

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA STAVEBNÍ**

Katedra konstrukcí pozemních staveb



**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2018**

**Bc. Lukáš Hradečný**



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta stavební**

**Katedra konstrukcí pozemních staveb**

**Opakovatelnost a reprodukovatelnost měření vzduchotěsnosti budov**

**Repeatability and reproducibility of building airtightness measurement**

Diplomová práce

Master's thesis

Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí

Vedoucí práce: Ing. Jiří Novák, Ph.D.

**Bc. Lukáš Hradečný**

---

**Praha 2018**



# ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hradečný                      Jméno: Lukáš                      Osobní číslo: 393869  
Fakulta/ústav: Fakulta stavební  
Zadávající katedra/ústav: Katedra konstrukcí pozemních staveb  
Studijní program: Budovy a prostředí  
Studijní obor: Budovy a prostředí

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Opakovatelnost a reprodukovatelnost měření vzduchotěsnosti budov

Název diplomové práce anglicky:

Repeatability and reproducibility of building airtightness measurement

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jiří Novák, Ph.D., katedra konstrukcí pozemních staveb FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: 11.10.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 07.01.2018

Platnost zadání diplomové práce: \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
Ing. Jiří Novák, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a všechny použité prameny a literatura jsou uvedeny v seznamu citované literatury.

Nemám námitek proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 7. ledna 2018

.....  
podpis

## **Poděkování**

Chtěl bych poděkovat Ing. Jiřímu Novákovi, Ph.D. za pomoc při měření, odborné vedení mé diplomové práce, vstřícnost při konzultacích a cenné rady, které mi pomohly tuto práci zkompletovat.

Poděkování patří rovněž Mgr. Stanislavu Palečkovi, Ing. Zbyšku Kubíčkoví, Ing. Jiřímu Krejčovi a Stanislavu Martínkovi za čas, který věnovali měření nezbytnému pro tuto práci.

## **Název diplomové práce**

Opakovatelnost a reprodukovatelnost měření vzduchotěsnosti budov

## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá stanovením opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření vzduchotěsnosti pomocí Blower Door testu. Byly provedeny dva experimenty, jejichž součástí bylo celkem 54 měření. Experimentu provedeného na pasivním rodinném domě v Koberovech se zúčastnilo 5 operátorů, kteří provedli celkem 30 měření. Experimentu v laboratoři UCEEB se zúčastnili 4 operátoři a celkový počet provedených měření byl 24.

Nasbíraná data byla statisticky analyzována a byla určena směrodatná odchylka opakovatelnosti a reprodukovatelnosti příslušných částí experimentů. Byly pozorovány a vyhodnoceny rozdíly mezi měřeními in-situ a v laboratoři.

Dosažená relativní směrodatná odchylka opakovatelnosti se v jednotlivých částech pohybovala od 0,3% do 0,7%. Dosažené hodnoty relativní směrodatné odchylky reprodukovatelnosti se pohybují od 1,0% do 1,6%. Práce potvrdila zásadní vliv operátora a použitého měřicího zařízení na přesnost měření.

## **Klíčová slova**

vzduchotěsnost budov, Blower Door test, nejistota měření, chyby měření, shodnost výsledků, opakovatelnost, reprodukovatelnost

## **Master's thesis title**

Repeatability and reproducibility of building airtightness measurement

## **Abstract**

The master's thesis deals with determination of repeatability and reproducibility of airtightness measurement using the Blower Door test. Two experiments were performed, which included a total of 54 measurements. An experiment which took place at a passive family house in Koberovy was attended by 5 operators who carried out a total of 30 measurements. Experiment in the UCEEB laboratory was attended by 4 operators and the total number of measurements performed was 24.

The collected data were statistically analyzed and the standard deviation of repeatability and reproducibility of the respective parts of experiments was determined. Differences between in-situ and laboratory measurements were observed and evaluated.

The relative standard deviation of repeatability was from 0.3% to 0.7% in individual parts of experiments. Values of the relative standard deviation of reproducibility range from 1.0% to 1.6%. The thesis confirmed the crucial influence of the operator and used measuring equipment on measuring accuracy.

## **Key words**

building airtightness, Blower Door test, measurement uncertainty, measurement errors, precision of results, repeatability, reproducibility

# Obsah

<b>1 Úvod</b>	<b>9</b>
1.1 Motivace	9
1.2 Cíle diplomové práce	9
<b>2 Teoretická část</b>	<b>10</b>
2.1 Měření vzduchotěsnosti budov	10
2.1.1 Fyzikální princip měření	10
2.1.2 Hodnotící veličiny	12
2.1.3 Metody měření	14
2.1.4 Blower door test	18
2.1.5 Způsob vyhodnocení výsledků	19
2.2 Definice pojmů	22
2.2.1 Chyba měření	22
2.2.2 Shodnost výsledků měření	23
2.2.3 Opakovatelnost	23
2.2.4 Reprodukovatelnost	24
2.3 Souhrn předchozích experimentů	25
2.3.1 C. Delmotte, J. Laverge (2011)	25
2.3.2 W. Bracke a spol. (2013)	26
2.3.3 F. Ledecký (2015)	27
2.3.4 O. Šafránek (2016)	28
2.3.5 Souhrn výsledků	29
<b>3 Experimenty</b>	<b>31</b>
3.1 Experiment č.1 – Koberovy	31
3.1.1 Cíle experimentu	31
3.1.2 Základní informace	32
3.1.3 Popis experimentálního objektu	32
3.1.4 Příprava měření	34
3.1.5 Postup měření	35
3.1.6 Klimatické podmínky při měření	36
3.1.7 Výsledky měření	37
3.1.8 Vyhodnocení výsledků měření na neupravené budově	39
3.1.9 Vyhodnocení výsledků měření na budově upravené clonou	45
3.1.10 Závěry	50



3.2	Experiment 2 – Laboratoř UCEEB.....	51
3.2.1	Cíle experimentu.....	51
3.2.2	Základní informace .....	51
3.2.3	Popis experimentálního objektu .....	52
3.2.4	Příprava měření .....	53
3.2.5	Postup měření.....	55
3.2.6	Klimatické podmínky při měření .....	55
3.2.7	Výsledky měření .....	57
3.2.8	Vyhodnocení výsledků měření na úrovni 240 m <sup>3</sup> /h .....	59
3.2.9	Vyhodnocení výsledků měření na úrovni 1000 m <sup>3</sup> /h .....	64
3.2.10	Závěry .....	68
<b>4</b>	<b>Vyhodnocení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti .....</b>	<b>69</b>
4.1	Výsledky vyhodnocení .....	69
4.1.1	Opakovatelnost.....	69
4.1.2	Reprodukovatelnost.....	71
4.2	Porovnání s předchozími experimenty .....	72
4.2.1	Opakovatelnost.....	72
4.2.2	Reprodukovatelnost.....	75
<b>5</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>76</b>
5.1	Shrnutí získaných informací.....	76
5.2	Praktický význam experimentu .....	78
5.3	Možné pokračování experimentu .....	79
	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>80</b>
	<b>Seznam grafů .....</b>	<b>82</b>
	<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>83</b>
	<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>84</b>
	<b>Seznam příloh .....</b>	<b>85</b>
	<b>Přílohy .....</b>	<b>86</b>

# 1 Úvod

## 1.1 Motivace

V současnosti je kladen stále větší důraz na vzduchotěsnost budov, a to zejména v souvislosti s rozmachem výstavby nízkoenergetických a pasivních budov na území České republiky. V případě domů je dostatečné utěsnění vzduchotěsné obálky nezbytné, aby mohl být dům certifikován jako pasivní. Splnění přísné vzduchotěsnosti obálky budovy je rovněž jednou z podmínek pro přiznání dotace z programu „Nová zelená úsporám“ při výstavbě rodinných a bytových domů s velmi nízkou energetickou náročností.

Měření vzduchotěsnosti obálky budovy je přitom jediný spolehlivý způsob, kterým lze tuto vlastnost určit. V průběhu měření však může dojít k mnoha nepřesnostem (chybám), a to jak z důvodu vnějších vlivů (zejména vítr a teplota), tak činností operátora, který obsluhuje měřící zařízení. Dopad na výsledek měření může mít i použité měřící zařízení, jeho správná funkčnost a kalibrace. Tyto skutečnosti byly v minulých letech předmětem zkoumání několika prací, zůstala však celá řada nezodpovězených otázek ohledně nejistoty měření, které slouží jako základ této diplomové práce.

Jaké bude rozpětí výsledků měření při jeho opakování dalšími operátory s rozdílným vybavením? Bude opakovatelnost a reprodukovatelnost měření stejná i u různě těsných objektů, nebo se v závislosti na vzduchotěsnosti objektu mění? Jak výsledky ovlivní vyloučení vlivu vnějšího prostředí a opakování měření v laboratorních podmínkách?

## 1.2 Cíle diplomové práce

Pro zodpovězení otázek položených výše je nutné nashromáždit data z měření na reálném objektu a v laboratoři, v obou případech při různém objemovém průtoku vzduchu a od několika operátorů. Tato data je třeba následně statisticky analyzovat a stanovit opakovatelnost a reprodukovatelnost měření.

Cílem práce je rovněž porovnat získané výsledky se závěry experimentů publikovaných v předchozích letech.

## 2 Teoretická část

Tato kapitola obsahuje stručný souhrn dostupných informací ohledně měření vzduchotěsnosti, jeho fyzikálních principů a způsobu vyhodnocování získaných výsledků. Dále bude v této kapitole shrnuta problematika nejistoty měření a určování opakovatelnosti a reprodukovatelnosti, se zaměřením na informace nezbytné pro vypracování této diplomové práce.

### 2.1 Měření vzduchotěsnosti budov

Vzduchotěsnost budovy je obtížné odhadnout v průběhu návrhu, projekce i realizace budovy, jelikož netěsnosti v obálce budovy vznikají nahodile. I výpočtové odhady jsou proto většinou velmi nepřesné. Různé metody měření tak zůstávají jediným spolehlivým způsobem, jak dosaženou vzduchotěsnost určit. [1]

#### 2.1.1 Fyzikální princip měření

Schopnost určitého prvku propouštět vzduch se nazývá vzduchotěsnost. Pokud hovoříme o vzduchotěsnosti budov, je tímto prvkem obálka budovy nebo její dílčí části. Čím těsnější je prvek, tím méně vzduchu za určitých podmínek propouští. Aby daný prvek propouštěl vzduch, musí splňovat dvě základní podmínky; musí obsahovat netěsnosti (místa kudy vzduch proudí) a musí být vystaven tlakovému rozdílu, tedy v prostředích, která prvek rozděluje, musí být rozdílný tlak vzduchu.

Čím větší je tlakový rozdíl mezi prostředími okolo netěsného prvku, tím více vzduchu prvkem protéká. Závislost průtoku vzduchu na působícím tlakovém rozdílu můžeme v případě budov, stavebních dílů a jejich spojů, vyjádřit pomocí tzv. empirické rovnice proudění:

$$\dot{V} = C \cdot \Delta p^n$$

kde:  $\dot{V}$  je objemový tok (průtok) vzduchu v  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

$C$  je součinitel proudění v  $\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$ ;

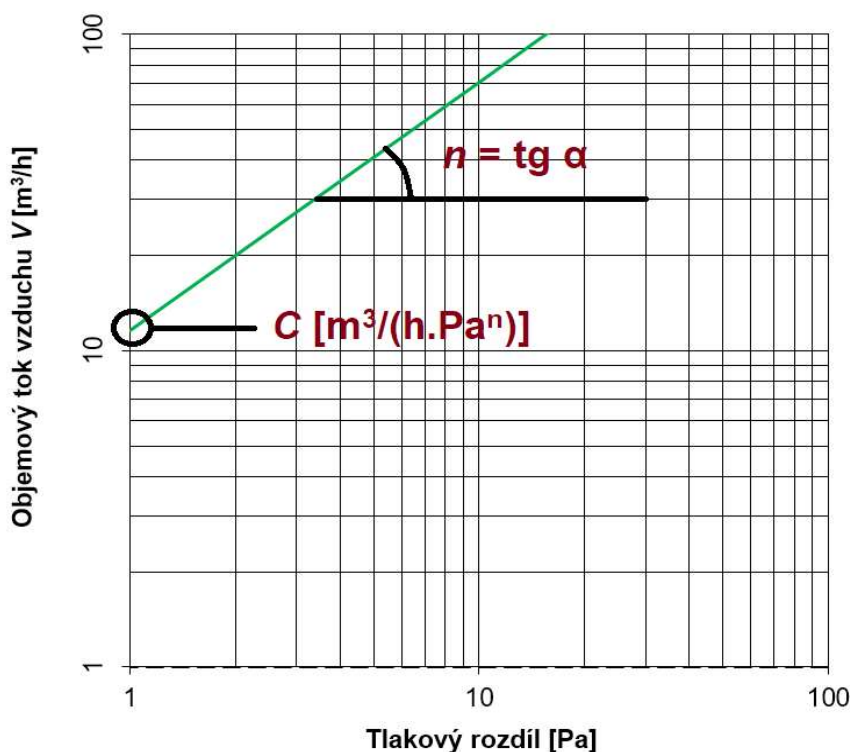
$\Delta p$  je tlakový rozdíl v Pa;

$n$  je bezrozměrný exponent proudění.

Parametry empirické rovnice proudění  $C$  a  $n$  přímo určují, kolik vzduchu a jakým způsobem protéká netěsnostmi. Součinitel proudění  $C$  vyjadřuje objemový tok vzduchu protékající netěsností při tlakovém rozdílu 1 Pa a podává tak informaci o velikosti netěsnosti. Hodnota exponentu proudění  $n$  vždy leží v intervalu 0,5 - 1, a popisuje, jestli se jedná o proudění turbulentní (hodnoty blíží se 0,5), nebo proudění laminární (hodnoty blíží se 1). V případě předběžných výpočtů, kdy nejsou známy bližší údaje o zkoumaném prvku nebo budově, se často používá hodnota  $n = 0,67$ . Jednotlivé parametry rovnice proudění je možné zjistit experimentálně měřením. [1]

Při měření vzduchotěsnosti budov je objemový tok vzduchu  $\dot{V}$  často označován jako  $q_{env}$ , kde spodní index *env* vychází z anglického slovního spojení *building envelope*, což v překladu znamená *obálka budovy*. Pokud je cílem popsat hodnotu objemového toku vzduchu na referenčním tlakovém rozdílu ( $\Delta p_{ref}$  [Pa]), je spodní index *env* doplněn o spodní index *ref* ( $q_{env,ref}$ ), nebo je tímto spodním indexem nahrazen ( $q_{ref}$ ). Zápis označení objemového toku vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu  $\Delta p_{ref} = 50 \text{ Pa}$  je běžně proveden formou  $q_{env,50}$  nebo  $q_{50}$ . Zápis může být navíc doplněn o znaménka plus nebo minus, která značí, jestli se jedná o hodnotu získanou měřením při přetlaku nebo při podtlaku v budově. Zápis  $q_{50+}$  tedy značí objemový tok vzduchu obálkou budovy při přetlaku 50 Pa a  $q_{50-}$  potom objemový tok vzduchu obálkou budovy při podtlaku 50 Pa. Tento popsaný zápis veličin bude použit v rámci celé diplomové práce.

Ke grafickému znázornění závislosti objemového toku vzduchu netěsnostmi v obálce budovy na tlakovém rozdílu je nejvhodnější graf v logaritmickém měřítku (Obrázek 1), ve kterém je na vodorovné ose vynesena tlakový rozdíl a na svislé ose objemový tok vzduchu – závislost těchto veličin má v tomto případě tvar přímky. Z grafu lze odečíst hodnotu součinitele proudění  $C$ , jako průsečík přímky se svislou osou v hodnotě 1 Pa. Hodnota exponentu  $n$  udává sklon přímky, jak je naznačeno v obrázku.



Obrázek 1: Graf závislosti objemového toku  $\dot{V}$  ( $q_{env}$ ) na tlakovém rozdílu  $\Delta p$

Stejně jako v případě objemového toku vzduchu, je u označení součinitele proudění  $C$  a exponentu proudění  $n$  možné použít spodní indexy plus nebo minus, kterými se rozlišují hodnoty získané měřením při přetlaku a při podtlaku v budově. Součinitel proudění  $C$  navíc bývá v případě měření vzduchotěsnosti budov doplněn o spodní index  $env$ . Pokud je součinitel proudění  $C_{env}$  vztažen ke standardním okrajovým podmínkám postupem podle ČSN EN 13829 [2], je jeho označení  $C_L$ .

## 2.1.2 Hodnotící veličiny

Nejčastěji používané veličiny pro hodnocení vzduchotěsnosti obvodového pláště jsou tyto:

- intenzita výměny vzduchu  $n_{ref}$  [h<sup>-1</sup>]
- měrný objemový tok vzduchu netěsnostmi  $q_{F,ref}$  [m<sup>3</sup>/(h.m<sup>2</sup>)]
- vzduchová propustnost budovy  $q_{E,ref}$  [m<sup>3</sup>/(h.m<sup>2</sup>)]
- ekvivalentní plocha netěsnosti  $A_{L,ref}$  [cm<sup>2</sup>]
- normalizovaná plocha netěsnosti  $A_n$  [-]

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1.1, dolní index *ref* u značek veličin udává hodnotu referenčního tlakového rozdílu  $\Delta p_{ref}$ . K vyčíslení těchto veličin je nutné znát celkový objemový tok vzduchu netěsnostmi při referenčním tlakovém rozdílu ( $q_{ref}$ ), jehož hodnota se odvozuje z výsledku měření vzduchotěsnosti budovy. Metody vyvinuté k tomuto účelu jsou popsány v kapitole 2.1.3. V praxi se však nejčastěji setkáme s metodou tlakového spádu (2.1.3.1 a 2.1.3.2), konkrétně s typem této metody nazývaným blower door test (2.1.4). [1]

### 2.1.2.1 Intenzita výměny vzduchu $n_{ref}$

Intenzitou výměny vzduchu  $n_{ref}$  [ $\text{h}^{-1}$ ] je vyjádřen objemový tok vzduchu netěsnostmi v obálce budovy při referenčním tlakovém rozdílu, který je vztažen k objemu vnitřního vzduchu v měřené budově.

$$n_{ref} = \frac{q_{ref}}{V}$$

kde:  $q_{ref}$  je objemový tok vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu v  $\text{m}^3/\text{h}$

$V$  je objem vnitřního vzduchu měřené budovy v  $\text{m}^3$

Všeobecně uznávaná a zřejmě nejrozšířenější jednočíselná veličina pro hodnocení vzduchotěsnosti obvodového pláště budov je intenzita výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Doporučené úrovně celkové vzduchotěsnosti budov v ČSN 73 0540-2 [3] jsou definovány právě pomocí  $n_{50}$ . [1]

### 2.1.2.2 Měrný objemový tok vzduchu netěsnostmi $q_{F,ref}$

Měrným objemovým tokem vzduchu netěsnostmi  $q_{F,ref}$  [ $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$ ] je vyjádřen objemový tok vzduchu netěsnostmi v obálce budovy při referenčním tlakovém rozdílu, který je vztažen k celkové podlahové ploše budovy:

$$q_{F,ref} = \frac{q_{ref}}{A_F}$$

kde:  $q_{ref}$  je objemový tok vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu v  $\text{m}^3/\text{h}$

$A_F$  je celková podlahová plocha budovy v  $\text{m}^2$

Tato veličina se v praxi příliš nepoužívá, je však jednou z možností pro vyjádření výsledku měření vzduchotěsnosti budov podle ČSN EN ISO 13829. [1]

### 2.1.2.3 Vzduchová propustnost budovy $q_{E,ref}$

Vzduchovou propustností budovy  $q_{E,ref}$  [ $\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$ ] je vyjádřen objemový tok vzduchu netěsnostmi v obálce budovy při referenčním tlakovém rozdílu, který je vztažen k celkové ploše obálky budovy:

$$q_{E,ref} = \frac{q_{ref}}{A_E}$$

kde:  $q_{ref}$  je objemový tok vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu v  $\text{m}^3/\text{h}$

$A_E$  je celková plocha obálky budovy v  $\text{m}^2$

Tato veličina se používá jako kritérium k hodnocení vzduchotěsnosti budov v mnoha evropských zemích. V jednotlivých zemích se liší hodnoty referenčního tlakového rozdílu.

### 2.1.2.4 Další hodnotící veličiny

#### **Ekvivalentní plocha netěsnosti $A_{L,ref}$**

Tato veličina udává plochu ideálního otvoru, kterým by při referenčním tlakovém rozdílu protékalo stejné množství vzduchu jako obálkou budovy. Používá se především v Kanadě a USA.

#### **Normalizovaná plocha netěsnosti $A_n$**

Normalizovaná plocha netěsnosti je odvozená z ekvivalentní plochy netěsnosti, která je vztažená k jednotce podlahové plochy a referenční výšce budovy. [1]

## 2.1.3 Metody měření

### 2.1.3.1 Metoda tlakového spádu s externím ventilátorem

Principem metody tlakového spádu je opakované měření objemového toku vzduchu skrz obálku budovy při známém tlakovém rozdílu. Tento kontrolovaný tlakový rozdíl známé hodnoty je uměle vyvolán ventilátorem s proměnnými otáčkami, který je osazen do obvodového pláště. Velikost tlakových rozdílů se volí typicky v rozmezí 10 až 80 Pa; měření na nižších úrovních tlakového rozdílu by bylo komplikované vzhledem k působení klimatických vlivů.

Odpovídající objemový tok vzduchu, transportovaný ventilátorem, je naměřen pro každou úroveň tlakového rozdílu. Předpokladem je stejné množství vzduchu

transportovaného ventilátorem a protékajícího netěsnostmi v obvodovém plášti budovy. Výsledky měření (objemový tok vzduchu odpovídající určitému tlakovému rozdílu) se vynesou jako body do grafu závislosti objemového toku vzduchu na vyvolaném tlakovém rozdílu, který je popsán v kapitole 2.1.1. Obvykle jsou provedeny dvě série měření; při přetlaku v budově a při podtlaku v budově. Objemový tok vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu ( $q_{ref}$ ) se vypočte jako aritmetický průměr hodnot naměřených při přetlaku ( $q_{ref+}$ ) a při podtlaku ( $q_{ref-}$ ).

Existuje několik typů zařízení vyvinutých k měření tlakového spádu s externím ventilátorem. Nejrozšířenějším z těchto zařízení je tzv. blower door, který je možné snadno osadit do dveřních a okenních otvorů. Podrobnější popis tohoto zařízení je uveden v kapitole 2.1.4. [1]

Výkon přenosných ventilátorů (Obrázek 2) se zpravidla pohybuje mezi 1000 m<sup>3</sup>/h 10000 m<sup>3</sup>/h. Pokud je potřeba při měření dosáhnout vyšší objemový tok vzduchu, je možné využít více ventilátorů (výkony se sečtou), případně nepřenosný ventilátor umístěný na autopřívěsu, jehož výkon může dosahovat až 100000 m<sup>3</sup>/h. [4]

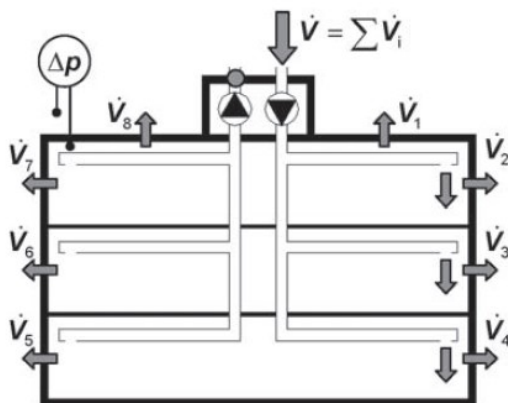


Obrázek 2: Umístění ventilátorů systému blower door [5]



### 2.1.3.2 Metoda tlakového spádu s vnitřním ventilátorem

Tato metoda slouží jako alternativa k metodě tlakového spádu s externím ventilátorem pro velké budovy vybavené vlastním výkonným větracím zařízením. Principiálně (Obrázek 3) je metoda prakticky shodná jako metoda s externím ventilátorem, a shodný je i způsob vyhodnocení výsledků. Zásadním rozdílem je, že pro vyvolání tlakového rozdílu jsou použity ventilátory větracího zařízení instalovaného v budově.



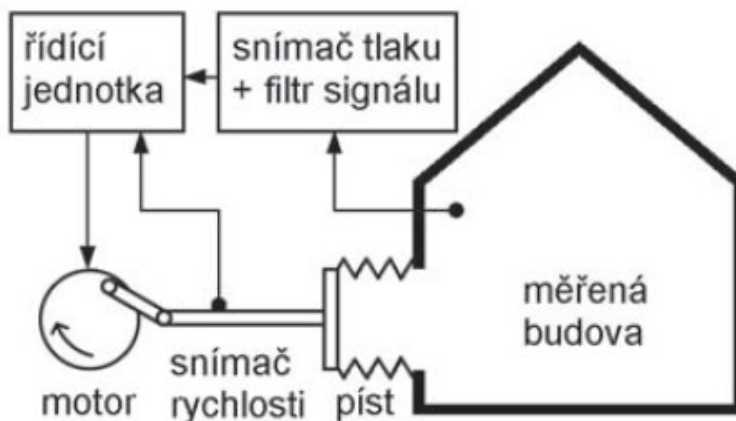
Obrázek 3: Princip metody tlakového spádu s interním ventilátorem [1]

Měření při podtlaku probíhá za použití ventilátorů na odtahovém potrubí, přívodní potrubí je utěsněno. Při měření za přetlaku je situace přesně opačná, použijí se ventilátory na přívodním potrubí, a odtahové potrubí se utěsní. Použití vzduchotechnického systému budovy k měření je vždy nutné konzultovat se správcem budovy, případně výrobcem vzduchotechnického systému, jelikož systém bude pracovat v nestandardním režimu, a některé typy větracích zařízení nemusí být pro tento účel vhodné.

Je nutné zajistit také dostatečně přesné měření objemového toku vzduchu a tlakového rozdílu, jelikož měřicí přístroje, které jsou součástí větracího systému, většinou nemají dostatečnou přesnost. Je vhodné tlakový rozdíl měřit na více místech budovy, a to zejména u výškových budov, kde se negativně projevuje vliv vzlaku vzduchu uvnitř budovy a rozdílné tlakové účinky větru na různě umístěných částech obvodového pláště budovy. [1]

### 2.1.3.3 Metoda harmonicky proměnného tlakového rozdílu

Princip metody je zcela odlišný než v případě dvou předchozích. V budově je vyvoláván harmonicky proměnný tlakový rozdíl, a sledována odezva na tyto tlakové změny uvnitř budovy. Údaje o vzduchotěsnosti obvodového pláště jsou odvozeny z charakteru této odezvy. Harmonickou změnu tlakového rozdílu vyvolává svým pohybem píst, který se pohybuje se známou frekvencí, a stlačuje vzduch uvnitř budovy (Obrázek 4).



Obrázek 4: Schéma metody s harmonicky proměnným tlakovým spádem [1]

Měřenými veličinami jsou:

- pístem vyvolaná amplituda tlakového rozdílu;
- fázový posun mezi polohou pístu a tlakovou změnou v budově.

Tyto dvě naměřené veličiny slouží k výpočtu objemového toku vzduchu netěsnostmi.

Vzhledem k tomu, že metoda probíhá při nízkých tlakových rozdílech, nelze touto metodou měřit budovy s velkými netěsnostmi, je tedy vhodná spíše k měření těsných budov. Pokud dojde k odfiltrování signálů s odlišnou frekvencí, než je frekvence pístu, je možné eliminovat nepříznivý vliv klimatických podmínek na výsledek měření.

Oproti ostatním metodám, má metoda harmonicky proměnného tlakového spádu několik výhod:

- měření je rychlé (cca 3 minuty);
- výsledek měření je k dispozici okamžitě;
- při měření je výměna vzduchu v budově nízká;
- je možné eliminovat nebo potlačit vliv klimatických podmínek na výsledek.

Přestože má tato metoda oproti ostatním uvedeným několik výhod, a byly pro ni vyvinuty přenosné přístroje pro komerční využití, nedošlo k jejímu výraznému rozšíření. [1]

#### 2.1.3.4 Metoda tlakového impulzu

Principem metody je zaznamenání rychlého poklesu tlakového rozdílu uvnitř netěsného prostoru vyvolaného tlakovým impulsem. Vzduchotěsnost obálky prostoru určuje rychlost poklesu vyvolaného tlakového rozdílu. Odvození údajů o vzduchotěsnosti obálky je možné pomocí porovnání naměřených dat s teoretickým průběhem poklesu tlaku.

K měření jsou potřeba dvě zařízení, jedno vyvolává tlakový impulz, a druhé zaznamenává velmi rychlý pokles tlakového rozdílu.

Měřicí zařízení je jednoduché a metoda rychlá, přesto se pro měření budov v současnosti nepoužívá. [1]

#### 2.1.4 Blower door test

Termínem blower door test je označováno měření vzduchotěsnosti budovy pomocí zařízení blower door. Principem se jedná o metodu tlakového spádu s použitím externího ventilátoru, při které je tento ventilátor pomocí speciálního rámu instalován do dveří nebo okna v obálce budovy. Blower door test je nejrozšířenější metodou pro měření vzduchotěsnosti budov, a v řadě zemí je standardizovaný. V České republice je pro měření vzduchotěsnosti zařízením blower door od roku 2016 platná norma ČSN EN ISO 9972 [6]. Měření se používá jak pro kontrolu vzduchotěsnosti v průběhu výstavby, tak pro určení dosažené úrovně vzduchotěsnosti dokončené budovy. [1]

Přestože zařízení je na trhu ve variantách od různých výrobců, základní součásti sady jsou vždy stejné, jedná se o:

- ventilátor s plynule měnitelnými otáčkami;
- regulátor otáček;
- teleskopický rám;
- vzduchotěsná plachta nebo panel;
- přístroj pro měření tlakových rozdílů.

Přesnost výsledků je závislá na přesnosti a kalibraci přístrojů, na klimatických podmínkách v průběhu měření a rovněž na kvalitě práce technika, který měření provádí. Proto byl postup měření standardizován a stal se součástí technických norem. Při dodržení postupů předepsaných těmito normami je věrohodnost naměřených výsledků vysoká, a jsou vzájemně srovnatelné.

V České republice je platná norma ČSN EN ISO 9972 [6], která předepisuje postup přípravy budovy před měřením, postup měření, a způsob zpracování výsledků.

Měřicí postup se skládá z těchto kroků:

- kontrola klimatických podmínek před měřením;
- osazení měřicího zařízení;
- volba posloupnosti tlakových rozdílů;
- měření základního tlakového rozdílu před začátkem testu;
- měření závislosti objemového toku vzduchu na tlakovém rozdílu;
- měření základního tlakového rozdílu po skončení testu. [1]

Součástí každého testu by měla být dvě měření, jejichž postup je identický – měření při podtlaku a při přetlaku v budově.

### 2.1.5 Způsob vyhodnocení výsledků

Cíle diplomové práce vychází z experimentu posouzení zúčastněných laboratoří dle normy ČSN ISO 5725, což je *mezilaboratorní experiment, v němž se hodnotí výsledek činnosti každé z laboratoří používajících stejnou normalizovanou metodu měření na identickém materiálu* [7]. Laboratoří se v případě měření vzduchotěsnosti rozumí operátor s vlastním vybavením pro měření. *Identickým materiálem* je experimentální objekt, na kterém měření vzduchotěsnosti probíhají. Použitá normalizovaná metoda je metoda blower door, popsaná v normě ČSN EN ISO 9972. Při vyhodnocení výsledků byly použity postupy popsané v normě ČSN ISO 5725 (všech jejích částech).

Vyhodnocení výsledků měření se skládá z těchto kroků:

- vyhodnocení klimatických podmínek při měření;
- kontrola úplnosti naměřených údajů;
- kontrola přípustných mezí jednotlivých veličin;
- kontrola vnitřní konzistentnosti dat;
- kontrola odlehlých hodnot;
- vyhodnocení základních statistických údajů platných výsledků měření.

#### 2.1.5.1 Vyhodnocení klimatických podmínek při měření

Vyhodnocuje se, zda klimatické podmínky v průběhu měření splňovaly doporučení normy ČSN EN ISO 9972, tedy jestli byly vhodné pro měření vzduchotěsnosti. Vyhodnocení obsahuje přehled měřených veličin, typicky vnitřní a vnější teploty. Rovněž se vyhodnocuje záznam rychlosti větru (pokud je k dispozici), dle normy [6] dostačuje určit rychlost větru stupněm na Beaufortově stupnici.

#### 2.1.5.2 Kontrola úplnosti naměřených údajů

Kontrola úplnosti naměřených dat je důležitá zejména v případě, že k odevzdávání dat dohází pomocí vyplňování formuláře. V případě experimentů prováděných v rámci této práce byla data z měření odevzdávána v podobě výstupu z měřícího softwaru, případně automaticky generovaného formuláře. Přesto byla kontrola dat provedena. Při neúplnosti dat jsou dotčená měření z experimentu vyloučena.

#### 2.1.5.3 Kontrola přípustných mezí jednotlivých veličin

Při kontrole přípustných mezí jednotlivých veličin je ověřeno, jestli hodnoty zkoumaných veličin nepřekračují fyzikálně přípustné meze a zároveň spadají do mezí předepsaných zkušebním postupem. Kontrolováno bylo splnění těchto podmínek:

- tlakový rozdíl při nulovém objemovém průtoku vzduchu  $\Delta p_0$  leží v intervalu (-5 Pa; +5 Pa);
- součinitel proudění  $C_{L+/-}$  je větší než 0;
- exponent proudění  $n_{+/-}$  leží v intervalu (0,5; 1,0).

Při nesplnění těchto podmínek je test vyloučen z vyhodnocení jako neplatný. [8]

#### 2.1.5.4 Kontrola vnitřní konzistentnosti dat

Kontroluje se shoda mezi odevzdanou hodnotou  $q_{50}$  a hodnotou  $q_{50}$  získanou výpočtem z hodnot součinitele proudění  $C_{L+/-}$  a  $n_{+/-}$ . Dále se kontroluje shoda mezi odevzdanou hodnotou  $q_{50+/-}$  a hodnotou vypočtenou jako průměr z  $q_{50+}$  a  $q_{50-}$ .

Tato kontrola je důležitá zejména v případě, že k odevzdávání dat dohází pomocí vyplňování formuláře. Při neshodě odevzdané hodnoty s vypočtenou větší než 1% jsou výsledky měření vyloučeny z dalšího vyhodnocení.

