

Česká zemědělská univerzita v Praze

Fakulta lesnická a dřevařská

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů



**Fakulta lesnická
a dřevařská**

Analýza vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb

Diplomová práce

Autor: Bc. Vojtěch Švejda, Dis.

Vedoucí práce: Ing. Miloš Pavelek, Ph.D.

2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Vojtěch Švejda, DiS.

Dřevěné konstrukce a stavby na bázi dřeva

Název práce

Analýza vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb

Název anglicky

Analysis of the Airtightness of Timber-Based Buildings

Cíle práce

Cílem práce je zjištění vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb. Práce bude rozdělena na teoretickou část, kde budou popsány konstrukční možnosti, zásady a problematika panelových dřevostaveb. Součástí budou používané metody měření vzduchotěsnosti s ohledem na platnou legislativu. Teorie bude obsahovat používané materiály pro vzduchotěsnící rovinu, zjištění problematických míst a detailů v konstrukci a detekce případných netěsností a následné možnosti oprav. Praktická část práce bude zaměřena na analýzu měření vzduchotěsnosti pomocí tzv. Blower-door testu (test vzduchotěsnosti stavby) na třech stavbách na bázi dřeva. Výstupem praktické části práce bude souhrn doporučených pravidel pro (1) návrh, (2) výrobu a následnou (2) montáž na stavbě s ohledem na vzduchotěsnost konstrukce dle platných norem.

Metodika

- Literární rešerše
- Analýza měření vzduchotěsnosti na třech stavbách na bázi dřeva
- Zjištění problematických míst v konstrukci a návrh následných oprav
- Výsledky a diskuze
- Závěr

Harmonogram práce:

- červenec – říjen 2023: literární rešerše, příprava podkladů na měření vzduchotěsnosti (projektová dokumentace, konstrukční skladby, prostupy obvodovou konstrukcí)
- listopad – leden 2024: měření vzduchotěsnosti na třech stavbách na bázi dřeva,
- únor – březen 2024: analýza a vyhodnocení naměřených dat, příprava doporučených pravidel pro (1) návrh, (2) výrobu a následnou (3) montáž na stavbě

- duben 2024: odevzdání závěrečné práce



Doporučený rozsah práce

40 – 60 normostran textu + přílohy

Klíčová slova

Konstrukční systém na bázi dřeva; Blower-door test; doporučená pravidla pro návrh; diagnostika staveb.

Doporučené zdroje informací

ČSN EN ISO 9972 Tepelné chování budov – Stanovení průvzdušnosti budov – Tlaková metoda, 2017

ČSN 73 0540 – 2 Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky, ČNI, 2011

HAZUCHA, Juraj. Konstrukční detaily pro pasivní a nulové domy: doporučení pro návrh a stavbu. První vydání. Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 9788024745510;8024745518;.

HERZOG, Thomas. Timber construction manual. Boston: Birkhäuser, 2004. ISBN 978-3-7643-7025-1.

KOLB, Josef. Dřevostavby: systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště. Vyd. 3., přeprac. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2275-7.

NOVÁK, Jiří. Vzduchotěsnost obvodových plášťů budov. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-1953-5.

PAVLAS, Marek. Dřevostavby z vrstvených masivních panelů: Technologie CLT [online].1. elektronické vydání. Praha: Grada, 2016. ISBN 8027100550.

RŮŽIČKA, Martin. Moderní dřevostavba. Third edition. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3298-5.

TNI 73 0329 Zjednodušené výpočtové hodnocení a klasifikace obytných budov s velmi nízkou potřebou tepla na vytápění – rodinné domy, 2010

TYWONIAK, Jan. Nízkoenergetické domy 3: nulové, pasivní a další. Praha: Grada, 2012. Stavitel. ISBN 978-80-247-3832-1.

Předběžný termín obhajoby

2023/24 LS – FLD

Vedoucí práce

Ing. Miloš Pavelek, Ph.D.

Garantující pracoviště

Katedra zpracování dřeva a biomateriálů

Elektronicky schváleno dne 25. 6. 2023

doc. Ing. Roman Fojtík, Ph.D.

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 28. 7. 2023

prof. Ing. Róbert Marušák, PhD.

Děkan

V Praze dne 21. 01. 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma: Analýza vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb vypracoval samostatně a citoval jsem všechny informační zdroje, které jsem v práci použil, a které jsem rovněž uvedl na konci práce v seznamu použitých informačních zdrojů.

Jsem si vědom, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů, ve znění pozdějších předpisů, především ustanovení § 35 odst. 3 tohoto zákona, tj. o užití tohoto díla.

Jsem si vědom, že odevzdáním diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, a to i bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Svým podpisem rovněž prohlašuji, že elektronická verze práce je totožná s verzí tištěnou a že s údaji uvedenými v práci bylo nakládáno v souvislosti s GDPR.

V Praze dne 5.4.2024

Podpis autora

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu své diplomové práce panu Ing. Miloši Pavelkovi, Ph.D. za jeho čas strávený při konzultacích, profesionální přístup, ochotu, trpělivost a odborné a cenné rady, které vedly k vypracování této práce.

Dále bych rád poděkoval panu Ing. Františku Volmutovi za pomoc při řešení technologických postupů výroby a montáže dřevostaveb z celostěnových panelů.

Nezpochybnitelný dík náleží společnosti PILA MARTINICE s.r.o., zastoupenou panem Ing. Michalem Zemanem, Ph.D. za poskytnuté rady a podklady pro účely této práce. Také bych rád poděkoval Výzkumnému a vývojovému ústavu dřevařskému v Praze, s.p., zastoupeného panem Ing. Jiřím Břichem za možnost účasti na provádění testů průvzdušnosti staveb a za poskytnuté podklady do této práce.

Analýza vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá problematikou zajištění vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb. Hlavním cílem práce je analýza vzduchotěsnosti třech staveb na bázi dřeva, zpracování konstrukčních detailů z hlediska zajištění vzduchotěsnosti a zpracování souhrnu doporučených pravidel pro návrh, výrobu a montáž s ohledem na vzduchotěsnost konstrukcí dle platných norem.

Práce vymezuje oblast panelových dřevostaveb, historii vývoje, jejich rozdělení dle různých kritérií a výrobní a montážní postupy dřevostaveb z celostěnových panelů. Dále se zaměřuje na problematiku vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb, metody jejího měření, používané materiály pro vzduchotěsnící rovinu, příčiny a typy netěsností a metody jejich měření a detekce.

Metodika práce spočívá v provedení literární rešerše, měření vzduchotěsnosti pomocí metody tlakového spádu s externím ventilátorem (blower-door test) na třech stavbách na bázi dřeva, zpracování konstrukčních detailů a shrnutí doporučených pravidel pro návrh, výrobu a montáž s ohledem na vzduchotěsnost konstrukce.

Hlavními výsledky práce jsou analýza naměřených hodnot vzduchotěsnosti třech staveb na bázi dřeva včetně identifikace nejčastějších míst netěsností, zpracované konstrukční detaily a souhrn doporučených pravidel pro zajištění vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb z celostěnových panelů v souladu s platnými normami.

Přínos práce spočívá v uceleném pohledu na problematiku vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb, poskytnutí praktických doporučení pro návrh, výrobu a montáž s ohledem na vzduchotěsnost konstrukcí dle platných norem a analýze vzduchotěsnosti třech staveb na bázi dřeva s identifikací netěsností v konstrukci. Velkým přínosem práce jsou poté zpracované konstrukční detaily, které reprezentují ta nejkomplicovanější místa pro zajištění vzduchotěsnosti a nabízí řešení, jak je možné vzduchotěsnost v těchto kritických místech zajistit. Práce může sloužit jako podklad pro všechny zúčastněné strany realizované stavby a přispět tím ke snížení rizika vzniku nežádoucích netěsností a konstrukčních vad, které by mohly negativně ovlivnit vzduchotěsnost dřevostavby.

Klíčová slova – Konstrukční systém na bázi dřeva, Blower-door test, doporučená pravidla pro návrh, diagnostika staveb.

Analysis of airtightness of prefabricated wooden buildings

Abstract

This thesis deals with the issue of ensuring airtightness of wooden panel constructions. The main objective of the thesis is to analyse the airtightness of three timber-based buildings, to process the structural details from the point of view of ensuring airtightness and to elaborate a summary of recommended rules for design, production, and assembly with respect to the airtightness of structures according to valid standards.

The thesis defines the area of prefabricated wooden panel constructions, history of development, their division according to various criteria and production and assembly procedures of timber buildings made of full-wall panels. Furthermore, it focuses on the issue of airtightness of wooden panel constructions, methods of its measurement, materials used for the airtight plane, causes and types of leakages and methods of their measurement and detection.

The methodology of the thesis involves literature review, airtightness measurement using the pressure drop method with an external fan (blower-door test) on three timber-based buildings, processing construction details, and summarizing recommended rules for design, production, and assembly regarding the airtightness of the structure.

The main results of the thesis are the analysis of the measured values of airtightness of three timber-based buildings, including the identification of the most common leakage points, elaborated construction details and a summary of recommended rules for ensuring the airtightness of wooden panel buildings made of full-wall panels in accordance with valid standards.

The contribution of the thesis lies in a comprehensive view of the issue of airtightness in wooden panel buildings, providing practical recommendations for design, production, and assembly with respect to the airtightness of structures according to valid standards and analysis of the airtightness of three timber-based buildings with the identification of construction leakages. A great benefit of the work is the elaborated construction details, which represent the most complicated places for ensuring airtightness and offer solutions on how to ensure airtightness in these critical places. The work can serve as a basis for all parties involved in the construction and thus contribute

to reducing the risk of undesirable leakages and construction defects that could negatively affect the airtightness of the wooden building.

Keywords – Timber-based construction system, Blower-door test, recommended rules for design, diagnostics of buildings.

OBSAH

NÁZVOSLOVÍ	18
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	18
1. ÚVOD.....	15
2. CÍL PRÁCE	17
3. LITERÁRNÍ REŠERŠE	18
3.1. PANELOVÉ DŘEVOSTAVBY	18
3.2. HISTORIE A VÝVOJ PANELOVÝCH DŘEVOSTAVEB	18
3.3. ROZDĚLENÍ PANELŮ DŘEVOSTAVEB.....	20
3.3.1. Rozdělení podle účelu použití:	20
3.3.2. Rozdělení podle průvzdušnosti konstrukce:	20
3.3.3. Rozdělení podle rozměrů:.....	20
3.4. SOUČASNÁ VÝROBA PANELOVÝCH DŘEVOSTAVEB, STROJNÍ ZAŘÍZENÍ POUŽÍVANÉ PŘI JEJICH VÝROBĚ.....	22
3.4.1. Výroba modulových panelů.....	23
3.4.2. Výroba celostěnových panelů.....	24
3.4.3. Strojní zařízení používané při výrobě celostěnových panelů	26
3.5. MONTÁŽNÍ POSTUP DŘEVOSTAVBY Z CELOSTĚNOVÝCH PANELŮ	27
3.6. VZDUCHOTĚSNOST	31
3.6.1. Difuzně uzavřené konstrukce.....	33
3.6.2. Difuzně otevřené konstrukce	34
3.6.3. Zajištění vzduchotěsnosti.....	36
3.7. POUŽÍVANÉ METODY PRO MĚŘENÍ VZDUCHOTĚSNOSTI S OHLEDEM NA PLATNOU LEGISLATIVU.....	41
3.7.1. Metoda tlakového spádu s externím ventilátorem	41
3.7.2. Blower-door test	42
3.7.3. Metoda tlakového spádu s vnitřním ventilátorem.....	44
3.7.4. Metoda harmonicky proměnného tlakového rozdílu	45
3.7.5. Metoda tlakového impulzu	46
3.8. MATERIÁLY PRO VZDUCHOTĚSNÍCÍ ROVINU.....	46
3.9. NETĚSNOSTI VZDUCHOVÉ OBÁLKY BUDOVY	55
3.9.1. Příčiny vzniklých netěsností v konstrukci	55

3.10.	MOŽNOSTI DETEKCE NETĚSNOSTÍ V KONSTRUKCI.....	56
3.11.	NEJČASTĚJŠÍ NETĚSNOSTI V OBÁLCE BUDOVY	59
4.	METODIKA	60
4.1.	METODIKA LITERÁRNÍ REŠERŠE	60
4.2.	METODIKA ANALÝZY MĚŘENÍ VZDUCHOTĚSNOSTI NA TŘECH STAVBÁCH NA BÁZI DŘEVA	60
4.2.1.	Postup měření	60
4.2.2.	1. měřený objekt – RD Zichovec	67
4.2.3.	2. měřený objekt – RD Příbram	71
4.2.4.	3. měřený objekt – RD Mělnická Vrutice.....	75
4.3.	METODIKA VYPRACOVÁNÍ KONSTRUKČNÍCH DETAILŮ.....	79
4.4.	METODIKA SOUHRNU DOPORUČENÝCH PRAVIDEL PRO NÁVRH, VÝROBU A MONTÁŽ NA STAVBĚ S OHLEDEM NA VZDUCHOTĚSNOST KONSTRUKCE DLE PLATNÝCH NOREM	80
5.	VÝSLEDKY ANALÝZY MĚŘENÍ	81
5.1.	1. OBJEKT – RD ZICHOVEC	81
5.2.	2. OBJEKT – RD PŘÍBRAM	86
5.3.	3. OBJEKT – RD MĚLNICKÁ VRUTICE	94
5.4.	VÝSLEDKY MĚŘENÍ VZDUCHOTĚSNOSTI NA TŘECH STAVBÁCH NA BÁZI DŘEVA	99
5.5.	KONSTRUKČNÍ DETAILY	101
5.6.	SOUHRN DOPORUČENÝCH PRAVIDEL PRO NÁVRH, VÝROBU A MONTÁŽ NA STAVBĚ S OHLEDEM NA VZDUCHOTĚSNOST KONSTRUKCE DLE PLATNÝCH NOREM	101
6.	DISKUSE.....	104
7.	ZÁVĚR	106
8.	SEZNAM POUŽITÝCH INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	107
	SEZNAM ILUSTRACÍ.....	113
	SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	117
	SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ	118

SEZNAM PŘÍLOH	119
---------------------	-----

Názvosloví

a	Propustnost ve spárách (daPa)n]	$m^3/[h \cdot m \cdot$
C	Součinitel proudění	$m^3/h \cdot Pa^n$
C _{env}	Součinitel proudění vzduchu	$m^3/(h \cdot Pa^n)$
C _L	Součinitel proudění netěsnostmi	$m^3/(h \cdot Pa^n)$
ELA ₅₀	Ekvivalentní plocha netěsnosti	m^2
M	Faktor difuzního odporu	-
n	Exponent proudění vzduchu	-
n ₅₀	Intenzita výměny vzduchu	h^{-1}
n ₅₀ , N	Doporučené hodnoty celkové intenzity výměny vzduchu	h^{-1}
q _{E50}	Měrná průvzdušnost obálkou	$m^3/(h \cdot m^2)$
q _{F50}	Měrná průvzdušnost podl. plochou	$m^3/(h \cdot m^2)$
q ₅₀	Průtok vzduchu netěsnostmi	h^{-1}
r ²	Koeficient determinace	-
S _d	Ekvivalentní difuzní tloušťka	m
U	Součinitel prostupu tepla	W/m ² K
v	Světlá výška měřené budovy	m
Ṁ	Objemový tok vzduchu	m^3/h
Δp	Tlakový rozdíl	Pa
Δt	Rozdíl teplot mezi interiérem a exteriérem	K

Seznam použitých zkratk a symbolů

ČR – Česká republika

KVH – Konstruktionsvollholz – konstrukční hranol

BSH – Brettschichtholz – Lepené lamelové dřevo

DUO – Dřevěný nosník složený ze 2 lamel slepených dohromady

TRIO – Dřevěný nosník složený ze 3 lamel slepených dohromady

OSB – Oriented Strand Board – Orientovaná třísková deska

PD – Projektová dokumentace

DVD – Dřevovláknitá deska

PK – Pilový kotouč

SK – Slinutý karbid

KD – Konstrukční deska

CNC – Computer Numeric Control – číslicové řízení počítačem

EPS – Expandovaný pěnový polystyren

PE – Polyethylen

PUR – Polyuretan

NP – Nadzemní podlaží

ZZT – Zpětné získávání tepla

HVV – Hlavní vzduchotěsnící vrstva

SVO – Systém vzduchotěsnících opatření

TZB – Technické zařízení budov

EU – Evropská unie

ČSN – Česká technická norma (dříve Československá norma)

EN – Evropská norma

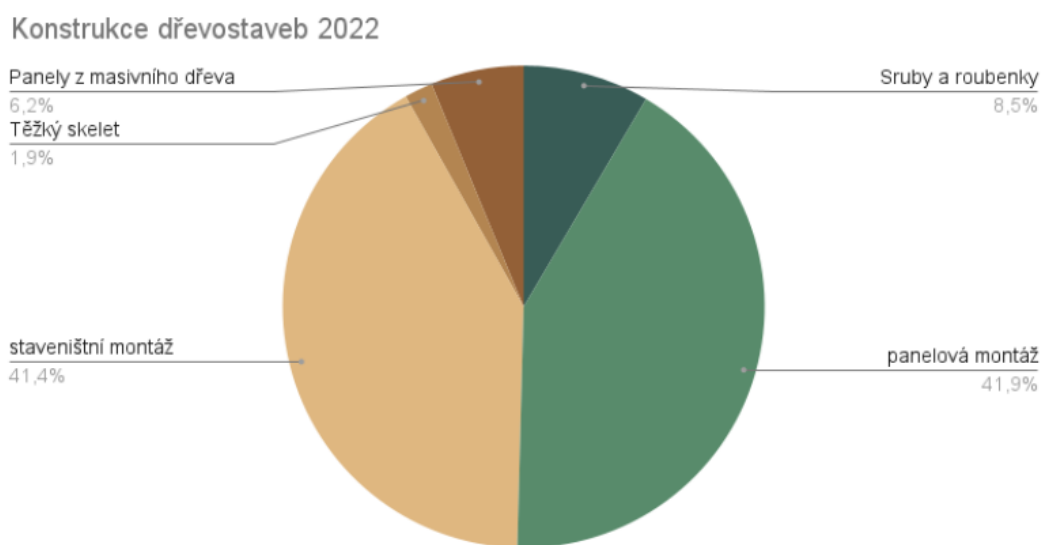
ISO – Mezinárodní organizace pro normalizaci

RD – Rodinný dům

GDPR – General Data Protection Regulation – právní rámec ochrany osobních údajů

1. Úvod

Podíl bytových staveb na území ČR v posledních letech stále roste. V nejbližším roce 2022 došlo k předání téměř 40 000 nově postavených bytů (RD bylo postaveno celkem 18782), což je meziročně o 14 % více. Podíl dřevostaveb na území ČR se v roce 2022 ustálil na 14,1 % - tedy 2642 staveb na bázi dřeva (ČSÚ, 2023). Tento podíl staveb na bázi dřeva na území ČR je dán především díky zvyšujícím se požadavkům na energetickou a ekologickou zátěž budov, efektivitě, rychlosti a kvalitě výstavby zejména v případě technologie panelových staveb. Technologií panelových staveb je u nás postaveno 42 % (viz. graf 1) z celkového počtu postavených staveb na bázi dřeva, kdy se v současné době jedná o nejrozšířenější způsob výstavby. Budoucnost výstavby těchto typů staveb je tedy zcela nezpochybnitelná a je nutné se tímto typem staveb zabývat a proniknout do jeho problematiky (Trandová, 2023).



Graf 1 - konstrukce dřevostaveb 2022 (Trandová, 2023).

Zajištění dostatečné vzduchotěsnosti obvodového pláště budov je důležitým aspektem pro dosažení energetické účinnosti a omezení negativních vlivů na vnitřní prostředí. Netěsnosti v konstrukcích způsobují neřízenou výměnu vzduchu mezi interiérem a exteriérem, což vede ke zvýšeným ztrátám tepla, vyšší spotřebě energie na vytápění a chlazení a může přispívat k problémům s vlhkostí. Přestože je tato problematika již značně prozkoumána, stále přetrvávají výzvy při praktické realizaci vzduchotěsných stavebních systémů (Ernhorn – Kluttig & kol., 2009).

Dosažení vysoké míry vzduchotěsnosti je obzvláště důležité u dřevostaveb využívajících technologii panelových systémů. Tyto stavby se v poslední době těší stále větší oblibě díky svým environmentálním výhodám, rychlosti výstavby a dobrým tepelně – izolačním vlastnostem. Kvalitní provedení vzduchotěsných detailů je klíčové již při samotném návrhu, následné výrobě a montáži. Přestože existují legislativní požadavky a normy pro měření a hodnocení vzduchotěsnosti budov, dosud není zcela vyjasněno, jak nejlépe navrhnout a provést vzduchotěsné detaily u těchto stavebních systémů s ohledem na specifické postupy výroby a montáže.

Tato diplomová práce se zabývá problematikou zajišťování vzduchotěsnosti u panelových dřevostaveb a jejím cílem je přinést nové poznatky a fakta. Práce kriticky analyzuje současný stav poznání, vyhodnocuje výsledky měření vzduchotěsnosti na třech stavbách na bázi dřeva, identifikuje běžné příčiny vzniku netěsností, navrhuje konstrukční detaily z hlediska zajištění vzduchotěsnosti a navrhuje soubor doporučených pravidel pro návrh, výrobu a montáž s ohledem na dosažení odpovídající vzduchotěsnosti konstrukcí. Vychází přitom z rešerše relevantní odborné literatury a platných technických norem, stejně jako z poznatků získaných praktickým měřením.

2. Cíl práce

Cílem této diplomové práce je zjištění vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb. Práce bude rozdělena na teoretickou část, kde budou popsány konstrukční možnosti, zásady a problematika panelových dřevostaveb. Součástí budou používané metody měření vzduchotěsnosti s ohledem na platnou legislativu. Teorie bude obsahovat používané materiály pro vzduchotěsnící rovinu, zjištění problematických míst a detailů v konstrukci a detekce případných netěsností a následné možnosti oprav. Praktická část bude zaměřena na analýzu měření vzduchotěsnosti pomocí tzv. Blower-door testu (test vzduchotěsnosti stavby) na třech stavbách na bázi dřeva. Výstupem praktické části bude souhrn doporučených pravidel pro návrh, výrobu a následnou montáž na stavbě s ohledem na vzduchotěsnost konstrukce dle platných norem.

3. Literární rešerše

3.1. Panelové dřevostavby

Dřevostavby postavené z celostěnových panelů patří mezi nejběžnější a nejčastěji realizované typy na území České republiky. Jsou složeny z obvodových panelů, vnitřních nosných nebo vnitřních nenosných příček, štítových panelů, stropních panelů, krovu, popř. střešních panelů, střechy, podlah a podhledů. Základem konstrukce panelu je rám z hranolů, který je vyplněný tepelnou izolací a opláštěný vhodným plášt'ovacím materiálem (OSB deskami, dřevotřískovými deskami, sádrovláknitými deskami apod.). Celostěnové panely jsou ve velké míře prefabrikované a na staveništi se převážejí oboustranně opláštěné, včetně zabudovaných oken a dveří. Mezi přednosti dřevostaveb z celostěnových panelů náleží především možnost maximální přípravy stavby ve výrobě, extrémně rychlý způsob výstavby (hrubá stavba je hotová v rozmezí 5 dnů až dvou týdnů), suchá montáž bez mokrých procesů na staveništi, vysoká kvalita stavebních dílců a maximální vyloučení povětrnostních vlivů během výstavby. Konstrukci lze realizovat jak pomocí difuzně otevřené obálky budovy, tak pomocí difuzně uzavřené obálky budovy (Štefko & kol., 2009).

3.2. Historie a vývoj panelových dřevostaveb

Panelový konstrukční systém je systém dřevostaveb, který byl patentován již v roce 1880 Johannem Gerhardem Clementem Döckerem. Ihned po svém vzniku se systém celosvětově proslavil a je velice populární i dnes. Panelový konstrukční systém se začal vyvíjet, když se válčící armády snažily najít způsob, jak rychle stavět a následně pak demontovat vojenské lazarety, které by mohly být použitelné i v zimních měsících. Proto v roce 1880 přišel Johann Gerhard Clement Döcker se systémem staveb z panelů, jež měly dřevěný borovicový rám, na který byl připevněn „lisovaný Döckerův materiál“ - pravděpodobně předchůdce cementovláknité desky. Panely byly snadno skladovatelné a přepravovatelné, tudíž naprosto vhodné pro polní ležení a lazarety. Výroby se ujali tehdejší dánský konzul Christian Ferdinand Christoph a jeho společník architekt Christian Rudolf Unmack. V roce 1882 byla výroba zahájena v Niesky (Horní Lužicko). V roce 1899 firma Christov & Unmack vybuodovala první školu. Panelové dřevostavby začala také využívat církve pro stavbu nouzových kostelů a modliteben, dále byly stavěny školy v přírodě, rekreační objekty a obytné domy. Díky úspěšnosti tohoto systému, tedy systému panelů, došlo také k obrovskému rozmachu první velké továrny na panely. Postupem času došlo k výrobě dvou základních typů staveb. Prvním typem stavby byla lehká, snadno

demontovatelná a transportovatelná konstrukce, která byla určena pro armádu a humanitární akce. Druhým typem staveb byly těžší stavby, které byly také demontovatelné, ale byly určeny jako stavby občanské vybavenosti, kasárny, nemocnice, školy apod. Díky rozmachu této konstrukce bylo nutné rozšířit výrobu do České republiky, konkrétně do Boleslavi. Po první světové válce dobehla výroba velkých zakázek pro export a od roku 1924 se staly hlavním výrobním programem dřevěné panelové domy. V druhé polovině 20. století došlo k rozvoji průmyslové výroby panelů prakticky po celé Evropě. Díky tomuto rozvoji došlo k vývoji deskových materiálů na bázi dřeva, tepelných a zvukových izolací, různých spojovacích prostředků, kování, stavební chemie, fólií, střešních krytin, omítek apod. Dále došlo k vývoji a změně konstrukce rámu, kde původní tesařské spoje byly ve druhé polovině 20. století nahrazeny hřebíky, rám byl skládaný „na tupo“ a byl spojený pomocí hřebíků. Tuhost panelu byla zajištěna opláštěním rámu konstrukční deskou na bázi dřeva (Liška, 2012).

