodnoty tlakové ztráty se více blíží tlakové ztrátě, které byla vypočtena pro průměr kapiláry  $d_{kap} = 2,30$  mm. Dále je možné konstatovat, že naměřené hodnoty opět leží mezi křivkami tlakové ztráty pro průměry kapilár  $d_{kap} = 2,30$  mm a  $d_{kap} = 2,40$  mm a tedy, že výsledky získané výpočetním modelem lze považovat za uspokojivé.



Obr. 7.3 - Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro varianty zapojení rohoží délky 3 a 1 m

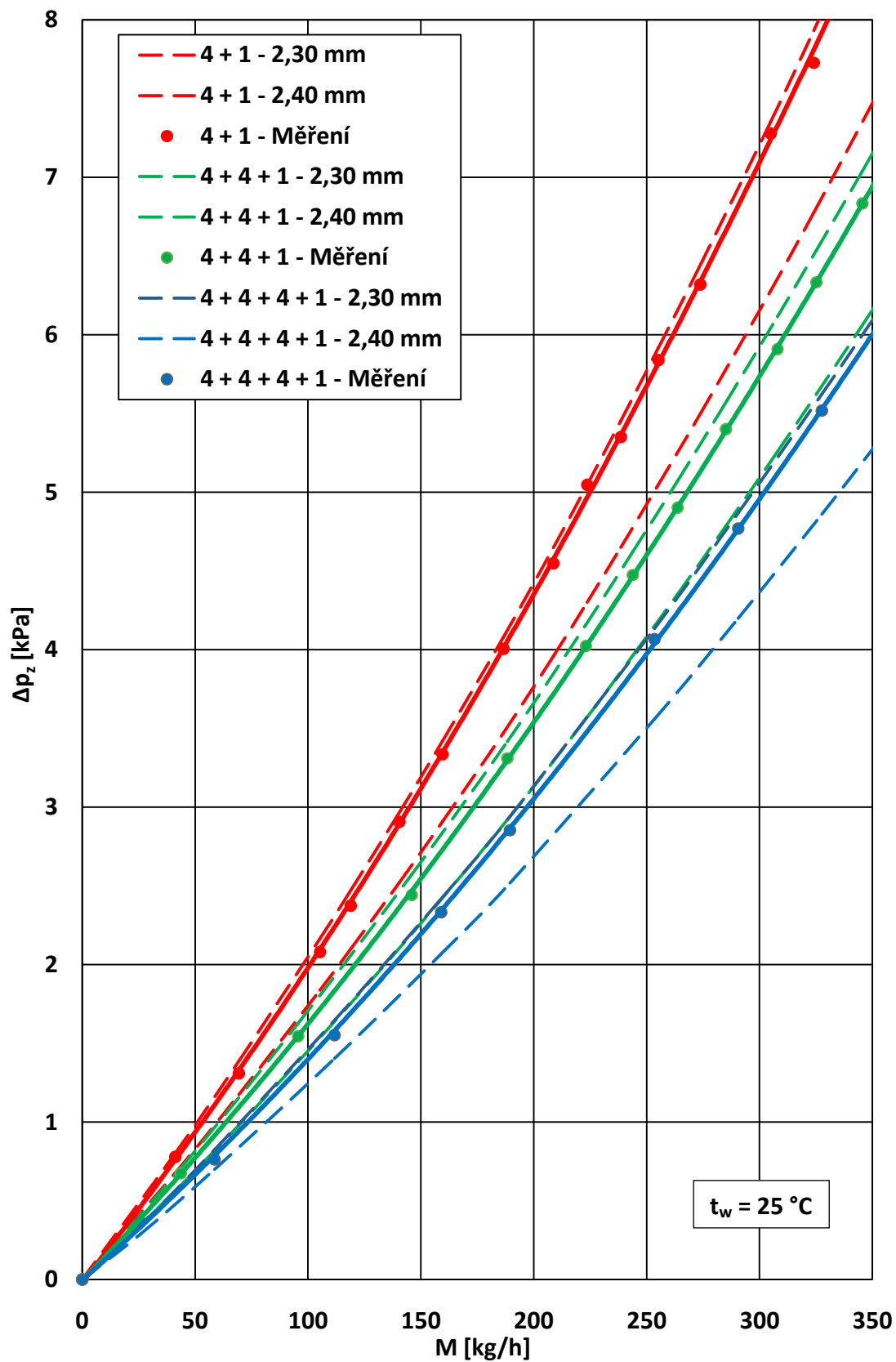
#### 6.4. VARIANTY SE ZAPOJENÍM ROHOŽÍ 4 a 1 m