#### 2.1.5.5 Kontrola odlehlých hodnot

Kontrola přítomnosti odlehlých hodnot mezi výsledky, které splnily všechny předchozí podmínky, je prováděna pomocí *Grubbsova testu na odlehlé hodnoty* [9]. Testovány jsou výsledky testů, za které je v případě provedených experimentů považována hodnota  $q_{50+/-}$ . Vzhledem k tomu, že v rámci obou provedených experimentů dosazovali všichni účastníci stejnou hodnotu vnitřního objemu vzduchu, vztahují se závěry kontroly odlehlých hodnot i na výsledky  $n_{50}$ , které jsou z hodnot  $q_{50+/-}$  získány výpočtem. Hodnoty, označené Grubbsovým testem jako odlehlé, byly z dalšího vyhodnocení vyloučeny.

Kromě celkových výsledků testů jsou kontrole odlehlých hodnot v odůvodněných případech podrobeny navíc některé dílčí výsledky ( $q_{50+}$ ,  $q_{50-}$ ,  $C_{L+}$ ,  $C_{L-}$ ,  $n_{+}$ ,  $n_{-}$ ). Zjištění odlehlé hodnoty u těchto dílčích výsledků nevede k vyloučení testu z dalšího statistického vyhodnocení.

#### 2.1.5.6 Vyhodnocení základních statistických údajů

Po vyloučení všech neplatných měření je provedeno základní statistické vyhodnocení, které se skládá z určení:

- minimální hodnoty ( $x_{\min}$ );
- maximální hodnoty ( $x_{\max}$ );
- aritmetického průměru ( $\bar{x}$ );
- rozptylu hodnot ( $\sigma^2$ );
- směrodatné odchylky ( $\sigma$ );
- variačního koeficientu měření ( $v_x$ ).

Tyto souhrnné statistické údaje jsou uvedeny v přehledné tabulce.

Důležitými statistickými údaji, které popisují měření jednotlivých operátorů, jsou *variální rozpětí*  $R_{xn}$ , které vypočítáme jako rozdíl minimální a maximální naměřené hodnoty, a *strannost operátora*  $B$ , kterou lze dle ČSN ISO 5725-1 [7] určit jako rozdíl aritmetického průměru všech měření jednoho operátora  $\bar{x}_n$  a přijaté střední hodnoty měření  $s_x$ . V případě vzduchotěsnosti nelze určit střední hodnotu jinak než měřením, v takovém případě norma připouští použití aritmetického průměru všech měření  $\bar{x}$ . Vzorec pro výpočet strannosti operátora je tedy  $B = \bar{x}_n - \bar{x}$ . Tyto vypočtené hodnoty jsou spolu s aritmetickým průměrem výsledků měření každého operátora uvedeny v tabulce.

## 2.2 Definice pojmů

### 2.2.1 Chyba měření

Chyba měření je definována jako rozdíl mezi skutečnou hodnotou měřené veličiny a hodnotou zjištěnou měřením. Chybou je zatíženo každé provedené měření, a výsledek se tak správné hodnotě pouze přibližuje. Rozlišujeme tři druhy chyb měření: hrubé, soustavné a náhodné. Rozdíl správné a naměřené hodnoty závisí na přesnosti měřícího přístroje a přesnosti měřící metody. [10]

#### 2.2.1.1 Hrubá chyba

Tato chyba vzniká nepozorností operátora při měření, případně poruchou měřícího přístroje, nebo nevhodně použitou metodou měření. Hrubá chyba je většinou odhalena při prvotním zkoumání výsledků měření.

#### 2.2.1.2 Soustavná chyba

Soustavná chyba, také nazývaná systematická, vzniká nepřesností měřícího přístroje a měřící metody. Tato chyba má při opakovaném měření za stejných podmínek stálou hodnotu.

V případě měření vzduchotěsnosti je za měřící přístroj považována celá sada určená k měření, včetně veškerého příslušenství. Pro kvantifikaci soustavné chyby je možné použít veličinu *strannost operátora*, která je popsána v podkapitole 2.1.5.6.

### 2.2.1.3 Náhodná chyba

Tento typ chyby vzniká náhodnými vlivy v průběhu měření, například změnou teploty, změnou tlaku, vlivem větru apod. Velikost náhodné chyby lze odhadnout pomocí opakovaného měření a statistického vyhodnocení naměřených výsledků.

Pro experimenty v této práci je náhodná chyba obsažena ve *variačním rozpětí* každého operátora.

### 2.2.2 Shodnost výsledků měření

Shodností výsledků se podle normy ČSN ISO 5725 rozumí *těsnost shody mezi nezávislými výsledky zkoušek získanými za předem specifikovaných podmínek*. [7] Těmito podmínkami mohou být podmínky opakovatelnosti (2.2.3) nebo reprodukovatelnosti (2.2.4).

### 2.2.3 Opakovatelnost

Opakovatelnost je shodnost výsledků měření získaných za podmínek opakovatelnosti. Podmínky opakovatelnosti určují, že měření musí být provedeno:

- toutéž metodou;
- jedním operátorem za použití téhož měřicího zařízení;
- na stejné budově;
- za srovnatelných klimatických podmínek;
- během krátkého časového rozmezí.

Dodržení těchto podmínek je zásadní pro možnost následně vyhodnocovat opakovatelnost měření. Při porušení jakékoliv z uvedených podmínek, není možné opakovatelnost určit.

Opakovatelnost udává nejmenší možné rozpětí výsledků získaných zkušební metodou při vyloučení faktorů, které přispívají ke zvýšení variability výsledků (použité zařízení a jeho kalibrace, klimatické podmínky, vliv operátora).

*Směrodatná odchylka opakovatelnosti* ( $\sigma_r$ ) je směrodatná odchylka výsledků měření získaných za podmínek opakovatelnosti.



*Variační koeficient opakovatelnosti* ( $v_{xr}$ ) slouží k porovnání souborů dat, které mají různý aritmetický průměr. Vypočítá se jako podíl směrodatné odchytky opakovatelnosti ( $\sigma_r$ ) a aritmetického průměru všech měření ( $\bar{x}$ ).

*Mez opakovatelnosti* je hodnota, o které lze s pravděpodobností 95% tvrdit, že pod ní bude ležet nebo jí bude rovna absolutní hodnota rozdílu mezi dvěma výsledky zkoušek získanými za podmínek opakovatelnosti. [7]

## 2.2.4 Reprodukovatelnost

Reprodukovatelnost je shodnost výsledků měření získaných za podmínek reprodukovatelnosti. Pro měření vzduchotěsnosti je podmínkami reprodukovatelnosti určeno, že musí být provedeno:

- toutéž metodou;
- na stejné budově;
- různými operátory za použití různého měřicího zařízení;
- za srovnatelných klimatických podmínek.

Stejně jako v případě opakovatelnosti je dodržení těchto podmínek nezbytné pro následné vyhodnocení měření.

Reprodukovatelnost udává rozpětí výsledků získaných zkušební metodou bez vyloučení faktorů přispívajících ke zvýšení variability výsledků. Vypovídá tedy o vlivu operátora a použitého měřicího zařízení na výsledek měření.

*Směrodatná odchytka reprodukovatelnosti* ( $\sigma_R$ ) je směrodatná odchytky výsledků měření získaných za podmínek reprodukovatelnosti.

*Variační koeficient reprodukovatelnosti* ( $v_{xR}$ ) slouží k porovnání souborů dat, které mají různý aritmetický průměr. Vypočítá se jako podíl směrodatné odchytky reprodukovatelnosti ( $\sigma_R$ ) a aritmetického průměru všech měření ( $\bar{x}$ ).

*Mez reprodukovatelnosti* je hodnota, o které lze s pravděpodobností 95% tvrdit, že pod ní bude ležet nebo jí bude rovna absolutní hodnota rozdílu mezi dvěma výsledky zkoušek získanými za podmínek reprodukovatelnosti. [7]

## 2.3 Souhrn předchozích experimentů

### 2.3.1 C. Delmotte, J. Laverge (2011)

V práci *Interlaboratory test for the determination of repeatability and reproducibility of building airtightness measurement* [11] (Stanovení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření vzduchotěsnosti budov srovnávacím měřením) se autoři Christophe Delmotte a Jelle Laverge zabývají určením nejistoty měření vzduchotěsnosti budov při praktickém použití blower door testu, konkrétně jeho opakovatelností a reprodukovatelností.

Při měřeních v červnu a červenci roku 2011, které probíhaly na rodinném domě v Belgii vybudovaném roku 1980, byly dodrženy podmínky opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. Příprava stavby před měřením byla v rámci experimentu jednotná, došlo k vyloučení prostoru podkroví a suterénu. Teploty zaznamenané v průběhu měření se pohybovaly v rozmezí 11,7°C až 28,1°C, maximální rozdíl vnitřní a vnější teploty během měření byl 4,2°C. Průměrná naměřená rychlost větru byla 1,3 až 5,1 m/s, což odpovídá 0° až 2° Beaufortovy stupnice. Podmínky při testech byly vhodné pro měření vzduchotěsnosti.

Při testování za podmínek opakovatelnosti, bylo provedeno 10 měření. Testy obsahovaly měření při přetlaku i podtlaku v budově, a vypočtenou průměrnou hodnotu průtoku vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu 50 Pa, která je považována za výsledek měření. Zaznamenané výsledky  $q_{50}$  ze všech deseti měření za podmínek opakovatelnosti se pohybovaly v rozmezí 715 až 744 m<sup>3</sup>/h. Variační koeficient opakovatelnosti ( $v_{xr}$ ) byl při tlakovém rozdílu 50 Pa 1,4%. Výsledky byly kromě tlakového rozdílu 50 Pa zaznamenány na více hladinách referenčního tlakového rozdílu, variabilita výsledků se s klesajícím tlakovým rozdílem zvyšovala.

Za podmínek reprodukovatelnosti ležely průměrné hodnoty průtoku vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa v rozmezí 713 až 772 m<sup>3</sup>/h. Vyhodnocení zaznamenaných výsledků při tlakovém rozdílu 50 Pa ukázalo, že variační koeficient reprodukovatelnosti ( $v_{xR}$ ) je 2,4%. Dosažená mez reprodukovatelnosti byla 6,7%, což znamená, že hodnota rozdílu mezi dvěma výsledky zkoušek bude s 95% pravděpodobností menší či rovna 6,7% z průměru výsledků. Při vyhodnocení výsledků zaznamenaných na nižších tlakových rozdílech byl variační koeficient

až dvojnásobný. Souhrn výsledků, včetně dílčích výsledků měření při podtlaku a přetlaku, je uveden v kapitole 2.3.5.

Autoři experimentu zaznamenali výrazné rozdíly výsledků při měření při přetlaku a při podtlaku v budově, na závěr studie tedy doporučují vždy provádět měření při podtlaku i přetlaku, a za výsledek považovat až průměr z těchto dvou dílčích výsledků. Dalším doporučením je volba tlakových rozdílů použitých během měření v intervalu 30 až 100 Pa. Při nižších tlakových rozdílech byla zaznamenána příliš velká variabilita výsledků a byl zaznamenán značný vliv klimatických podmínek na výsledek měření při tlakových rozdílech nižších než 30 Pa.

### 2.3.2 W. Bracke a spol. (2013)

Práce *Durability and measurement uncertainty of airtightness in extremely airtight dwellings* [12] (Trvanlivost a nejistota měření vzduchotěsnosti velmi těsných domů) byla vypracována kolektivem autorů z Ghent University v roce 2013.

Autoři Wolf Bracke, Jelle Laverge, Nathan Van den Bossche a Arnold Janssens zde prezentují výsledky měření vzduchotěsnosti provedených na budovách s velmi těsnou obálkou ( $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$ ). Uvedená hranice intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa ( $n_{50}$ ) odpovídá doporučené hodnotě z normy ČSN 73 0540-2 [3] pro budovy s velmi nízkou potřebou tepla na vytápění, vybavené mechanickým větracím systémem a zpětným získáváním tepla. Práce je rozdělena na čtyři části, k měření ve všech částech bylo použito stejné měřicí zařízení Minneapolis Blower Door typ 4.1.

Měření v první části bylo prováděno na dvou pasivních domech, cílem této části je určení opakovatelnosti měření. V období od prosince 2012 do února 2014 bylo provedeno celkem 111 měření (dům 1 – 58, dům 2 – 53), jejichž výsledky byly následně vyhodnoceny. U domu 1 bylo dosaženo variačního koeficientu opakovatelnosti 1,4% a u domu 2 byla výsledná hodnota 2,3%. Součástí této části experimentu bylo rovněž testování při osazení měřicího zařízení do různých dveří objektu – rozdíl ve výsledcích dosáhl až 15,5%. Toto zjištění potvrdilo nutnost provádět experimenty opakovatelnosti měření stejnou metodou a při osazení měřicího zařízení na stejném místě.

Druhá část měření je zaměřená na vliv ročního období na výsledky měření, konkrétně vliv teplotních rozdílů. Měření bylo provedeno na stejných dvou pasivních domech, a to od listopadu 2012 do dubna 2013. Ve výsledcích se vyskytly výrazné rozdíly, které však autoři přičítají stavebním úpravám, které byly provedeny na měřených budovách. Je tak zřejmé, že tato měření nesplňují podmínky opakovatelnosti a není možné jejich výsledky porovnávat.

Další – třetí – část práce se zabývá změnou vzduchotěsnosti budov v čase. Měření proběhla na 15 domech v Belgii, a výsledky byly porovnány s hodnotami uvedenými v původní dokumentaci. Všechny naměřené hodnoty byly výrazně vyšší než hodnoty uvedené v původní dokumentaci, a to průměrně o 37%. Autoři konstatují, že podmínky během původního a nového měření byly rozdílné, a tím mohla být do výsledků vnesená určitá nejistota, přesto je pokles vzduchotěsnosti budov v čase z výsledků patrný.

Poslední část práce se zabývá reprodukovatelností měření. Přestože autoři hovoří o reprodukovatelnosti měření, nejsou dodrženy podmínky reprodukovatelnosti, jelikož měření nebyla provedena na jednom objektu, ale na více objektech podobné konstrukce, které byly zkonstruovány podobnými postupy. Pokus byl proveden ve městě Brende a dosažené rozpětí hodnot bylo 12%. Tato zjištěná hodnota však vypovídá více o provedení budov než o samotném měření vzduchotěsnosti.

V závěru práce je autory zhodnoceno měření vzduchotěsnosti budov tlakovou metodou jako spolehlivé, pokud jsou dodrženy technické zásady měření.

### 2.3.3 F. Ledecký (2015)

Autor František Ledecký se ve své diplomové práci *Nejistoty při měření vzduchotěsnosti budov* [13] zaměřuje na získání velkého množství výsledků měření vzduchotěsnosti a následné odvození nejistoty měření. Součástí práce je i vyhodnocení opakovatelnosti měření a vlivu rozdílných klimatických podmínek na výsledky.

V termínu od dubna do listopadu 2014 bylo provedeno celkem 92 měření. Všechna měření byla provedena jedním operátorem a stejným měřicím zařízením na zkušebním objektu umístěném na střeše budovy stavební fakulty ČVUT v Praze. Postup měření se řídil normou ČSN EN 13829 [2]. Podmínky v jednotlivých dnech

experimentu byly různé; síla větru se pohybovala od 1° do 4° Beaufortovy stupnice, záznam teploty byl v rozpětí od 4°C do 34°C. V některých případech tak podmínky neodpovídaly doporučením normy. V rámci celé diplomové práce byl hodnocenou veličinou objemový průtok vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu 50 Pa ( $q_{50}$ ).

Při vyhodnocování nejistoty měření dospěl autor k celkové nejistotě 4% se spolehlivostí 95%. Po vyloučení měření, při kterých podmínky nesplňovaly doporučení normy klesla hodnota nejistoty na 3,3%. Tato nejistota je vztažena k objemovému průtoku vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa ( $q_{50}$ ). Při zkoumání závislosti výsledků měření na vnějších vlivech prokázal autor závislost mezi objemovým průtokem vzduchu a rozdílem vnitřní a venkovní teploty, a také závislost objemového průtoku vzduchu na rychlosti větru.

Pro test opakovatelnosti v rámci této diplomové práce vybral autor z celého souboru dat měření, která splňovala podmínky opakovatelnosti a provedl test dle postupu z normy ČSN ISO 5725-2 [14]. Variační koeficient opakovatelnosti u tohoto vybraného souboru dat dosahoval 0,6%, autor tak dospěl k závěru, že při měření za srovnatelných okolních podmínek je metoda blower door test velmi přesná, a že nejistotu výrazně zvyšuje právě vliv klimatických podmínek (vnitřní a vnější teplota, vlhkost a rychlost větru).

V závěru práce uvádí autor doporučení k dosažení co nejnižší nejistoty při měření vzduchotěsnosti. Doporučuje provádět měření za vhodných podmínek, což zahrnuje rychlost větru do 2° Beaufortovy stupnice a vyvarování se měření při extrémních venkovních teplotách. Rovněž doporučuje, aby rozdíl mezi vnitřní a vnější teplotou byl, pokud možno, co nejnižší. Při dodržení těchto doporučení a správného postupu měření se lze vyhnout velkému rozpětí naměřených hodnot v rámci opakovaného měření a nejistota měření se minimalizuje, lze tedy očekávat přesný výsledek zkoušky, blížící se skutečné hodnotě vzduchotěsnosti budovy.

### 2.3.4 O. Šafránek (2016)

Diplomová práce Ondřeje Šafránka s názvem *Opakovatelnost měření vzduchotěsnosti zařízením Blower Door* [15] se zabývá stanovením opakovatelnosti a nejistoty měření vzduchotěsnosti v laboratorních podmínkách. Experiment byl proveden v červenci a září 2015 v experimentální hale Univerzitního centra

energeticky efektivních budov ČVUT. Veškerá měření zkušebního objektu byla provedena v laboratorních podmínkách (s vyloučením vnějších klimatických vlivů).

V rámci práce bylo provedeno celkem 131 měření na několika úrovních průtoku vzduchu. Autor považuje data nashromážděná na každé úrovni průtoku vzduchu za základ testu opakovatelnosti. Měření v rámci experimentu byla prováděna pouze za podtlaku, proto není možné je porovnávat s celkovými výsledky měření, ale pouze s dílčími výsledky  $q_{50}$ .

Celkem bylo měření provedeno na deseti úrovních průtoku vzduchu od 50 m<sup>3</sup>/h do 1300 m<sup>3</sup>/h. Variační koeficient opakovatelnosti se pro výsledky při podtlaku 50 Pa pohybuje od 0,16% do 2,44%. Autor uvádí, že s rostoucím objemovým průtokem vzduchu klesá relativní směrodatná odchylka opakovatelnosti (variační koeficient opakovatelnosti) i maximální variabilita naměřených hodnot.

Při porovnání s výsledky předchozích experimentů odhaduje autor vliv klimatických podmínek na výsledky měření. Ve všech testech provedených v rámci diplomové práce pozoruje autor menší směrodatnou odchylku i maximální variabilitu výsledků, a tedy větší přesnost měření. Tento výsledek byl autorem očekáván, vzhledem k provádění měření v laboratorních podmínkách, tedy vyloučení vnějších klimatických vlivů.

Závěrem autor uvádí, že experiment potvrdil závislost přesnosti měření, variability výsledků a nejistoty měření na objemovém průtoku vzduchu. Srovnáním s výsledky předchozích experimentů byl rovněž potvrzen výrazný vliv klimatických podmínek na výsledky měření.

### 2.3.5 Souhrn výsledků

Cílem souhrnu předchozích experimentů bylo poznání již publikovaných informací ohledně opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření vzduchotěsnosti budov.

#### 2.3.5.1 Opakovatelnost měření vzduchotěsnosti

Opakovatelnosti měření vzduchotěsnosti se už ve svých pracích věnovala řada autorů, a je k dispozici množství různých výsledků. Pro potřeby této práce jsou v následující tabulce (Tabulka 1) uvedeny hodnoty variačního koeficientu opakovatelnosti, dosaženého v jednotlivých experimentech.

Tabulka 1: Variační koeficienty opakovatelnosti

		Variační koeficient opakovatelnosti		
		q <sub>50-</sub>	q <sub>50+</sub>	q <sub>50+/-</sub>
C. Delmotte, J. Laverge (2011)		1,98%	1,23%	1,36%
W. Bracke a spol. (2013)	dům 1	-	-	1,40%
	dům 2	-	-	2,30%
F. Ledecký (2015)		0,52%	0,83%	0,58%
O. Šafránek (2016)	50 m <sup>3</sup> /h	2,44%	-	-
	100 m <sup>3</sup> /h	1,05%	-	-
	250 m <sup>3</sup> /h	0,53%	-	-
	500 m <sup>3</sup> /h	0,37%	-	-
	750 m <sup>3</sup> /h	0,18%	-	-
	900 m <sup>3</sup> /h	0,20%	-	-
	1000_1 m <sup>3</sup> /h	0,42%	-	-
	1000_2 m <sup>3</sup> /h	0,16%	-	-
	1250 m <sup>3</sup> /h	0,19%	-	-
	1300 m <sup>3</sup> /h	0,35%	-	-

### 2.3.5.2 Reprodukovatelnost měření vzduchotěsnosti

Vyhodnocení reprodukovatelnosti měření budov obsahují z uvedených prací pouze dvě. Výsledky výzkumu, se kterými je možné porovnávat další experimenty, ve své práci uvádí pouze C. Delmotte a J. Laverge, kterým při vyhodnocování výsledků měření objemového průtoku vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa vyšel variační koeficient reprodukovatelnosti  $v_{XR} = 2,4\%$ . Uvedené dílčí výsledky při podtlaku a přetlaku jsou 2,5% a 3,2%.

## 3 Experimenty

V rámci této diplomové práce jsou realizovány dva experimenty, které jsou navrženy tak, aby byly z velké části shodné, a jediným zásadním rozdílem bylo místo realizace experimentu. Experiment č.1 je realizován in-situ na pasivním rodinném domu ATREA v Koberovech [16], experiment č.2 pak v laboratorních podmínkách v Univerzitním centru energeticky efektivních budov v Buštěhradu [17].

### 3.1 Experiment č.1 – Koberovy

#### 3.1.1 Cíle experimentu

Základním cílem experimentu je vyhodnotit reprodukovatelnost měření vzduchotěsnosti budov. Toho lze docílit porovnáním množství výsledků měření, které provedou různí operátoři s různým vybavením na stejné budově a za srovnatelných podmínek.

Dílčím cílem experimentu je zároveň vyhodnotit opakovatelnost měření vzduchotěsnosti budov. Pro toto vyhodnocení je třeba, aby každý z operátorů provedl alespoň tři měření, která budou splňovat podmínky opakovatelnosti; tedy budou provedena dle ČSN ISO 5725-1 [7]:

- toutéž metodou;
- jedním operátorem za použití téhož měřicího zařízení;
- na stejné budově;
- za srovnatelných klimatických podmínek;
- během krátkého časového rozmezí.

Rovněž je pro potřeby této práce žádoucí, aby všechna měření byla zopakována při různém objemovém průtoku vzduchu. Po dokončení měření bude proto upravena těsnost měřeného objektu, a veškerá měření budou zopakována.

Během experimentu budou také zaznamenávány klimatické podmínky v místě měření, tedy vnitřní a vnější teplota, a rychlost větru. Tyto data budou analyzována, a bude posouzen případný vliv těchto jevů na výsledky měření.



### 3.1.2 Základní informace

Experiment probíhal v termínu 12. - 15. 6. 2017 na severozápadním okraji Českého ráje v obci Koberovy (geografické souřadnice: 50,620753 N, 15,229596 E). Zkušebním objektem byl vzorový pasivní dům ATREA, který je součástí soboru třinácti pasivních rodinných domů vybudovaných v roce 2007 (Obrázek 5). Soubor mimo vzorového pasivního domu zahrnuje ještě školící středisko společnosti ATREA, s.r.o. a 11 trvale obydlených rodinných domů.



Obrázek 5: Soubor pasivních domů ATREA v Koberovech [16]

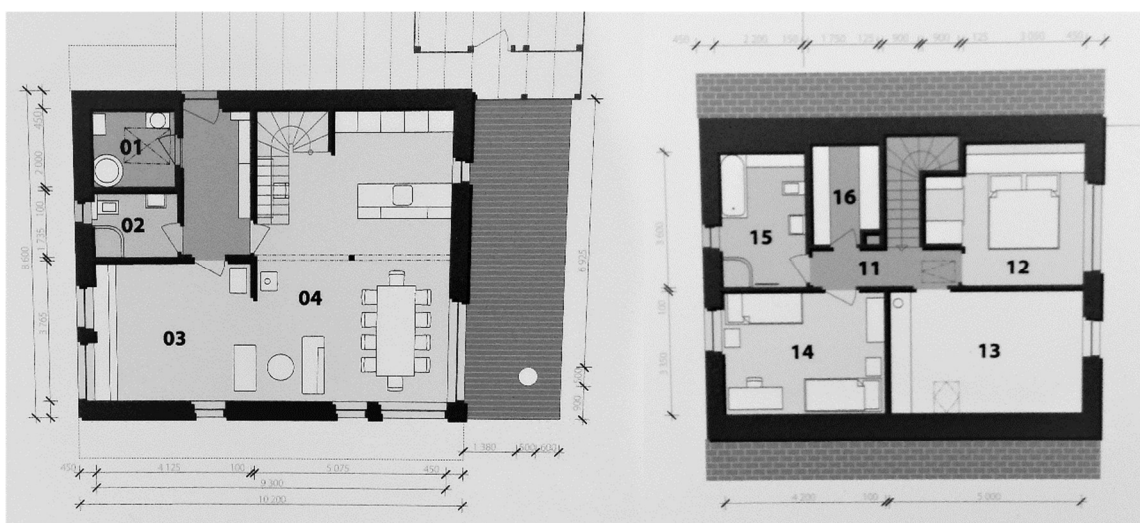
Ve stejném termínu jako experiment probíhalo v Koberovech rovněž srovnávací měření Asociace Blower Door CZ [8], jejíž členové se zúčastnili experimentu opakovatelnosti a reprodukovatelnosti.

### 3.1.3 Popis experimentálního objektu

Jedná se o dvoupodlažní nepodsklepený objekt, který slouží jako vzorový rodinný dům. V 1.NP se nachází obývací pokoj s jídelnou a kuchyní, pracovna, koupelna

a technická místnost s tepelným čerpadlem a vzduchotechnickou jednotkou. Vnitřní podlahová plocha 1.NP je celkem 66,76 m<sup>2</sup>. Místnosti v 2.NP jsou: ložnice, dva pokoje, koupelna, šatna a chodba se schodištěm. Podlahová plocha 2.NP je 64,51 m<sup>2</sup>, celková podlahová plocha je tedy 131,27 m<sup>2</sup> a celková zastavěná plocha domu potom 87,72 m<sup>2</sup>. Tyto udávané plochy jsou součástí schématických výkresů (Obrázek 6), které jsou k nahlédnutí přímo v experimentálním objektu (Obrázek 7).

Vnitřní objem domu, stanovený podle ČSN EN ISO 9972 [6] je  $V = 326 \text{ m}^3$  a plocha obálky budovy  $A_E = 293 \text{ m}^2$ . Ve všech vyhodnocovaných měřeních provedených na tomto objektu byly použity výše uvedené hodnoty  $V$  a  $A_E$ .



Obrázek 6: Schématické půdorysy 1.NP a 2.NP vzorového domu ATREA



Obrázek 7: Experimentální objekt – vzorový pasivní dům ATREA



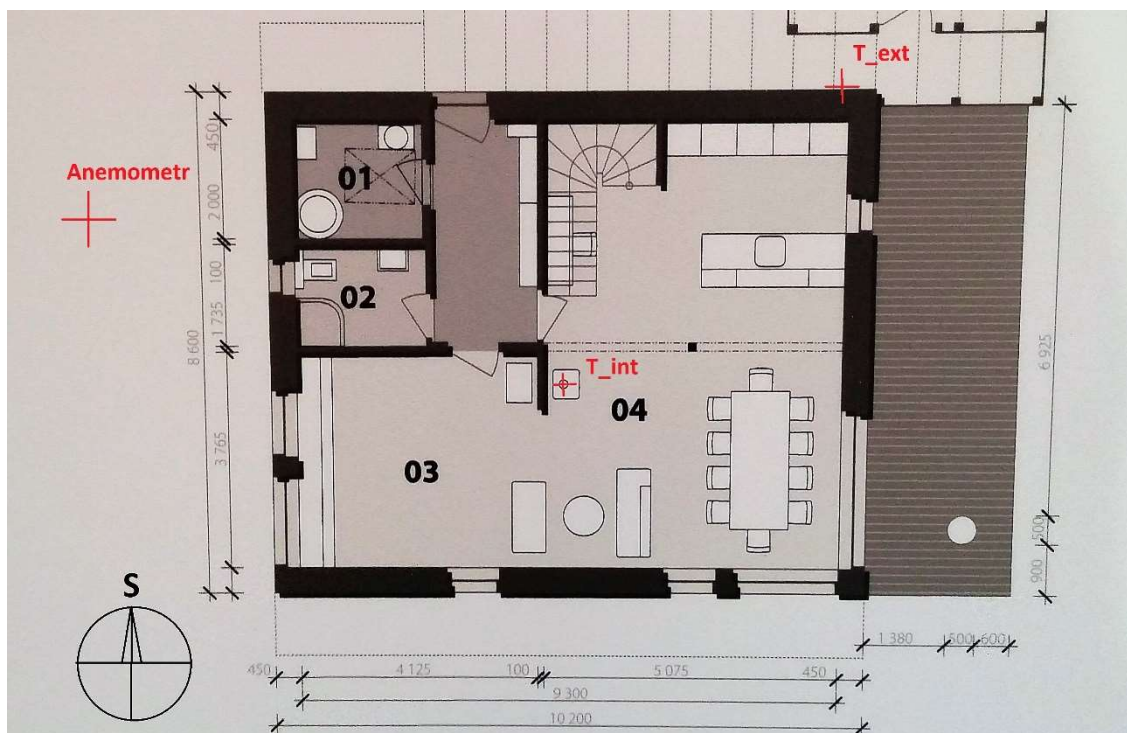
### 3.1.4 Příprava měření

Součástí tohoto experimentu není posuzování přípravy objektu před měřením vzduchotěsnosti, proto byla tato příprava provedena před počátkem měření, a zůstala v celé době trvání stejná. Příprava objektu zahrnovala:

- utěsnění vzduchotechnické jednotky pomocí nafukovacích míčů;
- utěsnění komína nad úrovní střechy pomocí nafukovacího míče;
- zazátkování zemního výměníku tepla;
- zalití všech zápachových uzávěrek vodou;
- zavření všech oken a dveří vedoucích do exteriéru;
- otevření interiérových dveří.

Každý následující den byla před prvním měřením toho dne provedena kontrola těchto opatření. Tyto kontroly neodhalily žádné nedostatky, a lze tak tvrdit, že vlastnosti objektu byly v průběhu všech provedených měření shodné.

V rámci přípravy měření byly rovněž rozmístěny přístroje pro vyhodnocení klimatických podmínek (Obrázek 8), konkrétně teplotní čidla v interiéru a exteriéru a anemometr. Pomocí těchto přístrojů probíhalo monitorování podmínek po celou dobu trvání experimentu.



Obrázek 8: Schéma umístění teplotních čidel a anemometru

Proběhla také výroba clony (Obrázek 9), která slouží ke změně vzduchotěsnosti budovy. Cílem bylo upravit vzduchotěsnost budovy na průtok vzduchu přibližně 1000 m<sup>3</sup>/h při tlakovém rozdílu 50 Pa. Konkrétně byla tato clona vyrobena z OSB desky, do které byly vyříznuty a vyvrtány otvory. Odhad plochy otvorů byl proveden na základě rovnice pro výpočet průtoku vzduchu při určitém tlakovém rozdílu na cloně [18] – v tomto případě při tlakovém rozdílu 50 Pa. Tato clona byla osazována do okna koupelny v 1.NP.



Obrázek 9: Výroba clony a její osazení do okna koupelny

### 3.1.5 Postup měření

Jednotlivá měření probíhala podle normy ČSN EN 13829 [2], která je v současné době nahrazena normou ČSN EN ISO 9972 [6], jejíž české znění však v době experimentu ještě nebylo k dispozici. Postup měření je však dle obou výše uvedených norem téměř identický, a proto tato záměna nemá žádný vliv na získaná data, ani na vyhodnocení experimentu. Měřicí postup je popsán v kapitole 2.1.4.

Každý z operátorů provedl tři testy na dvou úrovních průtoku vzduchu; celkem tedy šest testů. Každý z testů se skládal z měření při podtlaku v budově a při přetlaku v budově, a následně proběhlo jejich vyhodnocení dle výše uvedených norem. Všichni operátoři osazovali měřicí zařízení do rámu vstupních dveří, umístění tlakových čidel však už bylo variabilní, a každý volil umístění dle svého uvážení. Stejně tak vnitřní a vnější teplotu měřil každý z operátorů vlastním zařízením a uváděl jí v protokolu o měření. Tyto uvedené hodnoty byly následně porovnávány se záznamem pořízeným trvale umístěnými čidly venkovní a vnitřní teploty.

Toto porovnání sloužilo k odhalení závažných chyb (například záměna vnitřní a vnější teploty), nikoliv k opravě hodnot uvedených operátory v protokolu.

### 3.1.6 Klimatické podmínky při měření

Kompletní záznam klimatických podmínek z průběhu měření je uveden v přílohách 1 a 2. Součástí je záznam rychlosti větru, vnitřní a venkovní teploty a jejich rozdíl z každého dne experimentu, a to v časovém rozmezí cca 8:00 až 21:00.

#### 3.1.6.1 Rychlost větru

Průměrná naměřená rychlost větru se od 12.6. do 14.6. pohybovala v rozmezí od 0,9 do 1,2 m/s, v těchto dnech byly naměřeny nárazy větru, které dosahovaly až 6,4 m/s, vyskytovaly se však velmi zřídka. Je nepravděpodobné, že by tyto nárazy větru měly výrazný vliv na výsledek prováděného měření. Dne 15.6. byla průměrná rychlost větru nižší, konkrétně 0,4 m/s, a maximální naměřené hodnoty nepřesáhly 3,5 m/s, podmínky v poslední den měření tak byly mírně příznivější než ve dnech předchozích.

Součástí každého měření je určení síly větru na Beaufortově stupnici operátorem. Síla větru během všech testů byla určena mezi 0° a 2° Beaufortovy stupnice, což plně odpovídá naměřeným datům.

#### 3.1.6.2 Vnitřní teplota – $T_i$

Naměřená vnitřní teplota byla v průběhu experimentu stálá – nedocházelo k výraznějším výkyvům. Průměrná vnitřní teplota se v jednotlivých dnech pohybovala od 23,3 °C do 24,9 °C.

