



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

**Fakulta stavební
Katedra fyziky**

Měření vzduchotěsnosti stavebních konstrukcí

Measuring of airtightness of building constructions

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Martin Černožorský

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Fyzikální a materiálové inženýrství

Školitel: Doc. Ing. Petr Semerák, Ph.D.

Praha, 2021

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Martin Černohorský

Název disertační práce: Měření vzduchotěsnosti stavebních konstrukcí

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval samostatně pod vedením školitele Doc. Ing. Petra Semeráka, Ph.D.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektů:

Výzkum a vývoj mikro- a nanomateriálů nové generace, SGS19/141/OHK1/3T/11

Optimalizace materiálů pro moderní stavitelství, SGS16/197/OHK1/3T/11

V Praze dne 11.6.2021

.....
podpis

Poděkování

Rád bych poděkoval mému školiteli Doc. Ing. Petru Semerákovi, Ph.D. za odborné vedení, dobré nápady a v neposlední řadě za pozitivní přístup k mojí práci. Dále bych rád poděkoval řadě odborníků z katedry fyziky a katedry pozemních staveb za pomoc s řešením úloh, se kterými jsem pomoci potřeboval. Rád bych poděkoval také manželce Petře a dcerám Ladě, Matyldě a Žofii i širší rodině za to, že mi umožnili práci vytvořit a dokončit. Speciální poděkování patří oddělení diagnostiky firmy Dekprojekt, s. r. o., za předané cenné zkušenosti a za sdílení nezdolného optimismu při diagnostice staveb.

Anotace

Ruku v ruce s technickým vývojem jsou na stavební materiály kladeny vyšší specifické nároky. Výjimkou není ani vzduchotěsnost, resp. průvzdušnost, která je klíčová pro tepelně vlhkostní fungování obvodových plášťů a pro energetickou náročnost budov. I přes snahu certifikace stavebních výrobků mohou být vlastnosti dodaného stavebního materiálu vlivem rozličných okolností různé. Tato práce se zabývá vývojem měřicího zařízení a optimalizací postupu měření právě pro ověření vzduchotěsnosti tuhých deskových stavebních materiálů, konkrétně OSB desek, pro které je tato vlastnost důležitá a také často diskutovaná. Sestrojená testovací sada pracuje na základě metody tlakového impulsu. Výhodou této metody je vhodný měřicí rozsah, jednoduché provedení zkoušky, krátká doba měření, možnost provádění v úvodní fázi výstavby nebo již při přejímce materiálu. Pro sestavené měřicí zařízení jsou použity cenově i skladově dostupné komponenty. Součástí práce je experimentální část, která ověřuje různé detaily prováděných měření.

Klíčová slova: metoda tlakového impulsu, vzduchotěsnost, průvzdušnost, OSB desky, mikromanometr

Abstrakt

Building materials have to fulfill high specific requirements simultaneously with the technical development. Airtightness resp. air permeability is no exception. This property is important for heat and moisture transport of building envelopes and for energy efficiency in buildings. In spite of building materials certification, the properties can be different due to many various processes. This thesis deals with development of measuring equipment and optimalization of measuring process the airtightness rigid building board materials, especially OSB board, in witch is this property important and often discussed. Constructed measuring set works on base of pressure puls method. This method has a nuber of advantages: suitable measuring rate for this aplication, simple performance, short duration, possibility of performance in different construction phases as well as by acceptance the material. Measuring assemble is made from cheap and available components. Experimental part specializes in various details of performance this measuring.

keywords: pressure pulse method, airtightness, air permeability, OSB board, micromanometer

OBSAH

ÚVOD.....	4
DŮVODY MĚŘENÍ PRŮVZDUŠNOSTI OBÁLKY BUDOVY.....	5
VÝZNAM PRŮVZDUŠNOSTI DESKOVÝCH MATERIÁLŮ.....	7
METODY MĚŘENÍ PRŮVZDUŠNOSTI.....	9
MĚŘENÍ CELKOVÉ PRŮVZDUŠNOSTI OBÁLKY BUDOVY.....	9
Metoda tlakového spádu.....	9
Metoda tlakového impulsu.....	10
Metoda harmonicky proměnného tlakového rozdílu.....	11
INTERPRETACE VÝSLEDKŮ.....	11
PRŮVZDUŠNOST STAVEBNÍCH VÝROBKŮ, DÍLCŮ A JEJICH NAPOJENÍ.....	12
DIAGNOSTICKÉ METODY ZJIŠŤOVÁNÍ NETĚSNOSTI A MĚŘENÍ PRŮVZDUŠNOSTI STAVEBNÍCH VÝROBKŮ, DÍLCŮ A JEJICH NAPOJENÍ.....	13
Diagnostické metody pohybu vzduchu skrz vzduchotěsnou obálku.....	13
Diagnostika ultrazvukem.....	14
Diagnostika termovizním snímkováním.....	15
Měření statickou metodou tlakového spádu.....	17
Měření dynamickou metodou tlakového impulsu.....	17
TEORETICKÁ ČÁST.....	19
VYBRANÉ VLASTNOSTI TEKUTIN.....	19
PÓROVÁ STRUKTURA STAVEBNÍHO MATERIÁLU.....	20
POHYB PLYNU V PÓROVÉ STRUKTUŘE.....	22
TEORIE MĚŘENÍ PRŮVZDUŠNOSTI METODOU TLAKOVÉHO IMPULSU.....	23
OSB DESKY.....	27
VÝROBA OSB DESEK [23].....	28
VÝVOJ MĚŘICÍ SESTAVY.....	31
TESTOVACÍ SADA I (TS I).....	32
TESTOVACÍ SADA II (TS II).....	33
Altis v4+.....	33
Provedená měření na TS II.....	35
TESTOVACÍ SADA III (TS III).....	37
OPTIMALIZACE TESTOVACÍ SADY III.....	39
TĚSNOST MĚŘICÍCH SESTAV.....	40

VÝVOJ OSAZENÍ VZORKU.....	41
POUŽITÉ DESKY.....	41
OSAZENÍ MĚŘICÍ SESTAVY A BOČNÍ TOKY VZDUCHU.....	42
Vliv upínání komory pomocí šroubů.....	46
Vliv osazení vzorku ke komoře přes silikonovou hadičku.....	47
Akrylátový tmel v pozici těsnicí vrstvy připojovací spáry.....	49
Vliv rozměru vzorku.....	49
Vliv bočních cest u desek s nižší průvzdušností.....	52
Vliv osazení vzorku vně komory (EX) a dovnitř komory (IN).....	54
OPTIMALIZOVANÉ OSAZENÍ VZORKU.....	55
POSTUP MĚŘENÍ.....	57
PŘÍPRAVA VZORKU A OSAZENÍ KOMORY.....	57
MĚŘENÍ.....	57
VYHODNOCENÍ.....	58
OPAKOVATELNOST MĚŘENÍ.....	62
ROZSAH MĚŘICÍ METODY.....	64
Limity nízkých hodnot průvzdušnosti.....	64
Limity vysokých hodnot průvzdušnosti.....	64
DOPLŇKOVÁ MĚŘENÍ.....	68
DEFORMACE MĚŘENÉHO OBJEMU.....	68
PRŮBĚH TEPLŮT UVNITŘ KOMORY.....	69
MĚŘENÍ IN SITU RD MEZOUŇ.....	71
STAV OBJEKTU.....	71
PŘÍPRAVA A PRŮBĚH MĚŘENÍ IN SITU.....	73
VÝSLEDKY MĚŘENÍ IN SITU.....	76
VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ IN SITU.....	79
ZÁVĚR.....	83

Seznam použitých symbolů:

Q	objemový tok [m^3/h];
C	součinitel proudění [$\text{m}^3/(\text{h Pa})$];
Δp	tlakový rozdíl [Pa]
n	exponent proudění [-]
C_D	empiricky určený výtokový součinitel [-]
A	plocha otvoru clony [m^2]
p	tlakový rozdíl mezi dvěma systémy [Pa]
ρ_a	hustota vzduchu [kg/m^3]
V_a	vnitřní objem měřicí komory [m^3]
T	termodynamická teplota [K]
t	čas [s]
B	konstanta tekutiny [$\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{K}^{-0,5}$] hodnota konstant uvedena v [12]
C_k	konstanta tekutiny [K] hodnota konstant uvedena v [12]
η	dynamická viskozita [Pa s^{-1}]
ρ	hustota tekutiny [kg/m^3]
V	objem plynu [m^3]
n_a	počet částic [mol]
R_a	plynová konstanta $8,314\ 4598\ [\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}]$, $286,73\ [\text{J}/\text{K}^{-1}\ \text{kg}^{-1}]$
m_a	hmotnost plynu, hmotnost plynu uvnitř komory [kg]
P	tlak vzduchu [Pa]
u	rychlost proudění [ms^{-1}]
u_s	střední rychlost proudění [ms^{-1}]
l	délka průřezu [m]
R	poloměr průřezu [m]
r	vzálenost vrstvy od osy průřezu [m]
Re	Reynoldsovo číslo [-];
ν	kinematická viskozita tekutiny [m^2/s]
P_0	atmosferický tlak [Pa]
c_v	tepelná kapacita při konstantním objemu [$\text{J kg}^{-1}\ \text{K}^{-1}$]
c_p	tepelná kapacita při konstantním tlaku [$\text{J kg}^{-1}\ \text{K}^{-1}$]
U	vnitřní energie [J]
H	entalpie [J]
Q_{heat}	tepelný tok [J]

1. ÚVOD

Tato práce se zaměřuje na studium zjišťování vzduchotěsnosti nebo také průvzdušnosti deskových stavebních materiálů metodou tlakového impulsu a její aplikovatelnost ve stavební praxi. Výstupem je konstrukce sestavy, která umožní měření vzduchotěsnosti výše uvedenou metodou a řada provedených experimentů, které zkoumají různé aspekty zvolené metody.

Vzhledem k tomu, že jsou na budovy kladeny čím dál vyšší nároky (snižování energetické náročnosti, optimalizování vnitřního prostředí, prodloužení životnosti, šetrnost staveb a stavebních materiálů k životnímu prostředí atd.), jsou do budov instalována komplikovaná technologická zařízení a pro výstavbu jsou používány stavební materiály se specifickými vlastnostmi. Tyto vlastnosti pak zásadně ovlivňují fungování dílčích stavebních konstrukcí i stavby jako celku.

Používání materiálů se specifickými vlastnostmi vede k vysokým požadavkům na zkoušení jejich parametrů, na standardizaci jejich vlastností a na dohled nad technologickým postupem při výrobě. I přes snahu normalizace a certifikace ve stavebnictví se mohou vlastnosti stavebních materiálů pro specifické účely značně různit. Příčiny mohou být různé a mohou vzniknout v různých fázích životního cyklu stavebního materiálu, například chybná volba materiálu, nedodržení technologické kázně při výrobě, chybné skladování, nepříznivé povětrnostní podmínky v průběhu výstavby atd. Nejlepší představu o vlastnostech materiálů tedy získáme měřením in situ přímo na stavbě, kdy jsou měřené parametry poznamenány celým výrobním a stavebním procesem. Proto je účelné měřit vlastnosti použitých stavebních materiálů přímo na stavbě nejlépe nedestruktivně v zabudovaném stavu nebo ve stavu těsně před zabudováním, kdy se můžeme vyvarovat použití vadných výrobků a materiálů. Měření průvzdušnosti materiálu nebo konstrukce může být klíčové pro snižování celkové průvzdušnosti obálky budovy, nebo můžeme na základě měření průvzdušnosti nepřímo určovat i další vlastnosti materiálu (např. pórovitost, pevnost, neprůzvučnost, difuzní odpor). Měření průvzdušnosti tedy může napomoci správnému pochopení fungování daného materiálu a například správné diagnostice poruch stavby. [3],[7]

Vyvíjená měřicí sestava je použitelná pro měření tuhých deskových materiálů. Vzhledem k výše uvedenému se metoda specializuje na měření vzduchotěsnosti OSB desek, které jsou v moderních dřevostavbách pravděpodobně nejpoužívanějším deskovým konstrukčním materiálem a často ve skladbě obvodového pláště plní právě vzduchotěsní funkci.

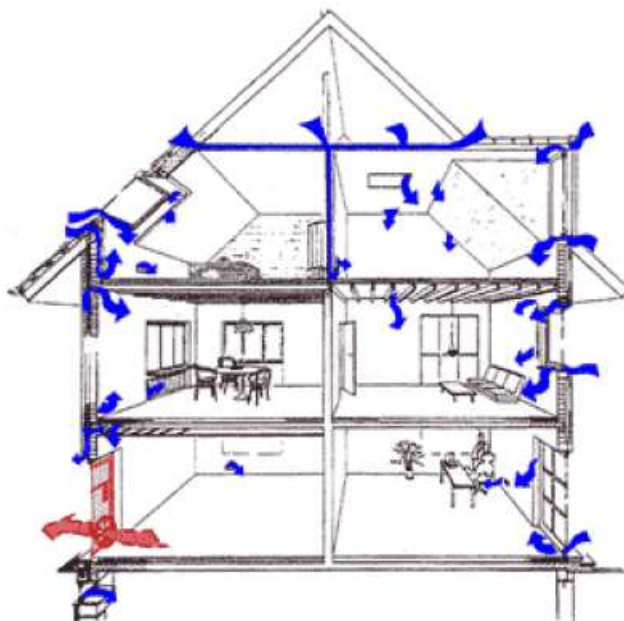
1.1. DŮVODY MĚŘENÍ PRŮVZDUŠNOSTI OBÁLKY BUDOVY

Vzduchotěsnost je schopnost materiálu odolat průniku vzduchu při tlakovém rozdílu na protějších stranách materiálu. Vzduchotěsnost je určována nejčastěji průvzdušností konstrukce, jež vyjadřuje množství vzduchu, které za jednotku času při daném tlakovém rozdílu (spádu) konstrukcí prochází. Ve stavební praxi se nejčastěji měří průvzdušnost obálky budovy, částí budovy, zřídka pak jednotlivých stavebních prvků nebo konstrukcí. [1]

Průvzdušnost obálky budovy se ve stavební praxi nejčastěji zjišťuje v rámci ověření energetické náročnosti budovy. Do kontextu celkové energetické náročnosti budovy zapadá průvzdušnost obálky budovy v rámci efektivity větrání přes vzduchotechnickou jednotku s osazeným zpětným získáváním tepla z odtahového vzduchu. Nejvíce energeticky efektivní je větrání výhradně přes rekuperační výměník osazený v rámci vzduchotechnické jednotky, kdy je zcela eliminováno větrání netěsnostmi v obálce budovy nebo výplněmi otvorů. [2]

Dále je měření průvzdušnosti obálky budovy používáno k určení kvality provedení vzduchotěsní obálky budovy. Protože vzduchotěsní vrstva je velmi často současně i vrstvou parotěsnou, může mít kvalita provedení této vrstvy významný vliv na transportní jevy v rámci stavební konstrukce (šíření tepla, vlhkosti) do skladeb obvodových konstrukcí. Propustnost vzduchu parotěsnou vrstvou může mít až fatální následky [1]. Přenesená vzdušná vlhkost z interiéru budovy do skladeb obvodových konstrukcí může být mnohonásobně větší, než množství vlhkosti přenesené do obvodových konstrukcí principem difúze. Vzdušná vlhkost přenesená do skladby může za nízkých venkovních teplot ve skladbě kondenzovat a může způsobovat problémy různé závažnosti (např. snížení izolačních vlastností tepelné izolace, vzhledové defekty, vlhkostní mapy na povrchu staveb, biologickou degradaci konstrukcí, snížení únosnosti). [3] Nejvíce náchylné stavby vzhledem k vlhkostním poruchám jsou stavby s konstrukčním systémem na bázi dřeva, obecně dřevostavby. Také proto se měření průvzdušnosti obálky budovy z důvodu zjištění kvality provedení vzduchotěsní, resp. parotěsní vrstvy provádí u dřevostaveb.

Problém v měření průvzdušnosti obálky je v tom, že nelze jednoduše kvantifikovat objemový tok proudící přes jednotlivé detaily (návaznosti konstrukcí, kotvení konstrukcí, prostupující technologie atd., viz obr. 1) nebo přes jednotlivé plošné konstrukce. Pro detekci je možné použít některou z metod uvedených v kapitole 2.4.



obr. 1: Proudění vzduchu netěsnostmi obálky budovy při vyvolaném podtlaku v budově [4]

Vzduchotěsnost budov, resp. jejich úseků se měří také z důvodů zajištění požární ochrany těch objektů, které jsou proti požáru chráněny stabilním plynovým hasicím zařízením. Prostor je v případě požáru chráněn vháněním hasicího plynu (viz obr. 2), který při určité koncentraci zamezuje vzniku požáru. V těchto případech je vyžadována těsnost obálky chráněného prostoru tak, aby nedocházelo k rychlému poklesu koncentrace hasicího plynu v případě požáru a prostor mohl být proti požáru efektivně chráněn. [5]



obr. 2: Osazené tlakové láhve s hasicím plynem (archiv autora)

Velmi ojediněle se lze setkat s měřením vzduchotěsnosti obálky budovy, resp. jejích prostor u budov s chráněným vnitřním prostředím. Příkladem jsou laboratoře, kde je nežádoucí nekontrolovaný únik aerosolů do okolního prostředí nebo naopak, je chráněno vnitřní prostředí před aerosoly venkovními.



obr. 3: Výrobní laboratoři vakcinačních látek, ve které byla měřena vzduchotěsnost (archiv autora)

1.2. VÝZNAM PRŮVZDUŠNOSTI DESKOVÝCH MATERIÁLŮ

Na následujícím příkladu je ukázán vliv průvzdušnosti obalových konstrukcí na celkovou průvzdušnost obálky budovy. Mějme modelový rodinný dům se čtvercovým půdorysem s plochou střechou o vnitřních půdorysných rozměrech 10 x 10 m. Modelový objekt zahrnuje 2.NP a od podlahy po hlavní vzduchotěsnící vrstvu (HVV) stropu je vysoký 6 m. Vnitřní objem objektu je 600 m³, plocha obálky budovy je 440 m², z toho je 100 m² podlaha na terénu, 100 m² stropní konstrukce, plocha stěn je 240 m². Uvažujme dvě varianty. V první variantě je HVV stěn z deskových materiálů s proměnnou průvzdušností. Ve druhé variantě jsou HVV stěn a stropu z deskových materiálů. V následující tabulce tab. 1 je uveden vliv průvzdušnosti obalových konstrukcí na celkovou průvzdušnost obálky budovy. Z uvedeného příkladu je patrné, že pokud bude na HVV použito materiálu, který má průvzdušnost vyšší než 1,0 m³/m²h bude s přihlédnutím na řadu dalších detailů, které se na každé stavbě objevují, velmi obtížné dosáhnout například doporučené hodnoty celkové průvzdušnosti obálky budovy pro pasivní budovy $n_{50} < 0,6 \text{ h}^{-1}$.

varianta	plocha obálky z deskových materiálů [m ²]	průvzdušnost použitých deskových materiálů při tlakovém rozdílu 50 Pa [m ³ /m ² h]											
		0,1		0,5		0,75		1		1,25		1,5	
		m ³ /h	h ⁻¹	m ³ /h	h ⁻¹	m ³ /h	h ⁻¹	m ³ /h	h ⁻¹	m ³ /h	h ⁻¹	m ³ /h	h ⁻¹
VAR 1	240	24	0,04	120	0,20	180	0,30	240	0,40	300	0,50	360	0,60
VAR 2	340	34	0,06	170	0,28	255	0,43	340	0,57	425	0,71	510	0,85

tab. 1: Vliv průvzdušnosti materiálů na celkovou průvzdušnost obálky budovy

Další významný dopad má průvzdušnost použitých materiálů na vlhkostní transport v konstrukcích. Při zimních návrhových podmínkách vzniká vzhledem k rozdílné hustotě vnitřního a venkovního vzduchu v horní části budov běžně přetlak 5 Pa. V následující tabulce tab. 2 jsou uvedeny hmotnosti vodní páry, které se vlivem proudění do konstrukce dostanou při tlakovém rozdílu 5 Pa. Je uvažováno s parametry vnitřního vzduchu 20,6 °C a RH 50 %. Průvzdušnost při 5 Pa je odečtena z regresních křivek provedených měření. Transportovaná vlhkost do konstrukce při použití nevzduchotěsných materiálů přináší do konstrukce vlhkost, která může způsobit poruchu funkce konstrukce, zvláště pak při použití dřevěných konstrukcí nebo konstrukcí na bázi dřeva.

	průvzdušnost použitých deskových materiálů při tlakovém rozdílu 5 Pa (50 Pa) [m ³ /m ² h]			
	0,006	0,051	0,08	0,096
	(0,06)	(0,51)	(0,8)	(0,96)
hmotnost transportované vodní páry [g/den]	1,29	10,98	17,22	20,66

tab. 2: Vliv průvzdušnosti deskových materiálů na transport vodní páry

2. METODY MĚŘENÍ PRŮVZDUŠNOSTI

2.1. MĚŘENÍ CELKOVÉ PRŮVZDUŠNOSTI OBÁLKY BUDOVY

Měření vzduchotěsnosti lze provádět několika způsoby uvedenými v různých zdrojích. Jsou to jednak metody založené na tlakovém rozdílu mezi měřenou a přilehlou částí, dále pak méně používané metody založené na principu poklesu koncentrace indikačního činidla [6]. Z uvedených metod se dnes častěji používají metody založené na principu tlakového rozdílu mezi měřeným objemem a přilehlým prostředím. Z těchto metod se pak nejčastěji používá statická metoda tlakového spádu, významně méně používanými jsou pak metody dynamické [2].

2.1.1. Metoda tlakového spádu

Metoda tlakového spádu je dnes nejrozšířenější metodou měření celých objektů, ale i stavebních dílců. Jestliže k měření používáme externí ventilátor, bývá metoda označována jako Blower door. Osazené měřicí zařízení je zobrazeno na obr. 4.



obr. 4: Osazení Blower door testu na objektu logistické haly vlevo a na objektu rodinného domu vpravo (archiv autora)

V podstatě se jedná o stacionární metodu, kdy je ventilátorem mezi interiérem a exteriérem vytvořený a udržovaný určitý tlakový rozdíl. Ze znalosti plochy otvoru ve cloně ventilátoru, tlakového rozdílu před a za clonou, vlastností vzduchu a empiricky určených výtokových koeficientů a dalších kalibračních koeficientů lze dopočítat podle rovnice objemový tok vzduchu, který teče ventilátorem. Tento objemový tok vzduchu je shodný s objemovým

tokem vzduchu, který teče přes netěsnosti všech konstrukcí objektu. Pro zvýšení přesnosti měření a stanovení hodnoty při určitém tlaku se provádí sada měření při několika tlakových rozdílech mezi měřeným prostorem a okolním prostředím. Následně se pro interpretaci výsledků využívá metody lineární regrese. Výsledkem měření je regresní křivka, která má předpis (1) a parametry C a n . Součinitel proudění C odpovídá objemovému toku vzduchu při tlakovém rozdílu 1 Pa a v podstatě dává informaci o velikosti netěsnosti. Exponent proudění n popisuje charakter proudění, jeho hodnota leží v intervalu 0,5 (turbulentní proudění) až 1,0 (laminární proudění).[2]

$$Q = C \cdot \Delta p^n \quad (1)$$

Metodu tlakového spádu lze použít v různých modifikacích i pro měření vzduchotěsnosti stavebních dílců. Velmi často se jedná o modifikaci, kdy je měřená konstrukce v dokončené stavbě uzavřena do vlastní vzduchotěsné komory. Do komory je pak zabudován otvor o definovaných parametrech (plocha a výtokový součinitel). Ventilátorem, který je osazený vně vzduchotěsné komory (např. ve dveřích objektu), se vytvoří tlakový rozdíl uvnitř a vně pomocné vzduchotěsné komory. Z rovnice (2) je dopočítán objemový tok vzduchu přes definovaný otvor. Měřený objemový tok je roven objemovému toku měřenou konstrukcí. [2]

$$Q = C_D A \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} \quad (2)$$

2.1.2. Metoda tlakového impulsu

Další metodou podstatně méně využívanou pro měření vzduchotěsnosti je metoda tlakového impulsu. Jedná se o metodu dynamickou, kdy je v budově, resp. měřeném prostoru, vytvořen přetlak nebo podtlak. Sledovanou veličinou je pak pokles tlakového rozdílu mezi vnějším a vnitřním prostředím. Z křivky poklesu tlaku, která má tvar exponenciály s exponentem < 0 , lze získat okamžitý objemový tok mezi vnitřním prostorem budovy a venkovním prostředím při libovolném tlakovém rozdílu. Základní rovnice (3) pro výpočet průtoku vzduchu zohledňuje změnu tlaku, teploty a objemu komory v čase po vyvolání tlaku v komoře a uzavření přívodu / odtahu vzduchu. [2], [8] Podrobněji je teorie této měřicí metody popsána v kapitole 3.4.

$$Q_{(p)} = -\frac{V_a}{p} \cdot \frac{dp}{dt} + \frac{V}{T} \cdot \frac{dT}{dt} - \frac{dV_a}{dt} \quad (3)$$

2.1.3. Metoda harmonicky proměnného tlakového rozdílu

Pro zjištění netěsností v obálce budovy je uvnitř budovy za pomoci pístu vytvořen harmonicky se měnící tlakový rozdíl. Z analýzy amplitudy tlakového rozdílu uvnitř budovy a z fázového posunu vzhledem k pohybu pístu je přímo dopočtena ekvivalentní plocha netěsnosti obálky budovy. Výhodou metody je rychlost provedení a z důvodu velké četnosti opakování možnost odfiltrování vnějších vlivů (vítr). Metoda pracuje s velmi nízkými tlakovými rozdíly a je použitelná téměř výhradně pro prostory s vyšší těsností obálky. [9]

2.2. INTERPRETACE VÝSLEDKŮ

Při měření celých objektů nebo jejich částí se v českých, ale i v převážné většině dalších evropských zemí používá jako srovnávací hodnota vzduchotěsnosti obálky budovy hodnota objemového toku přes obalové konstrukce Q [m^3/h] při tlakovém rozdílu 50 Pa. Tato hodnota bývá dále vztažena k vnitřnímu objemu měřeného prostoru (n_{50} ; [h^{-1}]) nebo k ploše obalových konstrukcí (q_{50} ; [$\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$]). Výsledkem je pak měrná veličina, kterou lze v případě vztažení k objemu nazvat násobností výměny vnitřního vzduchu při vyvolaném tlakovém rozdílu 50 Pa, v případě vztažení k ploše obalových konstrukcí ji lze nazvat průměrnou průvzdušností metru čtverečného obálky budovy. Komplexnější informaci o vzduchotěsnosti obálky budovy podává výše uvedená rovnice proudění (1) s dosazenými měřeními zjištěnými koeficienty. [2]

Při měření stavebních konstrukcí nebo stavebních prvků bývá pro hodnocení používána hodnota průvzdušnosti jednoho prvku (např. okna) při tlakovém rozdílu 50 Pa Q_{50} [m^3/h]. Při měření plošných stavebních materiálů nebo dílců bývá vztažena průvzdušnost při tlakovém rozdílu 50 Pa na plochu q_{50} [$\text{m}^3\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$], což je hodnota, která se v některých případech uvádí i při měření celých objektů. Analogicky jako u hodnocení celých budov nebo částí lze pro komplexnější popis průvzdušnosti prvku uvést empirickou rovnici proudění (1) s dosazenými měřeními zjištěnými koeficienty. [2]

Ve stavební praxi bývá spojeno testování vzduchotěsnosti s lokalizací netěsných míst. Při lokalizaci lze nalézt místo netěsnosti, avšak nelze zhodnotit absolutní vliv na výsledek testu. K průtoku vzduchu přes obálku budovy při tlakovém rozdílu dochází především v místech netěsných spojů jednotlivých stavebních dílců. Při použití netěsných stavebních dílců (OSB desky, betonové tvarovky s velkou pórovitostí atd.) může být významná také složka proudění vzduchu přes samotné stavební dílce. [10], [11]

2.3. PRŮVZDUŠNOST STAVEBNÍCH VÝROBKŮ, DÍLCŮ A JEJICH NAPOJENÍ

Celkovou průvzdušnost obálky budovy tvoří průvzdušnost jednotlivých stavebních dílců, výrobků a jejich napojení. U některých stavebních výrobků je výrobcem deklarována průvzdušnost, např. výplně otvorů a některé deskové materiály. Většina stavebních dílců však průvzdušnost deklarovanou nemá. Bez výjimky všechny výrobky mohou po zabudování vykazovat odlišné hodnoty, než které jsou deklarované a měřené v laboratorních podmínkách, a to vlivem nejrůznějších faktorů (doprava, skladování, montáž atd.). Současně nelze definovat téměř žádná reálná napojení dvou stavebních prvků opět např. vzhledem ke kvalitě provedení stavebních prací, klimatickým podmínkám v době výstavby atd. Z výše uvedeného plyne, že výslednou celkovou průvzdušnost obálky budovy nelze předem výpočtově stanovit na základě dílčích hodnot jednotlivých prvků a detailů. Obecně lze pouze usuzovat, že čím více je na stavbě detailů napojení jednotlivých vzduchotěsnících prvků a čím je větší plocha obálky, tím bude vyšší celková průvzdušnost obálky budovy. Skutečnost může být ale docela jiná, a proto nezbyvá než průvzdušnost obálky budovy, případně i jednotlivých stavebních prvků a detailů měřit přímo na stavbě.