Poslední zkoumaná variace různých délek kapilárních rohoží – tedy kombinace délek 4 a 1 m má tyto varianty zapojení 1 + 4 m, 4 + 1 m, 4 + 4 + 1 m a 4 + 4 + 4 + 1 m. U varianty 1 + 4 m bude dále provedeno porovnání s variantou 4 + 1 m. Z hlediska odchylky měřené a vypočtené hodnoty při vstupních podmínkách  $t_w = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $d_{kap} = 2,35 \text{ mm}$  (viz Tab. 7.4) můžeme výsledky porovnání zhodnotit takto: Nejnižší odchylku opět vykazuje zapojení 3 rohoží (méně než 1 %), nejvyšší naopak zapojení 4 rohoží, kde se odchylka pohybuje přes 8 %.

Tab.7.4 – Odchylky naměřených a vypočtených hodnot pro varianty zapojení kapilárních rohoží délky 4 m a 1m. Výsledky jsou získány za vstupních podmínek  $t_w = 25 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $d_{kap} = 2,35 \text{ mm}$

Průtok	Odchylka	Odchylka	Odchylka	Odchylka
M	4+1	4 + 4 + 1	4 + 4 + 4 + 1	1 + 4
kg/h	%	%	%	%
0	0	0	0	0
35	1,0	1,4	6,0	7,2
70	2,3	0,4	5,7	3,6
105	3,3	0,6	2,6	2,9
140	3,3	0,8	0,6	3,1
175	2,4	0,8	3,8	3,6
210	0,5	0,4	7,0	4,2
245	2,3	0,4	10,3	4,6
280	5,5	1,2	14,1	5,4
315	9,4	1,9	18,7	6,2
350	14,3	2,5	24,5	7,2
Prum	<b>4,4</b>	<b>0,9</b>	<b>8,5</b>	<b>4,8</b>