Došlo i ke změně materiálu používaného pro výrobu rámu, kdy borovice nahradil smrk společně s modřínovým zakládacím prahem. V dalších letech následoval vývoj KVH řeziva a lepeného lamelového dřeva (BSH, DUO, TRIO apod.), které byly na výrobu dřevěných rámu pro panelové konstrukce ideální z důvodu nízké vlhkosti řeziva ($15 \pm 3 \%$), nízké hmotnosti, tvarové stálosti prvků a možnosti držení materiálu na skladech díky opakujícímu se systému skladeb stěn. Postupně ve stavbách začaly převažovat tyto prvky a používání rostlého sušeného řeziva se dnes ve stavbách objevuje minimálně. Použití KVH řeziva v rámech v současné době konkuruje použití I profilů (např. Steico), které jsou výhodné z důvodu výborné eliminace tepelných mostů a celkové „lehkosti“ konstrukce. (Kolb, 2011)

Vlastnosti tohoto systému dřevěných panelových staveb byly přizpůsobeny našim potřebám. Lze tedy předpokládat, že systém panelových dřevostaveb bude nadále prosazovaný, ať už z důvodu vysoké kvality a dostupnosti materiálů používaných v tomto systému nebo hospodárnosti, jednoduchosti a rychlosti výstavby. Výrobci po celém světě se vzájemně liší skladbami stěn, velikostí panelů, stupni prefabrikace, typem použitého materiálu apod. Základem tohoto systému však zůstává dřevěný rám, který si nechal patentovat Johann Gerhard Clement Döcker, a tím započal novou éru dřevozpracujícího průmyslu. Zkušenosti a testy také ukazují, že rámové stavby jsou vhodné pro vícepodlažní budovy, kdy v současné době je v ČR povolena maximální výška dřevostavby 12 metrů (měřeno od prvního podlaží až po podlahu posledního podlaží), (Liška, 2012).

3.3. Rozdělení panelů dřevostaveb

Panel – plošná stavební jednotka (prefabrikát), která se skládá z rámu, pláště, výplně a vzduchotěsné roviny (Kolb, 2008).

3.3.1. Rozdělení podle účelu použití:

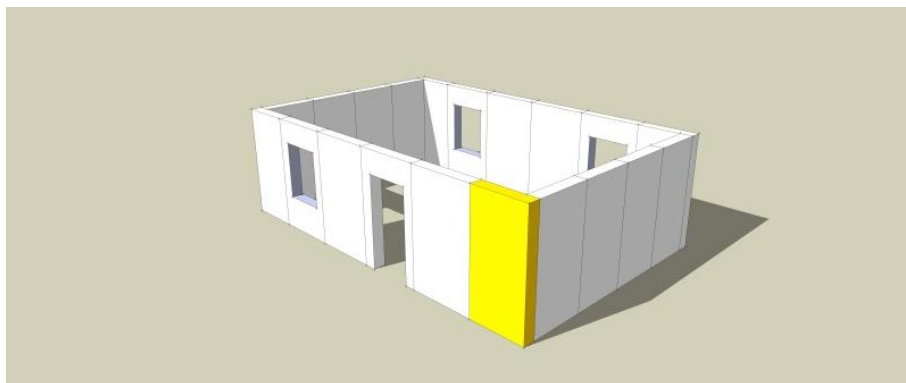
- stěnové panely,
 - obvodové
 - vnitřní – nosné, nenosné
- podlahové panely,
- stropní panely,
- štítové panely,
- střešní panely (Breyer & kol., 2007).

3.3.2. Rozdělení podle průvzdušnosti konstrukce:

- panely s difuzně otevřenou konstrukcí stěny,
- panely s difuzně uzavřenou konstrukcí stěny (Růžička, 2014).

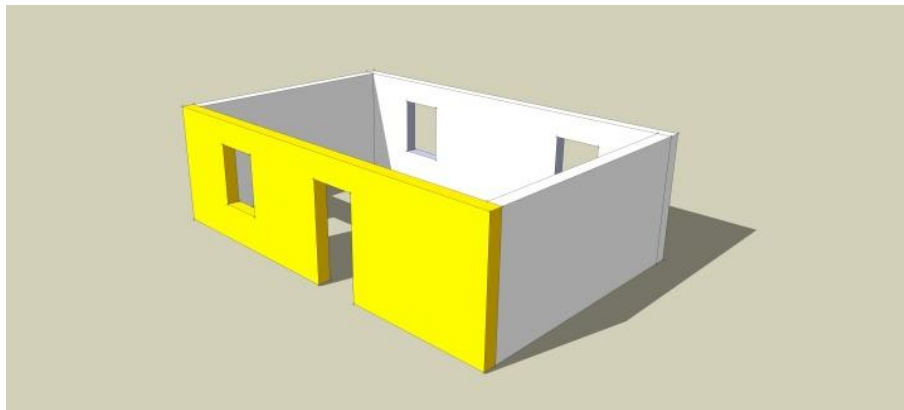
3.3.3. Rozdělení podle rozměrů:

- **Malorozměrové (modulové)** - zobrazeny na obrázku 1,
 - šířku panelu udávají moduly – např. panel š. 300, 600, 900, 1200, 1500 a 1800 mm,
 - nejsou dokončené – jejich součástí je pouze rám s opláštěním,
 - mají nízkou hmotnost,
 - jsou určeny pro montáž bez těžké mechanizace (EARCH, 2010).



Obrázek 1 - malorozměrový panel (EARCH, 2010).

- **Středněrozměrové** – zobrazeny na obrázku 2,
 - šířka panelu je v rozmezí od 3500 mm do 5000 mm,
 - včetně otvorů pro dveře a okna,
 - jsou určeny pro montáž pomocí těžké mechanizace (EARCH, 2010).



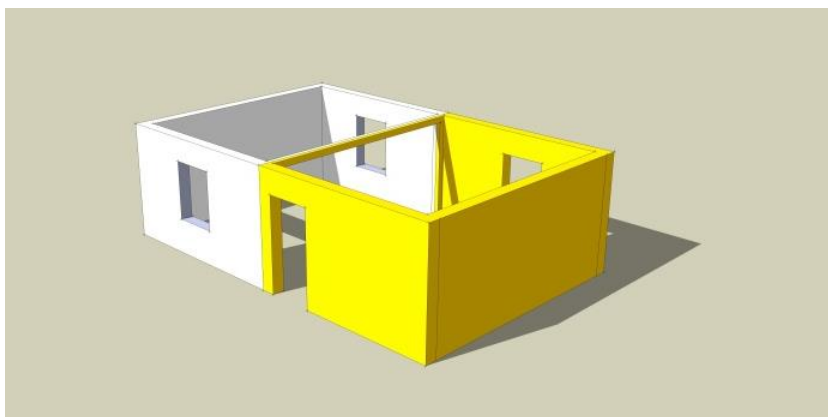
Obrázek 2 - středněrozměrový panel (EARCH, 2010).

- **Celostěnové** – zobrazeny na obrázku 3,
 - nejvyužívanější typ panelové konstrukce v České republice,
 - délka a výška panelu je udávána v závislosti na možnostech přepravece,
 - vyznačují se vysokým stupněm dokončení,
 - hrubá stavba je obvykle dokončena do 3 dnů,
 - jsou určeny pro montáž pomocí těžké mechanizace (EARCH, 2010).



Obrázek 3 - celostěnový panel (autor práce, 2023).

- **Prostorové buňky** – zobrazeny na obrázku 4,
 - vysoká rychlost výstavby,
 - velmi složitá přeprava,
 - jsou určeny pro dopravu pomocí těžké mechanizace,
 - v České republice se téměř nevyskytují.



Obrázek 4 - prostorové buňky (EARCH, 2010).

3.4. Současná výroba panelových dřevostaveb, strojní zařízení používané při jejich výrobě

Panelové dřevostavby umožňují vysoký stupeň prefabrikace. Díky prefabrikaci dochází k urychlení výstavby, kvalitnějšímu provedení výsledné konstrukce z důvodu vyšší možnosti sledování předepsaných norem a kvalitativních požadavků během výroby. Ke kvalitnímu provedení přispívá i kvalitní prostředí, ve kterém dochází k výrobě prefabrikovaných dílců dřevostaveb za pomoci dělníků. Při využití prefabrikace dochází také k urychlení montáže na stavbě a nižším požadavkům na kvalitu montážníků za předpokladu kvalitního technického řešení a správně provedeného prefabrikátu (Herzog & kol., 2004).

3.4.1. Výroba modulových panelů

Výroba těchto typů panelů je velmi snadná a efektivní z důvodu opakujícího se sortimentu výroby. Pro stručné popsání výroby těchto panelů byl zvolen panel se skladbou stěny viz. níže:

- OSB 3 EGGER	tl.18 mm
- rámová konstrukce z KVH hranolů 60x100 mm vyplněná tepelnou izolací Isover Woodsil tl.100 mm	tl.100 mm
- OSB 3 EGGER	tl.18 mm
<hr/>	
Celková tloušťka stěny	136 mm

Výroba probíhá ve výrobní hale, kde dochází k navezení potřebného materiálu pro výrobu modulových panelů (KVH řezivo pro rám je přesně připraveno pomocí CNC obráběcího centra Hundegger K2i a obsahuje veškeré spoje). Po navezení materiálu se OSB desky přesně zaformátují dle PD, dojde k rozmístění dřevěných prvků rámové konstrukce na pracovních stolech a rám se zafixuje pomocí vlnovců. Následně dochází k přiložení a připevnění OSB desky na rám, přičemž OSB deska se připevní pomocí sponek/vrutů. Takto jednostranně opláštěný panel je nutné otočit a po jeho otočení následuje vložení izolace Isover Woodsil mezi sloupky. Dále dochází k opláštění OSB deskou z druhé strany panelu za pomoci sponek/vrutů. Takto připravený panel je uskladněn a následně expedován (Hairstans, 2019). Výrobu modulových panelů můžeme provést jak liniovým, tak hnízdovým způsobem (Karabegović, 2020).

- **Liniový způsob**

- Předmět výroby se posouvá po každé provedené operaci na další pracoviště,
- výhodou je vysoký stupeň dělby práce a vyšší kapacita,
- nevýhodou je potřeba většího prostoru. (Karabegović, 2020).

- **Hnízdový způsob**

- Veškeré operace se provádí na jednom pracovišti,
- tento způsob vyžaduje menší výrobní prostor, ale klade vyšší nároky na organizaci práce. Umožňuje však využít různé manipulační prostředky, např. mostový nebo kozový jeřáb,

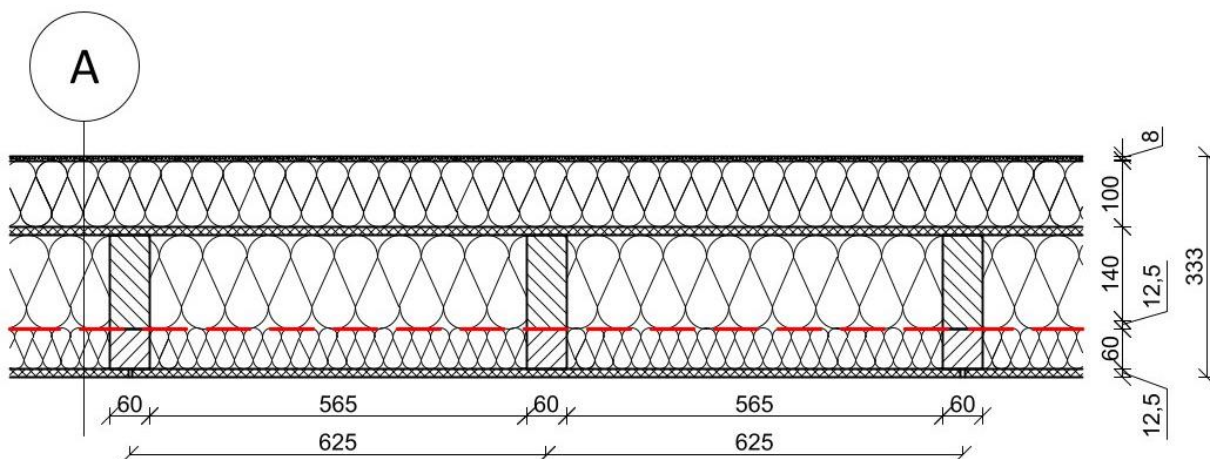
- tento způsob je také výhodnější z důvodu rozvodu tlakového vzduchu. (Karabegović, 2020).

3.4.2. Výroba celostěnových panelů

Výroba celostěnových panelů jednopodlažní budovy je znázorněna pomocí blokového schématu výroby celostěnového panelu vycházejícího ze skladby obvodového panelu společnosti PILA MARTINICE s.r.o. uvedeného v příloze této práce.

V blokovém schématu je znázorněna výroba celostěnového panelu, který vychází ze skladby obvodového panelu společnosti PILA MARTINICE s.r.o., znázorněného na obrázku 5.

Výroba celostěnových panelů probíhá ve výrobní hale, kde dochází k navezení potřebného materiálu pro výrobu panelu (KVH řezivo pro rám je přesně připraveno pomocí CNC obráběcího centra Hundegger K2i a obsahuje veškeré spoje) a panel je tak vyroben přesně dle PD. Při výrobě dochází ke sledování předepsaných norem a kvalitativních požadavků na výrobek. Je také sledována kvalita používaných materiálů, kvalita provedení panelu a efektivita výroby (Pila Martinice, 2023).



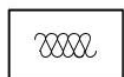
Legenda materiálů



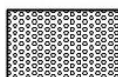
KVH C24, alt.
BSH GL 24H



Sádroláknitá deska Fermacell



Izolační materiály



Omítkový systém STO

Legenda vzduchotěsnících materiálů

Hlavní vzduchotěsnící vrstva



Parobrzdná folie ISOCELL FH NATUR - tl.
0,25mm, $\mu = 25800$

SKLADBA A - vnější obvodová stěna

- Strukturovaná omítka STO - SILCO K/R/MP, $\mu = 38$	tl.3 mm
- Silikátový mezinátěr STO - PREP MIRAL, $\mu = 30$	tl. 0,3mm
- Armovací síťovina STO GLASFASEGEWEBE F + tmel STO LEVELL UNI, $\mu = 25$	tl.5 mm
- DVD deska STEICO PROTECT DRY M, $\mu = 3$	tl.100 mm
- Sádroláknitá deska Fermacell, $\mu = 13$	tl.12,5mm
- Rámová konstrukce z KVH hranolů 60x140 mm vyplněná tepelnou izolací ISOVER WOODSIL, $\mu = 1$	tl.140 mm
- Parobrzdná folie ISOCELL FH NATUR, $\mu = 25800$, $S_d = 6,45m$	tl.0,25mm
- Instalační předstěna z KVH hranolů 60x60 mm vyplněná tepelnou izolací ISOVER WOODSIL, $\mu = 1$	tl. 60 mm
- Sádroláknitá deska Fermacell, $\mu = 13$	tl.12,5 mm

Celková tloušťka stěny:

333 mm

Obrázek 5 - skladba vnější obvodové stěny (Pila Martinice, 2023).

3.4.3. Strojní zařízení používané při výrobě celostěnových panelů

- **Zkracovací pila**
 - Ramenová,
 - \varnothing PK 500 mm,
 - 3000 ot./min,
 - řezná rychlost 60 m/s,
 - posuvná rychlost 7 m/min.
 - častou alternativou bývá použití CNC obráběcího centra s osazením různých typů nástrojů.
- **Formátovací pila**
 - Vertikální/horizontální,
 - spodní/horní,
 - 1/2 kotoučová,
 - \varnothing PK 350 mm s SK plátky,
 - 4500 ot./min,
 - řezná rychlost 70-80 m/s,
 - posuvná rychlost 15-19 m/min.
 - alternativou může být použití CNC mostů, které provedou opláštění rámu a desky následně zaformátuje přímo na rámu panelu, popř. lze využít nářezová centra.
- **Pracovní stoly**
 - 2-3 ve výrobní hale,
 - hydraulické, zdvihací, otočné,
 - různé velikosti stolů dle velikosti vyráběných panelů (obvykle 4x13, max. 16 metrů).
- **Sbíjecí pistole, přístroje pro vlnovce**
 - Pneumatické sbíjecí pistole,
 - tlak dle velikosti a druhu používaného spojovacího materiálu,
 - sbíjení rámu apod.
- **Sponkovací pistole**
 - Připevnění KD,
 - tlak dle velikosti a druhu používaného spojovacího materiálu,

- alternativou může být použití multifunkčního CNC zařízení, které provede připevnění KD k rámu,
- přístroje pro vlnovce.
- **Vrtačka, Aku šroubovák**
 - Připevnění roštů, zhotovení otvorů apod.
- **Zdvihací zařízení**
 - Mostový jeřáb.
- **Stojany**
 - Vertikální stojany pro zavěšení panelu.
- **Pumpa**
 - Stříkání tmelu.
- **Manipulátor**
 - (Pila Martinice, 2023)

3.5. Montážní postup dřevostavby z celostěnových panelů

Montážní postup jednopodlažní budovy z celostěnových panelů vycházející ze skladby obvodového panelu společnosti PILA MARTINICE s.r.o., viz. obrázek 5, je znázorněn pomocí tabulky 1.

Jedná se o montážní postup jednopodlažní budovy z celostěnových panelů, které mají osazená okna společně s vnějšími parapety. Panely jsou z interiérové strany zakončeny sádrovláknitou deskou Fermacell a ze strany exteriérové jsou zakončeny lepidlem s perlíčkou umístěné na fasádní dřevovláknité desce (Pila Martinice, 2023).

Pořadové číslo	Název operace	Nářadí	Použitý materiál
1	Očištění základové desky	Lopata, koště, majzlík, kladivo, vodováha, bruska	
2	Rozměření panelů na základovou desku dle výkresové dokumentace	Metr, pásmo, brnkačka, značkovací sprej	
3	Osazení vyrovnávacích podložek pod stěny na základovou desku	Vodováha, metr, nivelační přístroj	Vodovzdorná překližka, dubové podložky
4	Nanesení výplňové malty mezi vyrovnávací podložky	Míchadlo, zednická lžice, kbelík	Výplňová malta Fermacell
5	Montáž obvodových, vnitřních nosných a nenosných panelů	Jeřáb, dočasné fixační prvky, rázový utahovák, vrtací kladivo, vodováha, aku šroubovák	Obvodové, vnitřní nosné a nenosné panely, spojovací prostředky
6	Přilepení těsnící pásky ISOCELL OMEGA DB k desce Fermacell Vapor a základové desce pomocí spreje UNI PRIMER	Nůž	Těsnící páska ISOCELL OMEGA DB, sprej UNI PRIMER
7	Statické zajištění panelů dřevostavby a jejich přesná fixace	Dočasné fixační prvky, rázový utahovák, vrtací kladivo, vodováha, aku šroubovák	Ocelové vzpěry, spojovací materiál, kování
8	Přelepení kotvicích prvků panelu za pomoci těsnící pásky ISOCELL OMEGA DB k desce Fermacell Vapor a základové desce pomocí spreje UNI PRIMER	Nůž	Těsnící páska ISOCELL OMEGA DB, sprej UNI PRIMER
9	Montáž příhradových vazníků	Jeřáb, rázový utahovák, brnkačka, metr, aku šroubovák, pneumatická hřebíkovací pistole, řetězová pila	Prefabrikované příhradové vazníky, kování, spojovací materiál
10	Větrování příhradových vazníků	Pneumatická hřebíkovací pistole, řetězová, popř. okružní pila	Větrovací prkna
11	Bednění příhradových vazníků	Pneumatická hřebíkovací pistole, řetězová, popř. okružní pila, kladivo	Bednicí prkna, spojovací materiál

12	Pokryvačské práce-osazení okapnice, dokončení horní části střešního pláště	Nůžky na plech, vodováha, metr, aku šroubovák, kladivo, pneumatická hřebíkovací pistole, úhlová bruska, řetězová, popř. okružní pila	Okapnice, pojistná hydroizolace, latě, kontralatě, krytina, spojovací prostředky
13	Klempířské práce-osazení okapových háků a žlabů	Ohýbačka okapových háků, nůžky na plech, provázek, kotoučová bruska, kladivo, metr	Okapové háky, žlaby, spojovací materiál
14	Realizace podhledu přesahu vazníku	Pokosová pila, pneumatická hřebíkovací pistole, aku šroubovák	Palubky, spojovací prostředky
15	Instalace parotěsné fólie pod vazníky + přilepení fólie k vytažené fólii ze stěny pomocí Airstop pásy	Pneumatická sponkovací pistole, nůž, metr	Parotěsná fólie ISOCELL OKO NATUR, Airstop páska, spojovací prostředky
16	Montáž roštu podhledu	Aku šroubovák, nůžky na plech	CD profily, spojovací prostředky
17	Příprava podstřešního prostoru pro foukanou izolaci	Aku šroubovák, pokosová pila, okružní pila	OSB desky, SM KVH latě, spojovací prostředky
18	Zateplení podstřešního prostoru	Stroj pro foukání izolace z celulózy např. ISOBLOW STANDARD +PLUS	Celulózová vlákna
19	Montáž elektroinstalace do elektroinstalačních kanálků vč. zapojení do jističe + montáž dočasných zásuvek a vypínačů	Vodováha, metr, aku vrtačka, kleště	Kabely, spojovací prostředky, jistič, zásuvky, žárovky
20	Instalace rozvodů vody a kanalizace do instalační předstěny panelu vč. napojení na vodovod a kanalizaci (standardní předstěna 60 mm). Pro umístění větší DN potrubí je nutné použít 100 mm předstěnu, popř. instalaci umístit do příček	Vodováha, metr, aku vrtačka, polyfúzní svářečka	Armatury, izolace, těsnění, spojovací prostředky, baterie
21	Blower-door test		
22	Montáž podlahového polystyrenu	Nůž, metr, vodováha	EPS podlahový polystyren

23	Instalace PE fólie	Nůž, metr	PE fólie, páska pro spojení pruhů fólie
24	Instalace podlahového topení	Provede specializovaná firma	Provede specializovaná firma
25	Zalítí podlahového topení betonem	Pumpa na beton, vodováha, nivelační přístroj, vibrační lat'	Beton
26	Montáž podhledů	Vodováha, aku šroubovák, zvedák na sádrokarton	Fermacell, spojovací materiál
27	Dokončení interiérových ploch	Špachtle, bruska na sádrokarton	Tmel
28	Pokládka dlažby a obklad stěn v koupelně + na WC	Míchadlo, zednická lžíce, kbelík, stěrka	Keramické obklady, lepidlo, lišty, spárovací hmota
29	Montáž sanitty	Vrtačka, aku šroubovák, metr, vodováha, vytlačovací pistole	WC, umyvadlo, vana, sprchový kout, spojovací materiál, těsnění, armatury, izolace, silikon
30	Pokládka podlahové krytiny mimo WC a koupelnu	Metr, kladivo, pila, nůž	Podlahové dílce, podkladní fólie
31	Montáž vnitřních parapetů	Pila, metr, palička, úhelník	PUR pěna, parapety
32	Dokončení vnější fasády	Metr, nůž, stěrka	Fasádní systém
33	Klempířské práce-osazení svodů	Nůžky na plech, kotoučová bruska, metr	Svody, kolena, trubkové spony
34	Výmalba + dokončovací práce	Stěrka, váleček	Vnitřní malířský nátěr (např. Primalex)
35	Demontáž dočasných zásuvek a vypínačů a současně osazení trvalých elektrických zásuvek, vypínačů a světel	Vodováha, metr, šroubovák, aku vrtačka, kleště	Světla, zásuvky, vypínače, spojovací prostředky, elektrikářské pásky
36	Montáž interiérových dveří	Aku vrtačka, pila, úhelník, metr, kleště, šroubovák, klíče, dveřní rozpěry, vodováha	Interiérové dveře, akrylát, PUR pěna, silikon, mazivo
37	Terénní úpravy		
38	Úklid		
39	Kontrola provedení		
40	Předání stavby majiteli		

Tabulka 1 - montážní postup dřevostavby z celostěnových panelů (Pila Martinice, 2023).