Netěsnosti hlavní vzduchotěsnící vrstvy jsou detekovány na stavbě při měření celkové průvzdušnosti obálky budovy, která je prováděna nejčastěji metodou tlakového spádu, tj. při konstantním tlakovém rozdílu mezi exteriérem a interiérem budovy. [2] Nejčastěji se v dnešní době provádí detekce netěsností měřením rychlosti proudění vzduchu v těsné blízkosti předpokládané netěsnosti anemometrem nebo detekce proudění vzduchu kouřem, kdy se při vyvolaném podtlaku v budově v blízkosti předpokládané netěsnosti vypustí úzký proud kouře a pozoruje se, kudy kouř prochází hlavní vzduchotěsnící vrstvou. Měřicí metody jsou blíže uvedeny v následujících kapitolách. Tyto metody jsou proveditelné pouze v místech, u kterých je předpokládána netěsnost a kde je proudění vzduchu vzduchotěsnící vrstvou dostatečně rychlé. U stavebních dílců, např. u deskových materiálů, kde je proudění plochou poměrně nízké, tyto metody použít nelze. Pokud zaujímají tyto stavební dílce velkou plochu v rámci hlavní vzduchotěsnící vrstvy, může mít jejich netěsnost zásadní vliv na celkovou průvzdušnost obálky budovy. Zvýšená průvzdušnost může přinášet do konstrukce značnou vlhkost a narušit tak tepelně vlhkostní fungování obvodového pláště.

Kvantifikování průvzdušnosti stavebních dílců, výrobků a napojení měřením na stavbě není v současnosti rozšířené i vzhledem k náročnosti a nepřesnosti dostupných měřicích metod. Právě tomuto tématu, které je blíže specializováno na měření průvzdušnosti deskových materiálů na bázi aglomerovaného dřeva, je věnována tato disertační práce.

2.4. DIAGNOSTICKÉ METODY ZJIŠŤOVÁNÍ NETĚSNOSTI A MĚŘENÍ PRŮVZDUŠNOSTI STAVEBNÍCH VÝROBKŮ, DÍLCŮ A JEJICH NAPOJENÍ

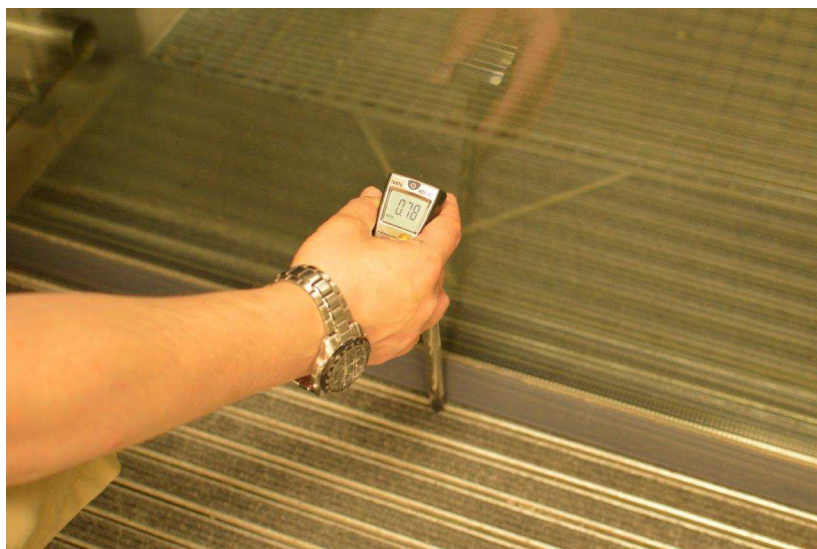
Obecně lze pro diagnostiku netěsností využít metody indikující pohyb vzduchu netěsnostmi hlavní vzduchotěsnící vrstvy objektu nebo metody, které měří průtok vzduchu daným výsekem konstrukce. V následujících kapitolách jsou uvedeny nejrozšířenější z nich.

2.4.1. Diagnostické metody pohybu vzduchu skrz vzduchotěsnou obálku

V měřeném objektu nebo jeho části je ventilátorem vytvořen tlakový rozdíl mezi interiérem a exteriérem. Přes stavební konstrukce, výrobky nebo jejich napojení začne netěsnostmi proudit vzduch ve směru tlakového spádu. Proud vzduchu je indikován různými způsoby.

Nejjednodušší metoda, která je ale velice efektivní, je detekce proudění hmatem. Při vyvolaném podtlaku uvnitř budovy měřič detekuje proudění vzduchu vlastníma rukama. Výhodou je rychlost zkoumání jednotlivých detailů, nevýhodou pak to, že proudění vzduchu nelze nijak zdokumentovat. Pro dokumentaci je vhodné použít například detekci anemometrem, který měří rychlost proudění vzduchu, viz obr. 5. Anemometr však zaznamená pouze rychlost proudění, nikoli jeho proteklý objem, a tak zobrazované hodnoty mohou být často zavádějící. Pro měření anemometrem se nejčastěji používá anemometr založený na principu měření odporu žhaveného drátku. Další metoda, která je použitelná pro znázornění proudění vzduchu skrz obálku budovy, je detekce kouřem. Pro detekci se používá kouřových tyčinek, kouřových per nebo kouřostrojů. Častěji se tato diagnostická metoda používá při vyvolaném přetlaku uvnitř budovy, kdy je k vytipovaným netěsným místům přiblížen zdroj kouře a je sledováno, kterým místem vytéká vzduch přes obálku budovy. Při bezvětří a při použití silných kouřostrojů lze použít diagnostiku i při opačném tlakovém spádu a pozorovat, kudy kouř do objektu přitéká. [1], [2]

Nevýhodou všech uvedených metod je jejich použitelnost pouze v pokročilé fázi dokončenosti obálky prostoru. Na stavbě by měly být provedeny všechny hlavní vzduchotěsnící vrstvy.



obr. 5: Detekce netěsnosti posuvných dveří za použití anemometru (archiv autora)



obr. 6: Detekce netěsností pomocí kouřostroje [2]

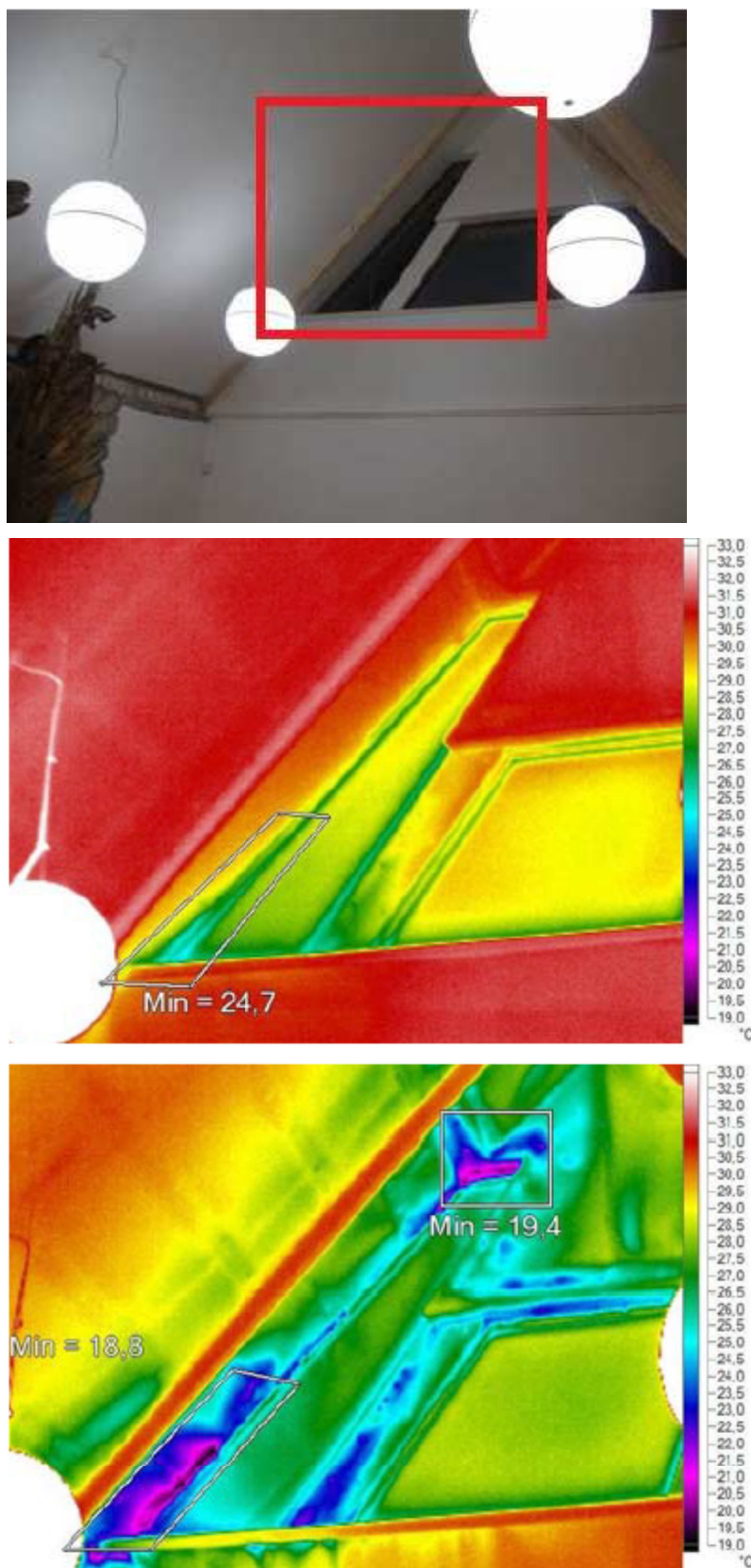
2.4.2. Diagnostika ultrazvukem

Výhodou této diagnostické metody je, že nemusí být prováděna při vyvolaném tlakovém spádu, a je jí tedy možné použít v kterékoli fázi výstavby. Metoda je založena na šíření ultrazvuku stavební konstrukcí. Na jedné straně konstrukce je umístěn vysílač ultrazvuku, na opačné straně je přijímač. Měřič posouvá přijímač kolem potenciálně netěsných míst, při zaznamenání vysílané frekvence ultrazvuku převede přijímač zvuk do slyšitelného spektra. Metoda není ve stavebnictví příliš rozšířena. [2]

2.4.3. Diagnostika termovizním snímkováním

Metoda je založena na principu vizualizace povrchových teplot konstrukcí. Termovizní snímky jsou pořízeny ve dvou krocích. V prvním kroku je nasnímkováno stávající teplotní pole zkoumaného detailu. Následně je uvnitř budovy vyvolán podtlak a po určité době jsou pořízeny snímky předemtných míst termovizní kamerou. Při zaznamenání významně snížených povrchových teplot na termovizním snímku pořízeném po vyvolaném podtlaku lze vyhodnotit daný detail jako netěsný. Vzduchotěsnost detailu je možné také vyhodnotit podle tvaru teplotního pole po vyvolaném tlakovém rozdílu. [1] Příklad změny tvaru teplotního pole detailu způsobeného prouděním chladného venkovního vzduchu je uvedený na následujícím obrázku.

Metoda je vázána na dokončenost obálky budovy, na možnost vytopení objektu a na vhodné vnější okrajové podmínky (nízké teploty, bez slunečního záření).



obr. 7: Snímky dokumentující termovizní měření shora:

- fotografie detailu připojovací spáry okna z civilního fotoaparátu
- termovizní snímek při přirozeném tlakovém rozdílu
- termovizní snímek při vyvolaném podtlaku v budově

Proudění chladného vzduchu při podtlaku uvnitř budovy vyvolává snížení povrchových teplot v místě netěsností vzduchotěsnicí vrstvy. (archiv autora)

2.4.4. Měření statickou metodou tlakového spádu

Měření je založeno na stejných principech, které jsou uvedeny v kapitole 2.1.1. Na jedné a druhé straně definovaného otvoru je měřen tlakový rozdíl. Při známém výtokovém součiniteli a dalších charakteristikách lze dopočítat proudící objem vzduchu daným otvorem. Nejčastěji je pro toto měření používáno cloněk s kruhovými otvory a kolmými hranami, výtokový součinitel takových clon je při vhodném osazení, které není ovlivněno prouděním vzduchu, roven 0,61. [2] K měřenému výseku konstrukce je vzduchotěsně připevněna těsná komora s výše uvedenou clonkou. Uvnitř budovy je vyvolán tlakový rozdíl. Během měření je zaznamenáván tlakový rozdíl mezi exteriérem a interiérem a mezi interiérem a prostředím uvnitř pomocné komory. Výsledkem měření je objemový tok, který proudí přes zkoušený výsek konstrukce. Fotografie z měření na stavbě je na obr. 8.

Metoda je vázána na dokončenost objektu nebo jeho části. Dokončenost by měla být alespoň taková, aby v interiéru bylo možné vyvolat požadovaný tlakový spád.



obr. 8: Měření průvzdušnosti okenní ventilační klapky (archiv autora)

2.4.5. Měření dynamickou metodou tlakového impulsu

Měřením výseku stavebních konstrukcí metodou tlakového impulsu se zabývá tato práce. Princip měření dílčích konstrukcí za pomoci metody tlakového impulsu je stejný jako měření celého objektu, které je popsáno v kapitole 2.1.2. K měřenému výseku stavební konstrukce je vzduchotěsně napojena těsná komora. Uvnitř komory je vyvolán tlakový rozdíl. Pokles tlakového rozdílu je zaznamenáván. Na základě exponenciální křivky poklesu tlakového rozdílu je dopočtena hodnota okamžitého objemového toku do komory nebo z komory při libovolném tlakovém rozdílu. Teoretický základ této metody popsán v kapitole 3.4. Měření na stavbě dokumentuje fotografie na obr. 9.

Metoda není limitována stavem objektu, resp. jeho dokončeností. Za pomoci této metody lze měřit například i jednotlivé stavební komponenty před zabudováním do stavby. Výhodou oproti metodě tlakového spádu je použitelnost pro konstrukce s nízkou průvzdušností.



obr. 9 Experimentální měření metodou tlakového impulsu (archiv autora)

3. TEORETICKÁ ČÁST

Pro představu nebo konstrukci výpočtů proudění tekutiny pórovou strukturou stavebního materiálu je nutné znát vlastnosti protékající tekutiny, vlastnosti pórové struktury materiálu a mechanismus pohybu tekutiny póry. Z povahy problematiky šíření tekutin v prostoru spolu s okrajovými podmínkami, které jsou v tomto případě tvořeny pórovou strukturou materiálu, vyplývá, že analytické řešení této úlohy je nereálné a numerické řešení úlohy je také velmi náročné. V následujících kapitolách se budeme zabývat jednotlivými aspekty, které vstupují do výše uvedené problematiky, avšak v současném stavu rozpracovanosti tématu nebudu uvádět jejich vliv na výsledný tok tekutiny stavebním materiálem.

3.1. VYBRANÉ VLASTNOSTI TEKUTIN

Název tekutiny souhrnně označuje plyny a kapaliny, které mají některé vlastnosti společné. Dokonalá tekutina je spojitě rozprostřená látka (kontinuum), ve které nemohou vznikat tahová napětí a smyková napětí jsou nulová. Dokonalá tekutina se tedy nebrání změně tvaru a modul pružnosti ve smyku je nulový. [12]

Reálné tekutiny mají konečný odpor ke změně tvaru reálných tekutin, který bývá nejčastěji definován chováním newtonovské viskózní tekutiny. [12]

Plyny nemají proti kapalinám definovaný objem, ten je definován objemem uzavřené nádoby. Kapaliny jsou významně méně stlačitelné než plyny. V případech, kdy nedochází k významné změně hustoty plynu, je technická praxe považuje za nestlačitelné, resp. stlačování plynů zanedbává. V praxi je tekutina považována za stlačitelnou, pokud se hustota v závislosti na tlaku mění o více než pět až deset procent. [12]

Viskozita (vazkost) tekutin je dána vnitřním třením v tekutině. Dynamická viskozita η [Pa s^{-1}] je závislá na teplotě a je určena vztahem (4). Dynamická viskozita vzduchu při atmosférickém tlaku a teplotě 0°C je přibližně $1,71 \cdot 10^{-5} \text{ Pa s}^{-1}$. [13]

$$\eta = \frac{B \sqrt{T}}{1 - C} \quad (4)$$

Tzv. kinematická viskozita [m^2s^{-1}] je definována jako následující poměr (5). Kinematická viskozita je díky závislosti na hustotě silně závislá i na tlaku [13]. Kinematická viskozita vzduchu je za atmosférického tlaku a teploty 0°C přibližně $1,33 \cdot 10^{-5} \text{m}^2\text{s}^{-1}$. [12]

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (5)$$

Stlačitelnost tekutin vyjadřuje míru stlačitelnosti, tedy poměr objemu V po stlačení tlakovým rozdílem Δp a původního objemu V_0 .

Nejčastějším plynem, který nás obklopuje v každodenním životě, je vzduch. Je tvořen jednak suchým vzduchem, jehož přibližné složení je uvedené v následující tab. 3, dále pak vodní parou a nečistotami, které ve vzduchu vytváří aerosoly. Rozměry molekul dusíku a kyslíku, které tvoří okolo 99% vzduchu, mají kinetický průměr mezi 0,2 – 0,3 nm. [16]

plyn	objemové zastoupení (%)	hmotnostní zastoupení (%)
Dusík (N_2)	78,09	75,5
Kyslík (O_2)	20,95	23,17
Argon (Ar)	0,93	1,286
Oxid uhličitý (CO_2)	0,03	0,043
Neon (Ne), helium (He), krypton (Kr), vodík (H), xenon (Xe), ozon (O_3)	stopové množství	stopové množství

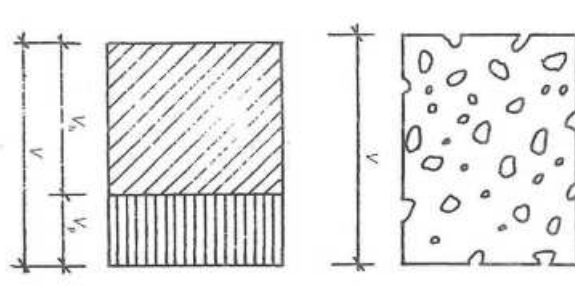
tab. 3: Chemické složení suchého vzduchu [12]

Ideální plyn je abstrakce, která uvažuje plyn jako dokonale stlačitelný a bez vnitřního tření (dokonale tekutý). Tento model lze použít za předpokladů, že částice mají mnohonásobně větší vzdálenosti než je jejich rozměr (částice lze považovat za hmotné body), částice na sebe kromě srážek nijak nepůsobí, srážky částic jsou dokonale pružné. Stavové proměnné jsou pro ideální plyn vázány stavovou rovnicí ideálního plynu (6). Pro některé případy lze abstrakci vhodně použít [12].

$$PV = n_a RT \quad , \quad m_a = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} \quad (6)$$

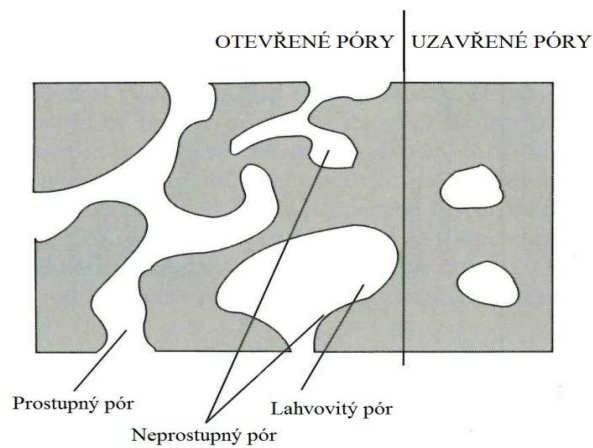
3.2. PÓROVÁ STRUKTURA STAVEBNÍHO MATERIÁLU

Běžné stavební materiály jsou protkány mnoha vzájemně propojenými póry různých rozměrů a různého tvaru. Pórovitost a charakter pórů (tvar, velikost, rozložení, materiál povrchu stěn atd.) jsou typické pro každý materiál a mají zásadní vliv na jeho makroskopické vlastnosti (např. transportní jevy ad.). Každá pórovitá látka o objemu V je složena z objemu skeletu V_h a objemu pórů V_p , viz obr. 10.



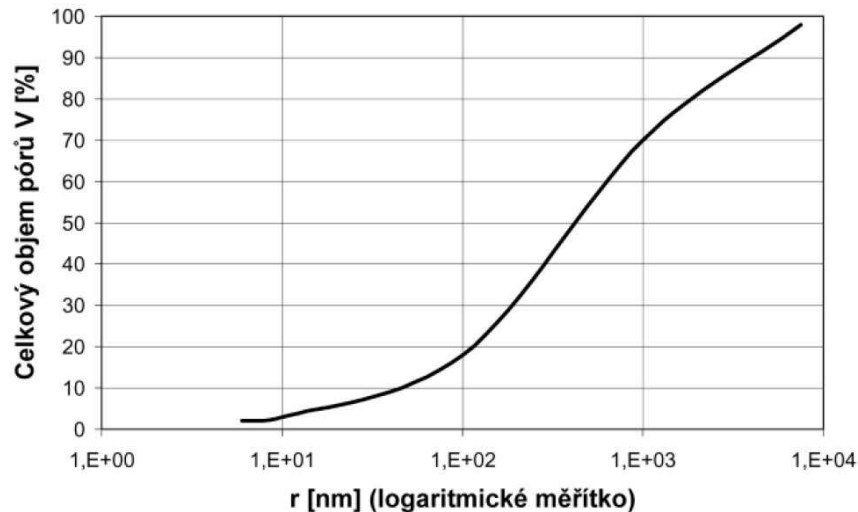
obr. 10: Objem pórů a tuhého skeletu [17]
(vlevo poměr pórů a tuhého skeletu, vpravo pórovitý materiál)

Pórovitost dělíme na otevřenou a uzavřenou. Otevřená pórovitost je objem pórů propojených s povrchem látky. Uzavřené póry jsou póry, které nejsou propojeny s povrchem tělesa a nemají vliv na transport látek v materiálu. Prostupné póry mají vliv na propustnost materiálu z jedné strany na stranu jinou [17]. Schematické znázornění typů pórů je uvedeno na obr. 11.



obr. 11: Otevřené, uzavřené a prostupné póry [18]

Při transportu materiálem sehrávají významnou roli rozměry pórů. Jejich rozdělení ve stavebním materiálu se nejčastěji určuje metodou rtuťové porozimetrie nebo měřením heliovým pyknometrem. Pórovitost zaznamenáváme do grafu jako četnost, resp. procento objemu, které póry zaujímají (např. obr. 12).



obr. 12: Grafické zaznamenání rozdělení pórů podle velikosti [19]

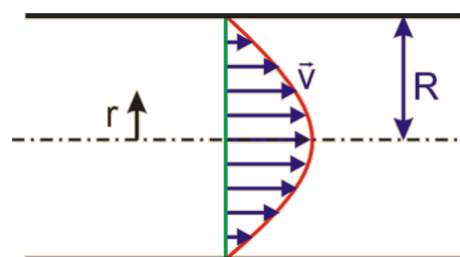
Dalšími významnými vlivy, které mají dopad na proudění plynu přes stavební materiál, je například tortuozita pórů (křivost pórů) a koeficient tření povrchu pórů.

3.3. POHYB PLYNU V PÓROVÉ STRUKTUŘE

Pro analytické řešení pohybu newtonovských viskózních tekutin, kde lze zanedbat změny hustoty tekutin, lze využít Navier-Stokesovy rovnice spolu s rovnicí kontinuity. [13] Řešení této soustavy rovnic zejména při zadání reálných okrajových podmínek, které jsou v pórové struktuře stavebních materiálů, je velmi komplikované.

Pro první přiblížení představy proudění plynu pórovým systémem stavebního materiálu uvedme parabolický zákon rozdělení rychlosti (7) [13], který platí pro proudění nestlačitelné tekutiny kruhovým průřezem. Schematické zobrazení je uvedeno na obr. 13.

$$v = \frac{p_2 - p_1}{4l\eta} (R^2 - r^2) \quad (7)$$



obr. 13: Grafické znázornění parabolického zákona rozdělení rychlosti [13]

Objemový tok tekutiny trubicí o poloměru R a délce l při tlakovém rozdílu mezi konci trubice (p_2-p_1) vystihuje Poiseuilleův zákon (8) [13].

$$Q = \frac{\pi(p_1 - p_2)R^4 t}{8l\eta} \quad (8)$$

Laminární proudění

Budeme-li uvažovat idealizovanou netěsnost ve tvaru trubice kruhového průřezu, pak touto trubicí bude při vyvolaném tlakovém rozdílu mezi jedním a druhým koncem protékat tekutina. Při laminárním proudění bude vektor jednotlivých vrstev tekutiny, různě vzdálených od středu trubky, rovnoběžný s osou proudění a jednotlivé vrstvy tekutiny se nebudou mísit. [12]

Turbulentní proudění

Při zvýšení tlakového rozdílu mezi konci netěsnosti, resp. trubice se mezi jednotlivými vrstvami kapaliny vzdálenými od středu trubice začnou vytvářet smykové síly a vrstvy kapaliny se začnou mísit. Velikost a směr vektoru rychlosti kapaliny v jednotlivých místech trubice bude kolísat, vektor tedy vždy nebude rovnoběžný s osou simulované netěsnosti. [12]

Reynoldsovo číslo

Zda v trubici nastane laminární nebo turbulentní proudění, lze stanovit dle velikosti bezrozměrného výrazu (9), který nazýváme Reynoldsovým číslem. [12]

$$Re = \frac{-u_s R}{\nu} \quad (9)$$

3.4. TEORIE MĚŘENÍ PRŮVZDUŠNOSTI METODOU TLAKOVÉHO IMPULSU

Teoretický základ měřicí metody pro tuto práci byl převzat z práce B. Mattsson a J. Claesson [8]. Metoda uvažuje vzduch jako ideální plyn. Tento předpoklad je vhodnou aproximací vzhledem k nízkým tlakovým rozdílům, se kterými se v měřicí metodě pracuje. Na úvod je nutné zavést tlakovou diferenci mezi měřeným objemem a okolním prostředím (10).

$$p(t) = P(t) - P_0, \quad P(t) = P_0 + p(t) \quad (10)$$

Dále je vhodné definovat $P = P_0 + p$ jako objemový tok $Q_a(p)$ v m^3/s resp. m^3/h a objem měřeného prostoru při tlakovém rozdílu p jako $V_a(p)$.

Rovnice ideálního plynu zapsaná dvěma způsoby je uvedena níže (11)

$$m_a = \frac{P \cdot V_a}{R_a \cdot T}, \quad \rho_a = \frac{P}{R_a \cdot T} \quad (11)$$

Pro ideální plyn, který je pro rozsah měření velmi dobrou náhradou skutečného vzduchu, platí následující vztahy:

$$c_v = \frac{5 \cdot R_a}{2}, \quad c_p = \frac{7 \cdot R_a}{2}, \quad c_p - c_v = R_a, \quad \frac{c_v}{c_p} = \frac{5}{7} \quad (12)$$

Vnitřní energie U [J] a entalpie H [J] ideálního plynu jsou pouze funkcí teploty (nezávislé na tlaku a objemu):

$$U = U_0 + m_a \cdot c_v \cdot T, \quad H = H_0 + m_a \cdot c_p \cdot T \quad (13)$$

Hmotnostní bilance

Hmota vzduchu, která je přisávána do měřeného prostoru (do komory) skrz netěsnosti za časový úsek, je rovna

$$\frac{dm_a}{dt} = \rho_a \cdot Q_{(p)} \quad (14)$$

Pokud dosadíme do této rovnice (14) za m_a rovnici (11) první část, dostaneme:

$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{P V_a}{R_a T} \right) = \rho_a \cdot Q_{(p)} \quad (15)$$

Konstantu R_a můžeme vytknout před derivací a za ρ_a dosadit podle druhé části rovnice (11), po úpravách dostáváme:

$$Q_a(p) = \frac{T}{P} \cdot \frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{P \cdot V_a}{T} \right) \quad (16)$$

Po parciální derivaci jednotlivých veličin podle času dostáváme rovnici průtoku vzduchu:

$$Q_a(p) = \frac{V_a}{P} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{V_a}{T} \cdot \frac{dT}{dt} + \frac{dV_a}{dt} \quad (17)$$

První člen rovnice týkající se poklesu tlakového rozdílu je měřený. Druhý člen, který se týká změny teploty v čase, je diskutován níže. V kapitole 8.2 jsou uvedeny výsledky z měření teplot uvnitř komory v průběhu měření a jsou diskutovány teplotní změny a tepelné toky v souvislostech prováděného měření. Poslední člen, který se týká deformace komory, lze při vhodně zvolené konstrukci měření zanedbat. Měření deformace komory je součástí této práce, jeho výsledky a vliv na měření je uveden v kapitole 8.1.

Energetická bilance

Problematickým členem rovnice (17) je druhý člen zahrnující změnu teploty vzduchu uvnitř komory. Změna teploty je velmi rychlá ruku v ruce s tlakovými změnami uvnitř komory. Navíc mezi okolním prostředím a měřeným prostorem dochází k významné výměně vzduchu. Proto je vhodné pokusit se vyjádřit druhý člen rovnice v závislosti na změně tlaku. K tomu poslouží energetická bilance.

