

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb

Měření vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků v laboratorních podmínkách

Laboratory measurements of the air permeability of building components

Diplomová práce

Studijní program: Budovy a prostředí

Studijní obor: Budovy a prostředí

Vedoucí práce: Ing. Jiří Novák, Ph.D.

Vladimír Vacek

Praha 2019



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Vacek</u>	Jméno: <u>Vladimír</u>	Osobní číslo: <u>423837</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra konstrukcí pozemních staveb</u>		
Studijní program: <u>(N3649) Budovy a prostředí</u>		
Studijní obor: <u>(3608T006) Budovy a prostředí</u>		

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Měření vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků v laboratorních podmínkách</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Laboratory measurements of the air permeability of building components</u>	
Pokyny pro vypracování: -Rešerše - vzduchotěsnost stavebních dílců a prvků, měření vzduchotěsnosti v laboratorních podmínkách -Sestavení a zprovoznění zkušebního zařízení pro měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti v laboratorních podmínkách -Vytvoření výpočtového programu (MS Excel) sloužící ke zpracování výsledků měření -Měření a vyhodnocení těsnosti zkušební komory -Měření a vyhodnocení měření s různými typy přístrojů pro měření průtoku vzduchu -Srovnávací měření vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků metodou v laboratoři x metodou in-situ -Vyhodnocení, závěry	
Seznam doporučené literatury: -Jiří Novák, Vzduchotěsnost obvodových plášťů budov, Grada -ČSN EN ISO 9972 -ČSN EN 12114 -ČSN EN 12207, ČSN EN 12152 -ČSN EN 1026, ČSN EN 12153 -ČSN EN 12155	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Jiří Novák, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>4.10.2018</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>6.1.2019</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

<u>4.10.2018</u>	Podpis studenta(ky)
Datum převzetí zadání	

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

.....
Bc. Vladimír Vacek

Poděkování

V úvodu bych chtěl poděkovat svému vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Novákovi, Ph.D. za jeho konzultace, cenné připomínky, výborný přístup a především čas, který mi věnoval při vypracovávání této práce.

Rád bych poděkoval také Ing. Janu Vítovcovi, Ing. Radimu Havlíčkovi a Bc. Pavlu Kasalovi za pomoc při přesunech zkušební komory včetně zkušebních rámu a Ing. Ondřejovi Nehasilovi za cenné konzultace při zprovoznění záznamového zařízení DataTaker.

A nesmím zapomenout poděkovat své rodině, především rodičům, že mi umožnili studovat a dostat se až k této závěrečné práci.

Anotace

Tato diplomová práce se zabývá především měřením vzduchotěsnosti a vodotěsnosti stavebních dílců a prvků v laboratorních podmínkách. V úvodní části práce seznamuje obecně s problematikou měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti v laboratorních podmínkách, včetně zkušebních metod a následné klasifikace prvků podle technických norem. Dále se zabývá sestavením a zprovozněním zkušebního zařízení pro měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti prvků obvodových plášťů. Zařízení se skládá ze vzduchotěsné zkušební komory, ventilátoru, zařízení pro měření průtoku vzduchu a tlakových rozdílů. Slouží k měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti zkušebních vzorků do maximálního rozměru 3x3 m v Univerzitním centru energeticky efektivních budov v Buštěhradě. Následuje srovnávací měření s různými typy přístrojů pro měření průtoku vzduchu. Dále porovnává měřicí metody v laboratoři s metodou pomocné tlakové komory, která se v praxi používá např. pro měření průvzdušnosti oken in-situ. V závěru je vytvořen návod pro používání tohoto zkušebního zařízení.

Klíčová slova

Průvzdušnost, vzduchotěsnost, měření vzduchotěsnosti, vodotěsnost, zkušební komora, okna, stavební dílce a prvky, laboratoř, laboratorní měření.

Annotation

The master's thesis deals with the measurement of the airtightness and watertightness of building components in laboratory conditions. In the introductory part the issue of airtightness and watertightness is presented, including the test methods and the subsequent classification of elements according to technical standards. It also deals with assembling and commissioning of test facility for measuring airtightness and watertightness of building elements. It consists of airtightness test chamber, pressurisation equipment fan, airflow and pressure differences measure devices. It allows for measurements of airtightness and watertightness of specimen to a maximum dimension of 3x3 m in the University center for energy efficient buildings in Buštěhrad. Comparative measurements with different types of air flow meters are followed. Furthermore, the comparison of the measurement method in the laboratory with the auxiliary pressure chamber method, which in practice is used, for example, to measure airtightness of the windows in-situ. At the end, instructions for using this test device are created.

Keywords

Air permeability, airtightness, airtightness measurements, watertightness, test chamber, windows, building components and elements, laboratory, laboratory measurements.

Obsah

1. Úvod.....	- 9 -
2. Vzduchotěsnost budov	- 11 -
2.1 Netěsnosti v obálce budovy.....	- 11 -
2.2 Tlakový rozdíl	- 12 -
2.2.1. Tlakový rozdíl vyvolaný rozdílem teplot.....	- 13 -
2.2.2. Tlakový rozdíl vyvolaný účinkem větru.....	- 14 -
2.2.3. Tlakový rozdíl vyvolaný větracím zařízením	- 15 -
3. Vzduchotěsnost stavebních dílců a prvků	- 16 -
3.1. Hodnocení vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků.....	- 16 -
3.1.1. Ekvivalentní plocha netěsnosti	- 16 -
3.1.2. Referenční plošná průvzdušnost	- 17 -
3.1.3. Referenční spárová průvzdušnost	- 17 -
3.1.4. Součinitel spárové průvzdušnosti	- 18 -
3.2. Klasifikace vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků	- 18 -
3.2.1. Vzduchotěsnost oken a dveří - klasifikace	- 18 -
3.2.2. Vzduchotěsnost lehkých obvodových plášťů - klasifikace.....	- 19 -
3.2.3. Vzduchotěsnost vrat - klasifikace	- 20 -
3.3. Měření vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků	- 20 -
3.3.1. Laboratorní metody.....	- 21 -
3.3.1.1. Metoda tlakového spádu	- 21 -
3.3.1.2. Metoda při neustáleném tlakovém rozdílu	- 22 -
3.3.2. Metody měření in-situ.....	- 23 -
3.3.2.1. Metoda pomocí fólie a clony	- 23 -
4. Vodotěsnost stavebních dílců a prvků	- 25 -
4.1. Klasifikace vodotěsnosti stavebních dílců a prvků	- 25 -
4.1.1. Vodotěsnost oken a dveří - klasifikace	- 25 -
4.1.2. Vodotěsnost lehkých obvodových plášťů - klasifikace	- 26 -
4.1.3. Vodotěsnost vrat - klasifikace.....	- 27 -
4.2. Měření vodotěsnosti stavebních dílců a prvků	- 27 -
5. Sestavení a zprovoznění zkušebního zařízení	- 29 -
5.1. Zkušební komora	- 31 -
5.1.1. Dokončení zkušební komory	- 32 -
5.1.1.1. Zadní vstup do komory	- 33 -
5.1.1.2. Těsnění mezi zkušební komorou a rámem pro osazení vzorků ...	- 35 -

5.2. Zkušební rámy	- 38 -
5.3. Zkušební zařízení pro měření vzduchotěsnosti	- 39 -
5.3.1. Požadavky na zkušební zařízení	- 39 -
5.3.2. Zkušební zařízení ve skutečnosti	- 40 -
5.4. Zkušební zařízení pro měření vodotěsnosti	- 44 -
5.4.1. Požadavky na zkušební zařízení	- 44 -
5.4.2. Zkušební zařízení ve skutečnosti	- 45 -
5.5. Ověřování průvzdušnosti pláště zkušební komory	- 48 -
5.5.1. Detekce netěsností v plášti zkušební komory anemometrem	- 49 -
5.5.2. Detekce netěsností v plášti zkušební komory zakouřením	- 50 -
5.5.3. Dotěsnění detekovaných netěsností v plášti komory	- 50 -
5.5.4. Ověření těsnosti zkušební komory natlakováním	- 50 -
5.5.5. Ověření těsnosti zkušební komory měřením zbytkových toků	- 51 -
5.6. Pilotní měření průvzdušnosti výplně otvoru	- 57 -
5.6.1. Výběr vhodné výplně otvoru	- 57 -
5.6.2. Způsob osazení okna do zkušebního rámu	- 57 -
5.6.3. Měření průvzdušnosti zkušební okna	- 58 -
5.6.3.1. Zkušební postup	- 59 -
5.6.3.2. Výsledky měření	- 60 -
5.7. Srovnávací měření s různými typy přístrojů pro měření průtoku vzduchu	- 61 -
5.7.1. Vyhodnocení srovnávacího měření č.1	- 65 -
5.7.2. Vyhodnocení srovnávacího měření č.2	- 68 -
5.7.3. Vyhodnocení srovnávacího měření č.3	- 71 -
5.7.4. Vyhodnocení srovnávacího měření č.4	- 74 -
5.7.5. Shrnutí srovnávacího měření s různými typy přístrojů pro měření průtoku vzduchu	- 77 -
5.8. Srovnávací měření průvzdušnosti metodou v laboratoři x metodou in-situ	- 78 -
5.8.1. Vyhodnocení srovnávacího měření laboratoř x in-situ	- 79 -
6. Závěr	- 82 -
6.1. Možné pokračování práce	- 84 -
7. Zdroje a použitá literatura	- 86 -
8. Seznam tabulek	- 89 -
9. Seznam obrázků	- 90 -
10. Seznam příloh	- 94 -

1. Úvod

V Evropské unii se provoz budov podílí přibližně ze 40 % na celkové spotřebě energií. Stavební sektor se neustále rozrůstá, a proto se dá předpokládat i zvýšení spotřeby energií. V současnosti je tedy trendem (nejen dle nařízení Evropské unie) snižování energetické náročnosti budov, emisí skleníkových plynů a potřeby neobnovitelných zdrojů ve stavebnictví. [33,34]

Je tedy očividné, že musíme snižovat energetickou náročnost budov. Z toho vyplývá snižování všech položek v energetické bilanci budovy, kde podstatnou část tvoří i tepelné ztráty. Naším cílem je tedy minimalizování tepelných ztrát budovy.

Tepelnou ztrátu budovy je možné omezit i zlepšením vzduchotěsnosti obálky budovy. To platí především v případech, kdy už jsme ostatní položky energetické bilance snížili na minimum. Pokud je obálka budovy netěsná, dochází mimo jiné k úniku vnitřního vzduchu skrze netěsnosti do venkovního prostředí. Tento fakt má za následek zvýšení tepelné ztráty, která se negativně projeví v celkové energetické bilanci budovy.

Abychom zajistili vzduchotěsnost obálky budovy, je nutné znát i vzduchotěsnost všech jednotlivých stavebních dílců či prvků (oken, dveří, vrat, lehkých obvodových plášťů atd.), ze kterých se vzduchotěsná obálka budovy skládá. Pokud chceme znát vzduchotěsnost těchto stavebních dílců či prvků, je vhodné provádět zkoušky průvzdušnosti v laboratorních podmínkách. Dále je vhodné ihned po zkoušce vzduchotěsnosti navázat na zkoušku vodotěsnosti (pokud to zkušební prvek umožňuje). Tato diplomová práce se tedy zabývá sestavením a zprovozněním komory pro měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti v prostorách Univerzitního centra energeticky efektivních budov v Buštěhradě, včetně různých srovnávacích měření.

Hlavní motivací k vytvoření zkušebního zařízení pro měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti stavebních dílců a prvků v Univerzitním centru energeticky efektivních budov (UCEEB) je primárně výzkumná činnost. Zařízení bude používáno k ověřování průvzdušnosti a vodotěsnosti nově vyvíjených prototypů prvků obvodových plášťů budov (v minulosti např. projekty ENVILOP, MORE-CONNECT, SONG).

Název této diplomové práce je tedy Měření vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků v laboratorních podmínkách. Cíle práce jsou:

- sestavení a zprovoznění zkušebního zařízení pro měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti zkušebních vzorků až do rozměru 3x3 m v laboratorních podmínkách
- vytvoření výpočtového programu sloužící ke zpracování výsledků měření průvzdušnosti
- vyhodnocení srovnávacího měření s různými typy přístrojů pro měření průtoku vzduchu
- vyhodnocení srovnávacího měření metodou v laboratoři x metodou in-situ

2. Vzduchotěsnost budov [1, 2, 3]

Problematika vzduchotěsnosti neboli průvzdušnosti obálky budovy se zkoumá již několik desítek let. Motivace k tomuto výzkumu jsou zcela zřejmé, a to hlavně snaha o snížení energetické náročnosti objektů. V posledních letech je hlavním impulsem těchto výzkumů narůstající zájem o nízkoenergetické, pasivní a nulové domy.

Schopnost daného prvku (materiálu, určité konstrukce nebo obálky budovy jako celku) propouštět vzduch se nazývá vzduchotěsnost. Pokud má být prvek co nejtěsnější, je zapotřebí, aby propouštěl co nejmenší množství vzduchu. Jestliže má prvek propouštět vzduch, je nutné splnění dvou základních podmínek:

- prvek obsahuje netěsnosti
- prvek je vystaven tlakovému rozdílu (rozdíl tlaků vzduchu na vnitřním a vnějším líci)

2.1 Netěsnosti v obálce budovy [1, 2, 3]

Obálka budovy vždy propouští určité množství vzduchu, proto je nemožné dosáhnout dokonalé vzduchotěsnosti. Správně provedené konstrukce většinou nemají problém se vzduchotěsností v ploše, i přes to, že se ve skladbách konstrukcí používají materiály propustné pro vzduch (např. minerální tepelné izolace). K zajištění vzduchotěsnosti se ve skladbách konstrukcí používají vzduchotěsné vrstvy (např. omítky a parozábrany). Vzduch tedy proudí skrze obálku budovy především netěsnými spoji mezi konstrukcemi a místy, kde je přerušena spojitost vrstev zajišťujících vzduchotěsnost (např. netěsné spoje, netěsné napojení na prostupující prvky). Netěsnosti v obálce budovy se dají rozdělit na:

- „záměrné“ – otvory, které jsou navrženy jako součást větracího systému, pro přívod čerstvého vzduchu
- „nechtěné“ – trhliny, otvory, spáry atd. vznikají převážně vlivem chyb při návrhu anebo nedůsledností při výstavbě objektu

Problémem nechtěných netěsností je, že mohou nepříznivě ovlivnit tepelně vlhkostní režim konstrukce, ale i celkové tepelné chování objektu. Tento typ netěsností je nutné systematicky odstraňovat.

2.2 Tlakový rozdíl [1, 3, 4, 5]

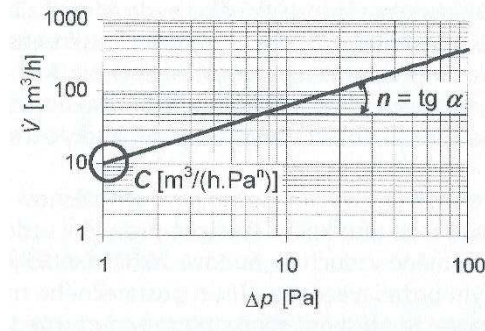
Nutnou podmínkou k proudění vzduchu skrze obálku budovy je tlakový rozdíl mezi vnitřním a vnějším prostředím. Tlakový rozdíl je většinou způsoben kombinací tlakového rozdílu působení větru, rozdílem teploty mezi vnitřním a vnějším prostředím a případným tlakovým rozdílem, který vyvolá mechanický větrací systém. Pokud je tlakový rozdíl větší, znamená to, že prvkem proudí i více vzduchu. Závislost proudění vzduchu netěsnostmi obálky budovy na tlakovém rozdílu se dá vyjádřit tzv. empirickou rovnicí proudění:

$$q = C \times (\Delta p)^n \quad (1)$$

kde	q	je objemový tok vzduchu [m^3/h]
	C	je součinitel proudění [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$]
	Δp	je tlakový rozdíl [Pa]
	n	je součinitel proudění (bezrozměrný)

Vzduchotěsnost daného prvku se dá přímo popsat parametry rovnice proudění C a n . Tyto parametry se zjišťují experimentálním měřením. Parametr C , neboli součinitel proudění, vyjadřuje množství objemového toku vzduchu procházející netěsností při tlakovém rozdílu 1 Pa. Informuje tedy o velikosti netěsnosti. Charakter proudění vzduchu vyjadřuje exponent proudění n . Tento exponent se pohybuje v rozmezí 0,5 (turbulentní proudění) až 1,0 (laminární proudění). Pokud nejsou v předběžných výpočtech dostupné přesnější údaje o zkoumaném prvku, počítá se běžně s hodnotou $n = 0,67$.

Ke grafickému znázornění závislosti objemového toku vzduchu na tlakovém rozdílu se nejčastěji využívá grafu v logaritmickém měřítku. Na vodorovnou osu se vynese tlakový rozdíl Δp a na svislou osu se vynese objemový tok vzduchu q . Hodnotu součinitele proudění C je možno odečíst z grafu (obrázek č.1), kdy se přímka protne se svislou osou v rozdílu tlaků $\Delta p=1$ Pa. Směrnice přímky, tedy její sklon, je dán hodnotou exponentu proudění n .



Obr. č.1: Graf závislosti objemového toku vzduchu netěsnostmi v obálce budovy na tlakovém rozdílu [1]

2.2.1. Tlakový rozdíl vyvolaný rozdílem teplot [1, 3, 4]

Tzv. komínový efekt je způsoben rozdílnou hustotou vnitřního a venkovního vzduchu. Tato rozdílná hustota vzduchu je zapříčiněna rozdílem teplot mezi vnitřním a vnějším prostředím. Hustota vzduchu je ovlivněna teplotou, vlhkostí vzduchu a barometrickým tlakem, přičemž vliv vlhkosti vzduchu a barometrického tlaku bývá většinou zanedbatelný. Pokud se nezohlední vliv těchto dvou veličin, počítá se tlakový rozdíl pouze na základě rozdílu teplot a výšce budovy:

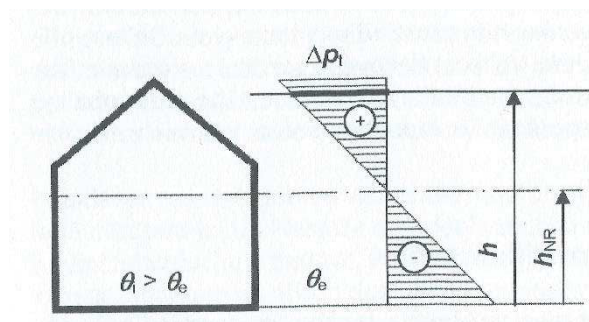
$$\Delta p_t = (\rho_e - \rho_i) \times g \times (h_{NR} - h) = \rho_e \times \left(\frac{\theta_e - \theta_i}{\theta_i} \right) \times g \times (h_{NR} - h) \quad (2)$$

- kde Δp_t je tlakový rozdíl vyvolaný rozdílem teplot [Pa]
 ρ_e je hustota venkovního vzduchu [kg/m³]
 ρ_i je hustota vnitřního vzduchu [kg/m³]
 g je gravitační konstanta [m/s²]
 h_{NR} je výška neutrální roviny [m]
 h je výška místa, kde je zjišťován rozdíl tlaku [m]
 θ_e je teplota venkovního vzduchu [K]
 θ_i je teplota vnitřního vzduchu [K]

Tento vztah platí za předpokladu, že zkoumaná budova se dá považovat za jednu tlakovou zónu (veškeré místnosti v budově jsou mezi sebou vzájemně propojeny a není mezi nimi tlakový rozdíl) a vnitřní teplota je po výšce budovy neměnná.

Pokud je vnitřní vzduch teplejší než venkovní (běžné podmínky v zimním období), vzniká podtlak v nižších částech budovy a přetlak ve vyšších částech. Mezi oblastmi podtlaku a přetlaku leží neutrální rovina. V této rovině je tlakový rozdíl nulový. Poloha neutrální

roviny závisí na rozložení netěsností po výšce objektu a z toho vyplývá, že se nemusí nacházet jen v polovině výšky objektu.



Obr. č.2: Ilustrační schéma ke vztahu (2), tlakový rozdíl vyvolaný rozdílem teplot [1]

2.2.2. Tlakový rozdíl vyvolaný účinkem větru [1, 3, 4]

Pro vzduch proudící okolo libovolného tělesa jsou příznačné časté změny rychlosti a směru proudění. Tyto změny významně ovlivňují tlak vzduchu na povrchu obtékaného tělesa. Přetlak je vyvolán na návětrné straně jednoduchých deskových těles. K podtlaku neboli sání dochází na závětrné straně. Při obtékání reálné budovy větrem je mnohem složitější určit rozložení tlaků na obálce budovy. Záleží totiž na tvaru budovy, orientaci budovy vůči větru, vlivu okolní zástavby, překážek, terénu a také na síle větru. V daném místě na obálce budovy je tlakový účinek větru definován vztahem:

$$\Delta p_v = C_p \times \rho \times \frac{v^2}{2} \quad (3)$$

kde Δp_v je rozdíl tlaku vzduchu v daném místě na obálce a tlaku vzduchu v místě s nerušeným prouděním v referenční výšce [Pa]

C_p je tlakový součinitel (bezrozměrný)

ρ je hustota vzduchu [kg/m^3]

v je rychlost větru v místě s nerušeným prouděním v referenční výšce [m/s]

Odborná literatura (např. [1]) uvádí i konkrétní hodnoty tlakového součinitele C_p pro daný směr větru a typ konstrukce. Mnoho používaných a publikovaných hodnot tlakového součinitele C_p vychází z měření v aerodynamických tunelech. Tyto hodnoty lze získat i pomocí výpočtových metod CFD (Computational Fluid Dynamics) či měření in-situ. Hodnoty tlakového součinitele C_p jsou vždy vztaženy k určité referenční výšce objektu, ta většinou odpovídá i výšce budovy.

Z důvodu velmi proměnlivé rychlosti a směru větru je nutné, při odhadech či výpočtech reálného působení tlakových účinků větru na obálku budovy, vždy počítat s velkou mírou nejistoty.

2.2.3. Tlakový rozdíl vyvolaný větracím zařízením [1, 3, 4]

Činnost mechanického větracího systému může vyvolávat tlakový rozdíl mezi vnitřním a venkovním prostředím. Při použití rovnotlakých větracích systémů může být vliv tlakového rozdílu malý a zanedbatelný v porovnání s účinky větru či rozdílu teplot. Při využití přetlakových nebo podtlakových větracích systémů je vliv tlakového rozdílu výraznější. Určité typy spalovacích spotřebičů (jako např. kamna, krby a kotle) či kuchyňské digestoře mohou také vyvolat tlakový rozdíl.

Nesmíme opomenout, že tlakové účinky větru, rozdílu teplot a větracích zařízení působí v daném objektu současně. Z toho vyplývá, že výsledný tlakový rozdíl je proměnlivý v čase a závisí na klimatických podmínkách.

3. Vzduchotěsnost stavebních dílců a prvků

Jediným spolehlivým nástrojem ke zjištění průvzdušnosti stavebních dílců a prvků je měření.

3.1. Hodnocení vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků [1, 6, 7]

Při hodnocení vzduchotěsnosti stavebních dílců lze vycházet z empirické rovnice proudění (1). Tato rovnice (1) definuje vztah mezi objemovým tokem vzduchu q a tlakovým rozdílem Δp .

Nejčastěji používané veličiny sloužící k hodnocení vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků:

$A_{ref,L}$ ekvivalentní plocha netěsnosti [m^2]

$q_{ref,A}$ referenční plošná průvzdušnost [$m^3/(h.m^2)$]

$q_{ref,L}$ referenční spárová průvzdušnost [$m^3/(h.m)$]

i_{LV} součinitel spárové průvzdušnosti [$m^3/(s.m.Pa^{0,67})$]

K vyčíslení hodnotících veličin je nutné znát celkový objemový tok vzduchu netěsnostmi ve stavebním dílci či prvku při referenčním tlakovém rozdílu (dolní index „ref“). Hodnota tohoto rozdílu se odvozuje z výsledků měření vzduchotěsnosti.

Národní předpisy či národní technické normy většinou určují hodnotu referenčního tlakového rozdílu. Mezi nejčastější hodnoty patří 10, 50, 75 a 100 Pa. Pokud se při testování stavebních dílců a prvků předpokládá spíše vyšší propustnost vzduchu (malá vzduchotěsnost), používají se nízké hodnoty referenčního tlakového rozdílu. U těsných stavebních dílců a prvků (např. okna a dveře) se většinou výsledky měření vyjadřují při referenčních tlakových rozdílech větších než 50 Pa.

3.1.1. Ekvivalentní plocha netěsnosti [1, 7]

Ekvivalentní plocha netěsnosti $A_{ref,L}$ je definována jako plocha ideálního otvoru se zaoblenými hranami. Při referenčním tlakovém rozdílu protéká tímto otvorem stejný objemový tok vzduchu jako zkoumaným zkušebním stavebním dílcem či prvkem. Výtokový součinitel C_D je obvykle roven jedné. Pokud není určeno jinak, ekvivalentní plocha netěsnosti $A_{ref,L}$ se vypočítá za pomoci parametrů rovnice těsnosti takto:

$$A_{ref,L} = C_D \times \sqrt{\frac{\rho}{2}} \times \Delta p_{ref}^{(n-0,5)} \quad (4)$$

- kde $A_{ref,L}$ je ekvivalentní plocha netěsnosti [m²]
 C_D je výtokový součinitel (bezrozměrný)
 Δp_{ref} je referenční tlakový rozdíl [Pa]
 ρ je hustota vzduchu [kg/m³]
 n je součinitel proudění (bezrozměrný)

Za smluvní neboli referenční tlakový rozdíl je považována hodnota 10 Pa, pokud není ve zkušebním protokolu uvedeno jinak. Ekvivalentní plocha netěsnosti se k vyjádření požadavků na průvzdušnost stavebních dílců a prvků zpravidla nepoužívá.

3.1.2. Referenční plošná průvzdušnost [1, 6]

Referenční plošná průvzdušnost $q_{ref,A}$ je definována jako podíl objemového toku vzduchu proudící skrze zkoumaný stavební díl při referenčním tlakovém rozdílu ku ploše vzorku:

$$q_{ref,A} = \frac{q_{ref}}{A_W} \quad (5)$$

- kde $q_{ref,A}$ je referenční plošná průvzdušnost [m³/(h.m²)]
 q_{ref} je objemový tok vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu [m³/h]
 A_W je plocha stavebního dílce či prvku [m²]

Referenční plošná průvzdušnost je v soustavě evropských norem užívána k vyjádření vzduchotěsnosti výplní stavebních otvorů jako jsou např. okna, dveře či vrata. Dále se tato veličina používá i k specifikování požadavků na průvzdušnost stavebních dílců a prvků.

3.1.3. Referenční spárová průvzdušnost [1, 6]

Referenční spárová průvzdušnost $q_{ref,L}$ je definována jako podíl objemového toku vzduchu proudící skrze zkoumaný stavební díl při referenčním tlakovém rozdílu ku délce spáry ve vzorku:

$$q_{ref,L} = \frac{q_{ref}}{A_L} \quad (6)$$

- kde $q_{ref,L}$ je referenční spárová průvzdušnost [m³/(h.m)]
 q_{ref} je objemový tok vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu [m³/h]
 A_L je celková délka zkoumané spáry ve stavebním dílci či prvku [m]

Referenční spárová průvzdušnost se dá využít jen pro hodnocení stavebních dílců a prvků, které obsahují záměrně vytvořené konstrukční spáry. Jako například funkční či připojovací spáry výplní otvorů, spáry mezi stěnovými panely lehkého obvodového pláště apod. I referenční spárová průvzdušnost je v soustavě evropských norem užívána k vyjádření vzduchotěsnosti výplní stavebních otvorů jako jsou např. okna, dveře či vrata.

3.1.4. Součinitel spárové průvzdušnosti [1, 10, 11]

Součinitel spárové průvzdušnosti i_{LV} vyjadřuje hodnotu objemového toku vzduchu, který proteče spárou stavebního dílce či prvku o délce 1 m při tlakovém rozdílu 1 Pa. Hodnota součinitele spárové průvzdušnosti i_{LV} se určuje při smluvní hodnotě $n=0,67$ podle vzorce:

$$i_{LV} = \frac{q}{3600 \times L \times \Delta p^{0,67}} \quad (7)$$

- kde i_{LV} je součinitel spárové průvzdušnosti [$\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot \text{Pa}^{0,67})$]
 q je objemový tok vzduchu při tlakovém rozdílu Δp [m^3/h]
 Δp je tlakový rozdíl [Pa]
 L je délka spáry ve zkoumaném stavebním dílci či prvku [m]

Pokud porovnáme tento vztah s empirickou rovnicí proudění (1) tak je patrné, že za předpokladu $n=0,67$ odpovídá součinitel spárové průvzdušnosti hodnotě součinitele proudění C . Objemový tok vzduchu proudící skrze stavební prvek při libovolném tlakovém rozdílu tedy lze dopočítat dosazením hodnoty i_{LV} namísto hodnoty C v empirické rovnici proudění (1). Protože se předpokládá hodnota exponentu proudění $n=0,67$ (nemusí být vždycky pravda), jedná se pouze o orientační hodnocení vzduchotěsnosti a vyjádření požadavků na vzduchotěsnost výplní otvorů podle dnes již neplatné ČSN 730540-2 z roku 2007 [10].

3.2. Klasifikace vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků

3.2.1. Vzduchotěsnost oken a dveří - klasifikace [1, 8]

Okna a dveře nemohou být zkonstruovány zcela vzduchotěsně, jelikož se skládají z otevíravých částí. U vzduchotěsně provedených konstrukcí je průvzdušnost obálky budovy výrazně ovlivněna právě vzduchotěsností výplní otvorů. Požadavkům, metodám měření a hodnocení vzduchotěsnosti výplní otvorů se věnuje pozornost především ve státech s chladným klimatem.

Samotná klasifikace vychází z porovnání vzduchotěsnosti zkoumané výplně otvoru vztažené na celkovou plochu a vzduchotěsnosti vztažené na délku spáry. Průvzdušnost oken a dveří se hodnotí dle ČSN EN 12207 [7] zařazením výrobku do jedné z pěti tříd těsnosti. Měřením provedeným v akreditované laboratoři se získají hodnoty referenční plošné průvzdušnosti $q_{ref,A}$ a hodnoty referenční spárové průvzdušnosti $q_{ref,L}$ sloužící k zařazení do tříd těsnosti. Hranice tříd těsnosti jsou uvedeny v tabulce 1.