#### 3.1.6.3 Venkovní teplota – $T_e$

Venkovní teplota se ve sledovaném časovém rozmezí (8:00 – 21:00) pohybovala od 14,7 °C do 30,1 °C. Průměrná venkovní teplota v jednotlivých dnech se pohybovala od 17,6 °C do 22,7 °C.

#### 3.1.6.4 Rozdíl teplot – $\Delta T$

Průměrný rozdíl teplot byl ve dnech experimentu následující: 12.6. 5,5 °C, 13.6. 5,2 °C, 14.6. 1,9 °C a 15.6. 2,9 °C. Po celou dobu experimentu byla tedy průměrná vnitřní teplota vyšší než průměrná venkovní teplota.

### 3.1.6.5 Vyhodnocení

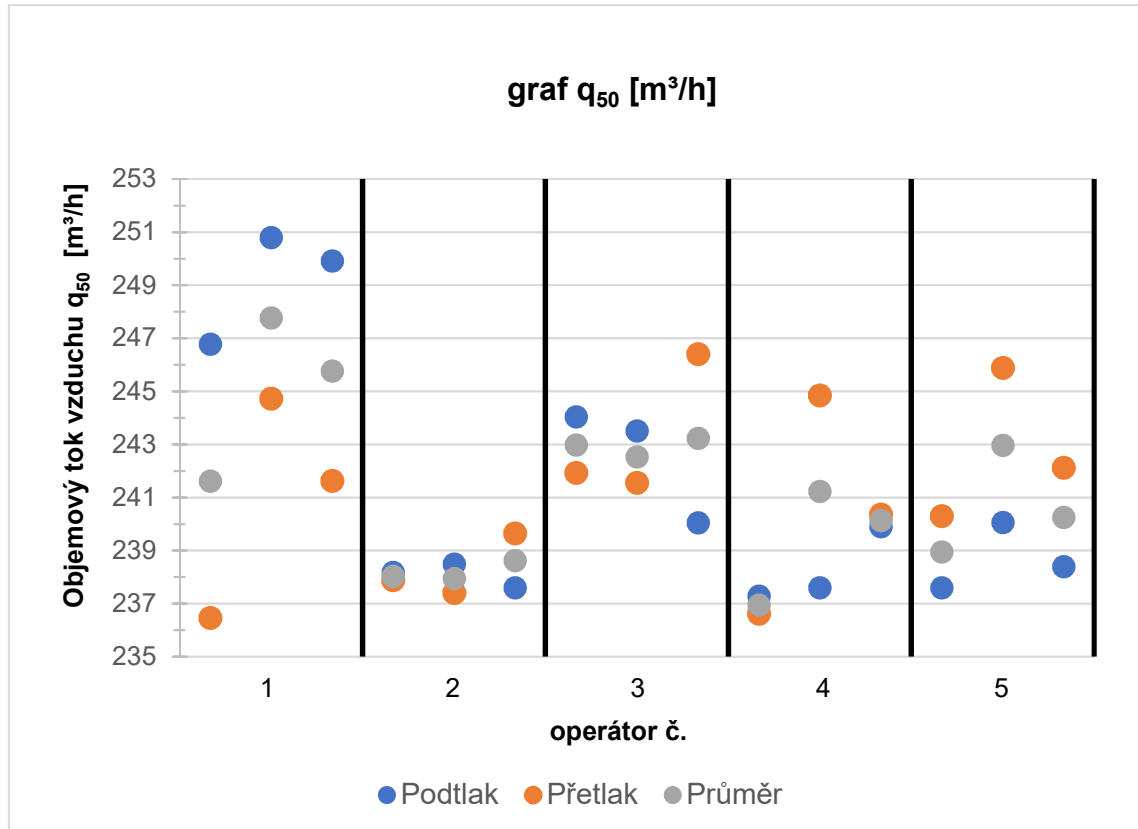
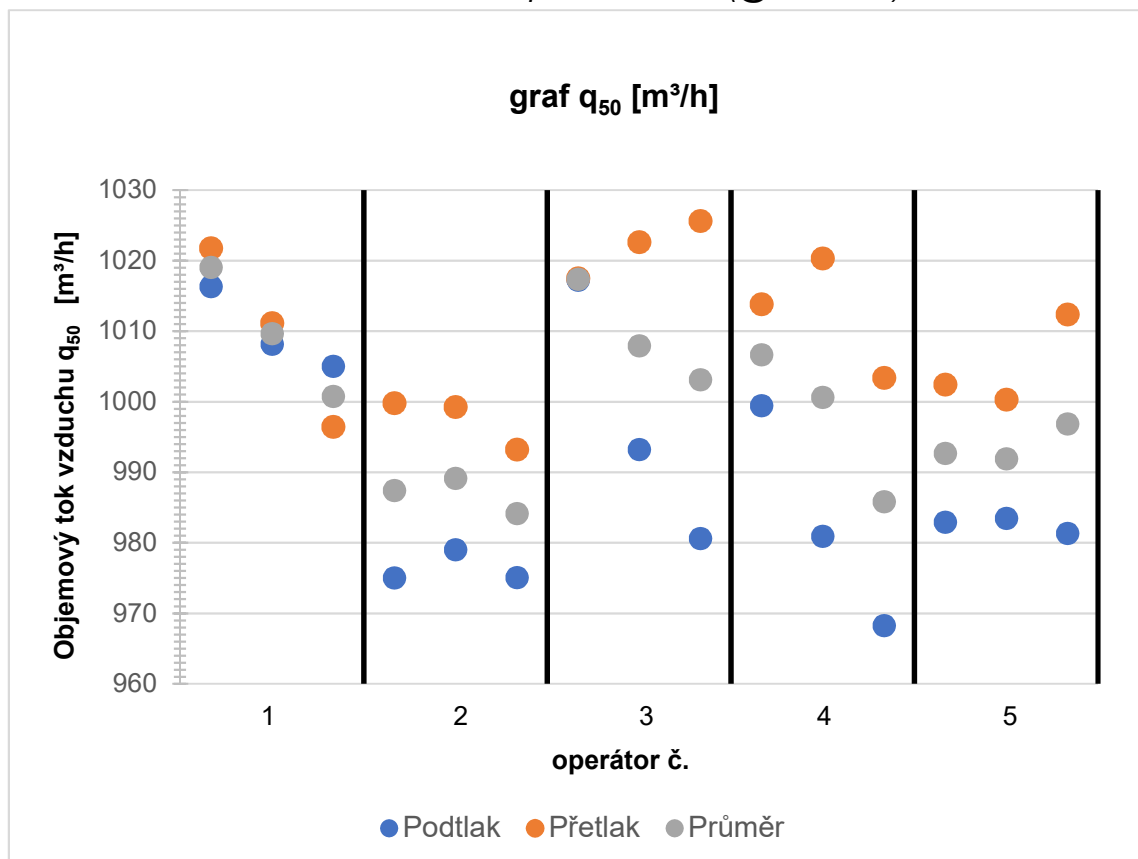
Po celou dobu experimentu klimatické podmínky splňovaly doporučení normy ČSN EN 13829 [2], a byly vhodné pro měření vzduchotěsnosti. Podmínky v průběhu všech měření byly podobné, a je tedy možné tato měření porovnávat.

### 3.1.7 Výsledky měření

Každý z pěti operátorů – účastníků experimentu – provedl tři testy na dvou úrovních průtoku vzduchu. Pro zjednodušení jsou dvě měřené úrovně průtoku vzduchu označovány ve zbytku práce jako „@240 m<sup>3</sup>/h“ a „@1000 m<sup>3</sup>/h“, přestože tyto hodnoty se od přesných výsledků měření mírně odchyľují.

Bylo nasbíráno 15 výsledků testu na každé úrovni, celkem tedy 30 výsledků testu. Tato data byla převzata jedním ze dvou způsobů; jako hrubý výstup z měřicího softwaru (soubor formátu .bld) nebo již zpracovaná v přehledné excelové tabulce. V případě výstupů z měřicího softwaru byl k datům poskytnut elektronický protokol, sloužící k jejich automatickému vyhodnocení. Zpracované výsledky testů jsou obsahem elektronické přílohy této práce. Souhrn výsledků všech operátorů je uveden v následujících grafech (Graf 1 a Graf 2). Tabulka se souhrnem všech naměřených hodnot a základním statistickým vyhodnocením je součástí příloh (Příloha 3 a Příloha 5), V přílohách této práce se nacházejí také kvartilové grafy naměřených hodnot. (Příloha 4 a Příloha 6)

Souhrnné tabulky obsahující výsledky měření jednotlivých operátorů, jejich statistické vyhodnocení a vyhodnocení opakovatelnosti měření je obsaženo v přílohách této práce (Příloha 7 až Příloha 16).

Graf 1: Souhrn všech měření na neupravené budově (@240 m<sup>3</sup>/h)Graf 2: Souhrn všech měření na budově upravené clonou (@1000 m<sup>3</sup>/h)

### 3.1.8 Vyhodnocení výsledků měření na neupravené budově

#### 3.1.8.1 Kontrola úplnosti naměřených údajů

Veškerá data od všech operátorů byla kompletní, a obsahovala všechny údaje potřebné k následnému vyhodnocení experimentu.

#### 3.1.8.2 Kontrola přípustných mezí

##### **Tlakový rozdíl při nulovém objemovém průtoku vzduchu $\Delta p_0$**

Kontrola tlakového rozdílu při nulovém objemovém průtoku vzduchu (tzv. „baseline“) probíhá před a po každém testu. Limitní hodnotou tohoto objemového průtoku je  $\Delta p_0 = \pm 5 \text{ Pa}$ . Při překročení této limitní hodnoty je provedený test považován za neplatný.

V žádném z provedených testů nebyla překročena limitní hodnota, a všechny testy lze z hlediska  $\Delta p_0$  považovat za platné. Hodnoty  $\Delta p_0$  naměřené při jednotlivých testech jsou obsahem elektronické přílohy této práce.

##### **Součinitel proudění $C_L$**

Hodnoty součinitele proudění  $C_L$ , byly u všech testů větší než 0.

Při měření na neupravené budově se hodnoty  $C_L$ - pohybovaly od 11,04 do 17,46, s aritmetickým průměrem 14,09. Variační koeficient všech naměřených hodnot byl 11,86%. Hodnoty  $C_L$ + se pohybovaly od 10,44 do 20,28, s aritmetickým průměrem 14,61. Variační koeficient byl 15,12%. Zejména hodnoty naměřené při přetlaku se u některých testů výrazně lišily, byla proto provedena kontrola odlehlých hodnot (viz kapitola 3.1.8.4).

##### **Exponent proudění $n$**

Stejně jako u součinitele proudění  $C_L$  byly některé hodnoty výrazně odlišné (zejména u měření přetlaku operátora č.3), a proto byla provedena kontrola odlehlých hodnot. U všech testů ležely naměřené hodnoty v přípustných mezích (0,5 až 1). Variační koeficient se pohyboval okolo 5%.

#### 3.1.8.3 Kontrola vnitřní konzistentnosti

Běžně se kontrola vnitřní konzistentnosti dat provádí pomocí výpočtu objemového toku vzduchu  $q_{50+/-}$  z uvedených hodnot  $C_{L+/-}$  a  $n_{+/-}$ . Vzhledem k tomu, že zdrojem dat



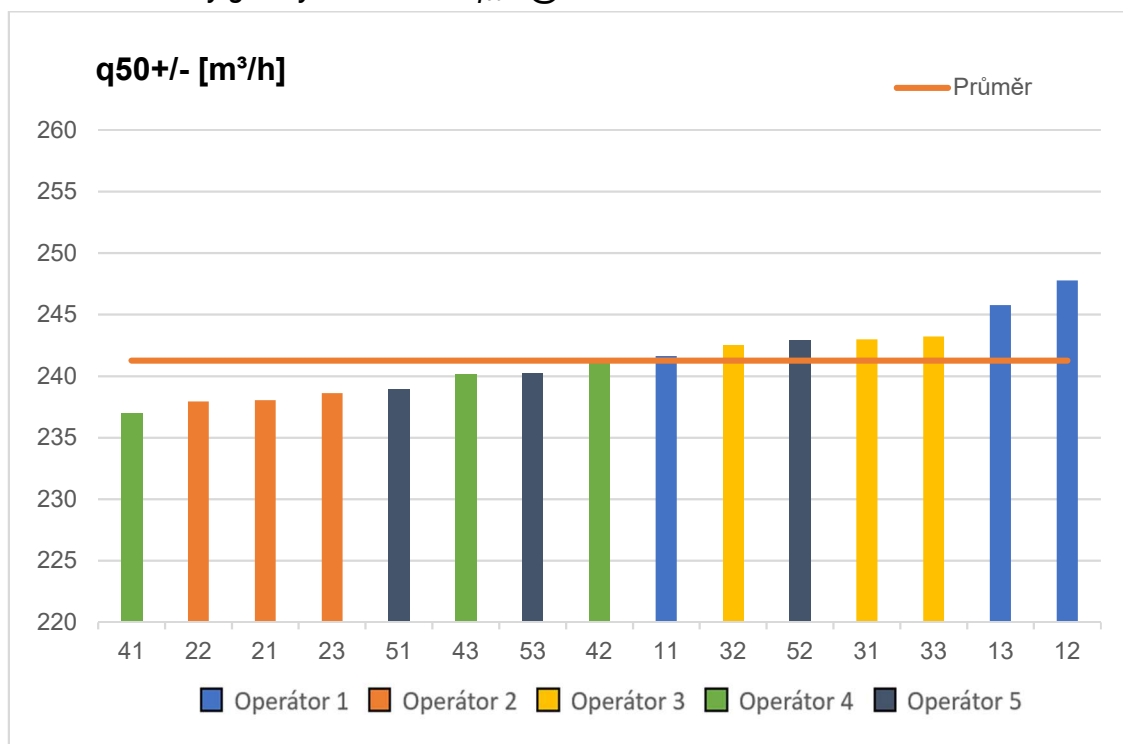
tohoto experimentu byly přímo výstupy z měřicího softwaru, a ne formuláře pro sběr dat, není tato kontrola nutná.

### 3.1.8.4 Kontrola odlehlých hodnot

#### Objemový tok vzduchu $q_{50+/-}$

Při kontrole odlehlých hodnot byly nejprve kontrolovány hodnoty  $q_{50+/-}$ , které jsou výsledkem každého testu. Souhrn těchto hodnot je zobrazen v grafu (Graf 3), Hodnoty v grafu jsou seřazeny od nejmenší po největší, a doplněny o vyznačení průměru. Popisky jednotlivých sloupců grafu jsou ve formátu „xy“, kde „x“ značí číslo operátora a „y“ číslo měření, a jednotliví operátoři jsou v grafu rovněž rozlišeni barevně. Z grafu nejsou patrné výraznější odchylky jednotlivých testů, a nelze tak bez statistického vyhodnocení odlehlých hodnot některé předem označit za podezřelé. Přesto byl proveden Grubbsův test na odlehlé hodnoty [9], který potvrdil prvotní domněnku, že se ve výsledcích testů žádné odlehlé ani vybočující hodnoty nevyskytují.

Graf 3: Souhrnný graf výsledků testů  $q_{50+/-}$  @240 m<sup>3</sup>/h



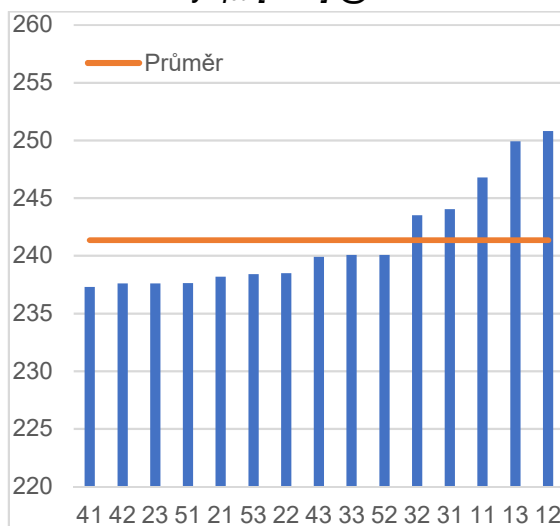
Kromě celkových výsledků testů byly kontrole odlehlých hodnot podrobeny navíc některé dílčí výsledky, které byly označeny jako podezřelé při kontrole přípustných mezí v podkapitole 3.1.8.2.

### Objemový tok vzduchu $q_{50-}$ a $q_{50+}$

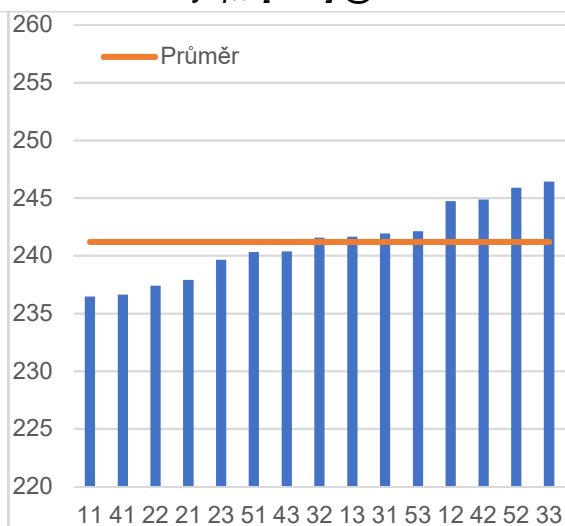
V případě objemového toku vzduchu při podtlaku v budově ( $q_{50-}$ ), neodhalil Grubbsův test žádné odlehlé ani vybočující hodnoty. Z grafu (Graf 4) je jasně patrné, že výsledky všech měření při podtlaku provedených operátorem č.1 byly vyšší než u všech ostatních operátorů. To mohlo být způsobeno více faktory; operátor 1 měl ze všech účastníků nejméně zkušenosti s měřením vzduchotěsnosti, a zároveň některé vybavení (rám osazovaný do dveřního otvoru) bylo v horším stavu než u ostatních operátorů. Ovlivnění výsledků klimatickými podmínkami lze s velkou pravděpodobností vyloučit, jelikož v průběhu měření operátora 1 byly klimatické podmínky příznivé, a nijak výrazně se nelišily od podmínek při ostatních měřeních. Konkrétní příčinu odchylky naměřených hodnot ani skutečný vliv uvedených faktorů však nelze přesně určit. Rozložení hodnot objemového toku vzduchu při přetlaku (Graf 5) je konzistentní, a nevykazuje žádné nesrovnalosti.

Na výsledcích zobrazených v následujících grafech je dobře patrné, jak důležité je pro měření vzduchotěsnosti opakovat testy při podtlaku i přetlaku. Pokud by došlo k měření pouze při podtlaku v budově, kde jsou výsledky operátora 1 vyšší než u ostatních operátorů, byl by výrazně zkreslen celkový výsledek měření.

Graf 4: Hodnoty  $q_{50-}$  [ $m^3/h$ ] @240  $m^3/h$



Graf 5: Hodnoty  $q_{50+}$  [ $m^3/h$ ] @240  $m^3/h$



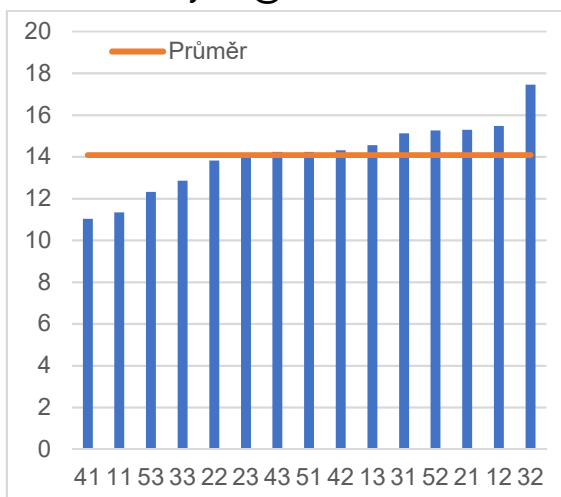
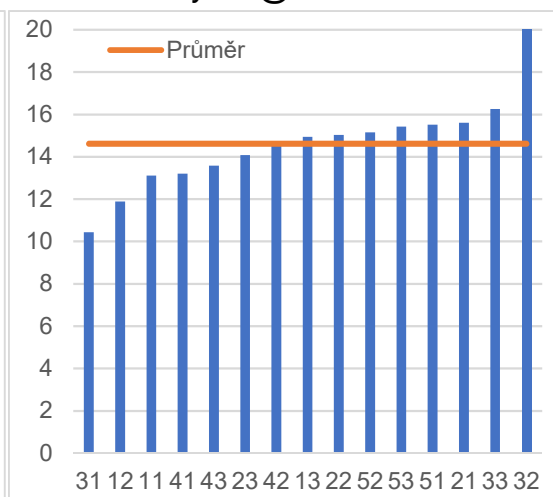
### Součinitel proudění $C_{L+/-}$

Rozložení hodnot  $C_{L-}$  (Graf 6) je konzistentní, a nevykazuje žádné nesrovnalosti.

U hodnot  $C_{L+}$  (Graf 7) je rozpětí větší než u  $C_{L-}$ , a zajímavé je také, že jak maximum, tak minimum pochází z po sobě jdoucích testů jednoho operátora (tedy provedených

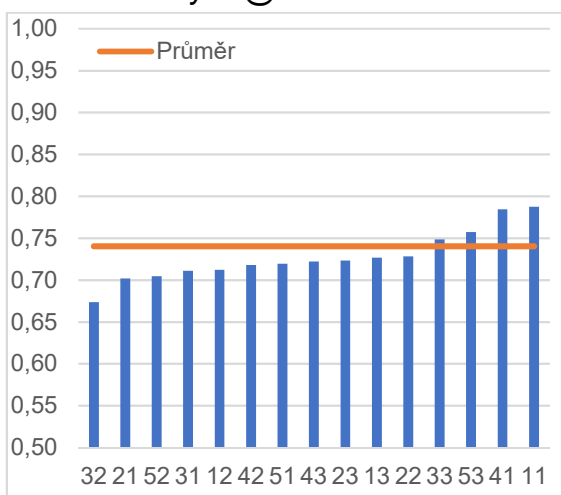
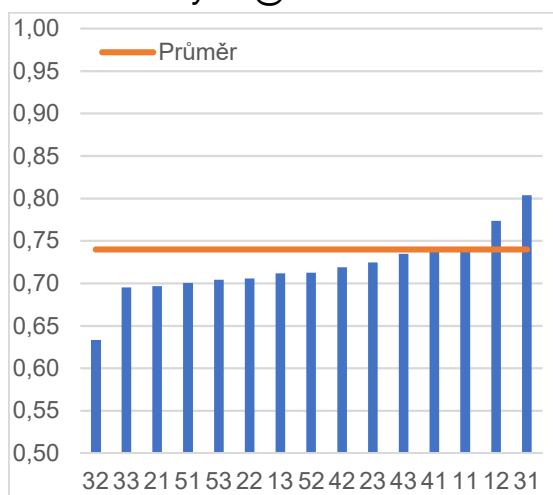
za podmínek opakovatelnosti). Přesto mají tyto dva konkrétní testy téměř shodný celkový výsledek  $q_{50+}$ : 241,94 m<sup>3</sup>/h u testu 31 a 241,57 m<sup>3</sup>/h u testu 32. Rozpětí hodnot  $C_{L+}$  se tak do celkového výsledku nepromítá, neboť je kompenzováno výsledky  $n_{+}$ , u kterých jsou výsledky testů 31 a 32 rovněž extrémními hodnotami.

Grubbsův test neodhalil žádné odlehlé ani vybočující hodnoty, a všechny výsledky tak lze považovat za platné.

Graf 6: Hodnoty  $C_{L-}$  @240 m<sup>3</sup>/hGraf 7: Hodnoty  $C_{L+}$  @240 m<sup>3</sup>/h

### Exponent proudění $n_{+/-}$

Hodnoty exponentu proudění  $n_{+/-}$  (Graf 8 a Graf 9) kopírují trend pozorovaný a komentovaný u hodnot součinitele proudění  $C_L$ . Ani v tomto případě nebyly pomocí Grubbsova testu odhaleny odlehlé nebo vybočující hodnoty.

Graf 8: Hodnoty  $n_{-}$  @240 m<sup>3</sup>/hGraf 9: Hodnoty  $n_{+}$  @240 m<sup>3</sup>/h

### 3.1.8.5 Vyhodnocení výsledků

Celkem bylo provedeno 15 měření, která byla po rozboru v kapitolách 3.1.8.1 až 3.1.8.4 označena jako platná, žádné z provedených měření tedy nebylo vyloučeno z dalšího statistického vyhodnocení, nebyla odhalena žádná hrubá chyba při měření. Určení opakovatelnosti měření každého operátora a reprodukovatelnosti měření je provedeno v samostatné kapitole 4.

Základní statistické údaje se nachází v tabulce níže (Tabulka 2), podrobné výsledky v příloze (Příloha 3), grafický souhrn všech měření v podobě kvartilového grafu rovněž v příloze (Příloha 4) a protokoly z jednotlivých měření jsou součástí elektronické přílohy této práce.

Tabulka 2:  $q_{50\pm}$ ; základní statistické údaje @240 m<sup>3</sup>/h

		<b>q<sub>50±</sub></b> [m <sup>3</sup> /h]
minimum	X <sub>min</sub>	236,96
aritmetický průměr	$\bar{x}$	241,27
maximum	X <sub>max</sub>	247,77
rozptyl	$\sigma^2$	8,58
směrodatná odchylka	$\sigma$	3,03
variační koeficient	V <sub>x</sub>	1,26%

### Rozpětí výsledků jednotlivých operátorů

Rozpětí výsledků a jejich poloha vůči aritmetickému průměru jsou důležitými prvky při určování reprodukovatelnosti měření. Proto zavádíme veličiny *variační rozpětí*  $R_{xn}$ , a *strannost operátora*  $B$ . Tyto veličiny jsou uvedeny v tabulce (Tabulka 3).

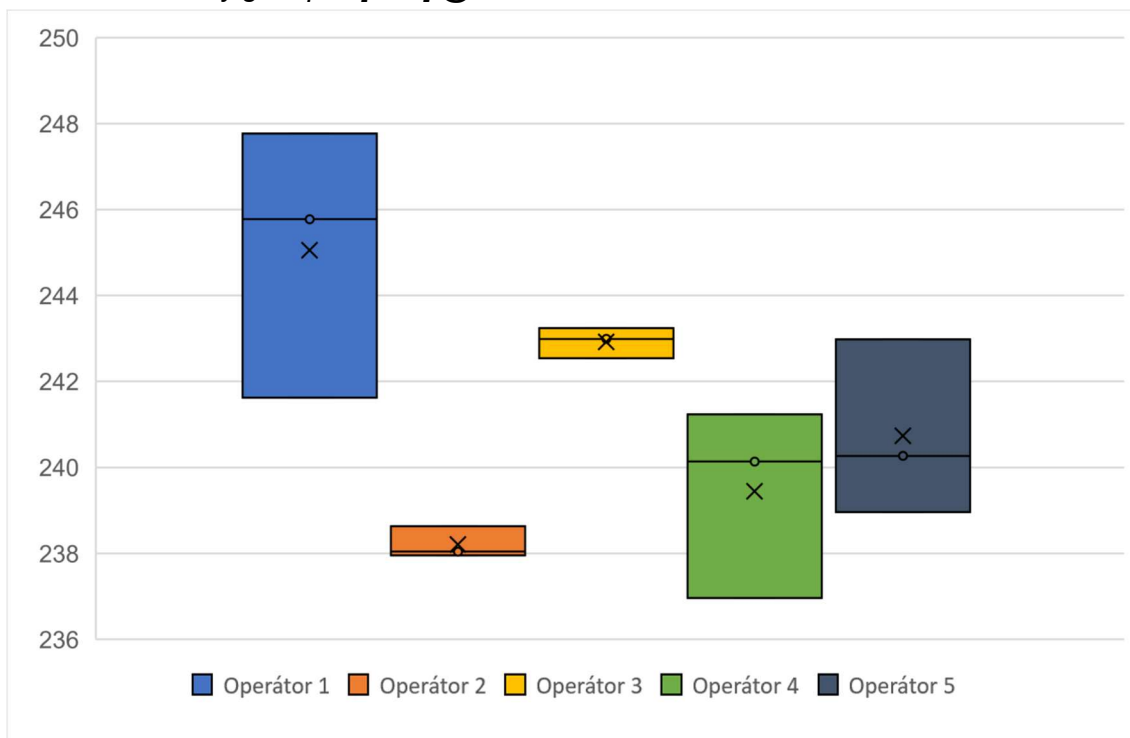
Tabulka 3: Variační rozpětí a strannost operátorů @240 m<sup>3</sup>/h

operátor	n	1	2	3	4	5
aritmetický průměr	$\bar{x}_n$	245,06	238,21	242,92	239,44	240,73
variační rozpětí	R <sub>1n</sub>	6,14	0,68	0,70	4,27	4,02
strannost operátora	B <sub>n</sub>	3,78	-3,07	1,65	-1,83	-0,54

Grafické zobrazení výsledků měření v podobě grafu (Graf 10) ukazuje význam výše uvedených veličin. Přestože je variační rozpětí operátorů 2 a 3 téměř shodné a velmi nízké, každý z těchto operátorů naměřil rozdílné hodnoty. To lze přičítat faktorům, které běžně ovlivňují každé měření. Oba operátoři měli srovnatelné klimatické podmínky, a vzhledem k velmi nízkému variačnímu rozpětí lze předpokládat, že vliv klimatických podmínek na výsledek měření byl minimální. Z toho vyplývá, že měření jsou zatížena velmi malou náhodou chybou, která není větší než uvedené variační rozpětí. Další možnou chybou je chyba soustavná, která zahrnuje vliv operátora a měřícího zařízení. V případě operátorů 2 a 3 byl použit shodný typ měřícího zařízení, které bylo navíc kalibrováno ve stejné laboratoři. Ani u zbytku vybavení, mimo měřící zařízení, nebyly zaznamenány výrazné rozdíly; bylo v bezvadném stavu. Největší dopad na výsledky měření měl tedy v tomto případě vliv operátora, který zahrnuje například umístění tlakových čidel, individuální nastavení softwaru, ale i zkušenost operátora (počet měření provedených za rok, automatizace úkonů apod.).

Na rozdíl od předchozího příkladu, kdy se aritmetické průměry měření výrazně lišily, jsou průměry měření operátorů 4 a 5 výrazně bližší; medián těchto měření je dokonce téměř shodný. Měření těchto operátorů jsou však zatížena větší náhodnou chybou ( $R_{14} = 4,27 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $R_{15} = 4,02 \text{ m}^3/\text{h}$ ), přestože klimatické podmínky při měření obou operátory nebyly výrazně rozdílné. Nelze tak s určitostí označit původ chyby měření.

Operátor 1 má ze všech největší variační rozpětí ( $R_{11} = 6,14 \text{ m}^3/\text{h}$ ) a rovněž nejvyšší aritmetický průměr měření ( $\bar{x}_1 = 245,06 \text{ m}^3/\text{h}$ ). To lze přičítat problémům při měření podtlaku, které byly popsány v podkapitole 3.1.8.4. Původ vzniklé chyby lze hledat jak v nezkušenosti operátora, tak v horším stavu sady Blower Door.

Graf 10: Souhrnný graf  $q_{50\pm}$  [ $m^3/h$ ] @240  $m^3/h$ 

### 3.1.9 Vyhodnocení výsledků měření na budově upravené clonou

#### 3.1.9.1 Kontrola úplnosti naměřených údajů

Veškerá data od všech operátorů byla kompletní, a obsahovala všechny údaje potřebné k následnému vyhodnocení experimentu.

#### 3.1.9.2 Kontrola přípustných mezí

##### Tlakový rozdíl při nulovém objemovém průtoku vzduchu $\Delta p_0$

V žádném z provedených testů nebyla překročena limitní hodnota, a všechny testy lze z hlediska  $\Delta p_0$  považovat za platné. Hodnoty  $\Delta p_0$  naměřené při jednotlivých testech jsou obsahem elektronické přílohy této práce.

##### Součinitel proudění $C_L$

Při měření na budově upravené clonou se hodnoty  $C_L$ - pohybovaly od 94,69 do 128,34, s aritmetickým průměrem 115,28. Variační koeficient všech naměřených hodnot byl 6,68%. Hodnoty  $C_L$ + se pohybovaly od 104,83 do 145,73, s aritmetickým průměrem 120,50. Variační koeficient byl 7,80%. Přesto, že byl variační koeficient poloviční proti měření na neupravené budově, byly zjištěny výrazné rozdíly u měření operátora 3, konkrétně měření č.4 a 5. Tyto hodnoty byly podrobeny kontrole odlehlých hodnot (viz kapitola 3.1.9.3).

## Exponent proudění $n$

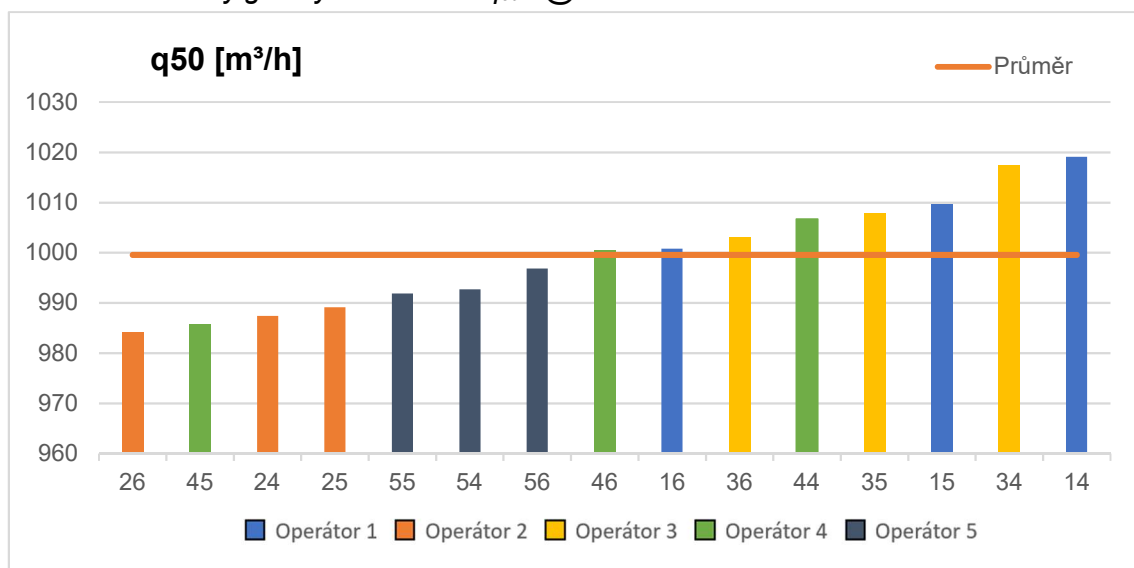
Mezi hodnotami exponentu proudění  $n$  se u žádného z testů nevyskytovaly výrazně odlišné hodnoty. U všech testů ležely naměřené hodnoty v přípustných mezích (0,5 až 1). Variační koeficient byl nižší než 4%.