Významnou skutečností je, že množství vzduchu uvnitř komory se mění v čase. Označme přírůstek hmoty vzduchu ve sledovaném objemu komory za časový interval dt jako dm_a . Pokud je $p > 0$ je m_a kladná, pokud je $p < 0$ je m_a záporná. Hmota, která je v komoře na konci časového intervalu dt je $m_a + dm_a$. Necht' dU je změna vnitřní energie pro celý objem vzduchu ve sledovaném otevřeném systému (včetně přísávaného vzduchu do komory) za časový úsek od t do $t + dt$. Objem vzduchu $Q_a(p) \cdot dt$ je tlačěn do komory z okolního prostředí tlakem P_0 . Dále je práce konána v rámci objemové změny komory dV vyvolané tlakem P . Do změny vnitřní energie patří také drobný tepelný tok proudící do komory přes plášť komory. Tento člen je zanedbán vzhledem k rychlosti poklesu tlaku a teploty (v řádu několika sekund).

$$dU = -P_0 \cdot Q_a(p) \cdot dt - P \cdot dV_a + \delta Q_{heat} \quad (18)$$

Označme dT změnu teploty vzduchu uvnitř komory. Změna vnitřní energie je pak závislá pouze na změně teploty. Ze vztahu (13) dostaneme:

$$dU = m_a \cdot c_v \cdot dT \quad (19)$$

Tato představa ale zahrnuje pouze změnu vnitřní energie objemu vzduchu v komoře, tj. bez změny teploty vlivem přírůstku hmoty vzduchu, která je přísáta během časového intervalu dt .

Tato korekce bude závislá na $\frac{dm_a}{dt} \cdot \frac{dT}{dt}$. Korekci lze zanedbat vzhledem k tomu, že dt^2 klesá k nule rychleji než dt .

Závislost teploty na tlaku

Do energetické bilance musíme zahrnout také drobný tepelný tok přes obálku komory. Vzhledem k rychlému poklesu tlaku v řádu několika sekund lze děj považovat za adiabatický a člen tepelného toku přes obálku komory zanedbat. Kombinací rovnice (18) a (19) dostaneme po úpravách rovnici (20). Pro zjednodušení na tento tvar je předpokládáno, že $P/P_0 = 1$. Vzhledem k rozsahu tlakové diference, která při měření nastává, je toto zjednodušení velmi dobře použitelné. Nejistotě měření, kterou přináší toto zjednodušení, je věnována kapitola 7.5.

$$Q_a(p) + \frac{dV_a}{dt} = \frac{-m_a \cdot c_v}{P} \cdot \frac{dT}{dt} \quad (20)$$

Levá strana uvedené rovnice (20) je rovna prvním dvěma členům na pravé straně rovnice (17). Pokud dáme do vztahu rovnice (17) a (20), dostáváme vztah mezi derivací P a T . Pak prostřednictvím úprav s využitím levé části vzorce (11) a třetí rovnice vztahů (12) můžeme psát:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{\rho_a \cdot c_p} \cdot \frac{dP}{dt} \quad (21)$$

Nakonec můžeme dosadit rovnici (21) do členu, který se týká teplotní změny v rovnici (17). Pokud využijeme úpravy levé části vzorce (11) a čtvrtého vztahu (13), můžeme zapsat tvar rovnice (22), který je závislý pouze na změně tlaku a objemu, resp. deformaci komory.

$$Q_a(p) = -\frac{V_a}{P} \cdot \frac{c_v}{c_p} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{dV_a}{dt} \quad (22)$$

Deformaci pláště komory lze vhodným návrhem měřicího zařízení úspěšně eliminovat, a tedy zanedbat. Této problematice je věnována kapitola 8.1.

4. OSB DESKY

Jak již bylo zmíněno v úvodu, vyvíjená metoda je cílena na použití pro měření OSB (Oriented Strand Board) desek, které jsou asi celosvětově nejrozšířenějším konstrukčním deskovým materiálem na bázi dřeva. Počátky komerčního použití desek sahají do 70. let 20. století, kdy byly rozšířeny v Severní Americe. Nalezneme je na stavbách po celém světě. OSB se používají v různých tloušťkách a formátech, s drážkou i bez ní, s různou povrchovou strukturou. Použití je široké – od klasického umístění ve svislých nosných konstrukcích jako zavětrovací desky, přes nosné desky stropních a střešních konstrukcí až po funkci parobrzdnou v difuzně otevřených systémech [20]. Právě s posledně zmíněným použitím jsou úzce svázány požadavky na vzduchotěsnost materiálu.

Podle ČSN EN 300 se OSB desky dělí podle označení na: [21]

OSB/1 – pro všeobecné použití v suchu, nábytek, vnitřní vybavení

OSB/2 – pro nosné prvky v suchu, montované stavby, vnitřní stěny

OSB/3 – pro nosné prvky ve vlhkém prostředí

OSB/4 – zvláště zatížitelné nosné desky, pro použití ve vlhkém prostředí

Ve stavební praxi a stavebninách se dnes setkáváme téměř výhradně s deskami OSB/3 a OSB/4, přičemž lépe dostupné jsou desky třídy 3. Vlastnosti desek se mohou značně různit podle tloušťky, použitých vstupních surovin a technologie výroby, ta je popsána v následujícím odstavci. Tato práce se zaměřuje na vzduchotěsnost neboli naopak jejich průvzdušnost. Plošná průvzdušnost desek je výrobcí udávána pouze u výrobků předurčených právě do pozice vzduchotěsné vrstvy, např. OSB4 výrobce EGGER (viz kapitola 6.1, tab. 6), OSB Airstop výrobce KRONOSPAN (viz obr. 14). Různá povrchová struktura desek, které byly použity v experimentální části, je zachycena na obrázcích v kapitole 6.1.



obr. 14: Deska KRONOSPAN OSB3 Airstop. Na jednu stranu desky je nanesena speciální vzduchotěsná fólie [22]

Vnitřní struktura materiálu je pórovitá. Dutiny v materiálu jsou v návaznosti na štěpkový skelet převážně ostrohranné. Úměrně k poměru lepidla a štěpků je větší nebo menší část pórů vyplněna lepidlem. Větší štěrky jsou nositelem pevnosti materiálu, menší třísky vyplňují pórovitou strukturu, zvláště pak ve středu tloušťky desky, kde jsou použity ve větším množství. Desky jsou obecně poměrně náchylné k bobtnání ve vlhkém prostředí. [23]

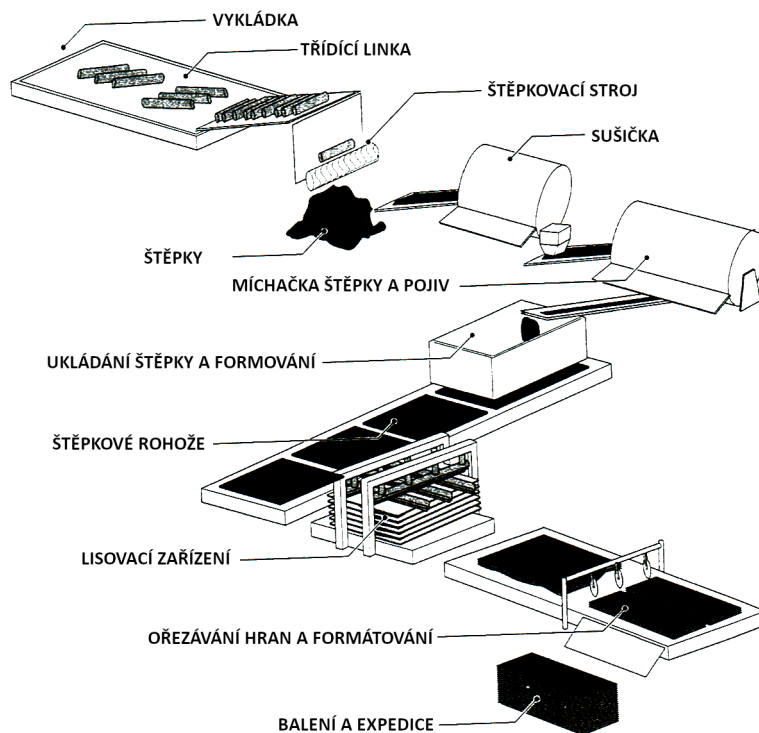
4.1. VÝROBA OSB DESEK [23]

OSB desky jsou vyráběny ze štěpků rychle rostoucích tvrdých, nebo i topolových dřevin, které jsou lepeny za tepla a předepsaného lisovacího tlaku fenolformaldehydovými a/nebo lepidly polyuretanovými MDI (methylen difenyl diisokyanát). Desky lepené MDI lepidly nesou často označení ECO. Typicky jsou OSB desky tvořeny třemi vrstvami s ortogonální orientací štěpek. Povrchové vrstvy desek mají větší procento štěpek orientovaných v podélném směru desky, štěrky ve střední vrstvě jsou orientovány kolmo na podélný směr, nebo jsou uspořádány náhodně. Poměr mezi středovou a povrchovými vrstvami je přibližně 60:40 až 40:60. Štěpky mají přibližně tyto rozměry: 0,8 mm/ 13 mm/ 100 mm (tloušťka/ šířka/ délka).

Čerstvě skácené kmeny jsou ponořeny do tanků s teplou vodou, aby byl omezen počet nevhodně velkých třísek a jemných kusů. Následně jsou kmeny strojně odkorněny a rozštěpkovány. Vzniklá směs je tříděna podle velikosti. Nevhodně velké třísky a jemné kusy jsou odstraněny. Někdy bývají jemnější částice použity se směsí lepidla do střední vrstvy desek. Použití určitého počtu jemných částic v deskách může být výhodné, jemné částice vyplní větší dutiny vznikající mezi štěrky, což vede k nižšímu rozptylu hustoty desek. Štěpky jsou následně sušeny ve válcové sušičce na vlhkost 3-7 % hmotnostní vlhkosti. Po vysušení

jsou štěrky smíchány s lepidly. V některých případech jsou povrchové vrstvy desek smíchány s fenolovými lepidly a střední vrstva s MDI lepidly, a to proto, že MDI lepidla potřebují kratší čas pro vytvrzení, ale lepí se i na kovové povrchy. Některé závody produkují desky lepené pouze MDI lepidly. V těchto provozech jsou pak speciální kontinuální válcové lisy. Poměr lepidel a výrobní technologie je různá podle jednotlivých výrobců. Typicky tvoří lepidla 2 – 2,75 % hmotnosti desky. Někdy bývá při výrobě používán horký vosk v objemu přibližně 1,5 % hmotnosti desky pro zlepšení odolnosti proti vodě a pro redukci bobtnání. Takto upravené štěrky jsou strojně uspořádávány a uloženy do rohoží. Rohože jsou lisovány za tepla. Desky plošných lisů nebo válce válcových lisů jsou vyhřívány a předávají teplo vedením do lisované desky. Vlhkost v povrchových vrstvách desek se vlivem zahřátí mění na vodní páru, která migruje směrem do středové vrstvy, kde přispívá k jejímu vytvrzení. Vzhledem k výrobnímu procesu není hustota desky v průřezu desky stejná, zvláště pak při větších tloušťkách desky. Hustota povrchových vrstev může mít hustotu i 130 % a středová vrstva 70 % z průměrné hustoty celé desky. Po lisování jsou desky uskladněny v teple po dobu cca 24 hodin, aby dobře vytvrdla použitá lepidla. Následně jsou desky řezány na potřebné rozměry.

Kvalita desek záleží na kontrole výrobního procesu. Nejdůležitějšími faktory jsou: třídění druhu dřeva, jeho velikost a vlhkost; velikost, kvalita, rozměry a vlhkost štěpek po vysušení; konzistence směsi štěpek lepidel a vosku; orientace štěpek na rohoži; teplota, lisovací tlak a doba lisování; kontrola kvality povrchu desek a jejich okrajů. Desky jsou vyráběny s hmotnostní vlhkostí přibližně 5 %. Povrch OSB desek je u desek pro pohledové použití broušen. Proces výroby OSB desek je graficky zpracován na obr. 15.



obr. 15: Výroba OSB desek [23]

5. VÝVOJ MĚŘICÍ SESTAVY

Motivací pro vývoj měřicí sestavy bylo měření vzduchotěsnosti několika rodinných domů s hlavní vzduchotěsnicí vrstvou z OSB desek eurostandardu 3. Na objektu i po zevrubné kontrole nebyly detekovány žádné významné netěsnosti v napojení obvodových konstrukcí nebo jednotlivých desek, ale byla měřena poměrně vysoká hodnota celkové průvzdušnosti obálky budovy. Vzhledem k naměřené netěsnosti nemohla stavební firma stavbu bez sankcí předat investorovi. Netěsnost desek byla experimentálně ověřena přilepením plastové fólie na plochu OSB desky. Po vytvoření podtlaku v budově se začala fólie nafukovat a přebírat tak vzduchotěsnicí funkci skladby v testovaném místě. Do fólie pak byl vyříznut otvor a za pomoci anemometru byla zdokumentována rychlost proudění vzduchu vytvořeným otvorem - obr. 16. Výstupem z měření bylo doporučení nátěru stavebních desek latexovým nátěrem. Po natření 2 vrstvami latexového nátěru klesla celková průvzdušnost obálky budovy pod požadovanou hodnotu $1,0 \text{ h}^{-1}$ při tlakovém rozdílu 50 Pa.



obr. 16: Měření rychlosti proudění vzduchu na výtokovém otvoru z plastové fólie přilepené na vzduchotěsnicí OSB desce objektu při vyvolaném podtlaku v interiéru, měřená hodnota 2,62 m/s (archiv autora)

Z provedeného měření je zřejmé, že by bylo vhodné umět měřit průvzdušnost stavebních konstrukcí v ploše. Tato průvzdušnost je poměrně malá, ale vzhledem k velké ploše stavebních konstrukcí, může při současných požadavcích na vzduchotěsnost obálky budovy hrát významnou roli. Výhodou by bylo použít princip měření, který by byl proveditelný ještě před stavbou budovy, například bezprostředně po závozu stavby stavebním materiálem, který by měl plnit vzduchotěsnicí funkci obvodového pláště. Výše uvedené předurčilo jako vhodný princip měření metodu tlakového impulsu.

V návaznosti na výše uvedenou motivaci bylo vyvíjeno měřicí zařízení, které bylo postupně optimalizováno. Uvedené pořadí sleduje časovou posloupnost myšlenkových pochodů a úprav zařízení.

5.1. TESTOVACÍ SADA I (TS I)

První testovací sada byla sestrojena v co nejjednodušší verzi, aby zahrnovala běžně dostupné komponenty pro měřiče z oboru vzduchotěsnosti. Měřicí komora se skládala z trubních komponentů, které se ve stavební praxi běžně používají pro vedení kanalizace. Materiálově jde o trubky z neměkčeného PVC. Konkrétně byla použita tvarovka přesuvky a tvarovka víčka jmenovité světlosti DN 200. Pro první pokusy byla použita pro tlakování, resp. evakuaci vnitřního objemu vzduchu hustilka s klasickým a otočeným vzduchovým pístem. Pro připojení mikromanometru byla použita silikonová hadička, na které byl osazen zpětný ventil proti přisávání vzduchu přes tlakovací trubici v době poklesu tlaku v komoře. Pro měření poklesu tlaku v komoře byl použit digitální diferenční mikromanometr značky INFILTEC, který je používán v sadě pro měření celkové průvzdušnosti obálky budovy. Použitý mikromanometr má rozlišitelnost 0,05 Pa, vzorkovací frekvenci 1 s a rozsah 0-550 Pa, při prvních měřeních nebyl používán záznamník zařízení.

S touto sadou byla provedena řada experimentálních měření, kdy byl sledován pouze čas poklesu tlaku z 550 Pa pod 50 Pa. Výsledky byly mezi sebou pouze porovnávány, na základě porovnání pak bylo stanoveno, který vzorek je pravděpodobně těsnější. Z provedených měření nebyla vypočtena hodnota objemového toku. V průběhu měření a po diskusi výsledků měření bylo odhaleno několik obtíží a chyb principu měření:

- vyvolaný tlakový impuls byl významně mimo rozsah měřicího zařízení,
- při vytvoření přetlaku vzniká tah na připojovací spáře mezi měřeným materiálem a měřicí komorou a komora se od podkladu několikrát od foukla,
- pro možnost stanovení objemového toku při určitém tlakovém rozdílu je nezbytné použít měřicí zařízení se záznamem měřených hodnot,
- je potřeba měřit i absolutní tlak, nejen pouze tlakovou diferenci.

5.2. TESTOVACÍ SADA II (TS II)



obr. 17: Testovací sada TS II (archiv autora)

Nejvýznamnější změnou oproti původní TS I bylo nahrazení zařízení pro měření a záznam poklesu tlaku za digitální mikromanometr Altis v4+. Měřidlo bylo umístěno přímo do měřicí komory, z ní je vyveden datový kabel USB a napájecí elektrický kabel. Výhodou mikromanometru je vyšší vzorkovací frekvence, současné měření atmosferického tlaku a vhodnější rozsah měřidla. Použitému zařízení je věnována kapitola 5.2.1. Měření s touto sestavou byla z důvodu rizika odfouknutí komory od vzorku prováděna pouze podtlakem. Sestavená testovací sada TS II je na fotografii obr. 17.

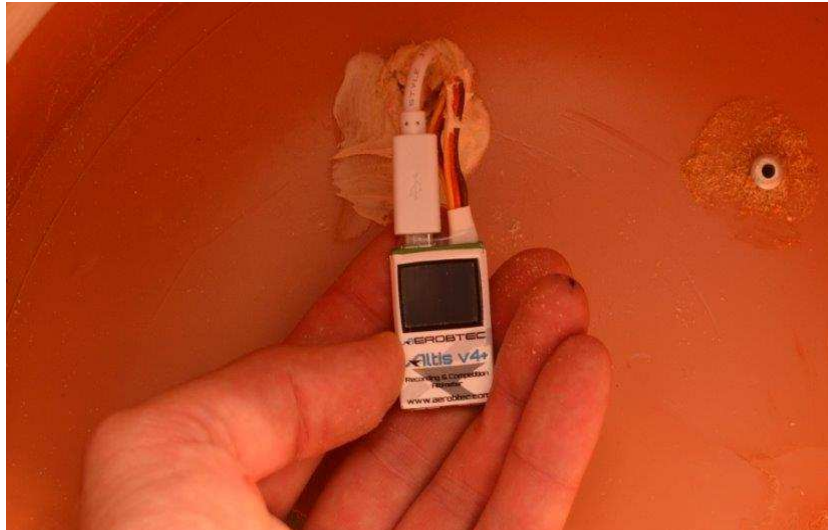
5.2.1. Altis v4+

Přístroj vyvinula a vyrábí bratislavská firma Aerobtec, jeho fotografie je na obr. 18. Cena se pohybuje okolo 1 500 Kč a činí tak celé zařízení velmi cenově atraktivním.

AerobTec Altis v4+ je barometrický výškoměr, navržený speciálně na zaznamenávání výšky RC modelů letadel s doplňkovými funkcemi pro modelářské soutěže. Vyznačuje se velmi malými rozměry a nízkou hmotností. Funguje tak, že snímá atmosférický tlak v aktuální výšce a na jeho základě vypočítá odpovídající výšku modelu. Tu následně ukládá do své vnitřní paměti. Výškoměr je vybavený pro připojení k počítači s operačním systémem Windows (XP nebo vyšší) přes USB port. Dodávaný program slouží na stahování naměřených dat, jejich uložení a zpracování. Kromě toho umožňuje jejich zobrazení v přehledných grafech. [24]

Altis v4 používá moderní rychlý digitální senzor tlaku Bosch BMP280, který pracuje na principu piezoelektrického tenzometru. Ten umožňuje snímat nepatrné změny tlaku, které odpovídají rozlišení výšky s přesností pod 0,5 m (při periodě vzorkování 0,1 s). Obrázek mikromanometru včetně rozměrů je uveden na obr. 19. Atmosférický tlak se časem mění a tyto změny ovlivňují i měření výšky. To je důvod, proč se při dlouhodobých měřeních může

objevit odchylka od skutečných hodnot. Pro krátké doby měření, typické pro pokles tlakového rozdílu uvnitř komory, je obvykle dosahovaná přesnost velmi vysoká. Změřené údaje se ukládají do vnitřní paměti s velkou kapacitou, což umožňuje asi 15 hodin záznamu při nejrychlejším vzorkování (0,1 s). Po zapnutí je výškoměr ve fázi inicializace, která trvá asi 3s. Během této fáze se měří referenční výška. [24], [25]



*obr. 18: Měřicí zařízení AerobTec Altis v4+ použité pro měření tlaku uvnitř komory
(archiv autora)*



obr. 19: Snímač Bosch BMP280 [26]

Pro stažení zaznamenaných dat z výškoměru do počítače nebo změnu jeho nastavení se používá standardní USB kabel. Pro zpracování naměřených dat a změnu nastavení je třeba mít nainstalovaný program Altis Flight Manager (AFM). To je počítačový program pro Windows, který slouží pro komunikaci s výškoměrem Altis v4 a na zobrazení a zpracování jimi naměřených dat. Aktuální verze je dostupná na www.aerobtec.com/support/download/. Pro ilustraci je přiložen obr. 20, na kterém je patrný záznam výšky letu RC modelu letadla. Výstup

z tohoto softwaru je v této práci využit několikrát, slouží pro ilustraci tlakových poměrů uvnitř komory v průběhu měření. Na svislé ose je ale vzhledem k primárnímu použití uvedena relativní výška, ta je softwarem převáděna z měřených hodnot absolutního tlaku za použití následujícího vztahu [31], kde veličiny s indexem 00 jsou standardní hodnoty ve výškové úrovni na hladině moře.

$$p = p_{00} \left(1 - 0,0065 \frac{h}{T_{00}} \right)^{5,2561} \quad \text{kde } p_{00} = 101325 \text{ Pa}, T_{00} = 288,15 \text{ K} \quad (23)$$



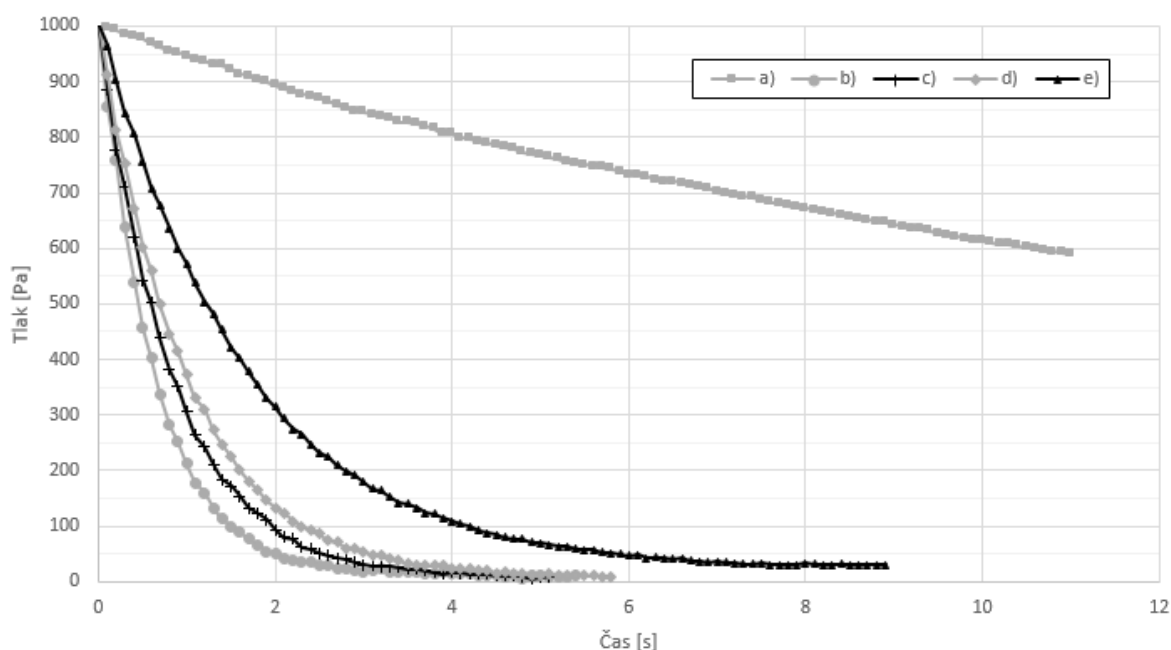
obr. 20: Záznam výšky letu modelu RC letadla, na svislé ose je uvedena jeho relativní výška. Pilot vypíná motor ve výšce 29,6 m (první peak), poté hledá termiku, zprvu marně. Klesá až do výšky cca 15 m. Po minutě od startu nachází stoupavý proud vzduchu a získává výšku 90 m. Stoupák se rozpadá, hledá dál, v čase 5:00 nachází další stoupák, ve kterém dokrouží až do výšky přes 150 m. Následuje opět klesání v nepříliš dobrém vzduchu, ale ve výšce kolem 50 m nachází tzv. nulku (vzduch mírně stoupá, letoun se drží zhruba v konstantní výšce). Následuje sestup na přistání, aby pilot nepřekročil časové okno 10 minut, které má vymezené na let.

5.2.2. Provedená měření na TS II

Pomocí této sady byla testována OSB deska s různým opracováním ploch, přes které by mohl unikat vzduch mimo měřenou plochu. V rámci měření byla sledována pouze změna tlaku uvnitř komory. Nebyl dopočítáván objemový tok vzduchu, metoda sloužila pouze pro porovnání těsnosti jednotlivých materiálů, resp. řešení připojovací spáry a míry vlivu bočních cest na rychlost změny tlaku uvnitř komory v průběhu měření. Na následujícím obr. 21 a obr. 22 jsou ukázány zkoumané varianty opracování ploch měřené OSB desky. Měření bylo prováděno jako primární měření v návaznosti na výzkum vlivu bočních cest (viz kapitola 8).



obr. 21: Úpravy měřeného vzorku OSB desky s povrchovou úpravou z nakaširovaného kartonu (zleva a) ze strany nakaširovaného papíru, b) ze strany bez povrchové úpravy, c) ze strany bez papíru + akrylátový nátěr z přilehlé strany desky okolo přisazené komory, d) DTTO + zatření hrany desky akrylátovým tmelem, e) DTTO + druhá vrstva akrylátového nátěru z přilehlé strany okolo přisazené komory



obr. 22: Pokles tlakové diference uvnitř komory při různém způsobu opracování desky, legenda viz předchozí obrázek

ze strany:	s nakaširovanou celulózou	ze strany bez povrchové úpravy			
úprava:	bez úpravy (a)	bez úpravy (b)	1x nátěr z přilehlé strany (c)	1x nátěr z přilehlé strany, tmelené hrany (d)	2x nátěr z přilehlé strany, tmelené hrany (e)
čas poklesu tlakového rozdílu z 1000 - 50 Pa [s]	102,3	2,1	2,6	3,7	5,5

tab. 4: Doba poklesu tlakového rozdílu uvnitř komory z 1000 na 50 Pa

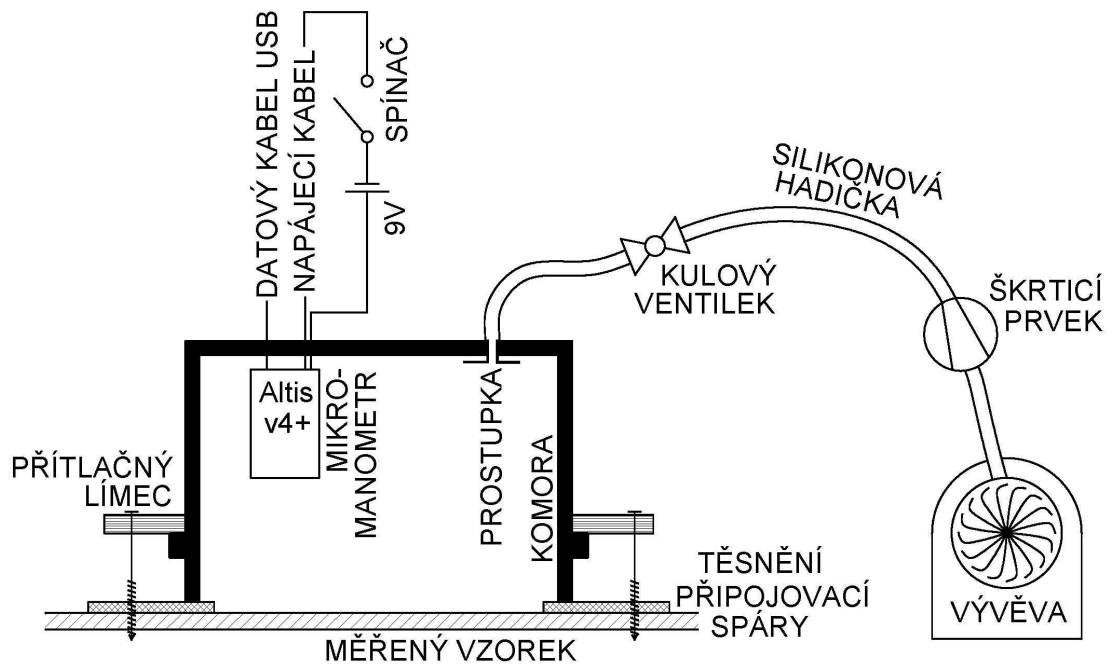
Po provedení těchto měření a po dalším studiu teoretického základu a dostupných zdrojů byly zjištěny některé nedostatky stávající měřicí sestavy TS II:

- jednorázová změna tlaku vyvolaná hustilkou nedosáhne ustáleného stavu tlakového stavu před uzavřením nasávací trubice,
- zpětný ventil nevykazoval konzistentní těsnost při různých tlakových rozdílech, při nižších tlakových rozdílech byla těsnost nižší,
- komora na vzorku nebyla dostatečně fixována, měření např. na stěně budovy by nebylo realizovatelné.