3.6. Vzduchotěsnost

Vzduchotěsnost je schopnost konstrukce nebo určitého výrobku (v našem případě hovoříme o vzduchotěsnosti obálky budovy) propouštět vzduch. O celkové vzduchotěsnosti budovy tedy rozhoduje vzduchotěsnost jednotlivých materiálů, jejich spojů a s tím související zajištění hlavní vzduchotěsnicí vrstvy budovy, která vytváří obálku budovy. Obecně platí, že čím méně vzduchu daný materiál propustí, tím je těsnější. Aby mohl tedy daný prvek propouštět vzduch, musí:

- obsahovat netěsnosti,
- být vystaven tlakovému rozdílu (rozdílný tlak v prostředích, která prvek odděluje), (Pešta & kol., 2014).

Množství vzduchu proudícího skrze konstrukční prvek, jeho spoje nebo celou budovu roste úměrně s velikostí tlakového rozdílu vzduchu. Tato závislost průtoku vzduchu na tlakovém rozdílu se typicky vyjadřuje pomocí rovnice netěsnosti ve vztahu 1.

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

Vztah 1 – rovnice netěsnosti.

\dot{V} – objemový tok vzduchu v [m^3/h]

C – součinitel proudění v [$\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{Pa}^n$]

Δp – tlakový rozdíl v [Pa]

n – exponent proudění (bezrozměrný), (ČSN EN 12114, 2001)

Hodnoty C a n jsou určeny experimentálně měřením proudění vzduchu a rovnice proudění přímo charakterizují vzduchotěsnost posuzovaného prvku. Určí množství a způsob proudění vzduchu skrze netěsnosti. Součinitel proudění C udává velikost netěsností a odpovídá objemovému toku vzduchu při tlakovém rozdílu 1 Pa. Hodnota exponentu proudění n se pohybuje v intervalu od 0,5 (turbulentní proudění) do 1,0 (laminární proudění) a udává charakter proudění. Pokud nejsou k dispozici podrobnější údaje, tak se často při předběžných výpočtech používá hodnota $n = 0,67$. (Srba, 2016)

Požadavky na vzduchotěsnost objektu jsou stanoveny normou ČSN 73 0540-2 – Tepelná ochrana budov. Provedením blower-door testu a následném vyhodnocení

výsledků se celková hodnota průvzdušnosti vyjadřuje intenzitou výměny vzduchu měřené budovy při tlakovém rozdílu 50 Pa jako hodnota n_{50} [h^{-1}] a ověří se, zda splňuje normové hodnoty. Doporučené limitní hodnoty n_{50} , N se stanovují v závislosti na způsobu větrání dle tabulky 2, přičemž platí, že $n_{50} \leq n_{50, N}$ (Tywoniak, 2011).

Větrání v budově	Doporučená hodnota celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} , N [h^{-1}]	
	Úroveň 1	Úroveň 2
Přirozené nebo kombinované	4,5	3
Nucené	1,5	1,2
Nucené se zpětným získáváním tepla (ZZT)	1	0,8
Nucené se ZZT v budovách se zvláště nízkou potřebou tepla na vytápění (pasivní budovy)	0,6	0,4

Tabulka 2 - doporučené hodnoty celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} , N . (ČSN 73 0540–2, 2011.)

POZN: Hodnoty na úrovni 1 se doporučuje splnit vždy a hodnoty na úrovni 2 přednostně.

Cílem stavebníka by mělo být dosažení co nejnižší hodnoty n_{50} . Pokud nebude konstrukce dostatečně vzduchotěsná, může dojít ke zvýšenému riziku poškození konstrukce z důvodu šíření tepla a proudění vodní páry v netěsné konstrukci, může docházet ke kondenzaci vody, vyšším nákladům na vytápění (v případě použití rekuperační jednotky při „nevzduchotěsné konstrukci“ k nižší účinnosti této jednotky) a možnému vzniku plísní.

Při stavbě je důležité zabránit nadměrnému šíření vodních par do konstrukce z důvodu možné kondenzace uvnitř konstrukce a následné degradaci nosné konstrukce nebo z důvodu vyšších nákladů na vytápění. Aby nedocházelo právě k těmto problémům, je nutné, aby společnost produkující celostěnové panely měla řádně zpracované detaily, které budou provedeny dělníky přesně dle detailů společnosti. Dále je nutné použití správných a kvalitně těsnících materiálů, správné tloušťky izolace a použití tepelně – vlhkostního výpočtu (ČSN 73 0540–2, 2011).

3.6.1. Difuzně uzavřené konstrukce

Cílem tohoto typu konstrukce je zabránit šíření vlhkosti v podobně vodních par z vnitřních prostorů skrze skladbu konstrukce směrem do exteriéru (difuze vodních par probíhá až 8 měsíců v roce). Obecně platí, že čím větší je teplotní rozdíl mezi interiérem a exteriérem, tím dochází k většímu pohybu vodních par. Proto je v této konstrukci umístěna parozábrana v podobě parotěsné fólie na interiérové straně panelu, která pohyb vodních par eliminuje. Je tedy velice důležité, aby parotěsná vrstva vytvářející hlavní vzduchotěsnicí vrstvu (HVV) v konstrukci byla celistvá a perfektně provedená bez jakéhokoliv porušení. Pokud by došlo k chybě v provedení parozábrany, mohlo by docházet k hromadění vlhkosti v konstrukci a dlouhodobě poté k její následné degradaci. Aby se zabránilo případnému protržení fólie je vhodné využívat skladbu s instalační předstěnou, na jejíž rošt se připevňují další vrstvy stěny (např. sádrovláknitá deska Fermacell apod.). V každém případě musí být spočítán teplotně vlhkostní výpočet pro danou skladbu, aby nedocházelo ke kondenzaci vody uvnitř konstrukce vlivem špatného umístění rosného bodu (Růžička, 2014).

- **Výhodami** tohoto typu konstrukce jsou:
 - nižší pořizovací náklady na materiálové složení konstrukce,
 - výběr z většího množství realizačních firem.
- **Nevýhodami** tohoto typu konstrukce jsou:
 - v případě vzniku vlhkosti v konstrukci nemožnost pronikání vodních par ven z konstrukce,
 - technologicky náročné zpracování a provedení veškerých detailů,
 - nutnost technologické kázně při provádění, znalost dělníků tohoto systému a s tím související precizní výroba a montáž dřevostavby, precizní prolepení detailů, informovanost obyvatelů konstrukce o principu zajištění vzduchotěsnosti,
 - při nepoužití instalační předstěny dochází k porušení celistvosti parozábrany vlivem montáže závěsů pro finální interiérové desky k rámu panelu,
 - průnik vlhkosti do konstrukce vlivem používání nekvalitních materiálů a nesytemových řešení,
 - vysoká náchylnost parozábrany proti protržení (Česká, 2022).

Příklad použitých materiálů vč. hodnot ekvivalentní difúzní tloušťky s_d a faktoru difúzního odporu μ u difúzně uzavřené systému konstrukce – skladba níže, viz. obrázek 6.

- Akrylátová tenkovrstvá omítka Weberpas akrylát tl. 2 mm – $s_d = 0,2 - 0,4$ m, $\mu = 100-200$,
- lepicí a stěrková hmota Webertherm elastik tl.5 mm – $s_d = 0,1$ m, $\mu = 20$,
- tepelná izolace Isover EPS 70 F tl. 180 mm – $s_d = 3,6 - 7, 2$ m, $\mu = 20-40$,
- konstrukční deska Rigidur tl. 12,5 mm – $s_d = 0,2375$ m, $\mu = 19$,
- minerální izolace Isover Woodsil tl. 140 mm – $s_d = 0,14$ m, $\mu = 1$,
- parotěsná folie DÖRKEN DELTA – DAWI GP tl. 0,2mm – $s_d = 100$ m, $\mu = 500\ 000$,
- minerální izolace Isover Uni tl. 40 mm – $s_d = 0,04$ m, $\mu = 1$,
- konstrukční deska Rigistabil tl. 12,5mm – $s_d = 0,125$ m, $\mu = 10$.



Obrázek 6 - difúzně uzavřená konstrukce HK – DŘESTAV (HK – Dřestav, 2023).

3.6.2. Difúzně otevřené konstrukce

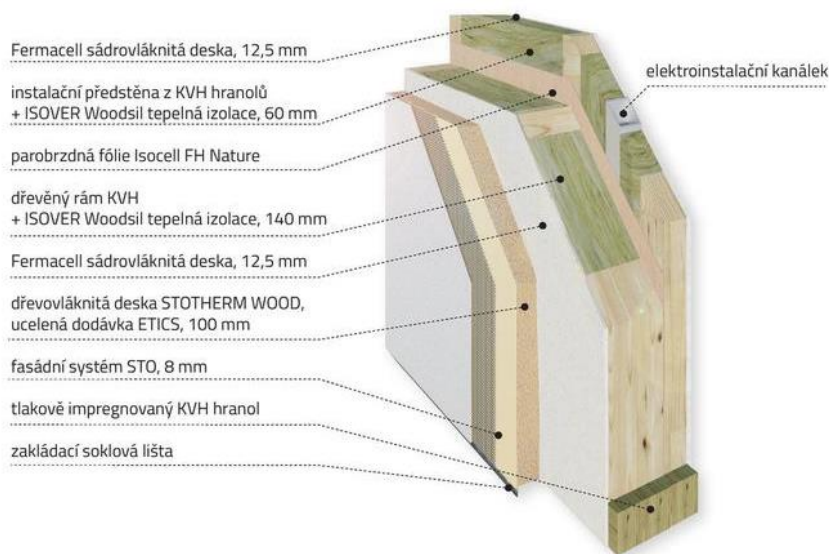
Tento typ konstrukce narozdíl od difúzně uzavřené konstrukce umožňuje průchod vodních par směrem z interiéru skrze skladbu konstrukce a následně do exteriéru. V konstrukci se proti pohybu vodních par používají parobrzdy, které jsou umístěné na interiérové straně panelu. Parobrzda může být tvořena např. OSB deskami, sádrovláknitými deskami (např. Fermacell Vapor), parobrzdnou fólií apod. Tyto

materiály tedy vodní páru „brzdí“ a propouští ji skrze konstrukci do exteriéru. Aby docházelo k propustnosti vodních par skrze konstrukci, je nutné dodržet zásadu, že směrem z interiéru do exteriéru má každá vrstva hodnotu difúzního odporu menší než ta vrstva předešlá. V každé konstrukci je nutné provést tepelně vlhkostní výpočet. Základem pro tvorbu tohoto typu konstrukce je správné zpracování a provedení veškerých detailů, znalost dělníků tohoto systému a s tím související precizní výroba a montáž dřevostavby, technologická kázeň a precizní prolepení detailů, jelikož difuze nebude nikdy natolik velká, aby dokázala odvést veškerou zkondenzovanou vodu (Růžička, 2014).

- **Výhodou** tohoto systému je:
 - schopnost konstrukce samovolně propouštět vodní páru (pouze určité množství) obálkou budovy, přičemž nedochází k její kondenzaci uvnitř konstrukce,
 - delší životnost konstrukce z hlediska možnosti propouštění vodních par,
 - odpadá riziko mechanického poškození konstrukce ze strany uživatele.
- **Nevýhodou** tohoto systému je:
 - vyšší pořizovací cena oproti difúzně uzavřené konstrukci (Česká, 2022).

Příklad použitých materiálů vč. hodnot ekvivalentní difúzní tloušťky s_d a faktoru difúzního odporu μ u difúzně otevřeného systému konstrukce – skladba níže, viz. obrázek 7.

- Sádroláknitá deska Fermacell tl. 12,5mm – $s_d = 0,16 \text{ m}$, $\mu = 13$,
- minerální izolace ISOVER Woodsil tl. 60 mm – $s_d = 0,06 \text{ m}$, $\mu = 1$,
- parobrzdná folie ISOCELL FH NATUR tl. 0,25mm – $s_d = 6,45 \text{ m}$, $\mu = 25800$,
- minerální izolace ISOVER Woodsil tl. 140 mm – $s_d = 0,14 \text{ m}$, $\mu = 1$,
- sádroláknitá deska Fermacell tl. 12,5mm – $s_d = 0,16 \text{ m}$, $\mu = 13$,
- DVD deska STEICO PROTECT DRY M, tl.100 mm – $s_d = 0,3 \text{ m}$, $\mu = 3$,
- minerální lepící a armovací hmota StoLevel Uni tl.5 mm – $s_d = 0,025 \text{ m}$, $\mu = 25$,
- strukturovaná omítka STO – SILCO K/R/MP tl.3 mm – $s_d = 0,114 \text{ m}$, $\mu = 38$.



Součinitel prostupu tepla $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, konstrukční hloubka 333 mm

Obrázek 7 - difúzně otevřená konstrukce DIFU ECO ENERGO (Pila Martinice, 2023).

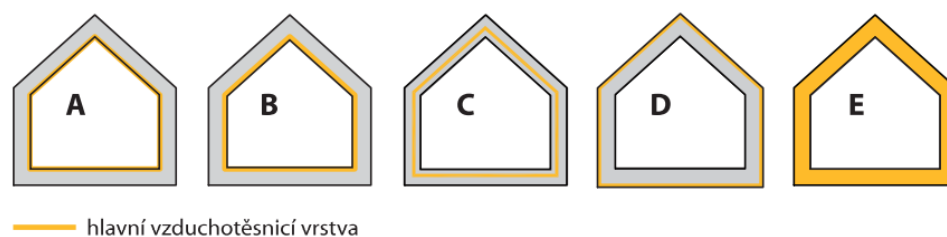
3.6.3. Zajištění vzduchotěsnosti

Základním vzduchotěsnícím opatřením je návrh hlavní vzduchotěsnící vrstvy v každé obvodové konstrukci. Hlavní vzduchotěsnící vrstva (HVV) je ve skladbě navržena za účelem zajištění vzduchotěsnosti v ploše konstrukce, přičemž je umístěna na interiérové straně panelu a měla by být umístěna tak, aby nedošlo k jejímu poškození během výstavby a samotného užívání stavby (toho je možné docílit použitím instalační předstěny ve stěně). HVV je pro živostnost stavby velice důležitá (z důvodu difuze vodních par jak u difúzně uzavřené, tak u difúzně otevřené konstrukce) a měla by ji být vybavena každá skladba konstrukce. Navržené řešení poté musí být prověřeno tepelně technickým výpočtem z důvodu zjištění možného rizika kondenzace vodních par uvnitř konstrukce. Pro to, aby HVV vydržela co nejdéle a plnila co nejdéle svou funkci, je nutné ji, popř. provést z kvalitních a vhodných materiálů, je důležité její precizní provedení a její prolepení v ploše, její správné napojení na další části konstrukce (základová deska, střešní konstrukce, stropní konstrukce apod.) a napojení na veškeré detaily konstrukce (je potřeba respektovat hlavní zásady návrhu realizace systému vzduchotěsnících opatření (Elmroth, Levin, 1983).

Součástí kvalitního provedení HVV je také důkladně a odborně vypracovaná projektová dokumentace. Je nezbytné, aby všechny vytápěné budovy byly opatřeny systémem vzduchotěsnících opatření (SVO). Pro zajištění dlouhodobé účinnosti systému vzduchotěsnících opatření je nutné již při samotném návrhu zohlednit konstrukční a technologické aspekty.

Materiál a pozice hlavní vzduchotěsnicí vrstvy se určuje v závislosti na způsobu provedení nosné konstrukce. U zděných staveb tuto vrstvu tvoří omítka na celé ploše konstrukce minimálně z jedné strany (obvykle té interiérové).

Jako hlavní vzduchotěsnicí vrstva dřevostaveb z celostěnových panelů se používá buď parozábrana (parotěsná fólie) nebo parobrzdá (např. deska Fermacell Vapor, OSB deska, parobrzdná fólie apod.) v závislosti na typu konstrukce. Na obrázku 8 jsou znázorněny principy zajištění vzduchotěsnosti HVV. HVV je umístěna na interiérové straně z důvodu jednodušší instalace a umístění rosného bodu mimo konstrukci (teplotně vlhkostní roční bilance).



Obrázek 8 - Principy zajištění vzduchotěsnosti (Novák, 2008)

A – vzduchotěsný vnitřní obklad (nebo jiná vzduchotěsná vnitřní povrchová úprava)

B – vzduchotěsná parozábrana pod vnitřním obkladem

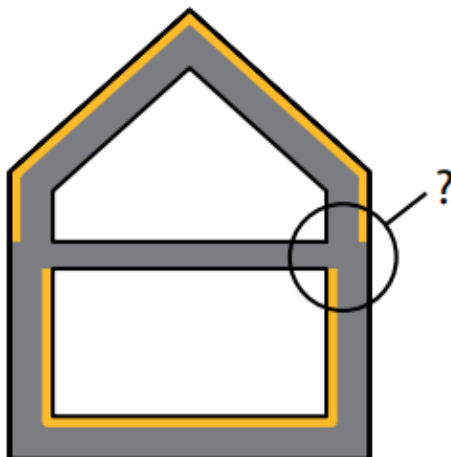
C – vzduchotěsná parozábrana uvnitř konstrukce

D – vzduchotěsná „větrová zábrana“ (větrovou zábranou se rozumí vrstva chránící tepelnou izolaci proti náporu větru, často zároveň plní funkci pojistné hydroizolace)

E – homogenní vzduchotěsnicí konstrukce

Hlavní vzduchotěsnicí vrstva by měla být ve všech typech konstrukcí umístěna v jedné poloze, čímž dochází k lepšímu vzájemnému napojení. V opačném případě při umístění HVV v různých polohách může docházet ke komplikovanému vzájemnému

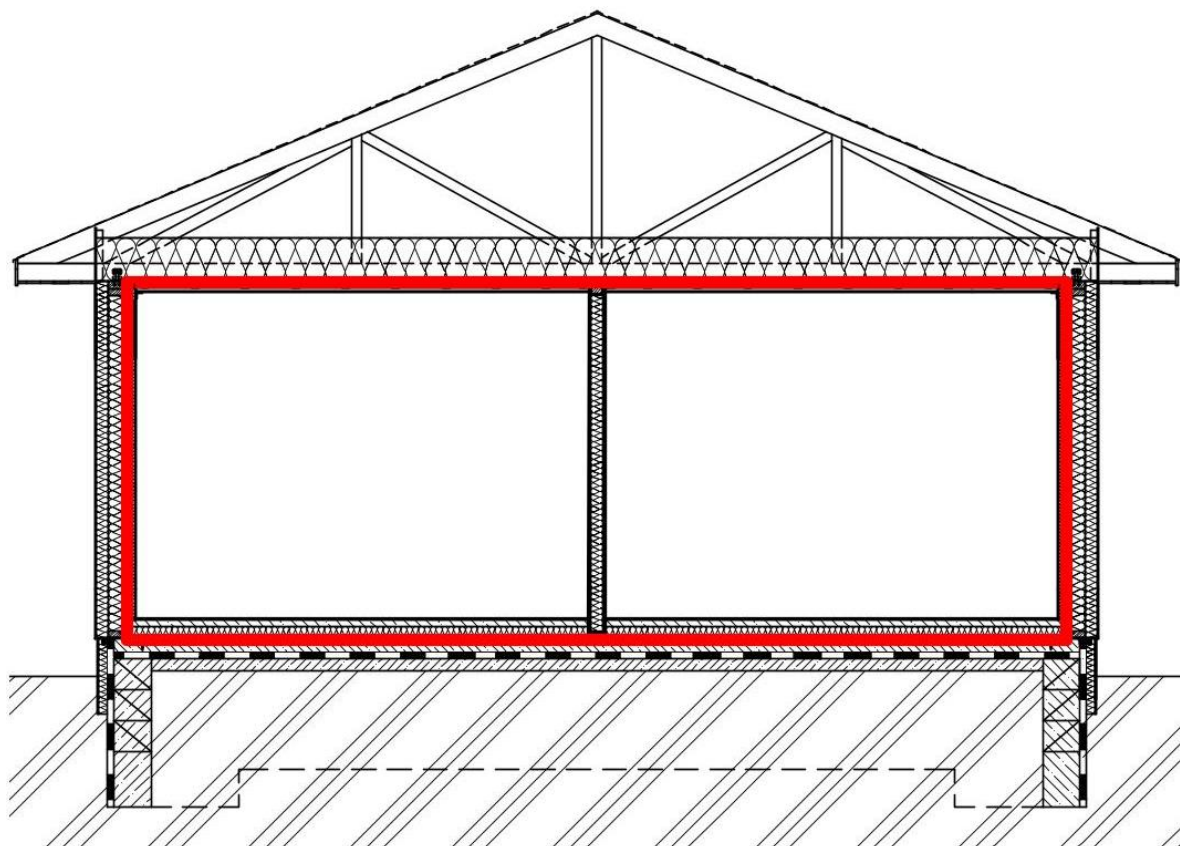
napojení. Chybný příklad umístění HVV je uveden níže na obrázku 9 (Elmroth, Levin, 1983).



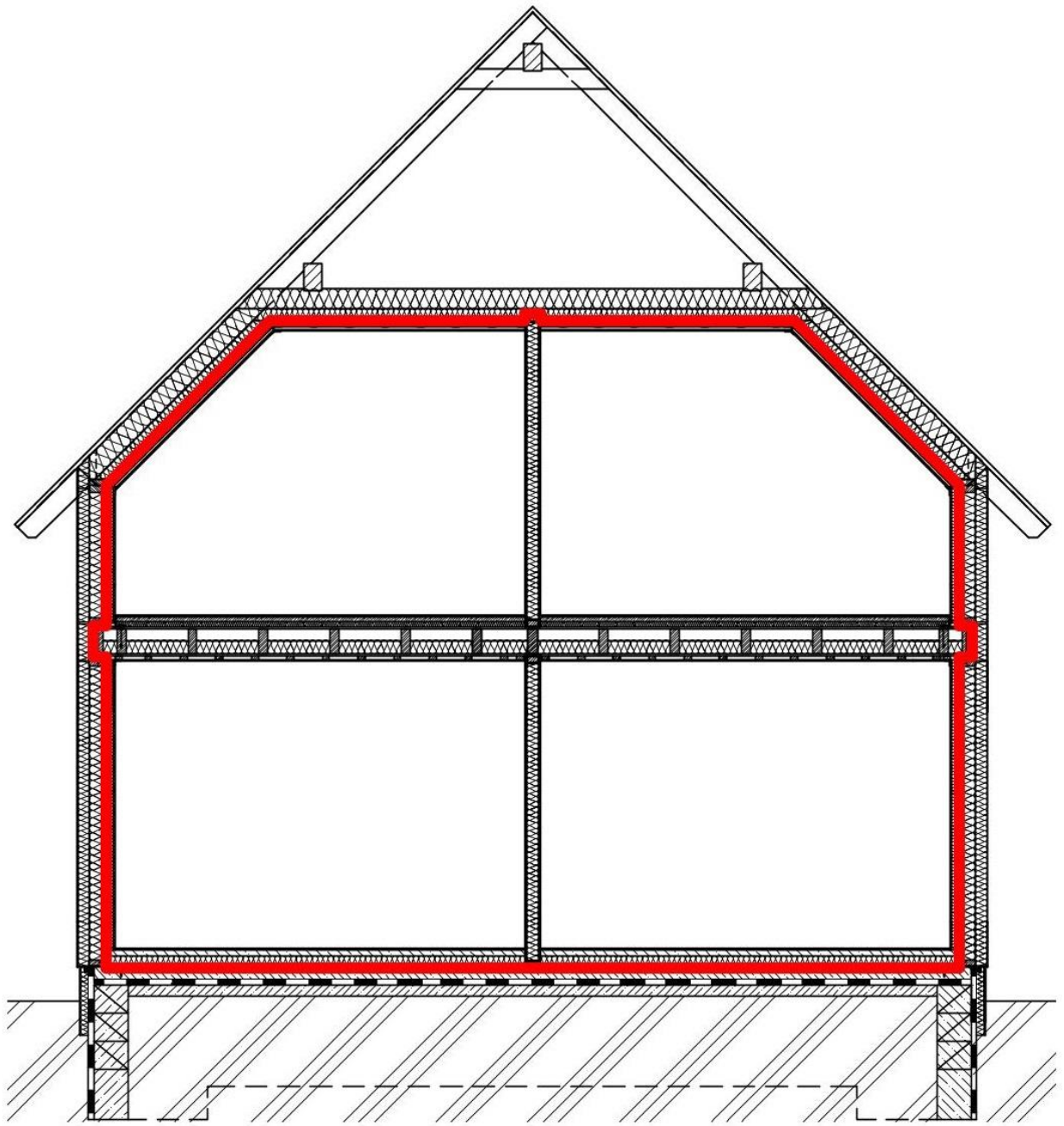
Obrázek 9 - odlišná poloha HVV jako příčina komplikovaného detailu. (Novák, 2008)

- **Příklady zajištění vzduchotěsnosti**

Příklady zajištění vzduchotěsnosti jsou znázorněny na obrázku 10 a 11. Příklady vychází z obrázku 8C, kdy je parozábrana umístěná uvnitř konstrukce.