Tab. 1 – Hranice tříd těsnosti oken a dveří [7]

Třída	Referenční plošná průvzdušnost při 100 Pa [$m^3/h.m^2$]	Referenční spárová průvzdušnost při 100 Pa [$m^3/h.m$]	Maximální zkušební tlak [Pa]
0	Nezkouší se		
1	50	12,50	150
2	27	6,75	300
3	9	2,25	600
4	3	0,75	600

3.2.2. Vzduchotěsnost lehkých obvodových plášťů - klasifikace [9]

Průnik vzduchu skrze funkční spáry nesmí být zohledněn ve vzduchotěsnosti pevných ploch lehkého obvodového pláště. Průvzdušnost pevných ploch lehkého obvodového pláště musí být vztažena k přetlaku aplikovanému na celou vnější plochu nebo na délku pevné spáry zkoumaného vzorku. Průvzdušnost otevíravých částí lehkého obvodového pláště (např. oken) je stanovena podle ČSN EN 12207 [7].

Lehké obvodové pláště se z hlediska vzduchotěsnosti klasifikují dle ČSN EN 12152 [9] do pěti tříd tak, aby byly zohledněny veškeré pravděpodobné místní a regionální podmínky. Na základě výsledků zkoušek měření průvzdušnosti lze klasifikovat pevné prvky lehkých obvodových plášťů dle tabulky 2.

Tab. 2 – Hranice tříd průvzdušnosti lehkých obvodových plášťů [9]

Třída	Průvzdušnost vztažená na celkovou plochu [$m^3/h.m^2$]	Průvzdušnost vztažená na délku pevné spáry [$m^3/h.m$]	Maximální zkušební tlak [Pa]
A1	1,5	0,5	150
A2	1,5	0,5	300
A3	1,5	0,5	450
A4	1,5	0,5	600
AE	1,5	0,5	>600

Zkoušené vzorky, které mají průvzdušnost vztaženou na celkovou plochu $>1,5 m^3/m^2.h$ při tlakovém rozdílu $<150 Pa$ nelze klasifikovat. A vzorky, které mají průvzdušnost vztaženou na délku pevné spáry $>0,5 m^3/m.h$ při tlakovém rozdílu $<150 Pa$ také nelze klasifikovat.

3.2.3. Vzduchotěsnost vrat - klasifikace [24]

Vrata (mimo výjimky uvedené v [24] jako např. vrata výtahů, vrata plavebních komor a přístavů, divadelní opony, železniční závory atd.) se z hlediska vzduchotěsnosti klasifikují dle ČSN EN 12426 [24] do sedmi tříd. Měřením provedeným v akreditované laboratoři se získá hodnota referenční plošné průvzdušnosti sloužící k zařazení do tříd těsnosti. Hranice tříd těsnosti jsou uvedeny v tabulce 3.

Tab. 3 – Hranice tříd průvzdušnosti vrat [24]

Třída	Průvzdušnost vztažená na celkovou plochu při tlaku 50 Pa [$\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^2$]	Specifikace
0	-	Bez požadavků
1	24	
2	12	
3	6	
4	3	
5	1,5	
6		Výjimečná

3.3. Měření vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků [1]

Pro měření vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků je potřeba znát stejně jako u měření vzduchotěsnosti obálky budovy závislost objemového toku vzduchu na tlakovém rozdílu. Tedy parametry z empirické rovnice proudění C (součinitel proudění) a n (exponent proudění).

Metody sloužící ke zjištění vzduchotěsnosti stavebních dílců jsou velmi obdobné jako metody pro měření vzduchotěsnosti obálky budovy (popsány v odborné literatuře, např. [1]). Je však nutné rozlišovat mezi laboratorními metodami měření průvzdušnosti stavebních dílců a metodami in-situ, tedy metodami měření stavebních dílců v zabudovaném stavu - na místě.

Mezi hlavní výhodu měření průvzdušnosti v laboratorních podmínkách patří dosažení vyšší přesnosti naměřených výsledků oproti měření v podmínkách in-situ. Těchto výsledků lze dosáhnout, protože v laboratorních podmínkách můžeme:

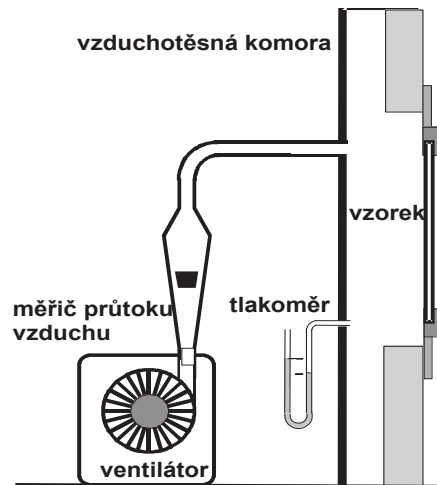
- zkušební podmínky cíleně upravit a jsou konstantní (nedochází k ovlivňování vlivem změn klimatických podmínek jako při měření in-situ)
- zkušební vzorky velmi pečlivě připravit
- použít přesnější, citlivější měřicí přístroje a lze je i pečlivěji osadit
- měřit ve větším rozsahu tlakových rozdílů

Laboratorní metody měření se využívají hlavně k ověřování a deklaraci vlastností sériově vyráběných stavebních dílců či prvků a standardizovaných řešení (typicky výplně otvorů a lehké obvodové pláště). Méně vhodné jsou k měření průvzdušnosti celých stavebních konstrukcí (neplatí u prefabrikovaných dílců) anebo styků několika konstrukcí. V laboratorních podmínkách se netestují stavební konstrukce realizované přímo na stavbě, ale jen jejich modely. Při stavbě modelů stavebních konstrukcí v laboratorních podmínkách se většinou nedá zohlednit vliv konkrétních podmínek na staveništi. Tedy nahodilých jevů, které mohou mít nepříznivý vliv na průvzdušnost konstrukce. Mezi tyto jevy patří např. klimatické podmínky a jejich vliv na vlastnosti materiálů a kvalitu prováděné práce, komplikace související s technologií a postupem výstavby, kázeň pracovníků atd.

3.3.1. Laboratorní metody

3.3.1.1. Metoda tlakového spádu [1, 5, 7, 12, 13, 14]

Na zkoumaný laboratorní vzorek se aplikují odstupňované zkušební tlaky (kladný a dle potřeby i záporný) známé hodnoty. Zkušební tlaky jsou vyvolány dostatečně výkonným ventilátorem s plynule regulovatelnými otáčkami. Pro každou úroveň zkušebního tlaku se změří objemový tok vzduchu proudící skrze měřený vzorek. Výsledky měření se vztáhnou k referenčním podmínkám používaných pro výpočet průvzdušnosti (20 °C, 101325 Pa, 50 % relativní vlhkosti vzduchu). Tyto hodnoty se vynesou jako body do grafu v logaritmickém měřítku (obrázek č.1). Graf udává závislost objemového toku vzduchu na tlakové diferenci. Parametry empirické rovnice proudění C (součinitel proudění) a n (exponent proudění) se určí vhodnou metodou lineární regrese uvedenou např. v ČSN EN ISO 9972 [5] či ČSN EN 12114 [7].



Obr. č.3: Schéma zkušebního zařízení pro měření vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků [7]

Podle technických norem [7, 12, 13 a 14] musí mít zkušební zařízení tyto součásti:

- zkušební komoru umožňující vzduchotěsné osazení vzorku
- ventilátor umožňující vytvoření řízené tlakové difference na zkušebním vzorku
- prostředky umožňující rychlou změnu požadovaných hodnot tlakové difference
- prostředek schopný měřit objemový tok vzduchu s přesností $\pm 5\%$
- prostředek umožňující měření nastavené tlakové difference s přesností $\pm 5\%$
- pomocné prostředky pro utěsnění veškerých spojů zkušebního vzorku (lepící páska nebo vzduchotěsná fólie zakrývající celý měřený vzorek)

Dle typu stavebního prvku se může odlišovat postup měření či požadavky na měřicí zařízení. Určité stavební prvky jako např. okna, dveře či lehké obvodové pláště, které mají nízkou průvzdušnost musí být měřeny při vysokých tlakových rozdílech. Jiné prvky naopak neumožňují testování při vysokých tlakových rozdílech. Z tohoto důvodu byly vypracovány mezinárodní technické normy sloužící k měření vzduchotěsnosti určitého typu stavebních prvků. Jako např. norma pro měření oken a dveří [12], vrat [14] či lehkých obvodových plášťů [13]. Kromě těchto specifických norem existuje i tzv. obecná norma [7] pro měření vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků, které nemají vypracovány samostatnou technickou normu.

3.3.1.2. Metoda při neustáleném tlakovém rozdílu [1]

Ve vzduchotěsné zkušební komoře je osazen zkušební vzorek. Uvnitř komory je vyvolán tlakový rozdíl např. běžným ventilátorem. Ventilátor je propojen se zkušební

komorou přes velmi těsně a velmi rychle uzavíratelnou klapku. Po uzavření klapky začne tlakový rozdíl klesat. Průvzdušnost zkoumaného vzorku je odvozena od rychlosti poklesu tlakového rozdílu v čase. K této metodě je zapotřebí kvalitní uzavírací klapka a přístroj k měření poklesu tlakové diference. Na základě průběhu poklesu tlakové diference v čase lze odvodit parametry rovnice proudění C (součinitel proudění) a n (exponent proudění).

3.3.2. Metody měření in-situ

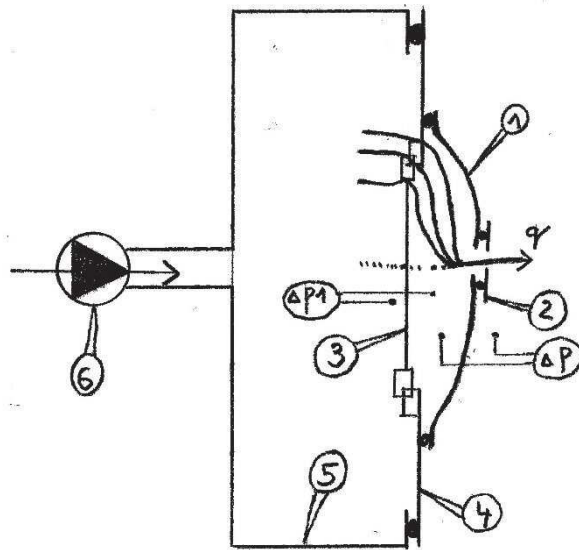
V rámci této práce se zaměřím pouze na metodu měření s pomocnou komorou (pomocí plastové fólie a clony). Další metody měření in-situ lze nalézt v odborné literatuře, např. [1 a 35].

3.3.2.1. Metoda pomocí fólie a clony [1, 3, 15]

Tato metoda se využívá pro měření vzduchotěsnosti zabudovaných stavebních prvků a využívá principu metody tlakového spádu. Tato zkušební metoda měří objemový tok vzduchu skrze zkoumaný prvek za různého referenčního tlaku přímo. Pokud se tato varianta aplikuje v laboratorních podmínkách (např. pro srovnávací měření laboratorních metod x metody měření in-situ) tak se okolo zkušebního vzorku se vytvoří pomocná tlaková komora ze vzduchotěsné fólie. Do této fólie se vlepí kalibrovaná clona (na základě těsnosti či netěsnosti vzorku lze vlepit i větší počet clon, množství clon je závislé na průvzdušnosti zkoumaného vzorku) o známé ploše A a výtokovém součiniteli C_D . Za pomoci ventilátoru je ve zkušební komoře vytvořen přetlak. Je nutné změřit působící tlakový rozdíl na zkoumaném vzorku (Δp_1) a rozdíl tlaků působící na kalibrovanou clonu (Δp). Průtok vzduchu clonou se vypočítá dle vztahu:

$$q = \frac{1}{3600} \times C_D \times A \times \sqrt{\frac{2 \times \Delta p}{\rho}} \quad (8)$$

- kde: q je objemový tok vzduchu clonou [m^3/h]
 C_D je výtokový součinitel otvoru v cloně (bezrozměrný)
 A je plocha otvoru v cloně [m^2]
 Δp je rozdíl tlaku vzduchu působící na clonu [Pa]
 ρ je hustota vzduchu proudící skrze clonu [kg/m^3]

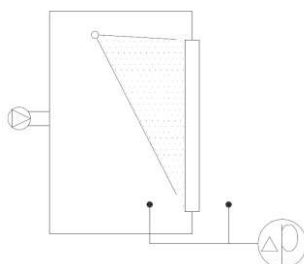


Obr. č.4: Princip měření průvzdušnosti pomocí fólie a clony: 1-vzduchotěsná fólie
 2-kalibrovaná clona; 3-zkušební vzorek; 4-rám pro osazení zkušební vzorku
 5-vzduchotěsná komora; 6-ventilátor

4. Vodotěsnost stavebních dílců a prvků [28, 29]

Jediným spolehlivým nástrojem ke zjištění vodotěsnosti stavebních dílců a prvků je měření. Vodotěsnost je schopnost zkušebního prvku (lehkého obvodového pláště nebo uzavřené otvorové výplně) odolávat průnikům vody. Je hodnocená odolnost proti průniku vody zkušebním prvkem při působení kladného tlakového zatížení (přetlaku) na exteriérovou stranu zkušebního prvku. Průnik vody je definován nepřetržitým či opakovaným zvlhčením vnitřního povrchu (interiérové strany) nebo části zkušebního vzorku. Zkouška vodotěsnosti stavebních dílců a prvků se většinou provádí ve zkušební laboratoři.

Ve skutečnosti na určitý zabudovaný prvek (ze strany exteriéru) působí kombinace deště a větru, tedy hnaného deště. V závislosti působení hnaného deště a voděodolnosti zabudovaného prvku může docházet k zatékání vody na interiérovou stranu prvku. Při zkoušce vodotěsnosti v laboratorních podmínkách se tedy simuluje hnaný déšť. Déšť je simulován postřikem vody, který je definován např. technickými normami [16, 17 a 23]. Působení větru je simulováno rozdílem statického tlaku na zkušebním prvkem.



Obr. č.5: Schéma principu zkoušky vodotěsnosti

Dále se práce věnuje pouze problematice vodotěsnosti oken, dveří, vrat a lehkých obvodových plášťů budov.

4.1. Klasifikace vodotěsnosti stavebních dílců a prvků

4.1.1. Vodotěsnost oken a dveří - klasifikace [28, 29, 31]

Okna i dveře obsahují otevíravé části, a proto nemohou být zkonstruovány zcela vodotěsně. Požadovaná vodotěsnost se stanovuje především podle výšky budovy nad terénem. Dále závisí na větrné oblasti, tvaru budovy a charakteru území.

K nežádoucímu průniku vody může docházet především mezi stykem zasklení a křídla tzv. zasklívací spárou, mezi stykem křídla a rámu tzv. funkční spárou a mezi stykem

rámů (zárubní) a stěn tzv. připojovací spárou. Připojovací spára je ovšem věcí správného zabudování výplně otvoru do samotné konstrukce.

Vodotěsnost oken a dveří se hodnotí dle ČSN EN 12208 [31] zařazením výrobku do jedné z jedenácti tříd těsnosti. Při průniku vody se udává tlakový rozdíl a čas působení tohoto tlakového rozdílu, při kterém k průniku vody nedošlo. Hranice tříd vodotěsnosti jsou uvedeny v tabulce 4.

Tab. 4 – Hranice tříd vodotěsnosti oken a dveří [31]

Tlakový rozdíl mezi vnější a vnitřní stranou zkušební vzorku P_{max} [Pa]	Klasifikace		Požadavky
	Zkušební postup A	Zkušební postup B	
-	0	0	Bez požadovku
0	1A	1B	15 min postřikování
50	2A	2B	Jako třída 1 + 5 min
100	3A	3B	Jako třída 2 + 5 min
150	4A	4B	Jako třída 3 + 5 min
200	5A	5B	Jako třída 4 + 5 min
250	6A	6B	Jako třída 5 + 5 min
300	7A	7B	Jako třída 6 + 5 min
450	8A	-	Jako třída 7 + 5 min
600	9A	-	Jako třída 8 + 5 min
>600	Exxx	-	Nad 600 Pa ve stupních po 150 Pa musí činit doba každého stupně 5 min

Zkušební postup A je vhodný pro nechráněný výrobek a zkušební postup B pro částečně chráněný výrobek. Zkušební vzorky, u kterých dojde k průniku vody bez tlakového zatížení před uplynutím doby 15 minut, není možné klasifikovat. Pokud zkušební vzorky nevykazují žádný průnik vody při zkušebním tlaku nad 600 Pa během minimální doby 5 minut, jsou klasifikovány jako Exxx. Přičemž xxx značí maximální zkušební tlak (např. 750 Pa, 900 Pa, 1050 Pa), při kterém nedošlo k průniku vody během doby 5 minut.

4.1.2. Vodotěsnost lehkých obvodových pláštů - klasifikace [30]

Lehké obvodové pláště se z hlediska vodotěsnosti hodnotí dle ČSN EN 12154 [30] do pěti tříd tak, aby byly zohledněny veškeré pravděpodobné místní a regionální podmínky. Při průniku vody se udává tlakový rozdíl a čas působení tohoto tlakového rozdílu, při kterém k průniku vody nedošlo. Na základě výsledků měření vodotěsnosti lze klasifikovat lehké obvodové pláště dle tabulky 5.

Tab. 5 – Hranice tříd vodotěsnosti lehkých obvodových plášťů [30]

Klasifikace	Tlakové stupně v [Pa]/doba trvání zkoušky v [min]	Nejvyšší zkušební tlak P_{max} [Pa]	Množství postřikovací vody [l/min.m ²]
R 4	0/15; 50/5; 100/5; 150/5	150	2
R 5	0/15; 50/5; 100/5; 150/5; 200/5; 300/5	300	2
R 6	0/15; 50/5; 100/5; 150/5; 200/5; 300/5; 450/5	450	2
R 7	0/15; 50/5; 100/5; 150/5; 200/5; 300/5; 450/5; 600/5	600	2
RE xxx	0/15; 50/5; 100/5; 150/5; 200/5; 300/5; 450/5; 600/5; nad 600/5 ve stupních po 150 Pa a době 5 min	Nad 600	2

Pokud dojde k průniku vody zkušebním vzorkem při tlaku nižším než 150 Pa, nelze tento vzorek klasifikovat. Naopak pokud zkušební vzorky nevykazují žádný průnik vody při zkušebním tlaku nad 600 Pa během minimální doby 5 minut, jsou klasifikovány do třídy RE xxx (mimořádné). Přičemž xxx značí maximální zkušební tlak (např. 750 Pa, 900 Pa, 1050 Pa), při kterém nedošlo k průniku vody během doby 5 minut.

4.1.3. Vodotěsnost vrat - klasifikace [32]

Vrata (mimo výjimky uvedené v [32]) se z hlediska vodotěsnosti klasifikují podle ČSN EN 12425 [32] do čtyř tříd odolnosti proti průniku vody. Při průniku vody se udává tlakový rozdíl a čas působení tohoto tlakového rozdílu, při kterém k průniku vody nedošlo. Hranice tříd vodotěsnosti jsou uvedeny v tabulce 6.

Tab. 6 – Hranice tříd vodotěsnosti vrat [32]

Třída	Zkušební tlak [Pa]	Specifikace postřiku vodou
0	-	Bez postřiku
1	30	Postřik 15 min
2	50	Postřik 20 min
3	>50	Výjimečná

4.2. Měření vodotěsnosti stavebních dílců a prvků [16, 17, 23, 28]

Podle typu stavebního prvku se může odlišovat postup měření nebo požadavky na zkušební zařízení. Proto byly vypracovány mezinárodní technické normy sloužící k měření vodotěsnosti určitého stavebního prvku. Jako např. norma pro měření oken a dveří [16], vrat [23] či lehkých obvodových plášťů [17].

Podle technických norem [16, 17 a 23] musí mít zkušební zařízení tyto součásti:

- zkušební komoru umožňující vzduchotěsné osazení vzorku
- ventilátor umožňující vytvoření řízené tlakové difference na zkušebním vzorku
- prostředky umožňující rychlou změnu požadovaných hodnot tlakové difference
- prostředek umožňující měření nastavené tlakové difference s přesností $\pm 5 \%$
- postřikovací systém umožňující na celém povrchu zkušebního vzorku vytvoření rovnoměrného a nepřetržitého vodního filmu
- přístroj pro měření celkové dodávané vody s přesností $\pm 10 \%$
- odvod vody z postřikovacího systému

Zkouška vodotěsnosti většinou následuje po zkoušce průvzdušnosti. Na zkoumaný laboratorní vzorek se spustí postřik vodou při nulovém zkušebním tlaku po určitý čas daný klasifikační normou [30, 31 a 32]. Postřik vodou musí zajistit na vnějším povrchu vzorku konstantní a nepřetržitý vodní film. U oken, dveří a vrat je metoda postřiku založena na tom, že trysky leží na vodorovné přímce (přičemž osa trysek je mírně sklopena směrem dolů), výškově nad nejvyšší vodorovnou linií jakékoliv pohyblivého rámu či zasklívací linie. Pokud se jedná o vyšší zkušební vzorky (u oken a dveří $> 2,5$ m a u vrat > 2 m), je postřikovací systém doplněn o další řadu (či řady) přídavných trysek. U lehkých obvodových pláštů musí být trysky rozmístěny v pravidelných mřížkách s osou trysek ve vodorovné rovině (kolmo na zkušební vzorek). Po uplynutí časového intervalu s nulovým tlakem dochází v pravidelných časových intervalech ke zvýšení tlakového rozdílu (přetlaku). Neustále se sleduje, zda nedošlo v průběhu postřikování k průniku vody na vnitřní povrchy zkušebního vzorku. Při průniku vody se zaznamená čas a tlakový rozdíl, při kterém nedošlo k průniku vody včetně místa, kde k průniku vody došlo.

Práce se věnuje pouze problematice vodotěsnosti oken, dveří, vrat a lehkých obvodových pláštů budov. Ovšem na podobném principu, lze testovat i vodotěsnost dalších typů prvků (např. konstrukční styky, žaluzie vyústek technického zabezpečení budov atd.).

5. Sestavení a zprovoznění zkušebního zařízení

Hlavní motivací k vytvoření zkušebního zařízení pro měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti stavebních dílců a prvků v Univerzitním centru energeticky efektivních budov (UCEEB) je primárně výzkumná činnost. Zařízení bude používáno k ověřování průvzdušnosti a vodotěsnosti nově vyvíjených prototypů prvků obvodových plášťů budov (v minulosti např. projekty ENVILOP, MORE-CONNECT, SONG atd.). Primárně tedy nejde o to stát se akreditovanou zkušební laboratoří.

Cílem této práce tedy je sestavení a zprovoznění zkušebního zařízení pro zjišťování technických parametrů vzduchotěsnosti a vodotěsnosti stavebních dílců a prvků do maximálního rozměru 3 x 3 m.

Při sestavování takového zkušebního zařízení je nutné mít vzduchotěsnou a vodotěsnou zkušební komoru, jejíž vlastnosti musí být v čase neměnné. Zkušební komora je tlakována pomocí výkonného ventilátoru, který dokáže vytvořit vysoký tlakový rozdíl i při nízkém průtoku vzduchu. Zároveň je možné ho regulovat i při nízkých otáčkách. Dále je potřeba schopnost přesného měření průtoku vzduchu ve velkém rozsahu a přesné měření tlakového rozdílu na vnitřní a vnější straně zkušební vzorku. K měření vodotěsnosti je zapotřebí postřikovací zařízení, které lze snadno nakonfigurovat podle typu a velikosti zkoumaného stavebního dílce či prvku. Pro upevňování zkušebních vzorků je vhodné použít rámy umožňující vzduchotěsné a vodotěsné osazení různých typů vzorků o různých rozměrech.

Jedná se o rozestavěné zařízení, které je potřeba dokončit a uvést do provozu. Součástí uvedení do provozu budou i pilotní a ověřovací měření. V UCEEBu jsem převzal jednotlivé součásti pro sestavení zařízení:

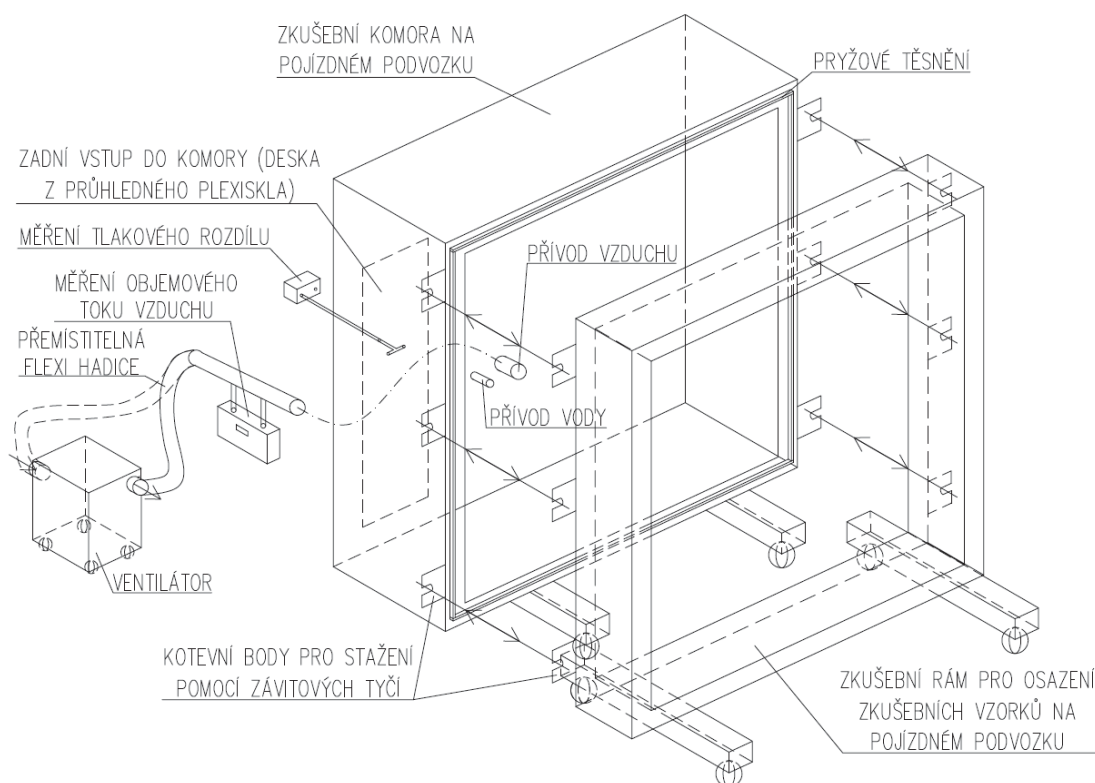
- nedokončenou zkušební komoru (kapitola 5.1., obr. č.8 a 9)
- zkušební rámy (kapitola 5.2., obr. č.18)
- regulovatelný ventilátor s frekvenčním měničem (kapitola 5.3.2., obr. č.20)
- zařízení pro měření objemového toku vzduchu (kapitola 5.3.2.): plynoměr (obr. č.21), mikroprůtokoměr (obr. č.22), clonková trať (obr. č.23)
- zařízení pro měření tlakové difference (kapitola 5.3.2., obr. č.24, 25 a 26)

Požadavky na součásti zkušebního zařízení sloužící k měření vzduchotěsnosti definuje technická norma ČSN EN 12114 [7]. Téměř identické požadavky udávají i technické normy ČSN EN 1026 [12], ČSN EN 12153 [13] a ČSN EN 12427 [14]. Požadavky na zkušební zařízení sloužící k měření vodotěsnosti definuje ČSN EN 1027 [16], ČSN EN 12155 [17] a ČSN EN 12489 [23].

Sestavení a zprovoznění zkušebního zařízení pro měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti stavebních dílců a prvků probíhalo v prostorách UCEEBu v Buštěhradě, od listopadu 2017 do listopadu 2018, v rámci odborné stáže.



Obr. č.6: Budova Univerzitního centra energeticky efektivních budov v Buštěhradě



Obr. č.7: Schéma sestavení zkušebního zařízení pro měření vzduchotěsnosti

Postup jednotlivých činností vedoucí k dokončení a zprovoznění zkušební komory:

1. Dokončení zkušební komory
 - a. zadní vstup do komory
 - b. těsnění mezi zkušební komorou a rámem pro osazení vzorků.
2. Zajištění, sestavení a zprovoznění vybavení pro měření vzduchotěsnosti.
3. Zajištění, sestavení a zprovoznění vybavení pro měření vodotěsnosti.
4. Detekce netěsností v plášti zkušební komory.
5. Dotěsnění detekovaných netěsností v plášti zkušební komory.
6. Měření zbytkových (reziduálních) toků proudící skrze plášť zkušební komory.
7. Pilotní měření průvzdušnosti výplně otvoru
8. Srovnávací měření s různými typy přístrojů pro měření průtoku vzduchu.
9. Srovnávací měření průvzdušnosti metodou v laboratoři x metodou in-situ

5.1. Zkušební komora

Zkušební komora je zhotovena z oceli S235RJ. Konstrukce je svařená z ocelových I profilů a z vnitřní strany pokryta ocelovými plechy. Tyto plechy jsou mezi sebou opatřeny vzduchotěsnými svary. Povrchovou úpravu celé konstrukce tvoří třívrstvý nátěrový systém pro prostředí C4. Komora má vnější rozměry cca 3,2 x 3,2 x 1,0 m (bez podvozku) a je osazena na pojízdném podvozku. Ocelovou konstrukci komory projektoval Ing. Lukáš Velebil na přelomu roku 2015/2016.