5.3. TESTOVACÍ SADA III (TS III)

Proti stávající sadě TS II byl kolem hrdla komory vytvořen dřevěný přítlačný límec, pro přítlačení měřicí komory k měřenému vzorku z důvodu snížení rizika vzniku netěsností na přípojovací spáře. Dále byla hustilka nahrazena elektrickou vývěvou s pěti výkonnostními stupni (běžný domácí vysavač). Výhodou je, že vysavač umožňuje dosažení ustáleného tlakového spádu před uzavřením komory, nevýhodou, že testovací sada neumožňuje měření přetlakem. Měření přetlakem ale bylo vyloučeno i vzhledem ke zvýšení rizik vzniku netěsností v přípojovací spáře a od fouknutí komory. Současně vzhledem k vysokému výkonu vývěvy byl na silikonovou hadičku osazen škrticí prvek, aby v komoře mohl být regulován maximální tlakový rozdíl při ustáleném tlaku. Poslední úpravou byla náhrada nekonzistentně těsného zpětného ventilku za mechanický kulový kohoutek s vysokou těsností. Pro možnost využití měřicí komory i pro měření průvzdušnosti desky metodou tlakového spádu byla do víka komory vlepena clona z nerezové oceli tl. 1 mm, do které byly laserem vypáleny kruhové otvory s průměry 2, 3 a 4 mm.

Schéma měřicí sestavy je uvedeno na obr. 23, sestavená testovací sada je zachycena na fotografii.



obr. 23: Schéma měřicí sestavy TS III



obr. 24: Měřicí sestava TS III

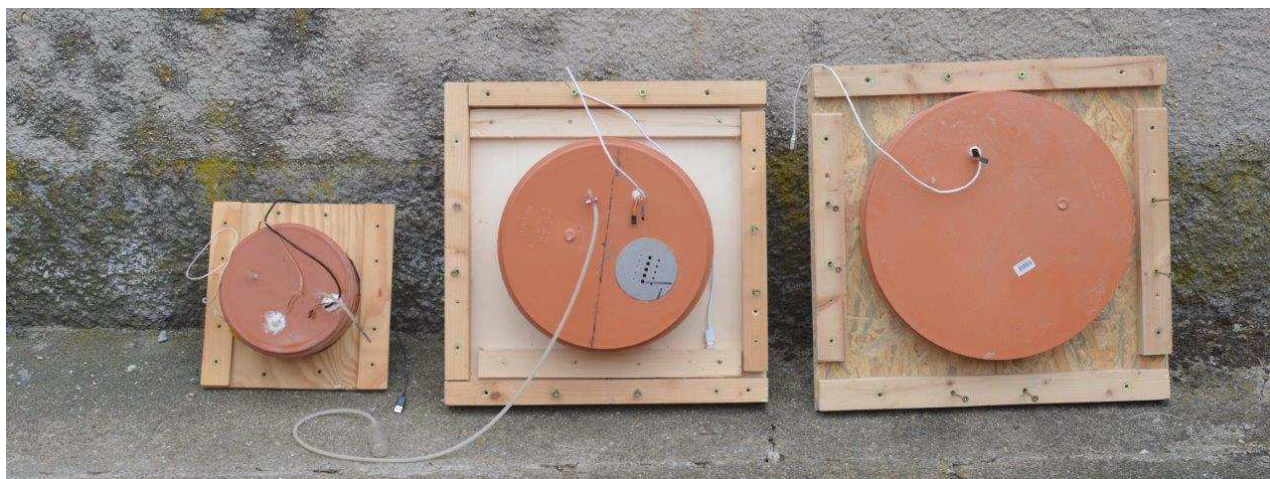
5.4. OPTIMALIZACE TESTOVACÍ SADY III

Podle teoretických předpokladů by byla nejvíce vhodná komora tvaru polokoule, která by jistě vykazovala nejnižší deformace a přinášela nejmenší chybu výsledků. Ideálně by také měřicí komora měla mít co největší průměr, to by vedlo k největší měřené ploše vzorku. Pak by také byl příznivý poměr obvodu ku ploše vzorku, což by minimalizovalo vliv bočních toků vzduchu. Současně by komora měla mít vhodný poměr objemu ku ploše zkoušeného vzorku, aby byl pokles tlaku pokud možno co nejpomalejší. Tuhost pláště komory by měla být co nejvyšší a současně by měla mít nezanedbatelný tepelný odpor. Tím by bylo dosaženo eliminace deformace objemu komory v závislosti na tlakovém rozdílu a možnosti zanedbání změny teploty vlivem prostupu pláštěm komory, které se podle kapitoly 3.4 zanedbají. V neposlední řadě by se se zkušební komorou mělo dobře manipulovat, což vede k požadavku nízké hmotnosti.

Z dostupných materiálů byla nejprve sestavena komora z neměkčeného PVC vnitřní světlosti 200 mm, vnitřní hloubky 213 mm, tloušťka stěny 4,9 mm. Tuhost použitých trub je charakterizovaná výrobcem deklarovanou kruhovou pevností SN41. Následně byly sestaveny ještě dvě obdobné komory ze stejného materiálu (neměkčené PVC). Jedna s vnitřní světlostí 315 mm, vnitřní hloubky 297 mm a tloušťkou stěny 7,7 mm, druhá s vnitřním průměrem 400 mm, vnitřní hloubkou 244 mm a tloušťkou stěny 9,8 mm. Vlastnosti jednotlivých zkušebních komor jsou přehledně formulovány v tab. 5, vlastnosti byly zjištěny měřením na konkrétních výrobcích. Sestavené komory jsou na obr. 25. S měřicími komorami bylo provedeno několik experimentů zaměřených na boční proudění mimo zkoušenou plochu desek. Jako nejvhodnější pro měření se, vzhledem k vhodnému poměru plochy ku objemu, vzhledem k těsnosti a vzhledem k dobré manipulaci s komorou, jeví zkušební komora s vnitřním průměrem 315 mm, na které byla provedena řada navazujících testovacích měření.

označení	průměr hrdla[mm]	hloubka[mm]	tloušťka stěny[mm]	vnitřní objem[cm ³]	volná plocha hrdla [cm ²]	obvod hrdla [cm]	hmotnost zařízení [kg]
d200	201	213	4,9	6663	317,9	63,2	2,2
d315	317	297	7,7	22904	789,2	99,6	8,1
d400	401	244	9,8	31128	1262,9	126	11,7

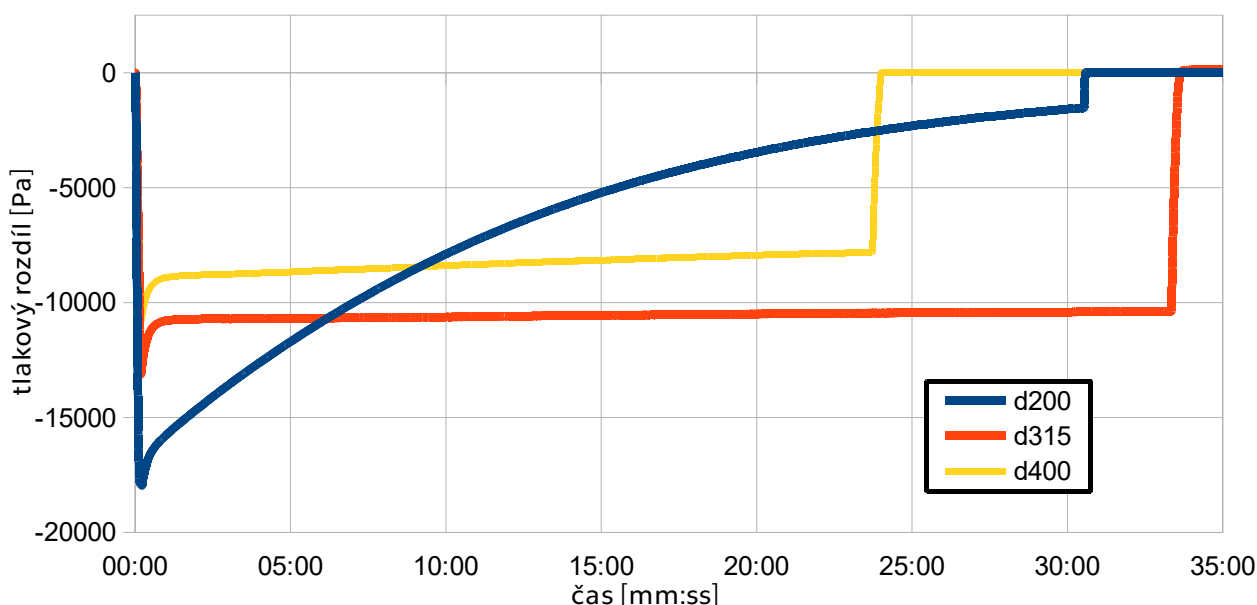
tab. 5: Vlastnosti sestavených měřicích komor



obr. 25: Sestavené měřicí komory

5.5. TĚSNOST MĚŘICÍCH SESTAV

Těsnost jednotlivých měřicích sestav byla experimentálně zjišťována záznamem změny tlakového rozdílu uvnitř měřicí komory přisazené přes lepidlo na laminátovanou dřevotřísku tloušťky 4 cm. Pokles tlakového rozdílu uvnitř sestavených zařízení je zaznamenán na následujícím obr. 26. V první fázi po vytvoření podtlaku a uzavření ventilu je pokles tlaku způsoben pravděpodobně zvýšením teploty vlivem prostupujícího tepla pláštěm zkušební komory. V lineární části grafu je pokles tlaku způsoben netěsností komory. Je nutné upozornit, že vzhledem k vysokému výkonu vývěvy a vysoké těsnosti komory byl uvnitř měřeného prostoru velmi vysoký podtlak cca 15 kPa. Běžně při zkoušení se tlakový rozdíl pohybuje do 1000 Pa.



obr. 26: Tlakové změny uvnitř komor během zkoušky těsnosti komor (v první fázi rychlé vytvoření tlakového rozdílu odsátím vzduchu, v maximu uzavření ventilu, první rychlejší fáze relaxace vyvolaná prostupem tepla skrz plášť komory, druhá fáze pomalejší relaxace způsobená netěsnostmi, zlom směrem k nule je následek otevření ventilu)

6. VÝVOJ OSAZENÍ VZORKU

Vzhledem k citlivosti metody, která pracuje s velmi malými tlakovými rozdíly a současně s velmi malými objemovými toky, je nutné co nejvíce eliminovat případné negativní vlivy. Význam negativních vlivů byl zjišťován experimentálně. V následujících kapitolách jsou popsány a dokumentovány vlivy, které mají větší či menší vliv na výsledek měření. U jednotlivých vlivů jsou také uvedeny pokusy, které byly provedeny z důvodů bližšího poznání konkrétních vlivů.

6.1. POUŽITÉ DESKY

Pro měření byly použity tři druhy desek s různou tloušťkou i dalšími vlastnostmi. Jejich popis je uveden v následující tab. 6, pohled na povrchovou strukturu desek je pak uveden na obr. 27 až obr. 29. Desky ze stavby prošly všemi klimatickými vlivy, které během stavby působí, často nemusí být desky ideálně skladované atd. Současně obě desky byly získány ze stavby, kde vycházela nadlimitní hodnota celkové průvzdušnosti obálky budovy.

deska	KRONOSPAN OSB3	EGGER OSB3 EKO	EGGER OSB4 TOP
tloušťka deklarovaná [mm]	12	15	15
tloušťka skutečná [mm]	11,7	15,3	15,8
propustnost vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa [$\text{m}^3/\text{m}^2\text{h}$]	-	$0,5 \pm 0,15^*$	$\leq 0,12^{**}$
pevnost v ohybu [MPa]	16,4	≥ 20	≥ 33
tloušťkové bobtnání (24 h) dle EN 317	15%	$< 15\%$	$< 10\%$
stav	ze skladu stavebnin	ze stavby nezabudovaná	ze stavby nezabudovaná

* není deklarovaná v prohlášení o vlastnostech, uvedená hodnota dle vyjádření výrobce

** v prohlášení o vlastnostech hodnota deklarovaná pouze pro tloušťku ≤ 12 mm (možná jde o chybu POV)

tab. 6: Klíčové vlastnosti použitých OSB desek [27], [28], [29]



obr. 27: Deska KRONOSPAN OSB3



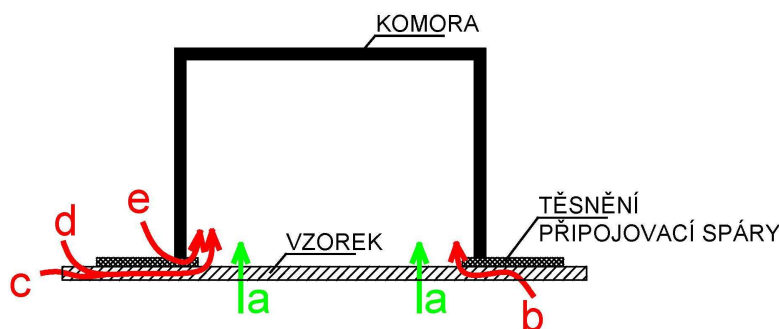
obr. 28: Deska EGGER OSB3 EKO



obr. 29: Deska OSB4 TOP

6.2. OSAZENÍ MĚŘICÍ SESTAVY A BOČNÍ TOKY VZDUCHU

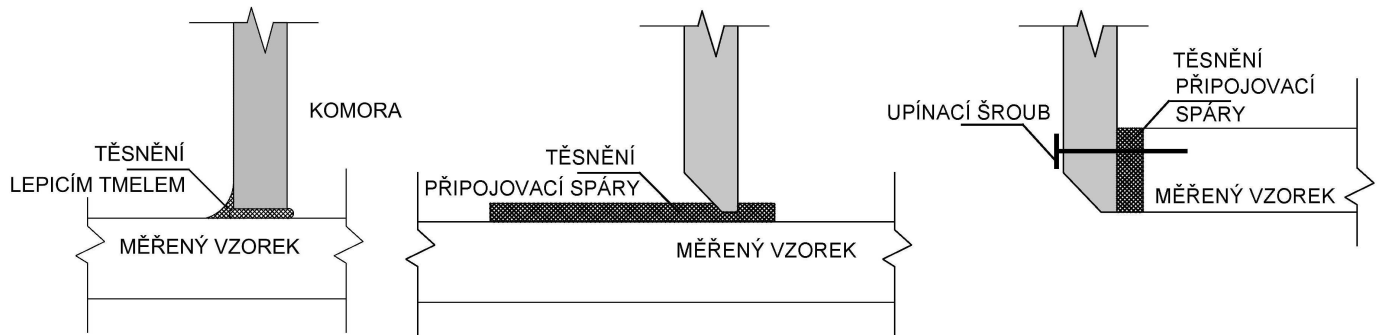
Osazení měřicí komory na měřený vzorek může zásadním způsobem ovlivnit výsledek měření. Netěsnosti v připojovací spáře mohou při chybném osazení násobně překročit netěsnosti měřeného vzorku. Současně další boční cesty toku vzduchu mohou mít významný vliv na výsledek, viz obr. 30. Proto byla osazení měřicí sestavy věnována velká pozornost. Bylo navrženo několik pokusů, které ověřují použitelnost navrženého osazení a míru jeho vlivu na výsledek.



*obr. 30: Hledané a zkrslující toky vzduchu
(a – hledaný objemový tok, b,c,d - boční objemové toky, e – objemový tok přes netěsnost přípojovací spáry)*

Obecně je na osazení měřicí komory kladeno několik nároků, které plynou z teoretického základu a reálného provádění měření. Těsnění přípojovací spáry by mělo být ideálně dotěsněno jak na měřený vzorek, tak na měřicí komoru. Těsnění by mělo být po osazení komory co nejméně stlačitelné, aby nedocházelo ke zkreslení vlivem deformace vnitřního objemu komory. Aby mohla být metoda měření použitelná v praxi, je nutné opravit přípojovací spáru přímo na stavbě, a to nejlépe těsně před provedením samotného měření tak, aby nebylo nutné měření provádět např. s dlouhou technologickou pauzou po přípravě podkladu nebo oprávnění přípojovací spáry. Přípojovací spára by měla být opravena za pomoci běžně dostupných materiálů a technologií.

Osazení vzorku vůči komoře lze provést v zásadě dvěma způsoby. Prvním způsobem je přisazení komory k měřenému vzorku, tento způsob osazení označme EX. Druhým způsobem je vsazení měřeného vzorku do hrdla měřicí komory, tento způsob označme IN. Použitá osazení vzorku dokumentuje obr. 31 a fotografie z provedených měření na obr. 32 až obr. 35. Každá možnost nese výhody i nevýhody. Nespornou výhodou osazení EX je nedestruktivní použitelnost na stojící stavbě, jednodušší opracovatelnost přípojovací spáry, jednodušší odsazení komory po ukončení měření a nižší riziko deformace objemu komory vlivem deformace přípojovací spáry. Nevýhodou je pak téměř nemožná eliminace některých bočních toků, např. viz obr. 30 b), c). Výhody a nevýhody osazení IN jsou v podstatě inverzní. U osazení IN je nutné měřený vzorek stabilizovat v určité poloze např. šrouby kotvenými skrz hrdlo komory z boku do vzorku. U jednotlivých způsobů osazení je důležité při dopočtu hodnot objemových toků volit správný příslušný objem komory a plochu zkoušeného vzorku.



obr. 31: Způsoby osazení měřicí komory vlevo těsnění lepicím tmelem (varianta EX), uprostřed přes těsnící vrstvu (varianta EX), vpravo vlepení do hrdla (varianta IN)



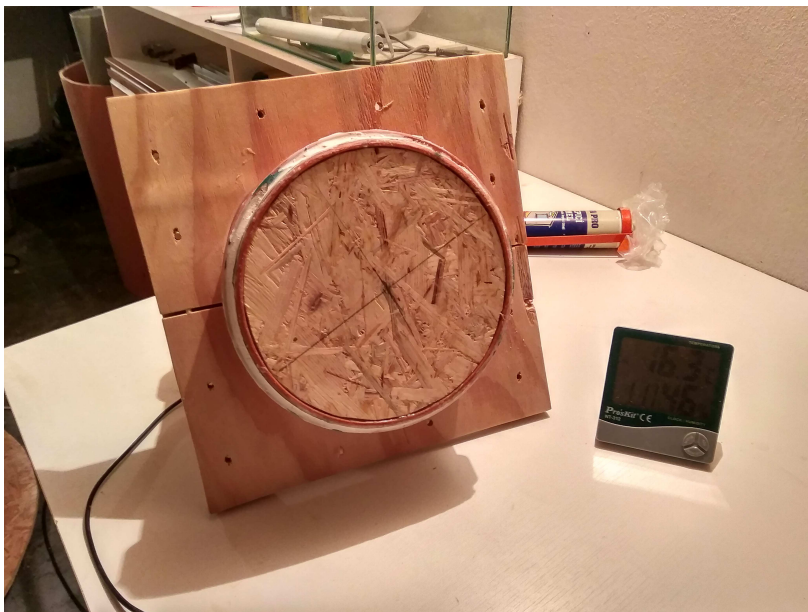
obr. 32: Osazení komory na vzorek přes těsnící vrstvu z asfaltového pásu



obr. 33: Příprava těsnící vrstvy z akrylátové emulze

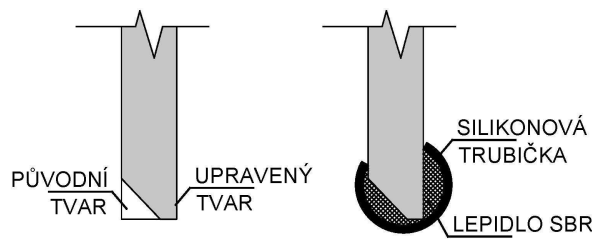


obr. 34: Osazení komory dotěsněním na vzorek lepicím tmelem



obr. 35: Osazení vzorku do hrdla komory (způsob IN)

V úvodních pokusech bylo používáno osazení komory na vzorek pomocí přilepení komory. Vzhledem k předpokládanému časovému průběhu zkoušky na reálné stavbě bylo v později prováděných experimentech používáno osazení komory přes těsnící prstenec aplikovaný na vzorek. Komora se pak pomocí šroubů dotlačila na těsnící materiál. Tento způsob se použil také z důvodu eliminace některých z bočních cest (viz toky v těsné blízkosti hrdla komory označené písmenem d) na obr. 30). Z důvodu snížení potřebné přitlačné síly při stejném stlačení těsnícího materiálu bylo upraveno hrdlo komory do tvaru písmene V, viz obr. 36 vlevo. Pro rovnoměrné dosednutí komory na těsnící materiál byla na hranu hrdla přilepena silikonová trubička - obr. 36. Použití silikonové trubičky je vhodné zejména při využití těsnící vrstvy menší tloušťky.



obr. 36: Úprava hrany hrdla měřicí komory , vlevo seříznutí hrany, vpravo vlepení silikonové trubičky

6.2.1. Vliv upínání komory pomocí šroubů

Pro zaručení dobrého dotlačení komory a eliminaci stlačení těsnícího materiálu v připojovací spáře byl na měřicí komoru připevněn límec, přes který je možné komoru upnout k měřenému vzorku šrouby, resp. vruty. K této práci byly vždy používány vruty do dřeva s dřívkem \varnothing 6 mm. Vruty byly použity proto, aby nebylo nutné měřenou desku předvrtávat a tím zvyšovat riziko zvýšení vlivu bočních cest. Vruty byly dotahovány ručně, použitý dotahovací moment nebyl měřen. Při upínání byly utahovány nejprve zlehka protilehlé vruty, ve druhé fázi pak postupně vruty po obvodu komory. Utěsnění připojovací spáry vlivem přitlačné síly bylo zkoušeno dvojicí měření, kdy ve druhém měření byly šrouby oproti prvnímu měření ještě více dotaženy. Pokud se maximální dosažený podtlak uvnitř komory nelišil, byla přitlačná síla považována za dostatečnou. Pokud došlo k dalšímu zvýšení maximálního podtlaku, byly šrouby dále dotahovány, dokud mezi dvěma posledními měřeními nebyl rozdíl v maximálním vyvolaném podtlaku uvnitř komory.



obr. 37: Dotlačení komory na vzorek pomocí vrutů do dřeva

V rámci práce byl zkoumán vliv kotvení šrouby na měřený objemový tok vzduchu bočními cestami. Měření proběhlo na měřicí komoře d200 a d400. Pro měření byla použita deska KRONOSPAN OSB 3 tl. 12 mm. Pro kotvení do desky byly použity vruty do dřeva s průměrem

dříku \varnothing 6 mm. Komora byla vždy na desku dotěsněna lepicím tmelem. Tmel byl před umístěním komory na vzorek nanesen na hranu hrdla, dále byl zatmelen vnější kout mezi hrdlem a měřeným vzorkem. Tato sada pokusů byla provedena s původním, tj. kolmým tvarem hrdla. Osazení je na fotografii obr. 34. Výsledky jsou uvedeny v následující tab. 7 a tab. 8. V tabulkách jsou vždy střední hodnoty provedených měření, četnost experimentů nebyla tak vysoká, aby bylo možné provést spolehlivé statistické vyhodnocení. Předpokládá se ale obdobná nejistota jako u uvedeného měření, dokumentujícího jeho opakovatelnost, viz kapitola 7.4.

úprava vzorku	objemový tok do komory při 50 Pa [m ³ /h]	plošná průvzdušnost q_{50} [m ³ /m ² h]	procenta oproti stávajícímu stavu [%]
bez vrutů	0,029	0,92	100
8 vrutů	0,030	0,95	103
12 šroubů	0,031	0,96	105

tab. 7: Výsledky měření vlivu šroubů na testovací sadě d200

úprava vzorku	objemový tok do komory při 50 Pa [m ³ /h]	plošná průvzdušnost q_{50} [m ³ /m ² h]	procenta oproti stávajícímu stavu [%]
bez vrutů	0,124	0,98	100
12 vrutů	0,120	0,95	97
12 děr po vrutech	0,123	0,98	99

tab. 8: Výsledky měření vlivu šroubů na testovací sadě d400

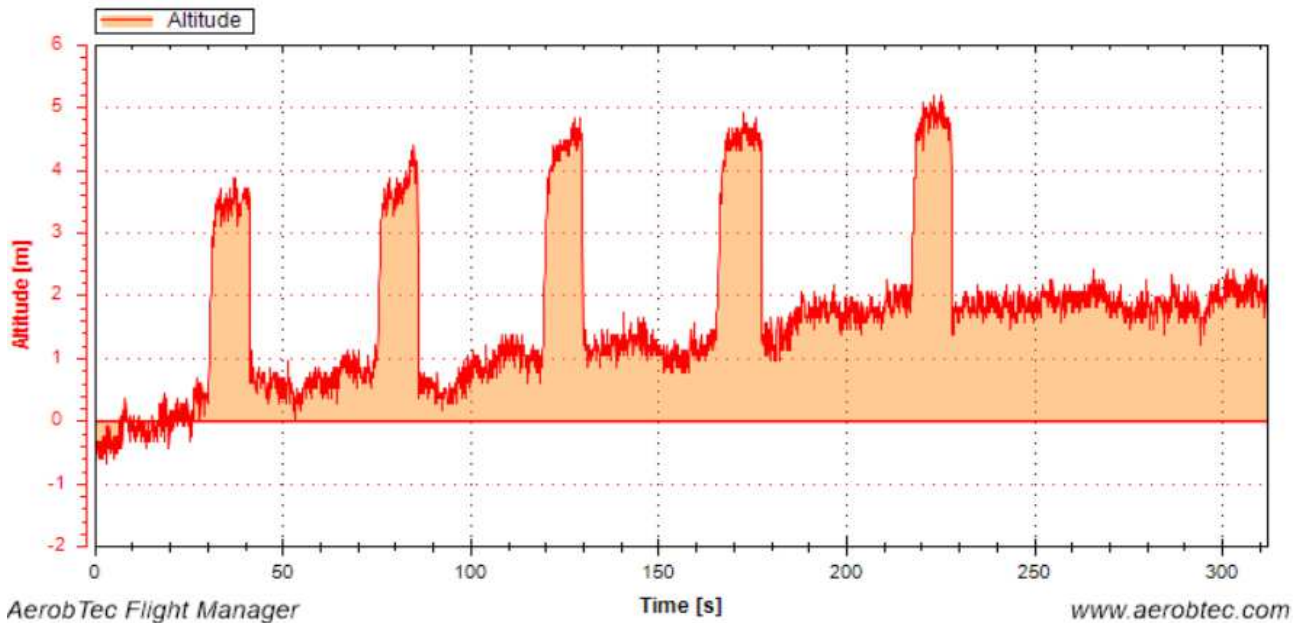
Z provedeného měření na zkušební komoře d200 můžeme pozorovat vzrůstající trend, tj. zvyšování průvzdušnosti s narůstajícím počtem vrutů. Pokud ale vezmeme v úvahu nejistotu měření, nelze tento mírný trend považovat za významný. Naopak u provedeného pokusu na stejné desce při použití komory d400 můžeme pozorovat trend mírného snížení průvzdušnosti s osazením vrutů, opět je ale snížení nevýznamné vzhledem k nejistotě měření.

Z provedených experimentů plyne, že vliv upínání komory na měřené hodnoty plošné průvzdušnosti je zanedbatelný.

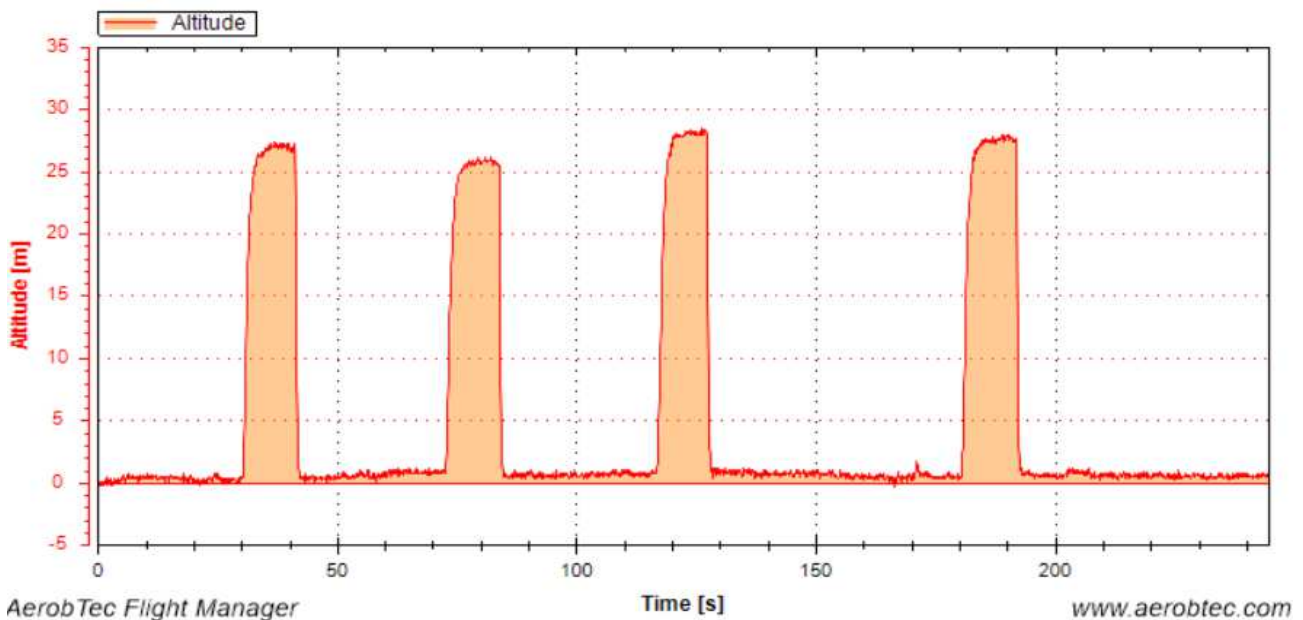
6.2.2. Vliv osazení vzorku ke komoře přes silikonovou hadičku

První experimenty, které využívaly osazení komory na vzorek přes těsnící vrstvu nanesenou na materiál, využívaly jako těsnící materiál akrylátový tmel. Ten vytvořil po zavaznutí pouze tenkou vrstvu přibližné tloušťky 0,5 mm. Při osazení měřicí komory došlo k nedostatečnému dosednutí hrdla komory na měřený vzorek. Proto byla na hrdlo komory nalepena silikonová hadička pomocí lepidla na bázi syntetického kaučuku. Na následujících obr. 38 a obr. 39 jsou

vedeny záznamy z měření s osazením silikonové hadičky. Bez ní přesahovaly netěsnosti komory měřící rozsah zkušební sestavy. Po nalepení silikonové hadičky byla dosažena vyšší celková těsnost komory. Pokles tlakového rozdílu byl ale stále příliš rychlý, takže nebylo možné stanovit objemový tok přitékající do komory.



obr. 38: Záznam měření z mikromanometru Altis v4+ bez použití silikonové hadičky na hrdle komory (maximální převýšení cca 4 m)



obr. 39: Záznam měření z mikromanometru Altis v4+ s přilepenou silikonovou trubičkou na hrdle komory (maximální převýšení cca 27 m)

Uvedený pokus ukázal, že umístění silikonové hadičky na hranu měřící komory má kladný vliv na těsnění připojovací spáry. Dále bylo zjištěno, že těsnicí vrstva z akrylátového tmelu není, vzhledem k nízké tloušťce vrstvy vhodná ani v kombinaci s použitím silikonové hadičky. Nanesený zavadlý akrylátový tmel nedokáže vhodně utěsnit připojovací spáru. Akrylátový

tmel jako materiál používaný pro těsnicí vrstvu přípojovací spáry byl vyřazen z použití i z dalších důvodů uvedených v následující kapitole.