Obrázek 10 - příklad zajištění vzduchotěsné obálky jednopodlažní budovy (autor práce, 2023).



Obrázek 11 - příklad zajištění vzduchotěsné obálky dvoupodlažní budovy (autor práce, 2023).

- **Druhy konstrukcí z hlediska vedení instalačních rozvodů**

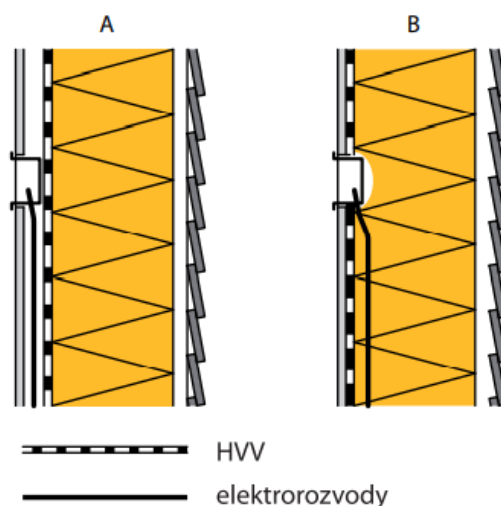
Pro umístění instalačních rozvodů se u dřevostaveb z celostěnových panelů nejčastěji používají dva typy konstrukcí znázorněné na obrázku 12. Mezi tyto konstrukce patří:

- **Konstrukce s instalační předstěnou**

- U tohoto typu konstrukce jsou rozvody vedené v instalační předstěně, před hlavní vzduchotěsnící vrstvou z důvodu zajištění celistvosti a minimalizace porušení HVV a dodatečné možnosti úpravy rozvodů (např. při poruchách).

- **Konstrukce bez instalační předstěny**

- U tohoto typu konstrukce je nutné dávat větší pozor na správné utěsnění vzduchotěsnící vrstvy, jelikož všechny prostupy procházejí skrze hlavní vzduchotěsnící vrstvu a musí se perfektně vzduchotěsně ošetřit (používat různé pásy, průchodky apod.). Jsou však oproti konstrukcím s instalační předstěnou ekonomičtěji výhodnější a celková tloušťka stěny je menší (Růžička, 2014).



Obrázek 12 - různá řešení rozvodů elektroinstalací v obvodové stěně dřevostavby.
(Novák, 2008)

A – rozvody v instalačním prostoru před HVV.

B – rozvody za HVV.

- **Hlavní zásady návrhu a realizace systému vzduchotěsnících opatření**

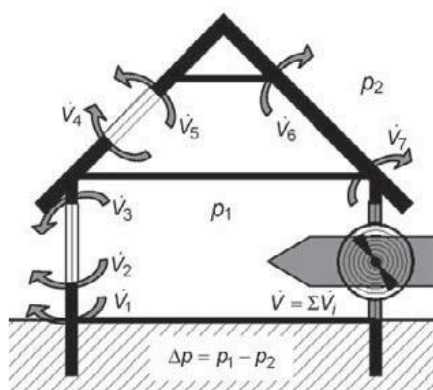
Pro kvalitní provedení stavby a dosažení nízké úrovně vzduchotěsnosti budovy je nutné dbát na řádně provedenou projekční přípravu, ale také na řádně provedenou práci při výstavbě budovy. Pro dosažení nejlepšího výsledku cílové úrovně vzduchotěsnosti je nutné splnit tyto podmínky:

- pečlivý návrh konstrukce,
- pečlivá realizace,
- kontrola provedení,
- informovanost všech účastníků návrhu a výstavby (Novák, 2008).

3.7. Používané metody pro měření vzduchotěsnosti s ohledem na platnou legislativu

3.7.1. Metoda tlakového spádu s externím ventilátorem

Metoda tlakového spádu s externím ventilátorem (ventilátor je součástí měřícího zařízení osazeného v obvodové konstrukci) spočívá v opakovaném měření průtoku vzduchu proudícího skrze obálku budovy při určitém tlakovém rozdílu. Budova je vystavena různým, kontrolovaným tlakovým rozdílům, které jsou vyšší než tlakové rozdíly způsobené přírodními vlivy, obvykle v rozmezí 20–80 Pa. Pomocí ventilátoru s proměnnými otáčkami je vyvolán tlakový rozdíl. Každý tlakový rozdíl je zaznamenán společně s odpovídajícím objemovým tokem vzduchu, který je transportován ventilátorem. Očekává se, že identické množství vzduchu uniká netěsnostmi v obvodovém plášti budovy viz. obrázek 13. Výsledkem jsou hodnoty tlakového rozdílu a objemového průtoku vzduchu z netěsností v obvodovém plášti budovy. (Novák, 2008).



Obrázek 13 - Princip metody tlakového spádu s externím ventilátorem (Novák, 2008)

3.7.2. Blower-door test

V principu se jedná se o metodu tlakového spádu s použitím externího ventilátoru. Tento princip testování byl zvolen pro potřeby této práce.

Jedná o nejjednodušší a nejvíce rozšířenou metodu zjišťování vzduchotěsnosti budov s nejlepšími výsledky.

Hlavním důvodem, proč provádět toto měření je možnost kontroly vzduchotěsníci vrstvy již při samotné výstavbě (po utěsnění veškerých prostupů a správném zajištění vzduchotěsné obálky budovy). Pokud by totiž při testu došlo k nalezení defektů ve vzduchotěsníci vrstvě, je možné je okamžitě opravit a vyvarovat se následným defektům v konstrukci (snížení životnosti stavby, zvýšení tepelných ztrát, snížení účinnosti větracích systémů, snížení kvality vnitřního prostředí apod.).

V EU se k měření používá postup popsany v normě ČSN EN ISO 9972.

- **Měřicí zařízení**

Je zde několik výrobců, a existují různé varianty blower-door testu, přičemž mezi nejznámější výrobce patří:

- Infiltec.
- Minneapolis Blowerdoor (viz. obrázek 15).
- Retrotec.
- Blowtest 3000.

Každé měřicí zařízení typu Blower-door se skládá z:

- teleskopického rámu,
- vzduchotěsné plachty s otvorem pro ventilátor,
- ventilátoru s plynule měnitelnými otáčkami,
- regulátoru otáček,
- zařízení pro měření objemového toku vzduchu (přesnost zařízení musí být $\pm 7\%$ z měřené hodnoty),
- zařízení pro měření tlakového rozdílu (přesnost ± 2 Pa v rozsahu 0 až 60 Pa),
- teploměrů pro zjišťování vnitřní a vnější teploty (s přesností ± 1 K),
- hadiček pro měření rozdílů tlaků mezi interiérem a exteriérem,

- vlhkoměru (Brich, 2024).

Doplňkovým zařízením při provádění blower-door testu je:

- notebook, tablet nebo další elektronické zařízení pro obsluhu Blower-door a pro zobrazení výsledků měření,
- utěšňující lepicí pásy,
- utěšňující balónky (viz. obrázek 14),
- hustilka pro nafukování balónků (viz. obrázek 14),
- anemometr,
- kouřová trubička,
- kouřové pero,
- vyvíječ kouře (Brich, 2024).



Obrázek 14 - příklad použití těsnícího balónku a hustilky (autor práce, 2024)



Obrázek 15 - Minneapolis Blowerdoor (autor práce, 2024)

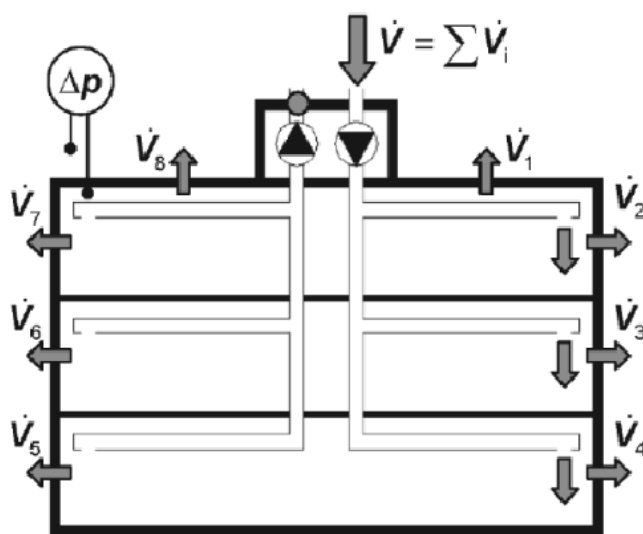
3.7.3. Metoda tlakového spádu s vnitřním ventilátorem

Metoda tlakového spádu s vnitřním ventilátorem slouží pro účely zjištění vzduchotěsnosti u velkých budov vybavených vlastním zařízením. K vyvolání potřebného tlakového rozdílu se používají ventilátory, které jsou umístěné v samotném větracím systému měřené budovy (Roulet, Alain, 1991).

Měření za pomoci této metody je založené na stejném principu jako u metody tlakového spádu s externím ventilátorem, která zahrnuje sérii měření objemového průtoku vzduchu prostupujícího obvodovou konstrukcí budovy. Pro použití této metody je však nezbytně nutné zajistit dostatečný výkon ventilátorů a schopnost regulace vyvolaného tlakového rozdílu.

Při měření podtlakem je tlakový rozdíl vytvořen pomocí ventilátorů umístěných na odtahovém potrubí, zatímco ventilátory na přívodním potrubí jsou vypnuty. Je velmi důležité správně utěsnit nasávací otvory přívodního potrubí, aby vzduch proudil pouze skrze netěsnosti v obvodovém plášti během měření – viz. obrázek 16. Při měření přetlakem se postupuje analogicky, kde jsou v provozu ventilátory na přívodním potrubí a odtahové potrubí je utěsněno.

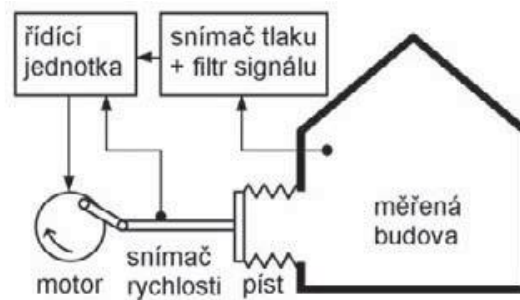
Před samotným zahájením měření je nutné zkontrolovat vhodnost použití umístěných větracích zařízení pro účely provádění testu vzduchotěsnosti. Ne všechna zařízení je možné použít z důvodu jejich práce v nestandardním režimu – střídání tlaku a podtlaku (Novák, 2008).



Obrázek 16 - Princip metody tlakového spádu s vnitřním ventilátorem (Roulet, Alain, 1991).

3.7.4. Metoda harmonicky proměnného tlakového rozdílu

Metoda harmonicky proměnného tlakového rozdílu slouží pro účely zjištění vzduchotěsnosti, kdy budova je vystavena harmonicky proměnnému tlakovému rozdílu a sleduje se reakce uvnitř budovy na tyto změny. Z charakteru této reakce se následně získávají informace o vzduchotěsnosti obvodového pláště. Za pomoci pohybu pístu, který s určitou frekvencí opakovaně stlačuje objem vzduchu uvnitř budovy je generována harmonická změna tlakového rozdílu viz. obrázek 17.



Obrázek 17 - Princip metody s harmonicky proměnným tlakovým spádem (Roulet, Alain, 1991).

Během měření se sledují tyto dvě hlavní veličiny:

- amplituda tlakového rozdílu vyvolaného pístem,
- fázový posun mezi změnou tlaku v budově a polohou pístu.

Objemový tok vzduchu vycházející z netěsností se vypočítá za pomoci dvou veličin uvedených výše. Ekvivalentní plocha netěsnosti A_L obálky měřené budovy se odvodí z vypočítaného objemového toku vzduchu a změřeného tlakového rozdílu.

Tato metoda není vhodná pro měření budov s výraznými netěsnostmi a je schopna detekovat netěsnosti pouze do určité kritické velikosti. U větších netěsnosti nad kritickou mez zůstávají výsledky měření konstantní.

Jedná se tedy o metodu vhodnou zejména pro měření těsných budov. Její výhody spočívají zejména v:

- rychlém měření,
- okamžitém výpočtu výsledku,
- malé výměně vzduchu,
- nižší citlivosti vůči klimatickým jevům oproti dvou předchozích metod (Novák, 2008).

3.7.5. Metoda tlakového impulzu

Metoda tlakového impulzu slouží pro účely zjištění vzduchotěsnosti, kdy při jednorázovém tlakovém impulzu v netěsném prostoru klesá tlakový rozdíl v čase a rychlost tohoto poklesu tlaku je zásadně ovlivněna vzduchotěsností obálky prostoru. Informace o vzduchotěsnosti obálky lze získat porovnáním naměřených dat s teoretickým průběhem poklesu tlaku. Vyvolání tlakového impulzu může být způsobené pouhým zavřením vchodových dveří.

Pro měření se v praxi používá citlivý manometr pro záznam rychlého poklesu tlakového rozdílu a datový sběrač s vysokou vzorkovací frekvencí (Novák, 2008).

I přes to, že byla tato metoda teoreticky zpracována a vyzkoušena v praxi, je rychlá, jednoduchá a nevyžaduje složitá zařízení, tak se pro měření budov nepoužívá. Bylo by však možné metodu podobného principu používat při laboratorních testech stavebních materiálů. (Mattson, Claesson, 2007).

3.8. Materiály pro vzduchotěsnící rovinu

Výběru výrobků pro zajištění vzduchotěsnosti hlavní vzduchotěsnící vrstvy je potřeba věnovat při návrhu konstrukce a samotné realizaci stavby velkou pozornost. Je nutné se řídit technickými listy výrobků, popř. použití výrobku v konstrukci konzultovat s výrobcem vzduchotěsnících prvků. Nejlepším řešením z hlediska výběru materiálů pro zajištění HVV je používání certifikovaných systémových výrobků, výrobků z nabízeného sortimentu jednoho výrobce, kde by měla být zaručena vzájemná kompatibilita výrobků a používání kvalitních a prověřených výrobků, které garantují určitou životnost. Na životnost systému má také velký vliv samotné zabudování vzduchotěsnících výrobků do konstrukce. Kombinace výrobků a experimentace s různými materiály se velmi nedoporučuje (Novák, 2008).

- **Materiály pro zajištění hlavní vzduchotěsnící vrstvy**

Ve skladbě stěn panelových dřevostaveb jsou tyto materiály navrženy zejména za účelem zajištění vzduchotěsnosti v ploše konstrukce (v některých případech však mohou plnit i další funkce – např. zajištění plošné stability rámu panelové dřevostavby). Hlavní vzduchotěsnící vrstva u dřevostaveb je zajištěna zejména pomocí konstrukčních desek na bázi dřeva, jako jsou OSB desky, MDF desky nebo parotěsné/parobrzděné folie. Mohou ji však také zajišťovat materiály na bázi sádry. Druh použité HVV však volíme v závislosti

na tom, zda se jedná o difuzně uzavřenou či otevřenou skladbu stěny. U skladeb difuzně uzavřených konstrukcí stěn používáme parozábrany a u skladeb s difuzně otevřenou konstrukcí stěn používáme parobrzdny (Hrubý, 2020).

- **Parozábrany**

Jejich hlavním účelem je zamezit pronikání vlhkosti z interiéru do skladby dřevěné konstrukce a exteriéru (Rigips ©2024). U těchto materiálů se hodnoty ekvivalentní tloušťky vzduchové vrstvy (sd) pohybují v rozmezí od 100 m až nad 1500 m. Jsou tvořeny zejména formou parotěsných folií (Dörken ©2024). Příklady parozábran jsou uvedeny na obrázcích 18 a 19 níže.



Obrázek 18 - Isocell Airstop Vap (Isocell ©2024).



Obrázek 19 - Isocell Airstop 1500 (Isocell ©2024).

- **Parobrzdny**

Jejich hlavním účelem je omezit pronikání vlhkosti z interiéru do skladby dřevěné konstrukce a exteriéru. Tento typ vzduchotěsníci vrstvy tedy umožňuje prostup vodních par skrze konstrukci stěny (Rigips ©2024). U těchto materiálů se hodnoty ekvivalentní tloušťky vzduchové vrstvy (Sd) pohybují v rozmezí od 0,5m až do 100 m. Jsou tvořeny zejména formou parobrzdných folií, konstrukčních desek na bázi dřeva, popř. konstrukčních desek na bázi sádry znázorněných na obrázcích 20, 21 a 22 (Dörken ©2024).



Obrázek 20 - Isocell öko natur (Isocell ©2024).



Obrázek 21 - OSB Egger 3 (Egger ©2024).



Obrázek 22 - Fermacell Vapor (Fermacell ©2024)

- **Lepící pásky**

Parotěsné

Lepení parozábran, lepení styků mezi deskami, napojení HVV na další prvky a konstrukce, přelepování detailů, které mohou vést ke zhoršení vzduchotěsnosti stavby (např. přelepění sponek), opravy defektů (např. protržené fólie) apod.

Paropropustné

Slouží především pro lepení difuzních folií (pojistných hydroizolací a větrových zábran) ve dvouplášťových obvodových konstrukcích (Novák, 2008). Druhy těchto materiálů jsou zobrazeny na obrázku 23 a 24.



Obrázek 23 – ISOCELL AIRSTOP ELASTO lepicí páska (Isocell ©2024).



Obrázek 24 - paropropustná páska Guttaband DO Profi (Gutta ©2024)

- **Pásky s přilnavostí k různým typům materiálů**

Slouží ke spojení dvou vzájemně odlišných materiálů (např. HVV na základovou desku), přičemž při použití tohoto typu pásky (zejména pásky s lepidlem na bázi butylu viz. obrázek 26) je nutné povrch před instalací této pásky vyrovnat, očistit a napenetrovat (penetraci provést např. sprejem UNI PRIMER viz. obrázek 25), (Isocell ©2024).



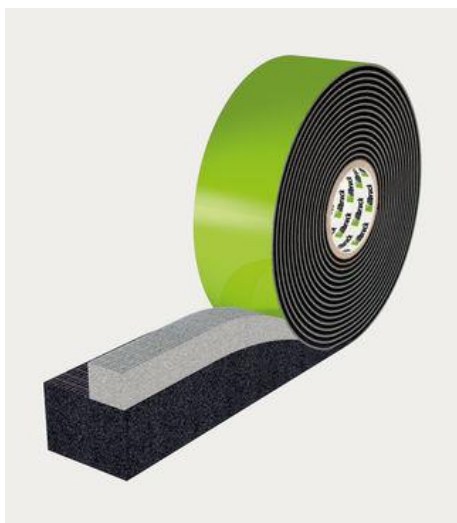
Obrázek 25 - ISOCELL UNI SPREJ PRIMER (Isocell ©2024).



Obrázek 26 - ISOCELL OMEGA DB těsnící páska (Isocell ©2024).

- **Okenní pásky**

Slouží k zajištění vzduchotěsného spojení okenního/dveřního rámu a obvodové konstrukce. Vyrábí se v mnoha různých variantách jak pro vnitřní, tak vnější použití (Novák, 2008). Druhy těchto materiálů jsou zobrazeny na obrázku č. 27 a 28.



Obrázek 27 - illbruck illmod Trio +
(illbruck ©2024).



Obrázek 28 - okenní fólie illbruck interiér
VV (illbruck ©2024).

- **Speciální těsnící pásky pro utěsnění prostupů**

Slouží k zajištění vzduchotěsnosti HVV, která byla poškozena z důvodu průchodu prostupů. Pro tento typ prolepení nelze použít pásky běžně používané např. pro přelepení sponek, ale je nutné použít pružné a adhezivní pásky zobrazené na obrázku 29, které je možné vytvarovat do přesného tvaru prostupu a dochází tak k lepšímu zajištění vzduchotěsnosti (alternativou je použití manžet – viz. manžety a průchodky), (Isocell ©2024).



Obrázek 29 - ISOCELL AIRSTOP VBB flís –
bitumenkaučuková páska (Isocell ©2024).

- **Lepící a těsnící tmely**

Tyto tmely slouží k zajištění vzduchotěsnosti v místech, kde je pomocí běžných materiálů velmi obtížné vzduchotěsnost zajistit. Tmely – viz. obrázek 30 a 31 jsou vhodné k trvalému a elastickému utěsnění spár, k lepení styku fólií apod. Tyto tmely jsou také vhodné pro lepení fólií vytažených z panelů k základové desce z důvodu vyplnění možné nerovnosti tmelem, (Novák, 2008).



Obrázek 30 - těsnící tmel
(illbruck ©2024).



Obrázek 31 - AIRSTOP SPRINT
těsnící tmel (Isocell ©2024).

- **Těsnící pásky**

Komprimační pásky slouží k vzduchotěsnému utěsňování širokých spár nebo spár s rozdílnou šířkou, přičemž povrchy vymežující spáru musí být dostatečně hladké. Při aplikaci dokáže páska po odlepení z kotouče zvětšit svůj objem a vyplní prostor vyplňované spáry. Pro utěsňování tenkých spár, které není možné utěsňovat jiným způsobem (přelepením, vytmelením) a které mají nerovné plochy se používají tenké a málo stlačitelné pásky, jejichž vzduchotěsnost zajišťuje právě důkladné stlačení pásky. Aplikují se především během montáže, kdy na podkladní vrstvu je položena právě tato páska a na ni další stavební prvek (např. panel), který dokáže stlačit pásku svou hmotností. Pro utěsnění, např. rohovém spojení panelů a délkového spojení panelů lze použít pásku ILLAC 600 - viz. obrázek 32, u které je výrobcem garantována (za splnění výrobcem uvedených podmínek) propustnost ve spárách a $\leq 0,1 \text{ m}^3 / [\text{h} \cdot \text{m} \cdot (\text{daPa})^n]$, (illbruck ©2024).



Obrázek 32 - illbruck illac 600 (illbruck ©2024).

- **Manžety a průchodky**

Pro zajištění vzduchotěsnosti prostupujících prvků skrze hlavní vzduchotěsnící vrstvu je velice efektivní a snadné použití průchodek různých tvarů a velikostí (průchodky od velikosti průchodu pro jeden kabel až po velikost kanalizačního potrubí). Manžety zobrazené na obrázcích 33–36 dokážou dokonale obepnout prostupující prvek a příruba manžety je přilepena k hlavní vzduchotěsnící vrstvě pomocí samolepících pruhů, popř. pokud jimi výrobek nedisponuje, může být přilepena pomocí vhodného tmelu nebo lepicí pásky. (Novák, 2008).



Obrázek 33 - AIRSTOP D1 manžeta na kabely (Isocell ©2024).



Obrázek 34 - AIRSTOP RGD manžeta na trubky (Isocell ©2024).



Obrázek 35 - AIRSTOP FRGD skládací manžeta na trubky (Isocell ©2024).



Obrázek 36 - OMEGA UDOS manžeta na trubky (Isocell ©2024).

- **Elektroinstalační krabice**

Pokud není možné umístit elektroinstalaci před hlavní vzduchotěsnicí vrstvu (v případě konstrukce bez použití instalační předstěny), dochází k narušení hlavní vzduchotěsnicí vrstvy prostupy, elektroinstalační krabicí, popř. rozvaděčem a dojde ke vzniku netěsností. Proto je vhodné použít vzduchotěsné elektroinstalační krabice zobrazené na obrázku 37, které mají otvory pro kabely opatřené vzduchotěsnicí pružnou membránou, která kabel vzduchotěsně obejmě. Mezi krabicí a hlavní vzduchotěsnicí vrstvou se vloží těsnění, které po připevnění elektroinstalačního prvku (zásuvka, vypínač apod.) přilne k hlavní vzduchotěsnicí vrstvě, popř. je krabice vyrobena z pružných materiálů a po ukotvení perfektně přilne k hlavní vzduchotěsnicí vrstvě a vzduchotěsnost mezi krabicí a hlavní vzduchotěsnicí vrstvou zůstane zachována (Novák, 2008).



Obrázek 37 – vzduchotěsná krabice KAISER (Kaiser ©2024).

- **Vzduchotěsný komín**

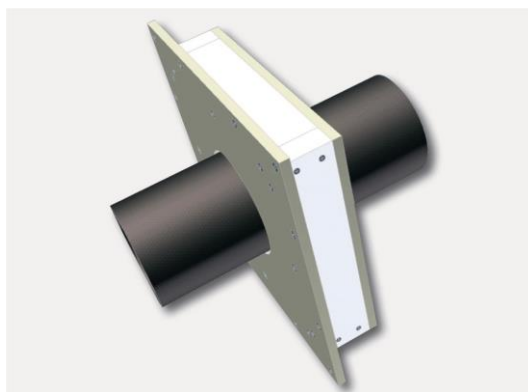
K netěsnostem v konstrukci může docházet také vlivem netěsnícího komínového tělesa, které může ohrozit celkový výsledek vzduchotěsnosti budovy. Proto v sortimentu některých výrobců komínů najdeme vzduchotěsné komínové systémy (např. Multi Prefa viz. obrázek 38), které zajišťují vzduchotěsnost právě této problematické části. Nejspolehlivějším řešením pro zajištění vzduchotěsnosti u většiny klasických komínových těles je tzv. natažení do lepidla“, které zajistí dostatečnou neprůvzdušnost komínu (Centrum pasivního domu, ©2024).