Obr. č.8: Pohled na přední stranu zkušební komory (vlevo) a pohled na zadní stranu se vstupem do komory (vpravo)



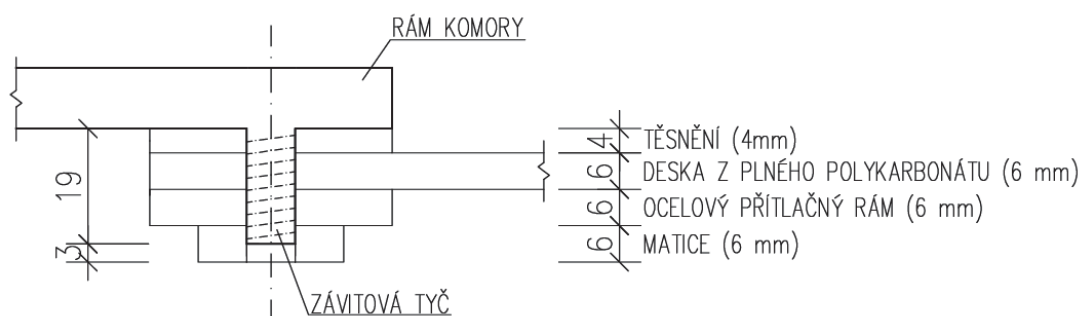
Obr. č.9: Pohled na zadní stranu komory s připravenými prostupy pro přívod či odvod vzduchu (přírubový spoj) a pro přívod vody (závitový spoj)

5.1.1. Dokončení zkušební komory

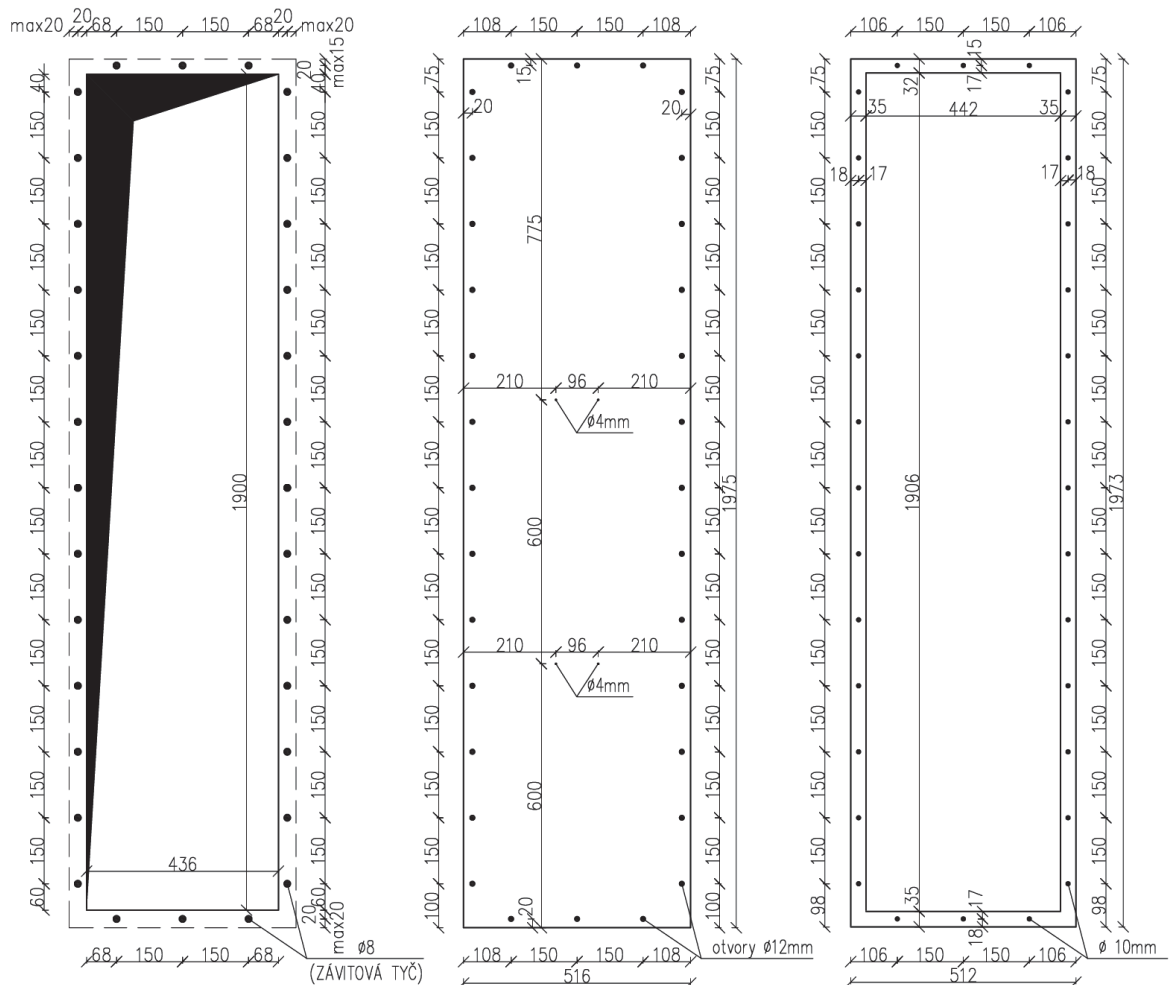
Zkušební komoru jsem převzal ve stavu (obrázek č.8 a 9), kdy byla dokončená ocelová konstrukce včetně povrchové úpravy. Dále byl již vyroben ocelový přítlačný rámeček (obrázek č.8 vpravo) pro upevnění desky zakrývající zadní vstup do komory.

5.1.1.1. Zadní vstup do komory

Nejprve došlo k přesnému zaměření otvoru a rozmístění závitových tyčí navařených ke zkušební komoře. Po zaměření se zjistilo, že navařené závitové tyče jsou poměrně krátké. Toto zjištění vedlo k detailnímu rozpracování tloušťek jednotlivých prvků. Skladba konstrukce a její tloušťky byly zvoleny odhadem. Jednotlivé prvky vstupu ve směru od komory: těsnění vstupu o síle 4 mm z pryže A160-40°Sh (elastomer NR-SBR); deska z plného čirého polykarbonátu tloušťky 6 mm; ocelový přitlačný rám tloušťky 6 mm; matice tloušťky 6 mm. Délka navařené závitové tyče je 19 mm.



Obr. č.10: Detail poskládání konstrukce u zadního vstupu do zkušební komory v místě závitové tyče (vodorovný řez v místě závitové tyče)



Obr. č.11: Rozměry a schéma vstupního otvoru (vlevo); prováděcí výkres pro desku s otvory z plného polykarbonátu tl. 6 mm (uprostřed); prováděcí výkres pro těsnění o síle 4 mm z pryže A160-40°Sh (vpravo)

Na připravené závitové tyče se nasadilo pryžové těsnění, které se dorazilo až k rámu komory. Dále se osadila deska z plného polykarbonátu. Při pohledu zvnějšku na vstup do komory došlo ke zjištění, že polykarbonátová deska nedoléhá na pravé straně až na pryžové těsnění. Důvodem nedolehnutí byla ocelová konstrukce zasahující do prostoru umístění desky (z vnějšku, pravá strana při pohledu na vstup do komory). Konstrukce se překrývaly přibližně o 2 mm. Proto došlo k odříznutí pravé strany polykarbonátové desky na stolní okružní pile o cca 2-3 mm. Následovalo osazení přítlačného ocelového rámečku z ploché oceli rozměru 6 x 40 mm s předvrtanými otvory. Přibližně polovina předvrtaných otvorů musela být převrtána, protože by jinak nebylo možné přítlačný rámeček vůbec osadit. Na těsnění, polykarbonátové desce a přítlačném ocelovém rámečku se zřetelně označil způsob osazování (spodní hrana, levá a pravá strana při pohledu z vnějšku). Vše je dotaženo přes závitové tyče maticemi M8 (32 kusů).

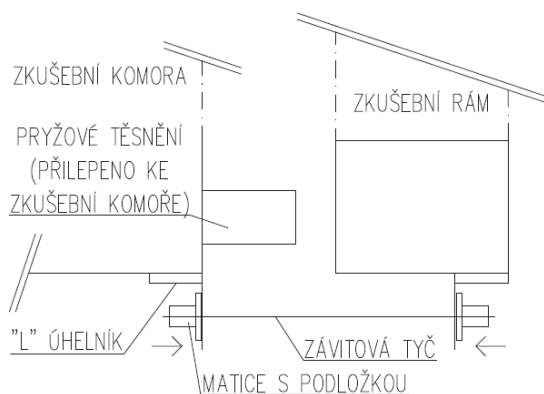
V polykarbonátové desce se z výroby nechaly předvrtat dvě dvojice otvorů pro případnou montáž dřevěných nábytkových úchytů, které by posloužily ke snadnější manipulaci s deskou. Ve skutečnosti není manipulace s deskou tak náročná. Proto nebyla nutná montáž dřevěných úchytů a došlo k vyplnění třech otvorů náplní z lepicí tavné pistole. Čtvrtý otvor byl využit ke snímání tlakového rozdílu mezi vnitřkem a vnějším zkušební komory.

5.1.1.2. Těsnění mezi zkušební komorou a rámem pro osazení vzorků

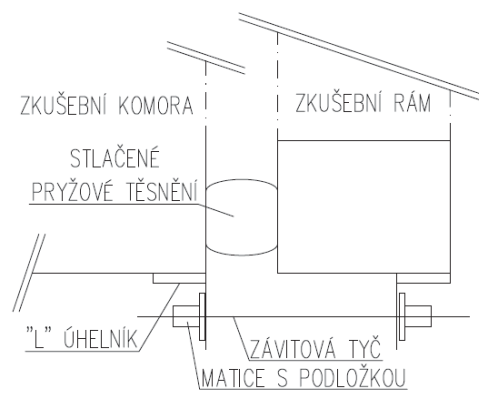
Mezeru mezi zkušební komorou a rámem pro osazení zkušebních vzorků je nutné mít vzduchotěsně i vodotěsně utěsněnou. Těsnění musí splňovat následující požadavky:

- vzduchotěsnost a vodotěsnost (uzavřená pórová struktura)
- být dostatečně tlusté a stlačitelné, aby se vyrovnalo nerovnoměrné stlačení při stažení zkušební komory s rámem pro osazení zkušebních vzorků
- umožnění pružné deformace (při zatížení se stlačí a po uvolnění zatížení se vrátí do původního tvaru)
- v průběhu let nesmí degradovat

STAV PŘED DOTAŽENÍM RÁMU KE KOMOŘE:



STAV PO DOTAŽENÍ RÁMU KE KOMOŘE:



Obr. č.12: Schéma horizontálního řezu komorou s pryžovým těsněním včetně principu stahování

Těsnění bude trvale přimontované ke zkušební komoře. Rám se ke zkušební komoře přitahuje pomocí 6 úchytů (3 na levé a 3 na pravé straně komory) pro závitové tyče. Závitové tyče jsou na každém konci opatřeny prodlouženými maticemi a podložkou. Po dotažení matic dojde k dosednutí zkušebního rámu na těsnění komory, jeho stlačení a tím i k zabránění průniku vzduchu a vody.



Obr. č.13: Pohled na systém stahování pomocí závitových tyčí a prodloužených matic s podložkou (zkušební vzorek - střešní okno SONG)

Na základě průzkumu trhu a konzultace ve specializované prodejně byl vybrán mikroporézní EPDM profil obdélníkového tvaru 20 x 30 mm (obr. č.14). Tato pryž splňuje výše uvedené požadavky na těsnění mezi zkušební komorou a zkušebním rámem, protože má uzavřenou mikroporézní strukturu (uzavřené dutinky), je neprodyšná, téměř nenasákavá a má velmi dobrou odolnost proti povětrnostním vlivům.



Obr. č.14: Vzorek mikroporézního EPDM profilu 20 x 30 mm

Pryžový profil se přilepil pomocí beztoluenového kontaktního lepidla Alkaprén 25 Plus ke zkušební komoře. Nejprve se odmastily spojované povrchy ocelové komory a těsnění. Brusným papírem se zdrsnil povrch těsnění. Pomocí grafitové tužky se načrtlo umístění těsnění po celém obvodu budoucí přitlačné plochy.

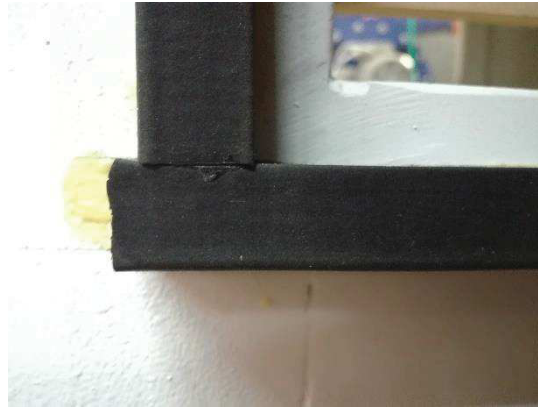
Lepidlo se dokonale promíchalo a nanoslo v tenké vrstvě štětcem na povrch ocelové komory a těsnění. Nechalo se zavadnout 10 minut a následně se oba povrchy spojily. Spoj se zalisoval přitažením zkušebního rámu ke komoře a jeho pevným stažením pomocí závitových tyčí s maticemi. Dotažení rámu zajistily také truhlářské svěrky. Spoj byl lisován po dobu minimálně 24 hodin. S lepením se postupovalo po dvou fázích. Nejprve se lepilo spodní a vrchní těsnění. Následovalo lepení těsnění na levé a pravé straně. V rozích se styky spojů těsnění (po zalisování) zakáply jednosložkovým kyanakrylátovým lepidlem CB 2008 pro extrémně rychlé spoje.



Obr. č.15:Nanesené lepidlo Alkaprén 25 Plus na zkušební komoře (vlevo) a na zdrsňeném povrchu těsnění (vpravo)



Obr. č.16: Zkušební komora s přitaženým rámem stažena závitovými tyčemi i pomocí truhlářských svěrek (zalisování těsnění na minimálně 24 hodin)



Obr. č.17: Detail spoje těsnění v rohu

5.2. Zkušební rámy

Zkoumané stavební dílce a prvky se osazují do zkušebních ráků, které mají vlastní podvozek. Díky tomu je možná celkem snadná manipulace a výměna různých typů ráků se zkušebními vzorky. V Univerzitním centru jsou v současné době používány tři typy zkušebních ráků a to:

- rám s otvorem pro osazení normového okna o rozměrech 1,23 x 1,48 m
- rám s otvorem pro osazení vzorku do velikosti 3 x 3 m, hloubka ráku 0,35 m
- rám s otvorem pro osazení vzorku do velikosti 3 x 3 m, hloubka ráku 0,60 m



Obr. č.18: Rám s otvorem pro normové okno (vlevo) a rám pro vzorky velikosti 3 x 3 m s menší hloubkou ráku (vpravo)

Tyto zkušební rámy jsou kompatibilní s velkou klimatickou dvojkomorou [36] a umožňují snadný přesun zkušebních vzorků mezi klimatickou dvojkomorou a komorou pro měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti.



Obr. č.19: Pohled na zkušební zařízení (vlevo - komora pro měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti, vpravo – klimatická dvojkomora)

5.3. Zkušební zařízení pro měření vzduchotěsnosti

5.3.1. Požadavky na zkušební zařízení [7, 12, 13, 14]

Požadavky na zkušební zařízení, kterým se měří průvzdušnost stavebních dílců a prvků definuje obecná norma ČSN EN 12114 [7]. Identické požadavky na zkušební zařízení definují i specifické normy pro okna a dveře ČSN EN 1026 [12], vrata ČSN EN 12427 [14] a lehké obvodové pláště ČSN EN 12153 [13]. Zkušební zařízení musí obsahovat:

1. Komoru s otvorem, do kterého se osadí zkušební vzorek. Komoru, která je dostatečně pevná a tuhá.
2. Zařízení, které umožní vytvoření regulovaných zkušebních tlaků (kladných i záporných) na zkušební vzorek.
3. Prostředky umožňující rychlou změnu hodnot tlakového rozdílu.
4. Zařízení schopné měřit objemový tok vzduchu s přesností $\pm 5\%$.
5. Zařízení pro měření zkušebního tlakového rozdílu s přesností $\pm 5\%$.
6. Prostředky k utěsnění všech spojů testovaného vzorku (lepicí pásky či vzduchotěsná fólie)

5.3.2. Zkušební zařízení ve skutečnosti

Zkušební zařízení pro měření vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků se sestavilo z jednotlivých dílů dle požadavků v kapitole 4.4.1. Zařízení se skládá z dílů:

1. Zkušební komora s otvorem a přemístitelnými rámy umožňující osazení vzorků. Komora je svařená z ocelových I profilů a z vnitřní strany pokrytá ocelovými plechy.
2. Regulovatelný ventilátor RH HIB 180, CI 20 na přímý pohon s elektromotorem Siemens 1LE1601 – 5,5 kW / 400 V / 50 Hz. Ventilátor je umístěn na pojízdném rámu.
3. Frekvenční měnič Eaton DC 1 – 34014FB – A66N a regulace měniče s diferenčním snímačem.
4. Zařízení k měření objemového toku vzduchu:
 - a. Membránový plynoměr BK – G10M; rozsah měření: (0) 0,1 – 16 m³/h; přesnost ±1 %. [18]
 - b. Minneapolis mikroprůtokoměr MLM s vyměnitelnými disky; rozsah měření 0,17 – 78,5 m³/h;
Disk 1: rozsah měření 12,4 – 78,5 m³/h, přesnost ±5 % nebo ±0,37 m³/h (platí vyšší z hodnot);
Disk 2: rozsah měření 2,15 – 18,2 m³/h, přesnost ±5 % nebo ±0,37 m³/h (platí vyšší z hodnot);
Disk 3: rozsah měření 0,65 – 3,23 m³/h, přesnost ±5 % nebo ±0,09 m³/h (platí vyšší z hodnot);
Disk 4: rozsah měření 0,17 – 0,83 m³/h, přesnost ±5 % nebo ±0,04 m³/h (platí vyšší z hodnot). [19]
 - c. Clonková trať s dvojicí centrických clon od ZPA Nová Paka; rozsah měření 11 – 160 m³/h;
Centrická clona DN50 výr. č. 15452A: rozsah měření 11 – 30 m³/h; přesnost ±1 %
Centrická clona DN50 výr. č. 15452: rozsah měření 30 – 160 m³/h; přesnost ±2 % v rozsahu 30 – 45 m³/h a přesnost ±1 % v rozsahu 45 – 160 m³/h. [20]

5. Zařízení k měření zkušebního tlakového rozdílu:

- a. Digitální měřidlo tlaku Minneapolis DG-1000; rozsah měření od -2500 Pa do 2500 Pa; přesnost $\pm 0,9$ % nebo $\pm 0,12$ Pa (platí vyšší z hodnot); naměřené hodnoty zaznamenává software TECLOG4. [21]
- b. Diferenční manometr Beck 984A.553714b; dva rozsahy měření: 0 – 1000 Pa a 0 – 2500 Pa s přesností $\leq \pm 1$ %; naměřené hodnoty zaznamenává zapisovač dat DataTaker. [22]
- c. Diferenční manometr Beck 984Q.543714b; tři kalibrované rozsahy měření (celkem 8 nastavitelných rozsahů měření 0 – 100 Pa, 0 – 250 Pa, 0 – 500 Pa, 0 – 1000 Pa, -50 až +50 Pa, -100 až +100 Pa, -250 až +250 Pa, -500 až +500 Pa): 0 – 100 Pa s přesností $\leq \pm 5$ %, 0 – 250 Pa s přesností $\leq \pm 2,5$ % a 0 – 500 Pa s přesností $\leq 2,5$ %; lineární chyba je $\leq \pm 1$ % ze zvoleného rozsahu; naměřené hodnoty zaznamenává zapisovač dat DataTaker. [22]
- d. Měřidlo tlakových rozdílů Minneapolis APT-8; rozsah měření od -1000 Pa do 1000 Pa; v rozsahu ± 800 Pa s přesností ± 1 % nebo $\pm 0,2$ Pa pro rozsah ± 400 Pa anebo ± 1 Pa pro rozsah ± 800 Pa (platí vyšší z hodnot), v rozsahu ± 1000 Pa s přesností ± 1 % nebo ± 1 Pa (platí vyšší z hodnot); naměřené hodnoty zaznamenává software TECLOG4. [26]

6. Lepící pásy a vzduchotěsné fólie.

Výše uvedené přístrojové vybavení zkušebního zařízení pro měření vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků splňuje požadavky technických norem [7, 12, 13, 14], uvedených v jednotlivých bodech v kapitole 5.3.1. Jediný problém nastává u měření objemového toku vzduchu velmi těsných vzorků. Nízký objemový tok vzduchu lze měřit membránovým plynoměrem BK – G10M (obrázek č.21), ovšem tento plynoměr dává impulz impulznímu snímači při průtoku vzduchu skrze plynoměr o objemu $0,1 \text{ m}^3$. Záznam o impulzu je zapsán spolu s časem do zapisovače dat DataTaker. Na základě naměřených hodnot (objem vzduchu $0,1 \text{ m}^3$ za určitý časový interval) uložených v zapisovači dat se dopočítá průtok vzduchu q [m^3/h]. Například pokud se má měřit objemový tok vzduchu $q=0,1 \text{ m}^3/\text{h}$, je nutné pro změření jedné hodnoty objemového toku vzduchu čas jedné hodiny. Pro snadnější a rychlejší měření velmi těsných zkušebních vzorků by bylo vhodné pořízení plynoměru, který dává impulz impulznímu snímači již při průtoku vzduchu o objemu $0,01 \text{ m}^3$, např. membránový plynoměr BK-G4 V1,2 [37]. Z toho vyplývá, že při měření objemového toku vzduchu

$q=0,1 \text{ m}^3/\text{h}$, je čas měření jedné hodnoty objemového toku vzduchu zkrácen přibližně na 6 minut (doba měření je 10x rychlejší oproti stávajícímu plynoměru).



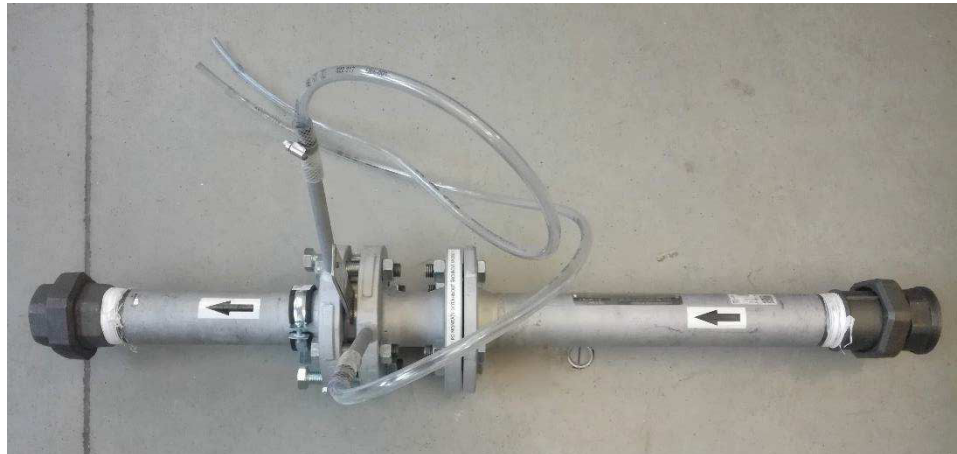
Obr. č.20: Regulovatelný ventilátor s frekvenčním měničem a regulací měniče



Obr. č.21: Membránový plynoměr BK – G10M s nízkofrekvenčním snímačem IN-Z61



Obr. č.22: Minneapolis mikroprůtokoměr MLM s vyměnitelnými disky



Obr. č.23: Clonková trať s dvojicí centrických clon od ZPA Nová Paka



Obr. č.24: Digitální měřidlo tlaku Minneapolis DG-1000



Obr. č.25: Diferenční manometry Beck 984 se zapisovačem dat DataTaker



Obr. č.26: Měřidlo tlakových rozdílů Minneapolis APT-8

5.4. Zkušební zařízení pro měření vodotěsnosti [16, 17]

Jelikož zkouška vodotěsnosti (při statickém tlaku) následuje po zkoušce průvzdušnosti stavebních vzorků a jsou k ní zapotřebí i totožné díly jako pro zkoušku vzduchotěsnosti, je vhodné, aby se pro tyto dvě zkušební metody používalo totožné zařízení.

5.4.1. Požadavky na zkušební zařízení [16, 17, 23]

Požadavky na zkušební zařízení definuje pro okna a dveře ČSN EN 1027 [16], pro lehké obvodové pláště ČSN EN 12155 [17] a pro vrata ČSN EN 12489 [23]. Zkušební zařízení musí obsahovat:

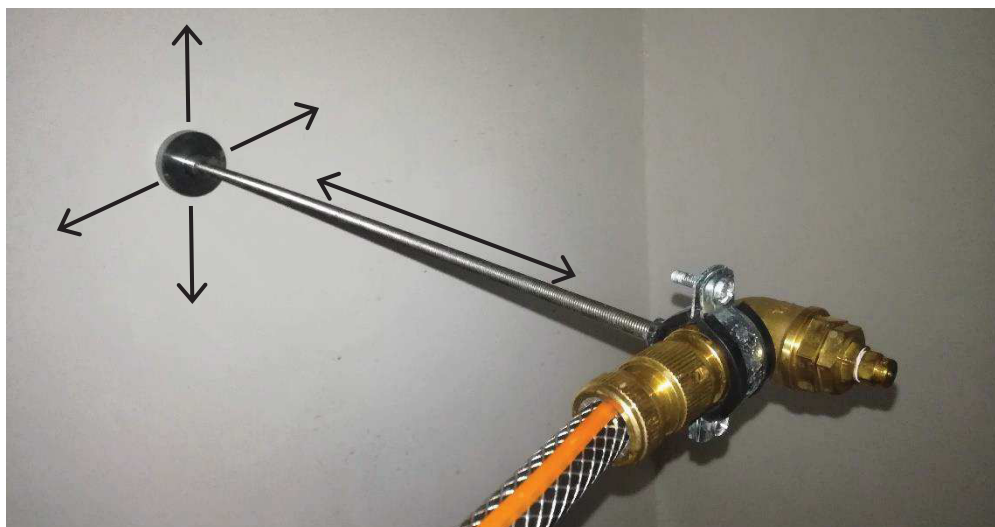
1. Komoru s otvorem, do kterého se osadí zkušební vzorek. Komoru, která je dostatečně pevná a tuhá – totožný požadavek i pro měření průvzdušnosti.
2. Zařízení, které umožní vytvoření regulovaných zkušebních tlaků na zkušební vzorek – totožný požadavek i pro měření průvzdušnosti.
3. Prostředky umožňující rychlou změnu hodnot tlakového rozdílu – totožný požadavek i pro měření průvzdušnosti.
4. Zařízení pro měření zkušebního tlakového rozdílu s přesností $\pm 5\%$ – totožný požadavek i pro měření průvzdušnosti.
5. Postřikovací systém, který zajistí na celém vnějším povrchu zkušebního vzorku vytvoření rovnoměrného vodního filmu v množství $2 \text{ l/m}^2 \cdot \text{min}$. Trysky musí mít následující charakteristiky:
 - kruhový plně kuželový rozstřík,
 - úhel rozstříku minimálně 90° a maximálně 120° (podle [17 a 23] musí být úhel rozstříku pouze 120°),
 - pracovní rozsah tlaku vody 2 až 3 bary podle údajů výrobce.
6. Přístroj pro měření celkové dodávané vody s přesností $\pm 10\%$
7. Odvod vody z postřikovacího systému. Tento odvod nesmí zasahovat do odvodnění rámu zkušebního vzorku.

5.4.2. Zkušební zařízení ve skutečnosti

Zkušební zařízení pro měření vodotěsnosti stavebních dílců a prvku při statickém tlaku se sestavilo z jednotlivých dílů dle požadavků v kapitole 5.4.1. Zařízení se skládá z dílů:

1. Viz. kapitola 5.3.2. bod 1. (totožné pro zkoušku vzduchotěsnosti).
2. Viz. kapitola 5.3.2. bod 2. (totožné pro zkoušku vzduchotěsnosti).
3. Viz. kapitola 5.3.2. bod 3. (totožné pro zkoušku vzduchotěsnosti).
4. Viz. kapitola 5.3.2. bod 5. (totožné pro zkoušku vzduchotěsnosti).
5. Postřikovací systém musí splňovat požadavky technických norem [16, 17 a 23] vypsanych v bodě 5 kapitoly 5.4.1. Musí umožnit snadné rozmístění postřikovacích trysek pro různé typy zkoušek (nejen dle požadavků technických norem [16, 17 a 23]). Současně je zkušební komora již dokončená a není vhodné narušovat její plášť vrtáním otvorů či navařováním pomocných konstrukcí pro postřikovací systém.

Zkušební komora je kovová, a proto je vhodné využít ke kotvení postřikovacího systému magnetických úchytů.

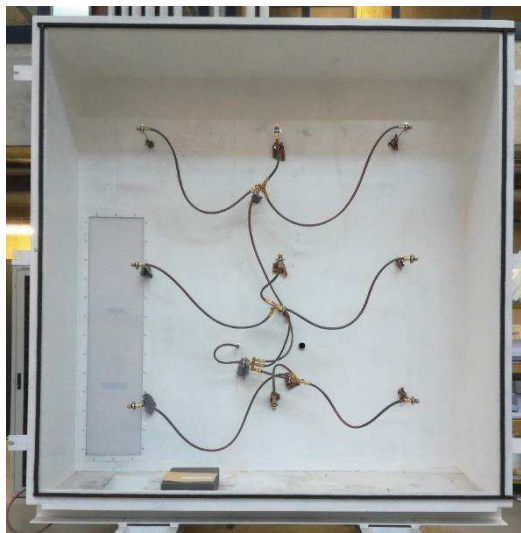
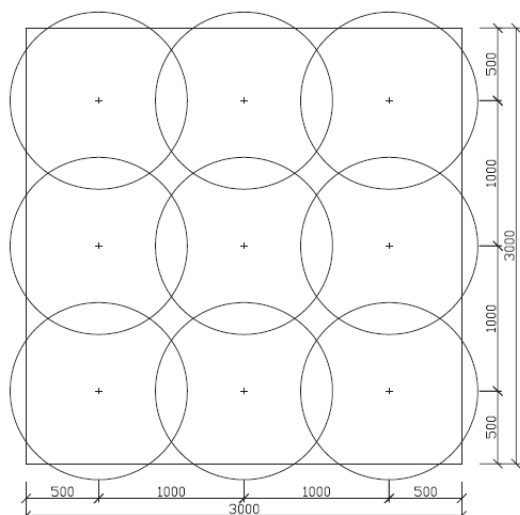


Obr. č.27: Schéma upevnění jedné trysky postřikovacího zařízení

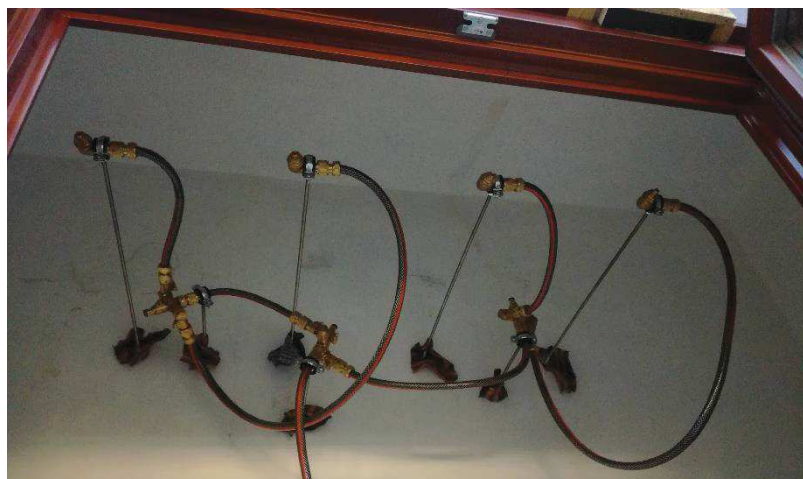
Pomocí magnetického způsobu uchycení lze snadno pohybovat s tryskou ve všech třech směrech. Ve svislém a vodorovném směru pomocí posunutí celého magnetického upevnění, vzdálenost trysek od zkušební vzorku se změní zkrácením či výměnou závitové tyče. Propojení jednotlivých trysek zajišťují flexibilní hadice napojené na rozdělovače.