6.2.3. Akrylátový tmel v pozici těsnicí vrstvy přípojovací spáry

Akrylátový tmel byl používán v prvních pokusech v pozici těsnicí vrstvy přípojovací spáry. Nejdříve byl na vzorek umístěn vymežovací kruh, který definoval měřenou plochu vzorku, pak byla na desku v okolí cca 5 cm nanášena směs akrylátového tmelu a akrylátové penetrace, aby došlo k vyplnění spár v místě hrany komory. Na tuto směs byla po zavaznutí nanášena vrstva akrylátového tmelu. Po jeho zavaznutí byla ke vzorku za pomoci šroubů dotlačena měřicí komora. Po odsazení komory po provedení měření byl akrylátový tmel potrháný a odtrhnutý - obr. 40. K popraskání této vrstvy mohlo dojít i během osazování komory, výsledek tedy mohl být zkreslený. Proto bylo v další práci jako těsnicí vrstvy používáno asfaltového pásu, který mimo vyšší těsnosti zkracuje i technologickou přestávku mezi osazením těsnicího materiálu a samotným měřením.



obr. 40: Potrhání těsnicího prstence z akrylátového tmelu po odsazení zkušební komory

6.2.4. Vliv rozměru vzorku

Pro ověření míry vlivu bočních cest uvedených na obr. 30, zejména pak bočních cest označených písmenem c), byl proveden následující pokus, který má mapovat vliv vzdálenosti hrany vzorku od hrdla na měření. Na desku Kronospan OSB 3 tl. 12 mm byla tmelem přilepena zkušební komora (viz obr. 34). Vzorek desky byl upraven do tvaru kruhu, který měl průměr roven 2,5násobku průměru hrdla příslušné komory d200, d315, resp. d400. Postupně byl vzorek ořezáván přímočarou pilou do snižujících se násobků průměru hrdla. Osazení komory se mezi jednotlivými měřeními s různým průměrem vzorku neupravovalo.

Nakonec byl vzorek oříznut přesně do rozměru hrdla komory a vsazen do hrdla (způsob IN viz obr. 31 a fotografie obr. 35). Výsledky pokusu jsou uvedeny v následujících tab. 9 až tab. 11, graficky pak na obr. 41 až obr. 43.

úprava vzorku	objemový tok do komory při 50 Pa [m ³ /h]	plošná průvzdušnost q ₅₀ [m ³ /m ² h]	procenta oproti stávajícímu stavu [%]
2,5 * průměr hrdla	0,029	0,91	100
2,0 * průměr hrdla	0,030	0,95	104
1,5 * průměr hrdla	0,031	0,98	108
vsazeno do hrdla	0,029	0,91	100

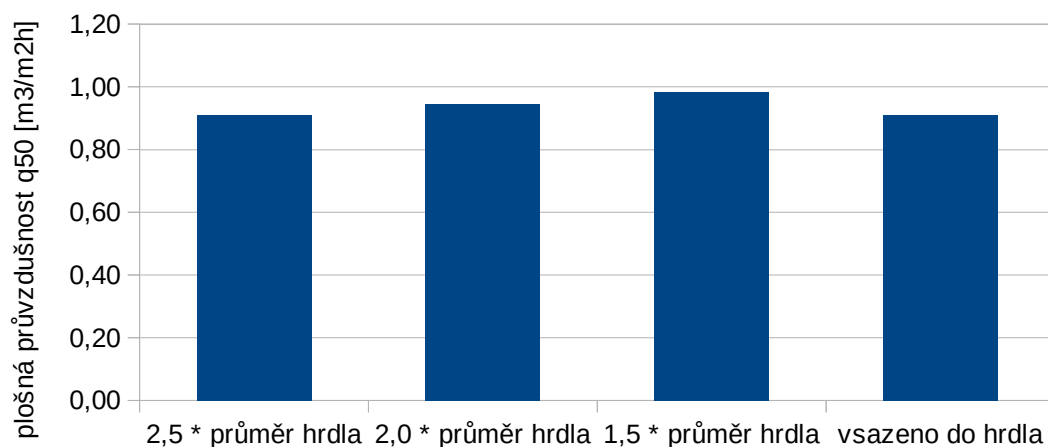
tab. 9: Výsledek měření vlivu vzdálenosti hrany vzorku od hrdla, komora d200

úprava vzorku	objemový tok do komory při 50 Pa [m ³ /h]	plošná průvzdušnost q ₅₀ [m ³ /m ² h]	procenta oproti stávajícímu stavu [%]
2,5 * průměr hrdla	0,055	0,70	100
1,5 * průměr hrdla	0,059	0,75	107
1,2 * průměr hrdla	0,057	0,72	103
vsazeno do hrdla	0,056	0,70	101

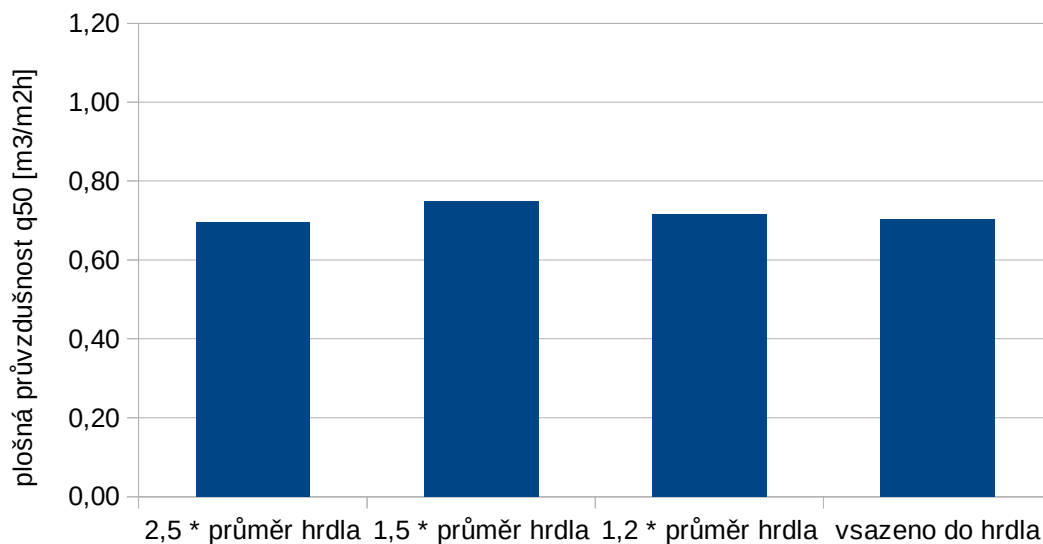
tab. 10: Výsledek měření vlivu vzdálenosti hrany vzorku od hrdla, komora d315

úprava vzorku	objemový tok do komory při 50 Pa [m ³ /h]	plošná průvzdušnost q ₅₀ [m ³ /m ² h]	procenta oproti stávajícímu stavu [%]
2,5 * průměr hrdla	0,124	0,98	100
1,5 * průměr hrdla	0,124	0,98	100
1,2 * průměr hrdla	0,116	0,92	94
vsazeno do hrdla	0,105	0,83	84

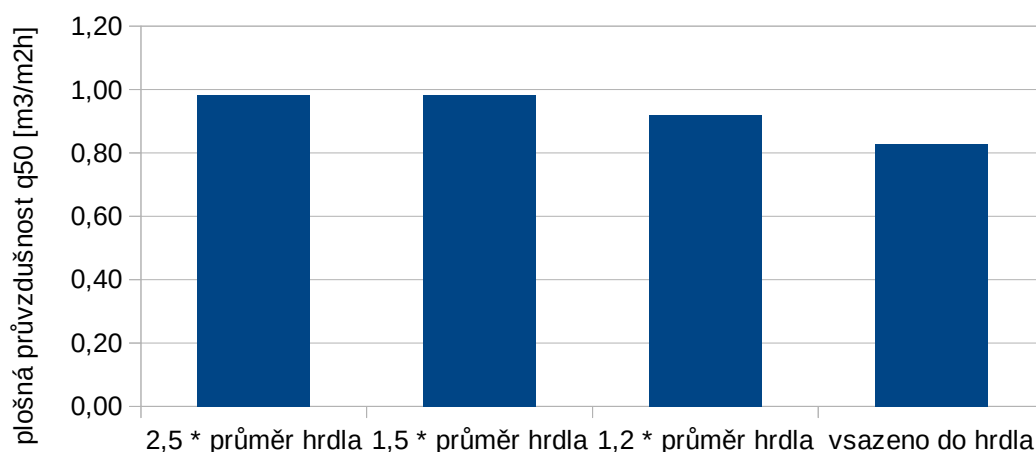
tab. 11: Výsledek měření vlivu vzdálenosti hrany vzorku od hrdla, komora d400



obr. 41: Výsledek měření vlivu vzdálenosti hrany vzorku od hrdla, komora d200



obr. 42: Výsledek měření vlivu vzdálenosti hrany vzorku od hrdla, komora d315



obr. 43: Výsledek měření vlivu vzdálenosti hrany vzorku od hrdla, komora d400

Pokud by se ukázalo, že s postupným ořezem vzorku stoupá jeho průvzdušnost, měly by boční cesty hranou vzorku významný vliv na výsledek. Pokud budeme uvažovat uvedenou nejistotu měření, výsledky tuto tendenci neukazují. Současně ale mějme na paměti, že pokus byl proveden na OSB desce, která nemá deklarovanou vzduchotěsnost a její průvzdušnost bude pravděpodobně poměrně vysoká. U desek s nižší průvzdušností může být vliv bočních cest významnější, jak dokumentují i další provedené pokusy.

Měření realizované na testovací sestavě d400 a vzorku s průměrem 1,2* průměru hrdla paradoxně vykazuje oproti stávající hodnotě bez ořezu vzorku snížení plošné průvzdušnosti. Tento zdánlivý trend je pravděpodobně opět vyvolán v rámci nejistoty měření.

Není bez povšimnutí, že u prvních dvou uvedených měření, tj. na komoře d200 a d315, byla stávající měřená hodnota téměř shodná s hodnotou, kdy byl osazen vzorek do hrdla komory. Výsledky těchto dvou měření ukazují, že vliv bočních proudů vzduchu je zde zanedbatelný. Naopak u měření provedeného na komoře d400 můžeme pozorovat významné snížení

objemového toku do komory při stanoveném tlakovém rozdílu. Tento výsledek může vysvětlovat větší póry ve struktuře materiálu, který vede proud vzduchu boční cestou.

Tento experiment také dokumentuje proměnlivost zkoumané vlastnosti v ploše vzorku. Pokud budeme uvažovat, že naměřené hodnoty, kdy byl vzorek vlepen do hrdla, jsou pouze zanedbatelně ovlivněny negativními vlivy (boční cesty, deformace komory atd.), je průvzdušnost desky s 95 % spolehlivostí v poměrně širokém intervalu 0,59 – 0,96 m³/m²h. Pro určení reprezentativní střední hodnoty bude vhodné provést měření na větším počtu míst.

6.2.5. Vliv bočních cest u desek s nižší průvzdušností

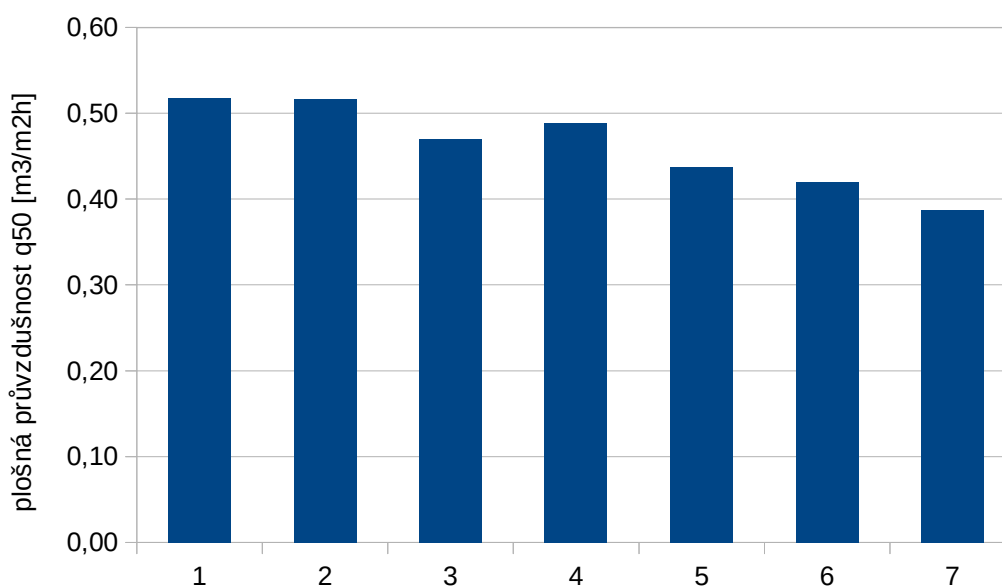
V tomto pokusu byl zkoumán vliv jednotlivých bočních cest na výsledek. Zkušební komora d315 byla osazena na vzorek desky EGGER OSB4 tl. 15 mm. Na vzorek přibližně čtvercového tvaru cca 60 x 60 cm byl nataven prstenec z asfaltového pásu GLASTEK STICKER ULTRA tl. 3 mm. Vrutky byla komora dotlačena na asfaltový pás. Nejdříve byl vzorek měřen bez dalších úprav, v dalším kroku byly odříznuty nenatavené kouty asfaltového pásu a v okruhu do 10 cm od hrdla byla na přilehlou plochu vzorku nanesa silná vrstva akrylátového tmelu. V dalším kroku byla celá přilehlá strana zatmelena silnou vrstvou akrylátového tmelu. Po přeměření následovalo zatmelení hrany desky akrylátovým tmelem. Dále byl na protější straně vzorku zatmelen akrylátovým tmelem prstenec okolo zkoušené plochy v šíři cca 5 cm. Na závěr byla zatmelena mimo zkoušenou plochu celá plocha z odvrácené strany desky. Nakonec byla deska oříznuta a vlepena do hrdla měřicí komory. Výsledky jednotlivých měření jsou uvedeny v tab. 12 a na obr. 45.



obr. 44: Vzorek desky ve stavu po nanesení akrylátového tmelu v rozsahu 10 cm od hrdla

úprava vzorku	objemový tok do komory při 50 Pa [m ³ /h]	plošná průvzdušnost q_{50} [m ³ /m ² h]	procenta oproti stávajícímu stavu [%]
asfaltový pás (1)	0,037	0,52	100
akrylát v okruhu 10 cm od hrdla (2)	0,036	0,52	100
akrylát po celé horní ploše (3)	0,033	0,47	91
akrylát hrany (4)	0,035	0,49	94
akrylát v okruhu 5 cm od hrdla na odvrácené straně (5)	0,031	0,44	85
akrylát celá druhá strana mimo měřenou plochu (6)	0,030	0,42	81
vsazeno do hrdla (7)	0,027	0,39	75

tab. 12: Výsledky měření těsnosti po postupných úpravách vzorku s vyšší těsností



obr. 45: Grafická podoba výsledků měření těsnosti po postupných úpravách vzorku (jednotlivé sloupce reprezentují stav úpravy vzorku dle tab. 12)

Výsledky pokusu ukazují několik poznatků. Boční cesty proudění vzduchu u měření vzorků vyšší těsnosti mají významnější vliv na měřený výsledek.

Vzhledem k nízké četnosti opakování nelze kvalitně statisticky vyhodnotit vliv částečného (3) nebo plnoplošného (4) zatmelení desky ze strany, kde byla přisazena komora. Je velmi nepravděpodobné, aby při pokusu, kdy byl vzorek utěsněn více, vycházely vyšší hodnoty objemového toku do komory. Skutečná hodnota objemového toku do komory při měření s částečně utěsněnou plochou ze strany osazené komory (3) musí být vyšší nebo rovna výsledku měření (4). Pokles měřených výsledků při úpravách (3) a (4) je na hranici nejistoty měření cca 6 – 9 %. O významu samotného zatmelení hrany desky nelze z provedeného měření rozhodnout. Významnější pokles cca o dalších 10 % přineslo nanesení akrylátového tmelu v okruhu cca 5 cm od hrdla komory na odvrácené straně vzorku (5). Přetmelení celé odvrácené strany desky mimo měřenou plochu přineslo další snížení na hranici nejistoty měření, cca 5 %. Vzorek osazený do hrdla komory vykazoval o 25 % nižší hodnoty objemového toku do komory než vzorek osazený pouze přes asfaltový pás bez dalších úprav.

Pokud vezmeme poslední měřený údaj jako hodnotu nejvíce se blížící skutečnosti, můžeme dopočítat přibližný objemový tok přes boční cesty jako rozdíl mezi hodnotami objemového toku do komory jednotlivých měřených stavů. Dále můžeme hodnotu vztáhnout k 1m délky přípojovací spáry komory, viz následující tab. 13.

Není bez povšimnutí, že výrobcem desky deklarovaná propustnost vzduchu je významně nižší. Výrobce uvádí plošnou propustnost při tlakovém rozdílu 50 Pa $0,12 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Měřená hodnota při vsazení měřeného vzorku do hrdla komory byla přibližně $0,39 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. Je však nutné zohlednit, že deska byla získána přímo ze stavby, která neplnila stanovené nároky na vzduchotěsnost. V rámci detekce netěsností nebyla na stavbě nalezena žádná významně netěsná místa, příčinou mohla být právě netěsnost samotné desky, která byla použita za účelem vytvoření hlavní vzduchotěsnicí vrstvy. Příčinou netěsnosti mohla být například anomálie výroby nebo mohla být deska v průběhu stavby vystavena neznámé klimatické zátěži. Pravděpodobnou zvýšenou klimatickou zátěž může dokumentovat i skutečná tloušťka desky, která byla vyšší o více než 5 % od výrobcem uváděného rozměru. Při bobtnání OSB desek lze předpokládat i rozšíření vnitřních pórů a tím zvýšení propustnosti vzduchu.

úprava vzorku	objemový tok do komory při 50 Pa vlivem bočních cest [m ³ /h.m]						
	1	2	3	4	5	6	7
asfaltový pás (1)	0	0,0001	0,0034	0,0021	0,0057	0,0070	0,0094
+ akrylát v okruhu 10 cm od hrdla (2)	-	0	0,0033	0,0020	0,0056	0,0069	0,0092
+ akrylát po celé horní ploše (3)	-	-	0	-0,0013	0,0023	0,0036	0,0059
+ akrylát hrany (4)	-	-	-	0	0,0036	0,0049	0,0072
+ akrylát v okruhu 5 cm od hrdla na odvrácené straně (5)	-	-	-	-	0	0,0013	0,0036
+ akrylát celá druhá strana mimo měřenou plochu (6)	-	-	-	-	-	0	0,0024
+ vsazeno do hrdla (7)	-	-	-	-	-	-	0

tab. 13: Vliv objemového toku bočními cestami vztažený k 1m délky přípojovací spáry pro různé dvojice úpravy vzorku

6.2.6. Vliv osazení vzorku vně komory (EX) a dovnitř komory (IN)

V rámci předchozích uvedených měření byl porovnáván mimo jiné i vliv osazení měřicí komory, a to na deskách KRONOSPAN OSB3 a EGGER OSB4. Z důvodu mapování vlivů bočních cest byl proveden pokus zaměřený na osazení komory na vzorek i na desku EGGER OSB3. Součástí tohoto pokusu bylo měření provedené na vzorku osazeném způsobem EX přes přířez asfaltového pásu a měření provedené na vzorku osazeném způsobem IN za použití lepidla na bázi syntetického kaučuku.

úprava vzorku	objemový tok do komory při 50 Pa [m ³ /h]	plošná průvzdušnost q ₅₀ [m ³ /m ² h]	procenta oproti stávajícímu stavu [%]
asfaltový pás	0,027	0,38	100
vsazení do hrdla	0,025	0,36	93

tab. 14: Výsledky měření vlivu osazení vzorku desky EGGER OSB3

Pokud přihlédneme k nejistotě měření, nelze rozhodnout, zda má způsob osazení, resp. boční proudění vzduchu, významný vliv na měření.

Z předchozích měření došlo k významnému snížení měřených hodnot pouze v případě měření prováděném na vzorku KRONOSPAN OSB3 s testovací sadou d400 a u měření provedeného na desce EGGER OSB4. U všech ostatních měření, které byly prováděny na vzorcích desek OSB3 obou výrobců, neměl způsob osazení významný vliv.

Výsledky mohou ukazovat na to, že pro desky, které jsou vyrobeny technologickým postupem typickým pro OSB4, bude hrát způsob osazení významnou roli. Naopak pro desky vyrobené technologickým postupem typickým pro desky nižší třídy, např. OSB3, nebude způsob osazení významný. Pro potvrzení této hypotézy by bylo potřeba provést rozsáhlejší měření s větším statistickým vzorkem.

6.3. OPTIMALIZOVANÉ OSAZENÍ VZORKU

Po provedených pokusech bylo jako optimální z pohledu poskytnutí nejpřesnějších výsledků vyhodnoceno vsazení vzorku do hrdla zkušební komory. Nevýhodou je obtížná příprava vzorku, obtížná manipulace se vzorkem, kdy je na hraně vzorku nanášeno živé lepidlo. Dále je nutné vložit technologickou přestávku pro zavadnutí lepidla, která byla při použití lepidla na bázi syntetického kaučuku v řádu dní. Nakonec po skončení měření lze vzorek jen velmi těžko z hrdla komory demontovat, při použití lepidla je nutné vzorek rozříznout a kusy vzorku vylomit. Náročné je pak i odstranění zbytků lepidla z hrdla zkušební komory. Tento způsob osazení nelze realizovat přímo na stavbě vzhledem k technologické pauze pro vytvrnutí lepidla.

Osazení vzorku přes prstenec z asfaltového pásu se ukázalo jako praktické a dobře realizovatelné i pro měření in situ. Právě při měření na stavbě, viz kapitola 9, bylo zjištěno, že je vhodné nejdříve plochu vzorku v místě připojovací spáry natřít vhodným nátěrem, který utěsní ostrohranné póry. Jako vhodný se ukázal latexový nátěr. Z důvodu zkrácení doby tuhnutí by bylo lépe volit např. tekutý asfaltový nátěr. Na vzorek, který je natřen uvedeným způsobem, je nataven asfaltový pás. Horký asfalt vyplní zbylý objem otevřených pórů

měřeného vzorku. Na asfaltový pás je komora dotlačena vruty do dřeva. Velikostí otvoru v prstenci z asfaltového pásu je definována měřená plocha vzorku. Vliv kotvení vruty na poškození desky, resp. zvýšení vlivu bočních cest je dle provedených měření zanedbatelný. Natavený asfaltový pás na vzorek současně eliminuje některé boční cesty v ploše okolo hrdla. U těsnějších desek by při použití tohoto způsobu osazení bylo vhodné dotěsnit i širší okolí přivrácené strany desky k měřicímu zařízení, a pokud to situace dovolí (např. při zabudování bez navazujícího souvrství skladby), i okolí mimo testovanou plochu odvrácené strany desky. Jako vhodný materiál pro utěsnění uvedených ploch se ukázal obyčejný akrylátový tmel, který je pro eliminaci bočních objemových toků dostatečně těsný i v nezavatlém stavu. I přes provedení všech uvedených dotěsnění je při tomto osazení vzorku nutné uvažovat s vlivem bočních cest. Zvláště pak u těsných vzorků, kde může být skutečná hodnota průvzdušnosti nižší o cca 10 – 15 %. Míru vlivu bočních cest při různé úpravě vzorku lze orientačně odečíst z tab. 13.

7. POSTUP MĚŘENÍ

7.1. PŘÍPRAVA VZORKU A OSAZENÍ KOMORY

Vzhledem k tomu, že předmětem měření jsou deskové materiály, které apriori mají nízkou průvzdušnost, protože se používají na stavbách v pozici vzduchotěsní vrstvy, je metoda velmi citlivá. Pokud řádově vyčíslíme, jaký objem je ve zkoumaném intervalu do komory přisáván, zjistíme, že jde o desítky cm^3 . Proto je příprava vzorku a osazení komory pro měření naprosto zásadní. Studiu vlivů přípravy vzorku a osazení měřicí komory na vzorek je věnována kapitola 6.2.

Jako nejvhodnější se ukázalo osazení měřicí komory přes těžký samolepicí asfaltový pás (tl. alespoň 2 mm), který má vyříznutý kruhový otvor. Pro mnou prováděné měření byl použit SBS modifikovaný asfaltový pás GLASTEK 30 STICKER ULTRA s tl. 3 mm. Asfaltový pás je na nerovný povrch měřené desky nataven pomocí propanbutanového hořáku běžně používaného ve stavebnictví pro realizaci asfaltových hydroizolací. K odlehlé samolepicí straně asfaltového pásu je po zavaznutí dotlačena zkušební komora přes „límeč“ alespoň 8 vruty do dřeva. Vzhledem k částečné elasticitě asfaltu dojde k vytvoření těsného spoje mezi komorou a asfaltovým pásem. Při osazování komory je potřeba dbát i na to, aby celé hrdlo leželo na asfaltovém pásu a dále na vhodné dotažení šroubů, více viz kapitola 6.2.

Pro utěsnění nejmenších otevřených pórů by bylo vhodné jako podklad pod asfaltový pás nanést na měřený vzorek za studena tekutou asfaltovou zálivku.

7.2. MĚŘENÍ

Po přípravě vzorku a osazení komory na vzorek jsou zaznamenány vybrané stavové veličiny vzduchu za měřeným vzorkem, tj. teplota a relativní vlhkost (atmosferický tlak je měřen přístrojem uvnitř komory). Dále je na měřicí komoru připojena vývěva a v komoře je vytvořen podtlak. Důležité je, aby bylo dosaženo téměř rovnovážného stavu, tj. aby mezi komorou a okolním prostředím byl konstantní tlakový rozdíl. Ze zkušeností z provedených měření trvá evakuace do ustáleného stavu u OSB desek běžně používaných pro vytvoření vzduchotěsní vrstvy stavby bez povrchové úpravy přibližně 10 s. Současně je vhodné použít takový výkon vývěvy, aby v komoře nebyl vyvolán zbytečně velký tlakový rozdíl, který by pak zkresloval výsledky nezanedbatelným objemovým tokem přes plášť komory, viz kapitola 7.5.1.

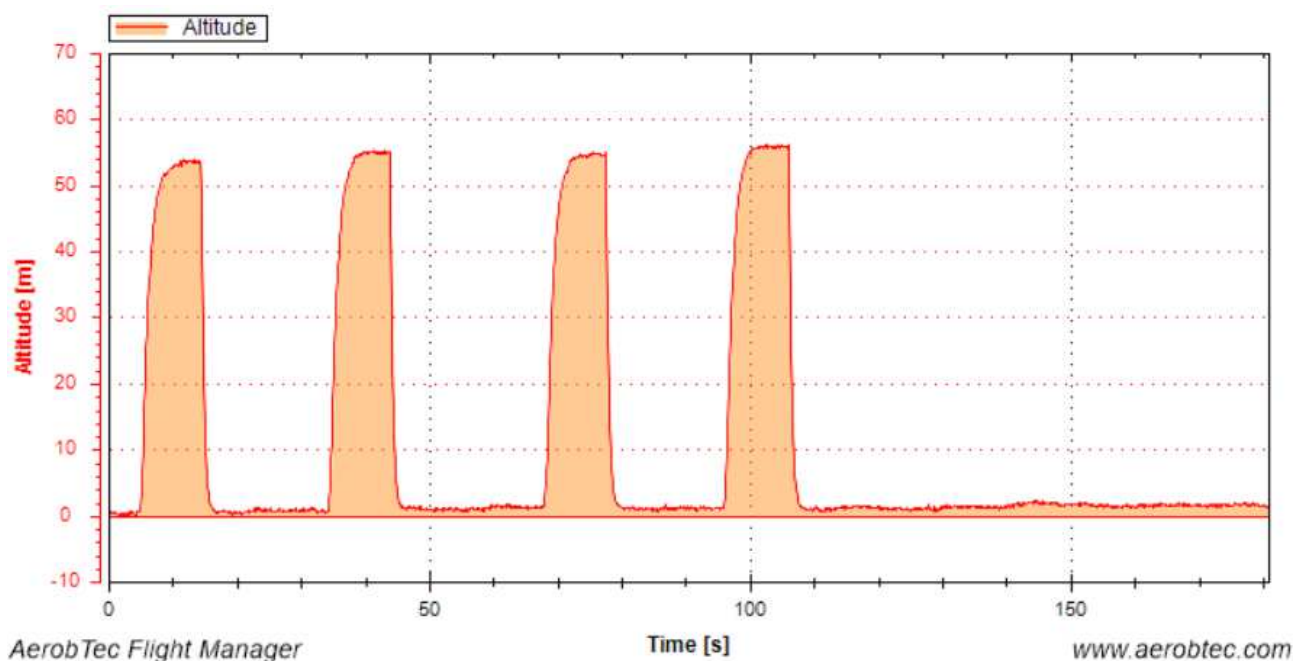
Po dosažení rovnovážného stavu je uzavřen ventil na trubici pro odsávání vzduchu,

v následujícím časovém intervalu probíhá pokles tlaku vzduchu ve zkušební komoře. V ideálním stavu se realizuje vyrovnání tlakového rozdílu pouze přes zkoušenou plochu vzorku desky. V reálném případě vstupuje do měření mnoho zkreslujících vlivů, jejichž mapování a studiu významu se věnuje kapitola 7.5.