### 3.1.9.3 Kontrola odlehlých hodnot

#### Objemový tok vzduchu $q_{50+/-}$

Při kontrole odlehlých hodnot byly nejprve kontrolovány hodnoty  $q_{50+/-}$  (Graf 11), které jsou výsledkem každého testu. Hodnoty mezi minimem a maximem mají téměř lineární průběh, a krajní hodnoty tak nelze na základě grafu označit jako podezřelé (odlehlé nebo vybočující). Byl proveden Grubbsův test na odlehlé hodnoty, který potvrdil, že se ve výsledcích měření nevyskytují žádné odlehlé ani vybočující hodnoty.

Graf 11: Souhrnný graf výsledků testů  $q_{50+/-}$  @1000  $m^3/h$

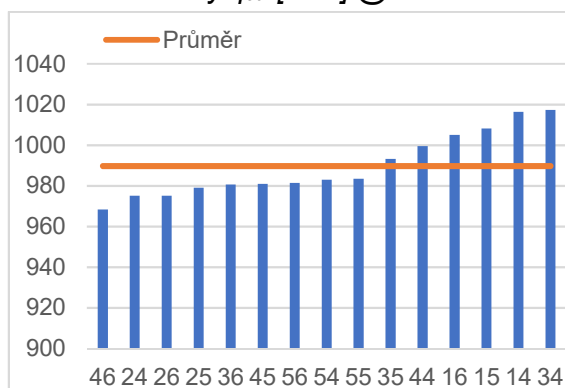
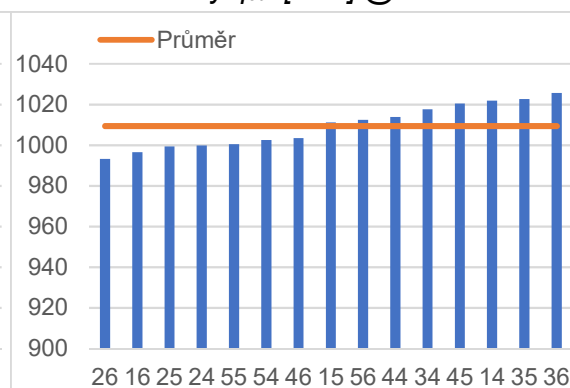


Kromě celkových výsledků testů byly kontrole odlehlých hodnot podrobeny navíc některé dílčí výsledky, které byly označeny jako podezřelé při kontrole přípustných mezí v podkapitole 3.1.9.2.

#### Objemový tok vzduchu $q_{50-}$ a $q_{50+}$

Stejně jako v případě měření na neupravené budově Grubbsův test neodhalil žádné odlehlé ani vybočující hodnoty. V grafu (Graf 12) můžeme pozorovat, že hodnoty průtoku vzduchu při podtlaku operátora 1 byly opět jedny z nejvyšších naměřených. Faktory, které mohly způsobit takové chování, jsou popsány v kapitole 3.1.8.4.

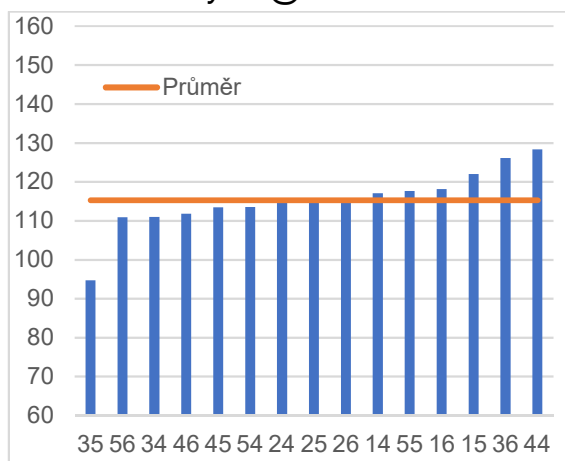
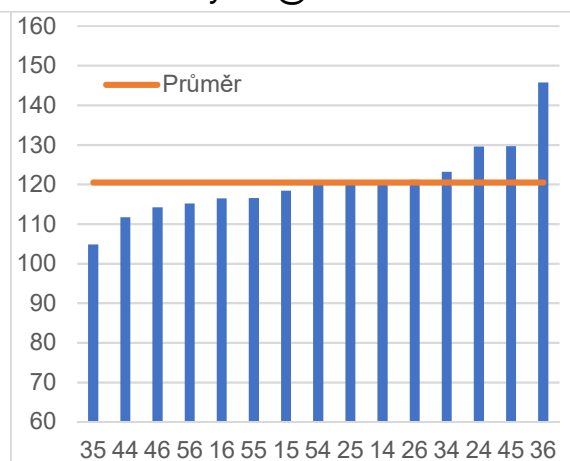
Na rozdíl od měření na neupravené budově byl zaznamenán výraznější rozdíl průměru všech měření mezi  $q_{50-}$  a  $q_{50+}$ , konkrétně průměr hodnot  $q_{50+}$  byl o cca 10  $m^3/h$  vyšší. Vzhledem k tomu, že vyšší hodnoty při měření přetlaku zaznamenali všichni operátoři v téměř všech měřeních, lze předpokládat, že se nejedná o chybu, ale o vlastnost budovy upravené clonou.

Graf 12: Hodnoty  $q_{50-}$  [ $m^3/h$ ] @1000  $m^3/h$ Graf 13: Hodnoty  $q_{50+}$  [ $m^3/h$ ] @1000  $m^3/h$ 

Stejně jako v případě předchozího měření se ukazuje důležitost opakování testů při podtlaku a přetlaku. Pokud by měření probíhalo pouze při podtlaku nebo pouze při přetlaku, došlo by v tomto konkrétním případě k výraznému zkreslení výsledků u všech operátorů.

### Součinitel proudění $C_{L+/-}$

U hodnot  $C_L$  (Graf 14) ani  $C_{L+}$  (Graf 15) Grubbsův test neodhalil žádné odlehle ani vybočující hodnoty. Zarážející je rozpětí výsledků operátora 3, jehož naměřené hodnoty nejsou konzistentní, stejně jako v případě měření na neupravené budově. Pravděpodobně se jedná o blíže neurčenou chybu při měření tohoto operátora.

Graf 14: Hodnoty  $C_L$  @1000  $m^3/h$ Graf 15: Hodnoty  $C_{L+}$  @1000  $m^3/h$ 



**Exponent proudění  $n_{+/-}$** 

Mezi hodnotami exponentu proudění  $n$  se u žádného z testů nevyskytovaly výrazně odlišné hodnoty, výsledky všech operátorů byly konzistentní, a proto nebyl důvod ke kontrole odlehlých hodnot.

Naměřené hodnoty  $n_{+}$ : 0,52 až 0,60

Naměřené hodnoty  $n_{-}$ : 0,50 až 0,58

**3.1.9.4 Vyhodnocení výsledků**

Celkem bylo provedeno 15 měření, která byla po rozboru v kapitolách 3.1.9.1 až 3.1.9.3 označena jako platná, žádné z provedených měření tedy nebylo vyloučeno z dalšího statistického vyhodnocení, nebyla odhalena žádná hrubá chyba při měření. Určení opakovatelnosti měření každého operátora a reprodukovatelnosti měření je provedeno v samostatné kapitole 4.

Základní statistické údaje se nachází v tabulce níže (Tabulka 4), podrobné výsledky v příloze (Příloha 5), grafický souhrn všech měření v podobě kvartilového grafu rovněž v příloze (Příloha 6) a protokoly z jednotlivých měření jsou součástí elektronické přílohy této práce.

Variační koeficient výsledků se proti měření na úrovni objemového průtoku vzduchu 240 m<sup>3</sup>/h snížil z 1,26 na 1,11%, tedy o 0,15%.

*Tabulka 4:  $q_{50+/-}$ ; základní statistické údaje @1000 m<sup>3</sup>/h*

		<b><math>q_{50+/-}</math></b> [m <sup>3</sup> /h]
minimum	$X_{\min}$	984,18
aritmetický průměr	$\bar{x}$	999,58
maximum	$X_{\max}$	1019,07
rozptyl	$\sigma^2$	115,30
směrodatná odchylka	$\sigma$	11,11
variační koeficient	$V_x$	1,11%

## Rozpětí výsledků jednotlivých operátorů

Variační rozpětí a strannost operátorů je uvedena v tabulce (Tabulka 5).

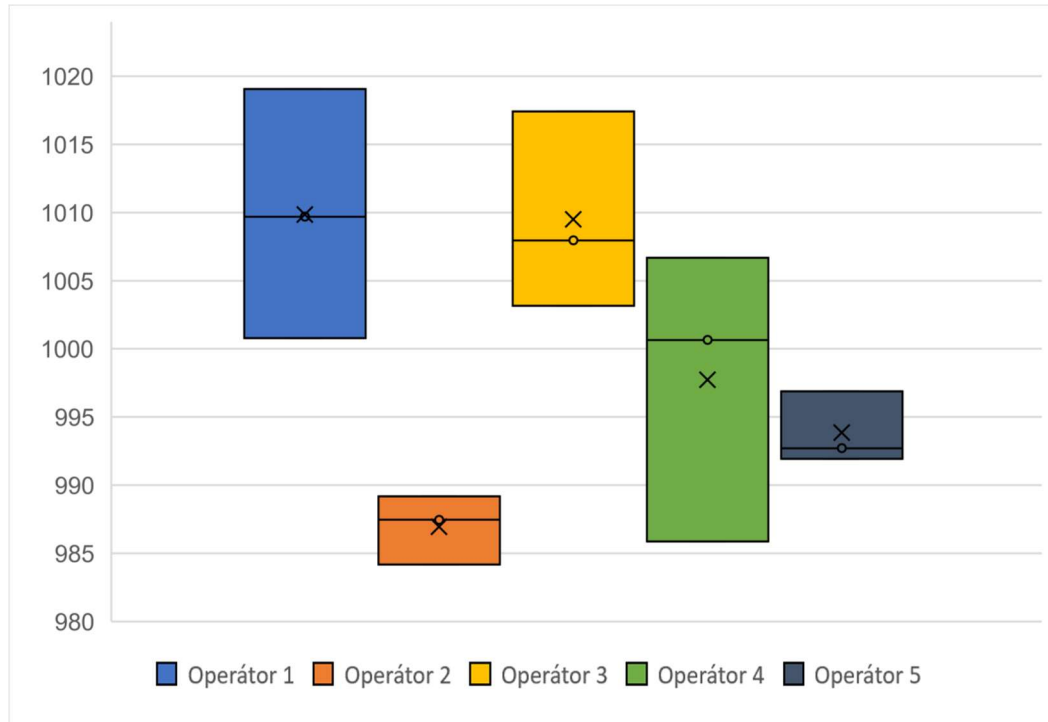
Tabulka 5: Variační rozpětí a strannost operátorů @1000 m<sup>3</sup>/h

operátor	n	1	2	3	4	5
aritmetický průměr	$\bar{x}_o$	1009,85	986,94	1009,51	997,73	993,85
variační rozpětí	$R_{1n}$	18,29	5,01	14,25	20,81	4,97
strannost operátora	$B_n$	10,27	-12,63	9,94	-1,84	-5,73

Pro rozbor výsledků je nejvhodnější grafické zobrazení (Graf 16), na kterém je patrné, že při měření na neupravené budově dosáhli operátoři 1 a 3 velmi podobných výsledků jak z hlediska průměru, tak variačního rozpětí i strannosti. Aritmetický průměr měření operátora 1 byl opět nejvyšší (stejně jako @240 m<sup>3</sup>/h), a potvrdily se tak domněnky popsané v podkapitolách 3.1.8.4 a 3.1.8.5. Přesný původ chyby vnesené do měření není možné s jistotou určit, lze jí však přičítat nezkušenosti operátora s měřením in-situ.

Největší rozpětí výsledků zaznamenal operátor 4, jehož průměr měření se však nejvíce přiblížil celkovému aritmetickému průměru všech měření.

Operátoři 2 a 5 dosáhli nejnižšího variačního rozpětí ( $R_{1n} \approx 5$  m<sup>3</sup>/h), na rozdíl od ostatních operátorů obsahovali jejich výsledky velmi malou náhodnou chybu. Stejně jako při vyhodnocení výsledků na úrovni 240 m<sup>3</sup>/h (podkapitola 3.1.8.5), byly průměrné výsledky operátora 2 opět nejnižší ze všech, což naznačuje, že se může jednat o soustavnou chybu operátora nebo měřicího zařízení. Pro potvrzení této domněnky však nebyl proveden dostatečný počet měření. Klimatické podmínky při všech měřeních byly velmi podobné, a jejich vliv se dá v tomto případě zanedbat.

Graf 16: Souhrnný graf  $q_{50+/-}$  [ $m^3/h$ ] @1000  $m^3/h$ 

### 3.1.10 Závěry

Po celou dobu experimentu panovaly klimatické podmínky příznivé pro měření vzduchotěsnosti, jejich rozdíly mezi testy jednotlivých operátorů byly poměrně malé, a výsledky všech testů je tedy možné vzájemně porovnávat.

U všech měření provedených v rámci experimentu byla provedena kontrola úplnosti naměřených údajů, kontrola přípustných mezí a kontrola odlehých hodnot. Tyto kontroly neodhalily u měření žádné nesrovnalosti, a mohlo tak dojít ke statistickému vyhodnocení datového souboru. V podkapitolách 3.1.8.5 a 3.1.9.4 bylo provedeno základní statistické vyhodnocení nasbíraných dat, a rozbor výsledků měření jednotlivých operátorů.

Vyhodnocení opakovatelnosti měření každého operátora a reprodukovatelnosti měření je provedeno v samostatné kapitole 4, která obsahuje i shrnutí výsledků a porovnání s experimentem provedeným v laboratorních podmínkách.

## 3.2 Experiment 2 – Laboratoř UCEEB

### 3.2.1 Cíle experimentu

Experiment prováděný v laboratoři má obdobné cíle, jako experiment provedený in-situ na pasivním domě v Koberovech. Jedná se tedy zejména o vyhodnocení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření vzduchotěsnosti budov, a to na více hladinách objemového průtoku vzduchu.

Stejně jako v případě experimentu provedeného in-situ (3.1.1) musí všechna měření splňovat podmínky opakovatelnosti dle normy ČSN ISO 5725-1 [7]. Rozdílem oproti předchozímu experimentu bude zejména vyloučení vlivu klimatických podmínek na výsledky měření díky umístění experimentálního objektu uvnitř haly.

Během experimentu bude nad rámec běžně měřených hodnot zaznamenávána rychlost průtoku vzduchu ve zkušební komoře. Tento záznam bude předmětem analýzy a poslouží pro objasnění případných nejasností ve výsledcích měření.

### 3.2.2 Základní informace

Příprava experimentu probíhala v září a říjnu 2017 v prostorách Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze (UCEEB) [17], které se nachází v Buštěhradu. Součástí centra ČVUT UCEEB (Obrázek 10) je zkušební hala, která primárně slouží pro provádění laboratorních experimentů, v této hale byl umístěn experimentální objekt, popsáný v kapitole 3.2.3.



Obrázek 10: Budova UCEEB ČVUT [17]

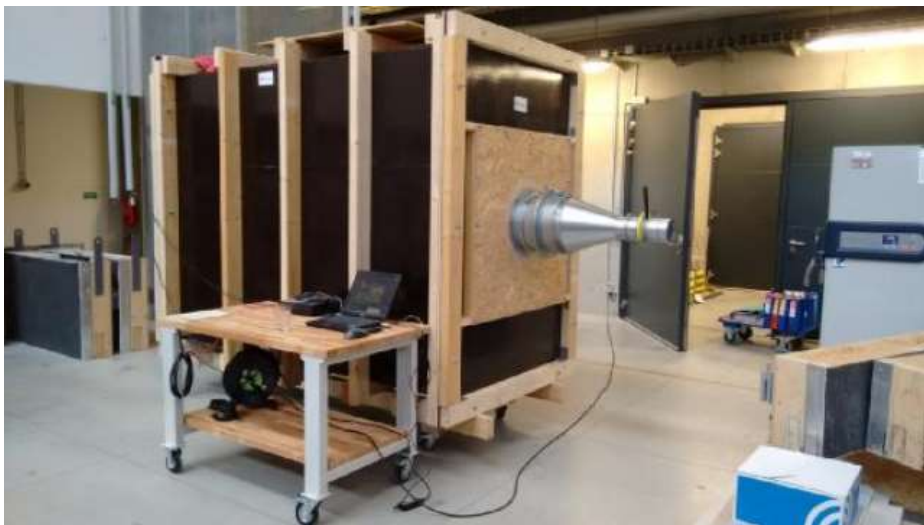
Měření v rámci experimentu probíhalo v několika dnech během října a listopadu 2017. Stejně jako v případě experimentu v Koberovech se měření účastnili členové Asociace Blower Door CZ, bez jejichž přispění by nebylo možné experiment reprodukovatelnosti realizovat.

### 3.2.3 Popis experimentálního objektu

Experimentálním objektem je zkušební komora navržená a realizovaná O. Šafránkem v roce 2015 v rámci diplomové práce *Opakovatelnost měření vzduchotěsnosti budov zařízením Blower Door* [15].

Vnitřní rozměry komory jsou přibližně 1,25 x 1,8 x 2,5 m (šířka x výška x délka), objem vnitřního prostoru je tedy přibližně 5,6 m<sup>3</sup>. Detailní popis návrhu a realizace zkušební komory je obsažen ve výše zmíněné diplomové práci [15].

V původním provedení umožňovala komora regulaci průtoku vzduchu pomocí sestavy prvků vzduchotechnického potrubí z pozinkovaného plechu, která byla přišroubovaná k OSB desce (Obrázek 11). Tento způsob regulace nicméně nebyl vhodný pro naplánovaný experiment z důvodu větších časových rozestupů mezi měřeními jednotlivých operátorů. Tyto časové rozestupy představovaly riziko manipulace s regulačními prvky, což by mělo za následek výrazné zkreslení výsledků měření. Konstrukce zkušební komory naštěstí počítala s možností budoucích úprav, a tak bylo možné odstranit prvky pro regulaci průtoku vzduchu, a navrhnout a instalovat clonu, která umožňovala regulaci průtoku vzduchu na více úrovních, a to bez rizika různého nastavení pro měření jednotlivých operátorů.



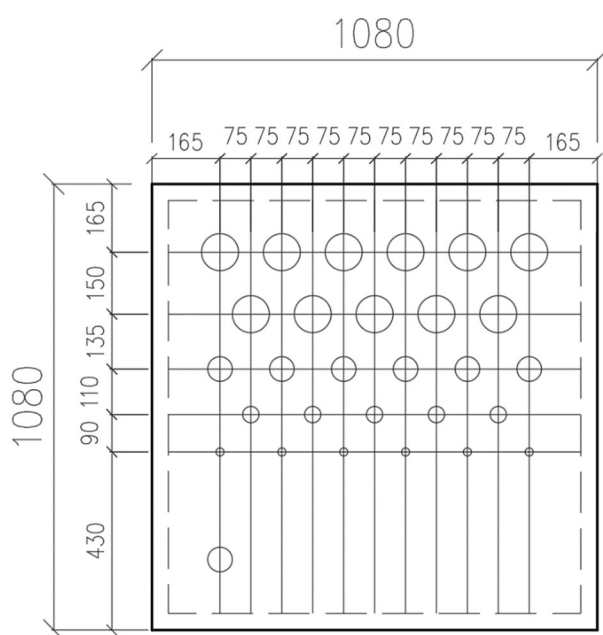
Obrázek 11: Původní stav zkušební komory [15]

### 3.2.4 Příprava měření

Před počátkem měření bylo nutné připravit zkušební komoru. Proběhla demontáž regulačních prvků včetně OSB desky, na kterou byly připevněny, a rovněž difuzoru z geotextilie, který dělil vnitřní prostor komory na dvě části. Následně byla zkušební komora vyčištěna a byla provedena kontrola vzduchotěsní lepící pásky, určené k zajištění vzduchotěsnosti všech spojů deskových dílů konstrukce. Tato vizuální kontrola neodhalila žádné nedostatky. Dále byl upraven difuzor z geotextilie (Příloha 17), a pomocí klínek byl upevněn do zkušební komory. Styk difuzoru se stěnou komory byl utěsněn pomocí lepící pásky.

Následoval návrh a realizace nové clony určené k regulaci průtoku vzduchu komorou. Navržená čtvercová clona (Obrázek 12) byla vyrobena z OSB desky, její rozměry jsou 108 x 108 cm. Do clony bylo dle návrhu vyvrtáno více otvorů o průměru 27 až 95 mm určených pro regulaci průtoku vzduchu. Výpočet plochy otvorů byl proveden pomocí rovnice pro určení průtoku vzduchu při určitém tlakovém rozdílu na cloně [18]. Jeden otvor v levém dolním rohu sloužící jako průchodka pro kabely k čidlům umístěným uvnitř komory byl opatřen vzduchotěsnou izolací.

Navržená clona byla následně připevněna ke konstrukci zkušební komory pomocí vrutů. Styk mezi rámem a OSB deskou byl opatřen gumovým těsněním, které zajišťuje vzduchotěsnost tohoto spoje.

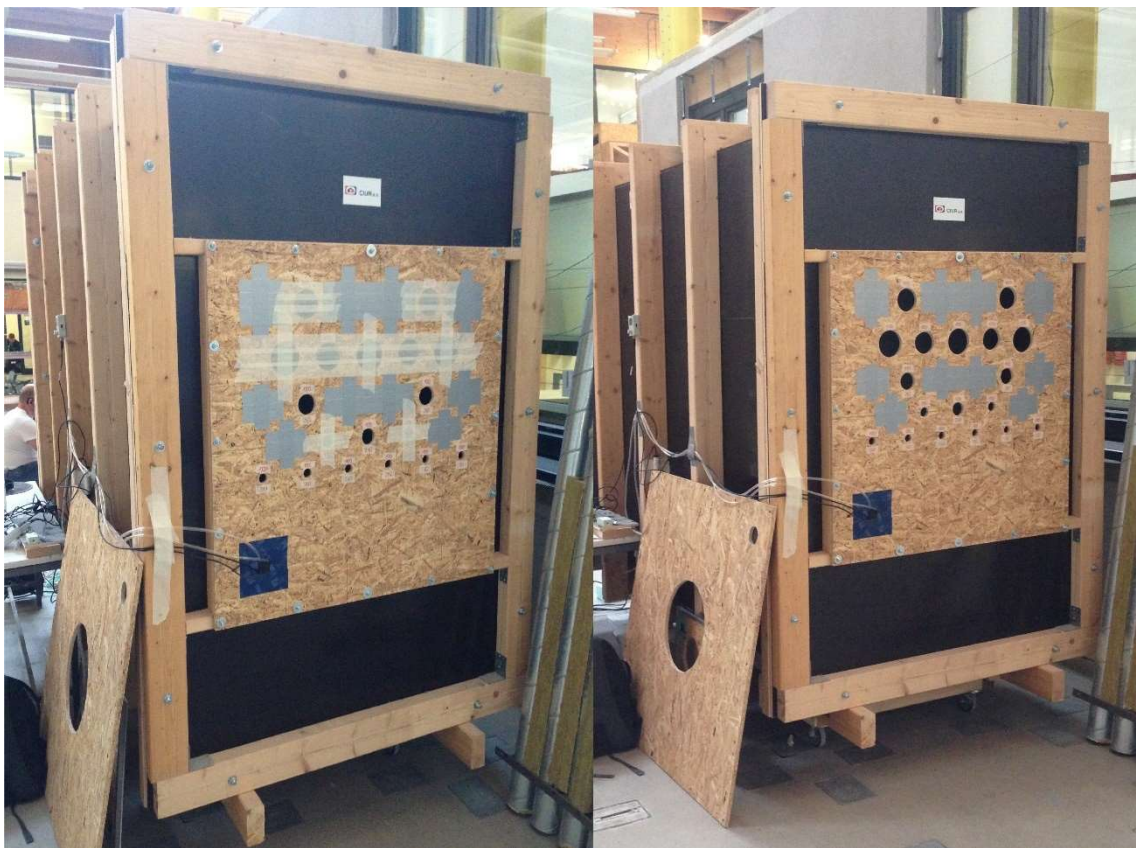


Obrázek 12: Návrh clony pro regulaci průtoku vzduchu



Po úpravě komory proběhlo umístění vnitřních měřidel (teploměru, anemometru a dvou tlakových čidel) na stojan uprostřed komory. Fotografie umístění se nachází v příloze (Příloha 18).

Po osazení čidel bylo možné naladit průtok vzduchu ve zkušební komoře. V průběhu ladění bylo provedeno několik testů s různou konfigurací otevřených a utěsněných otvorů v instalované cloně. Díky těmto testům byly určeny dvě konfigurace (Obrázek 13), které přibližně odpovídají dvěma úrovním průtoku vzduchu z experimentu v Koberovech (@240 m<sup>3</sup>/h a @1000 m<sup>3</sup>/h). Detailní fotografie clony je součástí přílohy (Příloha 19).



Obrázek 13: Konfigurace clony @240 m<sup>3</sup>/h (vlevo) a @1000 m<sup>3</sup>/h (vpravo)

Se zvolenými konfiguracemi clony bylo v rámci přípravy experimentu provedeno několik kompletních měření při podtlaku i přetlaku za účelem potvrzení předběžně určených úrovní průtoku vzduchu. Těmito měřeními bylo potvrzeno, že úrovně průtoku vzduchu se přibližně shodují s úrovněmi z předchozího experimentu (3.1), a rovněž byla ověřena funkčnost instalovaného teploměru, anemometru a dodatečných tlakových čidel. Výsledky těchto měření sloužily pouze pro ověření funkčnosti zkušební komory a nejsou součástí vyhodnocení experimentu.

### 3.2.5 Postup měření

Postup měření je popsán v kapitole 2.1.4.

Všichni operátoři osazovali měřicí zařízení do určeného otvoru ve zkušební komoře. Umístění tlakového čidla snímajícího tlak uvnitř komory se v průběhu experimentu neměnilo, stejné umístění využívali všichni operátoři.

Každý z operátorů postupně provedl tři testy na obou úrovních průtoku vzduchu, tyto testy se skládaly z měření při podtlaku a přetlaku v komoře a celkovým výsledkem měření byl průměr z naměřených hodnot.

### 3.2.6 Klimatické podmínky při měření

Vzhledem k umístění experimentálního objektu uvnitř haly byl vliv vnějších klimatických podmínek eliminován. Přesto byla po dobu experimentu monitorována teplota uvnitř a vně zkušební komory a jejich rozdíl. Další zaznamenávanou veličinou byla rychlost průtoku vzduchu uvnitř komory, kde mohlo dojít k ovlivnění hodnot snímaných vnitřním tlakovým čidlem.

#### 3.2.6.1 Rychlost průtoku vzduchu ve zkušební komoře

Rychlost průtoku vzduchu ve zkušební komoře byla snímána anemometrem v bezprostřední blízkosti vnitřního tlakového čidla (Příloha 18). Mimo dobu měření byly všechny zaznamenané hodnoty podle očekávání nulové. V době měření se zaznamenané hodnoty lišily podle toho, jestli probíhalo měření při podtlaku nebo při přetlaku.

V případě měření při podtlaku ve zkušební komoře byly anemometrem zaznamenány hodnoty nižší než 0,10 m/s na úrovni objemového průtoku vzduchu 240 m<sup>3</sup>/h a na úrovni 1000 m<sup>3</sup>/h maximální hodnoty v průběhu měření nepřekročily 0,30 m/s. Tyto hodnoty jsou na hranici rozlišovací schopnosti použitého anemometru, a lze je považovat za velmi nízké.

Při testování za přetlaku v komoře byly naměřené hodnoty vyšší, což lze vysvětlit přímým nasměrováním ventilátoru na anemometr. Na úrovni 240 m<sup>3</sup>/h nepřekročily maximální zaznamenané hodnoty 0,90 m/s a na úrovni 1000 m<sup>3</sup>/h byla maximální zaznamenaná hodnota rovna 1,23 m/s.



Rychlost průtoku vzduchu uvnitř komory byla v blízkosti tlakových čidel nízká, a její vliv na výsledky měření by měl být zanedbatelný. Pro podpoření tohoto tvrzení by však bylo nutné provést ještě další řadu testů za použití kvalitnějšího anemometru, případně měřit rychlost průtoku vzduchu ve více místech zkušební komory. Podrobnější chování zkušební komory by bylo vhodné podrobit dalšímu zkoumání, jak je navrženo v kapitole 5.3.

#### 3.2.6.2 Vnitřní teplota – $T_i$

Teplota naměřená uvnitř zkušební komory byla v průběhu měření stálá, rozdíly mezi měřeními různých operátorů byly malé. Naměřené hodnoty ležely v intervalu 17,5 °C až 22,5 °C. Průměrná vnitřní teplota se v jednotlivých dnech pohybovala od 17,7 °C do 22,2 °C.

#### 3.2.6.3 Venkovní teplota – $T_e$

Za venkovní teplotu je v rámci tohoto experimentu považována teplota naměřená uvnitř haly (vně zkušební komory). Naměřené hodnoty ležely v intervalu 17,7 °C až 22,9 °C. Průměrná teplota v průběhu měření se pohybovala od 17,9 °C do 22,6 °C, a byla vždy téměř identická jako teplota vnitřní.

#### 3.2.6.4 Rozdíl teplot – $\Delta T$

Jak již bylo naznačeno, průměrný rozdíl teplot byl velmi nízký a pohyboval se od 0,0 °C do 0,8 °C. Rozdíl teplot nemá na výsledky měření velký vliv, a to vzhledem k velké výměně vzduchu uvnitř zkušební komory.

#### 3.2.6.5 Vyhodnocení

Vliv klimatických podmínek na výsledky experimentu byl vzhledem k umístění experimentálního objektu uvnitř haly vyloučen. Teplota v průběhu konkrétních testů byla určena momentální teplotou v experimentální hale.

Součástí každého měření je určení síly větru na Beaufortově stupnici operátorem. Síla větru během všech testů byla vzhledem k okolnostem měření určena na 0° Beaufortovy stupnice.

Podmínky splňovaly doporučení normy ČSN EN 13829 [2], byly vhodné pro měření vzduchotěsnosti, a je tedy možné tato měření porovnávat.

### 3.2.7 Výsledky měření

Tohoto experimentu se zúčastnili celkem 4 operátoři, každý z nich provedl tři testy na dvou úrovních objemového průtoku vzduchu.

Bylo nasbíráno 12 výsledků testu na každé úrovni, celkem tedy 24 výsledků testu. Tato data byla převzata jedním ze dvou způsobů; jako hrubý výstup z měřicího softwaru (soubor ve formátu .bld) nebo již zpracovaná v přehledné excelové tabulce. V případě výstupů z měřicího softwaru byl k datům poskytnut protokol, sloužící k jejich vyhodnocení. Zpracované výsledky testů jsou obsahem elektronické přílohy této práce. Souhrn výsledků všech operátorů je uveden v následujících grafech (Graf 17 a Graf 18).

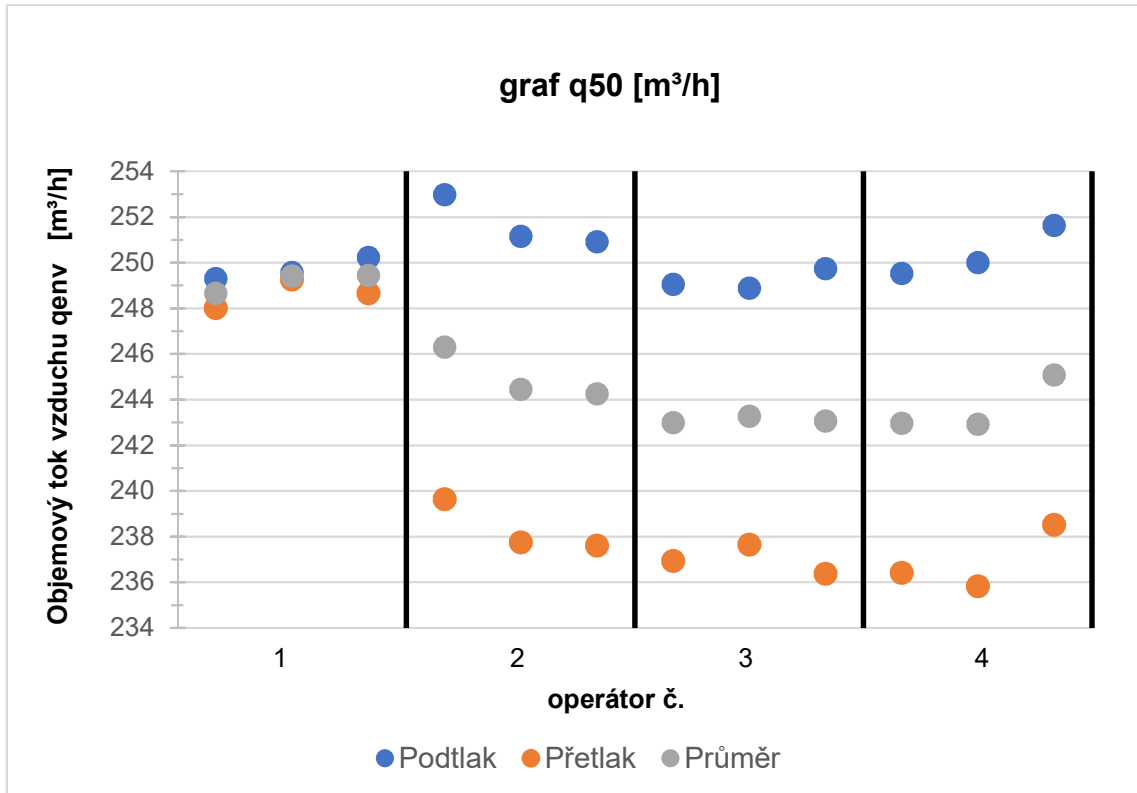
Hned při prvotní kontrole grafů je zřejmé že měření č.6 operátora 4 je výrazně vybočující, k takto výrazné odchylce od ostatních výsledků mohlo dojít jedině hrubou chybou při provádění měření. Tento výsledek tak byl označen jako chybný a byl vyloučen ze všech dalších statistických analýz. Další podezřelé výsledky se objevují u operátora č.1, konkrétně se jedná o všechny výsledky měření přetlaku na úrovni 240 m<sup>3</sup>/h a celkové výsledky měření na úrovni 1000 m<sup>3</sup>/h jsou zjevně vyšší než u ostatních operátorů. Tyto testy budou podrobeny kontrolám v rámci vyhodnocení výsledků.