Popis upevnění trysky postřikovacího zařízení:

Postřikovací systém je k ocelové konstrukci zkušební komory připevněn pomocí magnetického úchytu PM-48 s vnitřním závitem. Do závitu je našroubována závitová tyč M8 (délka závisí na požadavku vzdálenosti trysky od zkušební vzorku). Na závitovou tyč je našroubována kovová objímka s gumou, ve které je osazeno mosazné 90° koleno. V kolenu je ve směru postřiku umístěná axiální tryska série 490/491 s rozstříkem plného kužele typu 490.568 (úhel rozstříku 120°, vnější závit 1/8“) v mosazném provedení. Druhá strana kolene je opatřena adaptérem s vnitřním závitem pro snadné namontování rychlospojky 1/2“. Voda je k tryskám dopravována pomocí hadic 1/2“ s osazenými rychlospojkami.



Obr. č.28: Uspořádání postřikovacího zařízení (ústí trysky ve vzdálenosti 500 mm od zkušební vzorku) pro měření vodotěsnosti lehkých obvodových pláštů podle [17]



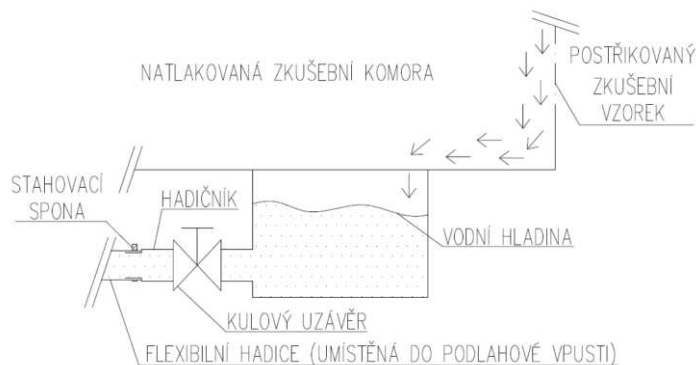
Obr. č.29: Uspořádání postřikovacího zařízení pro měření okna (o normových rozměrech 1,23x1,48 m) zkušebním postupem A podle [16]

6. Průtokoměr Gardena typ 8188; rozsah měření od 2 do 30 l/min; přesnost $\pm 5\%$ (minimálně $\pm 0,5$ l/min).



Obr. č.30: Průtokoměr Gardena typ 8188

7. Odtok je zabudován ve spodní části komory. Voda ze zkušební vzorku nateče do prohlubně na dně komory. Prohlubeň vytváří tzv. sifon, který zabraňuje úniku vzduchu z natlakované komory. Pokud voda ze sifonu odtéká rychleji, než přitéká, je možné přivřít kulový uzávěr na odtokovém potrubí.



Obr. č.31: Schéma odvodu vody ze zkušební komory

Tento systém zkušebního zařízení pro měření vodotěsnosti byl úspěšně ověřen ve variantě uspořádání postřiku pro testování lehkých obvodových plášťů (obr. č.28), kdy se postřikovala střešní hydroizolační fólie Protan SE tloušťky 1,5 mm o rozměrech 3x3 m. Další variantou úspěšného ověření funkčnosti zkušebního zařízení bylo uspořádání postřiku pro okna zkušební metodou A (obr. č.29), konkrétně okno SOLID COMFORT SC92 od firmy SLAVONA o normových rozměrech 1,23x1,48 m.

5.5. Ověřování průvzdušnosti pláště zkušební komory [1, 7, 12]

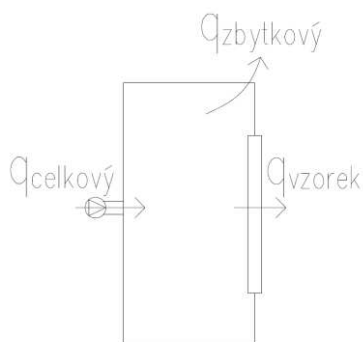
Zkušební komora není nikdy dokonale vzduchotěsná, a proto problematiku vzduchotěsnosti zkušební tlakové komory řeší i technické normy [7 a 12]. Tyto normy dělí zkušební komory na těsné (se známou průvzdušností) a netěsné (s neznámou průvzdušností). Dále uvádí podmínky, kdy je při vyhodnocování výsledků měření možné zanedbat vliv netěsností komory, ale také metodu, jak opravit výsledky měření o vliv netěsností komory.

Zkušební komoru považujeme za těsnou, pokud je její zbytkový objemový tok vzduchu menší než 5 % nejnižšího naměřeného objemového toku vzduchu. Pokud je komora považována za těsnou, lze uvažovat, že objemový tok vzduchu transportovaný ventilátorem je stejný jako objemový tok vzduchu proudící skrze zkušební vzorek. V případě netěsné zkušební komory se nejprve změří objemový tok vzduchu proudící skrze plášť komory. Zkušební vzorek je nahrazen vzduchotěsnou deskou nebo je

přelepen vzduchotěsnou fólií. Uvažuje se tedy, že objemový tok vzduchu transportovaný ventilátorem je totožný jako objemový tok vzduchu proudící skrze netěsnosti v plášti komory. Dále se po zjištění průvzdušnosti komory změří objemový tok vzduchu proudící zkušebním vzorkem a netěsnostmi v plášti komory. Průvzdušnost samotného zkušebního vzorku se vypočte jako rozdíl celkového objemového toku vzduchu a zbytkového toku vzduchu. Objemový tok vzduchu proudící zkušebním vzorkem se vypočítá pro všechny úrovně tlakového rozdílu.

$$q_{ref,vzorek} = q_{ref,celkový} - q_{ref,zbytkový} \quad (9)$$

kde: $q_{ref,vzorek}$ je objemový tok vzduchu zkoumaným vzorkem [m^3/h]
 $q_{ref,celkový}$ je celkový objemový tok vzduchu [m^3/h]
 $q_{ref,zbytkový}$ je zbytkový objemový tok vzduchu [m^3/h]



Obr. č.32: Schéma objemových toků vzduchu k rovnici (9)

5.5.1. Detekce netěsností v plášti zkušební komory anemometrem

Zjišťování netěsností v plášti zkušební komory pomocí anemometru bylo prováděno při tlakovém rozdílu ± 200 Pa mezi interiérem a exteriérem zkušební komory. V první fázi se v komoře vytvořil přetlak 200 Pa. Vzduch se tedy snažil dostat skrze netěsnosti ven z komory. Celý plášť (především jednotlivé spoje a svary) byl zvenku komory důkladně ohledán pomocí termického anemometru Testo 425. V druhé fázi došlo k vytvoření podtlaku v komoře. Vzduch se nasával skrze netěsnosti dovnitř do komory a ty se odhalovaly pomocí anemometru z vnitřku komory. Každá netěsnost byla na místě označena pro následné dotěsnění (viz. kapitola 5.5.3.). Schéma detekovaných netěsností včetně jejich fotodokumentace je uvedena v příloze P2.

5.5.2. Detekce netěsností v plášti zkušební komory zakouřením

K odhalení dalších případných netěsností v plášti zkušební komory se zvolila metoda zakouření vnitřku komory. K zakouření vnitřku komory se použil výrobek kouře BeamZ S700-LED. Spolu s kouřem uvnitř komory byl vyvolán také tlakový rozdíl 0, 20 a 100 Pa. Touto metodou se projevila pouze jedna netěsnost označená č.1 v příloze P2. Žádná další netěsnost se již neprojevila.

Závěrem se dá říct, že pro detekování velmi drobných netěsností (v případech kdy je nutné zajištění vzduchotěsnosti - vzduchotěsné komory, čisté prostory apod.) při tlakovém rozdílu je tato metoda vhodná pouze při vysoké hustotě kouře.

5.5.3. Dotěsnění detekovaných netěsností v plášti komory

Netěsnosti detekované v plášti komory se vyplnily a dotěsnily pomocí transparentního jednosložkového acetoxy silikonového tmelu Pattex pro univerzální použití v interiéru a exteriéru. Příklad utěsnění netěsnosti je uveden na obrázku č.33.

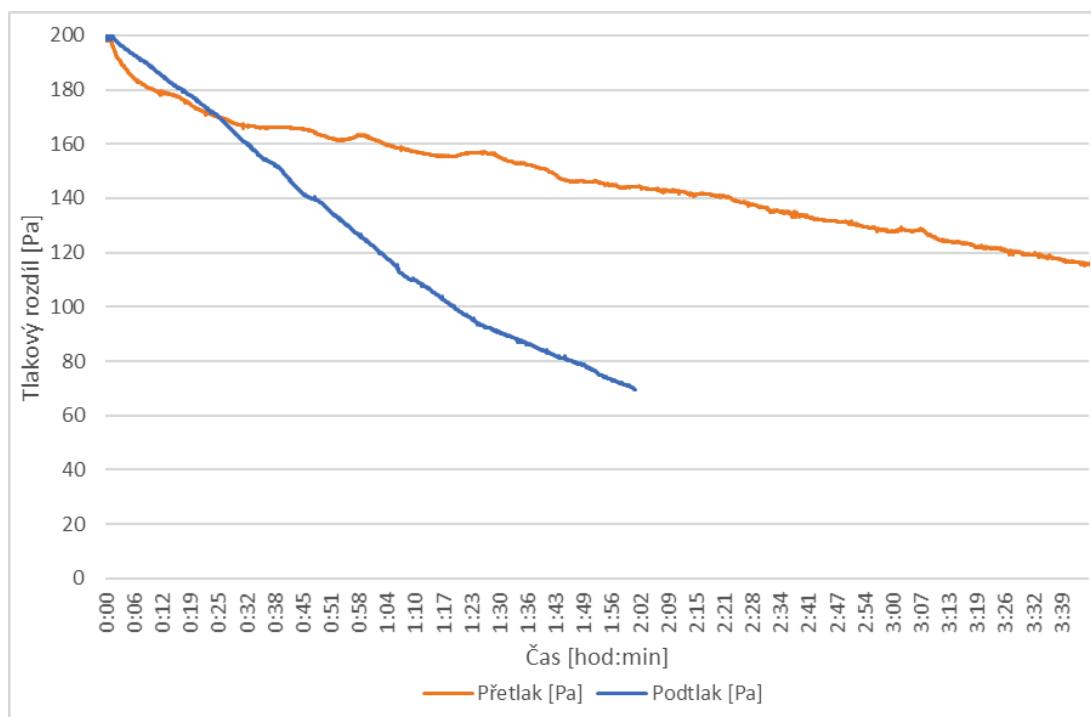


Obr. č.33: Detail netěsnosti (vlevo) a detail vyplněné a dotěsněné netěsnosti (vpravo)

5.5.4. Ověření těsnosti zkušební komory natlakováním

Pro tlakovou zkoušku zkušební komory se mezi komoru a posuvný rám vložila plachta svařená ze dvou dílů vzduchotěsné střešní hydroizolační fólie Protan SE tloušťky 1,5 mm. Toto opatření zajistí, že při tlakové zkoušce vzduch proniká pouze pláštěm zkušební komory. Zkouška byla provedena pro přetlak i podtlak uvnitř komory. Tlaková diference 200 Pa pro přetlak i pro podtlak byla vyvolána pomocí ventilátoru. Po

dosažení a ustálení tlaku na +200/-200 Pa se rychle uzavřel přívod/odvod vzduchu do/z komory kulovým uzávěrem. Pokles tlakového rozdílu zaznamenal software Teclog4.



Obr. č.34: Grafické porovnání poklesu tlaku po uzavření kulového kohoutu

Z výše uvedeného grafu je patrné, že plášť zkušební komory je velmi těsný. Po deseti minutách od uzavření kulového kohoutu klesla hodnota tlakového rozdílu o 20 Pa při přetlaku a o 12 Pa v případě podtlaku. Po 26 minutách poklesl tlakový rozdíl v obou případech (přetlak i podtlak) o 31 Pa. Hodinu po uzavření kulového kohoutu byl pokles hodnoty tlakového rozdílu o 38 Pa při přetlaku a o 76 Pa při podtlaku. Dvě hodiny po uzavření kohoutu klesl tlakový rozdíl o 56 Pa při přetlaku a o 129 Pa při podtlaku.

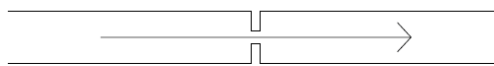
5.5.5. Ověření těsnosti zkušební komory měřením zbytkových toků

Je nutné znát zbytkový objemový tok vzduchu skrze plášť zkušební komory, jelikož se od něj odvíjí postup měření vzduchotěsnosti (viz. [7] nebo kapitola 5.5.). Pro měření zbytkových toků se mezi komoru a posuvný rám vložila plachta svařená ze dvou dílů vzduchotěsné střešní hydroizolační fólie Protan SE tloušťky 1,5 mm. Toto opatření zajistí, že při měření vzduch proniká pouze pláštěm zkušební komory.

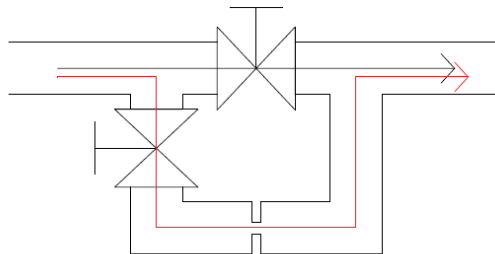
První pokus měření objemového toku vzduchu proběhl pomocí mikroprůtokoměru MLM a tlakového snímače DG-1000. Největším problémem tohoto zařízení je velmi zdoluhavá schopnost natlakování zkušební komory z důvodu použití nejmenší clony (disk 4, průměr otvoru cca 3 mm). Dále byl požadovaný průtok vzduchu nižší než

rozsah měření tohoto zařízení (minimální zaznamatelný průtok vzduchu zařízení $q_{min} = 0,17 \text{ m}^3/\text{h}$). Použití mikroprůtokoměru MLM je tedy nepraktické pro měření zbytkových toků skrze plášť zkušební komory.

BEZ BYPASSU



S BYPASSEM:



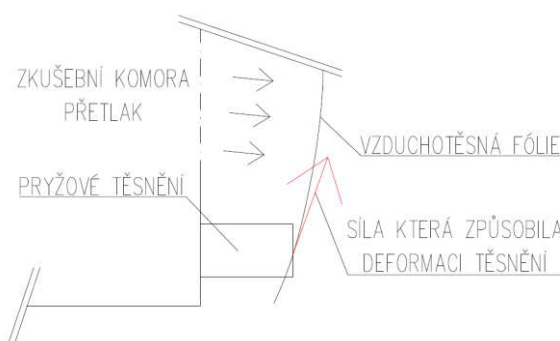
Obr. č.35: Varianty zapojení mikroprůtokoměru MLM (vlevo – bez bypassu, vpravo – s bypassem)

Na obrázku č.35 je uveden vhodnější způsob zapojení pro měření s mikroprůtokoměrem MLM. U varianty bez bypassu (na obr. č.35 vlevo) s použitím clon pro měření nízkých průtoků vzduchu dochází k zdlouhavému natlakování zkušební komory na požadovaný tlakový rozdíl. U varianty s bypassem (na obr. č. 35 vpravo) dochází k natlakování zkušební komory na požadovaný tlakový rozdíl pomocí otevřeného horního kulového kohoutu (proud vzduchu označený černou šipkou). Po dosažení a ustálení požadovaného tlakového rozdílu dojde k otevření kulového kohoutu směrem do bypassu a uzavření horního kohoutu (proud vzduchu označený červenou šipkou). Požadovaný tlakový rozdíl se opět nechá ustálit a je možné ihned měřit objemový tok vzduchu. U zapojení s bypassem tedy odpadá zdlouhavé natlakování zkušební komory na požadovaný tlakový rozdíl.

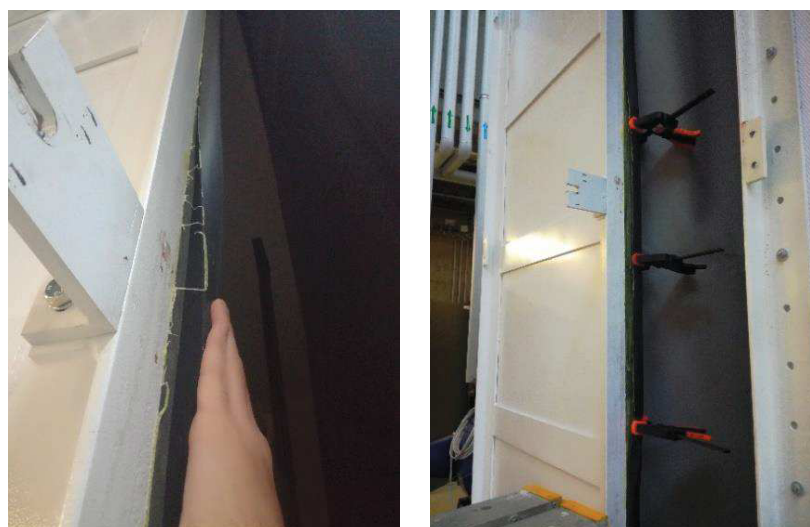
Z důvodu nevhodnosti použití mikroprůtokoměru MLM se pro měření zbytkového objemového toku vzduchu skrze plášť zkušební komory (zbytkový tok je nižší než rozsah měření mikroprůtokoměru MLM) se zvolil membránový plynoměr BK-G10M osazený nízkofrekvenčním snímačem IN-Z61 (impulsní snímač otáček plynoměru). Tento snímač zaznamená impuls vydaný otáčkoměrem plynoměru při průtoku vzduchu skrze plynoměr o objemu $0,1 \text{ m}^3$. Tento záznam je zapsán spolu s časem do zapisovače dat DataTaker. Zapisovač dat také zaznamenává hodnoty tlakového rozdílu z diferenčního manometru Beck 984. Nevýhodou měření objemového toku pomocí plynoměru je to, že se musí z objemu vzduchu proteklého přes plynoměr v časovém intervalu dopočítat průtok vzduchu q [m^3/h]. Není tedy znám aktuální objemový tok vzduchu v průběhu měření (jako např. u principu měření průtoku

vzduchu skrze otvor o známých rozměrech a vlastnostech – clonkové dráhy). A také to znamená, že čím je měřený průtok nižší, tím je doba měření delší. Například pokud se má měřit objemový tok vzduchu $q = 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$, je nutné pro změření jedné hodnoty objemového toku vzduchu čas jedné hodiny. U měření objemového toku vzduchu na principu clonkové dráhy toto zdouhavé měření odpadá, protože objemový tok vzduchu je znám téměř okamžitě.

Při osazení vzduchotěsné fólie mezi zkušební komoru a zkušební rám lze naměřit zbytkové toky proudící pouze skrze plášť zkušební komory. Ve zkušebním rámu byl umístěn vzorek střešního okna osazený ve střešní rovině. Dle předpokladu mělo dojít při přetlaku uvnitř komory k opření vzduchotěsné fólie o tento vzorek. Uvažovalo se s tlakovým rozdílem 50 Pa, 100 Pa, 150 Pa, 200 Pa, 250 Pa, 300 Pa, 450 Pa a 600 Pa. Zkouška začala od nejvyššího tlakového rozdílu. Ovšem hned při tlakovém rozdílu 600 Pa byly vyvinuty tak velké tahové síly ve fólii, které zapříčinily utržení gumového těsnění od kovového rámu zkušební komory na levé straně při pohledu zvenku.



Obr. č.36: Schéma tahové síly ve vzduchotěsné fólii, která poškodila pryžové těsnění



Obr. č.37: Utržené gumové těsnění (vlevo) a průběh opravy znovu přilepením těsnění (vpravo)

Z utrženého gumového těsnění se v co největší možné míře odstranily zbytky původního lepidla a následně byly spojované povrchy odmaštěny. Beztoluenové kontaktní lepidlo se dokonale promíchalo a pomocí štětce se nanoslo v tenké vrstvě na povrch ocelové komory a těsnění. Nechalo se zavadnout 10 minut a následně se oba povrchy spojily. Spoj se zalisoval v místě porušení přitlačením dřevěné fošny pomocí truhlářských svěrek. Spoj byl lisován po dobu minimálně 24 hodin. Po zalisování byla provedena vizuální kontrola spoje, která neobjevila žádné závady. Dále po přitažení zkušebního rámu byla těsnost opraveného spoje ověřena pomocí anemometru při různých stupních tlakového rozdílu.

Z důvodu eliminace rizika opětovného poškození gumového těsnění bylo nutné pro měření reziduálních toků pomocí vložené vzduchotěsné fólie snížit hodnotu maximálního tlakového rozdílu. Dle zkušeností z měření byla stanovena maximální hodnota tlakového rozdílu na 200 Pa. Při měření reziduálních toků za podtlaku docházelo k nasátí (vyboulení) fólie směrem do zkušební komory a tím i k velkým tahovým silám v místě gumového těsnění. Tyto síly by mohly znovu poškodit nalepené těsnění. Proto byl uvnitř zkušební komory sestaven podpůrný rám z dřevěných fošen, o který se vzduchotěsná fólie při podtlaku opře.



Obr. č.38: Podpůrný rám z dřevěných fošen

Samotný plášť zkušební komory je natolik vzduchotěsný, že měření zbytkových toků pomocí plynoměru v plném rozsahu (po přírůstcích 50 Pa až do 300 Pa a dále po přírůstcích 150 Pa až do maximálního zkušební tlaku) podle [12 a 13] by bylo časově příliš náročné a také by se měření pohybovalo pod minimálním deklarovaným rozsahem měřicího zařízení. Plynoměr sice dokáže zaznamenat i takto nízké průtoky

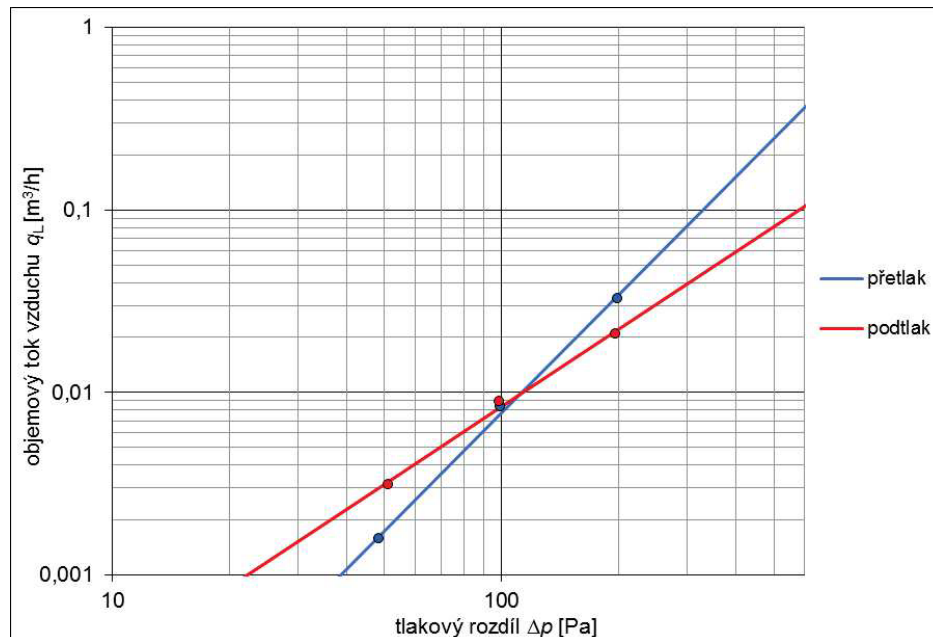
vzduchu ($q < 0,1 \text{ m}^3/\text{h}$), ovšem u těchto nízkých průtoků není výrobcem udávána přesnost měření. Pro získání přibližné informace o těsnosti pláště zkušební komory se zvolily hodnoty tlakového rozdílu 50 Pa, 100 Pa a 200 Pa. Hodnota objemu vzduchu, která protekla plynoměrem, byla odečítána manuálně snímáním otáčky na displeji při protečení vzduchu o objemu $0,01 \text{ m}^3$ (konstrukce tohoto typu plynoměru umožňuje pouze záznam impulzu o objemu $0,1 \text{ m}^3$). Současně byl měřen čas jedné této otáčky o $0,01 \text{ m}^3$ na plynoměru. Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 7. Výpočet odhadu nejistot uváděných v tabulce 7, byl stanoven dle postupu v [5 a 7]. Pro každé jednotlivé měření byl vyhotoven samostatný zkušební protokol (příloha P5).

Tab. 7 – Výsledky měření průvzdušnosti pláště zkušební komory

	$q_{50} [\text{m}^3/\text{h}]$		$q_{100} [\text{m}^3/\text{h}]$		$C_L [\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)]$		$n [-]$	
přetlak	0,0018	$\pm 0,003$	0,0078	$\pm 0,006$	0,0000004	$\pm 0,0001$	2,15	$\pm 1,27$
podtlak	0,0032	$\pm 0,004$	0,0084	$\pm 0,007$	0,0000125	$\pm 0,0025$	1,41	$\pm 1,30$

Z výsledků měření je patrné, že hodnota exponentu proudění n leží mimo interval $0,5 - 1$. V tomto případě tedy naměřené výsledky neodpovídají empirické rovnici proudění (1). Důvodem je nejspíš to, že empirická rovnice proudění (1) platí pro omezený tlakový rozdíl. V širším pásmu tlakových rozdílů už nemusí platit její závislost, protože chování netěsnosti se může měnit. Vzduchotěsná fólie se protahuje a deformuje tím i pryžové těsnění. Tím se tedy může měnit charakteristika netěsnosti. Také vzniká obrovská nejistota při měření objemového toku vzduchu plynoměrem (kvůli manuálnímu odečítání hodnot průtoku vzduchu), která není zahrnuta v odhadu nejistoty podle [5 a 7]. Výsledky měření jsou tedy zatíženy velikou mírou nejistoty, kdy je nejistota výsledků větší než vypočítaná hodnota. Zjištěné hodnoty průvzdušnosti pláště zkušební komory jsou tedy pouze orientační.

Grafickou formou jsou na obrázku č. 39 zaznamenány orientační výsledky měření průvzdušnosti zkušební komory.



Obr. č.39: Orientační výsledky měření průvzdušnosti zkušební komory

Měření zbytkových toků skrze plášť zkušební komory pomocí vložené vzduchotěsné fólie není optimální z důvodu velkých deformací fólie. Jako vhodnější varianta se jeví nahrazení vzduchotěsné fólie za vzduchotěsnou desku (např. vodovzdornou překližku) přimontovanou na rastr dřevěných sloupků. Sloupkový systém vždy musí odolat maximálnímu zkušebnímu tlaku uvnitř zkušební komory. Kotvicí prostředky a spoje desek je nutné vzduchotěsně utěsnit. Tato varianta se vzduchotěsnou deskou nebyla použita kvůli nepraktičnosti skladování velkých vzduchotěsných desek.

V běžné praxi pro měření zbytkových (reziduálních) toků bych doporučoval zakrytí a přelepení celého zkušebního vzorku plastovou vzduchotěsnou fólií.



Obr. č.40: Okno přelepené vzduchotěsnou plastovou fólií, měření zbytkových toků při podtlaku

5.6. Pilotní měření průvzdušnosti výplně otvoru

Pilotního měření slouží k ověření schopnosti sestaveného laboratorního zařízení měřit průvzdušnost na vybraném zkušebním vzorku.

5.6.1. Výběr vhodné výplně otvoru

K pilotnímu měření průvzdušnosti se zvolilo okno SOLID COMFORT SC92 od firmy SLAVONA, které bylo k dispozici na skladě UCEEBu. Rozměry zvoleného okna odpovídají rozměrům normového okna 1,23 x 1,48 m. Rám je dřevěný, okenní křídlo zasklené tepelně izolačním trojsklem. Funkční spára je vybavena třemi těsníci profily po celém obvodu. Vyrobene okno je z hlediska průvzdušnosti dle ČSN EN 12207 zatříděné v klasifikační třídě 4 [25].

5.6.2. Způsob osazení okna do zkušebního rámu

Pro zjišťování průvzdušnosti se okno osadilo do zkušebního rámu s otvorem o velikosti normového okna. Rám se používá pro zkoušení tepelně technických vlastností oken ve velké klimatické dvojkomoře [36]. Podle specifikací výrobce zkušebního rámu se předpokládá jeho vzduchotěsnost. Do rámu se ukotvilo pomocí čtyř kotevních bodů. Na zkušební rám se osadil kotevní plech ve tvaru U s navařenými závity. Přejechod z kotevního plechu na zkušební rám se z důvodu zajištění vzduchotěsnosti přelepil PVC lepicí páskou. Pevný rám okna byl zafixován pomocí OSB desek s vyvrtanými otvory, nasazených na kotevní plech a stažených maticemi ze strany interiéru i exteriéru. Exteriérová strana okna se osadila směrem do vnitřku komory. Horní a boční přípojovací spára ze strany exteriéru se přelepila PVC lepicí páskou. Těsnící hmota Terostat-IX byla použita k dotěsnění spodní přípojovací spáry z exteriéru.

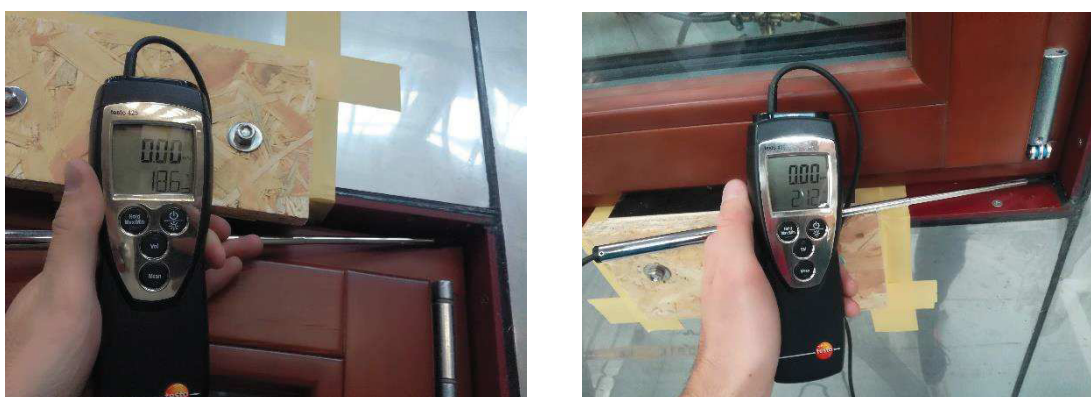


Obr. č.41: Detail kotevního plechu (vlevo) a detail vzduchotěsně přelepeného plechu (vpravo)



Obr. č.42: Pohled na osazené zkušební okno ze strany exteriéru

Před začátkem měření průvzdušnosti došlo k ověření vzduchotěsnosti připojovací spáry pomocí přikládání anemometru. Tato metoda ověřování neobjevila žádné netěsnosti až do tlakového rozdílu +300 Pa. V horních rozích připojovacích spár byl při tlakovém rozdílu 450 Pa objeven proudící vzduch rychlostí okolo 0,02 m/s. S touto netěsností se už dále nikterak nepracovalo, protože je velmi malá.



*Obr. č.43: Ověřování těsnosti připojovací spáry ze strany interiéru při přetlaku 300 Pa;
pravý horní roh (vlevo), pravý dolní roh (vpravo)*

5.6.3. Měření průvzdušnosti zkušebního okna

Průvzdušnost zkušebního vzorku se měřila ve dvou stavech. Nejprve ve stavu, kdy byl seřízen přítlak otevíravého křídla. Ve druhém stavu se přítlak křídla povolil a okno tak zůstalo neseřízené. Ve variantě seřízeného okna se ověřovala schopnost měření průvzdušnosti velmi těsných moderních oken. Varianta neseřízeného okna měla ověřovat schopnost měření průvzdušnosti oken s vyšší průvzdušností.