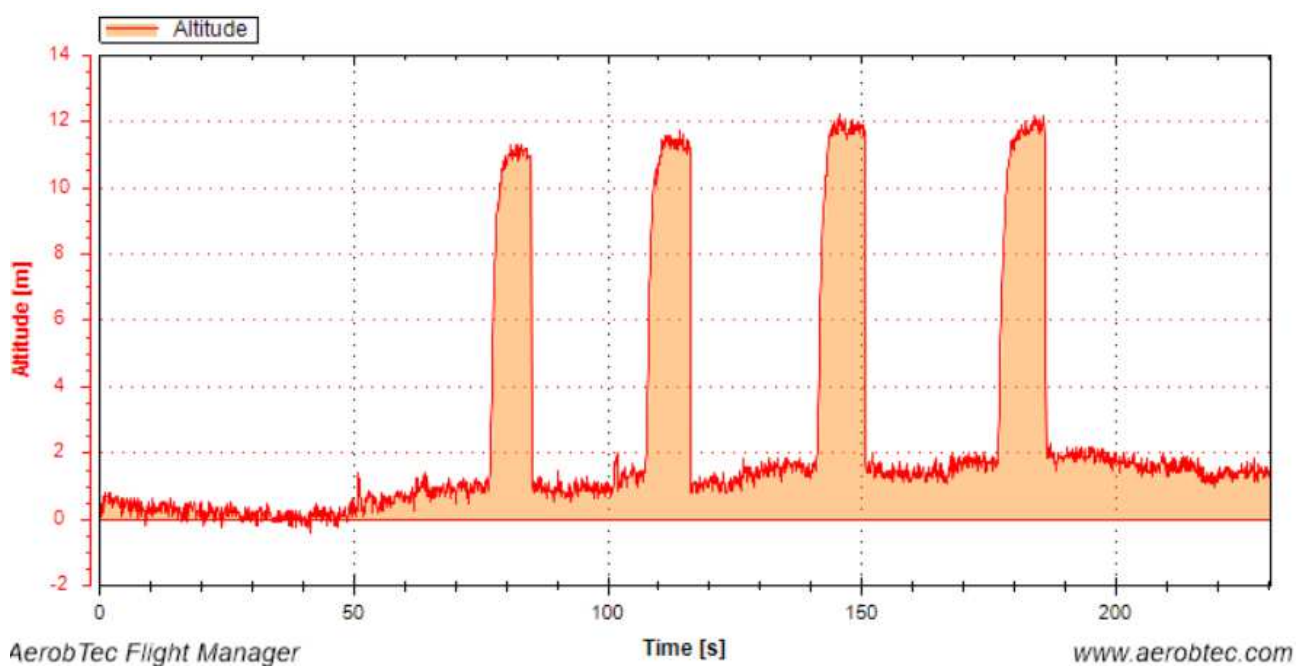
Po dostatečné době relaxace může být měření opakováno. Pro OSB desky používané v pozici hlavní vzduchotěsnící vrstvy bez povrchové úpravy se ukázala jako vhodná doba cca 20 s, pro těsnější materiály je nutná delší doba relaxace, naopak pro méně těsné vzorky je možné dobu relaxace zkrátit. Ze statistického hlediska je vhodné provést alespoň 5 měření, nejméně na třech místech měřené desky.

7.3. VYHODNOCENÍ

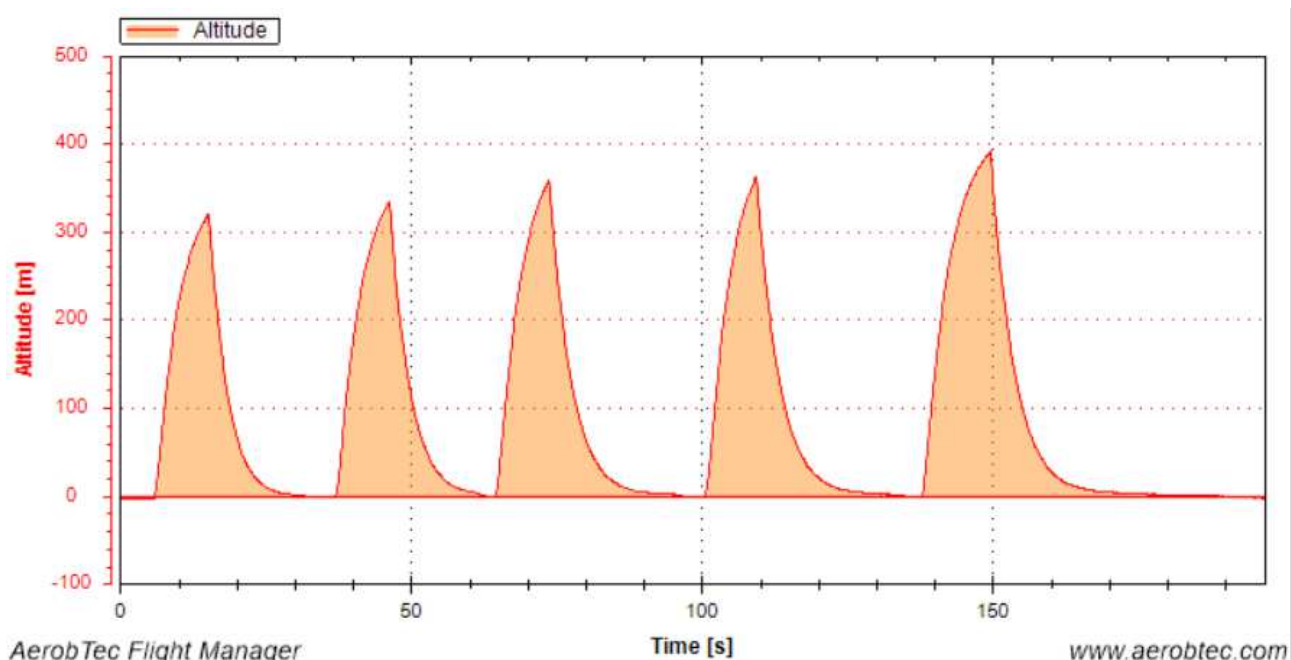
První cennou zpětnou vazbu o těsnosti sestavy (komora, připojovací spára, vzorek) můžeme získat bezprostředně po stažení dat ze záznamníku. Vzhledem k tomu, že použitý mikromanometr byl výrobcem primárně vyvinut pro záznam výšky letu modelů letadel, jsou stažená data zobrazována v dodávaném softwaru Altis flight manager. Zde je v přehledném grafu dostupný záznam „výšky letu“. Graf je ukázán na obr. 46. Výška letu je lineárně závislá na tlaku, a tak lze ze záznamu odvodit důležité informace. Například zda měřicí sestava vykazuje dostatečnou těsnost a uvnitř docházelo během měření k předpokládané tlakové diferencí. Ukázka záznamu, kde nebylo na první pokus dosaženo dostatečné těsnosti, je zobrazena na obr. 47. Dále je vhodné ověřit, jestli během evakuace komory došlo k ustálení tlakového rozdílu v jeho maximu. Ukázka měření, kdy k ustálení nedošlo, je na obr. 48. Pokud by nedošlo k ustálení tlakové difference, v dalším měření by bylo nutné dobu evakuace vnitřního objemu prodloužit nebo regulovat výkon vývěvy. Další kontrolou může být sledování, zda mezi jednotlivými tlakovými impulsy nedošlo např. k významnému zvyšování maximálního tlakového rozdílu (při použití stejného sacího výkonu), viz obr. 49. Pokud by docházelo mezi jednotlivými peaky k nárůstu maximálního tlakového rozdílu, je pravděpodobně netěsnost v připojovací spáře, která se v průběhu měření dotěsnila vlivem podtlaku, resp. dotlačení komory na vzorek.



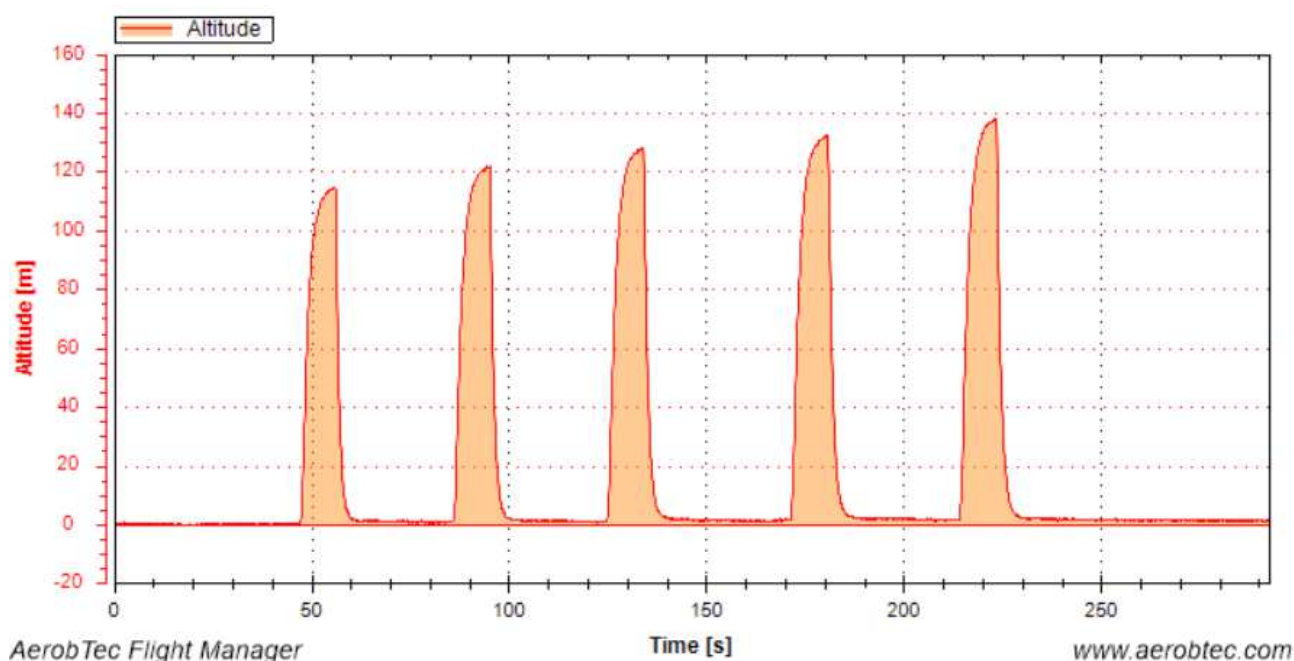
obr. 46: Grafické zobrazení výšky letu programu Altis flight manager – úspěšné měření (maximální výška letu je cca 55 m, před poklesem je dosaženo ustálené výšky, maximální výška mezi jednotlivými peaky nenarůstá, mezi jednotlivými peaky je dostatečný čas na vyrovnání tlakového rozdílu uvnitř a vně komory)



obr. 47: Grafické zobrazení výšky letu programu Altis flight manager – neúspěšné měření (maximální výška letu není dostatečná, cca 11 m)



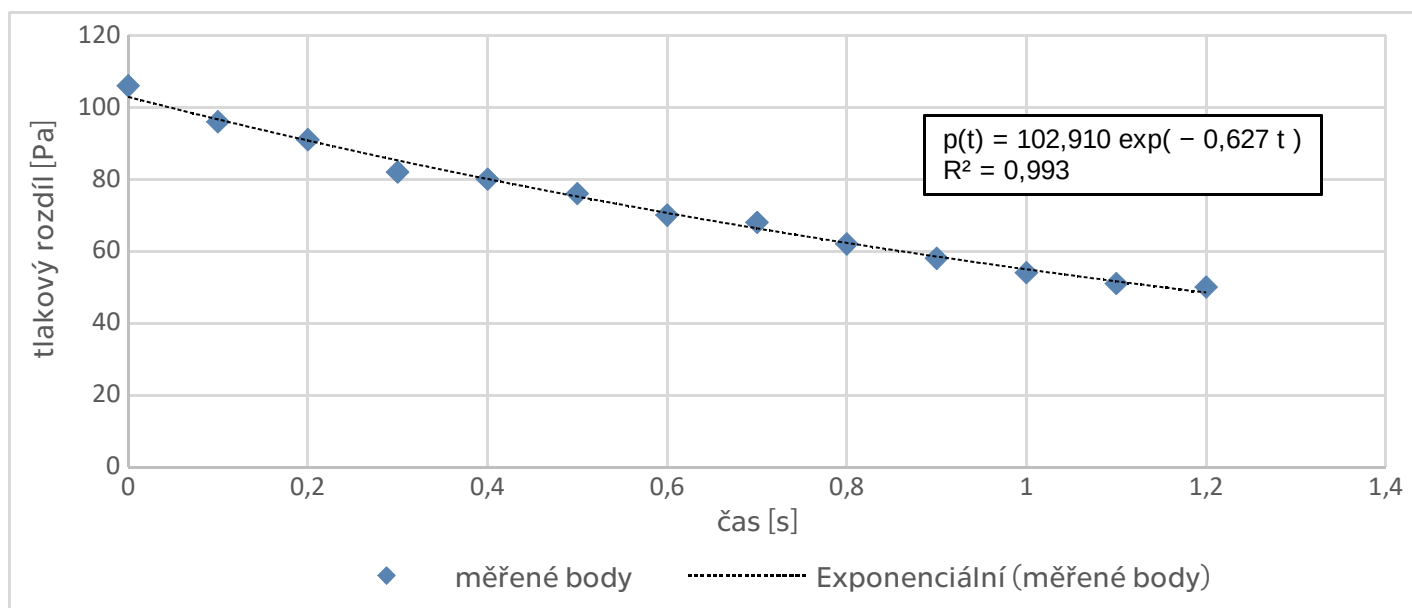
obr. 48: Grafické zobrazení výšky letu programu Altis flight manager – neúspěšné měření (před poklesem tlakového rozdílu nebyl maximální tlak v ustáleném stavu, mezi jednotlivými impulsy nebyla dostatečná doba na relaxaci)



obr. 49: Grafické zobrazení výšky letu programu Altis flight manager – neúspěšné měření (vzrůstající maximální tlak jednotlivých peaků, cca 110 m až 140m)

Stažená data ze záznamníku jsou vyhodnocována na základě principů uvedených v teoretické části této práce, viz kapitola 3.4. Zpracování probíhá v tabulkovém editoru s vlastním algoritmem výpočtu. Po stažení záznamníku z měřicího zařízení jsou odečteny počáteční a koncové okrajové podmínky (absolutní tlak). Řada absolutních tlaků je následně převedena na tlakové rozdíly mezi prostředím uvnitř komory a vnějším prostředím. Ze

záznamu je vybráno 13 po sobě jdoucích měřicích bodů při poklesu tlakového rozdílu, přičemž v každém měření by měly být zahrnuty alespoň 2 hodnoty nižší tlakového rozdílu 50 Pa. Poté jsou tlakové rozdíly nahrazeny exponenciální regresní křivkou. Nahrazení je provedeno na základě statistické metody nejmenších čtverců z přirozených logaritmů měřených hodnot. Pokud se v měření vyskytnou významně odlehlé hodnoty tlakové difference od regresní křivky, je možné je z měření odebrat, měření po odebrání odlehlých hodnot zahrnuje alespoň 10 údajů. Pokud byly odebrány odlehlé měřicí body, provede se přepočítání parametrů regresní křivky. Na tomto místě je vhodné zkontrolovat míru shody měřených hodnot a náhradní křivky za pomoci koeficientu determinace. Graf poklesu tlakového rozdílu včetně nahrazení regresní křivkou je ukázán na obr. 50.



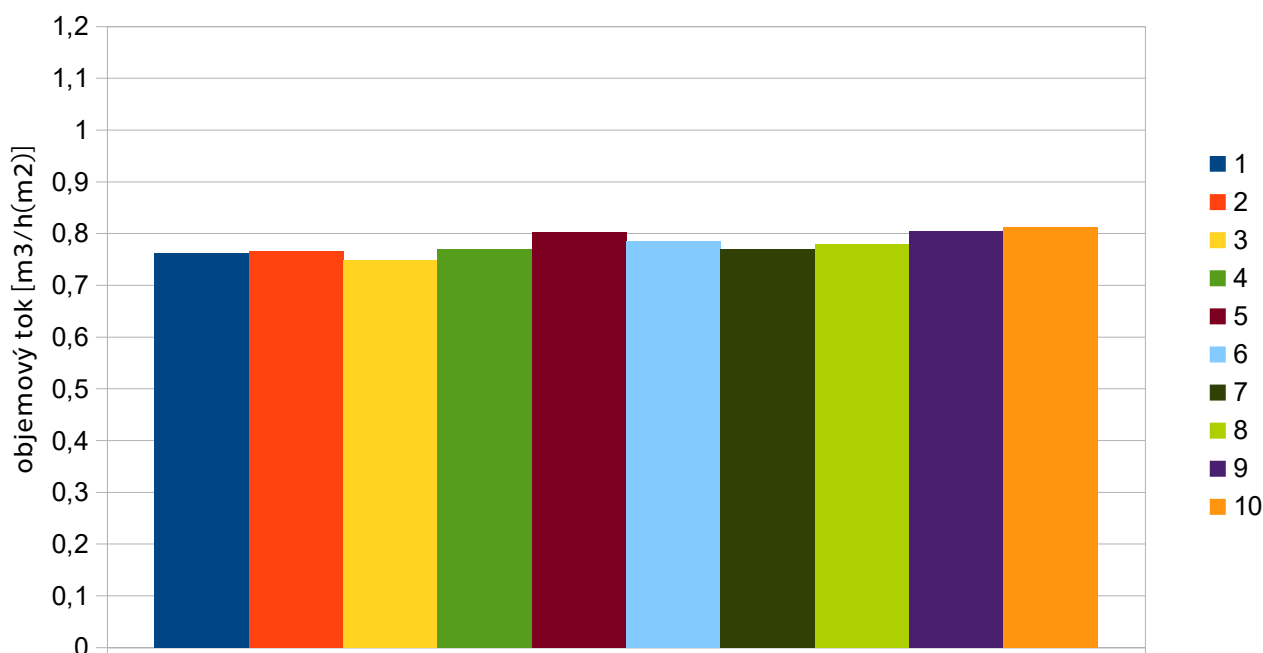
obr. 50: Vybraný interval záznamu měření a jeho nahrazení spojitou exponenciální křivkou

Po získání parametrů exponenciální křivky je zpětně dopočten čas od stanoveného počátku měření, kdy je na odlehlých stranách měřeného vzorku požadovaný tlakový rozdíl 50 Pa, který se běžně používá jako vztavná hodnota ve stavebnictví. Pro různé aplikace může být požadovaný tlakový rozdíl libovolný, logika výběru měřených bodů by měla zůstat stejná, vždy by v měření měly být zahrnuty alespoň 2 měřené hodnoty pod požadovaný tlakový rozdíl (pozn. při nižších tlakových rozdílech než 50 Pa vykazuje metoda nižší spolehlivost vzhledem k rozlišitelnosti mikromanometru). Po dopočtení času je podle vzorce (22) dopočtena hodnota okamžitého objemového toku v m^3/s přicházejícího do komory při určeném tlakovém rozdílu. Objemový tok je podělen měřenou plochou vzorku. Tato hodnota je následně převedena do požadovaných jednotek, ve stavebnictví jsou to nejčastěji m^3/m^2 za hodinu při tlakovém rozdílu 50 Pa. Naposledy uvedená hodnota spolu s hodnotou okamžitého objemového toku přicházejícího do komory v m^3/h při tlakovém rozdílu 50 Pa jsou použity v této práci pro porovnání naměřených výsledků. Pro standardizaci výsledků jsou

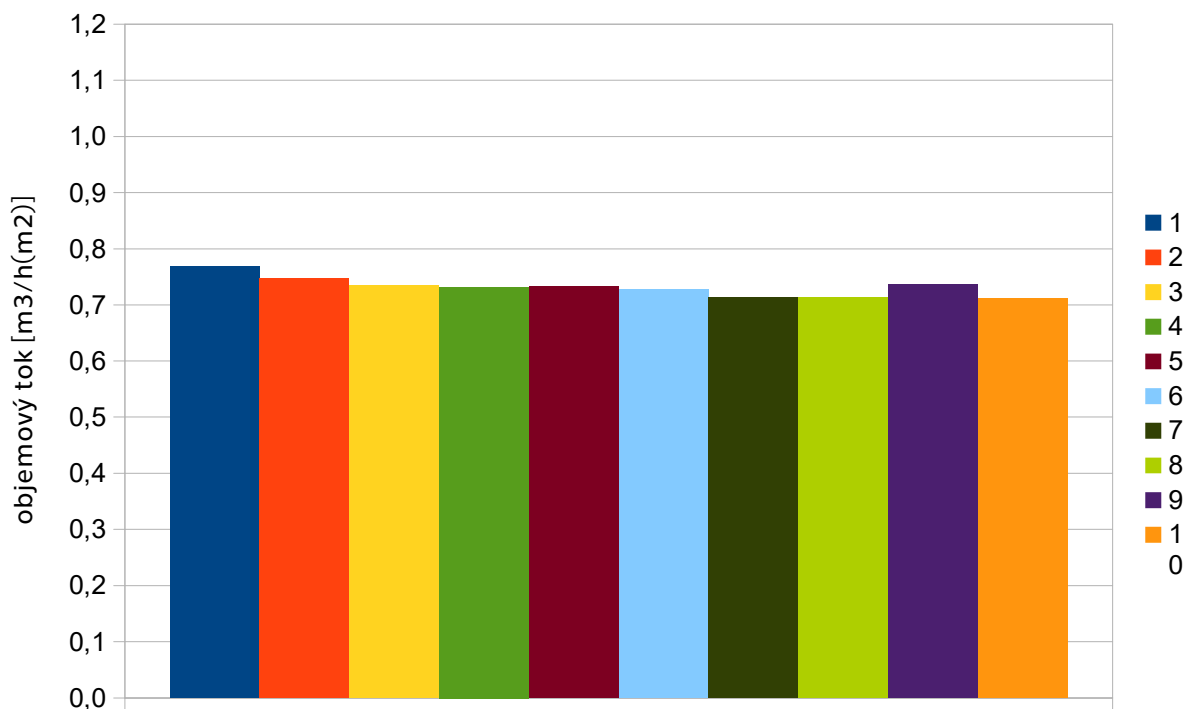
měřené výsledky objemového toku přepočteny na parametry vzduchu 20°C a relativní vlhkost 50 %, tak aby byl konstantní hmotnostní tok vzduchu.

7.4. OPAKOVATELNOST MĚŘENÍ

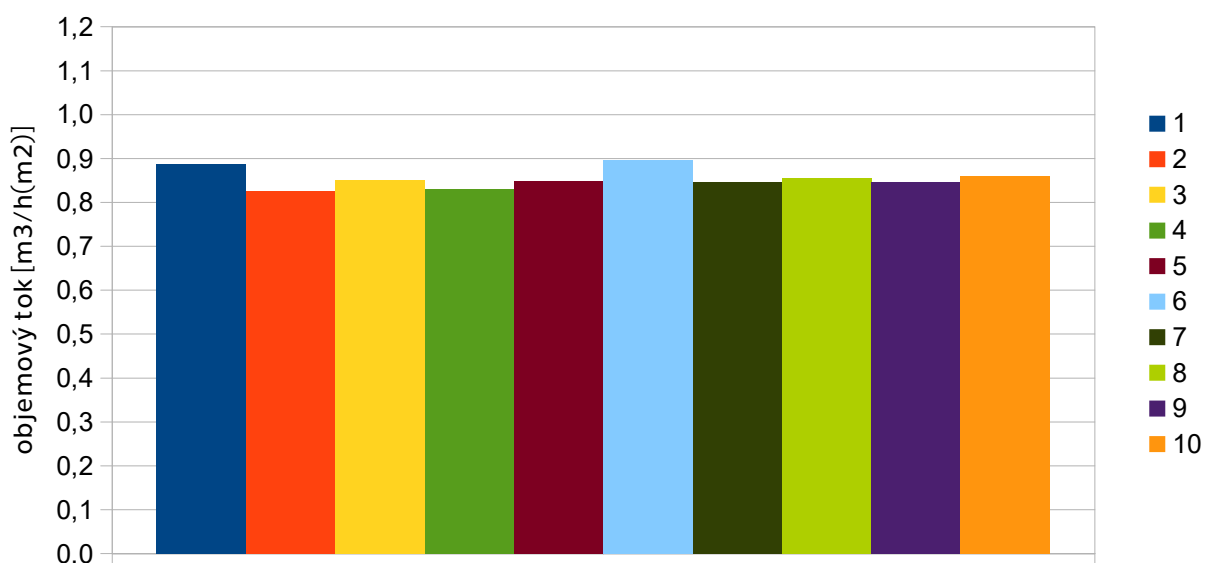
Opakovatelnost měření byla ověřena experimentálně. První zkouška testovala opakovatelnost měřicí metody bez vlivu osazení na zkoušený materiál, tj. bylo provedeno 10x opakované měření. Každá sestava byla osazena na jiné místo stejného vzorku. Mezi jednotlivými tlakovými impulsy nebyla komora znovu osazována. Výsledky měření včetně statistického vyhodnocení provedené na měřicích sestavách d200, d315 a d400 jsou prezentovány graficky i tabelárně na obrázcích obr. 51 až obr. 53 a v tabulce tab. 15. Opakovatelnost měření je velmi dobrá, při předpokladu normálního rozložení je pro interval 95 % spolehlivosti střední hodnota $\pm 4 - 5 \%$.



obr. 51: Opakovatelnost měření na měřicí sestavě d200



obr. 52: Opakovatelnost měření na měřicí sestavě d315



obr. 53: Opakovatelnost měření na měřicí sestavě d400

veličina / měřicí sestava	d200	d315	d400
minimální hodnota	0,749	0,711	0,826
maximální hodnota	0,812	0,768	0,897
střední hodnota	0,780	0,731	0,855
směrodatná odchylna σ	0,019	0,017	0,021
směrodatná odchylna $2 \cdot \sigma$	0,038	0,034	0,042
interval 95% spolehlivosti	0,742 – 0,818	0,697 – 0,765	0,813 – 0,897
relativní nejistota při 95% spolehlivosti	4,9%	4,70 %	4,90 %

tab. 15: Statistické vyhodnocení opakovatelnosti měření

7.5. ROZSAH MĚŘICÍ METODY

Spolehlivost měřicí metody je podle dostupných informací limitována několika faktory. Limity souvisejí s použitými zjednodušeními výpočtového modelu - například zjednodušení $P/P_0 = 1$, zanedbání tepelných toků přes plášť komory, zanedbání deformace objemu komory v závislosti na čase, zjednodušení reálného plynu na plyn ideální. Z druhé strany lze limity chápat jako limity zařízení, které by uvedená omezení mohla kompenzovat – například malý objem měřicí komory, nedostatečná tuhost pláště komory, nedostatečný výkon použité vývěvy. Reálně je nutné najít kompromis mezi uvedenými dvěma stranami, aby bylo zařízení funkční, a uvědomit si, s jakými nejistotami měření pracuje.

7.5.1. Limity nízkých hodnot průvzdušnosti

Tepelná výměna mezi pláštěm komory a objemem vnitřního vzduchu

Spolehlivost měřicí metody v nízkých hodnotách průvzdušnosti je limitována použitým předpokladem, že plášť komory tvoří adiabatickou okrajovou podmínku, tj. že za krátký časový interval pokles tlakového rozdílu uvnitř komory nedojde k významnému tepelnému toku do objemu vzduchu v komoře. Tento předpoklad není pravdivý, když tlakový pokles trvá řádově vyšší jednotky až desítky sekund. Teplo přicházející přes stěny komory pak mění tlakové poměry uvnitř komory. Tento jev je dobře viditelný např. na grafu obr. 26, kde byla zkoušena těsnost jednotlivých komor. V úvodní fázi je „rychlý“ pokles tlakového rozdílu vyvolán pravděpodobně právě změnou teploty vzduchu v komoře způsobenou prostupem tepla přes plášť komory. V uvedeném měření je vytvořen cca 10x větší tlakový rozdíl, než jakého je používáno při měření.

Tepelný tok do komory je v mezích jednotek J, i tato hodnota může mít nezanedbatelný vliv na tlakové poměry uvnitř komory [8]. Při měření by tedy bylo vhodné regulovat výkon vývěvy a používat co nejnižší počáteční tlakové rozdíly (tlakové rozdíly při ustáleném stavu v maximální tlakové diferenci mezi vnitřním objemem a vnějším prostředím). Bližší teoretické poznání a zapracování tohoto vlivu by mohlo vést ke zpřesnění výsledků měřicí metody.