Obrázek 38 - vzduchotěsný komín MULTI PREFA (Stavby – komíny ©2024).

- **Prostupy pro kouřovod**

Pokud kouřovod prochází skrze stěnu/strop/střechu je nutné ať už z hlediska zajištění vzduchotěsnosti nebo z hlediska zajištění bezpečné vzdálenosti kouřovodu od hořlavých materiálů použít prefabrikované dílce viz. obrázek 39 splňující výše uvedené parametry. Kouřovod tedy prochází prefabrikovaným dílcem, ke kterému je napojena hlavní vzduchotěsnicí vrstva, přičemž je splněn i požadavek na nehořlavost a odstupové vzdálenosti. Prefabrikovaný dílec může být vyroben např. z promatových desek (Promat s.r.o., 2024).



Obrázek 39 – PROMATUBE (Promat s.r.o. ©2024).

- **Půdní dvířka**

K netěsnostem v konstrukci může docházet také vlivem netěsnících dvířek do půdního prostoru, vlivem netěsnícího výlezu na střechu apod. Tyto prvky zpravidla nejsou izolované, jsou ve většině případů netěsné a nenapojené na hlavní vzduchotěsnicí vrstvu. Dochází zde k tepelným ztrátám, mohou ohrozit celkový výsledek vzduchotěsnosti budovy a mohou být příčinou vzniku kondenzace. K netěsnostem dochází především ve spáře mezi rámem a výklopným křídlem (díky chybějícímu těsnění), v kování a také mezi spoji. Poklop s půdními schody je často místo, kde dochází k největším netěsnostem, což může při měření testu vzduchotěsnosti obálky budovy vést k nevyhovující vzduchotěsnosti domu. Proto v sortimentu některých výrobců najdeme certifikované výrobky, které zajišťují vzduchotěsnost právě těchto různých typů dvířek. Dvířka mají těsnění, rám je vzduchotěsný a jsou opatřeny systémem pro napojení na hlavní vzduchotěsnicí vrstvu. (Zwiener, 2009).

3.9. Netěsnosti vzduchové obálky budovy

Obálku budovy nikdy nedokážeme dokonale vzduchotěsně zajistit a konstrukce do určité míry propouští vzduch. Dochází k tomu, že dokážeme velice dobře vzduchotěsně zajistit hlavní vzduchotěsnící vrstvu, tudíž zde je konstrukce vzduchotěsná. K proudění vzduchu však dochází v místech netěsných spojů mezi konstrukcemi, kde dochází k přerušení spojitosti vzduchotěsných vrstev, v netěsnosti kolem výplní stavebních otvorů, v prostupech apod. (bude specifikováno dále). K netěsnostem v obálce budovy dochází převážně u stavebních detailů, jež jsou příčinou vysokých hodnot n_{50} zjišťovaných při blower-door testu. Ke zjišťování netěsností dochází např. při provádění blower-door testu, viz kapitola 3.7.2.

3.9.1. Příčiny vzniklých netěsností v konstrukci

- **Příčiny chyb vzniklých při návrhu budovy:**
 - nevhodně zvolený materiál HVV,
 - neexistující podklady,
 - nedostatečné řešení konstrukčních detailů,
 - používání netěsných výrobků v konstrukci (např. pórovitá komínová tělesa, boxy na rolety, křbová kamna, střešní okna, HS portály, okna, dveře, ocelové prvky aj.),
 - nevhodná poloha hlavní vzduchotěsnící vrstvy ve skladbě konstrukce (nepoužívání instalační předstěny, odlišná poloha HVV),
 - nezajištění spojitosti hlavní vzduchotěsnící vrstvy,
 - výskyt prvků, které nelze vzduchotěsně zajistit (pohledové krovky, konstrukce balkonu vycházející ze stropu apod.),
 - netěsné napojení vzduchotěsnící vrstvy na základovou desku,
 - nevhodná skladba konstrukce,
 - nedostatečná dokumentace navržených opatření pro správné provedení vzduchotěsnosti (nedostatečná výkresová dokumentace – chybějící detaily, chybějící specifikace výrobků navržených pro vzduchotěsnící opatření – typ pásek, manžet, fólie..., nedostatečné informace v technické zprávě, chybějící popis provádění vzduchotěsnících opatření – technologické postupy, montážní návody apod.), (Brich, 2023).

- **Chyby vznikající při realizaci budovy:**
 - nedodržení technologických předpisů,
 - použití nevhodných výrobků pro vzduchotěsnicí opatření,
 - chybná koordinace stavebních prací – může např. dojít k neumožnění provedení hlavní vzduchotěsnicí vrstvy nebo k vytváření zbytečných prostupů,
 - nekvalitní provedení vzduchotěsných detailů,
 - nekvalitní provedení vzduchotěsnicí vrstvy, které mohlo být dělníky způsobeno vědomě a tento problém jimi dále nebyl řešen, nebo došlo k porušení vzduchotěsnicí vrstvy dělníky nevědomě, tudíž o tom dělníci nemuseli vůbec vědět (Brich, 2023).

3.10. Možnosti detekce netěsností v konstrukci

Při měření se vyhledávají defektní místa, u kterých dochází k netěsnostem ve vzduchotěsnicí vrstvě. Nalezený defekt je poté nutné opravit. Díky této kontrole dochází ke zvýšení životnosti konstrukce, zlepšení účinnosti vzduchotechniky, nepoddimenzování topné soustavy, k nižším nákladům na vytápění a také k eliminaci tepelných mostů. Nalezený defekt je zkušeností pro zhotovitele stavby, který se z chyby může ponaučit a v dalších konstrukcích by se těmto defektům měl vyvarovat (Nováček, 2012).

Mezi nejrozšířenější metody pro hledání netěsností při provádění blower-door testu patří:

- **Ruce technika provádějícího měření**

Jedná se o nejjednodušší, finančně nenáročnou variantu zjišťování netěsnosti vzduchotěsnicí vrstvy. Netěsnosti lze zjistit při podtlaku pomocí dlaně. Jedná se však pouze o lokální kontrolu, která vyžaduje velké zkušenosti technika a lze najít pouze větší netěsnosti (Nováček, 2012).

- **Vyhledávání netěsností pomocí kouře**

Pro vyhledávání netěsností pomocí kouře lze využít vyvíječ kouře, kouřové trubičky, popř. kouřové pero.

- **Vyvíječ kouře**

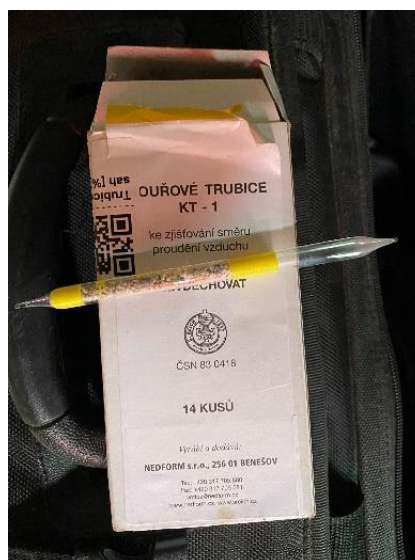
Zjišťování netěsností ve vzduchotěsnící vrstvě pomocí vyvíječe kouře viz. obrázek 40 probíhá tak, že dojde k zakouření celého objektu, následně dojde k vyvolání přetlaku v budově pomocí zařízení blower-door a z exteriéru se sledují místa, kterými kouř vychází ven z konstrukce. Při provádění této metody se kontroluje celá budova, avšak vyžaduje vyšší finanční náročnost, kouř není příliš viditelný a nelze přesně diagnostikovat místa úniku (Nováček, 2012).



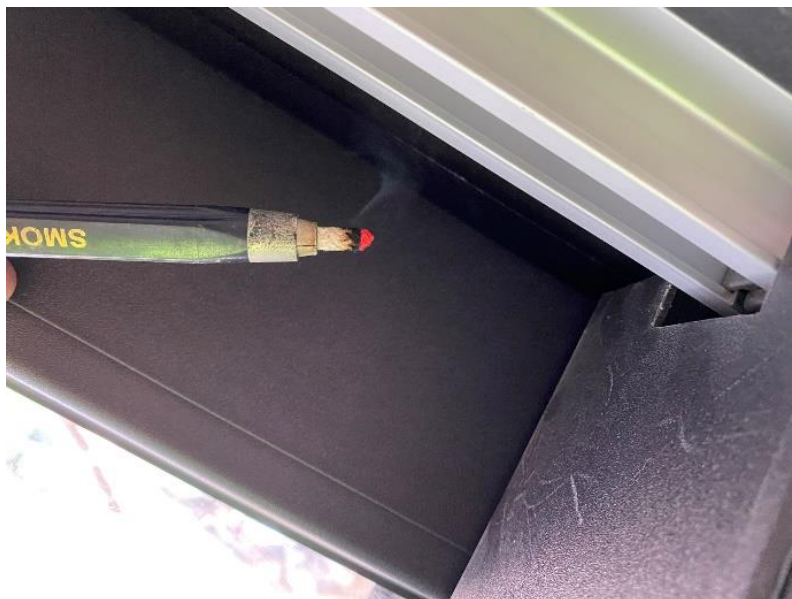
Obrázek 40 - vyvíječ kouře (H&W Luftdichtigkeitsprüfung GbR, ©2024).

- **Kouřové trubičky a pera**

Zjišťování netěsností ve vzduchotěsnící vrstvě pomocí kouřové trubičky nebo pera viz. obrázek 41 a 42 spočívá ve vytvoření přetlaku v měřeném objektu a kouř se snaží uniknout netěsnostmi ve vzduchotěsnící vrstvě. Jedná se o finančně nenáročnou a přesnou zjišťování netěsnosti, avšak vyžaduje velké zkušenosti technika a jedná se pouze o lokální kontrolu (Kořínek, 2013).



Obrázek 41 – kouřová trubička (autor práce, 2024).



Obrázek 42 - kouřové pero (autor práce, 2024).

- **Vyhledávání netěsností pomocí anemometru**

Při této metodě probíhá zjišťování netěsností ve vzduchotěsníci vrstvě pomocí anemometru znázorněného na obrázku 43, který měří rychlost pohybu vzduchu při podtlaku v budově, který je vyvolaný pomocí zařízení blower-door. Jedná se o časově nenáročné zjišťování netěsnosti vzduchotěsníci vrstvy, nicméně je vhodné pouze pro lokální kontrolu a vyžaduje velké zkušenosti technika provádějícího měření (Kořínek, 2013).



Obrázek 43 - anemometr (autor práce, 2024).

- **Vyhledávání netěsností pomocí ultrazvuku**

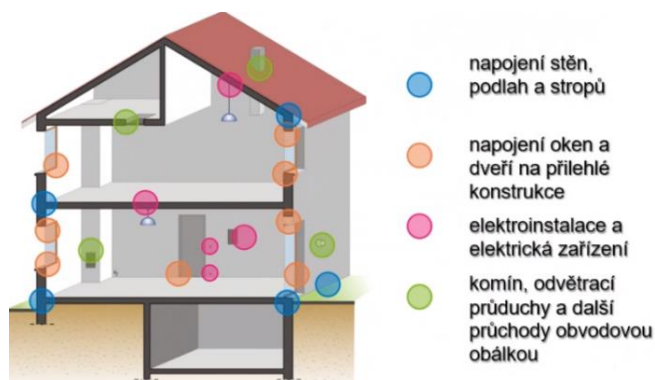
Při provádění této metody probíhá zjišťování netěsností vzduchotěsnicí vrstvy pomocí zařízení s vysokofrekvenčním vyvíječem vzduchu a detektorem, který zaznamenává ultrazvukové vlny pomocí speciální sondy. Jelikož ultrazvukové vlny procházejí pouze netěsnostmi v konstrukci, dojde k umístění zdroje na jednu stranu konstrukce a k detekci netěsností dochází na druhé straně. Při této metodě není potřeba využívat zařízení blower-door, jelikož tato metoda nevyžaduje tlakový rozdíl. Je však finančně náročnější a je zde nutná potřeba dalšího zařízení (Nováček, 2012).

- **Vyhledávání netěsností pomocí infračervené kamery**

Princip vyhledávání netěsností vzduchotěsnicí vrstvy pomocí infračervené kamery spočívá v nasnímání celé měřené konstrukce, následném vytvoření podtlaku v budově, který je vyvolán pomocí zařízení blower-door (z důvodu ochlazení konstrukce pomocí studeného vzduchu, který byl do konstrukce vehnán) a po cca. 10–15 minutách vytváření podtlaku a ochlazování konstrukce se místa znovu proměří pomocí infračervené kamery, na které by při správném zachování postupu měření měly být viditelné netěsnosti vzduchotěsnicí vrstvy. Tento způsob vyhledávání netěsností vzduchotěsnicí vrstvy je neúčinnější (lze provést celoplošnou kontrolu a nalézt netěsnosti i pod dokončovací vrstvou), nicméně lze provádět pouze za vhodných klimatických podmínek (minimální rozdíl teplot mezi interiérem a exteriérem musí být alespoň 5 °C), vyžaduje zkušenosti technika a nedetekuje malé netěsnosti (Nováček, 2012).

3.11. Nejčastější netěsnosti v obálce budovy

Kritická místa, kde dochází k nejčastějšímu výskytu netěsností jsou uvedena na obrázku 44 níže:



Obrázek 44 - nejčastější místa netěsností (Maxwell, 2018).

4. Metodika

4.1. Metodika literární rešerše

Literární rešerše je vypracována za pomoci volně dostupných bibliografických, vědeckých, legislativních a internetových zdrojů. Literární rešerše je zaměřena především na problematiku panelových dřevostaveb. Je popsán zejména historický vývoj, rozdělení konstrukcí a výrobní a montážní postupy. Velká část literární rešerše je zaměřena na vzduchotěsnost, která je hlavním tématem této práce. Dále je poukázáno na možnosti zajištění vzduchotěsnosti, konstrukční možnosti z hlediska difuze vodních par a vedení instalačních rozvodů. Následně jsou popsány a znázorněny metody měření vzduchotěsnosti s ohledem na platnou legislativu, používané materiály pro zajištění vzduchotěsnosti, netěsnosti vzduchové obálky budovy a příčiny jejich vzniku a možnosti detekce netěsností v konstrukci.

4.2. Metodika analýzy měření vzduchotěsnosti na třech stavbách na bázi dřeva

Vzduchotěsnost je nepochybně klíčovým prvkem pro efektivní a energetickou účinnost dřevostaveb. Analýza měření vzduchotěsnosti je pro účely této práce provedena na třech konkrétních stavbách na bázi dřeva postavených formou celostěnových panelů s difuzně otevřenou konstrukcí. Tato analýza je prováděna pomocí Blower-door testu (podrobný popis testu je uveden v kapitole 3.7.1. a 3.7.2.), který umožňuje měřit průnik vzduchu skrze konstrukci budovy a identifikovat tak potenciální úniky.

Tato analýza umožňuje porovnat účinnost vzduchotěsných obálek a identifikovat tak klíčové oblasti, kde dochází k únikům vzduchu u dispozičně i tvarově odlišných budov realizovaných systémem skladby stěn DIFU ECO ENERGO společnosti PILA MARTINICE s.r.o.

4.2.1. Postup měření

Správný postup měření je vždy závislý na typu měřicího přístroje, na pokynech výrobce měřicího zařízení a také na vnějších klimatických podmínkách, při kterých dochází k testu. Důležitým faktorem ovlivňující přesnost a výsledek měření je také ale odborná znalost technika, který provádí test (je nutné, aby znal normy, přesně zadával hodnoty do měřicího zařízení, měl zkušenost s prováděním blower-door testů apod.). Technik provádějící test by měl být také manuálně zručný (při osazení měřicího zařízení do rámu dveří, vyhledávání netěsností, přípravě stavby před začátkem testu apod.).

Z tohoto důvodu je postup měření, příprava a vyhodnocení výsledku popsán v normě ČSN EN ISO 9972 (ČSN EN ISO 9972, 2017).

Postup měření se skládá z několika kroků:

- kontrola klimatických podmínek před měřením,
- měření vnitřní plochy a objemu budovy bez vnitřních zdí,
- příprava měřicího zařízení,
- příprava měřeného objektu,
- osazení měřicího zařízení,
- volba tlakových rozdílů,
- měření základního tlakového a teplotního rozdílu před začátkem testu,
- provádění vlastního testu – měření závislosti objemového toku vzduchu na tlakovém rozdílu,
- měření základního tlakového a teplotního rozdílu po skončení testu,
- vyhodnocení testu (Srba, 2016).

1. Kontrola klimatických podmínek před měřením

Kontrola klimatických podmínek je velice důležitá, jelikož tlakové účinky větru a rozdíly teplot v interiéru a exteriéru mohou být příčinou chybného měření. Měření by tedy mělo probíhat jen v případě co možná nejmenšího teplotního rozdílu (teplota je zjišťována pomocí interiérových a exteriérových teploměrů a neměla by překročit hodnotu $500 \text{ m}^3\text{K}$, která je vypočtena ze vzorce $\Delta t \cdot v \leq 500 \text{ [m}^3\text{K]}$, kde $\Delta t \text{ [K]}$ = rozdíl teplot mezi interiérem a exteriérem a $v \text{ [m]}$ = světlá výška měřené budovy a ideálně při bezvětří (síla větru by neměla být vyšší než 6 m/s, resp. nemá být překročena o více než 3° Beaufortovy stupnice). Zaznamenané hodnoty je nutné zapsat a později je zapsat do měřicího zařízení Blower-door (Srba, 2016).

2. Měření vnitřní plochy a objemu budovy bez vnitřních zdí

Měření vstupních dat, bez kterých nelze měření provést. Jedná se o měření vnitřního objemu budovy vč. příček, měření čisté podlahové plochy a plochy pláště budovy. Měření provádíme pomocí laserového dálkoměru nebo ručně pomocí metru. Podlahové plochy vypočteme z projektové dokumentace. Zaznamenané hodnoty je nutné zapsat a později je zapsat do měřicího zařízení Blower-door.

3. Příprava měřícího zařízení

Jedná se o správné zadání naměřených hodnot do měřícího zařízení Blower-door, bez kterých nelze měření provést. Hodnoty zadáváme do formuláře v počítači, který s hodnotami následně pracuje při provádění testu. Zadávanými hodnotami jsou: Vnitřní objem, čistá podlahová plocha, plocha pláště budovy, síla větru a větrná expozice, vnitřní a vnější teplota, vnější a vnitřní tlak, systém vytápění a systém pro úpravu vzduchu.

4. Příprava měřeného objektu

Pro měření lze využít tři možnosti přípravy budovy, které definuje norma ČSN EN ISO 9972. Jedná se o metodu 1, 2 a 3.

Metoda 1 – měření se provádí v provozním stavu budovy buď v letních nebo zimních měsících (měření by mělo probíhat v období kdy se používá topení nebo klimatizace). Aby došlo k naměření reálného výsledku stavby, která se užívá, neprovádí se žádná dodatečná opatření pro zajištění vzduchotěsnosti stavby. Před měřením dojde pouze k zavření oken a dveří, popř. se uzavřou větrací klapky (nesmí dojít k utěsnění těchto větracích klapek – viz norma ČSN EN ISO 9972) v obvodové konstrukci a vyčistí se krb od sazí společně s krbovou vložkou, aby nedošlo k znečištění jejich okolí. Následně probíhá vlastní test, jehož výsledek udává celkovou vzduchotěsnost objektu, ve které jsou zahrnuty jeho netěsnosti, otvory a technické zařízení. Tento test se provádí zejména kvůli získání hodnoty do energetického výpočtu, kde je nutné znát celkovou výměnu vzduchu vč. netěsností v konstrukci, popř. se test provádí z důvodu možnosti získání dotace „Zelená úsporám“, (Srba, 2016).

Metoda 2 – měření se provádí v tu chvíli, kdy je budova osazena okny a dveřmi a je provedena vzduchotěsná obálka budovy včetně provedení veškerých detailů sloužících k zajištění vzduchotěsnosti obálky. Aby nedošlo k poškození vzduchotěsníci vrstvy během testu, je nutné tuto vrstvu zajistit např. tím, že ji pomocí latí připevníme k rámu panelu (v případě použití fólie jako vzduchotěsníci vrstvy není dostačující její připevnění k rámu pomocí sponek – mohlo by dojít k jejímu vytržení). Tato metoda je výhodnější z hlediska možnosti provedení kontroly kvality vzduchotěsníci vrstvy již ve fázi výstavby budovy, kdy v případě detekce netěsnosti je možné defekt jednoduše opravit již během samotného provádění testu a oprava tak není ekonomicky náročná (ve srovnání s opravou defektu při měření pomocí metody 1). Před samotným provedením testu je nutné, jak říká norma ČSN EN ISO 9972 utěsnit nebo uzavřít veškeré úmyslné

otvory v konstrukci, kterými jsou: Komínová tělesa, klimatizační rozvody, rozvody vzduchotechniky, odpadní potrubí, větrací klapky, vodovodní potrubí, otvory pro digestoř, rozvody pro odvětrání radonu a ostatní úmyslně vytvořené otvory (utěsnění otvorů je zobrazeno na obrázcích 45 a 46). K utěsnění úmyslných otvorů se využívají běžně dostupné materiály, které slouží pouze pro účely testu, pro který jsou naprosto dostačující (lepící papírové pásky, pryžové balónky s hustilkou, parotěsné fólie apod.), přičemž provedení těchto dočasných opatření pro účely testu musí být provedeno ve vysoké kvalitě, aby nedocházelo k únikům právě v těchto místech a nedocházelo k ovlivnění výsledků testu. V případě, že při provádění testu dojde ke zjištění netěsnosti v některé části konstrukce, je nutné tento defekt opravit pomocí materiálů k tomu určených a v konstrukci používaných (z důvodu systémového řešení konstrukce) – jedná se především o vzduchotěsné pásky, tmely, fólie, spreje apod. Pro zjišťování netěsností se nejdříve provádí předběžný test, při kterém dokážeme odhalit a následně opravit netěsnosti. Následuje vlastní „ostrý“ průběh testu, který trvá cca. 5-10 min. Po dokončení testu dochází k bezpečnému odstranění vzduchotěsnících opatření, které bylo nutné kvůli provádění testu zajistit. Při odstraňování těchto vzduchotěsnících opatření je nutné dbát na to, aby nedošlo k poškození vzduchotěsnící vrstvy objektu (Srba, 2016).



Obrázek 45 - utěsnění odpadu papírovou páskou (autor práce, 2024).



Obrázek 46 - utěsnění komínu pomocí těsnícího balónku (autor práce, 2024).

Metoda 3 - metoda zkoušky budovy pro zvláštní účely, při níž se připravené záměrné otvory přizpůsobí účelu zkoušky v souladu s normou ČSN EN ISO 9972. Záměrné otvory se uzavřou nebo utěsní (podle konkrétního účelu zkoušky). Otvory v obálce, které neslouží k větrání se uzavřou, utěsní nebo ponechají otevřené opět v závislosti na konkrétním účelu zkoušky (ČSN EN ISO 9972, 2017).

5. Osazení měřicího zařízení

- Při instalaci měřicího zařízení je nutné dbát na:
 - výběr vhodného otvoru pro usazení měřicího zařízení,
 - zajištění volného prostoru před a za ventilátorem pro volné proudění vzduchu,
 - zajištění vzduchotěsného spojení měřicího zařízení s obvody konstrukcí,
 - vhodné umístění tlakových čidel z důvodu ochrany před nežádoucími klimatickými vlivy (Srba, 2016).
- Rám měřicího zařízení (jedná se o univerzální teleskopický rám, který lze osadit jak do oken, tak dveří) se nejčastěji osazuje do vchodových dveří z důvodu:
 - volného prostoru v zádveří a možnosti proudění vzduchu do dalších místností (záleží na dispozici měřeného objektu),
 - snazší manipulace se zařízením, které není nutné zvedat do výšky,
 - nižšího počtu kování, než je u oken,
 - nižší těsnosti vchodových dveří oproti oknům, kdy vyloučíme jeden netěsný prvek konstrukce a dojde tak k „umělému“ zlepšení vzduchotěsnosti (tato skutečnost musí být uvedena v protokolu o měření), (Srba, 2016).

Před osazením rámu do dveřní zárubně dojde k proměření otvoru, do kterého se rám měřicího zařízení bude osazovat. Rám se připraví „na hrubo“ dle změřených rozměrů a připevní se na něj také „na hrubo“ vzduchotěsná plachta s otvorem pro ventilátor. Rám s plachtou se vloží do dveřní zárubně, následně se v zárubni „roztáhne“ na přesný rozměr zárubně, rozmístí se příčky do rámu a vzduchotěsná plachta se dopne, abychom zabránili případným netěsnostem a naměřili reálný výsledek. Do plachty se umístí ventilátor. Následně se na ventilátor napojí regulátor otáček a zařízení pro měření objemového toku vzduchu společně se zařízením pro měření tlakového rozdílu. Do měřicího zařízení se

následně připojí čidla (hadičky) pro měření rozdílů tlaků mezi interiérem a exteriérem. Tyto čidla je nutné chránit před nežádoucími klimatickými vlivy, aby nedocházelo ke zkreslení naměřených výsledků. Dále dojde k zadání základních informací o objektu do počítače. Počítač pro obsluhu a získání výsledků ze zařízení blower-door se k tomuto zařízení připojí pomocí internetu. Poté co jsou všechna zařízení mezi sebou propojena a jsou připojena do elektrické sítě, může dojít ke spuštění měřicího zařízení.