5.6.3.1. Zkušební postup

Měřicí postup se řídil technickou normou ČSN EN 1026 [12] a ČSN EN 12114 [7]. Zkušební vzorek byl kondicionován nejméně 18 hodin v klimatu s teplotou pohybující se okolo 20 °C a relativní vlhkostí vzduchu 35 %.

Zkušební komora byla uvažována jako komora s neznámou průvzdušností a tomu odpovídal i postup měření (ve variantě seřízeného i neseřízeného okna):

1. Došlo k přelepení celého okna vzduchotěsnou fólií ze strany exteriéru okna (z vnitřku komory). Vzduchotěsná fólie zakrývala celé otevíravé křídlo okna a jeho funkční spáru. Přilepena byla pomocí PVC lepicí pásky k pevnému rámu okna.
2. Před měřením zbytkových toků při přetlaku se vyvolaly tři tlakové rázy o tlakovém rozdílu 675 Pa, kdy každý trval nejméně 3 vteřiny.
3. Změřila se průvzdušnost zkušební komory (zbytkové toky) v tlakových stupních 50, 100, 150, 200, 250, 300 a 450 Pa.
4. Odstranila se vzduchotěsná fólie. Okenní křídlo bylo otevřeno, zavřeno a následně zajištěno v uzavřené poloze.
5. Před měřením celkových toků při přetlaku se vyvolaly tři tlakové rázy o tlakovém rozdílu 675 Pa, kdy každý trval nejméně 3 vteřiny.
6. Změřila se průvzdušnost zkušební komory a výplně otvoru (celkové toky) v tlakových stupních 50, 100, 150, 200, 250, 300 a 450 Pa.
7. Ze strany interiéru okna (z vnějšku komory) se přelepilo celé otevíravé křídlo okna a jeho funkční spára vzduchotěsnou fólií, která byla přilepena pomocí PVC lepicí pásky k pevnému rámu okna.
8. Před měřením zbytkových toků při podtlaku se vyvolaly tři tlakové rázy o tlakovém rozdílu 675 Pa, kdy každý trval nejméně 3 vteřiny.
9. Změřila se průvzdušnost zkušební komory (zbytkové toky) v tlakových stupních -50, -100, -150, -200, -250, -300 a -450 Pa.
10. Odstranila se vzduchotěsná fólie. Okenní křídlo bylo otevřeno, zavřeno a následně zajištěno v uzavřené poloze.
11. Před měřením celkových toků při podtlaku se vyvolaly tři tlakové rázy o tlakovém rozdílu 675 Pa, kdy každý trval nejméně 3 vteřiny.
12. Změřila se průvzdušnost zkušební komory a výplně otvoru (celkové toky) v tlakových stupních -50, -100, -150, -200, -250, -300 a -450 Pa.

Objemový tok vzduchu se měřil membránovým plynoměrem BK – G10M. Tlakové rozdíly byly měřeny snímačem tlakové diference Beck 984Q. Veškeré měřené hodnoty zaznamenával zapisovač dat DataTaker.

5.6.3.2. Výsledky měření

Pro oba dva testy (seřizené a neseřizené okenní křídlo) byl vyhotoven samostatný zkušební protokol (příloha P5). Přehled výsledků jednotlivých testů je uveden v tabulce 8. Výpočet odhadu nejistot uváděných v tabulce 8 byl stanoven dle postupu v [5 a 7]. Výsledné hodnoty součinitele proudění C_L jsou vztaženy jak pro celou plochu okenní výplně, tak i na 1 m^2 plochy okna a na 1 bm (běžný metr) funkční spáry. Exponent proudění n je neměnný.

Tab. 8 – Výsledky měření vzduchotěsnosti zkušebního okna

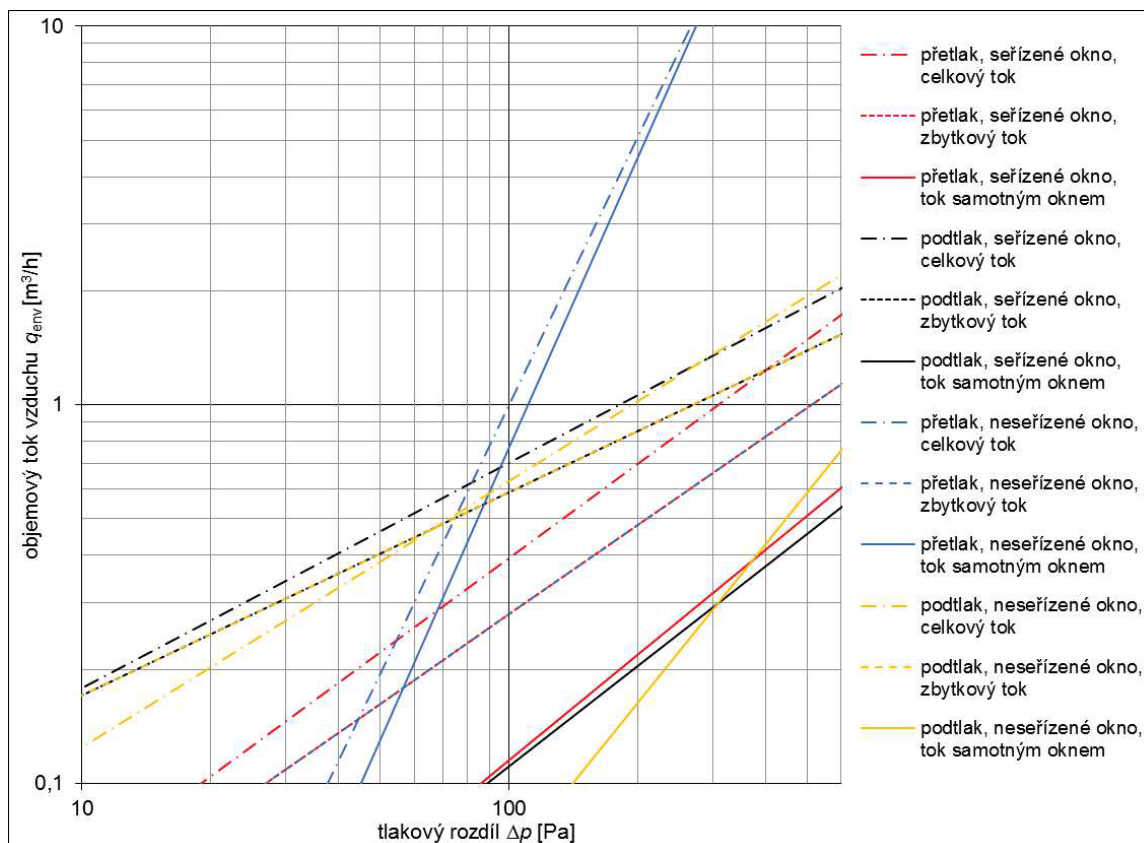
			objemový tok vzduchu $q_{100} [\text{m}^3/\text{h}]$		součinitel proudění C_L [$\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{Pa}^n)$]		exponent proudění $n [-]$	
seřizené okno	přetlak	celá výplň	0,11	$\pm 0,02$	0,0016	$\pm 0,003$	0,93	$\pm 0,07$
		na 1 m^2	0,06	$\pm 0,01$	0,0009	$\pm 0,002$	0,93	$\pm 0,07$
		na 1 bm spáry	0,02	$\pm 0,004$	0,0003	$\pm 0,001$	0,93	$\pm 0,07$
	podtlak	celá výplň	0,11	$\pm 0,05$	0,0019	$\pm 0,022$	0,88	$\pm 0,09$
		na 1 m^2	0,06	$\pm 0,02$	0,0011	$\pm 0,012$	0,88	$\pm 0,09$
		na 1 bm spáry	0,02	$\pm 0,01$	0,0004	$\pm 0,004$	0,88	$\pm 0,09$
neseřizené okno	přetlak	celá výplň	0,76	$\pm 0,26$	0,00001	$\pm 0,003$	2,54	$\pm 0,35$
		na 1 m^2	0,42	$\pm 0,14$	0,000003	$\pm 0,001$	2,54	$\pm 0,35$
		na 1 bm spáry	0,15	$\pm 0,05$	0,000001	$\pm 0,0005$	2,54	$\pm 0,35$
	podtlak	celá výplň	0,06	$\pm 0,02$	0,0001	$\pm 0,010$	1,40	$\pm 0,04$
		na 1 m^2	0,03	$\pm 0,01$	0,0001	$\pm 0,005$	1,40	$\pm 0,04$
		na 1 bm spáry	0,01	$\pm 0,003$	0,00002	$\pm 0,002$	1,40	$\pm 0,04$

Pozn.: plocha okna $1,82 \text{ m}^2$; délka funkční spáry $5,14 \text{ m}$

Z výsledků měření vyplývá, že v případě neseřizeného okna leží hodnota exponentu proudění n mimo interval $0,5 - 1$. V tomto případě tedy naměřené výsledky neodpovídají empirické rovnici proudění (1). Důvodem je nejspíš to, že v průběhu měření dochází změně charakteristiky netěsnosti. Dále je hodnota součinitele proudění C_L zatížena velikou mírou nejistoty. Nejistota je dokonce větší než samotná vypočítaná hodnota. Vysokou mírou nejistoty jsou zatíženy i hodnoty objemového toku vzduchu q_{100} u neseřizeného okna.

Na obrázku č. 44 jsou graficky porovnány výsledky měření vzduchotěsnosti okna ve variantě seřizeného a neseřizeného přitlaku okenního křídla. Kdy čerchovaná čára značí celkový objemový tok vzduchu (zbytkový tok + tok samotným oknem),

čárkovaná čára zbytkový objemový tok a plná čára objemový tok samotným oknem. Z grafického znázornění je patrné, že průvzdušnost samotného seřizovaného okna je téměř totožná při přetlaku i podtlaku. Ovšem u okna, které nemá seřizovaný přítlak okenního křídla, dochází při přetlaku uvnitř komory k rozevírání netěsností (okenní křídlo má tendenci se při přetlaku otevírat směrem do interiéru, ven z komory) a tím i ke zvyšujícímu se průtoku vzduchu v závislosti na zvyšujícím se tlakovém rozdílu. Tento fakt je zřejmý z velice strmé regresní přímky a vysokého exponentu proudění n .



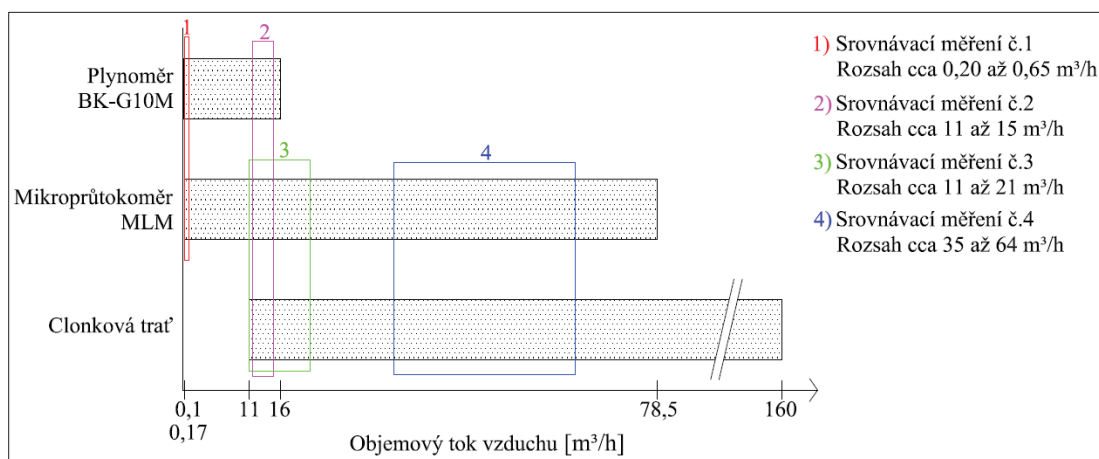
Obr. č.44: Grafické porovnání výsledků měření vzduchotěsnosti zkoumaného okna – objemový tok vzduchu celým oknem v závislosti na tlakovém rozdílu

Pokud se seřizované i neseřizované okno zatřídí dle klasifikace uvedené v ČSN EN 12207 [8], tak zkoumané okno spadá ve všech případech do nejtěsnější třídy 4. Tento výsledek měření odpovídá i klasifikaci, kterou udává výrobce zkušební okna.

5.7. Srovnávací měření s různými typy přístrojů pro měření průtoku vzduchu

V současné době jsou v UCEEBu k dispozici tři přístroje, kterými je možné měřit objemový tok vzduchu. A to membránový plynoměr BK-G10M (obr. č.21), mikroprůtokoměr MLM se čtyřmi vyměnitelnými disky (obr. č.22) a clonková trať

s dvojicí centrických clon (obr. č.23). V rámci srovnávacího měření bude porovnáváno, jak přesně jednotlivé zkušební přístroje měří a jaká bude shodnost naměřených výsledků. Cílem experimentu je ověření přesnosti měření různými typy přístrojů pro měření objemového toku vzduchu v různém měřicím rozsahu. Na obrázku č.45 je graficky znázorněn rozsah měření jednotlivých přístrojů pro měření objemového toku vzduchu. Barevné hodnoty 1, 2, 3 a 4 znázorňují předpokládaný rozsah měření objemového toku vzduchu při srovnávacím měření.



Obr. č.45: Grafické znázornění rozsahu měření jednotlivých přístrojů pro měření objemového toku vzduchu

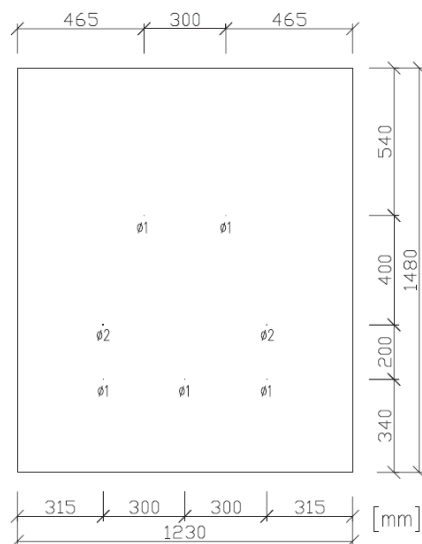
Pro účely srovnávacího měření je vhodné navrhnout zkušební vzorek s proměnlivou vzduchotěsností a její snadnou konfigurací. Byla tedy vytvořena deska s otvory, u které se různá těsnost simuluje střídavým utěsněním (přelepěním) otvorů. Předpokladem je to, že deska v ploše nepropouští vzduch a ten proudí jen skrze neutěsněné otvory. Deska je vyrobena z vodovzdorné překližky tloušťky 18 mm a má rozměry normového okna 1,23 x 1,48 m. To znamená, že se dá osadit do zkušebního rámu s otvorem o velikosti normového okna (obr. č.18 vlevo). Počet a velikost otvorů, které jsou potřebné ke konfiguraci jednotlivých předem zvolených rozsahů srovnávacího měření, byly stanoveny na základě výpočtu rovnice proudění vzduchu přes otvor v závislosti na tlakovém rozdílu pomocí kalkulačky [27]. Deska s otvory se osadila do zkušebního rámu s otvorem o velikosti normového okna pomocí kotvících bodů, stejně jako okno pro pilotní měření v kapitole 5.6.2. Připojovací spára se vyplnila těsnicí hmotou Terostat-IX a následně byla přelepěna PVC lepicí páskou ze strany interiéru i exteriéru.



Obr. č.46: Návrh rozmístění a velikosti otvorů (vlevo) a osazená deska s otvory (vpravo)

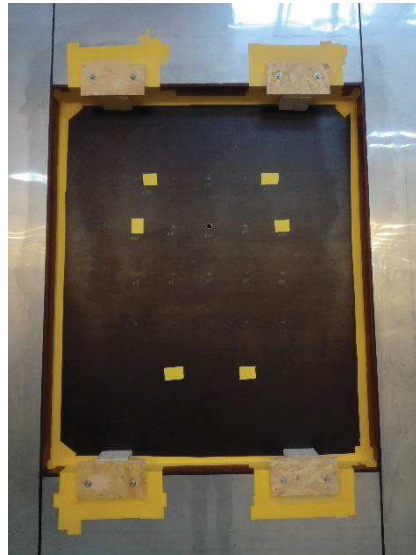
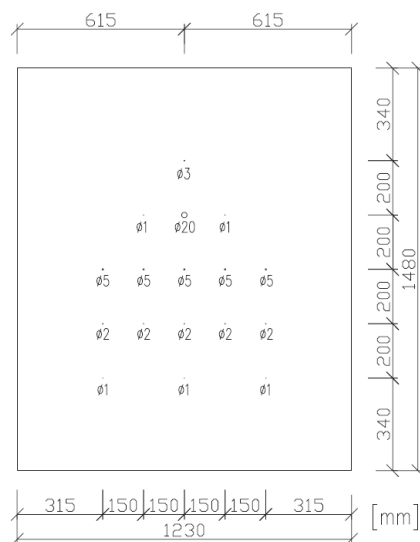
Otvory v desce budou dle požadované konfigurace průvzdušnosti přelepeny PVC lepicí páskou. Srovnávací měření se rozdělilo do čtyř kategorií dle měřícího rozsahu jednotlivých přístrojů pro měření objemového toku vzduchu:

1. Srovnávací měření pomocí plynoměru a mikroprůtokoměru MLM v přibližném rozsahu 0,20 až 0,65 m³/h. Tlakový rozdíl při přetlaku a podtlaku činil 50, 100, 150, 200, 250 a 300 Pa. Konfigurace otvorů v desce je uvedena na obrázku č.47.



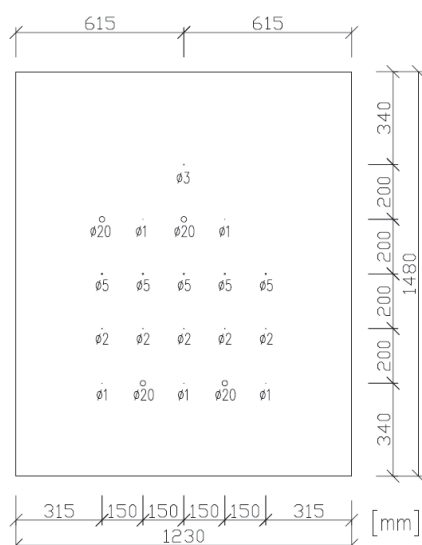
Obr. č.47: Rozmístění otvorů pro srovnávací měření č.1

2. Srovnávací měření všech tří přístrojů (plynoměr, mikroprůtokoměr MLM a clonková trať) v přibližném rozsahu 11 až 15 m³/h. Tlakový spád při přetlaku i podtlaku byl stanoven na 50, 55, 60, 65, 70, 75 a 80 Pa. Konfigurace otvorů v desce je uvedena na obrázku č.48.



Obr. č.48: Rozmístění otvorů pro srovnávací měření č.2 a 3

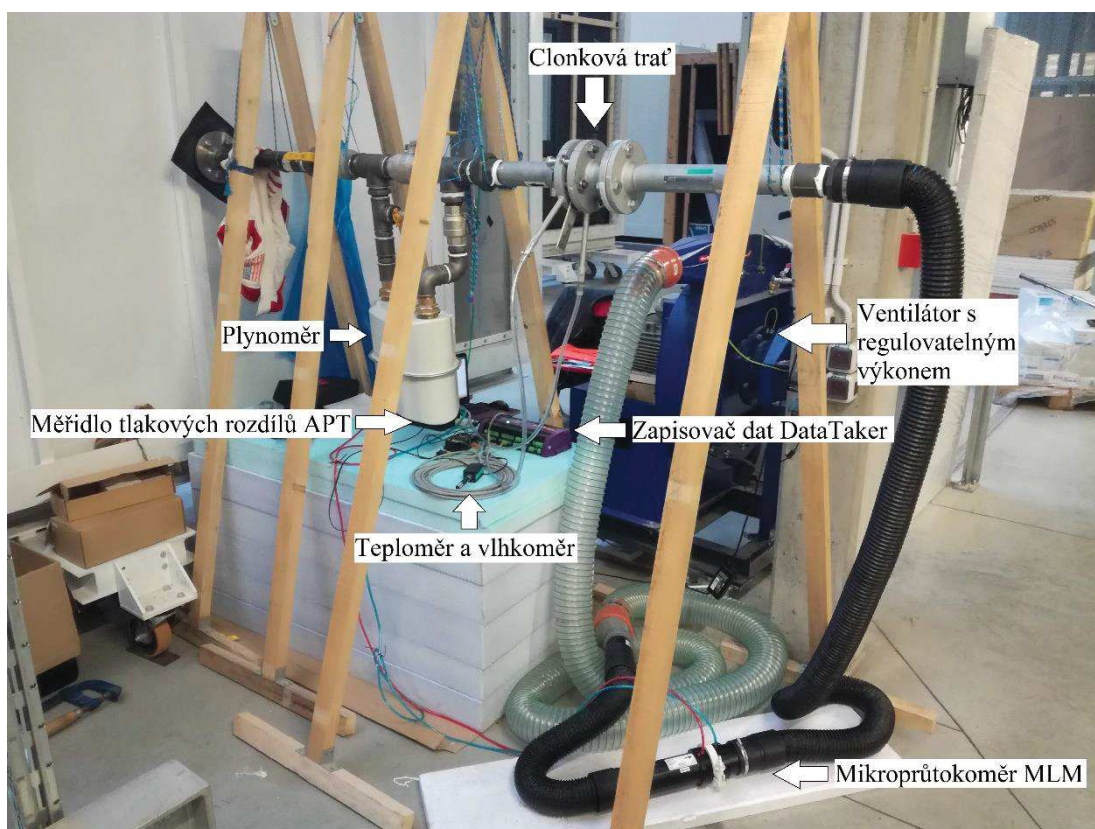
3. Srovnávací měření mikroprůtokoměru MLM a clonkové tratě v přibližném rozsahu 11 až 21 m³/h. Tlakový spád při přetlaku i podtlaku činil 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 a 150 Pa. Konfigurace otvorů je totožná se srovnávacím měřením č.2 (obrázek č.48).
4. Srovnávací měření mikroprůtokoměru MLM a clonkové tratě v přibližném rozsahu 35 až 64 m³/h. Tlakový spád při přetlaku činil 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140 a 150 Pa. Měření při podtlaku bylo ve svém průběhu ukončeno kvůli obavám z nadměrné deformace a následného poškození flexi hadice napojené na mikroprůtokoměr MLM. Konfigurace otvorů v desce je uvedena na obrázku č.49.



Obr. č.49: Rozmístění otvorů pro srovnávací měření č.4

Dle rovnice kontinuity je objemový tok vzduchu přes všechny sériově zařazené měřicí přístroje konstantní. Předpokladem je to, že v místě spojů jednotlivých měřicích přístrojů nevznikají netěsnosti. K účelům srovnávacího měření se proto tyto přístroje zařadily do série s důrazem na vzduchotěsné provedení spojů mezi nimi.

Tlakový rozdíl na zkušebním prvku, tlakový rozdíl na discích mikroprůtokoměru MLM a tlakový rozdíl na centrických clonách clonkové dráhy zaznamenávalo měřidlo tlakových rozdílů APT-8. Tyto hodnoty se měřily současně při sériovém zapojení přístrojů (mikroprůtokoměr MLM a clonková dráha) pro měření objemového toku vzduchu. Objemový tok vzduchu skrze plynoměr lze přesně odečíst pouze impulzním snímačem IN-Z61 a zapsáním hodnot do zapisovače dat DataTaker.



Obr. č.50: Zařízení měřící objemový tok vzduchu při přetlaku, zařazeno sériově (ve směru od ventilátoru: mikroprůtokoměr MLM, clonková trať a plynoměr) pro srovnávací měření č.2

5.7.1. Vyhodnocení srovnávacího měření č.1

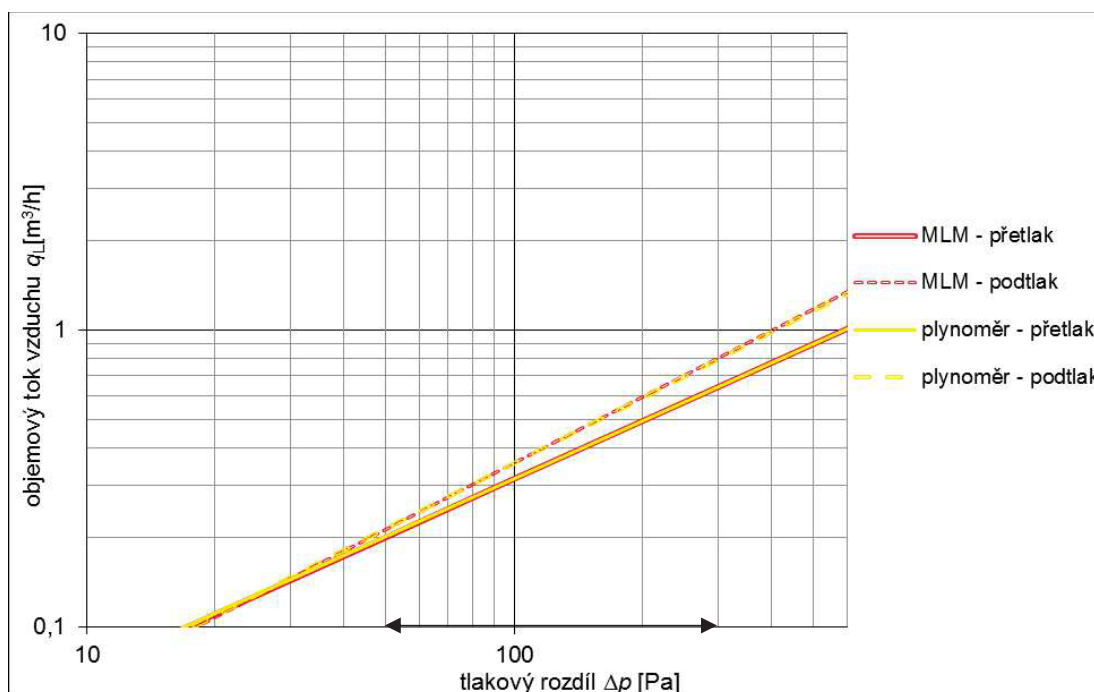
Při srovnávacím měření č.1 byl sériově zařazen (ve směru od ventilátoru) mikroprůtokoměr MLM a plynoměr. Pro obě dvě varianty měřicích přístrojů byl vyhotoven samostatný zkušební protokol (příloha P5). Přehled výsledků jednotlivých měření je uveden v tabulce 9. Výpočet odhadu nejistot uváděných v tabulce 9 byl

stanoven dle postupu v [5, 7]. Výsledné hodnoty jsou uváděny jako objemový tok vzduchu proudící skrze zkušební desku s otvory a plášť zkušební komory.

Tab. 9 – Výsledky srovnávacího měření č.1

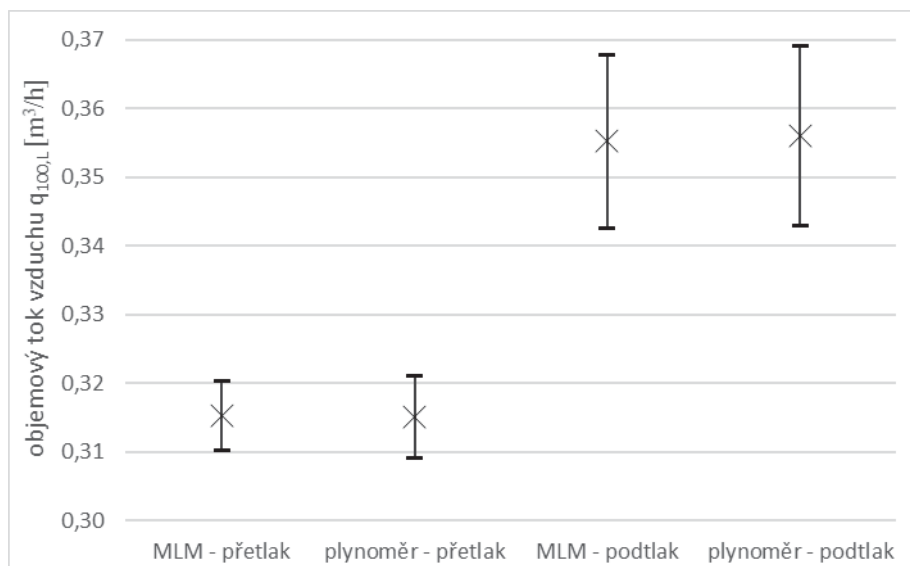
		objemový tok vzduchu $q_{L,100}$ [m ³ /h]		součinitel proudění C_L [m ³ /(h.Pa ⁿ)]		exponent proudění n [-]	
mikroprůtokoměr MLM	přetlak	0,32	±0,01	0,016	±0,002	0,65	±0,03
	podtlak	0,36	±0,01	0,012	±0,003	0,74	±0,06
plynoměr	přetlak	0,32	±0,01	0,016	±0,002	0,65	±0,02
	podtlak	0,36	±0,01	0,012	±0,003	0,74	±0,06

Na obrázku č.51 jsou graficky porovnány výsledky měření průvzdušnosti na základě naměřených hodnot objemového toku vzduchu z různých měřicích zařízení a tlakové difference. Šipka na vodorovné ose ukazuje, v jakém tlakovém spádu probíhalo měření.



Obr. č.51: Grafické porovnání výsledků srovnávacího měření č.1 – regresní přímky

Z výsledků měření je patrné, že naměřené hodnoty jsou u obou dvou přístrojů téměř totožné. Z grafického porovnání výsledků měření je zřejmé úplné překryvání regresních přímek od obou měřicích přístrojů. Toto úplné překrytí přímek názorně potvrzuje výbornou shodnost výsledků měření z obou dvou měřicích přístrojů v rozsahu průtoku vzduchu od 0,20 do 0,65 m³/h. Tuto shodu potvrzuje i grafické porovnání hodnot objemového toku s nejistotami na obrázku č.52.