Navíc je z grafů patrné, že hodnoty naměřené při přetlaku jsou u všech operátorů nižší než hodnoty naměřené při podtlaku. Tato skutečnost bude podrobena analýze v dalších kapitolách.

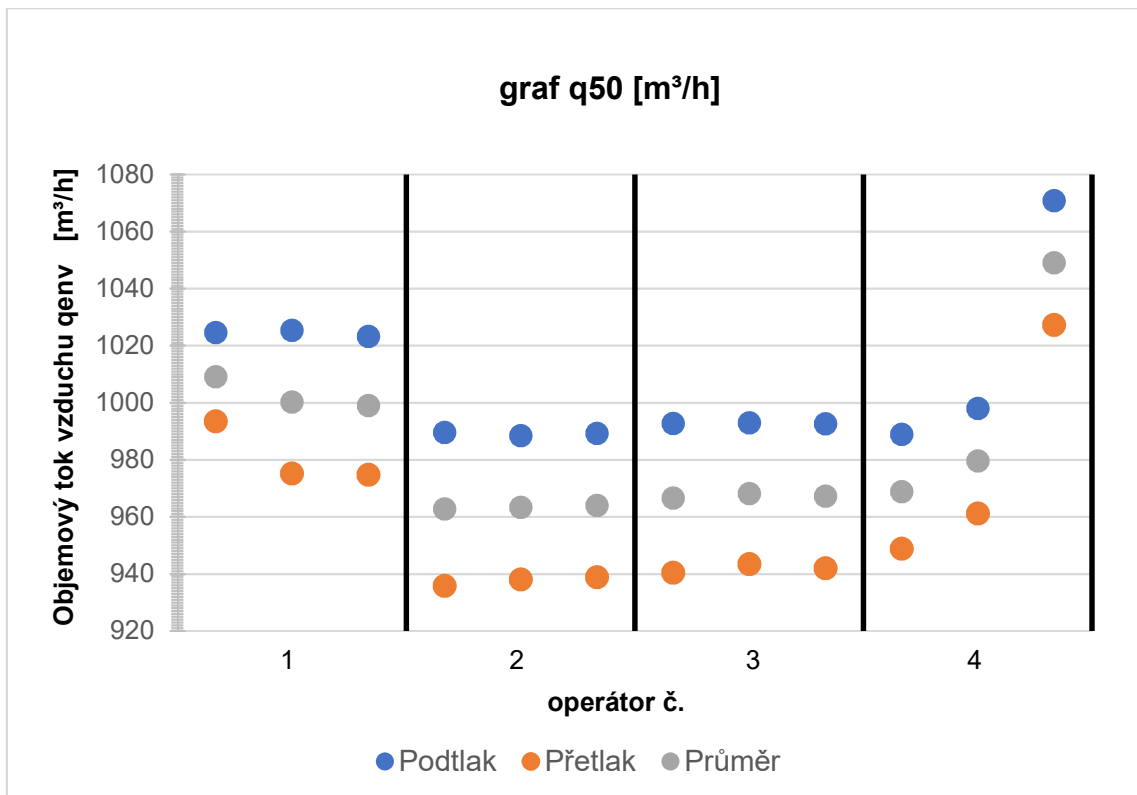
Tabulka se souhrnem všech naměřených hodnot (mimo vyřazené) a základním statistickým vyhodnocením je součástí příloh (Příloha 20 a Příloha 22), V přílohách této práce se nacházejí rovněž kvartilové grafy naměřených hodnot. (Příloha 21 a Příloha 23)

Souhrnné tabulky obsahující výsledky měření jednotlivých operátorů, jejich statistické vyhodnocení a vyhodnocení opakovatelnosti měření se rovněž nachází v přílohách (Příloha 24 až Příloha 31).

Graf 17: Souhrn všech měření v laboratoři na úrovni 240 m<sup>3</sup>/h



Graf 18: Souhrn všech měření v laboratoři na úrovni 1000 m<sup>3</sup>/h



## 3.2.8 Vyhodnocení výsledků měření na úrovni 240 m<sup>3</sup>/h

### 3.2.8.1 Kontrola úplnosti naměřených údajů

Veškerá data od všech operátorů byla kompletní, a obsahovala všechny údaje potřebné k následnému vyhodnocení experimentu.

### 3.2.8.2 Kontrola přípustných mezí

#### **Tlakový rozdíl při nulovém objemovém průtoku vzduchu $\Delta p_0$**

V žádném z provedených testů nebyla překročena limitní hodnota, a všechny testy lze z hlediska  $\Delta p_0$  považovat za platné. Hodnoty  $\Delta p_0$  naměřené při jednotlivých testech jsou obsahem elektronické přílohy této práce. Maximální naměřená hodnota  $\Delta p_0$  byla 0,1 Pa.

#### **Součinitel proudění $C_L$**

Hodnoty součinitele proudění  $C_L$ , byly u všech testů větší než 0.

Při měření na neupravené budově se hodnoty  $C_L$ - pohybovaly od 28,72 do 31,88, s aritmetickým průměrem 30,70. Variační koeficient všech naměřených hodnot byl 3,72%. Hodnoty  $C_L$ + se pohybovaly od 27,71 do 31,22, s aritmetickým průměrem 29,28. Variační koeficient byl 3,71%.

#### **Exponent proudění $n$**

Mezi hodnotami exponentu proudění  $n$  se u žádného z testů nevyskytovaly výrazně odlišné hodnoty. U všech testů ležely naměřené hodnoty v přípustných mezích (0,5 až 1). Naměřené hodnoty se pohybovaly od 0,53 do 0,56. Variační koeficient byl nižší než 3%.

### 3.2.8.3 Kontrola vnitřní konzistentnosti

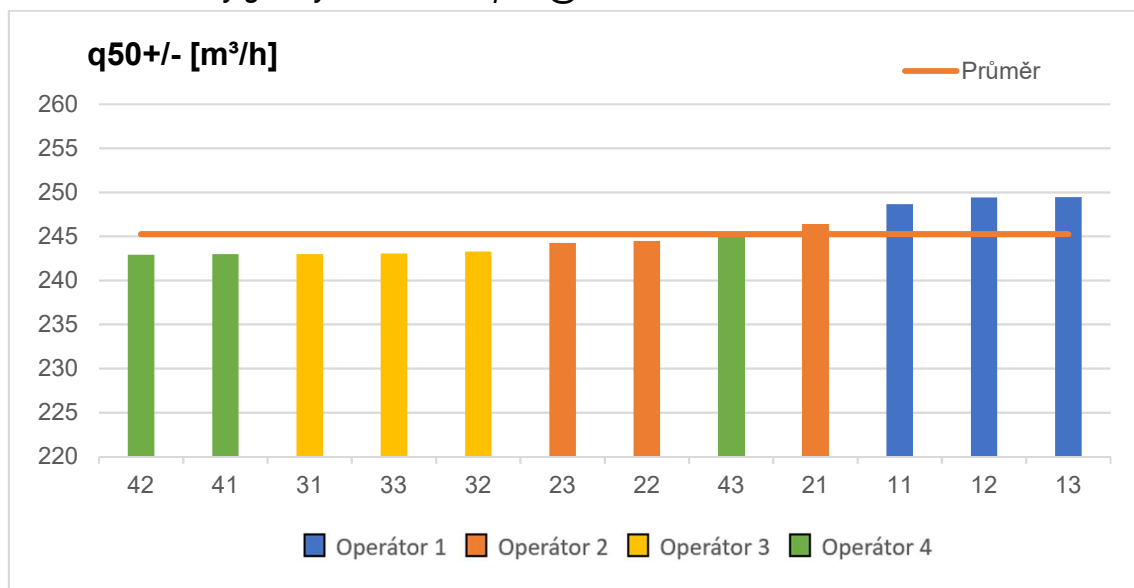
Běžně se kontrola vnitřní konzistentnosti dat provádí pomocí výpočtu objemového toku vzduchu  $q_{50+/-}$  z uvedených hodnot  $C_{L+/-}$  a  $n_{+/-}$ . Vzhledem k tomu, že zdrojem dat tohoto experimentu byly přímo výstupy z měřicího softwaru, a ne formuláře pro sběr dat, není tato kontrola nutná.

### 3.2.8.4 Kontrola odlehlých hodnot

#### Objemový tok vzduchu $q_{50+/-}$

Při kontrole odlehlých hodnot byly nejprve kontrolovány hodnoty  $q_{50+/-}$  (Graf 19), které jsou výsledkem každého testu. Hodnoty mají velmi nízké rozpětí ( $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) a variační koeficient pouze  $1,06\%$  a nevykazují znaky odlehlých hodnot. Byl proveden Grubbsův test na odlehlé hodnoty, který potvrdil, že se ve výsledcích měření nevyskytují žádné odlehlé ani vybočující hodnoty.

Graf 19: Souhrnný graf výsledků testů  $q_{50+/-}$  @ $240 \text{ m}^3/\text{h}$



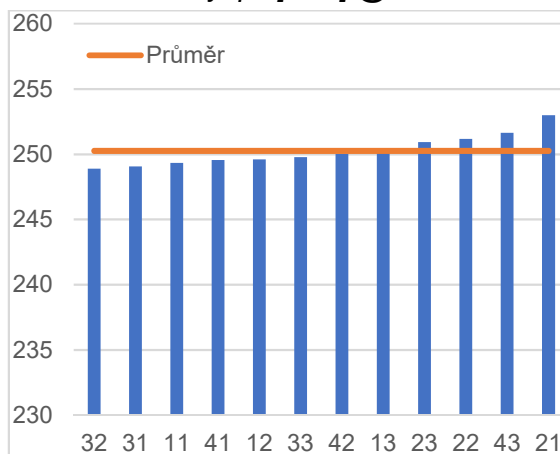
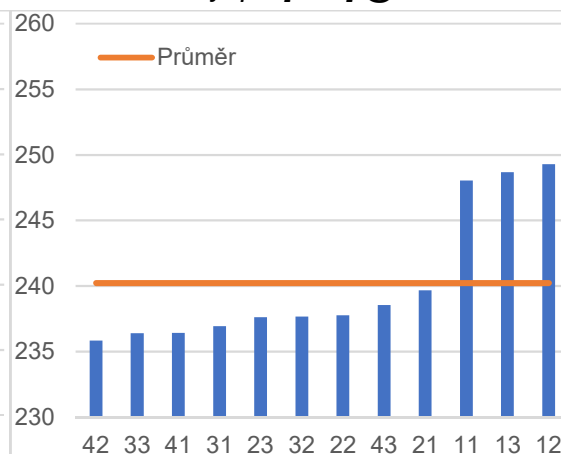
Kromě celkových výsledků testů byly kontrole odlehlých hodnot podrobeny navíc některé dílčí výsledky.

#### Objemový tok vzduchu $q_{50-}$ a $q_{50+}$

Výsledky  $q_{50-}$  (Graf 20) vypadají při prvotní kontrole konzistentně, a ani Grubbsův test neodhalil žádné odlehlé hodnoty. Při porovnání hodnot  $q_{50-}$  a  $q_{50+}$  (Graf 21) je zřejmé, že průměry naměřených veličin se výrazně liší (cca o  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ ). Navíc hodnoty  $q_{50+}$  odevzdané operátorem 1 výrazně vybočují oproti výsledkům ostatních operátorů a tím průměr naměřených hodnot ještě zvyšují.

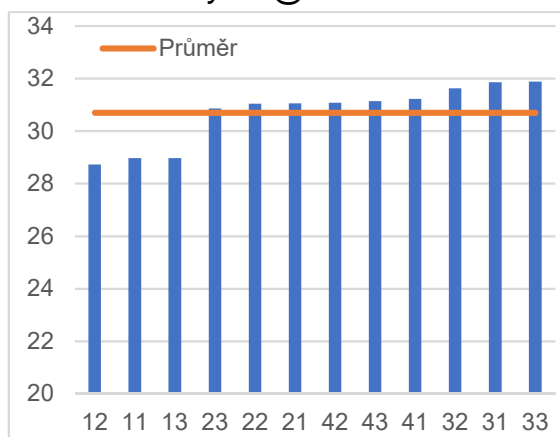
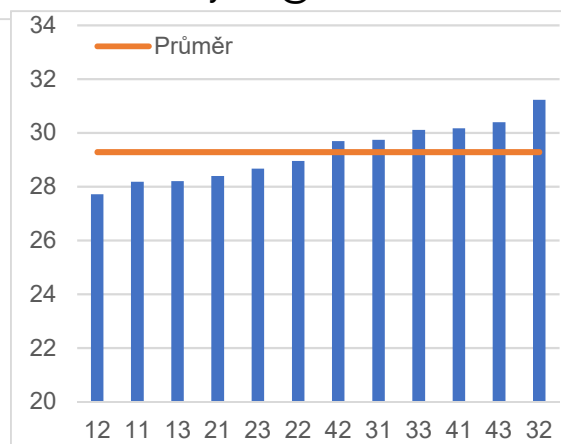
Byl opakovaně proveden Grubbsův test na odlehlé hodnoty, který v případě  $q_{50+}$ , postupně označil všechny hodnoty naměřené operátorem 1 jako odlehlé. Vzhledem k tomu, že se jedná pouze o dílčí výsledky měření, nebyly celkové výsledky měření operátora 1 vyloučeny z dalšího hodnocení. Měření při přetlaku je důvodem toho, proč jsou všechny tři celkové výsledky měření operátora 1 vyšší než celkové výsledky

všech ostatních měření. Příčina této odchylky nemohla být přesně určena, domnívám se však, že odchylka může být způsobena použitím jiného měřícího zařízení (BlowerDoor Standard) než operátoři 2, 3 a 4 (BlowerDoor MiniFan).

Graf 20: Hodnoty  $q_{50}$  [ $m^3/h$ ] @240  $m^3/h$ Graf 21: Hodnoty  $q_{50+}$  [ $m^3/h$ ] @240  $m^3/h$ 

### Součinitel proudění $C_{L+/-}$

U hodnot  $C_L$  (Graf 22) ani  $C_{L+}$  (Graf 23) Grubbsův test neodhalil žádné odlehlé ani vybočující hodnoty.

Graf 22: Hodnoty  $C_L$  @240  $m^3/h$ Graf 23: Hodnoty  $C_{L+}$  @240  $m^3/h$ 

### Exponent proudění $n_{+/-}$

Mezi hodnotami exponentu proudění  $n$  se u žádného z testů nevyskytovaly výrazně odlišné hodnoty, výsledky všech operátorů byly konzistentní, a proto nebyl důvod ke kontrole odlehlých hodnot.

Naměřené hodnoty  $n_-$ : 0,53 až 0,55

Naměřené hodnoty  $n_+$ : 0,52 až 0,56

### 3.2.8.5 Vyhodnocení výsledků

Celkem bylo provedeno 12 měření, která byla po rozboru v kapitolách 3.2.8.1 až 3.2.8.4 označena jako platná, žádné z provedených měření tedy nebylo vyloučeno z dalšího statistického vyhodnocení, nebyla odhalena žádná hrubá chyba při měření. Určení opakovatelnosti měření každého operátora a reprodukovatelnosti měření je provedeno v samostatné kapitole 4.

Základní statistické údaje se nachází v tabulce níže (Tabulka 6), podrobné výsledky v příloze (Příloha 20), grafický souhrn všech měření v podobě kvartilového grafu rovněž v příloze (Příloha 21) a protokoly z jednotlivých měření jsou součástí elektronické přílohy této práce.

Tabulka 6:  $q_{50\pm}$ ; základní statistické údaje @240 m<sup>3</sup>/h

		$q_{50\pm}$ [m <sup>3</sup> /h]
minimum	$x_{\min}$	242,93
aritmetický průměr	$\bar{x}$	245,25
maximum	$x_{\max}$	249,46
rozptyl	$\sigma^2$	6,16
směrodatná odchylka	$\sigma$	2,59
variační koeficient	$v_x$	1,06%

### Rozpětí výsledků jednotlivých operátorů

Variační rozpětí a strannost operátorů je uvedena v tabulce (Tabulka 7).

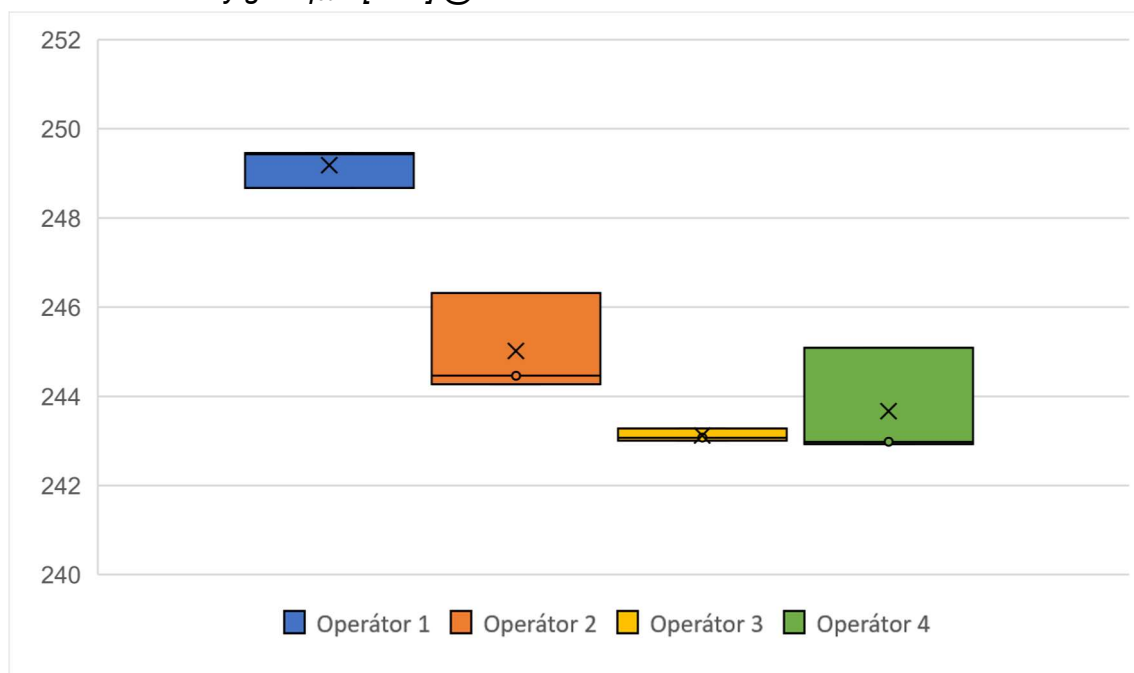
Tabulka 7: Variační rozpětí a strannost operátorů @240 m<sup>3</sup>/h

operátor	n	1	2	3	4
aritmetický průměr	$\bar{x}_n$	249,19	245,02	243,12	243,67
variační rozpětí	$R_{3n}$	0,78	2,05	0,27	2,16
strannost operátora	$B_n$	3,94	-0,23	-2,13	-1,58

Z grafického zobrazení výsledků měření (Graf 24) lze vyčíst, že všichni operátoři dosáhli velmi nízkého variačního rozpětí. Nejnižšího variačního rozpětí dosáhl operátor 3 (0,27 m<sup>3</sup>/h), který ve třech testech zaznamenal téměř identické výsledky. Výsledky operátorů 1 a 3 obsahují pouze minimální náhodnou chybu. I v případě operátorů 2 a 4 je dosažené variační rozpětí výrazně nižší, než bylo průměrně dosažené v experimentu provedeném in-situ.

Jiná situace nastává při hodnocení strannosti operátora. Aritmetický průměr měření operátorů 2, 3 a 4 byl téměř shodný, ale výsledky operátora 1 byly výrazně vyšší. Tím se potvrzuje, že výsledky operátora 1 obsahují soustavnou chybu, která může být způsobena měřicím zařízením, nebo přímo činností operátora při měření. V případě experimentu v laboratoři vznikla chyba zejména při testování při přetlaku, kde byly výsledky operátora 1 ( $q_{50+/-}$ ) až o 10 m<sup>3</sup>/h vyšší než výsledky ostatních. Příčina chyby nebyla v rámci tohoto experimentu zkoumána. K jejímu odhalení by bylo nutné, aby operátor provedl další sérii měření s jinou sadou měřicího zařízení – ideálně s jiným typem.

Graf 24: Souhrnný graf  $q_{50+/-}$  [m<sup>3</sup>/h] @240 m<sup>3</sup>/h





## 3.2.9 Vyhodnocení výsledků měření na úrovni 1000 m<sup>3</sup>/h

### 3.2.9.1 Kontrola úplnosti naměřených údajů

Veškerá data od všech operátorů byla kompletní, a obsahovala všechny údaje potřebné k následnému vyhodnocení experimentu. Z vyhodnocení bylo vyřazeno šesté měření operátora 4, které bylo označeno za chybné. Další uvedené statistické údaje nezahrnují vyřazené výsledky měření.

### 3.2.9.2 Kontrola přípustných mezí

#### **Tlakový rozdíl při nulovém objemovém průtoku vzduchu $\Delta p_0$**

V žádném z provedených testů nebyla překročena limitní hodnota, a všechny testy lze z hlediska  $\Delta p_0$  považovat za platné. Hodnoty  $\Delta p_0$  naměřené při jednotlivých testech jsou obsahem elektronické přílohy této práce. Maximální naměřená hodnota  $\Delta p_0$  byla 0,1 Pa.

#### **Součinitel proudění $C_L$**

Hodnoty součinitele proudění  $C_L$ , byly u všech testů větší než 0.

Při měření na neupravené budově se hodnoty  $C_L$ - pohybovaly od 81,54 do 97,65, s aritmetickým průměrem 88,49. Variační koeficient všech naměřených hodnot byl 7,53%. Hodnoty  $C_L$ + se pohybovaly od 81,32 do 96,61, s aritmetickým průměrem 88,34. Variační koeficient byl 6,52%.

#### **Exponent proudění $n$**

Mezi hodnotami exponentu proudění  $n$  se u žádného z testů nevyskytovaly výrazně odlišné hodnoty. U všech testů ležely naměřené hodnoty v přípustných mezích (0,5 až 1). Naměřené hodnoty se pohybovaly od 0,59 do 0,64. Variační koeficient byl nižší než 3%.

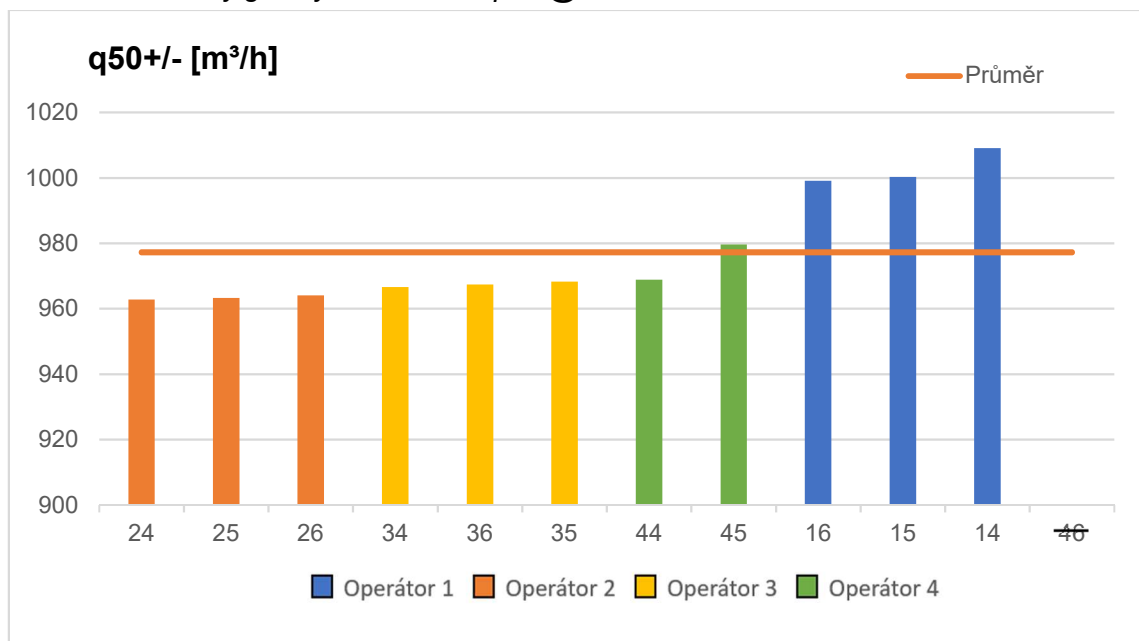
### 3.2.9.3 Kontrola odlehlých hodnot

#### **Objemový tok vzduchu $q_{50\pm}$**

Na odlehlé hodnoty byly nejprve kontrolovány výsledky  $q_{50\pm}$  (Graf 25). Podle provedeného Grubbsova testu se ve výsledcích měření nevyskytují žádné odlehlé ani vybočující hodnoty. Z grafu je zřejmé, že operátoři 2 a 3 dosahovali velmi podobných výsledků, a stejně jako v případě všech předchozích měření jsou

výsledky operátora 1 ze všech nejvyšší. Tato skutečnost se projevila ve všech testech obou experimentů, které jsou součástí této práce.

Graf 25: Souhrnný graf výsledků testů  $q_{50+/-}$  @1000  $m^3/h$

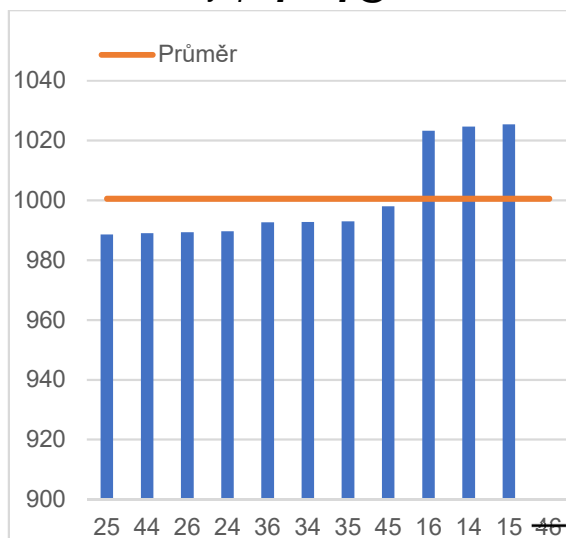


### Objemový tok vzduchu $q_{50-}$ a $q_{50+}$

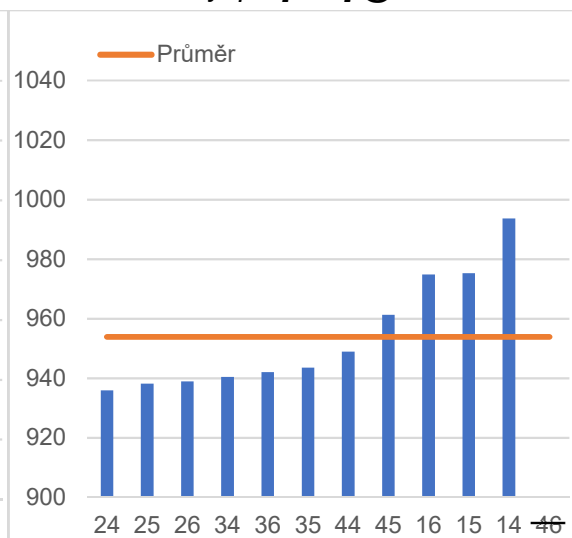
Stejně jako v případě měření na úrovni 240  $m^3/h$  je průměr měření při přetlaku výrazně nižší než při měření u podtlaku (o více než 30  $m^3/h$ ). Výsledky všech měření operátora 1 opět patří mezi nejvyšší, což znovu potvrzuje soustavnou chybu měření.

I přes větší rozpětí výsledků měření neodhalil Grubbsův test u hodnot  $q_{50-}$  ani  $q_{50+}$  žádné odlehlé hodnoty.

Graf 26: Hodnoty  $q_{50-}$  [m<sup>3</sup>/h] @1000  $m^3/h$



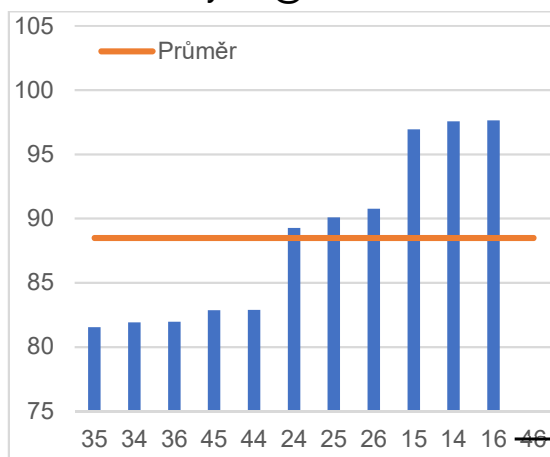
Graf 27: Hodnoty  $q_{50+}$  [m<sup>3</sup>/h] @1000  $m^3/h$



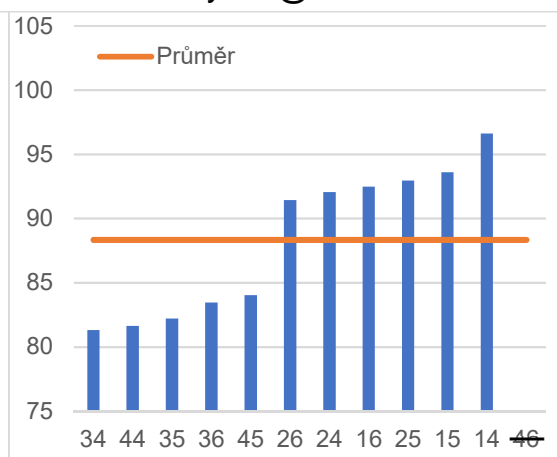
### Součinitel proudění $C_{L+/-}$

U hodnot  $C_{L-}$  (Graf 28) ani  $C_{L+}$  (Graf 29) Grubbsův test neodhalil žádné odlehlé ani vybočující hodnoty.

Graf 28: Hodnoty  $C_{L-}$  @1000 m<sup>3</sup>/h



Graf 29: Hodnoty  $C_{L+}$  @1000 m<sup>3</sup>/h



### Exponent proudění $n_{+/-}$

Mezi hodnotami exponentu proudění  $n$  se u žádného z testů nevyskytovaly výrazně odlišné hodnoty, výsledky všech operátorů byly konzistentní, a proto nebyl důvod ke kontrole odlehlých hodnot.

Naměřené hodnoty  $n_-$ : 0,60 až 0,64

Naměřené hodnoty  $n_+$ : 0,59 až 0,63

#### 3.2.9.4 Vyhodnocení výsledků

Celkem bylo provedeno 12 měření. Z dalšího statistického vyhodnocení bylo vyloučeno šesté měření operátora 4, u kterého došlo vinou hrubé chyby při měření k výrazné odchylce od všech ostatních získaných výsledků. Ostatní výsledky byly po rozboru v kapitolách 3.2.9.1 až 3.2.9.3 označeny jako platné. Určení opakovatelnosti měření každého operátora a reprodukovatelnosti měření je provedeno v samostatné kapitole 4.

Základní statistické údaje se nachází v tabulce níže (Tabulka 8), podrobné výsledky v příloze (Příloha 22), grafický souhrn všech měření v podobě kvartilového grafu rovněž v příloze (Příloha 23) a protokoly z jednotlivých měření jsou součástí elektronické přílohy této práce.

Tabulka 8:  $q_{50+/-}$ ; základní statistické údaje @1000 m<sup>3</sup>/h

		<b><math>q_{50+/-}</math></b> [m <sup>3</sup> /h]
minimum	$X_{\min}$	962,79
aritmetický průměr	$\bar{x}$	977,23
maximum	$X_{\max}$	1009,14
rozptyl	$\sigma^2$	269,69
směrodatná odchylka	$\sigma$	17,22
variační koeficient	$V_x$	1,76%

### Rozpětí výsledků jednotlivých operátorů

Variační rozpětí a strannost operátorů je uvedena v tabulce (Tabulka 9).

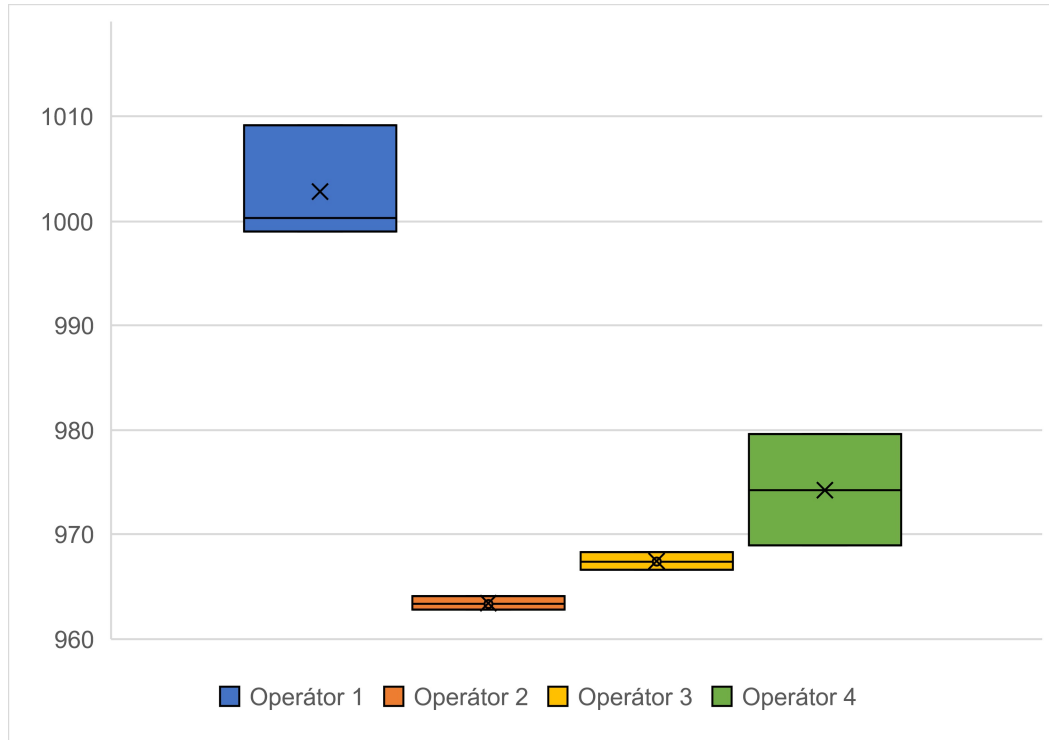
Tabulka 9: Variační rozpětí a strannost operátorů @1000 m<sup>3</sup>/h

operátor	n	1	2	3	4
aritmetický průměr	$\bar{x}_n$	1002,84	963,41	967,41	974,28
variační rozpětí	$R_{4n}$	10,09	1,31	1,67	10,70
strannost operátora	$B_n$	25,61	-13,82	-9,82	-2,95

Souhrnný graf  $q_{50+/-}$  (Graf 30) ukazuje, že v případě laboratorního měření na úrovni 1000 m<sup>3</sup>/h dosáhli všichni operátoři velmi nízkého variačního rozpětí, jehož hodnota byla oproti měření in-situ zhruba třetinová. Měření operátorů 2 a 3 byla ve všech ohledech téměř identická, oba dosáhli extrémně nízkých hodnot variačního rozpětí, a i strannost těchto operátorů byla velmi podobná.