7.5.2. Limity vysokých hodnot průvzdušnosti

Rozsah měřených hodnot je shora limitován rychlostí poklesu tlaku v komoře. Pokud je pokles tlaku příliš rychlý, nedojde k dostatečnému počtu záznamů v průběhu poklesu tlakového rozdílu a měření může být nepřesné, nebo zcela nerealizovatelné. Současně je také nutné uvažovat se zvyšující se nepřesností měření, pokud bychom používali hodnoty

vysokých tlakových rozdílů uvnitř komory v řádu vyšších 1000 Pa. Více se projeví vliv zjednodušujícího předpokladu $P/P_0 = 1$, viz tabulka tab. 16, ale také začne stoupat odchylka vlivem deformace komory.

Zjednodušení poměru tlaků uvnitř a vně komory P/P_0

V této kapitole je uveden příklad vlivu zjednodušení poměru absolutního tlaku v průběhu sledovaného intervalu měření a absolutního tlaku na počátku měření $P/P_0 = 1$. Měření a následný výpočet byl proveden za následujících zjednodušených okrajových podmínek a předpokladů: $P_0 = 97\,211$ Pa, teplota uvnitř komory $T_a = 282,15$ K je konstantní, hustota vzduchu $\rho_a = 1,19826$ kg/m³ je konstantní, měrná tepelná kapacita při konstantním tlaku $c_p = 1006$ J.kg⁻¹K⁻¹, deformace komory je zanedbána, vzhledem k rychlosti poklesu tlaku je zanedbán tepelný tok přes stěny komory. Na tomto místě je nutné uvést, že i tyto předpoklady vedou k mírnému zkreslení. Nejistota byla vypočtena na základě poměru objemových toků získaných dle (22) a vzorce (24), který vychází ze zápisu (20), kde nebylo použito zjednodušujícího předpokladu $P/P_0 = 1$. Vzorec byl upraven do následující podoby obdobnými kroky jako (22) v kapitole 3.4.

Pokud je tlakový rozdíl na odlehlých stranách vzorku ve sledovaném časovém rozmezí v řádu 100 Pa, je odchylka od uvedeného předpokladu v řádu desetin procent. Pokud je tlakový rozdíl v řádu 1000 Pa, je odchylka od uvedeného předpokladu v řádu jednotek procent. Odchylku výsledků mezi případem, kdy byl zanedbán koeficient P_0/P , a případem, kdy bylo uvažováno se skutečným poměrem P_0/P , dokumentuje tab. 16.

$$\dot{Q}_{(p)} = \frac{V_a}{P} \cdot \frac{dP}{dt} - \frac{V_a}{T} \cdot \frac{P}{P_0 \cdot \left(\rho_a \cdot c_p - \frac{P_0}{T} \cdot \left(\frac{P_0}{P} - 1 \right) \right)} \cdot \frac{dP}{dt} \quad (24)$$

P/P ₀	objemový tok		odchylka
	m ³ /s	m ³ /h	
0,9	4,94E-06	0,0178	3,21 %
0,92	4,98E-06	0,0179	2,51 %
0,94	5,01E-06	0,0180	1,84 %
0,96	5,04E-06	0,0182	1,20 %
0,98	5,07E-06	0,0183	0,58 %
0,99	5,09E-06	0,0183	0,29 %
1	5,10E-06	0,0184	0,00 %
1,01	5,12E-06	0,0184	-0,28 %
1,02	5,13E-06	0,0185	-0,56 %
1,04	5,16E-06	0,0186	-1,09 %
1,06	5,19E-06	0,0187	-1,61 %
1,08	5,21E-06	0,0188	-2,10 %
1,1	5,23E-06	0,0188	-2,57 %

tab. 16: Nejistoty měření při různém poměru P/P₀

Deformace komory

V experimentální části jsou uvedeny výsledky měření deformace objemu komory během měření, viz kapitola 8.1. Deformace použité komory se pohybuje v nižších jednotkách cm³. Pro podrobnější pochopení citlivosti měření a rozsahu byl vypočten objemový tok, který proudí do komory v průběhu sledovaného časového intervalu. Celkový objem přitekly do komory získáme integrací rovnice okamžitého objemového toku (25) podle času v požadovaných mezích, viz zápis (26). Například pro exponenciální křivku poklesu tlaku s parametry a=353,03, b=-1,889, kdy průvzdušnost desky při tlakovém rozdílu 50 Pa je q₅₀ = 0,72 m³/m²h, vychází celkový objem přitekly do komory do času t=1,035 s (tj. čas odpovídající tlakovému rozdílu 50 Pa) Q = 50,9 cm³. Při nižších hodnotách tlakového rozdílu uvnitř a vně komory, řádově do 500 Pa, lze deformaci komory zanedbat. Při vyšších tlakových rozdílech by deformace musela být zohledněna jak v teoretickém modelu, tak v navazujících výpočtech.

$$\dot{Q}_{(t)} = \frac{V_a}{P_0 - p_{(t)}} \cdot \frac{5}{7} \cdot \frac{p_{(t)}}{dt} \quad \text{kde} \quad p_{(t)} = a \cdot e^{bt} \quad (25)$$

$$Q = \left[\frac{5}{7} \cdot V_a \cdot \ln |P_0 \cdot a \cdot e^{bt}| \right]_0^t \quad (26)$$

Z provedených měření na měřicí sestavě d315, která byla pro měření vyhodnocena jako nejvhodnější, se horní hranice měřitelné průvzdušnosti pohybuje mezi 1,5 a 2,0 m³ vztažených na 1 m² při tlakovém rozdílu 50 Pa.

S přihlédnutím k předpokládanému použití ve stavebnictví, a to měření průvzdušnosti OSB desek s plošnou průvzdušností přibližně $0,1 - 1,0 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$, vyhovuje měřicí rozsah zamýšlenému použití. Vlastnosti OSB desek použitých v provedených pokusech jsou uvedeny v tab. 6 v kapitole 6.1.

8. DOPLŇKOVÁ MĚŘENÍ

8.1.DEFORMACE MĚŘENÉHO OBJEMU

V návaznosti na zjednodušení teoretického modelu předmětného měření, kdy byl v rovnici výpočtu objemového toku zanedbán člen zohledňující deformaci komory, bylo provedeno měření mapující deformaci komory v místech, kde se předpokládá největší deformace pláště komory. U válcovitých stěn lze vzhledem k rovnoměrnému zatížení podtlakem během měření předpokládat téměř nulovou deformaci. Deformace zbylých dvou ploch, tj. plochy víka a samotného vzorku, byla měřena za pomoci digitálního úchylkoměru s rozlišitelností 0,01 mm. Úchylkoměr byl umístěn do středu víka, resp. měřeného vzorku (EGGER OSB3 tl. 15 mm). Fotografie dokumentující měření je uvedena na obr. 54. Průhyb byl zaznamenán při dvou úrovních podtlaku uvnitř komory, a to přibližně 360 a 550 Pa. Při nižším tlakovém rozdílu by byl průhyb desky mimo měřitelný rozsah úchylkoměru. Měřený průhyb je uveden v tab. 17. Pro první zjednodušení předpokládejme tvar deformace víka komory ve tvaru kulového vrchlíku. Objem celkové deformace víka komory a vzorku pro tento předpoklad při uvedeném podtlaku uvnitř komory je uveden v tab. 17. Pokud přihlídneme k velikosti objemových toků, které v průběhu měření proudí do komory, viz kapitola 7.5, je ve zkoumaném rozsahu tlakového rozdílu vliv deformace malý. Při větších tlakových rozdílech by bylo nutné uvažovat s deformací komory.

vyvolaný podtlak	průhyb víka komory	objemová deformace víka	průhyb vzorku	objemová deformace vzorku	celková deformace komory	celková deformace komory
Pa	[mm]	[mm ³]	[mm]	[mm ³]	[mm ³]	[cm ³]
360	0,02	779	0,03	1169	1948	1,9
550	0,04	1559	0,06	2338	3897	3,9

tab. 17: Výsledky měření deformace komory



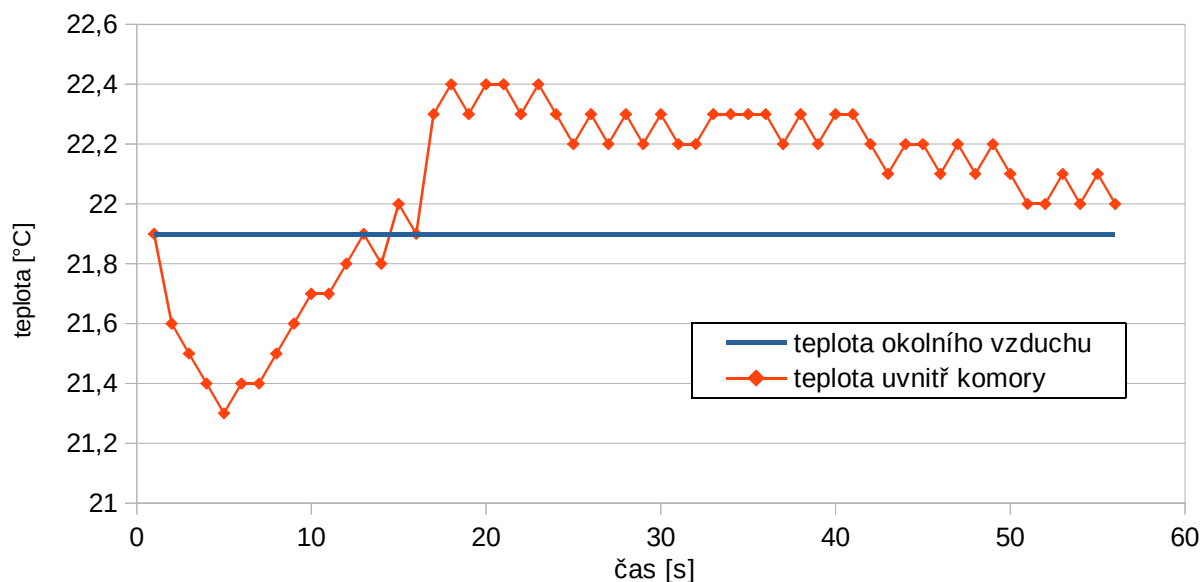
obr. 54: Měření deformace komory

8.2. PRŮBĚH TEPLOT UVNITŘ KOMORY

Teplota uvnitř komory nevstupuje do výpočtového modelu. Teplota vzduchu byla měřena z důvodu bližšího poznání stavu vnitřního prostředí. Výsledkem je záznam teploty uvnitř komory. Měření bylo provedeno při použití komory d200 osazené na vzorek OSB3 KRONOSPAN přes lepicí tmel. Úskalí v měření teploty vzduchu uvnitř komory spočívá ve velmi rychlém průběhu zkoušky, rychle se měnících tlacích uvnitř komory a s tím souvisejícími rychlými změnami teploty vzduchu. Vzhledem k informativnímu charakteru měření byly na přístrojové vybavení kladeny úměrné požadavky. Pro měření teploty byl použit teploměr s odporovým čidlem s velmi nízkou tepelnou kapacitou, foto na obr. 56. Záznam teplot probíhal intervalovým focením displeje měřidla. Na obr. 55 je záznam teploty okolního vzduchu a vzduchu uvnitř komory v průběhu měření.

V čase 0 s byl sepnut ventilátor vývěvy. Postupně se teplota uvnitř komory snižovala, minima $-21,3\text{ °C}$ (tj. rozdíl oproti teplotě před měřením $-0,6\text{ °C}$) dosáhla dle záznamu v čase 5 s po sepnutí vývěvy. Pokles je způsoben snížením tlaku uvnitř komory vlivem nerovnovážného stavu, kdy bylo z komory více vzduchu vysáváno, než bylo přisáváno přes netěsnosti desky. V dalším intervalu 5 s až 17 s došlo k nárůstu teploty až na hodnotu na počátku měření. Tento jev reprezentuje ustálení objemových toků do komory a z komory ven, kdy proudící vzduch do komory má teplotu okolního prostředí. Zvýšení teploty postupuje během cca 2 s až k maximu $22,4\text{ °C}$ (tj. rozdíl oproti teplotě před měřením $0,5\text{ °C}$). Po uzavření ventilu dochází k nárůstu teploty vlivem komprese vzduchu uvnitř komory a dále k postupnému snížení teploty a ostatních stavových veličin na hodnoty okolního prostředí. Při sledování průběhu měřených teplot je důležité mít na paměti jistou tepelnou setrvačnost měřicího čidla, např. lze předpokládat, že maxima a minima teplot budou vyšší, resp. nižší.

Otázky průběhu teplot uvnitř komory se týká také zanedbání tepelného toku přes plášť komory ve výpočtovém modelu, viz vzorec (18). Vzhledem k rychlosti poklesu tlaku uvnitř komory po uzavření ventilu, což potvrzuje i nárůst teploty obr. 55 v čase cca 17 s, nelze předpokládat, že by teplo prostupující přes plášť komory mělo významný vliv na výsledek. Plášť měřicí komory můžeme uvažovat jako adiabatický.



obr. 55: Teploty uvnitř komory během měření

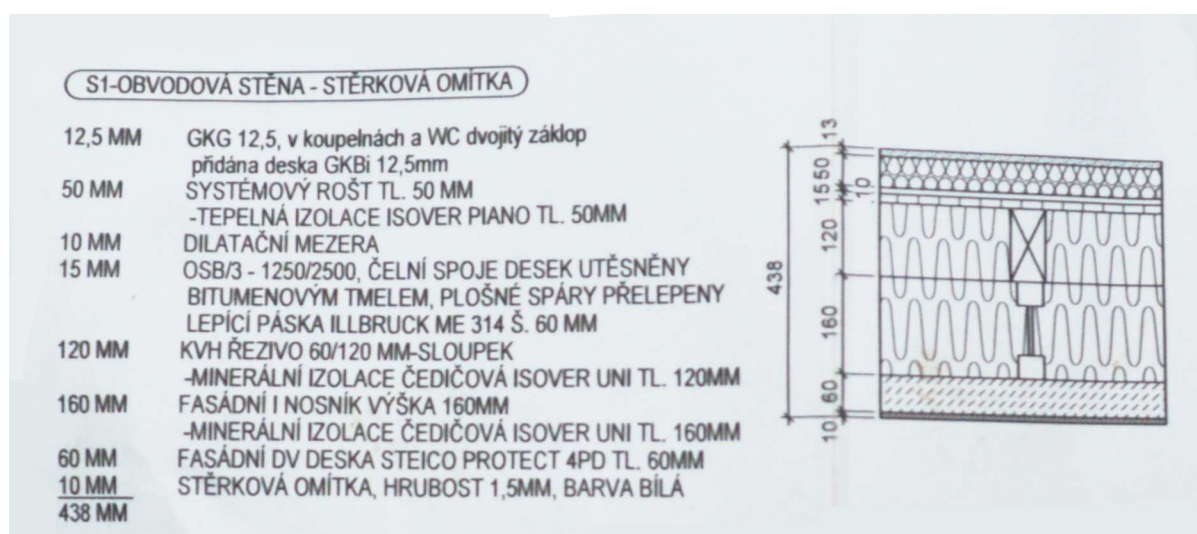


obr. 56: Teplotní čidlo

9. MĚŘENÍ IN SITU RD MEZOUŇ

9.1. STAV OBJEKTU

Pro ověření použitelnosti sestrojeného měřicího zařízení v praxi bylo provedeno měření na objektu rodinného domu v Mezouňi. Objekt je atypická přízemní dřevostavba sloupkového systému, vystavěná letmou montáží (na místě). Hlavní vzduchotěsnicí a současně parotěsnicí vrstvu stěn a střechy tvoří OSB desky tl. 15 mm ve standardu OSB3 od firmy EGGER, spáry desek byly přelepeny vzduchotěsnou páskou. Skladba stěny, na které bylo provedeno měření, je uvedena na obr. 57. Hlavní vzduchotěsnicí vrstvou podlahy jsou pak asfaltové pásy, které tvoří současně hydroizolační vrstvu. Objekt byl ve stavu, kdy bylo možné provést blower door test ve fázi rozestavěnosti, tj. byly provedeny hlavní vzduchotěsnicí vrstvy všech konstrukcí, byla osazena okna a byla opracována veškerá napojení jednotlivých dílců. Nebyly provedeny sádkartonové předstěny a nebyla dokončena fasáda objektu. Stav objektu je patrný z fotografií na obr. 58 až obr. 60.



obr. 57: Skladba stěny objektu dle projektové dokumentace



obr. 58: Pohled na objekt od západu



obr. 59: Pohled na objekt od východu



obr. 60: Pohled do interiéru stavby

9.2. PŘÍPRAVA A PRŮBĚH MĚŘENÍ IN SITU

Měření na stavbě probíhalo ve třech dnech vzhledem k probíhajícímu vývoji osazení měřicí komory na vzorek. V prvním dni byla provedena příprava těsnícího prstence z akrylátového tmelu na dvou místech. Pro měření měla být použita měřicí komora d315, a tak byl připraven prstenec s vnitřním průměrem 310 mm, šíře prstence byla cca 100 mm. Příprava podkladu je patrná z fotografií na obr. 61 a obr. 62.



obr. 61: Příprava těsnícího prstence z akrylátového tmelu



obr. 62: Hotový prstenec z akrylátového tmelu

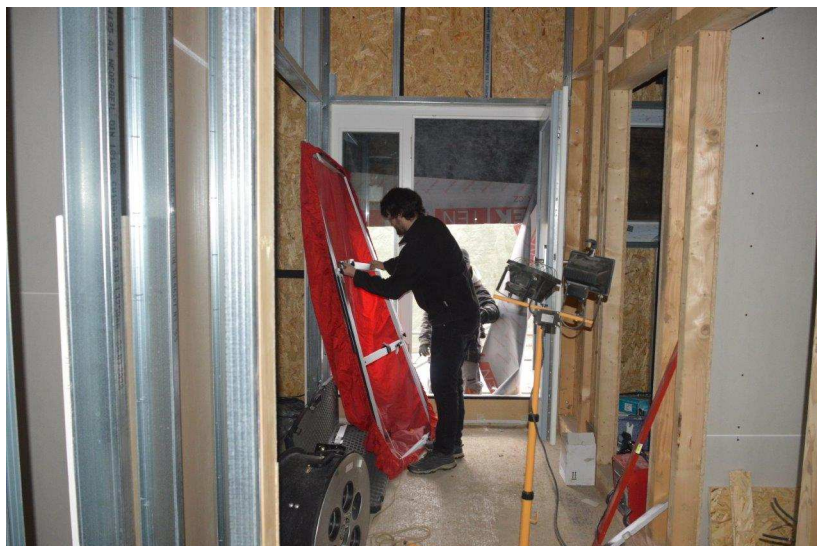
Ve druhém dni, kdy byl akrylátový tmel zavadlý, bylo provedeno měření průvzdušnosti metodou tlakového impulsu a srovnávací měření metodou tlakového spádu. Osazení testovací komory je uvedeno na obr. 63. Metoda tlakového spádu byla provedena za pomoci osazené sady blower door testu ve vstupních dveřích, příprava na osazení ventilátoru na obr. 64. Měření metodou tlakového spádu bylo provedeno na stejné testovací komoře, kde do

víka byla epoxidovým lepidlem vlepena clona z nerezové oceli tl. 1 mm, do které byly laserem vypáleny ostrohranné kruhové otvory průměru od 2 do 4 mm.

Při osazení měřicí komory na vzorek pouze přes akrylátový tmel nebylo možné vyčíslit průvzdušnost vzorku vzhledem k velmi rychlému poklesu tlakového rozdílu uvnitř komory, tj. měřená hodnota ležela mimo rozsah měřicí metody. Při vyvolaném podtlaku uvnitř celé budovy byla tlaková diference mezi interiérem objektu a prostředím uvnitř komory nízká. Z výše uvedeného vyplynulo, že osazení komory je velmi netěsné. Po odsazení komory bylo zjištěno, že komora nedoléhala na prstenec z akrylátového tmelu po celém obvodu. Po opětovném přisazení byla komora k podkladu dolepena vzduchotěsnou páskou Illbruck ME 314. Zkoušené místo po odsazení měřicí komory je na obrázku obr. 65. Výsledky měření v tomto stavu opracování připojovací spáry a jejich porovnání je uvedeno v následující kapitole.



obr. 63: Testovací sada s komorou upnutou na vzorek



obr. 64: Osazování blower door testu do vstupních dveří



obr. 65: Testované místo po odsazení měřicí komory, červenou šipkou označeno místo, kde hrdlo komory bylo mimo prstenec z akrylátového tmelu, vzduchotěsná páska je černá

Vzhledem k tomu, že osazení komory přes akrylátový tmel se ukázalo jako nedostatečně těsné, a také k tomu, že výsledky ukázaly poměrně nízkou těsnost použitých desek, bylo naplánováno měření v dalším dnu, tak aby byla ověřena případná účinnost navrženého nátěru desek latexovým nátěrem.

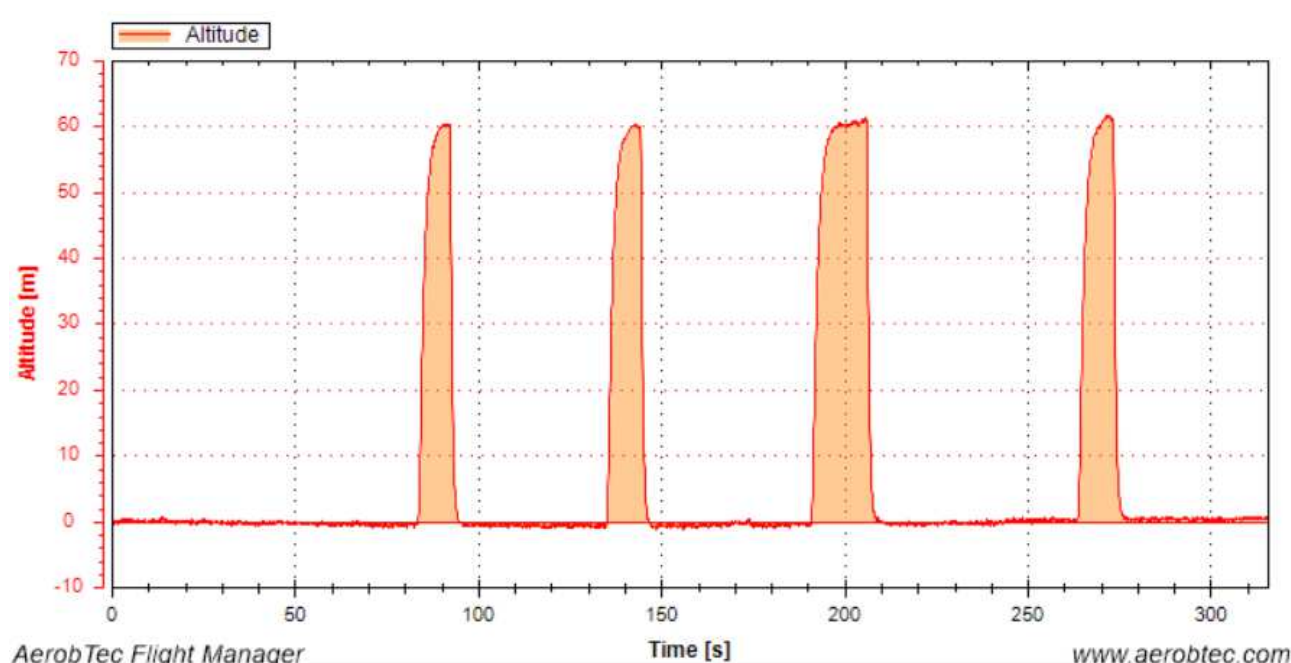
Na třetí den bylo měřené místo zatřeno latexovým nátěrem firmy HET, pro porovnání průvzdušnosti desky před a po provedeném nátěru. Dále byla část plochy desky v jiném místě stavby zatřena latexovým nátěrem firmy HET. Na tomto místě bylo provedeno měření průvzdušnosti OSB desky s neupraveným povrchem a s povrchem natřeným uvedeným nátěrem s přisazením měřicí komory přes těsnicí prstenec z asfaltového pásu, viz obr. 66. Měření ve třetí den byla provedena pouze metodou tlakového impulsu. Výsledky jsou uvedeny v následující kapitole.



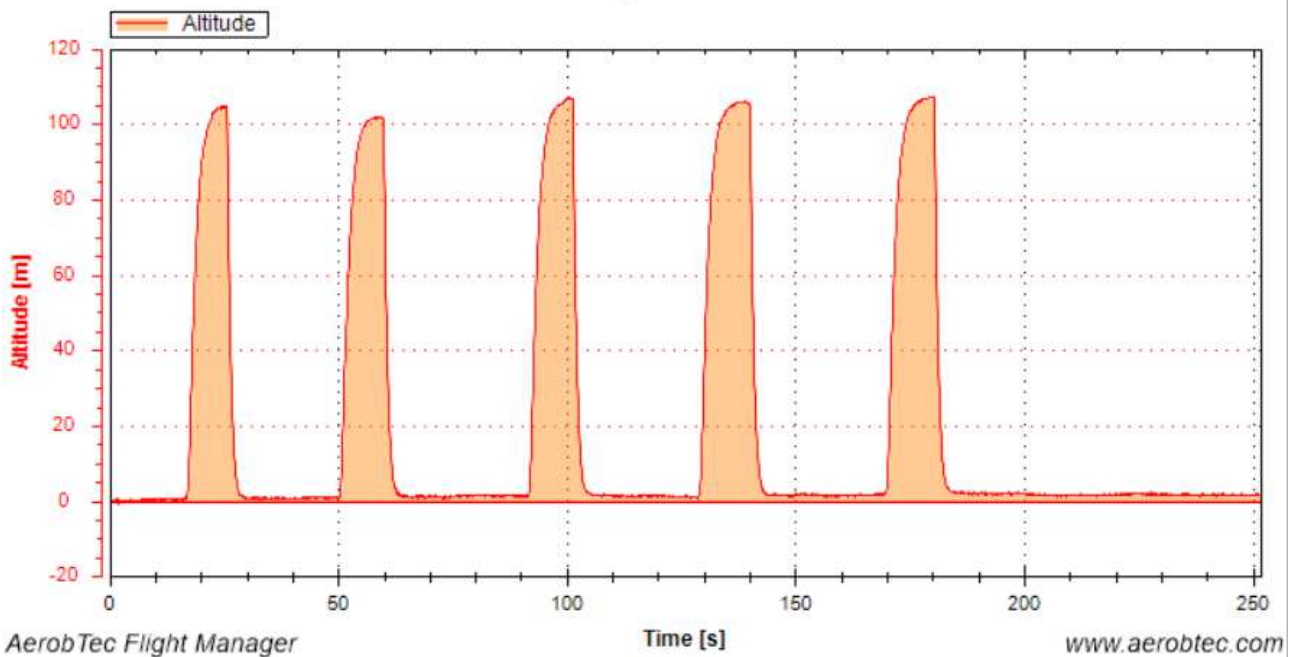
obr. 66: Příprava měřených vzorků

9.3. VÝSLEDKY MĚŘENÍ IN SITU

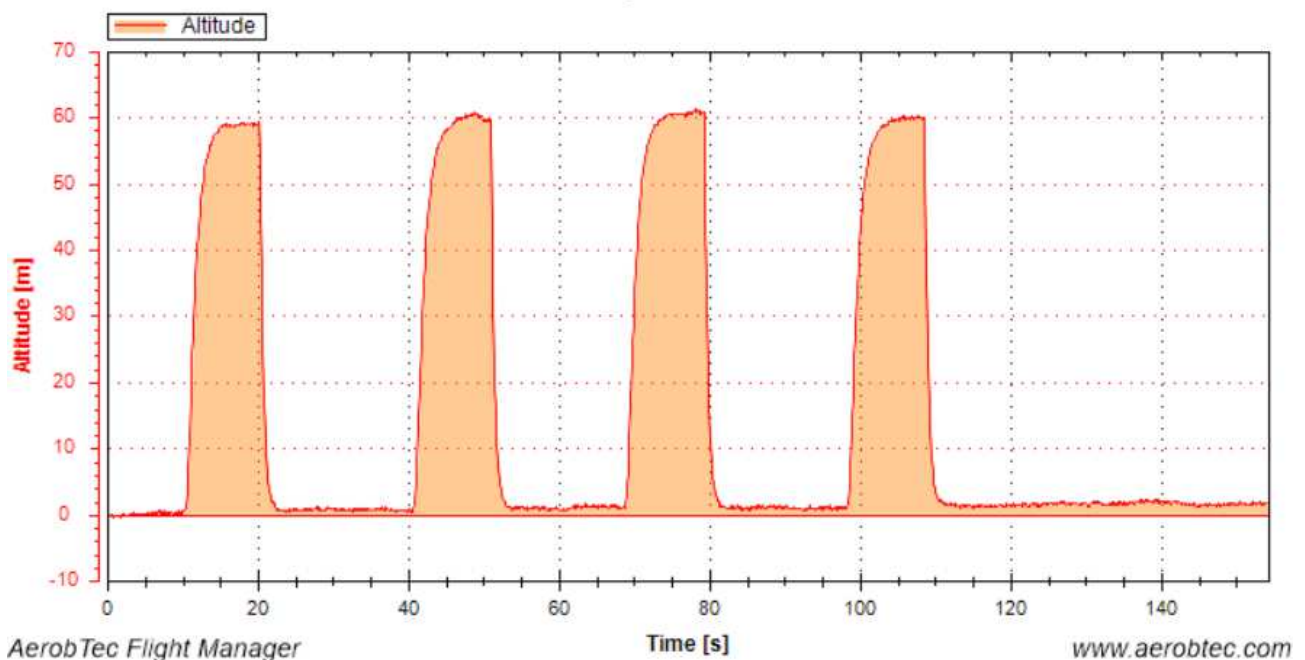
Výstupy z programu Altis flight manager, který zpracovává zaznamenaná data z mikromanometru Altis v4+ osazeného uvnitř měřicí komory, jsou uvedeny na následujících obrázcích. Na obr. 67 je záznam z měření ze druhého dne, kdy byla komora upnuta na neupravenou desku OSB3 firmy EGGER přes prstenec z akrylátového tmelu a dotěsněna vzduchotěsnou lepicí páskou. Měření za stejných podmínek ze třetího dne pouze s deskou s latexovým nátěrem ukazuje obr. 68. Na obr. 69 je záznam z měření ze třetího dne, kdy byla komora upnuta na jiné místo výše uvedené OSB desky bez povrchové úpravy přes prstenec z asfaltového pásu. Záznam z měření natřené desky latexovým nátěrem, kdy byla komora upnuta přes těsnící asfaltový pás, je uveden na obr. 70. Dopočtené hodnoty objemového toku při tlakovém rozdílu 50 Pa jsou uvedeny v tab. 18.