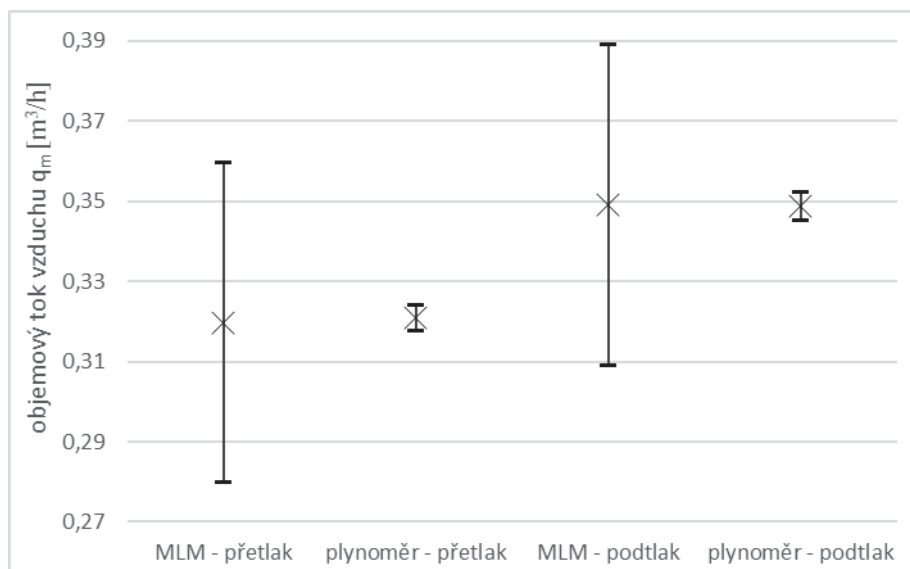


Obr. č.52: Grafické porovnání hodnot objemového toku vzduchu $q_{100,L}$ s nejistotami ze srovnávacího měření č.1

Tabulka 10 udává naměřené hodnoty objemového toku vzduchu q_m [m^3/h] při tlakovém rozdílu přibližně 100 Pa. U naměřených hodnot je uváděna přesnost měření měřicího zařízení (viz. kapitola 5.3.2.). Grafické porovnání naměřených hodnot objemového toku vzduchu udává obrázek č.53.

Tab. 10 – Výsledky naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 100 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.1)

		objemový tok vzduchu q_m [m^3/h] při tlakovém rozdílu cca 100 Pa	
přetlak	mikroprůtokoměr MLM	0,320	$\pm 0,040$
	plynoměr	0,321	$\pm 0,003$
podtlak	mikroprůtokoměr MLM	0,349	$\pm 0,040$
	plynoměr	0,349	$\pm 0,003$



Obr. č.53: Grafické porovnání naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 100 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.1)

Z výsledků naměřených hodnot průtoku vzduchu ze srovnávacího měření č.1 při tlakovém rozdílu cca 100 Pa je patrné a potvrzuje se, že měřicí přístroje udávají téměř totožně výsledky. A to i přesto, že má mikroprůtokoměr MLM výrobcem udávanou horší přesnost měření než plynoměr.

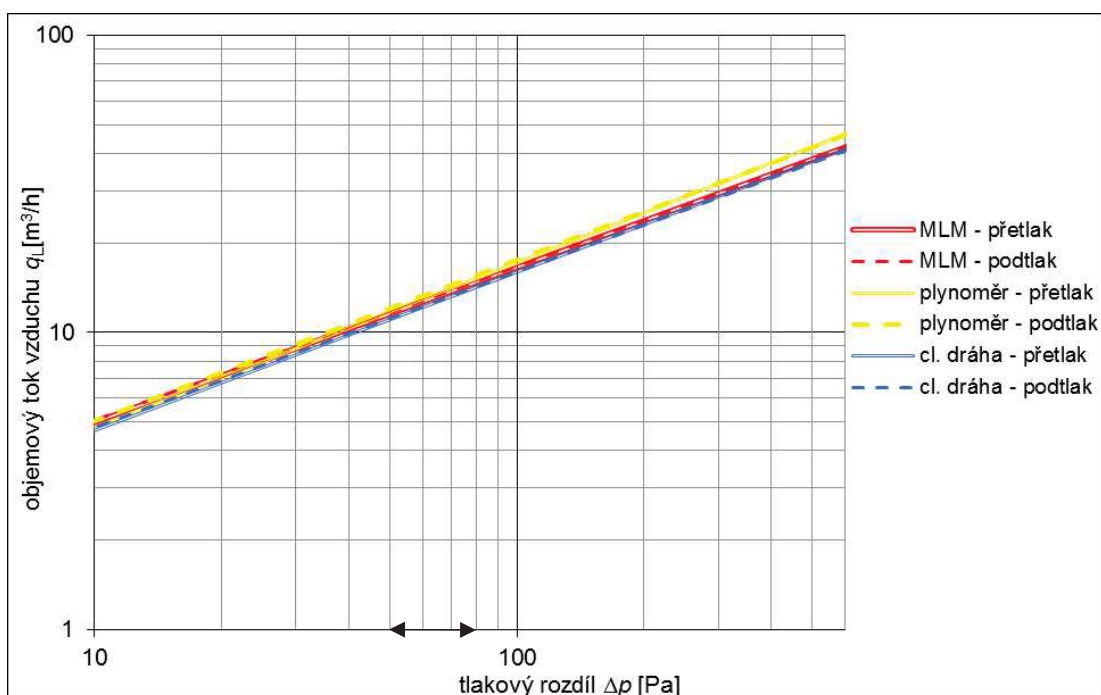
5.7.2. Vyhodnocení srovnávacího měření č.2

Při srovnávacím měření č.2 byly sériově zařazeny všechny tři přístroje (obrázek č.50) pro měření objemového toku vzduchu. Ve směru od ventilátoru mikroprůtokoměr MLM, clonková trať a plynoměr. Pro všechny tři varianty měřících přístrojů byl vyhotoven samostatný zkušební protokol (příloha P5). Přehled výsledků jednotlivých měření je uveden v tabulce 11. Výpočet odhadu nejistot uváděných v tabulce 11 byl stanoven dle postupu v [5, 7]. Výsledné hodnoty jsou uváděny jako objemový tok vzduchu proudící skrze zkušební desku s otvory a plášť zkušební komory.

Tab. 11 – Výsledky srovnávacího měření č.2

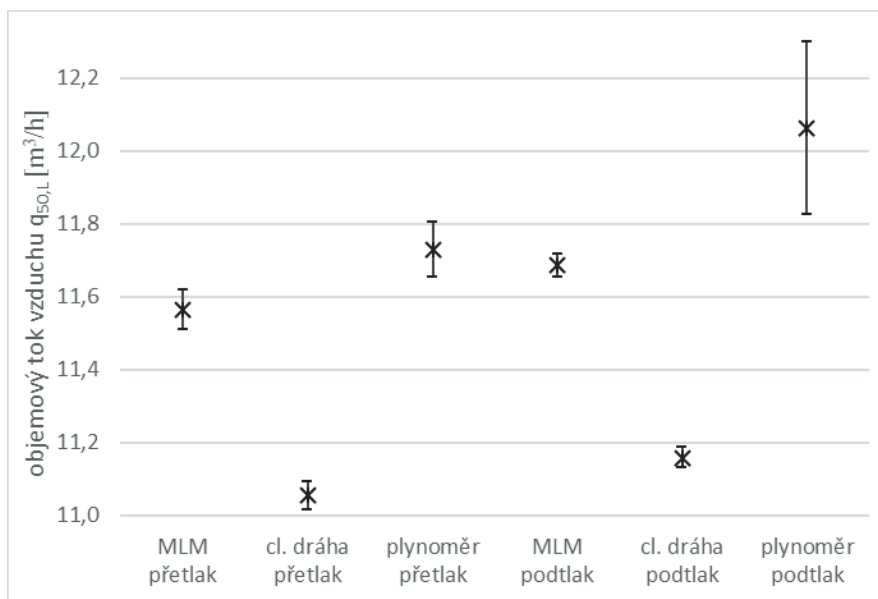
		objemový tok vzduchu $q_{L,50}$ [m ³ /h]		součinitel proudění C_L [m ³ /(h.Pa ⁿ)]		exponent proudění n [-]	
mikroprůtokoměr MLM	přetlak	11,56	±0,05	1,50	±0,10	0,52	±0,02
	podtlak	11,69	±0,03	1,54	±0,06	0,52	±0,01
clonková trať	přetlak	11,05	±0,04	1,37	±0,07	0,53	±0,01
	podtlak	11,16	±0,03	1,44	±0,05	0,52	±0,01
plynoměr	přetlak	11,73	±0,08	1,33	±0,12	0,56	±0,02
	podtlak	12,06	±0,24	1,46	±0,41	0,54	±0,07

Na obrázku č.54 jsou graficky porovnány výsledky měření průvzdušnosti na základě naměřených hodnot objemového toku vzduchu z různých měřicích zařízení a tlakové difference. Šipka na vodorovné ose ukazuje, v jakém tlakovém spádu probíhalo měření.



Obr. č.54.: Grafické porovnání výsledků srovnávacího měření č.2 – regresní přímky

Z výsledků měření jsou patrné určité rozdíly ve výsledcích hodnot objemového toku vzduchu $q_{L,50}$. Rozdíl mezi maximálním a minimálním výsledkem hodnoty $q_{L,50}$ různých měřicích přístrojů se pohybuje do 6 % při přetlaku a do 8 % při podtlaku. Technická norma ČSN EN 1026 [12] udává, že výsledná průvzdušnost se má vyjádřit s přesností 10 %. Se všemi třemi měřicími přístroji tedy lze (v rozsahu průtoku vzduchu od 11 do 15 m³/h) stanovit výslednou průvzdušnost s přesností 10 %. Z grafického porovnání výsledků měření (obr. č.54) je patrné překrývání regresních přímek. To představuje dobrou shodu mezi výsledky měření jednotlivých měřicích přístrojů. Ovšem grafické porovnání (obr. č.55) hodnoty objemového toku vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu 50 Pa, včetně odhadu nejistot podle [5, 7], už tak dobrou shodu neudává. Jelikož jsou všechny přístroje pro měření objemového toku vzduchu (včetně snímačů tlakového rozdílu) kalibrovány, proto není zřejmé, který přístroj udává správnou hodnotu objemového toku vzduchu.

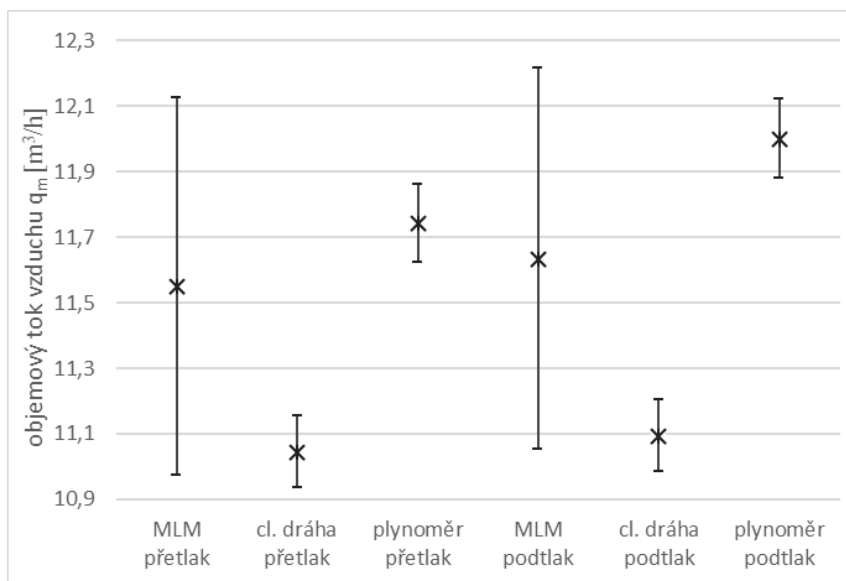


Obr. č.55: Grafické porovnání hodnot objemového toku vzduchu $q_{50,L}$ s nejistotami ze srovnávacího měření č.2

Tabulka 12 udává naměřené hodnoty objemového toku vzduchu q_m [m³/h] při tlakovém rozdílu přibližně 50 Pa. U naměřených hodnot je uváděna přesnost měření měřicího zařízení (viz. kapitola 5.3.2.). Grafické porovnání naměřených hodnot objemového toku vzduchu udává obrázek č.56.

Tab. 12 - Výsledky naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 50 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.2)

		objemový tok vzduchu q_m [m³/h] při tlakovém rozdílu cca 50 Pa	
přetlak	mikroprůtokoměr MLM	11,55	±0,58
	clonková trať	11,04	±0,11
	plynoměr	11,74	±0,12
podtlak	mikroprůtokoměr MLM	11,63	±0,58
	clonková trať	11,09	±0,11
	plynoměr	12,00	±0,12



Obr. č.56: Grafické porovnání naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 50 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.2)

Z výsledků naměřených hodnot průtoku vzduchu ze srovnávacího měření č.2 při tlakovém rozdílu cca 50 Pa je patrné, že clonková dráha a plynoměr udávají různé naměřené hodnoty průtoku vzduchu (ani jejich nejistoty se neprotínají v žádné společné hodnotě).

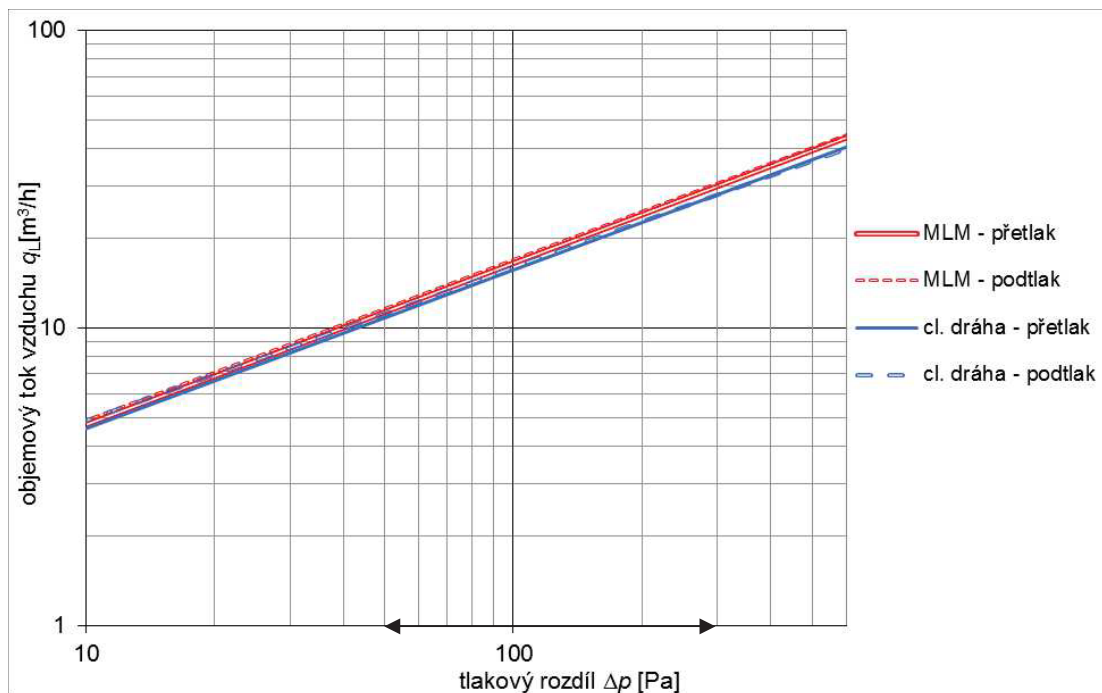
5.7.3. Vyhodnocení srovnávacího měření č.3

Při srovnávacím měření č.3 byl sériově zařazen (ve směru od ventilátoru) mikroprůtokoměr MLM a clonková dráha. Pro obě dvě varianty měřicích přístrojů byl vyhotoven samostatný zkušební protokol (příloha P5). Přehled výsledků jednotlivých měření je uveden v tabulce 13. Výpočet odhadu nejistot uváděných v tabulce 13 byl stanoven dle postupu v [5, 7]. Výsledné hodnoty jsou uváděny jako objemový tok vzduchu proudící skrze zkušební desku s otvory a plášť zkušební komory.

Tab. 13 - Výsledky srovnávacího měření č.3

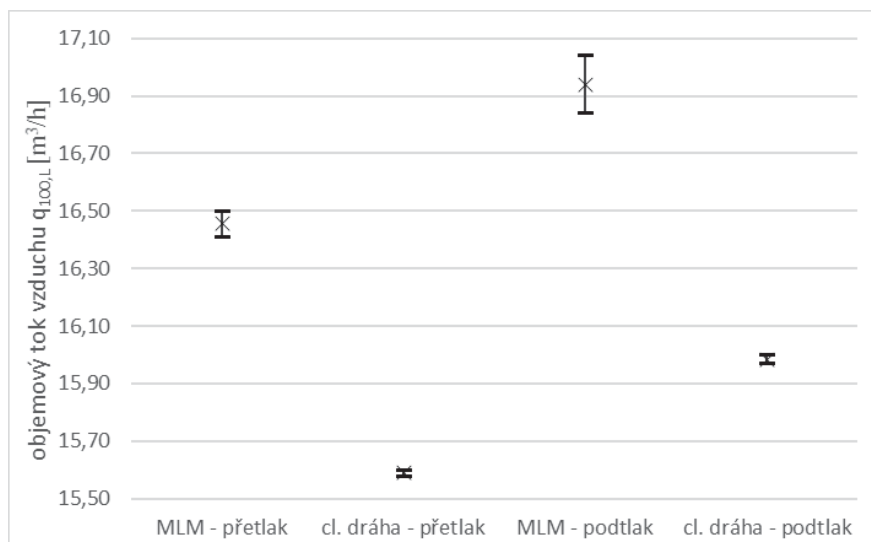
		objemový tok vzduchu $q_{L,100}$ [m^3/h]		součinitel proudění C_L [$m^3/(h \cdot Pa^n)$]		exponent proudění n [-]	
mikroprůtokoměr MLM	přetlak	16,46	$\pm 0,05$	1,35	$\pm 0,05$	0,54	$\pm 0,01$
	podtlak	16,94	$\pm 0,10$	1,41	$\pm 0,11$	0,54	$\pm 0,02$
clonková trať	přetlak	15,59	$\pm 0,01$	1,34	$\pm 0,01$	0,53	$\pm 0,00$
	podtlak	15,98	$\pm 0,01$	1,50	$\pm 0,02$	0,51	$\pm 0,00$

Na obrázku č.57 jsou graficky porovnány výsledky měření průvzdušnosti na základě naměřených hodnot objemového toku vzduchu z různých měřicích zařízení a tlakové difference. Šipka na vodorovné ose ukazuje, v jakém tlakovém spádu probíhalo měření.



Obr. č.57: Grafické porovnání výsledků srovnávacího měření č.3 – regresní přímky

Z výsledků měření jsou patrné určité rozdíly ve výsledcích hodnot objemového toku vzduchu $q_{L,100}$. Rozdíl mezi výsledkem hodnoty $q_{L,100}$ měřicích přístrojů se pohybuje do 6 % při přetlaku i podtlaku. Technická norma ČSN EN 1026 [12] udává, že výsledná průvzdušnost se má vyjádřit s přesností 10 %. Z grafického porovnání výsledků měření (obr. č.57) je zřejmá blízkost jednotlivých regresních přímek. To představuje dobrou shodu mezi výsledky měření jednotlivých měřicích přístrojů v rozsahu průtoku vzduchu od 11 do 21 m^3/h . Ovšem grafické porovnání (obr. č.58) hodnoty objemového toku vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu 100 Pa, včetně odhadu nejistot podle [5, 7], už moc dobrou shodu neudává. Jelikož jsou oba dva přístroje pro měření objemového toku vzduchu (včetně snímačů tlakového rozdílu) kalibrovány není zřejmé, který přístroj udává správnou hodnotu objemového toku vzduchu.

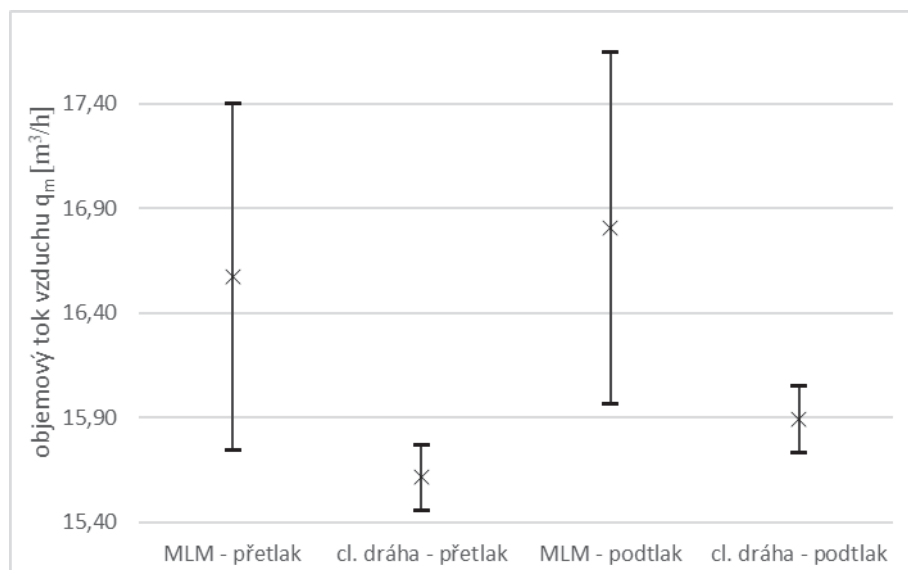


Obr. č.58: Grafické porovnání hodnot objemového toku vzduchu $q_{100,L}$ s nejistotami ze srovnávacího měření č.3

Tabulka 14 udává naměřené hodnoty objemového toku vzduchu q_m [m³/h] při tlakovém rozdílu přibližně 100 Pa. U naměřených hodnot je uváděna přesnost měření měřicího zařízení (viz kapitola 5.3.2.). Grafické porovnání naměřených hodnot objemového toku vzduchu udává obrázek č.59.

Tab. 14 - Výsledky naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 100 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.3)

		objemový tok vzduchu q_m [m³/h] při tlakovém rozdílu cca 100 Pa	
přetlak	mikroprůtokoměr MLM	16,57	±0,83
	clonková trať	15,62	±0,16
podtlak	mikroprůtokoměr MLM	16,81	±0,84
	clonková trať	15,89	±0,16



Obr. č.59: Grafické porovnání naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 100 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.3)

Z výsledků naměřených hodnot průtoku vzduchu ze srovnávacího měření č.3 při tlakovém rozdílu cca 100 Pa je patrné, že clonková dráha a mikroprůtokoměr MLM udávají různé naměřené hodnoty průtoku vzduchu (ovšem jejich nejistoty se v malém intervalu protínají). Clonková dráha při přetlaku i podtlaku udává nižší naměřené hodnoty oproti mikroprůtokoměru MLM.

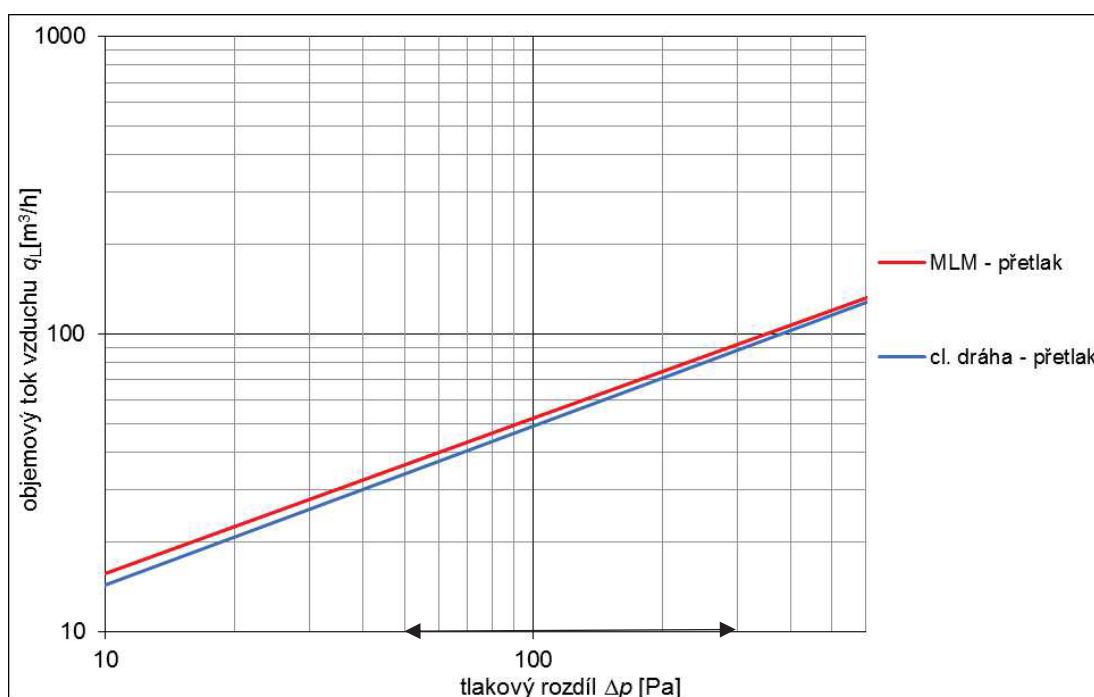
5.7.4. Vyhodnocení srovnávacího měření č.4

Při srovnávacím měření č.4 byl stejně jako u srovnávacího měření č.3 sériově zařazen (ve směru od ventilátoru) mikroprůtokoměr MLM a clonková dráha. Pro obě dvě varianty měřicích přístrojů byl vyhotoven samostatný zkušební protokol (příloha P5). Přehled výsledků jednotlivých měření je uveden v tabulce 15. Výpočet odhadu nejistot uváděných v tabulce 15 byl stanoven dle postupu v [5, 7]. Výsledné hodnoty jsou uváděny jako objemový tok vzduchu proudící skrze zkušební desku s otvory a plášť zkušební komory.

Tab. 15 – Výsledky srovnávacího měření č.4

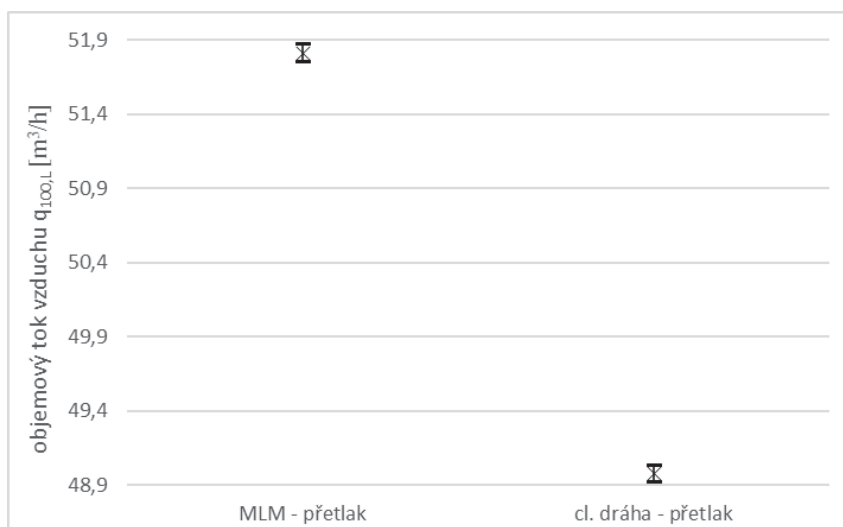
		objemový tok vzduchu $q_{L,100}$ [m ³ /h]		součinitel proudění C_L [m ³ /(h.Pa ⁿ)]		exponent proudění n [-]	
mikroprůtokoměr MLM	přetlak	51,81	±0,06	4,71	±0,07	0,52	±0,00
	podtlak	-	-	-	-	-	-
clonková trať	přetlak	48,98	±0,06	4,21	±0,06	0,53	±0,00
	podtlak	-	-	-	-	-	-

Na obrázku č.60 jsou graficky porovnány výsledky měření průvzdušnosti na základě naměřených hodnot objemového toku vzduchu z různých měřicích zařízení a tlakové diference. Šipka na vodorovné ose ukazuje, v jakém tlakovém spádu probíhalo měření.



Obr. č.60: Grafické porovnání výsledků srovnávacího měření č.4 – regresní přímky

Z výsledků měření jsou patrné určité rozdíly ve výsledcích hodnot objemového toku vzduchu $q_{L,100}$. I přestože je rozdíl ve výsledcích hodnot $q_{L,100}$ jednotlivých měřicích přístrojů okolo $3 \text{ m}^3/\text{h}$, stále se pohybuje do 6 %. Technická norma ČSN EN 1026 [12] udává, že výsledná průvzdušnost se má vyjádřit s přesností 10 %. Z grafického porovnání výsledků měření je zřejmá podobnost jednotlivých regresních přímek. Tento fakt představuje stále poměrně dobrou shodu mezi výsledky měření jednotlivých měřicích přístrojů (obr. č.60) v rozsahu průtoku vzduchu od 35 do $64 \text{ m}^3/\text{h}$. Ovšem grafické porovnání (obr. č.61) hodnoty objemového toku vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu 50 Pa , včetně odhadu nejistot podle [5, 7], už dobrou shodu neudává. Jelikož jsou všechny přístroje pro měření objemového toku vzduchu (včetně snímačů tlakového rozdílu) kalibrovány není zřejmé, který přístroj udává správnou hodnotu objemového toku vzduchu.

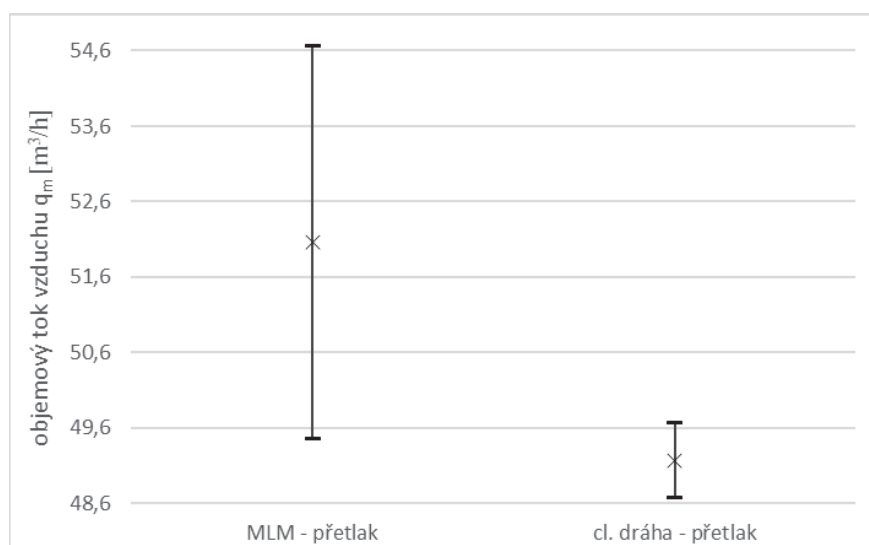


Obr. č.61: Grafické porovnání hodnot objemového toku vzduchu $q_{100,L}$ s nejistotami ze srovnávacího měření č.4

Tabulka 16 udává naměřené hodnoty objemového toku vzduchu q_m [m³/h] při tlakovém rozdílu přibližně 100 Pa. U naměřených hodnot je uváděna přesnost měření měřicího zařízení (viz. kapitola 5.3.2.). Grafické porovnání naměřených hodnot objemového toku vzduchu udává obrázek č.62.

Tab. 16 - Výsledky naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 100 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.4)

		objemový tok vzduchu q_m [m³/h] při tlakovém rozdílu cca 100 Pa	
přetlak	mikroprůtokoměr MLM	52,06	±2,60
	clonková trať	49,17	±0,49



Obr. č.62: Grafické porovnání naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 100 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.4)

Z výsledků naměřených hodnot průtoku vzduchu ze srovnávacího měření č.4 při tlakovém rozdílu cca 100 Pa je opět patrné (stejně jako v kapitole 5.7.3.), že clonková dráha a mikroprůtokoměr MLM udávají různé naměřené hodnoty průtoku vzduchu (ovšem jejich nejistoty se v malém intervalu protínají). Clonková dráha opět udává nižší naměřené hodnoty oproti mikroprůtokoměru MLM.