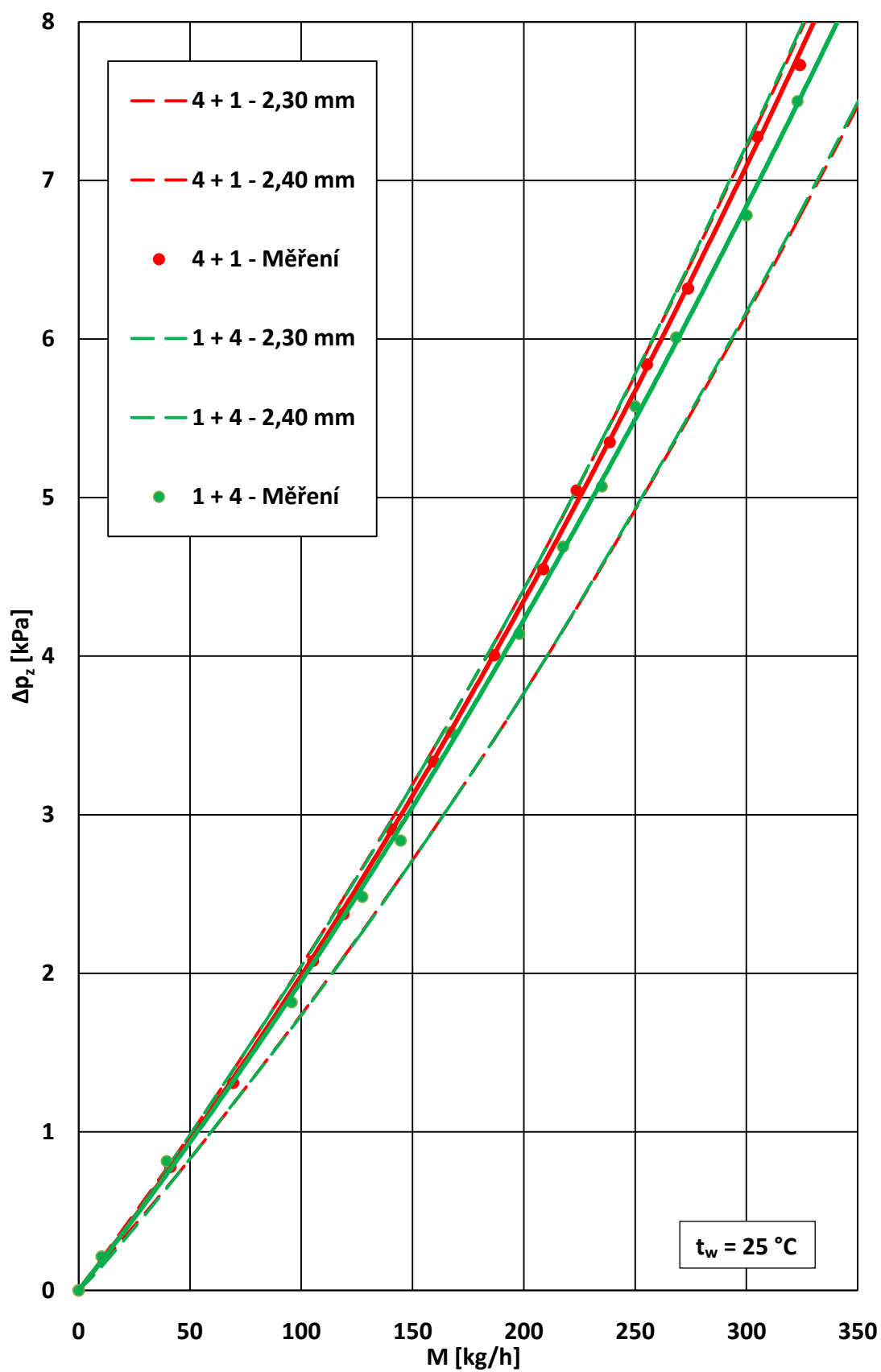
Z Obr. 7.4 je patrné že všechny naměřené hodnoty se nacházejí mezi křivkami tlakové ztráty pro mezní rozměry kapilár, takže můžeme výsledky výpočtů považovat za uspokojivé. Z výsledků je také patrné, že čím delší jsou kapiláry a jejich celkový počet, tím více se reálné hodnoty přibližují křivce tlakové ztráty pro dolní mezní rozměr kapiláry, tlaková ztráta tedy roste. Tato skutečnost je vidět především u 4 metrových rohoží kde je tato skutečnost způsobena větším množstvím kapilár a tím pádem větším vlivem odchylky rozměru průměrů kapilár na výsledek.



Obr. 7.4 - Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro varianty zapojení rohoží délky 4 a 1 m

### **6.4.1. Porovnání variant 4 + 1 m a 1 + 4 m**

Na Obr. 7.5 je vidět, že talková ztráta varianty 1 + 4 je nižší než tlaková ztráta varianty 4 + 1 m. Matematický model však vychází pro obě varianty naprosto shodně – zelená přerušovaná čára (průběh vypočtených hodnot pro 1 + 4 m) naprosto překrývá červené přerušované, které ukazují průběhy vypočtených hodnot pro variantu 4 + 1 m. I přes skutečnost, že matematický model počítá pro obě varianty stejně, i když v reálné situaci tyto hodnoty stejné nejsou, je možné ho použít pro obě varianty. A to z důvodů, že naměřené výsledky se nacházejí v tolerované oblasti vymezené křivkami průběhu talkové ztráty pro horní a dolní mezní rozměr kapilár.



Obr.7.5 – Porovnání naměřených a vypočtených hodnot pro varianty zapojení 4 + 1 m a 1 + 4 m

## 7. ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo experimentálně stanovit tlakové ztráty kapilárních rohoží, které jsou řazeny sériově za sebou a mají různou délku. Dále bylo cílem sestavit matematický model, který bude respektovat rozdílný průtok v jednotlivých rohožích.

Celé experimentální měření probíhalo v halových laboratořích Ústavu techniky prostředí Fakulty strojní Českého vysokého učení technického v Praze. Celkem bylo provedeno měření 10 různých variant zapojení kapilárních rohoží, konkrétně typu K.S 15 o průměru kapiláry  $2,35 \pm 0,05$  mm, šířce 920 mm a délkách 1 000 mm, 2 000 mm, 3 000 a 4 000. Protokoly o jednotlivých měřeních jsou uvedeny v příloze této diplomové práce. V příloze je též fotodokumentace měření.