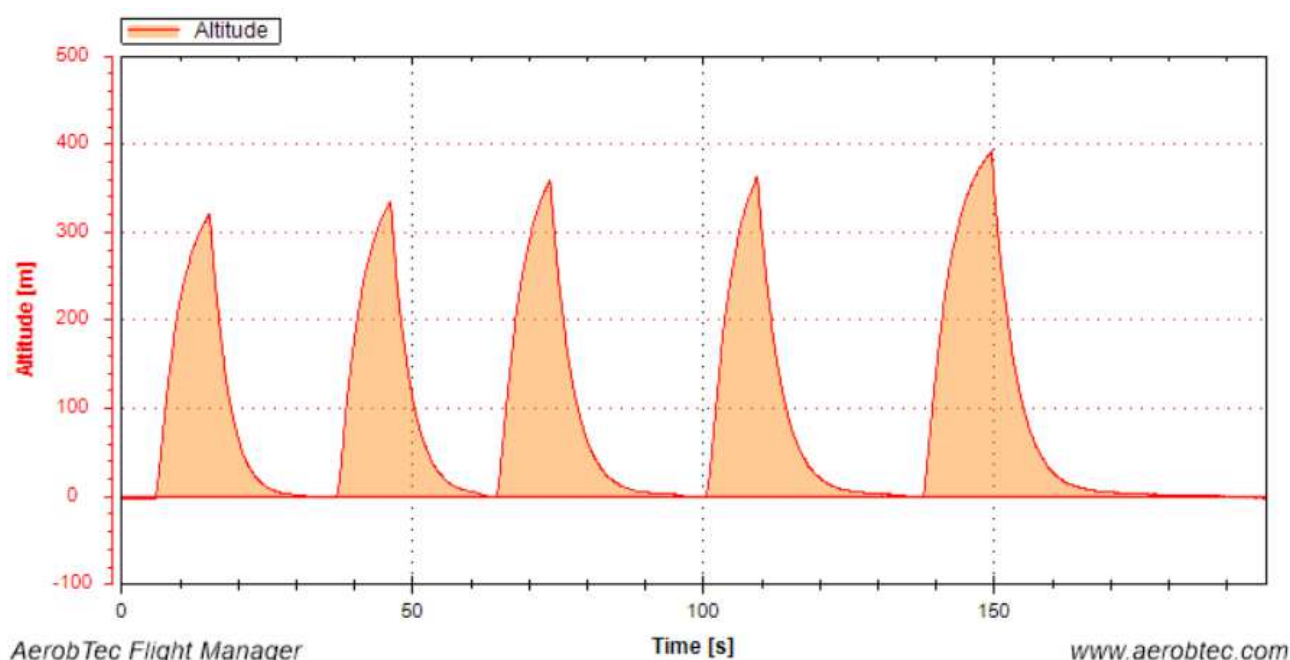
obr. 67: Záznam z tlakoměru uvnitř měřicí komory v průběhu měření neupravené desky metodou tlakového impulsu (komora osazena přes akrylátový tmel a dolepena vzduchotěsnící páskou)



obr. 68: Záznam z tlakoměru uvnitř měřicí komory v průběhu měření desky natřené latexovým nátěrem metodou tlakového impulsu (komora osazena přes akrylátový tmel a dolepena vzduchotěsnící páskou)



obr. 69: Záznam z tlakoměru uvnitř měřicí komory v průběhu měření neupravené desky metodou tlakového impulsu (komora osazena přes asfaltový pás)



obr. 70: Záznam z tlakoměru uvnitř měřicí komory v průběhu měření desky natřené latexovým nátěrem metodou tlakového impulsu (komora osazena přes asfaltový pás)

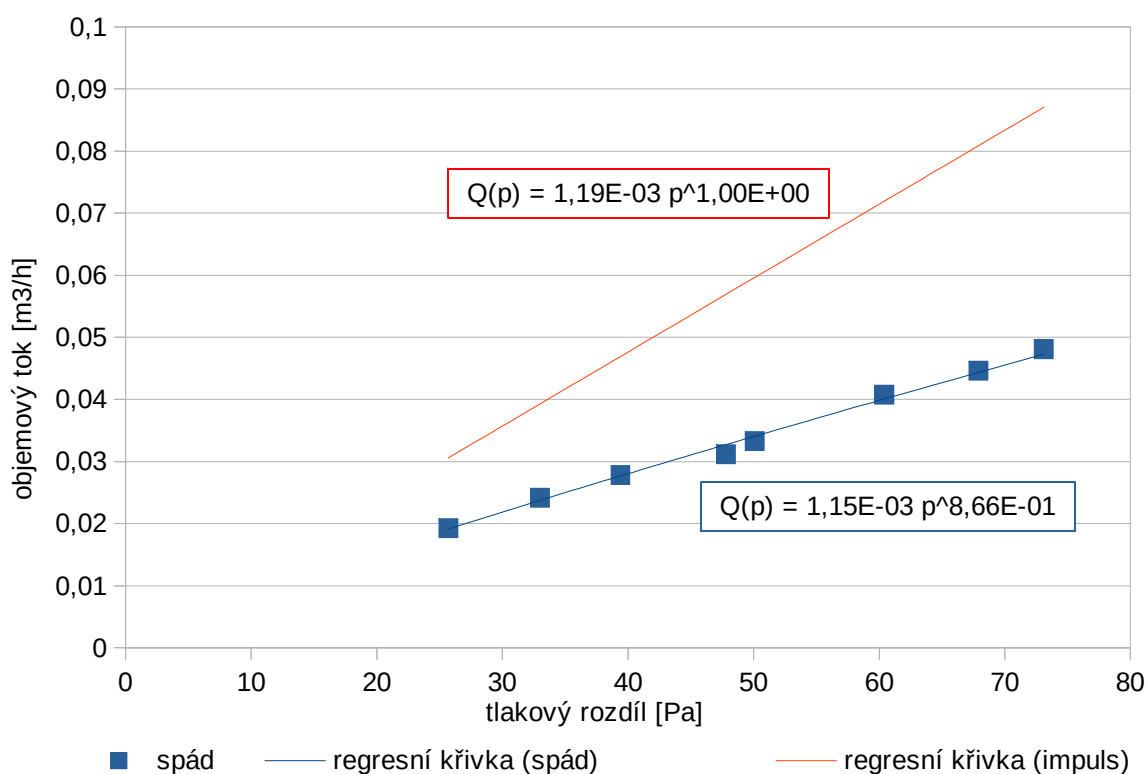
úprava přípojovací spáry	úprava desky	objemový tok do komory při 50 Pa [m ³ /h]	plošná průvzdušnost Q ₅₀ [m ³ /m ² h]	procenta oproti bez vzorku bez úpravy [%]
akrylátový tmel + páska	bez úprav	0,057	0,76	100
akrylátový tmel + páska	latexový nátěr	0,047	0,63	83
asfaltový pás	bez úprav	0,070	0,99	100
asfaltový pás	latexový nátěr	0,006	0,09	9

tab. 18: Výsledky měření průvzdušnosti metodou tlakového impulsu

Body měření provedené metodou tlakového spádu jsou uvedeny v následující tab. 19. Při měření byla použita clona s kruhovým otvorem průměru 2 mm. Pro dopočtení objemového toku byl použit výtokový součinitel $C_p = 0,61$. Z dopočtených hodnot byla za pomoci metody nejmenších čtverců určena regresní křivka, ze které byl stanoven objemový tok clonou. Pokud je komora a přípojovací spára dokonale těsná, je objemový tok clonou roven objemovému toku proudícímu přes měřený vzorek. Dopočtená hodnota objemového toku clonou při tlakovém rozdílu 50 Pa mezi komorou a exteriérem (tlakový rozdíl na měřeném vzorku) byla 0,033 m³/h, pokud hodnotu vztáhneme k ploše 1 m², dostaneme 0,43 m³/m²h.

měřicí bod	tlakový rozdíl interiér – exteriér [Pa]	tlakový rozdíl komora – interiér [Pa]
1	30,4	4,7
2	40,4	7,4
3	49,2	9,8
4	60,1	12,3
5	64,1	14
6	81,4	21
7	93,1	25,2
8	102,4	29,3

tab. 19: Tlakové rozdíly měřené metodou tlakového spádu



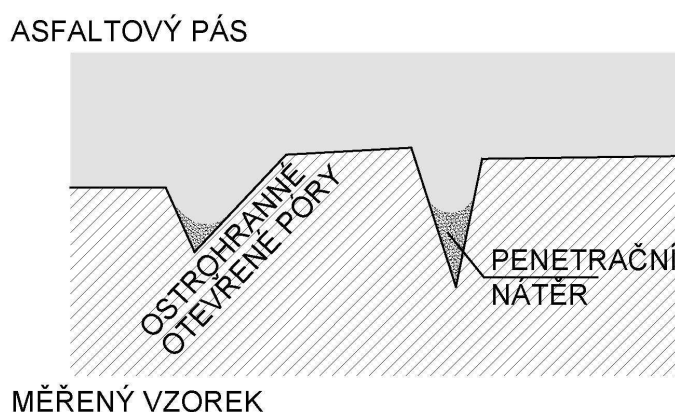
obr. 71: Porovnání výsledků měření objemových toků do komory metodou tlakového spádu a metodou tlakového impulsu

9.4.VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ IN SITU

I přesto, že výsledky měření na reálné stavbě nejsou zcela podle předpokladů, přinášejí při hlubším rozboru zajímavé poznání.

Latexový nátěr jednoznačně přináší snížení průvzdušnosti desek. Z výsledků měření metodou tlakového impulsu, kdy byla komora přisazena na vzorek přes asfaltový pás, lze usuzovat, že těsnost desek je na hranici měřitelnosti, pohybuje se přibližně v úrovni $0,1 \text{ m}^3 / \text{m}^2\text{h}$. Takto upravená připojovací spára zaručuje velmi dobrou těsnost.

V porovnání s měřením OSB desky bez povrchové úpravy s obdobným těsněním připojovací spáry (natavený prstenc z asfaltového pásu) jsou výsledky průvzdušnosti téměř o jeden řád nižší. To mohlo být způsobeno několika důvody, respektive jejich kombinací. Prvním důvodem je zvýšení těsnosti nanesením latexového nátěru. Druhým důvodem je pravděpodobně rozdíl v utěsnění ostrohranných pórů. V případě těsnění pouze pomocí nataveného asfaltového pásu nejsou otevřené ostrohranné póry vhodně utěsněny, zvláště přihlídneme-li k teplotě v průběhu měření a před měřením, která se pohybovala do 5°C. Při takto nízkých teplotách asfalt rychle chladne a tuhne, a to jak na vzduchu, tak při kontaktu s podkladem. Při měření desky natřené latexovým nátěrem byl nanesen nátěr i v oblasti natavení asfaltového pásu, mohlo tedy dojít k lepšímu vyplnění zmiňovaných pórů, viz obr. 72. Třetím důvodem velkého rozdílu mezi měřenými výsledky bylo potlačení bočních toků vzduchu vytvořením těsnicí roviny na straně přisazení komory. Pro zajištění vyšší těsnosti připojovací spáry by bylo vhodné před natavením asfaltového pásu povrch natřít nejlépe silnovrstvým nátěrem na bázi asfaltu, se kterým by se pak natavovaný asfaltový pás spolehlivě spojil. Současně by bylo vhodné použít nátěr, který by nepotřeboval dlouhou technologickou pauzu pro tuhnutí, aby mohla být příprava vzorku a samotné měření provedeny v jeden měřicí den.



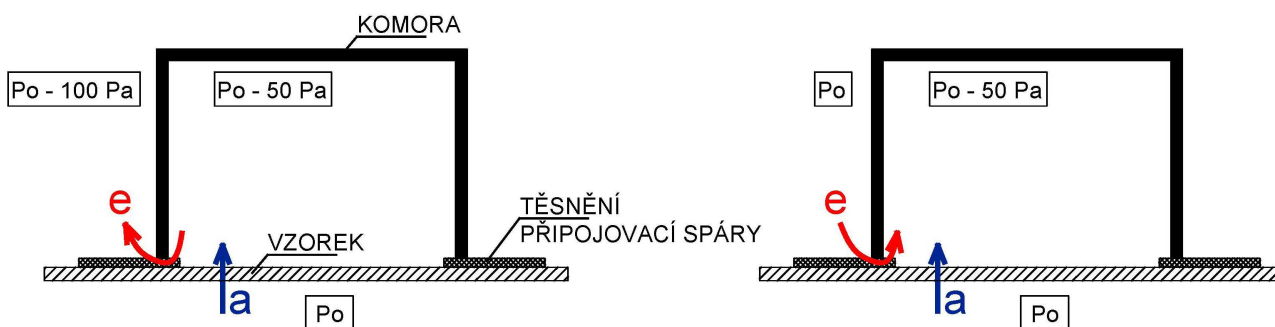
obr. 72: Těsnění připojovací spáry penetračním nátěrem / asfaltovým pásem
(řez vzorkem v tangenciálním směru měřicí komory)

Při měření velmi těsného souboru prvků – komora, připojovací spára, měřený vzorek, tj. měření desky s latexovým nátěrem a utěsněné spáry latexovým nátěrem a asfaltovým pásem, byl používán tlakový rozdíl uvnitř komory vysoko nad hodnotami, které umožňují zanedbat některé jevy, např. vliv deformace komory a přestup tepla z pláště komory. Dále také nedošlo před uzavřením ventilu (před poklesem tlakového rozdílu) k ustálení tlaků uvnitř komory. Z tohoto důvodu je nutné regulovat výkon vývěvy, resp. osadit na trubici od vývěvy škrťací prvek, kterým by bylo možné regulovat maximální tlakový rozdíl uvnitř komory.

Při měření s osazením vzorků přes těsnicí vrstvu je nutné volit menší vnitřní průměr těsnicího prstence. Při vytvoření prstence s vnitřním průměrem téměř nebylo možné komoru osadit tak, aby dosedla na těsnicí vrstvu v celé délce obvodu hrdla, jako vhodný se ukázal vnitřní průměr těsnicího prstence 300 mm pro zkušební komoru d315, který má vnitřní průměr 315 mm.

Porovnání dvou výsledků měření desek bez povrchové úpravy může vést k úvaze, že osazení pouze přes prstenc z asfaltového pásu je méně těsné než osazení přes akrylátový tmel s dotěsněním vzduchotěsnou páskou. Vzhledem k nehomogenním vlastnostem desek nelze jednoznačně určit, zda je rozdílnost výsledků dána opracováním připojovací spáry.

Při vytvoření podtlaku uvnitř budovy byl sledován také tlakový rozdíl mezi prostředím uvnitř komory a v interiéru objektu. V případě, že by byly komora a připojovací spára ideálně těsná, by byl tlakový rozdíl nulový. Tento stav i přes dotěsnění připojovací spáry komory vzduchotěsnou lepicí páskou nenastal, lze tedy předpokládat, že připojovací spára vykazovala drobné netěsnosti. Na tuto skutečnost ukazuje i porovnání výsledků získaných měřicí metodou tlakového spádu a tlakového impulsu. Při metodě tlakového impulsu se netěsnost spáry ukáže jako zvýšení hodnoty objemového toku (přes připojovací spáru je přisáván vzduch z interiéru budovy do komory). Naopak při použití metody tlakového spádu se netěsnost spáry ukáže jako snížení hodnoty objemového toku – přes připojovací spáru je vzduch z komory přisáván do interiéru objektu, mezi komorou a interiérem objektu je menší tlakový spád, a tedy menší dopočtený objemový tok, který proudí přes clonu a který se předpokládá roven průtoku vzduchu přes měřený vzorek. Rozdílná situace u dvou metod měření je znázorněna na obr. 73. Skutečnou hodnotu průvzdušnosti měřeného vzorku bez vlivu bočních cest přes připojovací spáru lze očekávat mezi měřenými hodnotami, tj. 0,43 – 0,76 m³/m²h (do této hodnoty však budou zahrnuty ostatní boční toky vzduchu realizované měřeným vzorkem).



obr. 73: Porovnání směru proudění přes připojovací spáru (vlevo metoda tlakového spádu, vpravo metoda tlakového impulsu)

Vliv bočních cest byl u desek OSB3 výrobce EGGER odhadnut přibližně na 10 %, tedy skutečná průvzdušnost této desky bude pravděpodobně mezi 0,39 a 0,68 m³/m²h. Snížení průvzdušnosti desky vlivem latexového nátěru můžeme předpokládat mezi 0,29 a 0,58 m³/m²h, velmi pravděpodobně se nebude snížení blížit jednomu ani druhému extrému uvedených hodnot.

10. ZÁVĚR

V rámci této práce bylo vyvíjeno zařízení pro měření průvzdušnosti tuhých deskových materiálů. Zařízení by mělo umožnit měření přímo na stavbě, a to jak v úvodní fázi stavby (např. při přejímce dodaných desek), tak ve fázi hrubé stavby, kdy by toto dílčí měření mohlo sloužit jako doplňková informace pro měřiče, který bude provádět nebo vyhodnocovat zkoušku průvzdušnosti obálky celého objektu. Měřicí zařízení najde využití ve výzkumné sféře při optimalizaci některých stavebních detailů z pohledu vzduchotěsnosti. Při dalším rozpracování a zohledněním materiálových vlastností měřených vzorků lze na základě měření například určit změnu únosnosti deskových stavebních materiálů atd.

Postupným vývojem a optimalizací bylo sestrojeno zařízení z běžně dostupných komponent, které vyhovuje zamýšlenému využití pro měření vzduchotěsnosti OSB desek používaných ve stavebnictví v pozici vzduchotěsnicí vrstvy. Základními komponenty jsou těsná komora s dostatečnou tuhostí pláště, mikromanometr se záznamníkem s vysokou vzorkovací frekvencí a vývěva s možností regulace výkonu. Pro plášť komory byly použity tvarovky z neměkčeného PVC, běžně používaného pro zemní vedení kanalizačního potrubí. Pro měření tlaku uvnitř komory bylo použito elektronické zařízení Altis v4+, které má vzorkovací frekvenci 10 Hz a rozlišitelnost 1 Pa. Běžně se tento tlakoměr používá pro záznam letu RC modelů letadel. Jako vývěva byl použit domácí vysavač s regulací výkonu. Podrobnější popis sestrojeného zařízení je uveden v kapitole 5.3. Výrobní náklady na měřicí zařízení jsou nízké. Cena materiálu na sestavení testovací komory se pohybuje okolo 3000 Kč. Samostatnou položkou je vývěva, kterou lze pořídit také řádově za tisícikoruny nebo lze použít průmyslového vysavač, který je na stavbě běžně využíván. To činí z měřicího zařízení dostupný přístroj, který pro kontrolu kvality dodaného materiálu může vlastnit každá stavební firma, která se specializuje na dřevostavby.

Zařízení funguje na principu metody tlakového impulsu, kdy je uvnitř zkušební komory vyvolán podtlak a následně je zaznamenáván pokles tlakového rozdílu. Teoretický základ metody je uveden v kapitole 3.4. Pro zjednodušení principu měření byly z komplexního teoretického základu odstraněny některé členy, které mají při vhodné konstrukci zařízení a vhodném rozsahu měření zanedbatelný vliv na výsledek, resp. na nejistotu měření. Těmto vlivům byl věnován prostor v rámci provedených experimentů a v podobě teoretického studia dané problematiky. Snahou bylo omezení těchto zkreslujících vlivů vhodnou konstrukcí měřicí sestavy. Mezi tyto vlivy lze zařadit deformaci objemu měřicí komory způsobenou působením tlakového rozdílu na stěny komory, tepelná výměna mezi stěnami

komory a vnitřním objemem vzduchu komory a vliv zjednodušujícího předpokladu $P/P_0 = 1$. Všechny tyto uvedené vlivy klesají s použitím nižších tlakových rozdílů uvnitř komory v průběhu měření. Proto je vhodné používat maximální tlakové rozdíly v komoře přibližně do 500 Pa.

Součástí práce bylo provedení řady zkušebních měření, které prověřovaly použitelnost v praxi. Samostatná kapitola 6.2 je věnována pokusům zkoumajícím vliv osazení komory na vzorek. Část poznání vyplynula i z provedeného měření in situ na reálné stavbě, které je popsáno v kapitole 9. V těchto pokusech byly zkoumány různé způsoby osazení vzorku na desku, vliv velikosti vzorku na výsledek měření a různé způsoby těsnění připojovací spáry. Z provedených pokusů se jako nejpřesnější jeví osazení vzorku do hrdla komory. Tento způsob osazení však není pro praktické měření vhodný vzhledem k časové náročnosti přípravy vzorku, zavadnutí těsnicího materiálu v připojovací spáře a demontáži vzorku z hrdla komory. Jedná se také o destruktivní zkoušku, kterou není vhodné provádět na reálné stavbě. Způsob osazení komory k měřenému vzorku přilepením nebo dotlačením přes těsnicí vrstvu s sebou nese vždy menší nebo větší vliv bočních toků vzduchu. U těsnějších desek je vliv bočních cest vyšší, u méně těsných naopak nižší. Jako nejvhodnější řešení připojovací spáry se ukázalo natření oblasti připojovací spáry penetračním nátěrem a natavení prstence z asfaltového pásu. Komora je pak k vzorku dotlačena alespoň 8 vruty do dřeva. Výsledky provedených měření mimo jiné ukázaly významnou variabilitu při měření v různých místech vzorku. Pokud by měření mělo zjistit přesnou hodnotu, bylo by vhodné provádět jej na více místech vzorku, aby vypočtená střední hodnota co nejlépe reprezentovala skutečnou průvzdušnost desky.

Použitá metoda měření vyvolaným tlakovým impulsem byla verifikována v několika zahraničních studiích např. [8], [30], které se specializovaly na poněkud jiné využití měřicí metody. V článku [8] byla metoda používána pro měření průvzdušnosti celého objektu a byla verifikována porovnáním s běžně používaným měřením metodou tlakového spádu s externím ventilátorem (blower door test). Článek [30] se zabývá porovnáním výsledků získaných měřicí metodou tlakového impulsu s výsledky získanými teoretickým modelem. Uvedený článek se zabývá pouze měřením a výpočtem průtoku vzduchu skrz definovaný otvor v jinak vzduchotěsném materiálu. Z porovnání výsledků obou uvedených studií vychází metoda měření za pomoci tlakového impulsu jako metoda vhodná pro zamýšlené použití, která poskytuje výsledky s dobrou shodou v porovnání se srovnávacím modelem, resp. obvyklou měřicí metodou.

Co do experimentů byly provedeny pilotní pokusy, které vedly k prvním krokům optimalizace. Do budoucna by bylo vhodné podrobněji prozkoumat vliv bočních cest při měření na stavbě, kdy je komora přisazena k měřenému vzorku. Dále by bylo vhodné testovat zařízení při vyvolaném přetlaku uvnitř komory, aby měření navazovalo na principy měření celkové průvzdušnosti obálky budovy. Hlubší studium zkreslujících vlivů, např. deformace komory a tepelná výměna přes stěny komory, by také mohlo dopomoci k vyšší přesnosti měřicího zařízení.

V současné době probíhá řízení zápisu sestrojeného měřicího zařízení do registru patentů a užitných vzorů spravovaného Úřadem průmyslového vlastnictví.

Seznam použité literatury:

- [1] PEŠTA, Jan, David TESAŘ a Viktor ZWIENER. *Diagnostika staveb: hydroizolace, termografie, blower door test, akustika*. 2. vyd. [Praha]: Dektrade, 2014. ISBN 978-80-87215-15-9.
- [2] NOVÁK, J. *Vzduchotěsnost obvodových plášťů budov*. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-1953-5.
- [3] *Tepelná ochrana historických budov ...: Praha ... : sborník odborných příspěvků z konference*. Praha: Česká stavební společnost ČSVTS, odborná skupina pro sanace a rekonstrukce staveb, 2005.
- [4] Webová stránka <http://www.zstv.cz/testovani-vyrobku/blowerdoor> dostupná 1.5.2021
- [5] POKORNÝ, M. 2014. *Požární bezpečnost staveb: sylabus pro praktickou výuku*. Praha: Vydavatel České vysoké učení technické. 2014. 111 s. ISBN 978-80-010-5456-7.
- [6] KRONVALL, J. *Airtightness - measurements and measurement methods*. Stockholm. Vydal: Swedish Council for Building Research. 1980. 64 s. ISBN 91-540-3201-6.
- [7] STEHLÍK, M. HERMÁNKOVÁ, V. VÍTEK, L. *Opening of microcracks and air permeability in concrete*. Journal of Civil Engineering and Management. 2015.
- [8] MATTSSON, B. CLAESSON, J. *A transient pressurization method for measurements of airtightness*. Journal of building physics. 2007. 35-53 s. ISSN 1744-2591.
- [9] SHERMAN, M. H., MODERA, M. P. *Low frequency measurements of the leakage of enclosures*. Rev. Sci. Inst. 57, 1986 and LBL report 20121
- [10] 8. *Internationales BUILDAIR-Symposium. Die Bautechnik: sborník příspěvků*. 2013, vol. 90, no. 6. ISSN 0932-8351.
- [11] DVOŘÁK, J. *Analýza vhodnosti použití OSB desek jako hlavní vzduchotěsnící vrstvy v dřevostavbách. Sborník článků 17. odborná konference doktorského studia - elektronická forma*. 2015. ISBN 978-80-214-5091-2

- [12] NOŽIČKA, J. *Dynamika plynů*. Praha. Vydal: Česká technika - nakladatelství ČVUT. 2005. 155 s. ISBN 80-01-03300-7.
- [13] *Průvodce kurzy fyziky katedry fyziky povrchů a plazmatu*. Dostupné online dne 19.1.2016. http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS
- [14] KHEILOVÁ, Milena. *Termodynamika*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 1998. ISBN 80-214-0997-5
- [15] HAŠEK, P. *Tabulky pro tepelnou techniku: skripta*. Ostrava. Vydal: Vysoká škola báňská. 1980.
- [16] REISEL, John R. a Keith MCIVER. *Principles of engineering thermodynamics*. SI edition. Boston: Cengage Learning, [2016]. ISBN 978-1-285-05648-7
- [17] SVOBODA, L. a kolektiv autorů. *Stavební hmoty*, Bratislava. Vydal: Jaga group. 2007. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [18] HALL, CH; HOFF W. D. *Water transport in brick, stone and concrete*. Oxon. Vydal: Taylor & Francis. 2002. 318 s. ISBN 0-419-22890-5.
- [19] ZWIENER, V. *Chemické injektážní metody pro ochranu zděných konstrukcí proti vztlínající vlhkosti - disertační práce*. 2006.
- [20] Zahradníček V., Horák P., *Moderní dřevostavby*, vydavatelství ERA Brno, 2007, ISBN 978-80-7366-109-0
- [21] Josten E., Reiche T., Wittchen B. *Dřevo a jeho obrábění*, Grada publishing, a.s., 2010, ISBN 978-80-247-2961-9
- [22] *Webové stránky firmy Kronospan* <https://cz.kronospan-express.com/cs/products> - kronobuild / OSB airstop
- [23] Thelandersson S., Larsen H. J., *Timber Engineering*. John Wiley& Sons, LTD, 2003, ISBN 0-470-84469-8
- [24] *Návod na použití výškoměru Altis v4* vydaný firmou AerobTec, s.r.o. dostupný online na <https://aerobtec.com/altis-v4/> - user manual

- [25] Bosch Sortec GmbH, *BMP280 - Data sheet*. revision 1.23, 2020, BST - BMP-DS001-23
- [26] Webová stránka výrobce Bosch, senzor BMP 280
<https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/pressure-sensors/>
- [27] Prohlášení o vlastnostech výrobce Egger Holzwerkstoffe Wiesmar GmbH pro desku EGGER OSB 3 EO, č. DOP-734-01 dostupné online 1.3.2021 na https://www.egger.com/shop/cs_SK/building/product-detail/OSB3
- [28] Prohlášení o vlastnostech výrobce Egger Holzwerkstoffe Wiesmar GmbH pro desku EGGER OSB 4 TOP, č. DOP-734-03 dostupné online 1.3.2021 na https://www.egger.com/shop/cs_SK/building/product-detail/OSB4TOP
- [29] Prohlášení o vlastnostech výrobce KRONOSPAN OSB, spol s r.o. č. OSB3-CPR-2013-07-01 dostupné online 1.3.2021 na <https://www.kaplanpraha.cz/media/cache/file/53/OSB3-prohlaseni-o-vlastnostech.pdf>
- [30] NISHIOKA, T.; CHEN Q. et al. *Unsteady pressurization method to measure the airtightness of the building envelope*, 2003
- [31] JANKO, Luboš. *Tabulky mezinárodní standardní atmosféry*. Praha: České vysoké učení technické, 1994. ISBN 80-01-01068-6.