V případě operátora 1 platí už několikrát konstatovaný fakt, že výsledky všech jeho měření jsou vyšší než u ostatních operátorů.

Výsledek šestého měření operátora 4 byl ze statistického vyhodnocení vyloučen z důvodu hrubé chyby při měření, která se projevila na výsledku měření. Vyhodnocení tak obsahuje pouze dva výsledky měření tohoto operátora, přesto je variační rozpětí dosažené tímto operátorem nejvyšší ze všech na úrovni 1000 m<sup>3</sup>/h.

Graf 30: Souhrnný graf  $q_{50+/-}$  [ $m^3/h$ ] @  $1000 m^3/h$ 

### 3.2.10 Závěry

Celý experiment probíhal ve zkušební hale UCEEB, byl tedy vyloučen vliv klimatických podmínek na výsledky, a výsledky všech testů je možné vzájemně porovnávat.

U všech měření provedených v rámci experimentu byla provedena kontrola úplnosti naměřených údajů, kontrola přípustných mezí a kontrola odlehlých hodnot. Vzhledem k odhalení hrubé chyby u jednoho měření došlo k jeho vyloučení, výsledky všech ostatních měření byly vyhodnoceny. V podkapitolách 3.2.8.5 a 3.2.9.4 bylo provedeno základní statistické vyhodnocení nasbíraných dat, a rozbor výsledků měření jednotlivých operátorů.

Vyhodnocení opakovatelnosti měření každého operátora a reprodukovatelnosti měření je provedeno v samostatné kapitole 4, která obsahuje i shrnutí výsledků a porovnání s experimentem provedeným in-situ.

## 4 Vyhodnocení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti

Výpočet opakovatelnosti a reprodukovatelnosti se řídí normami ČSN ISO 5725-1 [7] a ČSN ISO 5725-2 [14]. Výsledkem vyhodnocení je variační koeficient opakovatelnosti a variační koeficient reprodukovatelnosti, tedy procentuální hodnoty směrodatných odchylek. Variační koeficienty umožňují porovnání výsledků mezi více experimenty, přestože měření probíhalo na různých úrovních objemového průtoku vzduchu.

### 4.1 Výsledky vyhodnocení

Za test opakovatelnosti a reprodukovatelnosti byla považována měření na každé úrovni objemového průtoku vzduchu provedená in-situ i v laboratoři. Celkem tedy byly provedeny čtyři testy opakovatelnosti a reprodukovatelnosti. Vzhledem k tomu, že všichni operátoři při svých měřeních splnili podmínky opakovatelnosti, je vyhodnocena opakovatelnost každého operátora zvlášť a následně průměrná opakovatelnost měření jako celku. Vyhodnocení reprodukovatelnosti měření může být kvůli své podstatě provedeno pouze na celém souboru dat, nikoliv pro každého operátora zvlášť.

#### 4.1.1 Opakovatelnost

Souhrnné výsledky vyhodnocení opakovatelnosti měření v následujících tabulkách (Tabulka 10 až Tabulka 13) ukazují, že opakovatelnost měření je při obou zvolených úrovních průtoku vzduchu téměř stejná. Při měření in-situ dosáhl variační koeficient opakovatelnosti ( $v_{xr}$ ) 0,66% (@240m<sup>3</sup>/h) a 0,59% (@1000m<sup>3</sup>/h), byl tedy dokázán mírný pokles při zvýšení objemového průtoku vzduchu. Při měření v laboratoři dosáhl  $v_{xr}$  hodnot 0,29% (@240m<sup>3</sup>/h) a 0,36% (@1000m<sup>3</sup>/h).

Porovnání výsledků dosažených in-situ a v laboratoři dokazuje, že při vyloučení klimatických vlivů v průběhu měření dochází ke snížení variačního koeficientu opakovatelnosti ( $v_{xr}$ ) přibližně na polovinu.

Při hodnocení dílčích výsledků se opět ukazuje důležitost měření při podtlaku i přetlaku,  $v_{xr}$  (průměr) je totiž ve všech případech nižší než jeden nebo oba dílčí výsledky  $v_{xr}$  (podtlak, přetlak), a to jak v rámci celkových výsledků opakovatelnosti, tak u výsledků jednotlivých operátorů.

Tabulka 10: Opakovatelnost měření in-situ @240m<sup>3</sup>/h

Operátor	Variační koeficient opakovatelnosti		
	Podtlak	Přetlak	Průměr
1	0,85%	1,73%	1,28%
2	0,19%	0,50%	0,15%
3	0,89%	1,11%	0,15%
4	0,60%	1,71%	0,93%
5	0,53%	1,17%	0,85%
V <sub>xr</sub>	0,54%	1,08%	0,66%

Tabulka 11: Opakovatelnost měření in-situ @1000m<sup>3</sup>/h

Operátor	Variační koeficient opakovatelnosti		
	Podtlak	Přetlak	Průměr
1	0,58%	1,26%	0,91%
2	0,23%	0,37%	0,26%
3	1,87%	0,40%	0,72%
4	1,60%	0,84%	1,07%
5	0,11%	0,64%	0,27%
V <sub>xr</sub>	0,93%	0,63%	0,59%

Tabulka 12: Opakovatelnost měření v laboratoři @240m<sup>3</sup>/h

Operátor	Variační koeficient opakovatelnosti		
	Podtlak	Přetlak	Průměr
1	0,19%	0,25%	0,18%
2	0,45%	0,48%	0,46%
3	0,18%	0,27%	0,06%
4	0,44%	0,60%	0,51%
V <sub>xr</sub>	0,28%	0,34%	0,29%

Tabulka 13: Opakovatelnost měření v laboratoři @1000m<sup>3</sup>/h

Operátor	Variační koeficient opakovatelnosti		
	Podtlak	Přetlak	Průměr
1	0,11%	1,09%	0,55%
2	0,06%	0,16%	0,07%
3	0,02%	0,16%	0,09%
4	0,65%	0,91%	0,78%
V <sub>xr</sub>	0,23%	0,57%	0,36%

## 4.1.2 Reprodukovanost

Výsledků reprodukovatelnosti měření (Tabulka 14) kopírují trendy pozorované u výsledků opakovatelnosti. Variační koeficient reprodukovatelnosti ( $v_{xR}$ ) měření in-situ při zvýšení objemového průtoku mírně klesl z 1,21% (@240m<sup>3</sup>/h) na 1,07% (@1000m<sup>3</sup>/h). Při měření v laboratoři  $v_{xR}$  při zvýšení objemového průtoku naopak vzrostl z 1,01% (@240m<sup>3</sup>/h) na 1,62% (@1000m<sup>3</sup>/h).

Na rozdíl od vyhodnocení opakovatelnosti nebyl zaznamenán konstantní pokles variačního koeficientu v případě laboratorních měření. To je způsobeno faktem, že operátor 1 dosahoval odlišných výsledků při měření přetlaku než všichni ostatní operátoři. Tento problém a jeho možné příčiny jsou popsány v podkapitole 3.2.8.4. Aby byl zaznamenán pokles variačního koeficientu u měření v laboratoři oproti měření in-situ, musely by být z vyhodnocení vyřazeny výsledky operátora 1. To však není možné, protože měření nelze označit za chybná.

K poklesu  $v_{xR}$  došlo na úrovni objemového průtoku vzduchu 240m<sup>3</sup>/h, konkrétně z 1,21% (in-situ) na 1,01% (laboratoř). Na úrovni 1000 m<sup>3</sup>/h došlo naopak ke zvýšení  $v_{xR}$  z 1,07% na 1,62%.

Výrazné snížení  $v_{xR}$  u měření v laboratoři tak lze pozorovat pouze u měření podtlaku @240 m<sup>3</sup>/h. Na úrovni 1000 m<sup>3</sup>/h došlo k mírnému snížení  $v_{xR}$  z 1,54% (in-situ) na 1,44% (laboratoř).

Tabulka 14: Reprodukovanost měření

	Variační koeficient reprodukovatelnosti ( $v_{xR}$ )		
	Podtlak	Přetlak	Průměr
in-situ @240 m <sup>3</sup> /h	1,84%	1,31%	1,21%
in-situ @1000 m <sup>3</sup> /h	1,54%	1,02%	1,07%
laboratoř @240 m <sup>3</sup> /h	0,46%	2,07%	1,01%
laboratoř @1000 m <sup>3</sup> /h	1,44%	1,87%	1,62%



## 4.2 Porovnání s předchozími experimenty

Porovnání výsledků opakovatelnosti a reprodukovatelnosti si klade za cíl objektivní srovnání provedených experimentů, proto je pro srovnání vždy vybráno odpovídající umístění (in-situ/laboratoř) a bližší ze dvou úrovní objemového průtoku vzduchu, na kterých proběhla měření v rámci této diplomové práce.

### 4.2.1 Opakovatelnost

Pro porovnání výsledků opakovatelnosti byly v kapitole 2.3 shrnuty celkem čtyři předchozí experimenty publikované v letech 2011 až 2016.

#### 4.2.1.1 C. Delmotte, J. Laverge (2011)

Autoři práce [11] uvádějí, že objemový tok vzduchu při tlakovém rozdílu se pro jednotlivá měření pohyboval od 699 do 754 m<sup>3</sup>/h. Pro srovnání (Tabulka 15) dosažených výsledků byl zvolen výsledek opakovatelnosti in-situ dosažený na úrovni  $q_{50} = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Dosažený variační koeficient opakovatelnosti byl 2,4x menší, než v případě práce publikované v roce 2011. Dosažené dílčí výsledky variačního koeficientu opakovatelnosti při podtlaku a přetlaku jsou rovněž vyšší, a to v obou případech 2,2x.

Tabulka 15: Srovnání  $v_{xr}$ ; C. Delmotte, J. Laverge

	Variační koeficient opakovatelnosti ( $v_{xr}$ )		
	Podtlak	Přetlak	Průměr
C. Delmotte, J. Laverge (2011)	1,98%	1,23%	1,36%
in-situ @1000 m <sup>3</sup> /h	0,93%	0,63%	0,59%

#### 4.2.1.2 W. Bracke a spol. (2013)

Kolektiv autorů [12] prováděl měření na dvou pasivních domech. V případě prvního domu se naměřené hodnoty  $q_{50}$  pohybovaly kolem 230 m<sup>3</sup>/h, v případě druhého domu není tato informace uvedena, ale lze přepokládat, že úroveň  $q_{50}$  byla obdobná. Pro srovnání (Tabulka 16) nejlépe poslouží výsledek z měření in-situ @240 m<sup>3</sup>/h.

V práci nejsou publikovány dílčí výsledky opakovatelnosti měření při podtlaku a přetlaku v budově. Dosažený variační koeficient opakovatelnosti byl v případě

domu 1 více než 2x vyšší než hodnota vypočtená z výsledků této diplomové práce, u domu 2 byl výsledek téměř 3,5x vyšší. Srovnání ukazuje výrazně menší chybu a tím i větší přesnost měření v rámci experimentu provedeném in-situ.

Tabulka 16: Srovnání  $v_{xr}$ ; W. Bracke a spol.

		Variační koeficient opakovatelnosti ( $v_{xr}$ )		
		Podtlak	Přetlak	Průměr
W. Bracke a spol. (2013)	dům 1	-	-	1,40%
W. Bracke a spol. (2013)	dům 2	-	-	2,30%
in-situ @240 m <sup>3</sup> /h		0,54%	1,08%	0,66%

#### 4.2.1.3 F. Ledecký (2015)

F. Ledecký ve své diplomové práci [13] uvádí kromě celkového výsledku i dílčí výsledky při podtlaku a přetlaku v budově, je tak možné kompletní srovnání. Měření probíhala na experimentálním objektu při průměrném  $q_{50} = 1003 \text{ m}^3/\text{h}$ . Ke srovnání (Tabulka 17) posloužily výsledky z měření in-situ @1000 m<sup>3</sup>/h.

Celkový výsledek variačního koeficientu opakovatelnosti je u obou prací téměř totožný, to ukazuje na velmi podobnou přesnost měření. Rozdíly jsou u dílčích výsledků, kdy v případě podtlaku dosáhl F. Ledecký na 1,7x nižší  $v_{xr}$ , a v případě přetlaku byl dosažený  $v_{xr}$  naopak 1,3x vyšší.

Tabulka 17: Srovnání  $v_{xr}$ ; F. Ledecký

		Variační koeficient opakovatelnosti ( $v_{xr}$ )		
		Podtlak	Přetlak	Průměr
F. Ledecký (2015)		0,52%	0,83%	0,58%
in-situ @1000 m <sup>3</sup> /h		0,93%	0,63%	0,59%

#### 4.2.1.4 O. Šafránek (2016)

V rámci diplomové práce O. Šafránka [15] byla měření prováděna pouze při podtlaku, tomu odpovídají výsledky vyhodnocení opakovatelnosti, které nemohou obsahovat výsledky z měření při přetlaku ani průměrné hodnoty.

Srovnání (Tabulka 18) je možné na obou úrovních objemového průtoku vzduchu měřených v laboratoři, tedy 240 a 1000 m<sup>3</sup>/h při 50 Pa, jelikož práce O. Šafránka zahrnovala měření na průměrné úrovni  $q_{50} = 250$  m<sup>3</sup>/h, a dokonce dvě série měření při průměru  $q_{50} = 1000$  m<sup>3</sup>/h.

Variační koeficient opakovatelnosti dosažený O. Šafránkem na úrovni 250 m<sup>3</sup>/h byl téměř dvojnásobný oproti  $v_{xr}$  dosaženému v rámci této diplomové práce při měření v laboratoři @240 m<sup>3</sup>/h.

Na úrovni  $q_{50} = 1000$  m<sup>3</sup>/h publikoval autor dva výsledky  $v_{xr}$ , jeden 1,8x vyšší a druhý 1,4x nižší než výsledek  $v_{xr}$  při měření v laboratoři @1000 m<sup>3</sup>/h. Toto srovnání naznačuje, že přesnost měření byla v případě obou experimentů provedených v laboratoři podobná.

Tabulka 18: Srovnání  $v_{xr}$ ; O. Šafránek

		Variační koeficient opakovatelnosti ( $v_{xr}$ )		
		Podtlak	Přetlak	Průměr
O. Šafránek (2016)	250 m <sup>3</sup> /h	0,53%	-	-
O. Šafránek (2016)	1000_1 m <sup>3</sup> /h	0,42%	-	-
O. Šafránek (2016)	1000_2 m <sup>3</sup> /h	0,16%	-	-
laboratoř @240 m <sup>3</sup> /h		0,28%	0,34%	0,29%
laboratoř @1000 m <sup>3</sup> /h		0,23%	0,57%	0,36%

## 4.2.2 Reprodukovatelnost

Pro porovnání výsledků reprodukovatelnosti byl v kapitole 2.3 uveden pouze jeden předchozí experiment publikovaný v roce 2011.

### 4.2.2.1 C. Delmotte, J. Laverge (2011)

Pro srovnání (Tabulka 19) výsledků je nejvhodnější výsledek reprodukovatelnosti in-situ dosažený na úrovni  $q_{50} = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ , jelikož autory dosažené průměrné  $q_{50}$  se při testu reprodukovatelnosti pohyboval v rozmezí 713 až 772  $\text{m}^3/\text{h}$ .

Srovnání ukazuje, že autory dosažený výsledek  $v_{xR}$  byl 2,2x vyšší než výsledek  $v_{xR}$  při měření in-situ @1000  $\text{m}^3/\text{h}$ . Dílčí výsledek při přetlaku je 1,6x vyšší a při podtlaku dokonce 2,8x vyšší. Srovnání tak ukazuje výrazně menší chybu měření in-situ @1000  $\text{m}^3/\text{h}$ , tedy i menší nejistotu a větší přesnost měření.

Tabulka 19: Srovnání  $v_{xR}$ ; C. Delmotte, J. Laverge

	Variační koeficient reprodukovatelnosti ( $v_{xR}$ )		
	Podtlak	Přetlak	Průměr
C. Delmotte, J. Laverge (2011)	2,50%	2,90%	2,40%
in-situ @1000 $\text{m}^3/\text{h}$	1,54%	1,02%	1,07%

## 5 Závěr

### 5.1 Shrnutí získaných informací

Práce se zabývala určením opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření vzduchotěsnosti budov. Součástí práce bylo provedení dvou experimentů, které se skládaly z měření více operátorů na různých úrovních objemového průtoku vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu 50 Pa. Data získaná během obou experimentů byla následně statisticky vyhodnocena a pro příslušné dílčí části výsledků byly určeny směrodatné odchylky opakovatelnosti a reprodukovatelnosti.

Experiment č.1 probíhal na pasivním rodinném domu v Koberovech. Experimentu se zúčastnilo 5 operátorů, kteří provedli celkem 30 sérií měření. Získaná data prošla řadou kontrol, kontrolovány byly vhodné klimatické podmínky v průběhu měření, úplnost naměřených údajů, přípustné meze, vnitřní konzistentnost dat a odlehle hodnoty mezi celkovými a dílčími výsledky. V průběhu těchto kontrol byly z dalšího vyhodnocení vyřazeny nepřijatelné výsledky měření a následně bylo provedeno základní statistické vyhodnocení získaného souboru dat. Poté byl určen variační koeficient (relativní směrodatná odchylka), který v případě opakovatelnosti dosahoval u jednotlivých operátorů od 0,15% do 1,28%, a v průměru 0,66% na úrovni  $q_{50} = 240 \text{ m}^3/\text{h}$  a 0,59% na úrovni  $q_{50} = 1000 \text{ m}^3/\text{h}$ . Na uvedených úrovních  $q_{50}$  byl vypočten i variační koeficient reprodukovatelnosti, který dosáhl hodnot 1,21% a 1,07%.

Výsledky experimentu č.1 jsou v souladu se závěry diplomové práce O. Šafránka, která se zaměřovala na popsání závislosti nejistoty měření vzduchotěsnosti na objemovém průtoku vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu 50 Pa. Autor konstatuje, že relativní hodnota nejistoty měření se při zvýšení  $q_{50}$  snižuje. Tento závěr byl tedy experimentem č.1 potvrzen.

Experiment č.2 byl proveden v experimentální hale Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT, kde byla umístěna zkušební komora. Součástí experimentu bylo celkem 24 měření, která byla provedena čtyřmi operátory. Průběh experimentu byl obdobný jako v případě experimentu č.1. Zásadním rozdílem bylo umístění experimentálního objektu, které zaručovalo vyloučení vlivu klimatických podmínek na výsledky měření. Variační koeficient opakovatelnosti dosahoval u jednotlivých operátorů od 0,06% do 0,78%. Vypočtené průměry  $v_{xr}$  dosáhly hodnot

0,29% (@240 m<sup>3</sup>/h) a 0,36% (@1000 m<sup>3</sup>/h). Celkové výsledky variačního koeficientu opakovatelnosti tak byly výrazně nižší než v případě experimentu č.1 (přibližně poloviční), čímž byl potvrzen zásadní vliv klimatických podmínek na měření za podmínek opakovatelnosti.

Variační koeficient reprodukovatelnosti u experimentu č.2 nabył hodnot 1,01% (@240 m<sup>3</sup>/h) a 1,62% (@1000 m<sup>3</sup>/h). Tyto hodnoty jsou téměř shodné jako v případě experimentu č.1, což se vzhledem k vyloučení vlivu klimatických podmínek nepředpokládalo. Rovněž se v případě tohoto experimentu nepotvrdila popsaná závislost nejistoty měření vzduchotěsnosti na objemovém průtoku vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu 50 Pa. Je možné, že na neočekávané výsledky měla vliv použitá zkušební komora, jejíž další zkoumání může být předmětem navazujících experimentů.

Porovnání výsledků s pracemi publikovanými v předchozích letech ukázalo, že výsledné variační koeficienty jsou výrazně nižší, než ty uvedené v zahraničních studiích ([11], [12]). Tento výrazný rozdíl byl s největší pravděpodobností způsoben tím, že v případě zahraničních studií nebyl kladen důraz na konstantní klimatické podmínky v průběhu měření, což se negativně projevuje na nejistotě měření.

Srovnání s obdobnými částmi experimentů provedených v rámci diplomových prací na fakultě stavební ČVUT ([13], [15]) ukázalo, že dosažené variační koeficienty jsou bez výrazných rozdílů. V případě laboratorních výsledků byl vyloučen negativní dopad klimatických vlivů, a dosažené výsledky proto byly očekávatelné. Pro výsledky získané měřením in-situ platí, že v rámci experimentů opakovatelnosti a reprodukovatelnosti byly vyhledávány co nejvhodnější klimatické podmínky k testování, které není možné běžně zajistit při každém měření v průběhu celého roku.

Realizovaný komplexní experiment opakovatelnosti a reprodukovatelnosti měření vzduchotěsnosti budov byl unikátní svým rozsahem (počtem zúčastněných operátorů) a přímým srovnáním měření in-situ a v laboratoři. Podařilo se navázat na závěry předchozích experimentů a rozšířit poznání problematiky měření vzduchotěsnosti budov zodpovězením otázek, které byly položeny jako základ této diplomové práce.

## 5.2 Praktický význam experimentu

V rámci experimentu č.1 byla potvrzena závislost nejistoty měření vzduchotěsnosti na objemovém průtoku vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu 50 Pa. Relativní hodnota nejistoty měření se snižuje při zvýšení  $q_{50}$ , a to v případě opakování i reprodukování měření. Z důvodu neobjasněných rozdílů mezi měřeními jednotlivých operátorů nebyla tato závislost potvrzena ani vyvrácena v rámci druhého experimentu provedeného v laboratoři.

Experiment č.2 odhalil výrazný vliv klimatických podmínek na výsledky měření vzduchotěsnosti. Variační koeficient opakovatelnosti byl v případě laboratorních měření přibližně poloviční oproti měřením in-situ na stejných úrovních  $q_{50}$ . Výsledky reprodukovatelnosti měření byly v případě obou experimentů podobné a nebyl zaznamenán výrazný pokles jako v případě opakovatelnosti, což bylo s velkou pravděpodobností způsobeno vlastnostmi zkušební komory, ve které byly zaznamenány různé výsledky při použití různých typů měřících přístrojů. Tento fakt může být předmětem zkoumání v dalších experimentech, stejně jako zmíněné vlastnosti zkušební komory.

Výsledky opakovatelnosti a reprodukovatelnosti experimentu č.1 ukázaly, že při dodržení doporučení platné normy pro měření vzduchotěsnosti ohledně vhodných klimatických podmínek je měření vzduchotěsnosti budov velmi přesné a je možné dosáhnout relativní směrodatné odchylky opakovatelnosti nižší než 1% a relativní směrodatné odchylky reprodukovatelnosti nižší než 1,5% v případě měření objektů, jejichž netěsnosti umožňují objemový průtok vzduchu obálkou při tlakovém rozdílu 50 Pa mezi 240 a 1000 m<sup>3</sup>/h.

Důležitým poznatkem je zejména to, že i přes vyhledávání co nejvhodnějších klimatických podmínek (při měření in-situ v rámci experimentu) je jejich vliv na výslednou nejistotu značný, a proto je důležité se vyvarovat měření v nepříznivých podmínkách. Zahraniční experimenty ukázaly, že pokud měření proběhne v nevyhovujících podmínkách, je vhodné na tento fakt upozornit v protokolu o měření, jelikož nejistota takto provedeného měření je vysoká. Ideální podmínky pro měření vzduchotěsnosti zahrnují téměř stejnou vnitřní a vnější teplotu a co nejnižší rychlost větru, proto není vhodné měření provádět v době teplotních extrémů v zimě nebo v létě.

### 5.3 Možné pokračování experimentu

Na experimenty provedené v rámci této diplomové práce lze navázat mnoha způsoby. Experiment č.1 je možné zopakovat v upravené podobě, kdy může dojít ke změně počtu zúčastněných operátorů, počtu měření na jedné úrovni  $q_{50}$  nebo k provedení měření na více úrovních  $q_{50}$ . Při dodržení shodné přípravy budovy a v případě že nedojde k žádným stavebním úpravám na objektu, může být soubor dat získaný v této diplomové práci rozšířen o měření na dalších úrovních  $q_{50}$ , které budou ležet v intervalu 240 – 1000  $m^3/h$ , nebo budou větší než 1000  $m^3/h$ . Cílem takového rozšíření, by bylo další ověření závislosti nejistoty měření na  $q_{50}$ . Soubor dat je také možné doplnit o měření dalších operátorů, tím by byl rozšířen provedený experiment opakovatelnosti a reprodukovatelnosti.

Experiment č.2 lze také zopakovat v upravené podobě se stejnými změnami jako u experimentu č.1, nejdříve by však bylo vhodné podrobněji prozkoumat vlastnosti zkušební komory z hlediska proudění vzduchu uvnitř komory při použití různých měřících zařízení, zejména při použití ventilátorů s různou velikostí a rozdílným výkonem. Při využití stávajícího stavu zkušební komory je možné zkoumat vliv změny zařízení při několikanásobném opakování měření jedním operátorem, který nejdříve provede sérii měření (3 až 10) s jedním zařízením na jedné úrovni  $q_{50}$ , a následně stejnou sérii zopakuje s jiným zařízením na stejné úrovni  $q_{50}$ . Tím bude vyloučen vliv změny operátora, a jediným rozdílem mezi měřeními bude změna měřícího zařízení.

Pro zkoumání proudění vzduchu uvnitř zkušební komory je možné využít jednu nebo více kamer umístěných v rozích komory pro pořízení vizuálního záznamu, a následně při stálém tlakovém rozdílu, který bude vyvoláván ventilátorem, vpustit do komory kouř pomocí kouřového generátoru. Takto provedený experiment by odhalil způsob proudění uvnitř komory, a pomohl by k navržení úprav pro případné další měření vzduchotěsnosti s využitím této zkušební komory.



## Seznam použité literatury

- [1] NOVÁK, Jiří. *Vzduchotěsnost obvodových plášťů budov*. 1. vyd. Praha: Grada, 2008. Stavitel. ISBN 978-80-247-1953-5.
- [2] ČSN EN 13829 *Tepelné chování budov - Stanovení průvzdušnosti budov - Tlaková metoda*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [3] ČSN 73 0540-2 *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. 3. Praha: Český normalizační institut, 2011.
- [4] ZWIENER, Viktor a Ctibor HŮLKA. Blower Door test – stanovení vzduchové propustnosti budov metodou tlakového spádu. *TechPark, o.z.* [online]. online: TechPark, o.z., 2008 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <http://www.techpark.sk/technika-122011/blower-door-test-stanoveni-vzduchove-propustnosti-budov-metodou-tlakoveho-spadu.html>
- [5] Měřicí technika Minneapolis BlowerDoor. KREJČA, Jiří. *Blowertest* [online]. Jihlava: [www.blowertest.cz](http://www.blowertest.cz), 2017 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <https://www.blowertest.cz/cz/prodej/merici-technika-minneapolis-blowerdoor>
- [6] ČSN EN ISO 9972 *Tepelné chování budov - Stanovení průvzdušnosti budov - Tlaková metoda*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2016.
- [7] ČSN ISO 5725-1 *Přesnost (správnost a shodnost) metod a výsledků měření - Část 1: Obecné zásady a definice*. OPRAVA 1. Praha: Český normalizační institut, 1998.
- [8] NOVÁK, Jiří. Srovnávací měření techniků a měřicích zařízení, červen 2017: Stručná zpráva. In: *Asociace Blower Door CZ* [online]. Rakovník: <http://www.asociaceblowerdoor.cz/>, 2017 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: [http://www.asociaceblowerdoor.cz/images/other/17\\_srovnavaci\\_mereni\\_2017\\_ABDCZ\\_zprava\\_public.pdf](http://www.asociaceblowerdoor.cz/images/other/17_srovnavaci_mereni_2017_ABDCZ_zprava_public.pdf)
- [9] Grubbs' test for outliers. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Grubbs%27\\_test\\_for\\_outliers](https://en.wikipedia.org/wiki/Grubbs%27_test_for_outliers)
- [10] Chyba měření. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Chyba\\_m%C4%9B%C5%99en%C3%AD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Chyba_m%C4%9B%C5%99en%C3%AD)
- [11] DELMOTTE, Christophe a Jelle LAVERGE. *Interlaboratory test for the determination of repeatability and reproducibility of buildings airtightness measurements* [online]. Brusel, 2011 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: [http://www.wtcb.be/homepage/download.cfm?dtype=na\\_energy&doc=AIVC\\_TIGHTVENT\\_2011\\_Conference\\_Paper\\_BBRI\\_Delmotte.pdf&lang=en](http://www.wtcb.be/homepage/download.cfm?dtype=na_energy&doc=AIVC_TIGHTVENT_2011_Conference_Paper_BBRI_Delmotte.pdf&lang=en). Belgian Building Research Institute.,

- [12] BRACKE, W., J. LAVERGE, N. VAN DEN BOSSCHE a A. JANSSENS. *Durability and Measurement Uncertainty of Airtightness in Extremely Airtight Dwellings* [online]. Gent, Belgie, 2014 [cit. 2017-11-14]. Dostupné z: [http://www.aivc.org/sites/default/files/9-2\\_0.pdf](http://www.aivc.org/sites/default/files/9-2_0.pdf). Ghent University.
- [13] LEDECKÝ, František. *Nejistoty při měření vzduchotěsnosti budov*. Praha, 2015. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Jiří Novák, Ph.D.
- [14] ČSN ISO 5725-2 *Přesnost (správnost a shodnost) metod a výsledků měření - Část 2: Základní metoda pro stanovení opakovatelnosti a reprodukovatelnosti normalizované metody měření*. 1. Praha: Český normalizační institut, 1996.
- [15] ŠAFRÁNEK, Ondřej. *Opakovatelnost měření vzduchotěsnosti budov zařízením Blower Door*. Praha, 2016. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Jiří Novák, Ph.D.
- [16] *Pasivní domy Koberovy* [online]. Jablonec nad Nisou: ATREA s. r. o., 2007 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <http://www.domyatrea.cz/cz/pasivni-domy-koberovy>
- [17] *Univerzitní centrum energeticky efektivních budov ČVUT v Praze* [online]. UCEEB: Buštěhrad, 2014 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <http://www.uceeb.cz/>
- [18] Air Flow Rate through an Orifice. *Air Flow Rate through an Orifice* [online]. Japonsko: TLV International Inc., 2017 [cit. 2018-01-07]. Dostupné z: <https://www.tlv.com/global/TL/calculator/air-flow-rate-through-orifice.html>

## Seznam grafů

Graf 1: Souhrn všech měření na neupravené budově (@240 m <sup>3</sup> /h).....	38
Graf 2: Souhrn všech měření na budově upravené clonou (@1000 m <sup>3</sup> /h).....	38
Graf 3: Souhrnný graf výsledků testů q <sub>50+/-</sub> @240 m <sup>3</sup> /h .....	40
Graf 4: Hodnoty q <sub>50-</sub> [m <sup>3</sup> /h] @240 m <sup>3</sup> /h.....	41
Graf 5: Hodnoty q <sub>50+</sub> [m <sup>3</sup> /h] @240 m <sup>3</sup> /h.....	41
Graf 6: Hodnoty C <sub>L-</sub> @240 m <sup>3</sup> /h.....	42
Graf 7: Hodnoty C <sub>L+</sub> @240 m <sup>3</sup> /h .....	42
Graf 8: Hodnoty n- @240 m <sup>3</sup> /h.....	42
Graf 9: Hodnoty n+ @240 m <sup>3</sup> /h .....	42
Graf 10: Souhrnný graf q <sub>50+/-</sub> [m <sup>3</sup> /h] @240 m <sup>3</sup> /h.....	45
Graf 11: Souhrnný graf výsledků testů q <sub>50+/-</sub> @1000 m <sup>3</sup> /h .....	46
Graf 12: Hodnoty q <sub>50-</sub> [m <sup>3</sup> /h] @1000 m <sup>3</sup> /h .....	47
Graf 13: Hodnoty q <sub>50+</sub> [m <sup>3</sup> /h] @1000 m <sup>3</sup> /h .....	47
Graf 14: Hodnoty C <sub>L-</sub> @1000 m <sup>3</sup> /h.....	47
Graf 15: Hodnoty C <sub>L+</sub> @1000 m <sup>3</sup> /h .....	47
Graf 16: Souhrnný graf q <sub>50+/-</sub> [m <sup>3</sup> /h] @1000 m <sup>3</sup> /h.....	50
Graf 17: Souhrn všech měření v laboratoři na úrovni 240 m <sup>3</sup> /h.....	58
Graf 18: Souhrn všech měření v laboratoři na úrovni 1000 m <sup>3</sup> /h.....	58
Graf 19: Souhrnný graf výsledků testů q <sub>50+/-</sub> @240 m <sup>3</sup> /h .....	60
Graf 20: Hodnoty q <sub>50-</sub> [m <sup>3</sup> /h] @240 m <sup>3</sup> /h .....	61
Graf 21: Hodnoty q <sub>50+</sub> [m <sup>3</sup> /h] @240 m <sup>3</sup> /h.....	61
Graf 22: Hodnoty C <sub>L-</sub> @240 m <sup>3</sup> /h .....	61
Graf 23: Hodnoty C <sub>L+</sub> @240 m <sup>3</sup> /h.....	61
Graf 24: Souhrnný graf q <sub>50+/-</sub> [m <sup>3</sup> /h] @240 m <sup>3</sup> /h.....	63
Graf 25: Souhrnný graf výsledků testů q <sub>50+/-</sub> @1000 m <sup>3</sup> /h.....	65
Graf 26: Hodnoty q <sub>50-</sub> [m <sup>3</sup> /h] @1000 m <sup>3</sup> /h .....	65
Graf 27: Hodnoty q <sub>50+</sub> [m <sup>3</sup> /h] @1000 m <sup>3</sup> /h .....	65
Graf 28: Hodnoty C <sub>L-</sub> @1000 m <sup>3</sup> /h .....	66
Graf 29: Hodnoty C <sub>L+</sub> @1000 m <sup>3</sup> /h.....	66
Graf 30: Souhrnný graf q <sub>50+/-</sub> [m <sup>3</sup> /h] @1000 m <sup>3</sup> /h.....	68