Matematický model byl vytvořen v programu Microsoft Excel 2013 a jeho nadstavbě Visual Basic for Application. V tomto programu byl vytvořen nejprve model pro jednu kapilární rohož. Tento krok byl nutný vzhledem ke složitosti iteračního výpočtu, který je nutné použít pro sériové zapojení dvou, tří a čtyř rohoží. Na tomto modelu byla ověřena funkčnost a správnost výpočtu. Ověření správnosti bylo provedeno tak, že vypočtené hodnoty byly porovnány s hodnotami získanými experimentálně, které byly publikovány v [3].

Další fáze vývoje matematického modelu spočívala v rozšíření o iterační výpočet, který je nutný pro správný výpočet tlakových ztrát sériově zapojených rohoží různých délek. Nejprve byl sestaven model pro sériové zapojení dvou rohoží různých délek a tento model byl následně rozšířen, tak aby pracoval i se zapojením tří a čtyř rohoží.

V poslední fázi bylo nutné porovnat výsledky získané pomocí matematického modelu s výsledky, které byly získány experimentálním měřením. Zde je nutné říct, že z důvodů výrobní odchylky rozměrů jednotlivých kapilár ( $\pm 0,05$  mm) není možné dokonale přesně vypočítat tlakovou ztrátu. Proto byly matematickým modelem spočítány pro každou variantu zapojení hodnoty tlakové ztráty pro mezní rozměry kapilár, které garantuje výrobce.

Při porovnání jednotlivých vypočítaných výsledků s naměřenými hodnotami byly stanoveny následující závěry. Všechny vypočítané hodnoty můžeme považovat za uspokojivé, matematický model tedy splnil svůj účel a lze ho použít k výpočtu tlakových ztrát sériově zapojených kapilárních rohoží různé délky. Iterační výpočet, který byl v literatuře [3] popsán jako nepraktický pro projekční výpočty lze díky tomuto modelu v projekční praxi použít, neboť díky programu MS Excel se tento model podařilo zpracovat tak, že výpočty jsou dostatečně rychlé.



## 8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] ZMRHAL, V. Tlakové ztráty kapilárních rohoží – Experimentální měření (část 1). In *Vytápění, větrání, instalace*, 2012, roč. 21, č.4, s.2-7, 146-151.
- [2] ZMRHAL, V. Tlakové ztráty kapilárních rohoží – CFD simulace (část 2). In *Vytápění, větrání, instalace*, 2014, roč. 23, č.3, s.26-30, 122-124.
- [3] ZMRHAL, V. Tlakové ztráty kapilárních rohoží – Analytický model (část 3). In *Vytápění, větrání, instalace*, 2014, roč. 23, č.4, s.10-13, 162-165.
- [4] ZMRHAL, Vladimír. *Sálavé chladicí systémy*. Vyd. 1. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009, 217 s. ISBN 978-80-01-04318-9.
- [5] *Přibližný výpočet tlakové ztráty třením v potrubí Zdroj: <http://www.tzb-info.cz/1002-priblizny-vypocet-tlakove-ztraty-trenim-v-potrubi>: Ing. Zdeněk Reinberk [online]. [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/1002-priblizny-vypocet-tlakove-ztraty-trenim-v-potrubi>*
- [6] HEMZAL, K. Součinitel tření při proudění tekutin – komparace vztahů. In *Vytápění, větrání, instalace*, 2003, roč. 12, č.1, s.30-32, 222-227.
- [7] MATUŠKA, Tomáš. *Experimentální metody v technice prostředí*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005, 200 s. ISBN 80-01-03291-4.
- [8] CHYSKÝ, Jaroslav a Karel HEMZAL. *Větrání a klimatizace*. 3., zcela přeprac. vyd. Brno: Bolit-B press, 1993, 490 s. Česká matice technická (Bolit-B press). ISBN 80-901574-0-8.
- [9] NOVÝ, Richard. *Technika prostředí*. Vyd. 2., přeprac. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2000, 267 s. ISBN 80-01-03492-5.
- [10] KRÁL, Martin. *Excel VBA: výukový kurz*. Vyd. 1. Brno: Computer Press, 2010, 504 s. ISBN 978-80-251-2358-4.

## **9. SEZNAM PŘÍLOH**

Příloha č. 1 - Fotodokumentace experimentálního měření

Příloha č. 2 – Výsledky měření tlakových ztrát kapilárních rohoží