5.7.5. Shrnutí srovnávacího měření s různými typy přístrojů pro měření průtoku vzduchu

Byla provedena série čtyř srovnávacích měření průvzdušnosti se třemi dostupnými typy přístrojů (mikroprůtokoměr MLM, clonková dráha, plynoměr) pro měření objemového toku vzduchu na vzduchotěsné desce s otvory. Výsledky měření jsou:

- V rozsahu průtoku vzduchu od 0,20 do 0,65 m³/h se porovnávaly výsledky měření průvzdušnosti a naměřené hodnoty průtoku vzduchu z mikroprůtokoměru MLM a plynoměru při referenčním tlakovém rozdílu 100 Pa. V tomto rozsahu průtoku vzduchu oba dva přístroje udávaly téměř identické výsledky měření.
- V rozsahu průtoku vzduchu od 11 do 15 m³/h se porovnávaly výsledky měření průvzdušnosti a naměřené hodnoty průtoku vzduchu ze všech třech dostupných přístrojů (mikroprůtokoměru MLM, plynoměru a clonkové dráhy) při referenčním tlakovém rozdílu 50 Pa. Rozdíl mezi maximálním a minimálním výsledkem hodnoty $q_{L,50}$ různých měřicích přístrojů se pohybuje do 6 % při přetlaku a do 8 % při podtlaku.
- V rozsahu průtoku vzduchu od 11 do 21 m³/h se porovnávaly výsledky měření průvzdušnosti a naměřené hodnoty průtoku vzduchu z mikroprůtokoměru MLM a clonkové dráhy při referenčním tlakovém rozdílu 100 Pa. Rozdíl mezi výsledkem hodnoty $q_{L,100}$ obou dvou měřicích přístrojů se pohybuje do 6 % při přetlaku i podtlaku.
- V rozsahu průtoku vzduchu od 35 do 64 m³/h se porovnávaly výsledky měření průvzdušnosti a naměřené hodnoty průtoku vzduchu z mikroprůtokoměru MLM a clonkové dráhy při referenčním tlakovém rozdílu 100 Pa. Rozdíl mezi výsledkem hodnoty $q_{L,100}$ obou dvou měřicích přístrojů se pohybuje do 6 % při přetlaku.

Z výsledků srovnávacího měření je patrné, že clonková dráha systematicky udává nejnižší hodnoty objemového toku vzduchu. A jelikož jsou všechny přístroje pro měření objemového toku vzduchu (včetně snímačů tlakového rozdílu) kalibrovány není zřejmé, který přístroj udává správné hodnoty objemového toku vzduchu.

5.8. Srovnávací měření průvzdušnosti metodou v laboratoři x metodou in-situ

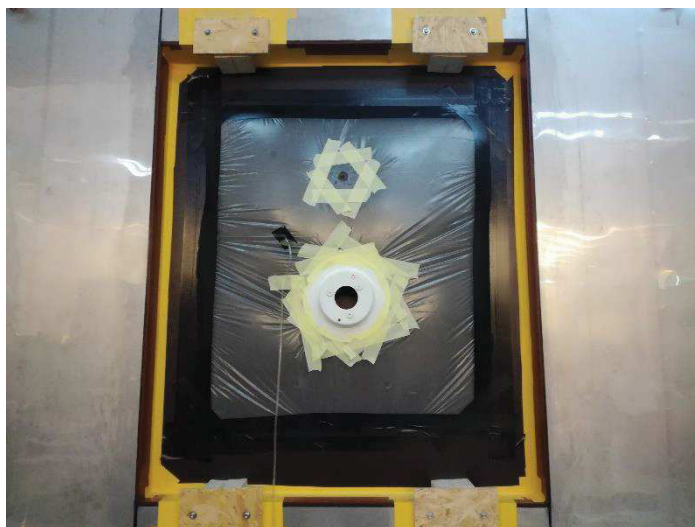
Průvzdušnost oken se dá zkoušet jak v laboratoři, tak i metodou in-situ. Toto srovnávací měření bylo provedeno z důvodu porovnání přesnosti měření pomocí vlepaných clonek do fólie u metody in-situ s přesnou laboratorní metodou. V bakalářské práci [3] jsem měřil vzduchotěsnost dvou starých špaletových oken v zabudovaném stavu in-situ za pomoci zvláštní úpravy metody tlakového spádu s pomocnou tlakovou komorou (metoda pomocí plastové fólie a clony). Princip této metoda je popsán v kapitole 3.3.2.1., včetně úpravy pro měření v laboratorních podmínkách. Výsledky měřených oken z bakalářské práce jsou uvedeny v tabulce 17.

Tab. 17 – Výsledky měření dvojice oken z bakalářské práce [3]

			okno 01		okno 02	
stáří okna			1920		1948	
typ okna			dvojité špaletové		dvojité špaletové	
přípojovací spára - výplň			nezjištěna		nezjištěna	
přípojovací spára - těsnění			není		není	
funkční spára - těsnění			není		není	
šířka okna	b	[m]	1,16		1,36	
výška okna	h	[m]	1,67		1,42	
součinitel proudění	C_L	$[m^3/(h \cdot Pa^n)]$	8,6	$\pm 1,8$	8,2	$\pm 0,3$
exponent proudění	n	[-]	0,54	$\pm 0,05$	0,57	$\pm 0,01$
objemový tok vzduchu	q_{50}	$[m^3/h]$	73	$\pm 1,4$	75,1	$\pm 0,2$

Pro účely tohoto srovnávacího měření se využila již připravená a osazená deska s otvory z kapitoly 5.7. Průvzdušnost zkušební desky s otvory byla nakonfigurována co nejpřesněji dle výsledků objemového toku vzduchu q_{50} , součinitele proudění C_L a exponentu proudění n dle tabulky 17. Je zde snaha o to, aby ověřovací test probíhal ve stejném (nebo co nejvíce podobném) měřicím rozsahu jako u reálně měřeného okna metodou in-situ v [3]. Zkušební deska s otvory má v původním stavu (bez přelepení otvorů) obdobné parametry jako měřená okna v bakalářské práci [3]. Konfigurace zkušební desky je uvedena na obrázku č.46.

Průvzdušnost desky s otvory se měřila současně laboratorní metodou i metodou s pomocnou tlakovou komorou. Měření proběhlo dvakrát a tlakový spád při přetlaku činil 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 a 90 Pa. K metodě v laboratoři se k měření objemového toku vzduchu použila clonková dráha. V metodě s pomocnou tlakovou komorou se zkušební deska s otvory přelepila vzduchotěsnou plastovou fólií, tak aby průtok vzduchu skrze otvory v desce proudil do vytvořené pomocné komory. Ve fólii se vyřízl otvor, do kterého se vlepily dvě kalibrované clony: D a 1,5 cm (obrázek č.63).



Obr. č.63: Pohled na zkušební desku s nalepenou fólií a osazenou clonou

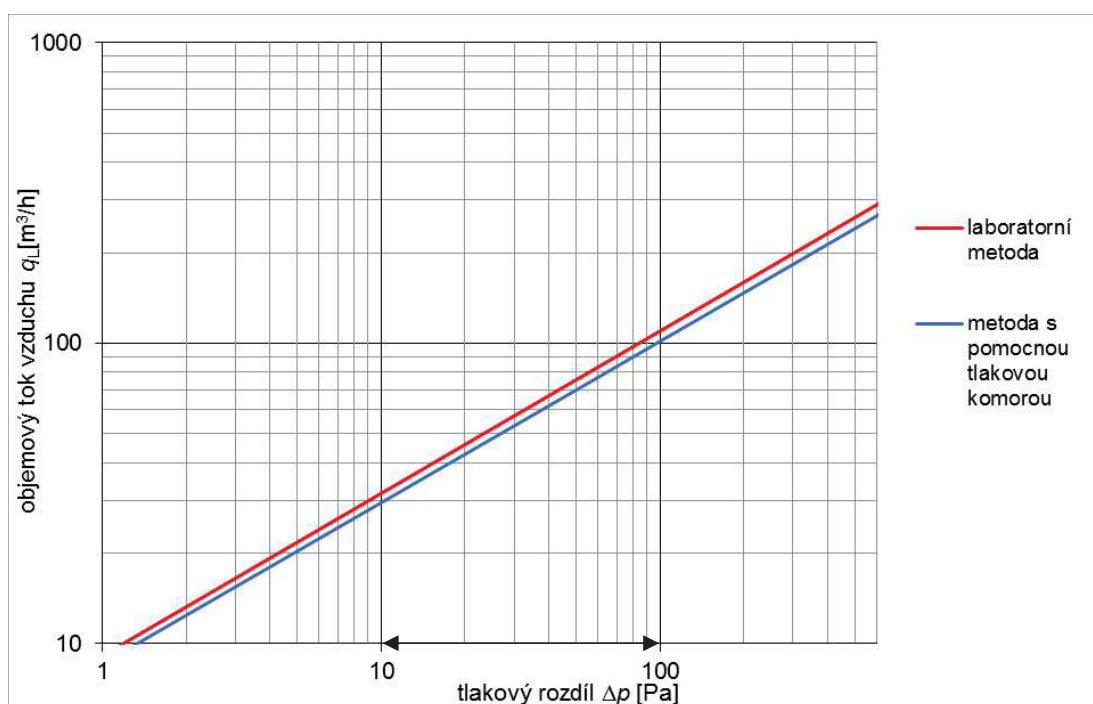
5.8.1. Vyhodnocení srovnávacího měření laboratoř x in-situ

Při srovnávacím měření metodou v laboratoři se k měření objemového toku vzduchu použila clonková dráha. Pro snímání tlakové difference (na clonce clonkové dráhy a na zkušebním prvku) se použilo měřidlo tlakové difference Minneapolis APT-8. Z naměřených hodnot zbytkových toků např. z kapitoly 5.6.3.2. ($q_{50,L}=0,16 \text{ m}^3/\text{h}$) a nyní naměřených hodnot ($q_{50,L}=75,64 \text{ m}^3/\text{h}$) lze zkušební komoru považovat za těsnou (nulovou) podle [7, 12]. U metody s pomocnou tlakovou komorou (simuluje metodu in-situ v laboratorních podmínkách) měřidlo tlakové difference Minneapolis APT-8 snímalo tlakový rozdíl na clonkách vlepěných do fólie a na zkušebním prvku. Naměřené hodnoty u obou metod zaznamenával software TECLOG4. K jednotlivým testům byl vždy vyhotoven samostatný zkušební protokol (příloha P5). Přehled výsledků jednotlivých měření je uveden v tabulce 18. Výpočet odhadu nejistot uváděných v tabulce 18 byl stanoven dle postupu v [5, 7].

Tab. 18 – Výsledky srovnávacího měření metod v laboratoři x in-situ

		objemový tok vzduchu $q_{L,50}$ [m ³ /h]		součinitel proudění C_L [m ³ /(h.Pa ⁿ)]		exponent proudění n [-]	
laboratorní metoda	měření 1	75,64	±0,15	9,16	±0,10	0,54	±0,00
	měření 2	75,64	±0,25	9,10	±0,17	0,54	±0,00
	Ø 1 a 2	75,64	±0,15	9,13	±0,10	0,54	±0,00
metoda s pomocnou tlakovou komorou	měření 1	69,73	±0,12	8,48	±0,08	0,54	±0,00
	měření 2	69,95	±0,11	8,59	±0,08	0,54	±0,00
	Ø 1 a 2	69,84	±0,08	8,54	±0,06	0,54	±0,00

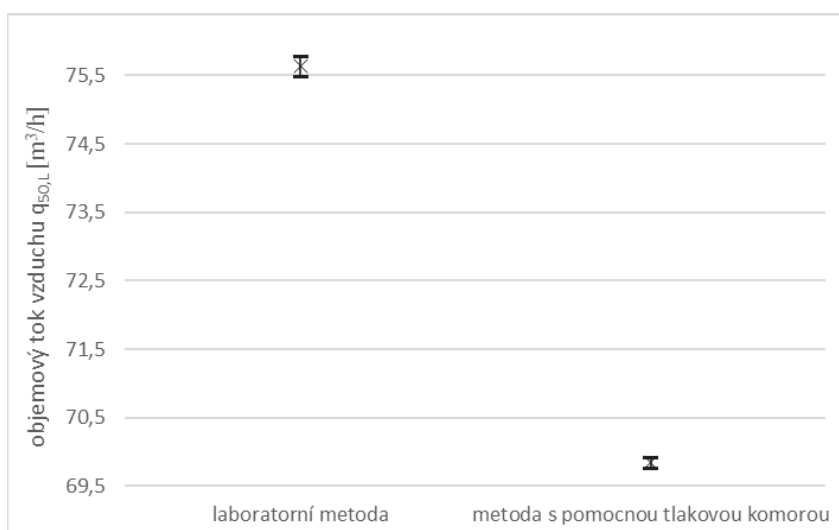
Na obrázku č.64 jsou graficky porovnány průměrné výsledky měření průvzdušnosti obou metod na základě naměřených hodnot objemového toku vzduchu a tlakové difference. Šipka na vodorovné ose ukazuje, v jakém tlakovém spádu probíhalo měření.



Obr. č.64: Grafické porovnání výsledků srovnávacího měření metod v laboratoři x metoda s pomocnou tlakovou komorou

Z výsledků měření jsou patrné určité rozdíly ve výsledcích hodnot objemového toku vzduchu $q_{50,L}$. I přestože je rozdíl ve výsledcích jednotlivých měřicích přístrojů okolo 6 m³/h, stále se pohybuje do 9 % rozdílu. Z grafického porovnání (obr. č.64) výsledků měření je zřejmá podobnost jednotlivých regresních přímek. Tento fakt představuje dobrou shodu mezi výsledky měření laboratorní metodou s clonkovou dráhou a metodou s pomocnou tlakovou komorou s vlepenými clonkami v rozsahu průtoku vzduchu od 30 do 100 m³/h. Ovšem grafické porovnání (obr. č.65) hodnoty objemového toku vzduchu při referenčním tlakovém rozdílu 50 Pa, včetně odhadu nejistot podle [5, 7], už tak dobrou shodu neudává. Jelikož se laboratorní metoda bere

jako referenční, dá se říct, že metoda s pomocnou tlakovou komorou udává nižší hodnoty objemového toku vzduchu oproti měření v laboratoři.



Obr. č.65: Grafické porovnání hodnot objemového toku vzduchu $q_{50,L}$ s nejistotami ze srovnávacího měření

Ovšem dále u metody s pomocnou tlakovou komorou in-situ (mimo laboratoř) mohou nastat problémy s přilepením vzduchotěsné fólie na pevný rám oken, či ostění. Rám oken je většinou úzký a nedovoluje dokonalé přilepení fólie. Hrozí také nebezpečí poškození laku okna či malby ostění. Dále je taky měření u metody in-situ ovlivněno klimatickými podmínkami jako je vítr, rozdíl teplot atd.

6. Závěr

Práce se zabývala měřením vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků v laboratoři. Pro účely tohoto měření bylo sestaveno a zprovozněno zkušební zařízení k testování vzduchotěsnosti a vodotěsnosti stavebních dílců či prvků do maximálního rozměru 3x3 m. Zařízení bude primárně používáno k ověřování průvzdušnosti a vodotěsnosti nově vyvíjených prototypů prvků obvodových plášťů budov v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT.

Metody měření objemového toku vzduchu založené na principu clonkových tratí (mikroprůtokoměr MLM, clonková dráha) se z praktického hlediska osvědčily. Objemový tok vzduchu u clonkových tratí je znám téměř okamžitě a umožňuje poměrně veliký rozsah měření. Mikroprůtokoměr MLM od 0,17 m³/h do 78,5 m³/h a clonková dráha od 11 m³/h do 160 m³/h. Mikroprůtokoměrem MLM tedy lze měřit i průvzdušnost těsných stavebních prvků.

Metoda měření objemového toku vzduchu pomocí membránového plynoměru BK-G10M s osazeným nízkofrekvenčním snímačem IN-Z61 (impulsním snímačem otáček plynoměru) se osvědčila. Nevýhodou oproti měření na principu clonkových tratí je neznalost aktuálního průtoku vzduchu. Impulsní snímač totiž zaznamená impuls vydaný otáčkoměrem plynoměru při průtoku vzduchu o objemu 0,1 m³ a zapíše se spolu s časem do zapisovače dat DataTaker. Objemový tok vzduchu q [m³/h] skrze plynoměr se tedy musí ze zaznamenaných hodnot (objem vzduchu, časový interval) následně dopočítávat. Hlavní nepraktičností měření průtoku vzduchu s membránovým plynoměrem je to, že čím je objemový tok vzduchu nižší, tím je doba měření delší. Například pokud se má změřit objemový tok vzduchu $q=0,1$ m³/h, je nutné pro změření jedné hodnoty objemového toku vzduchu čas jedné hodiny. Pro snadnější a rychlejší měření velmi těsných zkušebních vzorků by bylo vhodné pořízení plynoměru, který dává impuls impulsnímu snímači již při průtoku vzduchu o objemu 0,01 m³, např. membránový plynoměr BK-G4 V1,2 [37]. Z toho vyplývá, že při měření objemového toku vzduchu $q=0,1$ m³/h je čas měření jedné hodnoty objemového toku vzduchu zkrácen přibližně na 6 minut (doba měření je cca 10x rychlejší oproti stávajícímu plynoměru).

Pro měření vodotěsnosti stavebních dílců a prvků se z praktického hlediska osvědčilo uchycení postřikovacího systému pomocí magnetických úchyťů. Lze tedy

s jednotlivými tryskami snadno pohybovat ve všech třech směrech. Ve svislém a vodorovném směru pomocí posunutí celého magnetického upevnění a vzdálenost trysky od zkušební vzorku lze snadno změnit zkrácením nebo výměnou závitové tyče. Je také možnost libovolného rozmístění trysek na základě potřeby a způsobu požadovaného postřiku. Propojení jednotlivých trysek totiž zajišťují flexibilní hadice osazené rychlospojky napojené na rozdělovače.

Pilotním měřením byla ověřena schopnost měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti na okně SOLID COMFORT SC92 od firmy SLAVONA o normových rozměrech 1,23x1,48 m. Zkušebním zařízením tedy lze provést měření vzduchotěsnosti oken podle ČSN EN 1026 [12] (ale i ČSN EN 12114 [7]) a vodotěsnosti oken podle ČSN EN 1027 [16].

V běžné praxi pro měření zbytkových (reziduálních) toků doporučuji zakrytí a přelepení celého zkušební vzorku plastovou vzduchotěsnou fólií.

Byla provedena série čtyř srovnávacích měření průvzdušnosti se třemi dostupnými typy přístrojů (mikroprůtokoměr MLM, clonková dráha, plynoměr) pro měření objemového toku vzduchu na vzduchotěsné desce s otvory. Výsledky měření jsou:

- V rozsahu průtoku vzduchu od 0,20 do 0,65 m³/h se porovnávaly výsledky měření průvzdušnosti a naměřené hodnoty průtoku vzduchu z mikroprůtokoměru MLM a plynoměru při referenčním tlakovém rozdílu 100 Pa. V tomto rozsahu průtoku vzduchu oba dva přístroje udávaly téměř identické výsledky měření.
- V rozsahu průtoku vzduchu od 11 do 15 m³/h se porovnávaly výsledky měření průvzdušnosti a naměřené hodnoty průtoku vzduchu ze všech třech dostupných přístrojů (mikroprůtokoměru MLM, plynoměru a clonkové dráhy) při referenčním tlakovém rozdílu 50 Pa. Rozdíl mezi maximálním a minimálním výsledkem hodnoty $q_{L,50}$ různých měřicích přístrojů se pohybuje do 6 % při přetlaku a do 8 % při podtlaku.
- V rozsahu průtoku vzduchu od 11 do 21 m³/h se porovnávaly výsledky měření průvzdušnosti a naměřené hodnoty průtoku vzduchu z mikroprůtokoměru MLM a clonkové dráhy při referenčním tlakovém rozdílu 100 Pa. Rozdíl mezi výsledkem hodnoty $q_{L,100}$ obou dvou měřicích přístrojů se pohybuje do 6 % při přetlaku i podtlaku.

- V rozsahu průtoku vzduchu od 35 do 64 m³/h se porovnávaly výsledky měření průvzdušnosti a naměřené hodnoty průtoku vzduchu z mikroprůtokoměru MLM a clonkové dráhy při referenčním tlakovém rozdílu 100 Pa. Rozdíl mezi výsledkem hodnoty $q_{L,100}$ obou dvou měřících přístrojů se pohybuje do 6 % při přetlaku.

Provedlo se srovnání laboratorní metody měření průvzdušnosti s metodou měření s pomocnou tlakovou komorou (simulující metodu in-situ). V laboratorní metodě se ke zjištění objemového toku vzduchu použila clonková dráha a u metody s pomocnou tlakovou komorou se použila vzduchotěsná plastová fólie s vlepenými kalibrovanými clonkami. V rozsahu průtoku vzduchu od 30 do 100 m³/h jsou výsledky měření metodou s pomocnou tlakovou komorou nižší o 9 % oproti měření s clonkovou dráhou v laboratoři.

Pro vyhodnocování výsledků měření průvzdušnosti byl vytvořen výpočtový program (MS Excel). Výpočtový program pro vyhodnocování průvzdušnosti obecně je k dispozici v příloze P3 a program pro vyhodnocování průvzdušnosti oken a dveří v příloze P4. Oba typy výpočtového programu byly úspěšně validovány s výpočtovým programem na vyhodnocování průvzdušnosti Ing. Jiřího Nováka, Ph.D.

V závěru této práce byl vyhotoven návod (příloha P1) k používání zkušebního zařízení pro měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti stavebních dílců a prvků do maximálního rozměru 3x3 m umístěného v Univerzitním centru energeticky efektivních budov v Buštěhradě.

6.1. Možné pokračování práce

V rámci srovnávacích měření by bylo vhodné provést porovnávací měření vzduchotěsnosti např. na vzduchotěsné desce s otvory z kapitoly 5.7. s akreditovanými zkušebními laboratořemi např. Výzkumný ústav pozemních staveb (www.vups.cz), Centrum stavebního inženýrství (www.csias.cz), Technický a zkušební ústav stavební Praha (www.tzus.cz), Mendelova univerzita v Brně – Zkušebna stavebně truhlářských výrobků Zlín (www.zstv.cz) metodou podle ČSN ISO 5725 [38].

V rámci srovnávacího měření metodou v laboratoři x metodou in-situ by bylo vhodné ověřit porovnání s různými typy clon, které jdou vlepít do fólie. Z toho vyplývá i porovnání většího měřicího rozsahu metody s pomocnou tlakovou komorou.

Pro zlepšení funkčnosti by se dala do zkušební komory zavést elektrická energie např. pro osvětlení, zdroj tepla a ventilátoru pro rozeznání tepla ve zkušební komoře. Díky rozdílu teplot a vyvolanému přetlaku uvnitř komory by bylo možné sledovat netěsnosti na zkušebním vzorku pomocí termovizního snímkování.

Odhad nejistoty odvozených veličin byl stanoven doporučeným postupem podle ČSN EN ISO 9972 [5] a ČSN EN 12114 [7]. Tato nejistota ovšem není nejistotou měření. Nejistotu měření proto bude nutné stanovit vhodnými postupy podle ČSN P ENV 13005 [39].

Jelikož je průběh zkoušky doladěný, zkušební komora je uspokojivě těsná, pilotní testy již úspěšně proběhly, byl vytvořen software pro vyhodnocování měření průvzdušnosti včetně zkušebního protokolu a bude stanovena nejistota měření. Bylo by vhodné se zajímat o možnost akreditování zkoušek vzduchotěsnosti a případně i vodotěsnosti v laboratorních podmínkách.

7. Zdroje a použitá literatura

- [1] NOVÁK, Jiří. *Vzduchotěsnost obvodových plášťů budov*. Praha: Grada, 2008. Stavitel. ISBN 9788024719535.
- [2] *Asociaceblowerdoor.cz* [online]. [cit. 2018-09-20]. Dostupné z: <http://www.asociaceblowerdoor.cz/vyznam-mereni-vzduchotesnosti-1-29.html>
- [3] VACEK, Vladimír. *Měření vzduchotěsnosti oken in-situ ve starších budovách*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Jiří Novák, Ph.D.
- [4] KRAUS, Michal. *Determinační faktory vzduchotěsnosti energeticky efektivních budov* [online]. Ostrava, 2014 [cit. 2017-03-01]. Dostupné z: <http://krausmichal.cz/wp-content/uploads/2015/03/Determinacni-faktory-vzduchotesnosti-energeticky-efektivnich-budov-2.pdf>. Doktorská disertační práce. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební. Vedoucí práce prof. Ing. Darja Kubečková, Ph.D.
- [5] *ČSN EN ISO 9972: Tepelné chování budov - Stanovení průvzdušnosti budov - Tlaková metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017
- [6] NOVÁK, Jiří. *PROJEKT: „VYBRANÉ VLASTNOSTI PŘÍRODNÍCH A DALŠÍCH STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ, STAVEBNÍCH PRVKŮ A BUDOV“ - ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA: kapitola 7: VZDUCHOTĚSNOST STAVEB*. Praha, říjen 2011.
- [7] *ČSN EN 12114: Tepelné chování budov - Stanovení průvzdušnosti stavebních dílců a prvků - Laboratorní zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [8] *ČSN EN 12207: Okna a dveře - Průvzdušnost - Klasifikace*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [9] *ČSN EN 12152: Lehké obvodové pláště - Průvzdušnost - Funkční požadavky a klasifikace*. Praha: Český normalizační institut, 2002.
- [10] *ČSN 730540-2: Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
- [11] MRLÍK, Jindřich. Průvzdušnost stavebních výrobků. *Regenerace bytového fondu a staveb občanské vybavenosti: VII. celostátní odborná konference* [online]. Hradec Králové, 2012 [cit. 2018-10-07]. Dostupné z: http://www.csias.cz/otvorove_vyplne/dokumenty/pruvzdusnost_stavebnich_v_yrobku.pdf
- [12] *ČSN EN 1026: Okna a dveře - Průvzdušnost - Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2001.

- [13] ČSN EN 12153: *Lehké obvodové pláště - Průvzdušnost - Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [14] ČSN EN 12427: *Vrata - Průvzdušnost - Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [15] NOVÁK, Jiří. *Měření vzduchotěsnosti výplně otvoru v bytovém domě: Studie zpracovaná pro Kloknerův ústav ČVUT*. 2014.
- [16] ČSN EN 1027: *Okna a dveře - Vodotěsnost - Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [17] ČSN EN 12155: *Lehké obvodové pláště - Vodotěsnost - Laboratorní zkouška při statickém tlaku*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [18] *Katalogový list: BK-G10 a BK-G16, BK-G10T a BK-G16T Komunální membránové plynometry* [online]. [cit. 2018-10-14]. Dostupné z: https://www.gas-as.cz/www/prilohy/plynom%C4%9Bry/bk%20g10_16.pdf
- [19] *BlowerDoor GmbH: Minneapolis Micro Leakage Meter: BlowerDoor Reference Guide*. BlowerDoor, 2016.
- [20] *Protokol z výrobního výpočtu škrticího orgánu centrická clony DN50 PN16: výr. č. 15452 (č. výp. 11178), výr. č. 15452A (č. výp. 11179)*. Ostrava: Mattech, 2015.
- [21] *BlowerDoor GmbH: Minneapolis BlowerDoor Standard Modell 4.1 with DG-1000: BlowerDoor Reference Guide*. BlowerDoor, 2018.
- [22] *Katalogový list: Beck.Differential pressure transmitter 984* [online]. Beck, 2012 [cit. 2018-10-15]. Dostupné z: https://www.beck-sensors.com/fileadmin/user_upload/PDF/984Q_data_engl.pdf
- [23] ČSN EN 12489: *Vrata - Odolnost proti průniku vody - Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [24] ČSN EN 12426: *Vrata - Průvzdušnost - Klasifikace*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [25] *Osvědčení č. CE-ZSTV-029-15: Dřevěné okno a balkónové dveře jednoduché, typ SOLID COMFORT SC92* [online]. 11.8.2015 [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: https://www.slavona.cz/files/certifikace/SC/okna_SC92_CE-ZSTV-029-15.pdf
- [26] *Specifications for the APT System and Accessories. Conservationstrategies.com* [online]. [cit. 2018-11-12]. Dostupné z: <http://www.conservationstrategies.com/Specifications-for-the-APT-System-and-Accessories/products/84/>

- [27] Calculator: Air Flow Rate through an Orifice. *Tlv.com* [online]. Japan: TLV. International [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: <https://www.tlv.com/global/TI/calculator/air-flow-rate-through-orifice.html>
- [28] PUŠKÁR, Anton, FUČILA Jozef, SZOMOLÁNYIOVÁ Klára a MRLÍK Jindřich. *Okna, dveře, prosklené stěny*. Bratislava: Jaga, 2003. ISBN 80-889- 0547-8.
- [29] PETR TYL, Zdeněk a ŠUBRT Roman. *Moderní okna: [zasklení a úspora tepla, vzduchotěsnost a průvzdušnost, výměna, montáž a reklamace]*. Praha: Grada, 2012. ISBN 978-80-247-4286-1.
- [30] ČSN EN 12154: *Lehké obvodové pláště - Vodotěsnost - Funkční požadavky a klasifikace*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [31] ČSN EN 12208: *Okna a dveře - Vodotěsnost - Klasifikace*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [32] ČSN EN 12425: *Vrata - Odolnost proti průniku vody - Klasifikace*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [33] EVROPSKÁ UNIE. *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY 2010/31/EU ze dne 19. května 2010 o energetické náročnosti budov (přepřelování)*. Úřední věstník Evropské unie, 2010.
- [34] EVROPSKÁ UNIE. *SMĚRNICE EVROPSKÉHO PARLAMENTU A RADY (EU) 2018/844 ze dne 30. května 2018: kterou se mění směrnice 2010/31/EU o energetické náročnosti budov a směrnice 2012/27/EU o energetické účinnosti*. Úřední věstník Evropské unie, 2018.
- [35] ROULET, C.A. a VANDAELE L. *Air Flow Patterns within Buildings Measurement Techniques*. Coventry: AIVC Technical Note 34, 1991.
- [36] *Velká klimatická dvojkomora, Laboratoř stavební tepelné techniky: Informační leták ČVUT UCEEB* [online]. [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: http://www.uceeb.eu/system/files/souboryredakce/velka-klimaticka-dvojkomora_cze.pdf
- [37] *Katalogový list: BK-G1,6/BK-G2,5/BK-G4* [online]. [cit. 2018-12-04]. Dostupné z: <https://www.gas-as.cz/www/prilohy/plynom%C4%9Bry/bk%20g4.pdf>
- [38] ČSN ISO 5725: *Přesnost (pravdivost a preciznost) metod a výsledků měření - Část 1-6*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018.
- [39] ČSN P ENV 13005: *Pokyn pro vyjádření nejistoty měření*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