6. Volba tlakových rozdílů

Volba úrovní tlakových rozdílů pro měření objemového toku vzduchu by měla být taková, aby se maximálně omezil vliv povětrnostních podmínek na výsledky měření. Při větrném počasí je vhodné používat vyšší tlakové rozdíly. Norma ČSN EN ISO 9972 poskytuje doporučení pro stanovení minimální a maximální úrovně tlakového rozdílu. Každé měření by se mělo skládat alespoň z pěti měřících bodů, rovnoměrně rozložených mezi nejnižší a nejvyšší tlakový rozdíl, přičemž několik bodů by mělo být provedeno při tlakovém rozdílu vyšším než 50 Pa, pokud je to možné. Při volbě nejvyššího tlakového rozdílu je třeba zohlednit rozsah měřících přístrojů a riziko poškození budovy. U velkých nebo velmi netěsných budov se za určitých podmínek připouští i výsledky získané při tlakových rozdílech nižších než 50 Pa. Nicméně výsledky pod 25 Pa by podle normy ČSN EN ISO 9972 měly být prohlášeny za neplatné (Novák, 2008).

7. Měření základního tlakového a teplotního rozdílu před začátkem testu

Měření tlakového rozdílu probíhá před započítím a po skončení samotného testu průvzdušnosti budovy z důvodu proměnného účinku větru. K měření dochází po dobu 30 sekund a provádí se po osazení měřicího zařízení. Po tuto dobu dochází k záznamu průměrné hodnoty a ze zjištěných průměrných hodnot získaných před měřením testu průvzdušnosti a po měření testu průvzdušnosti se vypočte průměrná hodnota, která se použije ke korekci naměřených hodnot tlakového rozdílu. Ventilátor je po dobu měření tlaku zakrytý, případně probíhá výpočet tlakového rozdílu automaticky.

Měření teplotního rozdílu probíhá před započítím a po skončení testu a zapisuje se do měřicího zařízení blower-door jako hodnota rozdílu teplot mezi interiérem a exteriérem.

8. Provádění vlastního testu – měření závislosti objemového toku vzduchu na tlakovém rozdílu

Cílem provedení blower-door testu je změřit objemový tok vzduchu proudící netěsnostmi při různých úrovních tlakového rozdílu vyvolaného ventilátorem. Ventilátor nejdříve vhání vzduch do měřeného prostoru (je vyvolán přetlak) a po skončení tohoto typu měření dojde k otočení ventilátoru a ventilátor odvádí vzduch z měřeného prostoru, čímž je vyvolán podtlak. Po vytvoření tlakového rozdílu 50 Pa se po dobu cca. 1 minuty (viz. graf 2) měří objem vzduchu, který je nutné přivádět (odebírat) tak, aby tlakový rozdíl zůstal konstantní. Současně se zaznamenává venkovní tlak, vnitřní tlak a teplota. Následně dochází k postupnému snižování tlakového rozdílu na 40, 30, 20 a 10 Pa. (VVÚD s.p. ©2024).



Graf 2 - graf časového průběhu vyvolaných tlaků po dobu měření vzduchové neprůvzdušnosti (Loira ©2023).

— budova (Pa)

— fan (Pa)

9. Měření základního tlakového a teplotního rozdílu po skončení testu

Poté, co dojde ke skončení testu, je nutné změřit hodnoty základního tlakového a teplotního rozdílu stejným způsobem jako bylo popsáno v bodě 7 této kapitoly. Výsledné hodnoty se zapíší do měřicího zařízení blower-door.

10. Vyhodnocení testu

Jakmile dojde k zapsání hodnoty tlakového a teplotního rozdílu naměřených konečných hodnot do měřicího zařízení blower-door, zařízení ihned vygeneruje výslednou hodnotu měření, která je průměrnou hodnotou mezi naměřenou hodnotou přetlaku a podtlaku. Veškeré výpočty provádí automaticky počítač, přičemž výsledky musí být v souladu s požadavky normy ČSN EN ISO 9972.

4.2.2. 1. měřený objekt – RD Zichovec

Prvním měřeným objektem je RD zobrazený na obrázcích 47–49, nacházející se v obci Zichovec, okres Kladno. Jedná se o rodinný dům postavený formou celostěnových panelů s difuzně otevřenou konstrukcí. Atypickým prvkem této stavby jsou vystupující kleštiny krovu skrze vzduchotěsnou obálku budovy v části obývacího pokoje + kompletně prosklený štít dělící obývací pokoj a terasu. Při měření vzduchotěsnosti jsem se zaměřil právě na tyto atypické části. Měření probíhalo v celé budově za pomoci metody 2 (viz. kapitola 4.2.1., bod 4).

• Parametry stavby a podmínky měření:

- přízemní RD s otevřeným prostorem krovu nad částí obývacího pokoje,
- založení stavby na dvojité základové desce,
- podlahová plocha 142,94 m²,
- vnitřní objem 516 m³,
- konstrukce stěny DIFU ECO ENERGO společnosti Pila Martinice s.r.o. viz. obrázek 5. Součinitel prostupu tepla $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$,
- podlahové vytápění tepelným čerpadlem Vaillant voda/vzduch v kombinaci s krbovou vložkou,
- v objektu není umístěna jednotka pro řízené větrání objektu – větrání je tedy přirozené.



Obrázek 47 - RD Zichovec ve fázi rozestavěnosti při provádění Blower-door testu (Brich, 2024).



Obrázek 48 - RD Zichovec ve fázi rozestavěnosti při provádění Blower-door testu (Brich, 2024).



Obrázek 49 - RD Zichovec ve fázi předávky investorovi (autor práce, 2024).

- **Zkušební metoda**
 - ČSN EN ISO 9972 Tepelné chování budov – stanovení průvzdušnosti budov – tlaková metoda.
- **Umístění zařízení**
 - Zařízení pro měření vzduchotěsnosti bylo umístěno v místě vchodových dveří.
- **Měřicí zařízení**
 - Mikromanometr: Energy Conservatory DG1000.
 - Ventilátor: Energy Conservatory Model 4.
 - Teploměr + barometr: Testo T440.
 - Termoaltibarometr: Greisinger GTD 1100.
- **Podmínky měření při podtlaku**
 - Rychlost větru: 1. stupeň Beaufortovy stupnice.
 - Vnitřní teplota: 8,8 °C.
 - Vnější teplota: 11,8 °C.
 - Tlak vzduchu: 967,5 mbar.
- **Podmínky měření při přetlaku**
 - Rychlost větru: 1. stupeň Beaufortovy stupnice.
 - Vnitřní teplota: 8,8 °C.
 - Vnější teplota: 11,8 °C.
 - Tlak vzduchu: 967,5 mbar.

- **Předem utěsněné prostory** zobrazeny na obrázcích 50–53 níže:
 - vývody odpadního potrubí,
 - potrubí pro lokální odvětrání,
 - vstup pro komínové těleso,
 - vstup do půdního prostoru,
 - externí přívod vzduchu pro krbová kamna.



Obrázek 50 - Utěsnění potrubí lokálního odvětrání (Brich, 2024).



Obrázek 51 - Utěsnění vstupu do půdního prostoru (Brich, 2024).



Obrázek 52 - Utěsnění prostupu komínového tělesa (Brich, 2024).



Obrázek 53 - Utěsnění vývodu odpadního potrubí (Brich, 2024).

4.2.3. 2. měřený objekt – RD Příbram

Druhým měřeným objektem je RD zobrazený na obrázcích 54–56, nacházející se ve městě Příbram, okres Příbram. Jedná se o rodinný dům postavený formou celostěnových panelů s difuzně otevřenou konstrukcí. Atypickým prvkem této stavby jsou vystupující kleštiny krovu skrze vzduchotěsnou obálku budovy v části obývacího pokoje a kuchyně. Měření probíhalo v celé budově za pomoci metody 2 (viz. kapitola 4.2.1., bod 4).

- **Parametry stavby a podmínky měření:**

- přízemní RD s otevřeným prostorem krovu nad částí obývacího pokoje a kuchyně,
- založení stavby na dvojité základové desce,
- podlahová plocha 153,91 m²,
- Vnitřní objem 544 m³,
- konstrukce stěny DIFU ECO ENERGO společnosti Pila Martinice s.r.o. viz. obrázek 5. Součinitel prostupu tepla $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$,
- podlahové vytápění tepelným čerpadlem Nibe voda/vzduch v kombinaci s krbovou vložkou, v objektu je umístěna jednotka pro řízené větrání objektu Ventbox – větrání je tedy nucené se zpětným získáváním tepla.



Obrázek 54 - RD Příbram ve fázi rozestavěnosti při provádění Blower-door testu (Brich, 2024).



Obrázek 55 - RD Příbram ve fázi rozestavěnosti při provádění Blower-door testu (Brich, 2024).



Obrázek 56 - RD Příbram ve fázi předávky investorovi (autor práce, 2024).

- **Zkušební metoda**
 - ČSN EN ISO 9972 Tepelné chování budov – stanovení průvzdušnosti budov – tlaková metoda.
- **Umístění zařízení**
 - Zařízení pro měření vzduchotěsnosti bylo umístěno v místě vchodových dveří.
- **Měřicí zařízení**
 - Mikromanometr. Energy Conservatory DG1000.
 - Ventilátor: Energy Conservatory Model 4.
 - Teploměr + barometr: Testo T440.
 - Termoaltibarometr: Greisinger GTD 1100.
- **Podmínky měření při podtlaku**
 - Rychlost větru: 2. stupeň Beaufortovy stupnice.
 - Vnitřní teplota: 8,7 °C.
 - Vnější teplota: 5,9 °C.
 - Tlak vzduchu: 951,6 mbar.
- **Podmínky měření při přetlaku**
 - Rychlost větru: 2. stupeň Beaufortovy stupnice.
 - Vnitřní teplota: 8,7 °C.
 - Vnější teplota: 5,9 °C.
 - Tlak vzduchu: 951,6 mbar.
- **Předem utěsněné prostupy** zobrazeny na obrázcích 57–62 níže:
 - vývody odpadního potrubí,
 - vývody výdechového a nasávacího potrubí VZT,
 - průduch komínového tělesa,
 - vstup do půdního prostoru,
 - externí přívod vzduchu pro krbová kamna,
 - kabelové chráničky.



Obrázek 57 - Utěsnění vstupu do půdního prostoru (Brich, 2024).



Obrázek 58 - Utěsnění vývodu odpadního potrubí (Brich, 2024).



Obrázek 59 - Utěsnění externího přívodu vzduchu pro krbová kamna (Brich, 2024).



Obrázek 60 - Utěsnění průduchu komínového tělesa (Brich, 2024).



Obrázek 61 - Utěsnění vývodu výdechového/nasávacího potrubí VZT. (Brich, 2024).



Obrázek 62 - Utěsnění průduchu kabelu skrze kabelovou chráničku (Brich, 2024).

4.2.4. 3. měřený objekt – RD Mělnická Vrutice

Třetím měřeným objektem je RD zobrazený na obrázcích 63–65, nacházející se v obci Mělnická Vrutice, okres Mělník. Jedná se o rodinný dům postavený formou celostěnových panelů s difuzně otevřenou konstrukcí. Měření probíhalo v celé budově za pomoci metody 2 (viz. kapitola 4.2.1., bod 4).

- **Parametry stavby a podmínky měření:**

- patrový RD s nevytápěnou garáží,
- založení stavby na dvojité základové desce,
- podlahová plocha 151 m²,
- Vnitřní objem 469 m³,
- konstrukce stěny DIFU ECO ENERGO společnosti Pila Martinice s.r.o. viz. obrázek 5. Součinitel prostupu tepla $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$,
- podlahové vytápění tepelným čerpadlem Nibe voda/vzduch v kombinaci s křbovou vložkou,
- v objektu není umístěna jednotka pro řízené větrání objektu – větrání je tedy přirozené.



Obrázek 63 - RD Mělnická Vrutice ve fázi rozestavěnosti při provádění Blower – door testu (Brich, 2024).



Obrázek 64 – RD Mělnická Vrutice ve fázi rozestavěnosti při provádění Blower-door testu (Brich, 2024).



Obrázek 65 - RD Mělnická Vrutice ve fázi předávky investorovi (autor práce, 2024).

- **Zkušební metoda**
 - ČSN EN ISO 9972 Tepelné chování budov – stanovení průvzdušnosti budov – tlaková metoda.
- **Umístění zařízení**
 - Zařízení pro měření vzduchotěsnosti bylo umístěno v místě vchodových dveří.
- **Měřicí zařízení**
 - Mikromanometr. Energy Conservatory DG1000.
 - Ventilátor: Energy Conservatory Model 4.
 - Teploměr + barometr: Testo T440.
 - Termoaltibarometr: Greisinger GTD 1100.
- **Podmínky měření při podtlaku**
 - Rychlost větru: 1. stupeň Beaufortovy stupnice.
 - Vnitřní teplota: 12,5 °C.
 - Vnější teplota: 2,5 °C.
 - Tlak vzduchu: 1009,9 mbar.

- **Podmínky měření při přetlaku:**

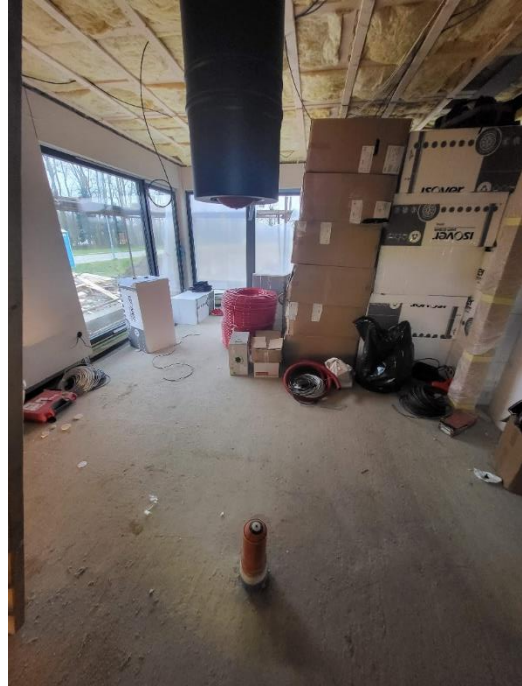
- Rychlost větru: 1. stupeň Beaufortovy stupnice.
- Vnitřní teplota: 12,5 °C.
- Vnější teplota: 2,5 °C.
- Tlak vzduchu: 1009,9 mbar.

- **Předem utěsněné prostupy** zobrazeny na obrázcích 66–69 níže:

- vývody odpadního potrubí,
- průduch komínového tělesa,
- vstup do půdního prostoru,
- externí přívod vzduchu pro krbová kamna,
- potrubí digestoře.



Obrázek 66 - Utěsnění vývodu odpadního potrubí (Brich, 2024).



Obrázek 67 - Utěsnění průduchu komínového tělesa a externího přívodu vzduchu pro krbová kamna (Brich, 2024).



Obrázek 68 - Utěsnění vstupu do půdního prostoru (Brich, 2024).



Obrázek 69 - Utěsnění průduchu pro digestoř (Brich, 2024).

4.3. Metodika vypracování konstrukčních detailů

Konstrukční detaily jsou zpracovány v programu AutoCAD 2013 a vychází ze skladby a principů společnosti PILA MARTINICE s.r.o. Jednotlivé konstrukční detaily jsou pro zpracování zvoleny tak, aby bylo možné znázornit ta nejkomplicovanější místa z hlediska zajištění vzduchotěsnosti. Zároveň je nutné, aby tyto vybrané detaily bylo možné složit do jednoduché a ucelené konstrukce nebo objektu. Pro přehlednost jsou vypracovány v měřítku 1:10, popř. 1:5. Při zpracování konstrukčních detailů je kladen velký důraz na vyobrazení jednotlivých vrstev vzduchotěsnících opatření s ohledem na téma práce. Jednotlivé vzduchotěsnící materiály vč. jejich popisků jsou mezi sebou barevně rozlišeny, aby je bylo možné bezpečně rozpoznat. Každý použitý materiál vyobrazený v jednotlivých detailech obsahuje hodnoty ekvivalentní difuzní tloušťky s_d a faktoru difuzního odporu μ , které byly získány za pomoci programu Teplo 2017, popř. z jednotlivých technických listů a komunikací s výrobcí daných materiálů.

4.4. Metodika souhrnu doporučených pravidel pro návrh, výrobu a montáž na stavbě s ohledem na vzduchotěsnost konstrukce dle platných norem

Pro vytvoření souhrnu doporučených pravidel pro návrh, výrobu a montáž na stavbě s ohledem na vzduchotěsnost konstrukce dle platných norem je použito informací získaných především při zpracování konstrukčních detailů této práce a získaných poznatků při nahlédnutí do výrobního procesu společnosti PILA MARTINICE s.r.o. Dalším důležitým faktorem pro vytvoření souhrnu byla účast na provádění měření vzduchotěsnosti třech staveb na bázi dřeva metodou blower-door testu prováděným p. Ing. Jiřím Bricem z Výzkumného a vývojového ústavu dřevařského v Praze, s.p., kde byla získána praktická fakta o zajištění vzduchotěsnosti. Díky těmto veškerým zjištěným informacím jsem následně mohl vypracovat souhrn doporučených pravidel pro návrh, výrobu a montáž na stavbě s ohledem na vzduchotěsnost konstrukce dle platných norem.

5. Výsledky analýzy měření

5.1. 1. objekt – RD Zichovec

Zaznamenané rozdíly hodnot tlaku při nulovém průtoku vzduchu při zkoušce podtlaku je možné pozorovat v tabulce 3 a při zkoušce přetlaku v tabulce 5. Hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu při zkoušce podtlaku jsou zaznamenány v tabulce 4 a při zkoušce přetlaku v tabulce 6.

• Zkouška podtlaku

Rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu				
$\Delta p_{0,1-}$	-1,0 Pa		$\Delta p_{0,2-}$	-1,8 Pa
$\Delta p_{0,1+}$	0,0 Pa		$\Delta p_{0,2+}$	0,5 Pa
$\Delta p_{0,1}$	-0,9 Pa		$\Delta p_{0,2}$	-1,1 Pa

Tabulka 3 - rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu RD Zichovec – zkouška podtlaku.

- Hodnoty měření

Tlakový rozdíl (Pa)	73	64	57	52	44	34	25	12	17
Průtok vzduchu (m ³ /h)	207	182	169	154	137	113	95	49	68

Tabulka 4 - hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu RD Zichovec – zkouška podtlaku.

Průtok vzduchu netěsnostmi q_{50} :	153 ($\pm 1,9$ %) m ³ /h.
Intenzita výměny vzduchu n_{50} :	0,30 h ⁻¹ .
Měrná průvzdušnost podl. plochou q_{F50} :	1,07 m ³ /(h*m ²).
Měrná průvzdušnost obálkou q_{E50} :	- m ³ /(h*m ²).
Ekvivalentní plocha netěsnosti ELA_{50} :	0,0047 ($\pm 4,7$ %) m ² – \varnothing 0,077m.
Součinitel proudění vzduchu C_{env} :	8,1 ($\pm 9,9$ %) m ³ /(h*Pa ⁿ).
Součinitel proudění netěsnostmi C_L :	8,0 ($\pm 9,9$ %) m ³ /(h*Pa ⁿ).
Exponent proudění vzduchu n :	0,753 \pm 0,027.
Koeficient determinace r^2 :	0,99.

- Zkouška přetlaku**

Rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu				
$\Delta p_{0,1-}$	-0,5 Pa		$\Delta p_{0,2-}$	-0,1 Pa
$\Delta p_{0,2+}$	0,4 Pa		$\Delta p_{0,2+}$	1,4 Pa
$\Delta p_{0,1}$	-0,1 Pa		$\Delta p_{0,2}$	1,1 Pa

Tabulka 5 - rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu RD Zichovec – zkouška přetlaku.

- **Hodnoty měření**

Tlakový rozdíl (Pa)	69	61	52	47	39	32	22	14	-
Průtok vzduchu (m ³ /h)	175	159	142	122	108	91	79	58	-

Tabulka 6 - hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu RD Zichovec – zkouška přetlaku.

Průtok vzduchu netěsnostmi q_{50} :	134 ($\pm 4,7$ %) m ³ /h.
Intenzita výměny vzduchu n_{50} :	0,26 h ⁻¹ .
Měrná průvzdušnost podl. plochou q_{F50} :	0,94 m ³ /(h*m ²).
Měrná průvzdušnost obálkou q_{E50} :	- m ³ /(h*m ²).
Ekvivalentní plocha netěsnosti ELA_{50} :	0,0041 ($\pm 4,7$ %) m ² – \varnothing 0,072m.
Součinitel proudění vzduchu C_{env} :	8,9 ($\pm 30,1$ %) m ³ /(h*Pa ⁿ).
Součinitel proudění netěsnostmi C_L :	8,9 ($\pm 30,1$ %) m ³ /(h*Pa ⁿ).
Exponent proudění vzduchu n :	0,695 \pm 0,082.
Koeficient determinace r^2 :	0,98.

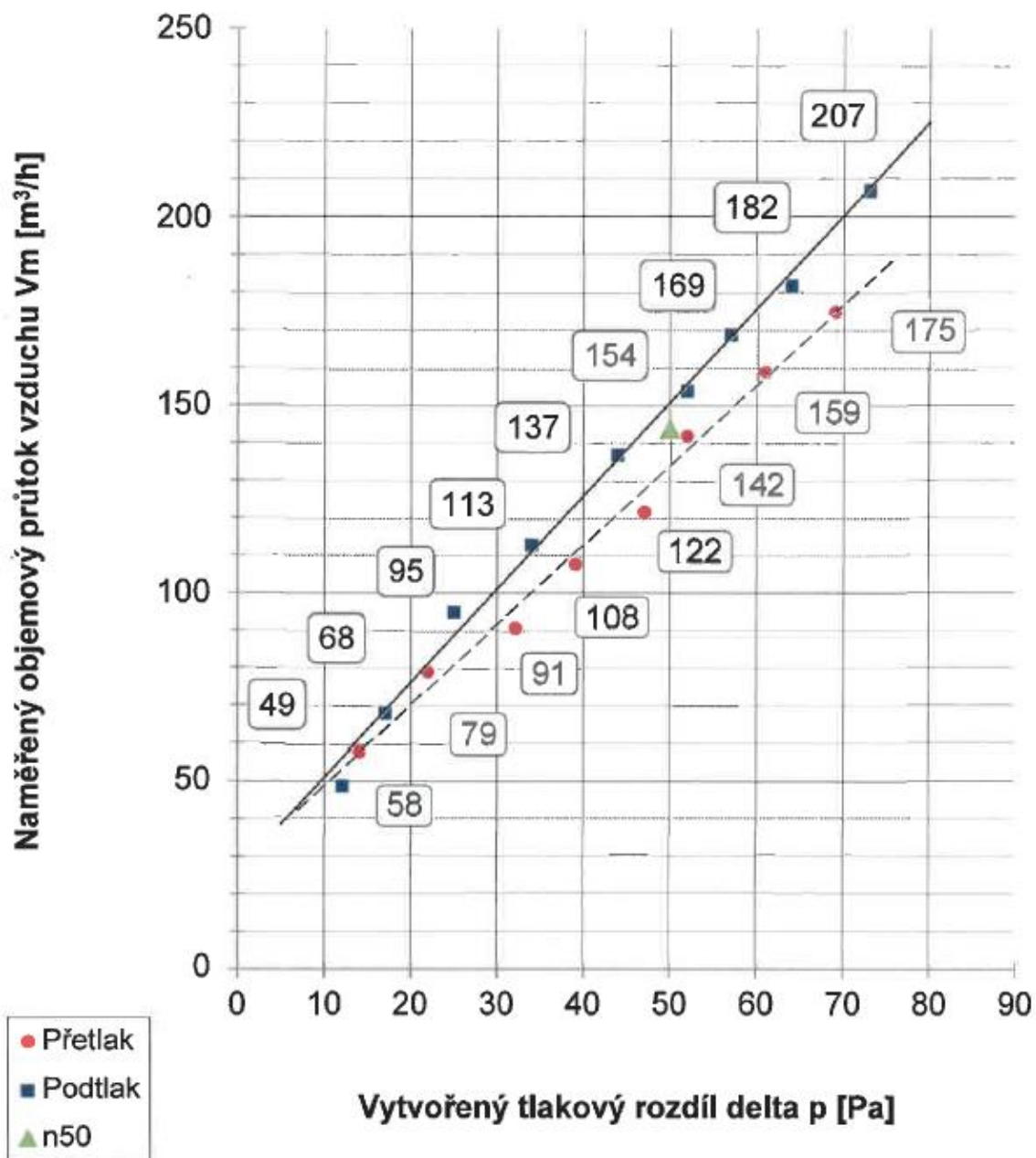
- Průměrná hodnota intenzity výměny vzduchu**

Průměrná hodnota intenzity výměny vzduchu získaná z hodnot zkoušky podtlaku a přetlaku je:

$$N_{50} = 0,28 \text{ h}^{-1}$$

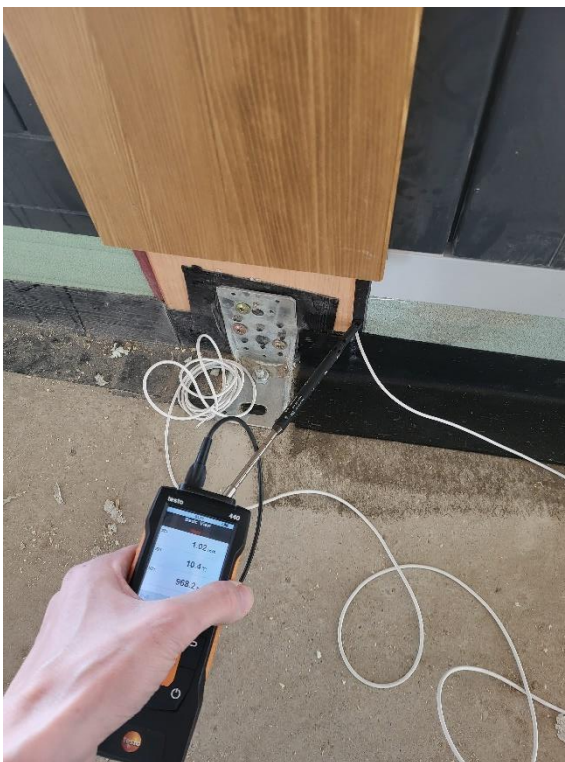
- **Graf průtoku vzduchu**

Na grafu průtoku vzduchu viz. graf 3 jsou vyobrazeny naměřené hodnoty objemového průtoku vzduchu v závislosti na vytvořeném tlakovém rozdílu při zkoušce podtlaku a přetlaku.