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Variační koeficienty opakovatelnosti .....	30
Tabulka 2: $q_{50+/-}$ ; základní statistické údaje @240 m <sup>3</sup> /h.....	43
Tabulka 3: Variační rozpětí a strannost operátorů @240 m <sup>3</sup> /h.....	43
Tabulka 4: $q_{50+/-}$ ; základní statistické údaje @1000 m <sup>3</sup> /h.....	48
Tabulka 5: Variační rozpětí a strannost operátorů @1000 m <sup>3</sup> /h.....	49
Tabulka 6: $q_{50+/-}$ ; základní statistické údaje @240 m <sup>3</sup> /h.....	62
Tabulka 7: Variační rozpětí a strannost operátorů @240 m <sup>3</sup> /h.....	62
Tabulka 8: $q_{50+/-}$ ; základní statistické údaje @1000 m <sup>3</sup> /h.....	67
Tabulka 9: Variační rozpětí a strannost operátorů @1000 m <sup>3</sup> /h.....	67
Tabulka 10: Opakovatelnost měření in-situ @240m <sup>3</sup> /h .....	70
Tabulka 11: Opakovatelnost měření in-situ @1000m <sup>3</sup> /h .....	70
Tabulka 12: Opakovatelnost měření v laboratoři @240m <sup>3</sup> /h.....	70
Tabulka 13: Opakovatelnost měření v laboratoři @1000m <sup>3</sup> /h.....	70
Tabulka 14: Reprodukovatelnost měření .....	71
Tabulka 15: Srovnání $v_{XR}$ ; C. Delmotte, J. Laverge .....	72
Tabulka 16: Srovnání $v_{XR}$ ; W. Bracke a spol. ....	73
Tabulka 17: Srovnání $v_{XR}$ ; F. Ledecký .....	73
Tabulka 18: Srovnání $v_{XR}$ ; O. Šafránek .....	74
Tabulka 19: Srovnání $v_{XR}$ ; C. Delmotte, J. Laverge .....	75

## Seznam obrázků

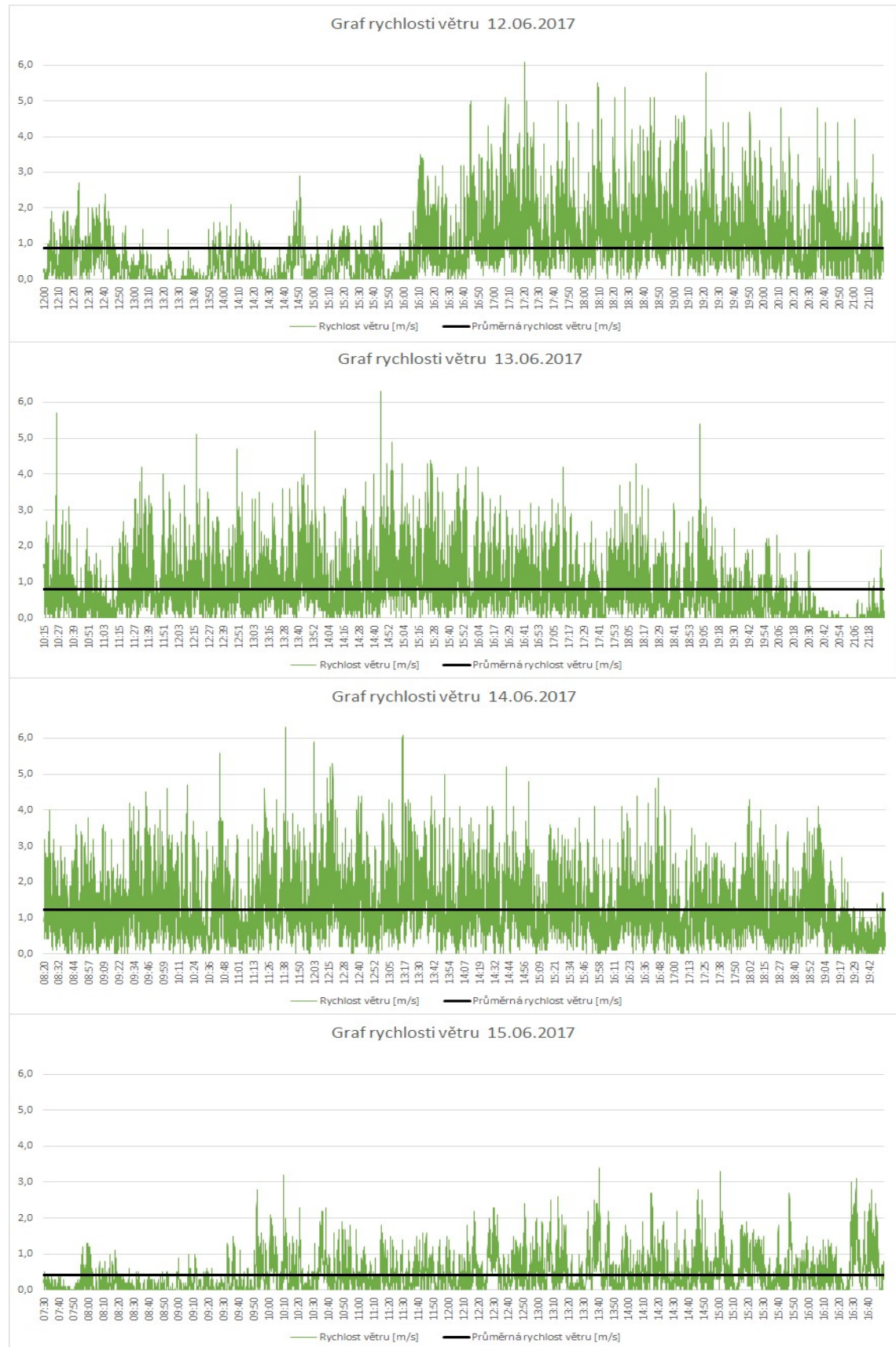
Obrázek 1: Graf závislosti objemového toku $\dot{V}$ ( $q_{env}$ ) na tlakovém rozdílu $\Delta p$ .....	12
Obrázek 2: Umístění ventilátorů systému blower door [5] .....	15
Obrázek 3: Princip metody tlakového spádu s interním ventilátorem [1].....	16
Obrázek 4: Schéma metody s harmonicky proměnným tlakovým spádem [1] .....	17
Obrázek 5: Soubor pasivních domů ATREA v Koberovech [16].....	32
Obrázek 6: Schématické půdorysy 1.NP a 2.NP vzorového domu ATREA .....	33
Obrázek 7: Experimentální objekt – vzorový pasivní dům ATREA .....	33
Obrázek 8: Schéma umístění teplotních čidel a anemometru.....	34
Obrázek 9: Výroba clony a její osazení do okna koupelny .....	35
Obrázek 10: Budova UCEEB ČVUT [17] .....	51
Obrázek 11: Původní stav zkušební komory [15] .....	52
Obrázek 12: Návrh clony pro regulaci průtoku vzduchu .....	53
Obrázek 13: Konfigurace clony @240 m <sup>3</sup> /h (vlevo) a @1000 m <sup>3</sup> /h (vpravo).....	54

## Seznam příloh

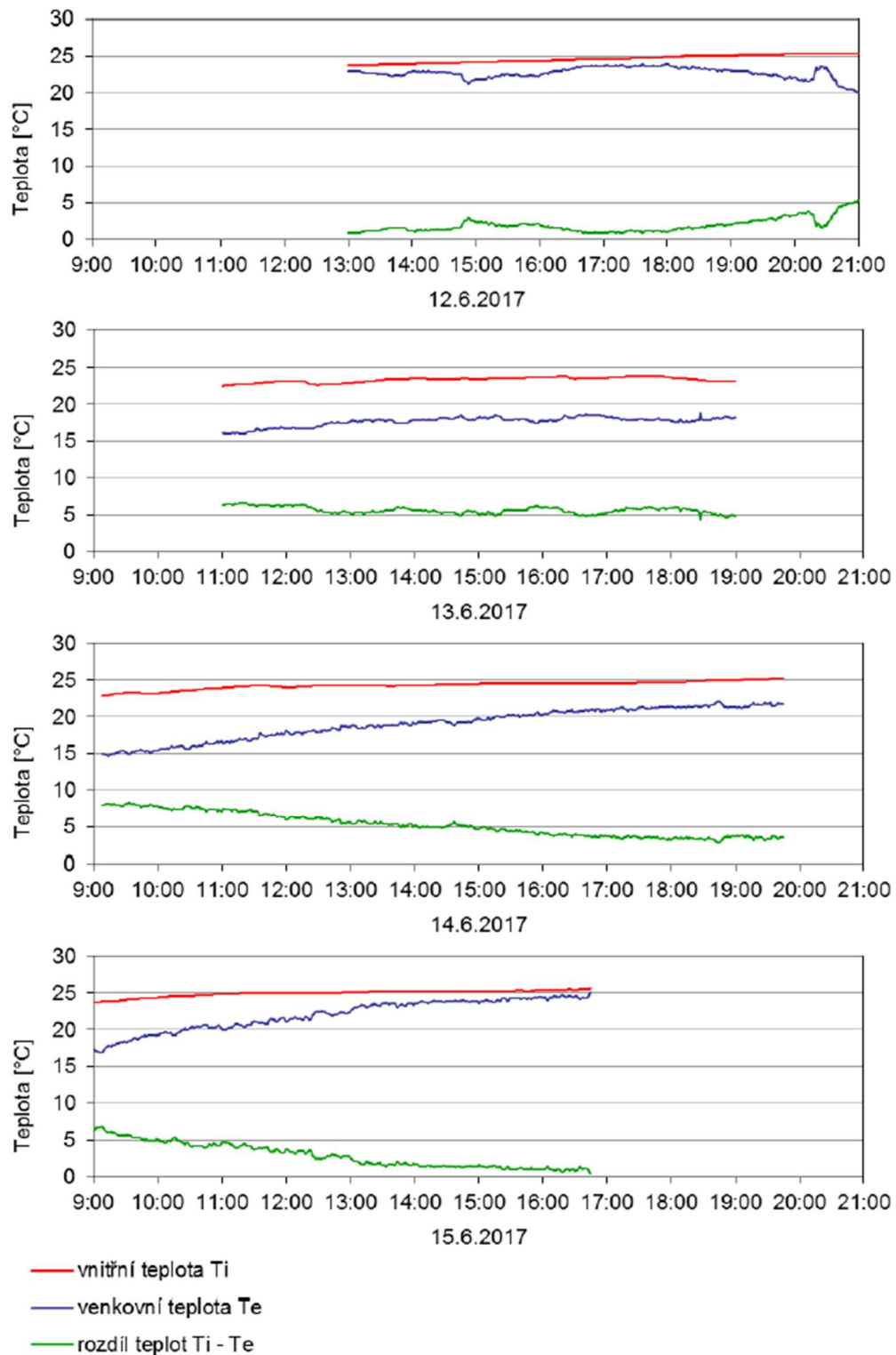
Příloha 1: Grafy rychlosti větru v průběhu experimentu .....	86
Příloha 2: Průběh teplot v době trvání experimentu [8].....	87
Příloha 3: Souhrn měření všech operátorů na neupravené budově.....	88
Příloha 4: Kvartilový graf výsledků měření na neupravené budově .....	88
Příloha 5: Souhrn měření všech operátorů na budově upravené clonou.....	89
Příloha 6: Kvartilový graf výsledků měření na budově upravené clonou.....	89
Příloha 7: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 1 na neupravené budově .....	89
Příloha 8: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 2 na neupravené budově .....	90
Příloha 9: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 3 na neupravené budově .....	90
Příloha 10: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 4 na neupravené budově ....	90
Příloha 11: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 5 na neupravené budově ....	90
Příloha 12: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 1 na upravené budově .....	91
Příloha 13: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 2 na upravené budově .....	91
Příloha 14: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 3 na upravené budově .....	91
Příloha 15: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 4 na upravené budově .....	91
Příloha 16: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 5 na upravené budově .....	92
Příloha 17: Upravený difuzor; geotextilie na rámu .....	92
Příloha 18: Osazení měřících čidel (teplota, 2x tlak, rychlost průtoku vzduchu) .....	93
Příloha 19: Detail konfigurace clony na zkušební komoře.....	93
Příloha 20: Souhrn měření všech operátorů v laboratoři @240 m <sup>3</sup> /h.....	94
Příloha 21: Kvartilový graf výsledků měření v laboratoři @240 m <sup>3</sup> /h .....	94
Příloha 22: Souhrn měření všech operátorů v laboratoři @1000 m <sup>3</sup> /h.....	95
Příloha 23: Kvartilový graf výsledků měření v laboratoři @1000 m <sup>3</sup> /h .....	95
Příloha 24: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 1 v laboratoři @240 m <sup>3</sup> /h ....	95
Příloha 25: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 2 v laboratoři @240 m <sup>3</sup> /h ....	96
Příloha 26: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 3 v laboratoři @240 m <sup>3</sup> /h ....	96
Příloha 27: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 4 v laboratoři @240 m <sup>3</sup> /h ....	96
Příloha 28: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 1 v laboratoři @1000 m <sup>3</sup> /h ..	96
Příloha 29: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 2 v laboratoři @1000 m <sup>3</sup> /h ..	97
Příloha 30: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 3 v laboratoři @1000 m <sup>3</sup> /h ..	97
Příloha 31: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 4 v laboratoři @1000 m <sup>3</sup> /h ..	97

## Přílohy

### Příloha 1: Grafy rychlosti větru v průběhu experimentu



Příloha 2: Průběh teplot v době trvání experimentu [8]

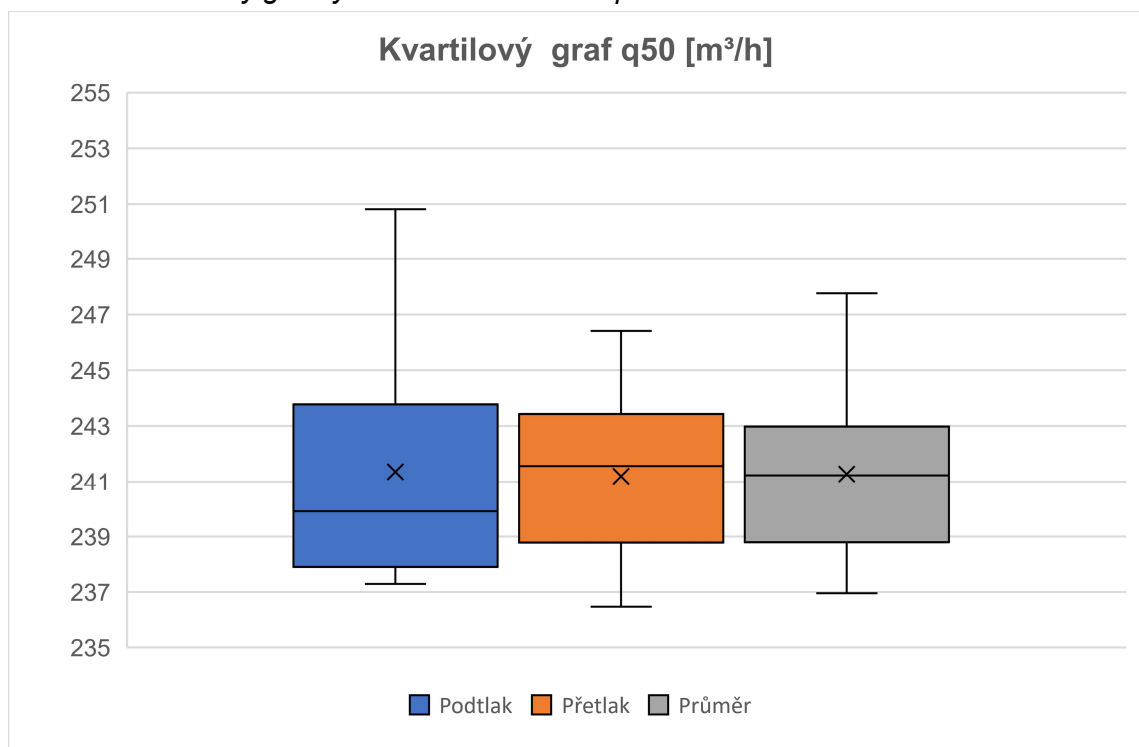




Příloha 3: Souhrn měření všech operátorů na neupravené budově

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
1	1	246,79	0,76	11,34	0,79	236,47	0,73	13,11	0,74	241,63	0,74	25,0	22,0
	2	250,81	0,77	15,47	0,71	244,73	0,75	11,88	0,77	247,77	0,76	25,0	21,5
	3	249,92	0,77	14,55	0,73	241,63	0,74	14,94	0,71	245,78	0,75	25,0	21,0
2	1	238,18	0,73	15,30	0,70	237,90	0,73	15,60	0,70	238,04	0,73	24,2	22,1
	2	238,49	0,73	13,81	0,73	237,41	0,73	15,02	0,71	237,95	0,73	24,4	22,4
	3	237,60	0,73	14,04	0,72	239,65	0,74	14,08	0,72	238,63	0,73	24,6	23,4
3	1	244,04	0,75	15,12	0,71	241,94	0,74	10,44	0,80	242,99	0,75	22,0	18,0
	2	243,52	0,75	17,46	0,67	241,57	0,74	20,28	0,63	242,54	0,74	24,0	18,0
	3	240,06	0,74	12,85	0,75	246,42	0,76	16,26	0,69	243,24	0,75	24,0	19,0
4	1	237,29	0,73	11,04	0,78	236,62	0,73	13,20	0,74	236,96	0,73	24,7	21,5
	2	237,60	0,73	14,32	0,72	244,86	0,75	14,71	0,72	241,23	0,74	24,7	21,5
	3	239,91	0,74	14,23	0,72	240,36	0,74	13,58	0,73	240,14	0,74	24,7	21,5
5	1	237,61	0,73	14,24	0,72	240,31	0,74	15,52	0,70	238,96	0,73	24,0	20,5
	2	240,07	0,74	15,26	0,70	245,89	0,75	15,14	0,71	242,98	0,75	25,5	21,0
	3	238,41	0,73	12,32	0,76	242,12	0,74	15,42	0,70	240,27	0,74	25,5	21,0
minimum	$x_{\min}$	237,29	0,73	11,04	0,67	236,47	0,73	10,44	0,63	236,96	0,73	22,00	18,00
aritmetický průměr	$\bar{x}$	241,35	0,74	14,09	0,73	241,19	0,74	14,61	0,72	241,27	0,74	24,48	20,96
maximum	$x_{\max}$	250,81	0,77	17,46	0,79	246,42	0,76	20,28	0,80	247,77	0,76	25,50	23,44
rozptyl	$\sigma^2$	19,67	0,00	2,61	0,00	9,96	0,00	4,56	0,00	8,58	0,00	0,67	2,23
směrodatná odchylka	$\sigma$	4,59	0,01	1,67	0,03	3,27	0,01	2,21	0,04	3,03	0,01	0,85	1,54
variační koeficient	$v_s$	1,90%	1,90%	11,86%	4,18%	1,35%	1,35%	15,12%	5,31%	1,26%	1,26%	3,45%	7,37%

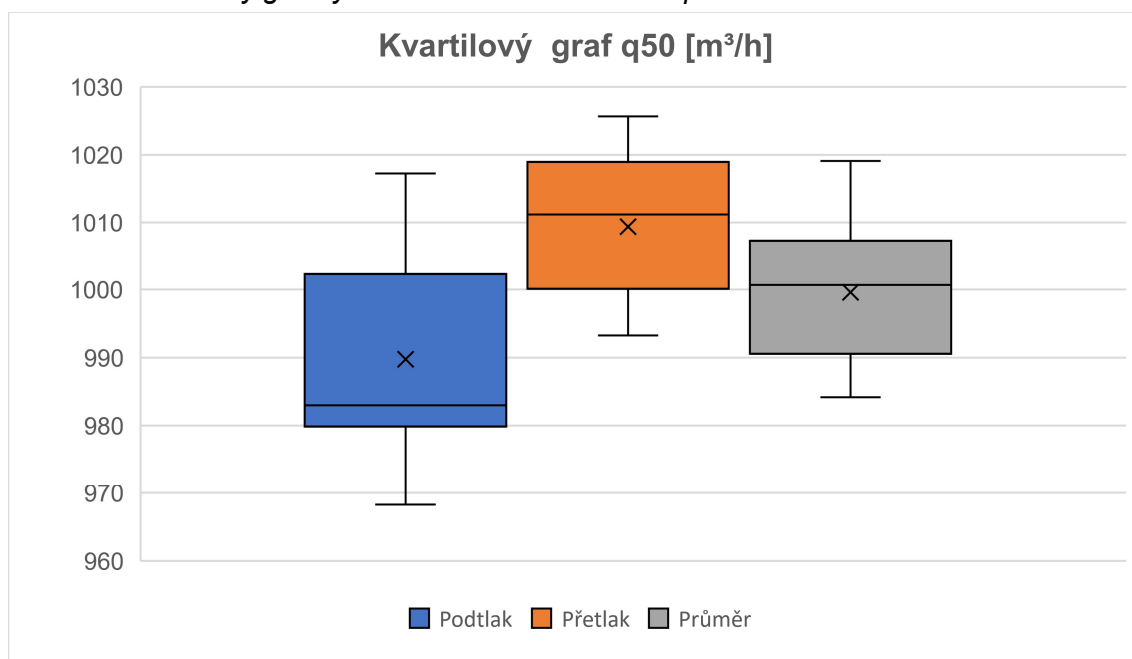
Příloha 4: Kvartilový graf výsledků měření na neupravené budově



Příloha 5: Souhrn měření všech operátorů na budově upravené clonou

Laboratoř	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
1	4	1016,35	3,12	117,06	0,55	1021,79	3,13	120,62	0,55	1019,07	3,13	23,0	22,0
	5	1008,20	3,09	122,01	0,54	1011,20	3,10	118,42	0,55	1009,70	3,10	23,0	22,0
	6	1005,08	3,08	118,17	0,55	996,48	3,06	116,47	0,55	1000,78	3,07	23,0	22,0
2	4	975,07	2,99	114,71	0,55	999,85	3,07	129,57	0,52	987,46	3,03	25,3	23,8
	5	979,05	3,00	114,78	0,55	999,32	3,07	120,15	0,54	989,18	3,03	25,3	24,1
	6	975,09	2,99	115,17	0,55	993,27	3,05	121,15	0,54	984,18	3,02	25,4	24,4
3	4	1017,26	3,12	110,98	0,57	1017,56	3,12	123,22	0,54	1017,41	3,12	24,0	19,0
	5	993,25	3,05	94,69	0,60	1022,67	3,14	104,83	0,58	1007,96	3,09	24,0	19,0
	6	980,64	3,01	126,11	0,52	1025,68	3,15	145,73	0,50	1003,16	3,08	24,0	19,0
4	4	999,50	3,07	128,34	0,52	1013,85	3,11	111,72	0,56	1006,68	3,09	24,6	20,5
	5	980,96	3,01	113,40	0,55	1020,35	3,13	129,68	0,53	1000,66	3,07	24,6	20,5
	6	968,29	2,97	111,78	0,55	1003,43	3,08	114,25	0,56	985,86	3,02	24,6	20,5
5	4	982,97	3,02	113,55	0,55	1002,47	3,08	119,98	0,54	992,72	3,05	25,5	21,0
	5	983,49	3,02	117,61	0,54	1000,36	3,07	116,55	0,55	991,93	3,04	25,0	21,0
	6	981,37	3,01	110,88	0,56	1012,42	3,11	115,22	0,56	996,89	3,06	25,0	21,0
minimum	X <sub>min</sub>	968,29	2,97	94,69	0,52	993,27	3,05	104,83	0,50	984,18	3,02	23,00	19,00
aritmetický průměr	$\bar{x}$	989,77	3,04	115,28	0,55	1009,38	3,10	120,50	0,54	999,58	3,07	24,42	21,32
maximum	X <sub>max</sub>	1017,26	3,12	128,34	0,60	1025,68	3,15	145,73	0,58	1019,07	3,13	25,50	24,41
rozptyl	$\sigma^2$	231,20	0,00	55,41	0,00	106,58	0,00	82,48	0,00	115,30	0,00	0,74	2,86
směrodatná odchylka	$\sigma$	15,74	0,05	7,71	0,02	10,69	0,03	9,40	0,02	11,11	0,03	0,89	1,75
variace koeficient	v <sub>s</sub>	1,59%	1,59%	6,68%	3,23%	1,06%	1,06%	7,80%	3,49%	1,11%	1,11%	3,64%	8,21%

Příloha 6: Kvartilový graf výsledků měření na budově upravené clonou



Příloha 7: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 1 na neupravené budově

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
1	1	246,79	0,76	11,34	0,79	236,47	0,73	13,11	0,74	241,63	0,74	25,0	22,0
	2	250,81	0,77	15,47	0,71	244,73	0,75	11,88	0,77	247,77	0,76	25,0	21,5
	3	249,92	0,77	14,55	0,73	241,63	0,74	14,94	0,71	245,78	0,75	25,0	21,0
minimum	X <sub>min</sub>	246,79	0,76	11,34	0,71	236,47	0,73	11,88	0,71	241,63	0,74	25,0	21,0
aritmetický průměr	$\bar{x}$	249,17	0,76	13,79	0,74	240,94	0,74	13,31	0,74	245,06	0,75	25,0	21,5
maximum	X <sub>max</sub>	250,81	0,77	15,47	0,79	244,73	0,75	14,94	0,77	247,77	0,76	25,0	22,0
variace rozpětí	R <sub>11</sub>	4,02	0,01	4,14	0,08	8,27	0,03	3,06	0,06	6,14	0,02	0,0	1,0
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	2,98	0,00	3,14	0,00	11,63	0,00	1,58	0,00	6,55	0,00	0,00	0,17
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	2,11	0,01	2,17	0,04	4,18	0,01	1,54	0,03	3,13	0,01	0,0	0,5
variace koeficient	v <sub>s</sub>	0,85%	0,85%	15,74%	5,38%	1,73%	1,73%	11,57%	4,18%	1,28%	1,28%	0,00%	2,33%
strannost operátora	B	7,82	0,02	-0,30	0,01	-0,25	0,00	-1,30	0,02	3,78	0,01	0,52	0,54

Příloha 8: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 2 na neupravené budově

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
2	1	238,18	0,73	15,30	0,70	237,90	0,73	15,60	0,70	238,04	0,73	24,2	22,1
	2	238,49	0,73	13,81	0,73	237,41	0,73	15,02	0,71	237,95	0,73	24,4	22,4
	3	237,60	0,73	14,04	0,72	239,65	0,74	14,08	0,72	238,63	0,73	24,6	23,4
minimum	X <sub>min</sub>	237,60	0,73	13,81	0,70	237,41	0,73	14,08	0,70	237,95	0,73	24,2	22,1
aritmetický průměr	$\bar{x}$	238,09	0,73	14,38	0,72	238,32	0,73	14,90	0,71	238,21	0,73	24,4	22,7
maximum	X <sub>max</sub>	238,49	0,73	15,30	0,73	239,65	0,74	15,60	0,72	238,63	0,73	24,6	23,4
variální rozpětí	R <sub>21</sub>	0,89	0,00	1,48	0,03	2,24	0,01	1,52	0,03	0,68	0,00	0,4	1,3
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	0,14	0,00	0,43	0,00	0,93	0,00	0,39	0,00	0,09	0,00	0,03	0,33
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	0,45	0,00	0,80	0,01	1,18	0,00	0,77	0,01	0,37	0,00	0,2	0,7
variální koeficient	v <sub>s</sub>	0,19%	0,19%	5,55%	1,95%	0,50%	0,50%	5,14%	2,02%	0,15%	0,15%	0,80%	3,09%
strannost operátora	B	-3,26	-0,01	0,29	-0,01	-2,87	-0,01	0,29	-0,01	-3,07	-0,01	-0,12	1,69

Příloha 9: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 3 na neupravené budově

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
3	1	244,04	0,75	15,12	0,71	241,94	0,74	10,44	0,80	242,99	0,75	22,0	18,0
	2	243,52	0,75	17,46	0,67	241,57	0,74	20,28	0,63	242,54	0,74	24,0	18,0
	3	240,06	0,74	12,85	0,75	246,42	0,76	16,26	0,69	243,24	0,75	24,0	19,0
minimum	X <sub>min</sub>	240,06	0,74	12,85	0,67	241,57	0,74	10,44	0,63	242,54	0,74	22,0	18,0
aritmetický průměr	$\bar{x}$	242,54	0,74	15,14	0,71	243,31	0,75	15,66	0,71	242,92	0,75	23,3	18,3
maximum	X <sub>max</sub>	244,04	0,75	17,46	0,75	246,42	0,76	20,28	0,80	243,24	0,75	24,0	19,0
variální rozpětí	R <sub>31</sub>	3,98	0,01	4,61	0,07	4,85	0,01	9,85	0,17	0,70	0,00	2,0	1,0
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	3,12	0,00	3,54	0,00	4,86	0,00	16,34	0,00	0,08	0,00	0,89	0,22
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	2,16	0,01	2,31	0,04	2,70	0,01	4,95	0,09	0,35	0,00	1,2	0,6
variální koeficient	v <sub>s</sub>	0,89%	0,89%	15,22%	5,25%	1,11%	1,11%	31,61%	12,13%	0,15%	0,15%	4,95%	3,15%
strannost operátora	B	1,19	0,00	1,05	-0,02	2,11	0,01	1,05	-0,01	1,65	0,01	-1,15	-2,63

Příloha 10: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 4 na neupravené budově

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
4	1	237,29	0,73	11,04	0,78	236,62	0,73	13,20	0,74	236,96	0,73	24,7	21,5
	2	237,60	0,73	14,32	0,72	244,86	0,75	14,71	0,72	241,23	0,74	24,7	21,5
	3	239,91	0,74	14,23	0,72	240,36	0,74	13,58	0,73	240,14	0,74	24,7	21,5
minimum	X <sub>min</sub>	237,29	0,73	11,04	0,72	236,62	0,73	13,20	0,72	236,96	0,73	24,7	21,5
aritmetický průměr	$\bar{x}$	238,27	0,73	13,19	0,74	240,62	0,74	13,83	0,73	239,44	0,73	24,7	21,5
maximum	X <sub>max</sub>	239,91	0,74	14,32	0,78	244,86	0,75	14,71	0,74	241,23	0,74	24,7	21,5
variální rozpětí	R <sub>41</sub>	2,62	0,01	3,28	0,07	8,24	0,03	1,51	0,02	4,27	0,01	0,0	0,0
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	1,36	0,00	2,33	0,00	11,34	0,00	0,41	0,00	3,28	0,00	0,00	0,00
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	1,43	0,00	1,87	0,04	4,12	0,01	0,79	0,01	2,22	0,01	0,0	0,0
variální koeficient	v <sub>s</sub>	0,60%	0,60%	14,17%	5,01%	1,71%	1,71%	5,68%	1,39%	0,93%	0,93%	0,00%	0,00%
strannost operátora	B	-3,08	-0,01	-0,90	0,01	-0,58	0,00	-0,78	0,01	-1,83	-0,01	0,22	0,54

Příloha 11: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 5 na neupravené budově

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
5	1	237,61	0,73	14,24	0,72	240,31	0,74	15,52	0,70	238,96	0,73	24,0	20,5
	2	240,07	0,74	15,26	0,70	245,89	0,75	15,14	0,71	242,98	0,75	25,5	21,0
	3	238,41	0,73	12,32	0,76	242,12	0,74	15,42	0,70	240,27	0,74	25,5	21,0
minimum	X <sub>min</sub>	237,61	0,73	12,32	0,70	240,31	0,74	15,14	0,70	238,96	0,73	24,0	20,5
aritmetický průměr	$\bar{x}$	238,69	0,73	13,94	0,73	242,77	0,74	15,36	0,71	240,73	0,74	25,0	20,8
maximum	X <sub>max</sub>	240,07	0,74	15,26	0,76	245,89	0,75	15,52	0,71	242,98	0,75	25,5	21,0
variální rozpětí	R <sub>51</sub>	2,46	0,01	2,94	0,05	5,58	0,02	0,37	0,01	4,02	0,01	1,5	0,5
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	1,05	0,00	1,49	0,00	5,41	0,00	0,02	0,00	2,80	0,00	0,50	0,06
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	1,25	0,00	1,49	0,03	2,85	0,01	0,19	0,01	2,05	0,01	0,9	0,3
variální koeficient	v <sub>s</sub>	0,53%	0,53%	10,72%	3,75%	1,17%	1,17%	1,26%	0,88%	0,85%	0,85%	3,46%	1,39%
strannost operátora	B	-2,66	-0,01	-0,15	0,00	1,58	0,00	0,75	-0,01	-0,54	0,00	0,52	-0,13

Příloha 12: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 1 na upravené budově

Laboratoř	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
1	4	1016,35	3,12	117,06	0,55	1021,79	3,13	120,62	0,55	1019,07	3,13	23,0	22,0
	5	1008,20	3,09	122,01	0,54	1011,20	3,10	118,42	0,55	1009,70	3,10	23,0	22,0
	6	1005,08	3,08	118,17	0,55	996,48	3,06	116,47	0,55	1000,78	3,07	23,0	22,0
minimum	X <sub>min</sub>	1005,08	3,08	117,06	0,54	996,48	3,06	116,47	0,55	1000,78	3,07	23,0	22,0
aritmetický průměr	$\bar{x}$	1009,88	3,10	119,08	0,55	1009,82	3,10	118,50	0,55	1009,85	3,10	23,0	22,0
maximum	X <sub>max</sub>	1016,35	3,12	122,01	0,55	1021,79	3,13	120,62	0,55	1019,07	3,13	23,0	22,0
variální rozpětí	R <sub>12</sub>	11,27	0,03	4,95	0,01	25,31	0,08	4,15	0,00	18,29	0,06	0,0	0,0
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	22,56	0,00	4,49	0,00	107,68	0,00	2,88	0,00	55,74	0,00	0,00	0,00
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	5,82	0,02	2,60	0,01	12,71	0,04	2,08	0,00	9,14	0,03	0,0	0,0
variální koeficient	v <sub>s</sub>	0,58%	0,58%	2,18%	1,16%	1,26%	1,26%	1,75%	0,25%	0,91%	0,91%	0,00%	0,00%
strannost operátora	B	20,11	0,06	3,80	0,00	0,44	0,00	-2,00	0,00	10,27	0,03	-1,42	0,68