8. Seznam tabulek

Tab. 1 – Hranice tříd těsnosti oken a dveří [7]	- 19 -
Tab. 2 – Hranice tříd průvzdušnosti lehkých obvodových plášťů [9]	- 19 -
Tab. 3 – Hranice tříd průvzdušnosti vrat [24]	- 20 -
Tab. 4 – Hranice tříd vodotěsnosti oken a dveří [31].....	- 26 -
Tab. 5 – Hranice tříd vodotěsnosti lehkých obvodových plášťů [30]	- 27 -
Tab. 6 – Hranice tříd vodotěsnosti vrat [32]	- 27 -
Tab. 7 – Výsledky měření průvzdušnosti pláště zkušební komory.....	- 55 -
Tab. 8 – Výsledky měření vzduchotěsnosti zkušební okna	- 60 -
Tab. 9 – Výsledky srovnávacího měření č.1	- 66 -
Tab. 10 – Výsledky naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 100 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.1)	- 67 -
Tab. 11 – Výsledky srovnávacího měření č.2	- 68 -
Tab. 12 - Výsledky naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 50 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.2)	- 70 -
Tab. 13 - Výsledky srovnávacího měření č.3.....	- 71 -
Tab. 14 - Výsledky naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 100 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.3)	- 73 -
Tab. 15 – Výsledky srovnávacího měření č.4.....	- 74 -
Tab. 16 - Výsledky naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 100 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.4)	- 76 -
Tab. 17 – Výsledky měření dvojice oken z bakalářské práce [3]	- 78 -
Tab. 18 – Výsledky srovnávacího měření metod v laboratoři x in-situ.....	- 80 -

9. Seznam obrázků

Obr. č.1: Graf závislosti objemového toku vzduchu netěsnostmi v obálce budovy na tlakovém rozdílu [1].....	- 13 -
Obr. č.2: Ilustrační schéma ke vztahu (2), tlakový rozdíl vyvolaný rozdílem teplot [1]	- 14 -
Obr. č.3: Schéma zkušebního zařízení pro měření vzduchotěsnosti stavebních dílců a prvků [7]	- 22 -
Obr. č.4: Princip měření průvzdušnosti pomocí fólie a clony: 1-vzduchotěsná fólie 2-kalibrovaná clona; 3-zkušební vzorek; 4-rám pro osazení zkušební vzorku 5-vzduchotěsná komora; 6-ventilátor.....	- 24 -
Obr. č.5: Schéma principu zkoušky vodotěsnosti	- 25 -
Obr. č.6: Budova Univerzitního centra energeticky efektivních budov v Buštěhradě... ..	- 30 -
Obr. č.7: Schéma sestavení zkušebního zařízení pro měření vzduchotěsnosti	- 30 -
Obr. č.8: Pohled na přední stranu zkušební komory (vlevo) a pohled na zadní stranu se vstupem do komory (vpravo)	- 32 -
Obr. č.9: Pohled na zadní stranu komory s připravenými prostupy pro přívod či odvod vzduchu (přírubový spoj) a pro přívod vody (závitový spoj)	- 32 -
Obr. č.10: Detail poskládání konstrukce u zadního vstupu do zkušební komory v místě závitové tyče (vodorovný řez v místě závitové tyče).....	- 33 -
Obr. č.11: Rozměry a schéma vstupního otvoru (vlevo); prováděcí výkres pro desku s otvory z plného polykarbonátu tl. 6 mm (uprostřed); prováděcí výkres pro těsnění o síle 4 mm z pryže A160-40°Sh (vpravo)	- 34 -
Obr. č.12: Schéma horizontálního řezu komorou s pryžovým těsněním včetně principu stahování	- 35 -
Obr. č.13: Pohled na systém stahování pomocí závitových tyčí a prodloužených matic s podložkou (zkušební vzorek - střešní okno SONG).....	- 36 -
Obr. č.14: Vzorek mikroporézního EPDM profilu 20 x 30 mm	- 36 -
Obr. č.15:Nanesené lepidlo Alkaprén 25 Plus na zkušební komoře (vlevo) a na zdrsněném povrchu těsnění (vpravo)	- 37 -
Obr. č.16: Zkušební komora s přitaženým rámem stažena závitovými tyčemi i pomocí truhlářských svěrek (zalisování těsnění na minimálně 24 hodin)	- 37 -
Obr. č.17: Detail spoje těsnění v rohu.....	- 38 -

Obr. č.18: Rám s otvorem pro normové okno (vlevo) a rám pro vzorky velikosti 3 x 3 m s menší hloubkou rámu (vpravo)	- 38 -
Obr. č.19: Pohled na zkušební zařízení (vlevo - komora pro měření vzduchotěsnosti a vodotěsnosti, vpravo – klimatická dvojkomora).....	- 39 -
Obr. č.20: Regulovatelný ventilátor s frekvenčním měničem a regulací měniče .	- 42 -
Obr. č.21: Membránový plynoměr BK – G10M s nízkofrekvenčním snímačem IN-Z61	- 42 -
Obr. č.22: Minneapolis mikroprůtokoměr MLM s vyměnitelnými disky	- 43 -
Obr. č.23: Clonková trať s dvojicí centrických clon od ZPA Nová Paka	- 43 -
Obr. č.24: Digitální měřidlo tlaku Minneapolis DG-1000.....	- 43 -
Obr. č.25: Diferenční manometry Beck 984 se zapisovačem dat DataTaker	- 44 -
Obr. č.26: Měřidlo tlakových rozdílů Minneapolis APT-8.....	- 44 -
Obr. č.27: Schéma upevnění jedné trysky postřikovacího zařízení	- 46 -
Obr. č.28: Uspořádání postřikovacího zařízení (ústí trysky ve vzdálenosti 500 mm od zkušební vzorku) pro měření vodotěsnosti lehkých obvodových plášťů podle [17]..	- 47 -
Obr. č.29: Uspořádání postřikovacího zařízení pro měření okna (o normových rozměrech 1,23x1,48 m) zkušebním postupem A podle [16]	- 47 -
Obr. č.30: Průtokoměr Gardena typ 8188	- 47 -
Obr. č.31: Schéma odtoku vody ze zkušební komory.....	- 48 -
Obr. č.32: Schéma objemových toků vzduchu k rovnici (9).....	- 49 -
Obr. č.33: Detail netěsnosti (vlevo) a detail vyplněné a dotěsněné netěsnosti (vpravo)	- 50 -
Obr. č.34: Grafické porovnání poklesu tlaku po uzavření kulového kohoutu	- 51 -
Obr. č.35: Varianty zapojení mikroprůtokoměru MLM (vlevo – bez bypassu, vpravo – s bypassem)	- 52 -
Obr. č.36: Schéma tahové síly ve vzduchotěsné fólii, která poškodila pryžové těsnění	- 53 -
Obr. č.37: Utržené gumové těsnění (vlevo) a průběh opravy znovu přilepením těsnění (vpravo).....	- 53 -
Obr. č.38: Podpurný rám z dřevěných fošen.....	- 54 -
Obr. č.39: Orientační výsledky měření průvzdušnosti zkušební komory	- 56 -
Obr. č.40: Okno přelepené vzduchotěsnou plastovou fólií, měření zbytkových toků při podtlaku.....	- 56 -

Obr. č.41: Detail kotevního plechu (vlevo) a detail vzduchotěsně přelepeného plechu (vpravo)	- 57 -
Obr. č.42: Pohled na osazené zkušební okno ze strany exteriéru	- 58 -
Obr. č.43: Ověřování těsnosti připojovací spáry ze strany interiéru při přetlaku 300 Pa; pravý horní roh (vlevo), pravý dolní roh (vpravo).....	- 58 -
Obr. č.44: Grafické porovnání výsledků měření vzduchotěsnosti zkoumaného okna – objemový tok vzduchu celým oknem v závislosti na tlakovém rozdílu	- 61 -
Obr. č.45: Grafické znázornění rozsahu měření jednotlivých přístrojů pro měření objemového toku vzduchu	- 62 -
Obr. č.46: Návrh rozmístění a velikosti otvorů (vlevo) a osazená deska s otvory (vpravo).....	- 63 -
Obr. č.47: Rozmístění otvorů pro srovnávací měření č.1	- 63 -
Obr. č.48: Rozmístění otvorů pro srovnávací měření č.2 a 3.....	- 64 -
Obr. č.49: Rozmístění otvorů pro srovnávací měření č.4	- 64 -
Obr. č.50: Zařízení měřící objemový tok vzduchu při přetlaku, zařazeno sériově (ve směru od ventilátoru: mikroprůtokoměr MLM, clonková trať a plynoměr) pro srovnávací měření č.2.....	- 65 -
Obr. č.51: Grafické porovnání výsledků srovnávacího měření č.1 – regresní přímky ..	- 66 -
Obr. č.52: Grafické porovnání hodnot objemového toku vzduchu $q_{100,L}$ s nejistotami ze srovnávacího měření č.1	- 67 -
Obr. č.53: Grafické porovnání naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 100 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.1)	- 68 -
Obr. č.54.: Grafické porovnání výsledků srovnávacího měření č.2 – regresní přímky .	- 69 -
Obr. č.55: Grafické porovnání hodnot objemového toku vzduchu $q_{50,L}$ s nejistotami ze srovnávacího měření č.2.....	- 70 -
Obr. č.56: Grafické porovnání naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 50 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.2)..	- 71 -
Obr. č.57: Grafické porovnání výsledků srovnávacího měření č.3 – regresní přímky ..	- 72 -

Obr. č.58: Grafické porovnání hodnot objemového toku vzduchu $q_{100,L}$ s nejistotami ze srovnávacího měření č.3	- 73 -
Obr. č.59: Grafické porovnání naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 100 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.3)	- 74 -
Obr. č.60: Grafické porovnání výsledků srovnávacího měření č.4 – regresní přímky ..	- 75 -
Obr. č.61: Grafické porovnání hodnot objemového toku vzduchu $q_{100,L}$ s nejistotami ze srovnávacího měření č.4	- 76 -
Obr. č.62: Grafické porovnání naměřených hodnot objemového toku vzduchu při tlakovém rozdílu cca 100 Pa včetně nejistot přesnosti měření (srovnávací měření č.4)	- 76 -
Obr. č.63: Pohled na zkušební desku s nalepenou fólií a osazenou clonou	- 79 -
Obr. č.64: Grafické porovnání výsledků srovnávacího měření metod v laboratoři x metoda s pomocnou tlakovou komorou	- 80 -
Obr. č.65: Grafické porovnání hodnot objemového toku vzduchu $q_{50,L}$ s nejistotami ze srovnávacího měření	- 81 -

10. Seznam příloh

- Příloha P1 – návod k obsluze zkušebního zařízení (tištěná)
- Příloha P2 – fotodokumentace detekovaných netěsností v plášti zkušební komory (tištěná)
- Příloha P3 – výpočetní program (MS Excel) pro vyhodnocování měření průvzdušnosti obecně (elektronicky na CD)
- Příloha P4 – výpočetní program (MS Excel) pro vyhodnocování měření průvzdušnosti oken a dveří (elektronicky na CD)
- Příloha P5 – protokoly z jednotlivých měření (elektronicky na CD)
- Příloha P6 – technické listy k použitým materiálům a zařízením (elektronicky na CD)

Příloha P1 – návod k obsluze zkušebního zařízení

Průvzdušnost

1. Soupis jednotlivých komponent

- a. zkušební komora
- b. zkušební rám pro osazení testovaných vzorků
- c. ventilátor s frekvenčním měničem
- d. flexibilní hadice k ventilátoru
- e. zařízení pro měření průtoku vzduchu (mikroprůtokoměr MLM, clonková dráha, plynoměr)
- f. zařízení pro měření tlakové difference (DG-1000, APT-8, Beck 984A, Beck 984Q)
- g. hadičky pro snímání tlakové difference
- h. teploměr, vlhkoměr a manometr
- i. počítač s vhodným softwarem

2. Používání zkušebního zařízení

U veškerých elektronických zařízeních je třeba brát na zřetel jejich provozní podmínky.

2.1. Sestavení zkušebního zařízení a následné měření

Maximální rozměry otvoru ve zkušebním rámu pro osazení testovaného vzorku jsou 3x3 m.

- 1) Do zkušebního rámu se vzduchotěsně osadí zkušební vzorek. Uchycení vzorku musí odolat veškerým tlakovým rozdílům, které mohou v průběhu měření nastat. Podle předpisu technických norem (ČSN EN 12114 [7], ČSN EN 1026 [12], ČSN EN 12153 [13] a ČSN EN 12427 [14]) se před zahájením měření musí zkušební vzorek kondicionovat nejméně 4 hodiny při teplotě vzduchu od 15 °C do 30 °C a relativní vlhkosti vzduchu mezi 25 % a 75 %.
- 2) Se zkušebním rámem a osazeným vzorkem se přijede ke zkušební komoře (směrem do zkušební komory je exteriérová strana zkušební vzorku). Rám se ke zkušební komoře přitáhne pomocí stažení 6 závitových tyčí (závitové tyče lze nahradit kovovými truhlářskými svorkami) a prodloužených matic. Je nutné, aby k dotahování jednotlivých závitových tyčí docházelo naráz (není možné maximálně dotáhnout v jednom stahovacím místě, následně na druhém,

třetím atd. – došlo by k poškození závitu na závitových tyčích i prodloužených maticích).

- 3) U měření objemového toku vzduchu clonkovou dráhou se dráha přimontuje na přívod vzduchu do zkušební komory pomocí závitu s převlečnou maticí (je nutné vložení pryžového těsnění do spoje). U měření objemového toku pomocí mikroprůtokoměru MLM či plynoměru se osadí sestavený bypass, který umožňuje rychlejší natlakování zkušební komory. Plynoměr se na bypass namontuje pomocí závitu s převlečnou maticí (je nutné vložení pryžového těsnění do spoje). Mikroprůtokoměr se na bypass namontuje přes osazené redukce, které umožňují snadné osazení flexibilních hadic (jsou součástí mikroprůtokoměru MLM). Vzduchotěsnost spoje je zajištěna stažením ocelové stahovací spony. V případě měření přetlaku musí šipky na přístrojích směřovat po proudu vzduchu směrem do komory. Při podtlaku šipky na přístrojích směřují po proudu vzduchu směrem k ventilátoru (ven z komory).
- 4) Ventilátor je se zařízením pro měření objemového toku vzduchu propojen flexibilní hadicí. V případě přetlaku je flexibilní hadice připojená na výfuku vzduchu z ventilátoru, u podtlaku je flexibilní hadice připojená k nasávání vzduchu do ventilátoru.
- 5) Na bezpečné místo, tak aby nemohlo dojít k poškození, se umístí vhodný snímač tlakové difference. Je NUTNÉ správné nastavení měřicího rozsahu, aby nedošlo k poškození tlakových snímačů. Na hadičky k tlakovým snímačům se nesmí šlápnout a nemělo by na ně svítit slunce.
 - Ke snímání tlakového rozdílu na clonkách u clonkových tratí (mikroprůtokoměr MLM a clonková dráha) lze použít všechny výše uvedené měřiče tlakové difference. Přístroje Beck je nutné připojit k zapisovači dat DataTaker, který naměřené hodnoty zaznamená a jejich vyhodnocení je možné až po stažení do počítače s programem MS Excel. Přístroje od firmy Minneapolis provádí záznam rovnou do počítače s nainstalovaným softwarem TECLOG4, kdy je k dispozici přímo záznam křivky tlakového rozdílu. Software TECLOG při zapojení mikroprůtokoměru MLM může i přímo udávat a zaznamenávat rovnou průtok vzduchu.
 - U plynoměru je nutné osazení impulzního snímače, který je zapojený k zapisovači dat DataTaker. Je zaznamenán průtok vzduchu o objemu

0,1 m³ a časový interval. Vyhodnocení dat je možné až po stažení zaznamenaných hodnot do počítače s programem MS Excel.

- Ke snímání tlakového rozdílu na zkoumaném prvku lze využít ty samé přístroje jako pro měření tlakového rozdílu na clonkách u clonkových tratí. Tlaková hadička pro snímání tlaku uvnitř zkušební komory se připojí na prostup v desce polykarbonátové desky zadního vstupu do komory.
- 6) Veškeré elektrické přístroje potřebné ke zkoušce (ventilátor, počítač, snímač tlakové diference, zapisovač dat, ...) se zapojí do elektrické sítě a uvedou do provozu dle jejich uživatelského manuálu.
- 7) Spínač ventilátoru se nastaví do pozice 1, po 3 vteřinách od sepnutí spínače se do provozu uvede zeleným tlačítkem start frekvenční měnič. Šipkou nahoru se zvyšují otáčky ventilátoru a šipkou dolů se snižují otáčky ventilátoru.



Obr. č.1: Frekvenční měnič a spínač ventilátoru

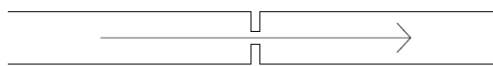
Při zvyšování otáček ventilátoru je nutné dát POZOR na to, aby nedošlo k překročení hodnot měřicího rozsahu měřidel tlakové diference.

- 8) Proveďte zkoušku průvzdušnosti podle postupu uvedeném v technické normě ČSN EN 12114 [7] (případně dle ČSN EN 1026 [12], ČSN EN 12153 [13] nebo ČSN EN 12427 [14]).
- V případě použití plynoměru nebo mikroprůtokoměru MLM k měření objemového toku vzduchu se využije zapojení přes bypass. Zkušební komora se tlakuje ve stavu, kdy je otevřen horní kulový kohout. Až je komora dostatečně natlakovaná, otevře se kulový kohout bypassu

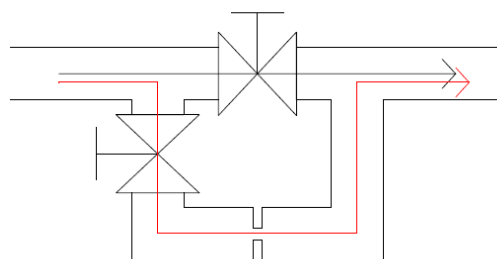
(směrem k měřicímu přístroji průtoku vzduchu) a uzavře se horní kulový kohout.

- U použití plynoměru NESMÍ dojít k zpětnému průtoku vzduchu (plynoměrem může protékat vzduch pouze jedním směrem). K tomuto zpětnému průtoků může dojít například pokud se nechá natlakovaná zkušební komora, otevřený bypass a vypne se (či se sníží výkon) ventilátoru. Vzduch tedy začne proudit v opačném směru, než ke kterému je plynoměr konstruován.

BEZ BYPASSU



S BYPASSEM:



Obr. č.2: Varianty zapojení mikroprůtokoměru MLM (vlevo – bez bypassu, vpravo – s bypassem)



Obr. č.3: Membránový plynoměr zapojený bypassem, na obrázku je vidět stav tlakování komory (horní kohout je otevřený, kohout směrem do bypassu uzavřený)

- 9) Po ukončení měření se šipkou dolů sníží otáčky ventilátoru až na nulu (displej musí ukazovat 0 Hz). Frekvenční měnič se vypne tlačítkem stop (červené tlačítko). Po 5 vteřinách od vypnutí frekvenčního měniče lze vypnout spínač ventilátoru otočením do pozice 0.

2.2. Tipy a rady

Pokud není znám ani přibližný odhad průvzdušnosti zkoumaného prvku, je vhodné před začátkem měření orientačně zkusit průvzdušnost zkušební vzorku pomocí mikroprůtokoměru MLM. V softwaru TECLOG4 se totiž ihned udává naměřený průtok vzduchu a tlakový rozdíl na zkoušeném prvku. Na základě těchto hodnot lze snadno zvolit přístroj pro měření objemového toku vzduchu (clonková dráha pro netěsné vzorky, plynoměr pro velmi těsné vzorky a mikroprůtokoměr MLM těsné až netěsné vzorky) pro úplné měření průvzdušnosti.

Při měření objemového toku pomocí plynoměru je vhodné mezi flexibilní hadici od ventilátoru a bypass u plynoměru zařadit mikroprůtokoměr MLM. Díky této vřazené tlakové ztrátě se nebude muset ventilátor při měření velmi těsných vzorků pohybovat v nízkých otáčkách. Dále lze tímto způsobem orientačně měřit a hlídat maximální průtok vzduchu, aby nedošlo k poškození samotného plynoměru (průtok vzduchu plynoměrem může být maximálně 16 m³/h).

Vodotěsnost

1. Soupis jednotlivých komponent

- a. zkušební komora
- b. zkušební rám pro osazení testovaných vzorků
- c. ventilátor s frekvenčním měničem
- d. flexibilní hadice k ventilátoru
- e. zařízení pro měření tlakové difference (DG-1000, APT-8, Beck 984A, Beck 984Q)
- f. hadičky pro snímání tlakové difference
- g. počítač s vhodným softwarem (pokud je požadováno uchování záznamu jednotlivých tlakových rozdílů)
- h. vodoměr (průtokoměr Gardena)
- i. flexibilní hadice s rychlospojkami pro přívod vody do komory
- j. postřikovací systém (trysky s magnetickým úchytným systémem, propojovací flexibilní hadice s rychlospojkami, rozdělovače)

2. Používání zkušebního zařízení

U veškerých elektronických zařízeních je třeba brát na zřetel jejich provozní podmínky.

2.1. Sestavení zkušebního zařízení a následné měření

Maximální rozměry otvoru ve zkušebním rámu pro osazení testovaného vzorku jsou 3x3 m.

- 1) Do zkušebního rámu se vzduchotěsně a vodotěsně osadí zkušební vzorek. Uchycení vzorku musí odolat veškerým tlakovým rozdílům, které mohou v průběhu měření nastat.
- 2) Dle požadavků technických norem ČSN EN 1027 [16], ČSN EN 12155 [17] nebo ČSN EN 12489 [23] se rozmístí trysky s magnetickými úchyty. Propojí se flexibilními hadicemi s rozdělovači. Rozdělovač je napojen uvnitř zkušební komory na přívod vody. Tento bod je možné provést až před bodem 6, ovšem je zapotřebí využít ke vstupu do zkušební komory zadní vstup.
- 3) Se zkušebním rámem a osazeným vzorkem se přijede ke zkušební komoře (směrem do zkušební komory je exteriérová strana zkušebního vzorku). Rám se ke zkušební komoře přitáhne pomocí stažení 6 závitových tyčí (závitové

tyče lze nahradit kovovými truhlářskými svorkami) a prodloužených matic. Je nutné, aby k dotahování jednotlivých závitových tyčí docházelo naráz (není možné maximálně dotáhnout v jednom stahovacím místě, následně na druhém, třetím atd. – došlo by k poškození závitu na závitových tyčích i prodloužených maticích).

- 4) Ventilátor je se zkušební komorou propojen flexibilní hadicí. Jelikož se vodotěsnost zkouší při přetlaku, je flexibilní hadice připojena na výfuku vzduchu z ventilátoru.
- 5) Na bezpečné místo, tak aby nemohlo dojít k poškození, se umístí snímač tlakové difference. Je nutné správné nastavení měřicího rozsahu, aby nedošlo k poškození tlakových snímačů. Na hadičky k tlakovým snímačům se nesmí šlápnout a nemělo by na ně svítit slunce.
 - Tlaková hadička pro snímání tlaku uvnitř zkušební komory se připojí na prostup v desce polykarbonátové desky zadního vstupu do komory. Snímání tlaku uvnitř komory je kryto stříškou, aby nedošlo k natečení vody do hadičky.
- 6) Na odtok vody (na hadičník) se nasadí flexibilní hadice, stáhne se ocelovou sponou. Druhý konec hadice se umístí do podlahové vpusti. Regulace odtoku vody ze zkušební komory je možná pomocí přivření kulového kohoutu umístěného na odtoku (před hadičníkem).
- 7) Průtokoměr Gardena se osadí pomocí rychlospojky na přívod vody (kohoutkový ventil). Na přívodu vody do zkušební komory je osazen kulový ventil. Propojení mezi průtokoměrem a zkušební komorou zajistí flexibilní hadice osazená rychlospojkami. Jelikož průtokoměr musí být trvale zavodněný, použije se k regulaci průtoku vody kulový kohout umístěný před vstupem do zkušební komory (kohoutkový ventil u průtokoměru bude plně otevřený).
- 8) Veškeré elektrické přístroje potřebné ke zkoušce (počítač, snímač tlakové difference, ventilátor, ...) se zapojí do elektrické sítě a uvedou do provozu dle jejich uživatelského manuálu.
- 9) Otevřením kohoutů na přívodu vody se spustí postřikovací zařízení.
- 10) Spínač ventilátoru se nastaví do pozice 1, po 3 vteřinách od sepnutí spínače se do provozu uvede zeleným tlačítkem start frekvenční měnič. Šipkou nahoru se zvyšují otáčky ventilátoru a šipkou dolů se snižují otáčky ventilátoru

- 11) Proveďte se zkouška vodotěsnosti podle postupu uvedeném v technické normě ČSN EN 1027 [16], ČSN EN 12155 [17] nebo ČSN EN 12489.
- 12) Po ukončení měření se uzavře přívod vody do zkušební komory.
- 13) Dále se po ukončení měření šipkou dolů sníží otáčky ventilátoru až na nulu (displej musí ukazovat 0 Hz). Frekvenční měnič se vypne tlačítkem stop (červené tlačítko). Po 5 vteřinách od vypnutí frekvenčního měniče lze vypnout spínač ventilátoru otočením do pozice 0.
- 14) Po odtečení vody ze zkušební komory je vhodné odstranit z vnitřních stěn zkušební komory veškerou vodu, aby se zbytečně nezvyšovalo riziko možné koroze pláště zkušební komory.

Pomůcka pro volbu měřicího zařízení

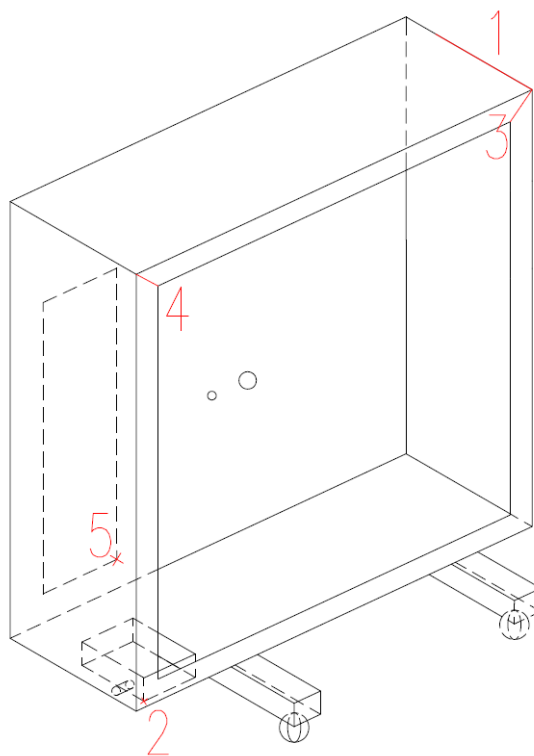
Tab. 1 – Zařízení pro měření objemového toku vzduchu

	Objemový tok vzduchu		Poznámky
	Celkový rozsah	Dílčí rozsahy	
Plynoměr	0 - 16 m ³ /h	nejsou	potřeba osadit impulsní snímač zapojený k DataTakeru, výstup v programu MS Excel
Mikroprůtokoměr MLM	0,17 - 78,5 m ³ /h	disk 4	12,4 - 75,5 m ³ /h
		disk 3	2,2 - 18,2 m ³ /h
		disk 2	0,65 - 3,23 m ³ /h
		disk 1	0,17 - 0,83 m ³ /h
Clonková dráha	11 - 160 m ³ /h	v.č. 15452	30 - 160 m ³ /h
		v.č. 15452A	11 - 30 m ³ /h

Tab. 2 – Zařízení pro měření tlakového rozdílu

	Rozsahy tlakového rozdílu	Poznámky
DG-1000	-2500 až 2500 Pa	připojit k počítači se softwarem TECLOG, výstup v TECLOGU nebo MS Excel
APT-8	-400 až 400 Pa	připojit k počítači se softwarem TECLOG, měřicí rozsah se nastaví v softwaru TECLOG, výstup v TECLOGU nebo MS Excel
	-1000 až 1000 Pa	
Beck 984A	0 až 1000 Pa	zapojit k DataTakeru, měřicí rozsah se nastaví manuálním přepnutím páčky (low x high), zvolený měřicí rozsah je vhodné nastavit i v DataTakeru, výstup v programu MS Excel
	0 až 2500 Pa	
Beck 984Q	0 až 100 Pa	zapojit k DataTakeru, měřicí rozsah se nastaví otočením směrovky na požadovaný rozsah, zvolený měřicí rozsah je vhodné nastavit i v DataTakeru, výstup v programu MS Excel
	0 až 250 Pa	
	0 až 500 Pa	

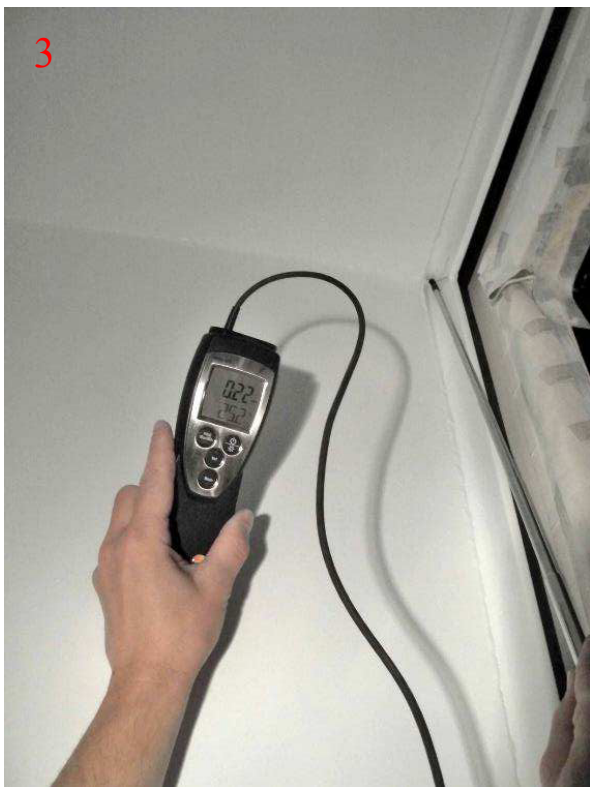
**Příloha P2 – fotodokumentace detekovaných netěsností v plášti
zkušební komory**



Obr. č.1: Schéma zkušební komory s označením netěsností



Obr. č.2: Netěsnosti v plášti zkušební komory naměřené zvenku (vlevo netěsnost č.1; vpravo netěsnost č.2)



Obr. č.3: Netěsnosti v plášti zkušební komory naměřené zevnitř (vlevo netěsnost č.3; vpravo netěsnost č.4)



Obr. č.4: Netěsnost v plášti zkušební komory (netěsnost č. 5)