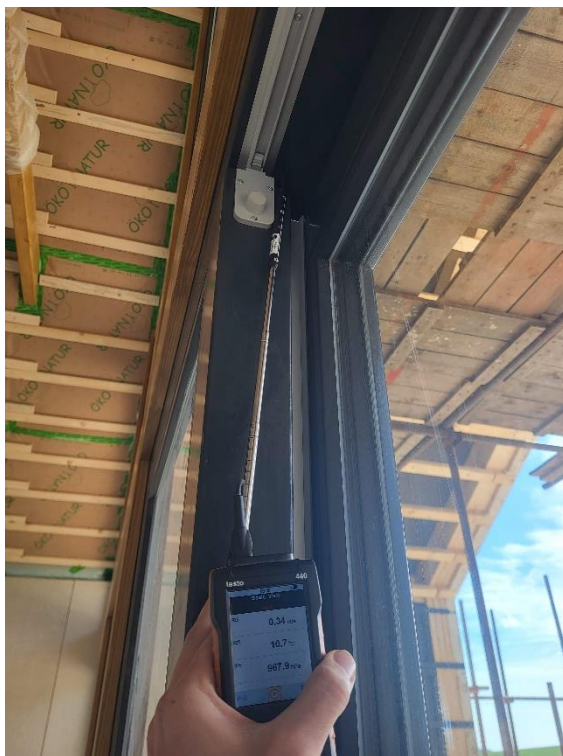


Graf 3 - Graf průtoku vzduchu RD Zichovec (Brich, 2024).

- **Zjištěné netěsnosti**



Obrázek 70 - Únik vzduchu ve funkční spáře HS portálu v místě vodících kolejnic (Brich, 2024).



Obrázek 71 - Únik vzduchu v místě podkladního profilu balkonových dveří způsobený nedostatečným utěsněním elektroinstalace (Brich, 2024).

- **Výsledky měření RD Zichovec**

Ze zjištěných hodnot provedeného měření je zřejmé, že vzduchotěsná obálka měřeného objektu je velmi dobře zajištěná. Veškeré netěsnosti byly vyřešeny operativně, přímo na místě stavby a nebylo zapotřebí žádných fatálních zásahů do konstrukce vzduchotěsné obálky měřeného objektu.

Na obrázku 70 byl detekován únik vzduchu ve funkční spáře HS portálu v místě vodících kolejnic. Bohužel se z pohledu zajištění vzduchotěsnosti jedná o velice problematické místo, které z důvodu bezpečného zajištění otevírání nelze zcela utěsnit.

Na obrázku 71 byl detekován únik vzduchu v místě podkladního profilu balkonových dveří způsobený nedostatečným utěsněním elektroinstalace“ byl detekován únik vzduchu v místě podkladního profilu balkonových dveří. Tento únik byl způsoben neostatečným utěsněním elektroinstalace vedenou směrem do exteriéru. Po zjištění tohoto defektu bylo provedeno dodatečné utěsnění elektroinstalace za pomoci paropropustné těsnící pásky ISOCELL AIRSTOP ELASTO.

Dalším potenciálním místem, kde by mohlo docházet k únikům vzduchu byly vystupující kleštiny krovu skrze vzduchotěsnou obálku budovy v části obývacího pokoje. Únik vzduchu v těchto místech nebylo možné ručním detekčním zařízením změřit, jelikož místo bylo nepřístupné. Nicméně opatření pro zajištění vzduchotěsnosti těchto potenciálních netěsností byla provedena tak, že místo kontaktu kleštin bylo s hlavní vzduchotěsnicí vrstvou dostatečně utěsněno paropropustnou těsnící páskou ISOCELL AIRSTOP ELASTO – viz. obrázek 72.



Obrázek 72 - Utěsnění místa styku pohledové kleštiny krovu s hlavní vzduchotěsnicí vrstvou (Brich, 2024).

5.2. 2. objekt – RD Příbram

Zaznamenané rozdíly hodnot tlaku při nulovém průtoku vzduchu při zkoušce podtlaku je možné pozorovat v tabulce 7 a při zkoušce přetlaku v tabulce 9. Hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu při zkoušce podtlaku jsou zaznamenány v tabulce 8 a při zkoušce přetlaku v tabulce 10.

- Zkouška podtlaku**

Rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu				
$\Delta p_{0,1-}$	-1,1 Pa		$\Delta p_{0,2-}$	-0,6 Pa
$\Delta p_{0,1+}$	0,0 Pa		$\Delta p_{0,2+}$	0,0 Pa
$\Delta p_{0,1}$	-1,1 Pa		$\Delta p_{0,2}$	-0,5 Pa

Tabulka 7 - rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu RD Příbram – zkouška podtlaku.

- Hodnoty měření**

Tlakový rozdíl (Pa)	74	66	53	41	32	23	16	-
Průtok vzduchu (m ³ /h)	295	260	221	186	157	131	103	-

Tabulka 8 - hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu RD Příbram – zkouška podtlaku.

Průtok vzduchu netěsnostmi q_{50} :	218 ($\pm 3,2$ %) m ³ /h.
Intenzita výměny vzduchu n_{50} :	0,40 h ⁻¹ .
Měrná průvzdušnost podl. plochou q_{F50} :	1,41 m ³ /(h*m ²).
Měrná průvzdušnost obálkou q_{E50} :	- m ³ /(h*m ²).
Ekvivalentní plocha netěsnosti ELA_{50} :	0,0066 ($\pm 1,6$ %) m ² – \varnothing 0,092 m.
Součinitel proudění vzduchu C_{env} :	16,1 ($\pm 20,4$ %) m ³ /(h*Pa ⁿ).
Součinitel proudění netěsnostmi C_L :	16,0 ($\pm 20,4$ %) m ³ /(h*Pa ⁿ).
Exponent proudění vzduchu n :	0,667 \pm 0,055.
Koeficient determinace r^2 :	0,99.

- Zkouška přetlaku**

Rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu				
$\Delta p_{0,1-}$	-2,9 Pa		$\Delta p_{0,2-}$	0,0 Pa
$\Delta p_{0,2+}$	0,0 Pa		$\Delta p_{0,2+}$	0,9 Pa
$\Delta p_{0,1}$	-2,9 Pa		$\Delta p_{0,2}$	0,9 Pa

Tabulka 9 - rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu RD Příbram – zkouška přetlaku.

- **Hodnoty měření**

Tlakový rozdíl (Pa)	70	57	49	39	29	22	16	-
Průtok vzduchu (m ³ /h)	296	264	235	201	164	130	104	-

Tabulka 10 - hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu RD Příbram – zkouška přetlaku.

Průtok vzduchu netěsnostmi q_{50} :	267 ($\pm 1,6 \%$) m ³ /h.
Intenzita výměny vzduchu n_{50} :	0,44 h ⁻¹ .
Měrná průvzdušnost podl. plochou q_{F50} :	1,54 m ³ /(h*m ²).
Měrná průvzdušnost obálkou q_{E50} :	- m ³ /(h*m ²).
Ekvivalentní plocha netěsnosti ELA_{50} :	0,0072 ($\pm 1,6 \%$) m ² – \varnothing 0,096 m.
Součinitel proudění vzduchu C_{env} :	14,6 ($\pm 9,7 \%$) m ³ /(h*Pa ⁿ).
Součinitel proudění netěsnostmi C_L :	14,5 ($\pm 9,7 \%$) m ³ /(h*Pa ⁿ).
Exponent proudění vzduchu n :	0,714 \pm 0,027.
Koeficient determinace r^2 :	0,99.

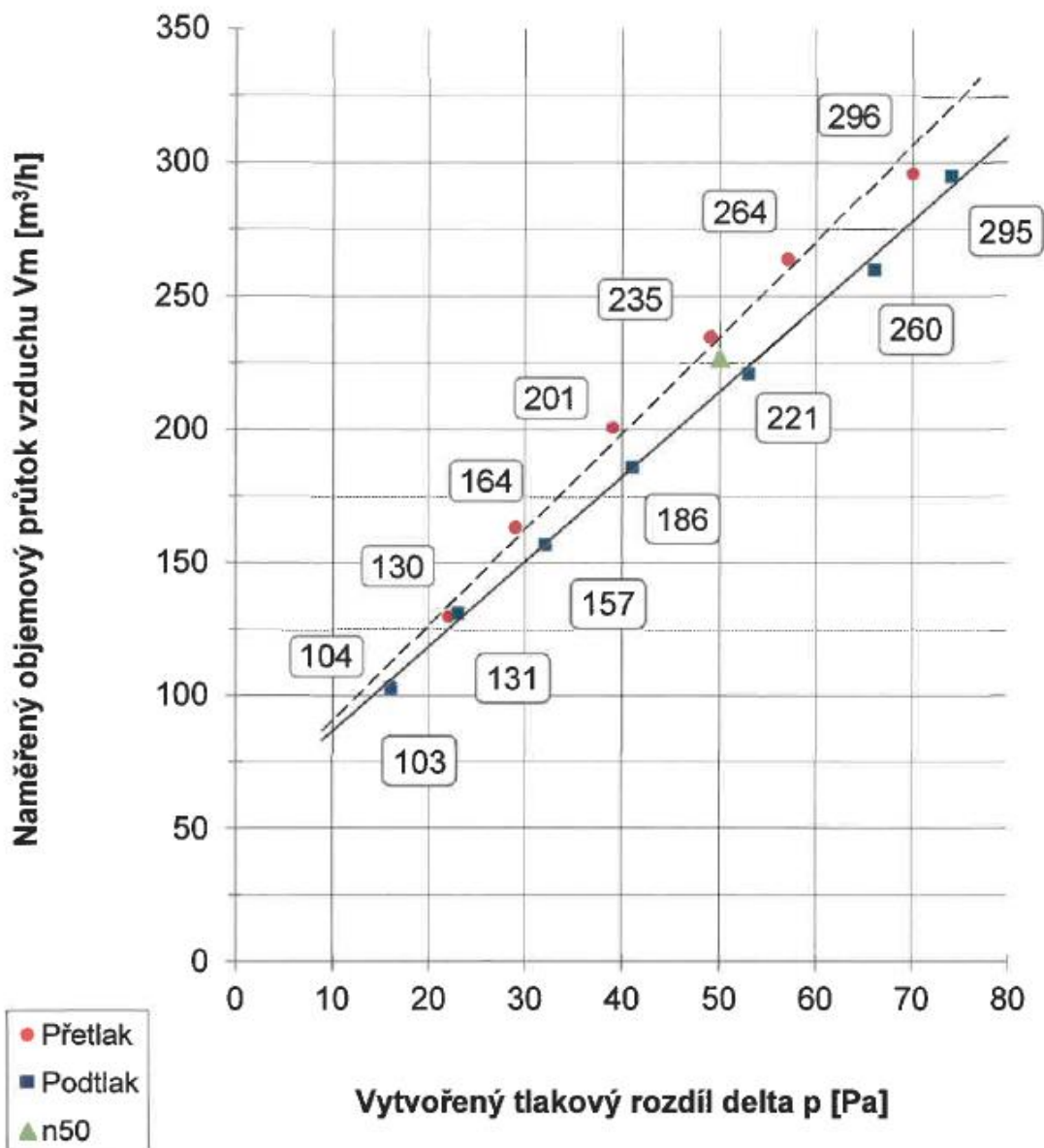
- Průměrná hodnota intenzity výměny vzduchu**

Průměrná hodnota intenzity výměny vzduchu získaná z hodnot zkoušky podtlaku a přetlaku je:

$$N_{50} = 0,42 \text{ h}^{-1}$$

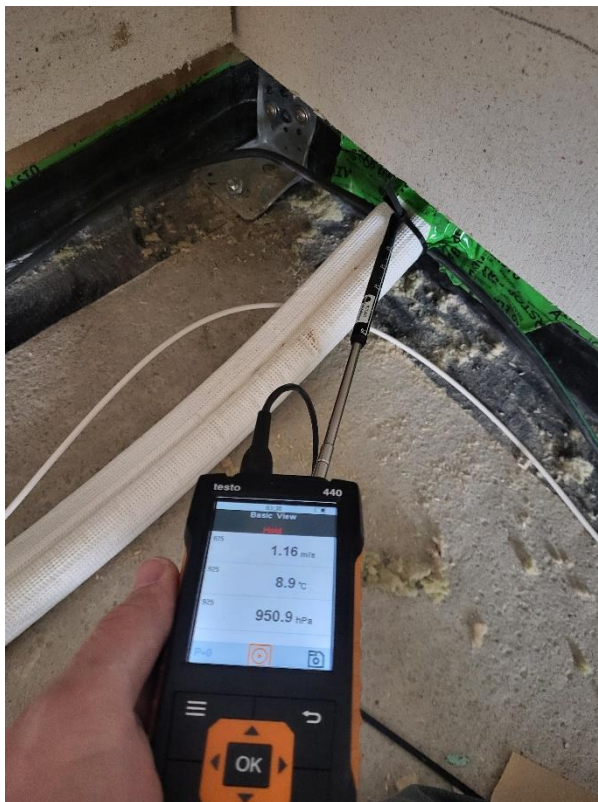
- **Graf průtoku vzduchu**

Na grafu průtoku vzduchu viz. graf 4 jsou vyobrazeny naměřené hodnoty objemového průtoku vzduchu v závislosti na vytvořeném tlakovém rozdílu při zkoušce podtlaku a přetlaku.



Graf 4 - Graf průtoku vzduchu RD Příbram (Brich, 2024).

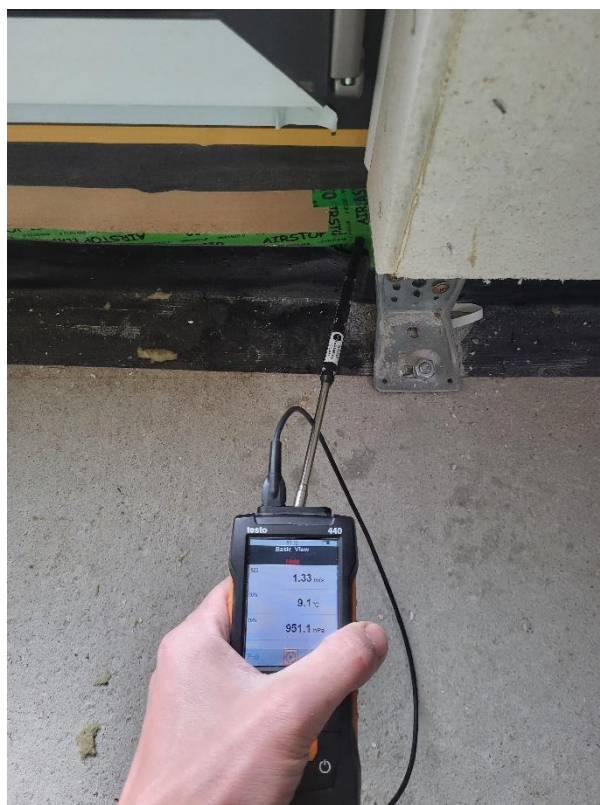
- **Zjištěné netěsnosti**



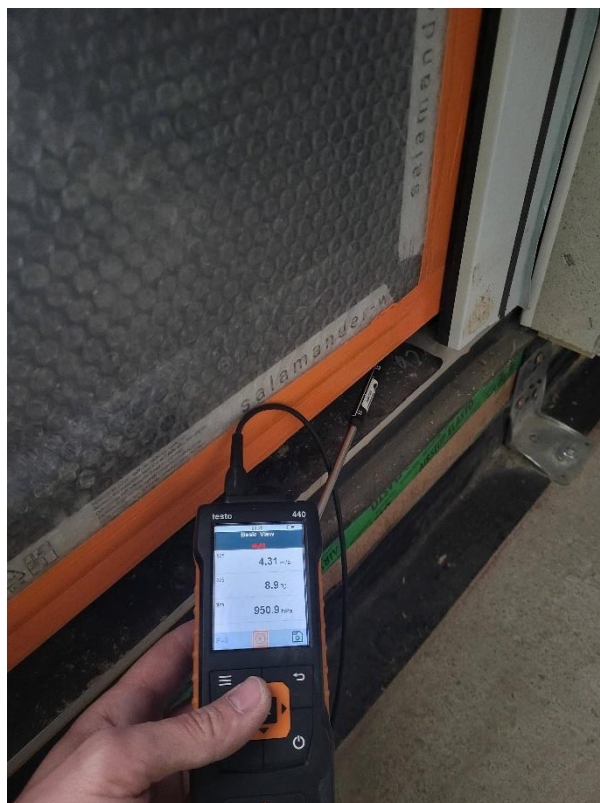
Obrázek 73 - Únik vzduchu okolo potrubí pro tepelné čerpadlo (Brich, 2024).



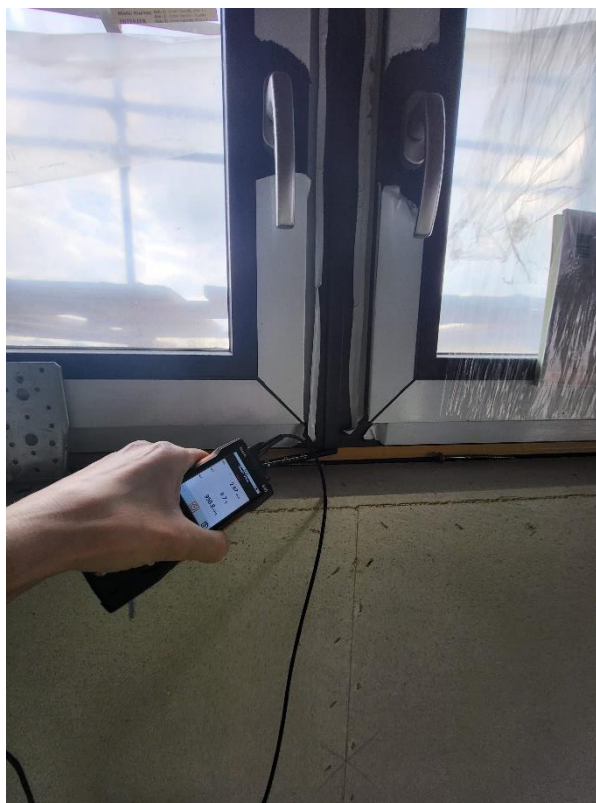
Obrázek 74 - Únik vzduchu v místě styku komínového tělesa s průchodkou z pěnoskla (Brich, 2024).



Obrázek 75 - Únik vzduchu v místě napojení obvodového panelu na základovou desku (Brich, 2024).



Obrázek 76 - Únik vzduchu ve funkční spáře dveří (Brich, 2024).



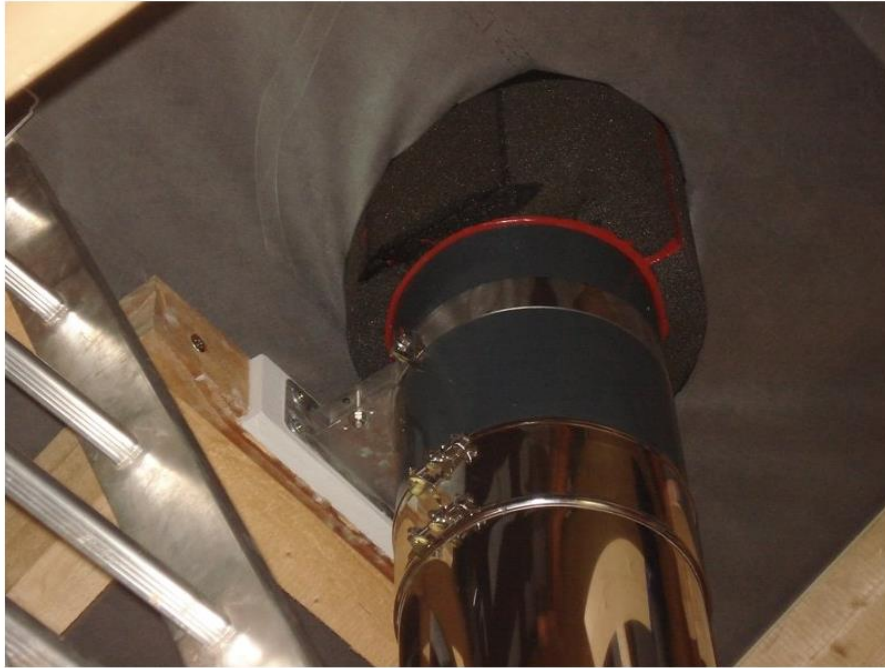
Obrázek 77 - Únik vzduchu v místě krycí lišty sestavy oken (Brich, 2024).

- **Výsledky měření RD Příbram**

Ze zjištěných hodnot provedeného měření je zřejmé, že vzduchotěsná obálka měřeného objektu je velmi dobře zajištěná. S výslednou hodnotou $N_{50} = 0,42 \text{ h}^{-1}$ se bezpečně dostaneme na doporučenou hodnotu $N_{50} = 0,8 \text{ h}^{-1}$. Většina netěsností byla vyřešena operativně, přímo na místě stavby a nebylo zapotřebí žádných fatálních zásahů do konstrukce vzduchotěsné obálky měřeného objektu. Netěsnosti, které nebylo možné vyřešit byly zapsány do protokolu měření – zejména netěsnosti vzniklé v místech výplní otvorů.

Na obrázku 73 byl detekován únik vzduchu v místě prostupu potrubí skrze obvodovou konstrukci. Tento únik byl způsoben použitím nevhodného vzduchotěsnícího materiálu. Po zjištění tohoto defektu bylo provedeno dodatečné utěsnění potrubí za pomoci těsnícího tmelu ISOCELL AIRSTOP SPRINT, který je vhodný zejména pro těžko přístupná místa z hlediska zajištění vzduchotěsnosti (viz. kapitola 3.8., část: lepicí a těsnící tmely).

Na obrázku 74 byl detekován únik vzduchu v místě prostupu komínového průchodu skrze nehořlavou průchodku z pěnoskla. K tomuto úniku došlo vlivem neutěsnění komínového tělesa společně s komínovou průchodkou za pomoci tepelně odolného tmelu. Po zjištění tohoto defektu bylo provedeno dodatečné utěsnění prostoru mezi komínovým tělesem a průchodkou za pomoci tepelně odolného tmelu CERESIT CS28, který je pro tyto účely určen. Správné provedení je znázorněno na obrázku 78 níže.



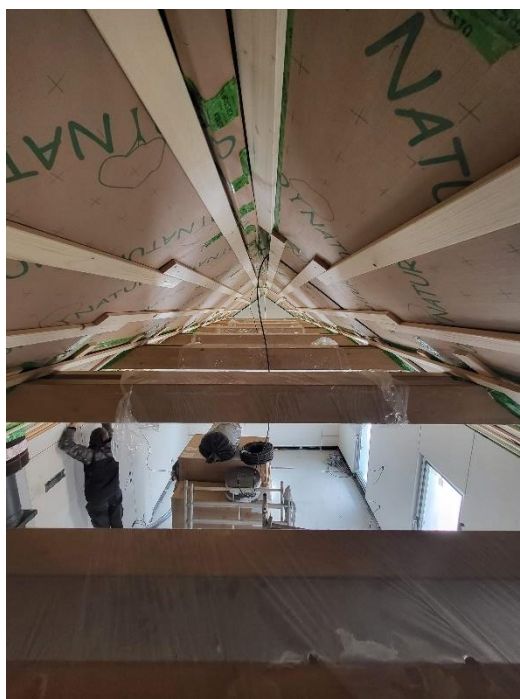
Obrázek 78 - Parotěsný průstup pro nerezové komíny (PAVLÍK KOMÍNOVÉ SYSTÉMY © 2024).