Příloha 13: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 2 na upravené budově

Laboratoř	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
2	4	975,07	2,99	114,71	0,55	999,85	3,07	129,57	0,52	987,46	3,03	25,3	23,8
	5	979,05	3,00	114,78	0,55	999,32	3,07	120,15	0,54	989,18	3,03	25,3	24,1
	6	975,09	2,99	115,17	0,55	993,27	3,05	121,15	0,54	984,18	3,02	25,4	24,4
minimum	X <sub>min</sub>	975,07	2,99	114,71	0,55	993,27	3,05	120,15	0,52	984,18	3,02	25,3	23,8
aritmetický průměr	$\bar{x}$	976,40	3,00	114,89	0,55	997,48	3,06	123,62	0,53	986,94	3,03	25,3	24,1
maximum	X <sub>max</sub>	979,05	3,00	115,17	0,55	999,85	3,07	129,57	0,54	989,18	3,03	25,4	24,4
variální rozpětí	R <sub>22</sub>	3,98	0,01	0,46	0,00	6,58	0,02	9,42	0,02	5,01	0,02	0,1	0,6
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	3,50	0,00	0,04	0,00	8,91	0,00	17,87	0,00	4,31	0,00	0,00	0,07
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	2,29	0,01	0,25	0,00	3,66	0,01	5,18	0,01	2,54	0,01	0,1	0,3
variální koeficient	v <sub>s</sub>	0,23%	0,23%	0,21%	0,17%	0,37%	0,37%	4,19%	1,91%	0,26%	0,26%	0,27%	1,34%
strannost operátora	B	-13,37	-0,04	-0,40	0,00	-11,90	-0,04	3,12	-0,01	-12,63	-0,04	0,92	2,76

Příloha 14: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 3 na upravené budově

Laboratoř	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
3	4	1017,26	3,12	110,98	0,57	1017,56	3,12	123,22	0,54	1017,41	3,12	24,0	19,0
	5	993,25	3,05	94,69	0,60	1022,67	3,14	104,83	0,58	1007,96	3,09	24,0	19,0
	6	980,64	3,01	126,11	0,52	1025,68	3,15	145,73	0,50	1003,16	3,08	24,0	19,0
minimum	X <sub>min</sub>	980,64	3,01	94,69	0,52	1017,56	3,12	104,83	0,50	1003,16	3,08	24,0	19,0
aritmetický průměr	$\bar{x}$	997,05	3,06	110,59	0,56	1021,97	3,13	124,59	0,54	1009,51	3,10	24,0	19,0
maximum	X <sub>max</sub>	1017,26	3,12	126,11	0,60	1025,68	3,15	145,73	0,58	1017,41	3,12	24,0	19,0
variální rozpětí	R <sub>32</sub>	36,62	0,11	31,42	0,08	8,11	0,02	40,90	0,08	14,25	0,04	0,0	0,0
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	230,74	0,00	164,60	0,00	11,22	0,00	279,79	0,00	35,06	0,00	0,00	0,00
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	18,60	0,06	15,71	0,04	4,10	0,01	20,49	0,04	7,25	0,02	0,0	0,0
variální koeficient	v <sub>s</sub>	1,87%	1,87%	14,21%	6,80%	0,40%	0,40%	16,44%	7,73%	0,72%	0,72%	0,00%	0,00%
strannost operátora	B	7,28	0,02	-4,69	0,01	12,59	0,04	4,09	0,00	9,94	0,03	-0,42	-2,32

Příloha 15: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 4 na upravené budově

Laboratoř	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	CL [m³/(h Pan)]	n [-]	q50 [m³/h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
4	4	999,50	3,07	128,34	0,52	1013,85	3,11	111,72	0,56	1006,68	3,09	24,6	20,5
	5	980,96	3,01	113,40	0,55	1020,35	3,13	129,68	0,53	1000,66	3,07	24,6	20,5
	6	968,29	2,97	111,78	0,55	1003,43	3,08	114,25	0,56	985,86	3,02	24,6	20,5
minimum	X <sub>min</sub>	968,29	2,97	111,78	0,52	1003,43	3,08	111,72	0,53	985,86	3,02	24,6	20,5
aritmetický průměr	$\bar{x}$	982,92	3,02	117,84	0,54	1012,54	3,11	118,55	0,55	997,73	3,06	24,6	20,5
maximum	X <sub>max</sub>	999,50	3,07	128,34	0,55	1020,35	3,13	129,68	0,56	1006,68	3,09	24,6	20,5
variální rozpětí	R <sub>42</sub>	31,21	0,10	16,56	0,03	16,92	0,05	17,96	0,04	20,81	0,06	0,0	0,0
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	164,23	0,00	55,55	0,00	48,55	0,00	63,01	0,00	76,49	0,00	0,00	0,00
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	15,70	0,05	9,13	0,02	8,53	0,03	9,72	0,02	10,71	0,03	0,0	0,0
variální koeficient	v <sub>s</sub>	1,60%	1,60%	7,75%	2,88%	0,84%	0,84%	8,20%	3,48%	1,07%	1,07%	0,00%	0,00%
strannost operátora	B	-6,85	-0,02	2,56	-0,01	3,17	0,01	-1,95	0,00	-1,84	-0,01	0,18	-0,82

Příloha 16: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 5 na upravené budově

Laboratoř	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
5	4	982,97	3,02	113,55	0,55	1002,47	3,08	119,98	0,54	992,72	3,05	25,5	21,0
	5	983,49	3,02	117,61	0,54	1000,36	3,07	116,55	0,55	991,93	3,04	25,0	21,0
	6	981,37	3,01	110,88	0,56	1012,42	3,11	115,22	0,56	996,89	3,06	25,0	21,0
minimum	X <sub>min</sub>	981,37	3,01	110,88	0,54	1000,36	3,07	115,22	0,54	991,93	3,04	25,0	21,0
aritmetický průměr	$\bar{x}$	982,61	3,01	114,01	0,55	1005,08	3,08	117,25	0,55	993,85	3,05	25,2	21,0
maximum	X <sub>max</sub>	983,49	3,02	117,61	0,56	1012,42	3,11	119,98	0,56	996,89	3,06	25,5	21,0
variální rozpětí	R <sub>S2</sub>	2,12	0,01	6,74	0,01	12,05	0,04	4,76	0,01	4,97	0,02	0,5	0,0
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	0,81	0,00	7,67	0,00	27,64	0,00	4,01	0,00	4,75	0,00	0,06	0,00
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	1,11	0,00	3,39	0,01	6,44	0,02	2,45	0,01	2,67	0,01	0,3	0,0
variální koeficient	v <sub>s</sub>	0,11%	0,11%	2,98%	1,33%	0,64%	0,64%	2,09%	1,17%	0,27%	0,27%	1,15%	0,00%
strannost operátora	B	-7,16	-0,02	-1,27	0,00	-4,30	-0,01	-3,25	0,01	-5,73	-0,02	0,75	-0,32

Příloha 17: Upravený difuzor; geotextilie na rámu

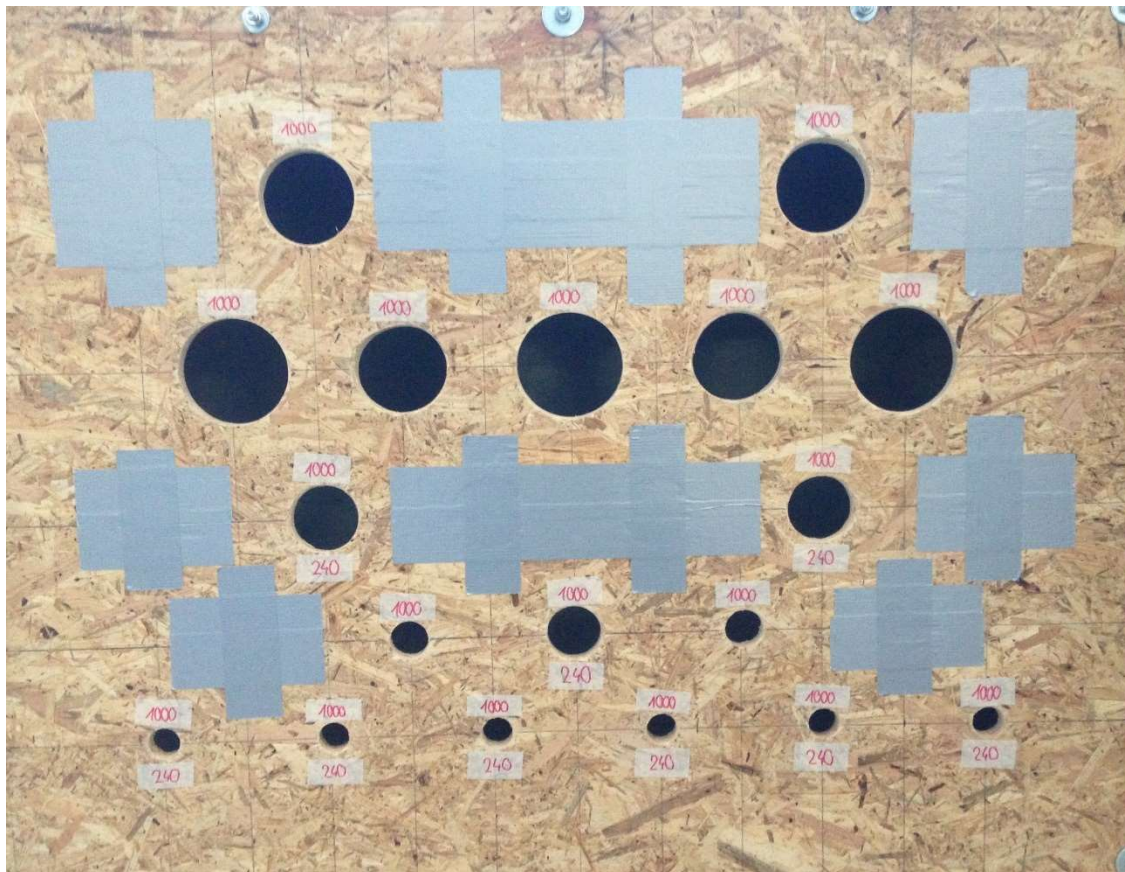




Příloha 18: Osazení měřících čidel (teplota, 2x tlak, rychlost průtoku vzduchu)

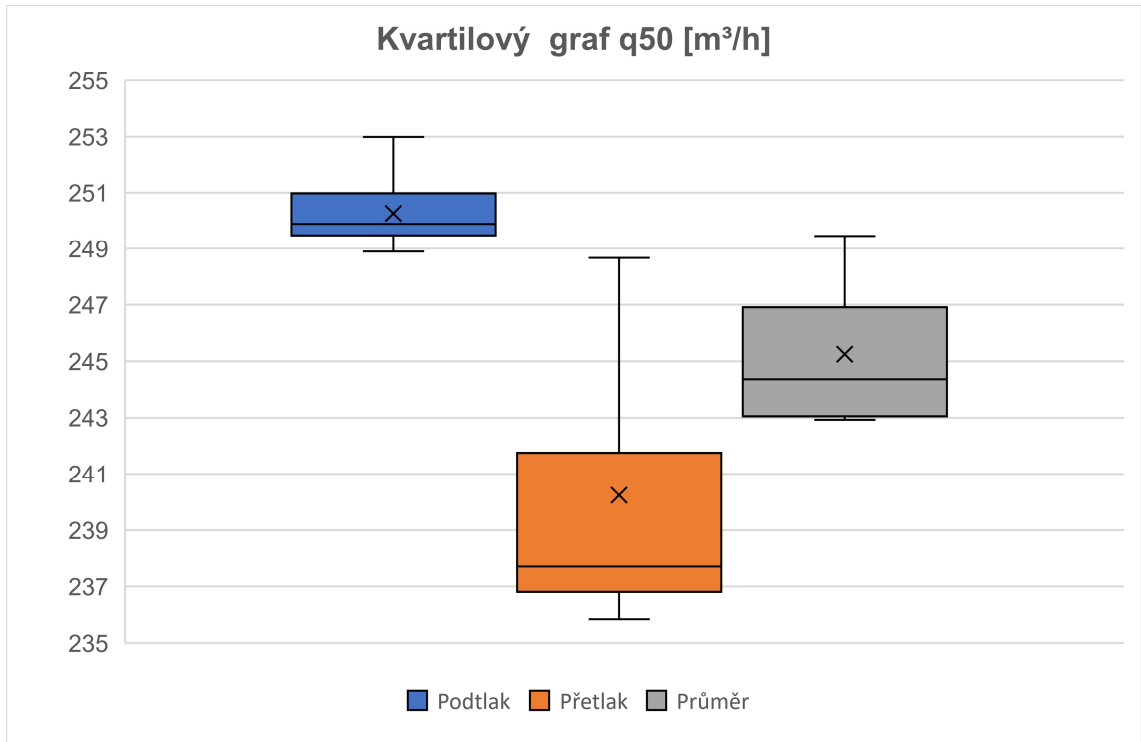


Příloha 19: Detail konfigurace clony na zkušební komoře



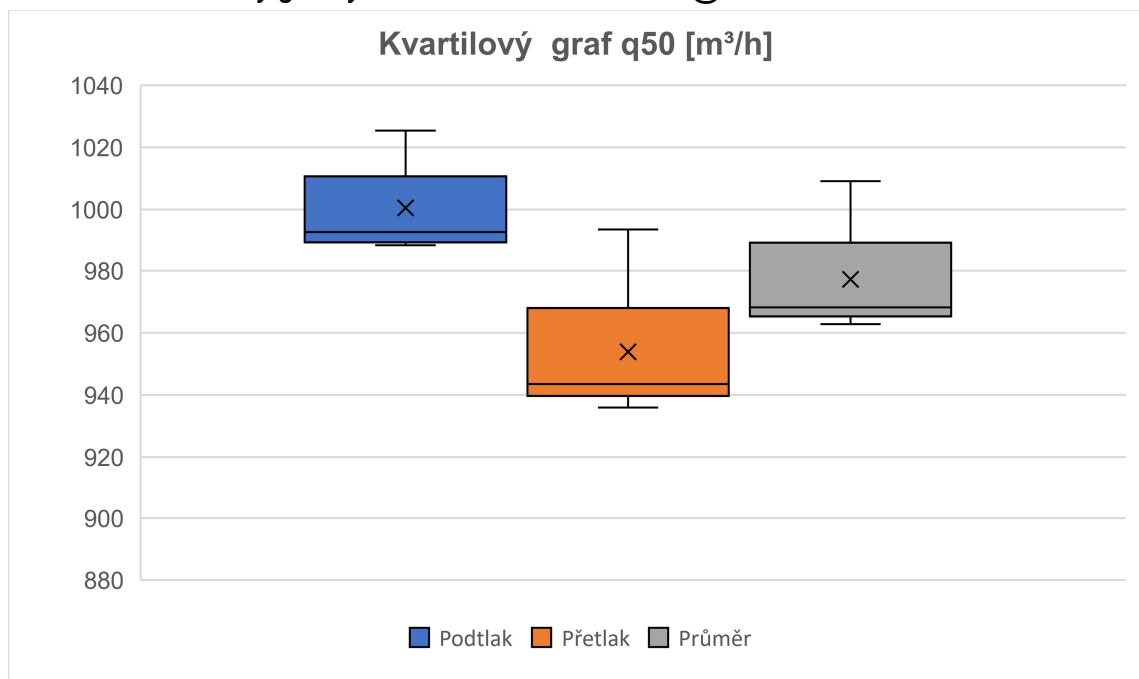
Příloha 20: Souhrn měření všech operátorů v laboratoři @240 m<sup>3</sup>/h

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
1	1	249,32	44,52	28,96	0,55	248,03	44,29	28,18	0,56	248,67	44,41	19,5	19,9
	2	249,59	44,57	28,72	0,55	249,28	44,51	27,71	0,56	249,43	44,54	18,8	19,2
	3	250,24	44,69	28,97	0,55	248,67	44,41	28,20	0,56	249,46	44,55	19,1	20,7
2	1	252,98	45,18	31,05	0,54	239,66	42,80	28,39	0,55	246,32	43,99	22,1	22,6
	2	251,16	44,85	31,04	0,53	237,76	42,46	28,95	0,54	244,46	43,65	22,1	22,6
	3	250,92	44,81	30,85	0,54	237,62	42,43	28,66	0,54	244,27	43,62	22,2	22,6
3	1	249,07	44,48	31,86	0,53	236,94	42,31	29,73	0,53	243,00	43,39	18,3	18,3
	2	248,90	44,45	31,62	0,53	237,66	42,44	31,22	0,52	243,28	43,44	18,8	18,8
	3	249,76	44,60	31,88	0,53	236,39	42,21	30,10	0,53	243,07	43,41	19,3	19,3
4	1	249,54	44,56	31,22	0,53	236,42	42,22	30,16	0,53	242,98	43,39	20,7	20,7
	2	250,02	44,65	31,08	0,53	235,84	42,11	29,69	0,53	242,93	43,38	20,6	20,6
	3	251,64	44,94	31,14	0,53	238,54	42,60	30,39	0,53	245,09	43,77	20,6	20,6
minimum	x <sub>min</sub>	248,90	44,45	28,72	0,53	235,84	42,11	27,71	0,52	242,93	43,38	18,30	18,30
aritmetický průměr	$\bar{x}$	250,26	44,69	30,70	0,54	240,23	42,90	29,28	0,54	245,25	43,79	20,17	20,49
maximum	x <sub>max</sub>	252,98	45,18	31,88	0,55	249,28	44,51	31,22	0,56	249,46	44,55	22,18	22,63
rozptyl	$\sigma^2$	1,34	0,04	1,20	0,00	24,67	0,79	1,08	0,00	6,16	0,20	1,78	2,03
směrodatná odchylka	$\sigma$	1,21	0,22	1,14	0,01	5,19	0,93	1,09	0,01	2,59	0,46	1,39	1,49
variční koeficient	v <sub>s</sub>	0,48%	0,48%	3,72%	1,80%	2,16%	2,16%	3,71%	2,60%	1,06%	1,06%	6,92%	7,26%

Příloha 21: Kvartilový graf výsledků měření v laboratoři @240 m<sup>3</sup>/h

Příloha 22: Souhrn měření všech operátorů v laboratoři @1000 m<sup>3</sup>/h

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty		
		q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]	
1	4	1024,66	182,98	97,56	0,60	993,61	177,43	96,61	0,60	1009,14	180,20	21,4	22,3	
	5	1025,44	183,11	96,93	0,60	975,24	174,15	93,59	0,60	1000,34	178,63	21,4	21,8	
	6	1023,27	182,73	97,65	0,60	974,82	174,08	92,47	0,60	999,05	178,40	21,8	22,2	
2	4	989,64	176,72	89,27	0,61	935,95	167,13	92,06	0,59	962,79	171,93	17,7	17,9	
	5	988,56	176,53	90,10	0,61	938,13	167,52	92,96	0,59	963,35	172,03	17,8	18,0	
	6	989,31	176,66	90,76	0,61	938,89	167,66	91,42	0,60	964,10	172,16	17,8	18,1	
3	4	992,73	177,27	81,91	0,64	940,47	167,94	81,32	0,63	966,60	172,61	19,5	19,5	
	5	992,98	177,32	81,54	0,64	943,57	168,49	82,20	0,62	968,27	172,91	19,4	19,4	
	6	992,68	177,26	81,95	0,64	942,06	168,23	83,46	0,62	967,37	172,75	19,5	19,5	
4	4	988,95	176,60	82,89	0,63	948,92	169,45	81,64	0,63	968,93	173,02	20,0	20,0	
	5	998,04	178,22	82,86	0,64	961,23	171,65	84,02	0,62	979,64	174,94	20,3	20,3	
	6													
minimum		X <sub>min</sub>	988,56	176,53	81,54	0,60	935,95	167,13	81,32	0,59	962,79	171,93	17,73	17,92
aritmetický průměr		$\bar{x}$	1000,57	178,67	88,49	0,62	953,90	170,34	88,34	0,61	977,23	174,51	19,70	19,91
maximum		X <sub>max</sub>	1025,44	183,11	97,65	0,64	993,61	177,43	96,61	0,63	1009,14	180,20	21,80	22,30
rozptyl		$\sigma^2$	220,68	7,04	40,31	0,00	342,90	10,93	30,18	0,00	269,69	8,60	1,97	2,39
směrodatná odchylka		$\sigma$	15,58	2,78	6,66	0,02	19,42	3,47	5,76	0,01	17,22	3,08	1,47	1,62
variační koeficient		V <sub>s</sub>	1,56%	1,56%	7,53%	2,61%	2,04%	2,04%	6,52%	2,45%	1,76%	1,76%	7,47%	8,14%

Příloha 23: Kvartilový graf výsledků měření v laboratoři @1000 m<sup>3</sup>/hPříloha 24: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 1 v laboratoři @240 m<sup>3</sup>/h

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty		
		q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]	
1	1	249,32	44,52	28,96	0,55	248,03	44,29	28,18	0,56	248,67	44,41	19,5	19,9	
	2	249,59	44,57	28,72	0,55	249,28	44,51	27,71	0,56	249,43	44,54	18,8	19,2	
	3	250,24	44,69	28,97	0,55	248,67	44,41	28,20	0,56	249,46	44,55	19,1	20,7	
minimum		X <sub>min</sub>	249,32	44,52	28,72	0,55	248,03	44,29	27,71	0,56	248,67	44,41	18,8	19,2
aritmetický průměr		$\bar{x}$	249,72	44,59	28,89	0,55	248,66	44,40	28,03	0,56	249,19	44,50	19,1	19,9
maximum		X <sub>max</sub>	250,24	44,69	28,97	0,55	249,28	44,51	28,20	0,56	249,46	44,55	19,5	20,7
variační rozpětí		R <sub>12</sub>	0,93	0,17	0,25	0,00	1,24	0,22	0,49	0,01	0,78	0,14	0,7	1,5
vnitrolaborat. rozptyl		$\sigma_w^2$	0,15	0,00	0,01	0,00	0,26	0,01	0,05	0,00	0,13	0,00	0,1	0,4
směrodatná odchylka opakovatelnosti		$\sigma_r$	0,48	0,09	0,14	0,00	0,62	0,11	0,28	0,00	0,45	0,08	0,35	0,75
variační koeficient		V <sub>s</sub>	0,19%	0,19%	0,49%	0,22%	0,25%	0,25%	0,99%	0,56%	0,18%	0,18%	1,84%	3,77%
strannost operátora		B	-0,55	-0,10	-1,81	0,01	8,43	1,50	-1,25	0,02	3,94	0,70	-1,03	-0,55



Příloha 25: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 2 v laboratoři @240 m<sup>3</sup>/h

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
2	1	252,98	45,18	31,05	0,54	239,66	42,80	28,39	0,55	246,32	43,99	22,1	22,6
	2	251,16	44,85	31,04	0,53	237,76	42,46	28,95	0,54	244,46	43,65	22,1	22,6
	3	250,92	44,81	30,85	0,54	237,62	42,43	28,66	0,54	244,27	43,62	22,2	22,6
minimum	X <sub>min</sub>	250,92	44,81	30,85	0,53	237,62	42,43	28,39	0,54	244,27	43,62	22,1	22,6
aritmetický průměr	$\bar{x}$	251,69	44,94	30,98	0,54	238,35	42,56	28,67	0,54	245,02	43,75	22,1	22,6
maximum	X <sub>max</sub>	252,98	45,18	31,05	0,54	239,66	42,80	28,95	0,55	246,32	43,99	22,2	22,6
variální rozpětí	R <sub>32</sub>	2,06	0,37	0,20	0,00	2,04	0,36	0,56	0,01	2,05	0,37	0,1	0,1
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	0,85	0,03	0,01	0,00	0,86	0,03	0,05	0,00	0,85	0,03	0,0	0,0
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	1,13	0,20	0,11	0,00	1,14	0,20	0,28	0,00	1,13	0,20	0,07	0,04
variální koeficient	v <sub>s</sub>	0,45%	0,45%	0,36%	0,17%	0,48%	0,48%	0,98%	0,66%	0,46%	0,46%	0,31%	0,17%
strannost operátora	B	1,43	0,26	0,28	0,00	-1,89	-0,34	-0,61	0,00	-0,23	-0,04	1,93	2,09

Příloha 26: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 3 v laboratoři @240 m<sup>3</sup>/h

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
3	1	249,07	44,48	31,86	0,53	236,94	42,31	29,73	0,53	243,00	43,39	18,3	18,3
	2	248,90	44,45	31,62	0,53	237,66	42,44	31,22	0,52	243,28	43,44	18,8	18,8
	3	249,76	44,60	31,88	0,53	236,39	42,21	30,10	0,53	243,07	43,41	19,3	19,3
minimum	X <sub>min</sub>	248,90	44,45	31,62	0,53	236,39	42,21	29,73	0,52	243,00	43,39	18,3	18,3
aritmetický průměr	$\bar{x}$	249,24	44,51	31,79	0,53	237,00	42,32	30,35	0,53	243,12	43,41	18,8	18,8
maximum	X <sub>max</sub>	249,76	44,60	31,88	0,53	237,66	42,44	31,22	0,53	243,28	43,44	19,3	19,3
variální rozpětí	R <sub>32</sub>	0,86	0,15	0,26	0,00	1,27	0,23	1,49	0,01	0,27	0,05	1,0	1,0
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	0,14	0,00	0,01	0,00	0,27	0,01	0,40	0,00	0,01	0,00	0,2	0,2
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	0,46	0,08	0,14	0,00	0,64	0,11	0,78	0,01	0,14	0,03	0,50	0,50
variální koeficient	v <sub>s</sub>	0,18%	0,18%	0,45%	0,17%	0,27%	0,27%	2,56%	1,14%	0,06%	0,06%	2,66%	2,66%
strannost operátora	B	-1,02	-0,18	1,09	-0,01	-3,24	-0,58	1,07	-0,01	-2,13	-0,38	-1,37	-1,69

Příloha 27: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 4 v laboratoři @240 m<sup>3</sup>/h

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
4	1	249,54	44,56	31,22	0,53	236,42	42,22	30,16	0,53	242,98	43,39	20,7	20,7
	2	250,02	44,65	31,08	0,53	235,84	42,11	29,69	0,53	242,93	43,38	20,6	20,6
	3	251,64	44,94	31,14	0,53	238,54	42,60	30,39	0,53	245,09	43,77	20,6	20,6
minimum	X <sub>min</sub>	249,54	44,56	31,08	0,53	235,84	42,11	29,69	0,53	242,93	43,38	20,6	20,6
aritmetický průměr	$\bar{x}$	250,40	44,71	31,14	0,53	236,93	42,31	30,08	0,53	243,67	43,51	20,6	20,6
maximum	X <sub>max</sub>	251,64	44,94	31,22	0,53	238,54	42,60	30,39	0,53	245,09	43,77	20,7	20,7
variální rozpětí	R <sub>32</sub>	2,10	0,38	0,14	0,00	2,70	0,48	0,71	0,00	2,16	0,39	0,1	0,1
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	0,81	0,03	0,00	0,00	1,34	0,04	0,09	0,00	1,01	0,03	0,0	0,0
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	1,10	0,20	0,07	0,00	1,42	0,25	0,36	0,00	1,23	0,22	0,06	0,06
variální koeficient	v <sub>s</sub>	0,44%	0,44%	0,23%	0,26%	0,60%	0,60%	1,20%	0,36%	0,51%	0,51%	0,28%	0,28%
strannost operátora	B	0,14	0,02	0,44	0,00	-3,30	-0,59	0,80	-0,01	-1,58	-0,28	0,47	0,15

Příloha 28: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 1 v laboratoři @1000 m<sup>3</sup>/h

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
1	4	1024,66	182,98	97,56	0,60	993,61	177,43	96,61	0,60	1009,14	180,20	21,4	22,3
	5	1025,44	183,11	96,93	0,60	975,24	174,15	93,59	0,60	1000,34	178,63	21,4	21,8
	6	1023,27	182,73	97,65	0,60	974,82	174,08	92,47	0,60	999,05	178,40	21,8	22,2
minimum	X <sub>min</sub>	1023,27	182,73	96,93	0,60	974,82	174,08	92,47	0,60	999,05	178,40	21,4	21,8
aritmetický průměr	$\bar{x}$	1024,46	182,94	97,38	0,60	981,22	175,22	94,22	0,60	1002,84	179,08	21,5	22,1
maximum	X <sub>max</sub>	1025,44	183,11	97,65	0,60	993,61	177,43	96,61	0,60	1009,14	180,20	21,8	22,3
variální rozpětí	R <sub>12</sub>	2,17	0,39	0,72	0,00	18,79	3,35	4,14	0,01	10,09	1,80	0,4	0,5
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	0,81	0,03	0,10	0,00	76,76	2,45	3,05	0,00	20,10	0,64	0,0	0,0
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	1,10	0,20	0,39	0,00	10,73	1,92	2,14	0,00	5,49	0,98	0,23	0,26
variální koeficient	v <sub>s</sub>	0,11%	0,11%	0,40%	0,21%	1,09%	1,09%	2,27%	0,53%	0,55%	0,55%	1,07%	1,20%
strannost operátora	B	23,89	4,27	8,89	-0,02	27,32	4,88	5,88	-0,01	25,61	4,57	1,83	2,19

Příloha 29: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 2 v laboratoři @1000 m<sup>3</sup>/h

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
2	4	989,64	176,72	89,27	0,61	935,95	167,13	92,06	0,59	962,79	171,93	17,7	17,9
	5	988,56	176,53	90,10	0,61	938,13	167,52	92,96	0,59	963,35	172,03	17,8	18,0
	6	989,31	176,66	90,76	0,61	938,89	167,66	91,42	0,60	964,10	172,16	17,8	18,1
minimum	X <sub>min</sub>	988,56	176,53	89,27	0,61	935,95	167,13	91,42	0,59	962,79	171,93	17,7	17,9
aritmetický průměr	$\bar{x}$	989,17	176,64	90,04	0,61	937,66	167,44	92,15	0,59	963,41	172,04	17,8	18,0
maximum	X <sub>max</sub>	989,64	176,72	90,76	0,61	938,89	167,66	92,96	0,60	964,10	172,16	17,8	18,1
variační rozpětí	R <sub>32</sub>	1,08	0,19	1,49	0,00	2,94	0,53	1,53	0,00	1,31	0,23	0,1	0,2
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	0,20	0,01	0,37	0,00	1,55	0,05	0,40	0,00	0,29	0,01	0,0	0,0
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	0,55	0,10	0,75	0,00	1,53	0,27	0,77	0,00	0,66	0,12	0,06	0,08
variační koeficient	v <sub>s</sub>	0,06%	0,06%	0,83%	0,36%	0,16%	0,16%	0,84%	0,38%	0,07%	0,07%	0,35%	0,44%
strannost operátora	B	-11,40	-2,04	1,55	-0,01	-16,24	-2,90	3,81	-0,02	-13,82	-2,47	-1,90	-1,91

Příloha 30: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 3 v laboratoři @1000 m<sup>3</sup>/h

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
3	4	992,73	177,27	81,91	0,64	940,47	167,94	81,32	0,63	966,60	172,61	19,5	19,5
	5	992,98	177,32	81,54	0,64	943,57	168,49	82,20	0,62	968,27	172,91	19,4	19,4
	6	992,68	177,26	81,95	0,64	942,06	168,23	83,46	0,62	967,37	172,75	19,5	19,5
minimum	X <sub>min</sub>	992,68	177,26	81,54	0,64	940,47	167,94	81,32	0,62	966,60	172,61	19,4	19,4
aritmetický průměr	$\bar{x}$	992,80	177,29	81,80	0,64	942,03	168,22	82,32	0,62	967,41	172,75	19,5	19,5
maximum	X <sub>max</sub>	992,98	177,32	81,95	0,64	943,57	168,49	83,46	0,63	968,27	172,91	19,5	19,5
variační rozpětí	R <sub>32</sub>	0,30	0,05	0,42	0,00	3,10	0,55	2,14	0,01	1,67	0,30	0,1	0,1
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	0,02	0,00	0,03	0,00	1,60	0,05	0,77	0,00	0,47	0,01	0,0	0,0
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	0,16	0,03	0,23	0,00	1,55	0,28	1,08	0,00	0,84	0,15	0,06	0,06
variační koeficient	v <sub>s</sub>	0,02%	0,02%	0,28%	0,12%	0,16%	0,16%	1,31%	0,51%	0,09%	0,09%	0,30%	0,30%
strannost operátora	B	-7,77	-1,39	-6,69	0,02	-11,87	-2,12	-6,02	0,01	-9,82	-1,75	-0,23	-0,44

Příloha 31: Souhrn a vyhodnocení měření operátora 4 v laboratoři @1000 m<sup>3</sup>/h

Operátor	č. měření	Podtlak				Přetlak				Průměr		Teploty	
		q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	CL [m <sup>3</sup> /(h Pan)]	n [-]	q50 [m <sup>3</sup> /h]	n50 [1/h]	Ti [°C]	Te [°C]
4	4	988,95	176,60	82,89	0,63	948,92	169,45	81,64	0,63	968,93	173,02	20,0	20,0
	5	998,04	178,22	82,86	0,64	961,23	171,65	84,02	0,62	979,64	174,94	20,3	20,3
	6												
minimum	X <sub>min</sub>	988,95	176,60	82,86	0,63	948,92	169,45	81,64	0,62	968,93	173,02	20,0	20,0
aritmetický průměr	$\bar{x}$	993,50	177,41	82,87	0,63	955,07	170,55	82,83	0,63	974,28	173,98	20,2	20,2
maximum	X <sub>max</sub>	998,04	178,22	82,89	0,64	961,23	171,65	84,02	0,63	979,64	174,94	20,3	20,3
variační rozpětí	R <sub>32</sub>	9,10	1,62	0,03	0,00	12,31	2,20	2,38	0,00	10,70	1,91	0,3	0,3
vnitrolaborat. rozptyl	$\sigma_w^2$	20,68	0,66	0,00	0,00	37,88	1,21	1,42	0,00	28,64	0,91	0,0	0,0
směrodatná odchylka opakovatelnosti	$\sigma_r$	6,43	1,15	0,02	0,00	8,70	1,55	1,68	0,00	7,57	1,35	0,21	0,21
variační koeficient	v <sub>s</sub>	0,65%	0,65%	0,03%	0,27%	0,91%	0,91%	2,03%	0,46%	0,78%	0,78%	1,05%	1,05%
strannost operátora	B	-7,07	-1,26	-5,62	0,01	1,17	0,21	-5,51	0,02	-2,95	-0,53	0,45	0,24