Na obrázku 75 byl detekován únik vzduchu v místě napojení obvodového panelu na základovou desku – konkrétně v místě vstupních dveří, kde v místě ostění dochází k rozšíření zakládacího hranolu a vzniká tak vnitřní roh, který je náročný na prolepení. K tomuto úniku došlo odtržením ISOCELL OMEGA DB pásky od zakládacího prahu. Tento únik byl způsoben nedostatečnou impregnací zakládacího prahu vysokým napnutím ISOCELL OMEGA DB pásky. Po zjištění tohoto defektu bylo provedeno částečné odstranění původních materiálů. Následovala impregnace ISOCELL UNI PRIMEREM a nové prolepení ISOCELL OMEGA DB pásky k zakládacímu prahu. (viz. kapitola 3.8., část: pásky s přilnavostí k různým typům materiálů).

Na obrázku 76 byl detekován únik vzduchu ve funkční spáře dveří. Bohužel se z pohledu zajištění vzduchotěsnosti jedná o velice problematické místo, které z důvodu bezpečného zajištění otevírání nelze zcela utěsnit. Jedním z možných řešení se nabízí seřízení okna tak, aby lépe doléhalo k celoobvodovému těsnění, případná samotná výměna celoobvodového těsnění za jiný typ.

Na obrázku 77 byl detekován únik vzduchu v místě krycí lišty sestavy oken. Jedná se o chybu v konstrukci okna, které nelze příliš dobře utěsnit. Jedním z možných řešení se nabízí vložení komprimační pásky mezi spojované okenní rámy. Nicméně by to znamenalo kompletní změnu systému výroby těchto typů výplň otvorů.

Dalším potenciálním místem, kde by mohlo docházet k únikům vzduchu byly vystupující kleštiny krovu skrze vzduchotěsnou obálku budovy v části obývacího pokoje a kuchyně. Únik vzduchu v těchto místech nebylo možné ručním detekčním zařízením změřit, jelikož místo bylo nepřístupné. Nicméně opatření pro zajištění vzduchotěsnosti těchto potenciálních netěsností byla provedena tak, že místo kontaktu kleštin bylo s hlavní vzduchotěsnicí vrstvou dostatečně utěsněno paropropustnou těsnicí páskou ISOCELL AIRSTOP ELASTO – viz. obrázek 79.



Obrázek 79 - Pohledové kleštiny krovu vystupující do interiéru (Brich, 2024).

5.3. 3. objekt – RD Mělnická Vrutice

Zaznamenané rozdíly hodnot tlaku při nulovém průtoku vzduchu při zkoušce podtlaku je možné pozorovat v tabulce 11 a při zkoušce přetlaku v tabulce 13. Hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu při zkoušce podtlaku jsou zaznamenány v tabulce 12 a při zkoušce přetlaku v tabulce 14.

- Zkouška podtlaku**

Rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu				
$\Delta p_{0,1-}$	-0,4 Pa		$\Delta p_{0,2-}$	-0,5 Pa
$\Delta p_{0,1+}$	0,0 Pa		$\Delta p_{0,2+}$	0,0 Pa
$\Delta p_{0,1}$	-0,4 Pa		$\Delta p_{0,2}$	-0,5 Pa

Tabulka 11 - rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu RD Mělnická Vrutice – zkouška podtlaku.

- Hodnoty měření**

Tlakový rozdíl (Pa)	71	64	56	48	36	25	18	10
Průtok vzduchu (m ³ /h)	146	139	123	108	87	68	56	33

Tabulka 12 - hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu RD Mělnická Vrutice – zkouška podtlaku.

Průtok vzduchu netěsnostmi q_{50} :	114 ($\pm 2,6$ %) m ³ /h.
Intenzita výměny vzduchu n_{50} :	0,24 h ⁻¹ .
Měrná průvzdušnost podl. plochou q_{F50} :	0,75 m ³ /(h*m ²).
Měrná průvzdušnost obálkou q_{E50} :	- m ³ /(h*m ²).
Ekvivalentní plocha netěsnosti ELA_{50} :	0,0035 ($\pm 4,0$ %) m ² – \varnothing 0,067 m.
Součinitel proudění vzduchu C_{env} :	6,2 ($\pm 12,5$ %) m ³ /(h*Pa ⁿ).
Součinitel proudění netěsnostmi C_L :	6,3 ($\pm 12,5$ %) m ³ /(h*Pa ⁿ).
Exponent proudění vzduchu n :	0,742 \pm 0,035.
Koeficient determinace r^2 :	0,99.

- Zkouška přetlaku**

Rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu				
$\Delta p_{0,1-}$	-0,3 Pa		$\Delta p_{0,2-}$	-0,1 Pa
$\Delta p_{0,2+}$	0,0 Pa		$\Delta p_{0,2+}$	0,1 Pa
$\Delta p_{0,1}$	-0,3 Pa		$\Delta p_{0,2}$	-0,1 Pa

Tabulka 13 - rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu RD Mělnická Vrutice – zkouška přetlaku.

- **Hodnoty měření**

Tlakový rozdíl (Pa)	71	64	56	47	37	24	18	10
Průtok vzduchu (m ³ /h)	155	141	130	109	92	75	58	38

Tabulka 14 - hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu RD Mělnická Vrutice – zkouška přetlaku.

Průtok vzduchu netěsnostmi q_{50} :	119 ($\pm 4,0$ %) m ³ /h.
Intenzita výměny vzduchu n_{50} :	0,25 h ⁻¹ .
Měrná průvzdušnost podl. plochou q_{F50} :	0,79 m ³ /(h*m ²).
Měrná průvzdušnost obálkou q_{E50} :	- m ³ /(h*m ²).
Ekvivalentní plocha netěsnosti ELA_{50} :	0,0036 ($\pm 4,0$ %) m ² – \varnothing 0,068 m.
Součinitel proudění vzduchu C_{env} :	7,3 ($\pm 19,1$ %) m ³ /(h*Pa ⁿ).
Součinitel proudění netěsnostmi C_L :	7,4 ($\pm 19,1$ %) m ³ /(h*Pa ⁿ).
Exponent proudění vzduchu n :	0,712 \pm 0,053.
Koeficient determinace r^2 :	0,99.

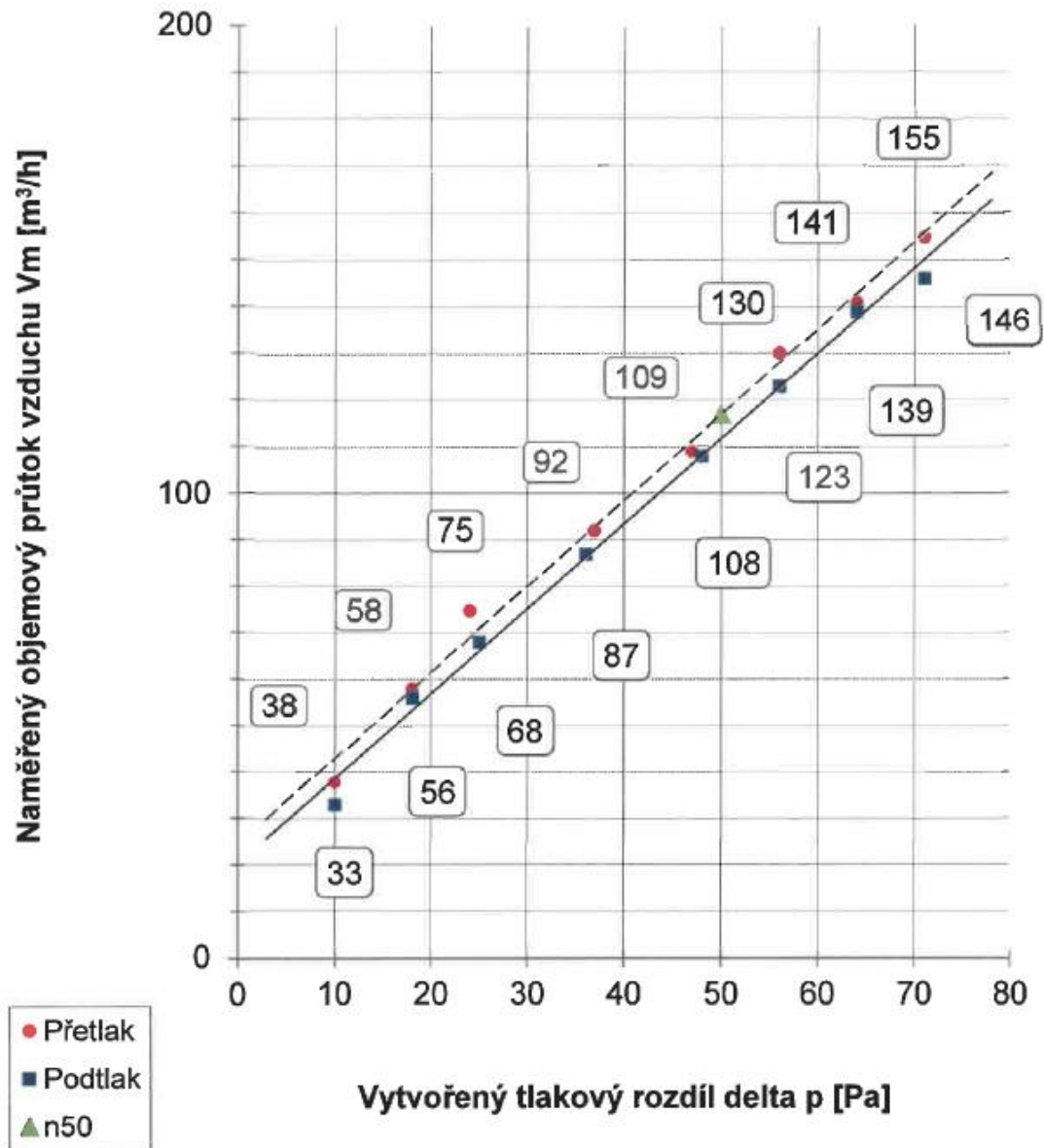
- Průměrná hodnota intenzity výměny vzduchu**

Průměrná hodnota intenzity výměny vzduchu získaná z hodnot zkoušky podtlaku a přetlaku je:

$$N_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$$

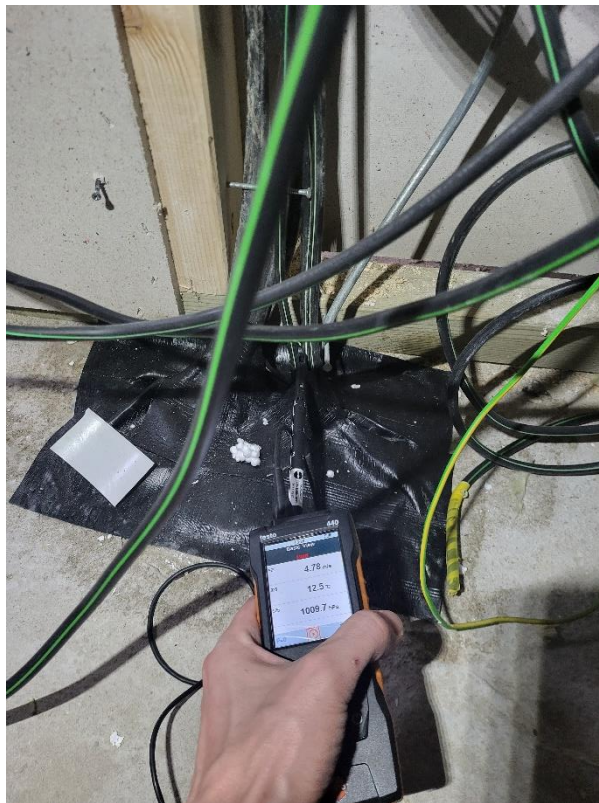
- **Graf průtoku vzduchu**

Na grafu průtoku vzduchu viz. graf 5 jsou vyobrazeny naměřené hodnoty objemového průtoku vzduchu v závislosti na vytvořeném tlakovém rozdílu při zkoušce podtlaku a přetlaku.

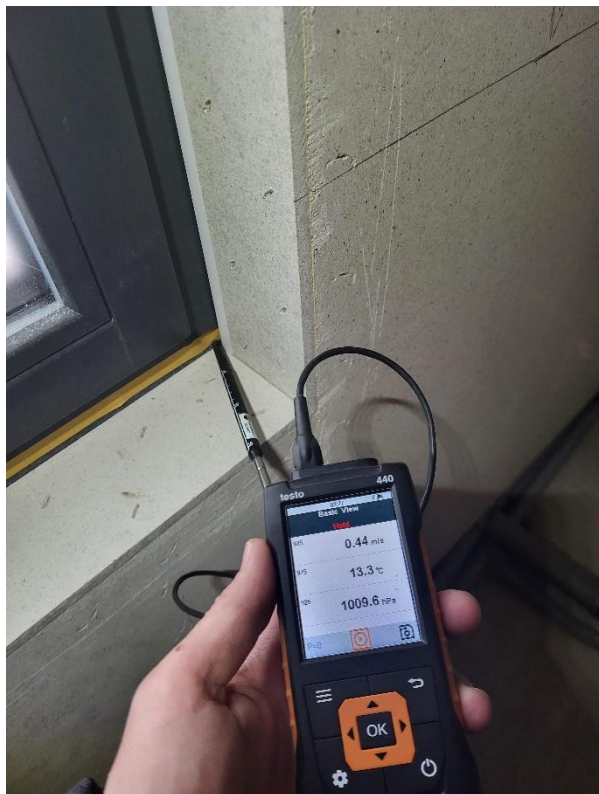


Graf 5 - Graf průtoku vzduchu RD Mělnická Vrutice (Brich, 2024).

- **Zjištěné netěsnosti**



Obrázek 80 - Únik vzduchu okolo elektroinstalace prostupující základovou deskou (Brich, 2024).



Obrázek 81 - Únik vzduchu v místě připojovací spáry okna (Brich, 2024).



Obrázek 82 - Únik vzduchu v místě styku komínového tělesa se systémovou průchodkou (Brich, 2024).

- **Výsledky měření RD Mělnická Vrutice**

Ze zjištěných hodnot provedeného měření je zřejmé, že vzduchotěsná obálka měřeného objektu je ze všech měřených objektů zajištěná nejlépe. S výslednou hodnotou $N_{50} = 0,25 \text{ h}^{-1}$ se bezpečně dostaneme na doporučenou hodnotu $N_{50} = 0,8 \text{ h}^{-1}$. Většina netěsností byla vyřešena operativně, přímo na místě stavby. V jednom případě byl však nutný zásah do konstrukce vzduchotěsné obálky měřeného objektu, kdy bylo nutné zajistit vzduchotěsnost v místě připojovací spáry okna.

Na obrázku 80 byl detekován únik vzduchu v místě prostupu elektroinstalace skrze základovou desku. Tento únik byl způsoben složitostí a množstvím vstupů vč. použití nevhodného vzduchotěsnicího materiálu. Po zjištění tohoto defektu bylo provedeno dodatečné utěsnění potrubí za pomoci těsnicího tmelu ISOCELL AIRSTOP SPRINT, který je vhodný zejména pro těžko přístupná místa z hlediska zajištění vzduchotěsnosti (viz. kapitola 3.8., část: lepicí a těsnicí tmely).

Na obrázku 81 byl detekován únik vzduchu ve spodním rohu připojovací spáry okna. Místo již bohužel nebylo zcela přístupné pro opravu a bylo doporučeno provést odstranění ostění + následné vyplnění volných vzduchových prostorů za pomoci vzduchotěsnicí pěny illbruck FM330. V případě špatného přístupu bylo doporučeno prostor vyplnit za pomoci těsnicího tmelu ISOCELL AIRSTOP SPRINT, který je vhodný zejména pro těžko přístupná místa z hlediska zajištění vzduchotěsnosti (viz. kapitola 3.8., část: lepicí a těsnicí tmely).

Na obrázku 82 byl detekován únik vzduchu v místě prostupu komínového průchodu skrze systémovou průchodku prostupující hlavní vzduchotěsnicí vrstvou objektu. K tomuto úniku došlo vlivem neutěsnění komínového tělesa společně s komínovou průchodkou za pomoci tepelně odolného tmelu. Stejně jako u předchozího měřeného objektu (viz obrázek 74) bylo po zjištění tohoto defektu provedeno dodatečné utěsnění prostoru mezi komínovým tělesem a průchodkou za pomoci tepelně odolného tmelu CERESIT CS28, který je pro tyto účely určen. Správné provedení je znázorněno na obrázku 78.

5.4. Výsledky měření vzduchotěsnosti na třech stavbách na bázi dřeva

Porovnání výsledků měřených staveb je znázorněno v tabulce porovnání výsledků měření vzduchotěsnosti třech staveb na bázi dřeva měřených za pomoci blower-door testu v příloze této práce.

Pro zajištění porovnatelného měření vzduchotěsnosti staveb byl vybrán jeden systém difuzně otevřené konstrukce skladby stěny DIFU ECO ENERGO realizovaný systémem celostěnových panelů společností PILA MARTINICE s.r.o. Aby bylo možné testy porovnávat a vyhodnocovat, tak byly prováděny na obdobných typech staveb. Z dat uvedených v tabulce porovnání výsledků měření vzduchotěsnosti třech staveb na bázi dřeva měřených za pomoci blower-door testu v příloze této práce vyplývá, že u žádné z měřených staveb nedocházelo k nadměrným únikům vzduchu a veškeré měřené budovy splňovaly doporučené hodnoty celkové intenzity výměny vzduchu n_{50} .

Žádné zásadní chyby se v konstrukci měřených objektů z hlediska zajištění vzduchotěsnosti téměř nevyskytovaly. Jednalo se převážně o drobné úniky vzduchu v oblasti prostupů elektroinstalací, v oblasti prostupů odpadních potrubí a prostupů komínových těles skrze systémové průchodky. Veškeré tyto nedostatky byly při

provádění testu řádně se zhotovitelem díla prodiskutovány a na místě operativně vyřešeny.

Velkou četnost a opakovatelnost úniků jsem během provádění testů zaznamenal v místech funkčních spár oken, popř. dveří a HS portálů. Bohužel se jedná o velmi problematické detaily, které nelze bezpečně zajistit z důvodu potřeby zajištění jejich bezpečného otevírání. Úniky vzduchu lze snížit seřízením problematických výplní stavebních otvorů, ale v celkovém zhodnocení těchto problematických míst se jedná o konstrukční chyby na stranách výrobců výplní stavebních otvorů, kteří se musí dané problematice věnovat.

Zásah do konstrukce byl nutný provést pouze v jednom případě, kdy byl během provádění testu vzduchotěsnosti zjištěn vznik netěsnosti v přípojovací spáře okna. Z důvodu nepřístupnosti bylo zhotoviteli doporučeno odstranit již hotové ostění, detekované místo vyplnit vzduchotěsnícím tmelem nebo pěnou a následně provést nové ostění.

Průměrná hodnota intenzity výměny vzduchu n_{50} ze všech tří měřených budov dosáhla výsledku $N_{50} = 0,32 \text{ h}^{-1}$. Výsledná průměrná hodnota měření značí vysokou míru zabezpečení vzduchotěsnosti stavby. Většina zjištěných nedostatků byla způsobena převážně vzniklými nedokonalostmi při samotné výstavbě. Pouze v jednom z případů byla zjištěna netěsnost vzniklá při samotné výrobě. Ze zjištěných výsledků tedy vyplývá, že dřevostavby realizované systémem celostěnových panelů jsou z hlediska zajištění vzduchotěsnosti na velmi vysoké úrovni zejména z důvodu možnosti kontroly kvality vzduchotěsnících vrstev a prováděných detailů již ve výrobním závodě. Aby však bylo možné dosahovat těchto výsledků a vytvářet tak kvalitní a bezpečné stavby, tak je nutné dodržovat veškeré technologické postupy a kázeň i při samotné montáži a používat takové materiály, které budou funkční a trvanlivé.

5.5. Konstrukční detaily

Výsledkem výkresové části je 8 důležitých konstrukčních detailů zabývajících se problematikou zajištění vzduchotěsnosti. Zpracované detaily reprezentují ta nejkomplicovanější místa pro zajištění vzduchotěsnosti a nabízí řešení, jak je možné vzduchotěsnost v těchto kritických místech zajistit. Díky charakteru a přehlednosti zpracovaných detailů jako celku je poté možné složit jednoduchou a ucelenou konstrukci nebo objekt. Zpracované detaily lze v praxi běžně užívat jako referenční příklad pro zajištění vzduchotěsnosti. Zhotovené konstrukční detaily z hlediska zajištění vzduchotěsnosti jsou vyobrazeny v příloze této práce (detail č.1 – detail č.8).

5.6. Souhrn doporučených pravidel pro návrh, výrobu a montáž na stavbě s ohledem na vzduchotěsnost konstrukce dle platných norem

Pro kvalitní provedení stavby, zajištění energetické efektivity, zajištění kvality vnitřního prostředí a dosažení nízké úrovně vzduchotěsnosti budovy je nutné dbát na řádně provedenou projekční přípravu, řádně provedenou práci jak při výrobě celostěnových panelů, tak při samotné výstavbě budovy. Pro dosažení nejlepšího výsledku cílové úrovně vzduchotěsnosti je nutné dodržovat pravidla zjištěná při zpracování konstrukčních detailů, náhledu do výrobního procesu výroby panelových dřevostaveb a analýze vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb viz. níže:

- **Návrh vzduchotěsnících vrstev**
 - Důsledný návrh celistvých a minimálně porušovaných vzduchotěsných vrstev bez zbytečných prostupů,
 - volba vhodných materiálů s dostatečnou trvanlivostí a odolností vůči poškození,
 - vhodné umístění vzduchotěsnící vrstvy v konstrukci.
- **Výběr vhodných materiálů a systémů**
 - Volba certifikovaných a ověřených systémů vzduchotěsnících vrstev od renomovaných výrobců,
 - upřednostňování materiálů s garantovanou dlouhou životností, ucelených systémů jednoho výrobce a garantovaných hodnot.

- **Konstrukční detaily**
 - Pečlivé řešení veškerých detailů a napojení zajišťující kontinuitu vzduchotěsné vrstvy,
 - používání speciálních vzduchotěsnících materiálů (viz. kapitola 3.8.),
 - zajištění řádného utěsnění prostupů instalací,
 - správné provedení konstrukční detailů je zobrazeno na detailech v této příloze (detail č.1 – detail č.8).
- **Výroba a montáž na stavbě**
 - Důsledné dodržování technologických postupů výrobců jednotlivých materiálů,
 - používání předepsaných materiálů a nenahrazování materiály s horšími vlastnostmi,
 - provádění kvalitní montáže a důsledné kontroly těsnosti spojů a detailů,
 - minimalizace poškození vzduchotěsnící vrstvy při dalších pracích na stavbě,
 - minimalizace zbytečných prostupů a zajištění jejich řádného utěsnění.
- **Ověření kvality vzduchotěsnosti objektu**
 - Provádění kontrolních měření dle platných zkušebních metod (viz. kapitola 3.7),
 - vyhledávání a oprava případných netěsností ve vzduchotěsnící vrstvě,
 - dosažení doporučených limitních hodnot celkové netěsnosti obálky budovy dle ČSN 73 0540-2.
- **Koordinace a spolupráce**
 - Zajištění dobré komunikace a koordinace mezi všemi zúčastněnými stranami,
 - sjednocení detailů a řešení vzduchotěsnící vrstvy v PD a při realizaci na stavbě.
- **Odborné proškolení a kontrola kvality**
 - Zajištění odborného vzdělávání pracovníků provádějící návrh a montáž vzduchotěsnících vrstev a kritických detailů,
 - provádění důsledné kontroly kvality prováděných prací odpovědnou osobou/dozorem.

- **Vnitřní klima a odvětrání**
 - Zajištění dostatečné výměny vzduchu v interiéru za pomoci přirozeného, popř. řízeného větrání,
 - předcházení kondenzaci vodních par uvnitř konstrukce správným návrhem a provedením.

- **Údržba, opravy**
 - Zajištění snadného přístupu ke vzduchotěsnícím vrstvám pro případné opravy a údržbu,
 - proškolení uživatelů díla o možných rizicích vzniklých při porušení vzduchotěsní vrstvy, jak tomu předcházet a na co si dát pozor např. při realizaci svépomocných dodělávek,
 - provádění důsledné kontroly kvality provedených prací odpovědnou osobou/dozorem.

6. Diskuse

Vzduchotěsnost je klíčovým faktorem pro dosažení nízkoenergetického standardu u moderních dřevostaveb. Dobře navrženou a provedenou vzduchotěsnou obálkou budovy lze významně snížit energetické ztráty větráním a současně pak omezit riziko kondenzace vodní páry v konstrukci. Kvalitní vnitřní mikroklima je pak předpokladem pro zdravé bydlení. Vzhledem k vzrůstajícím požadavkům na energetickou účinnost lze předpokládat i vzrůstající požadavky na vzduchotěsnost.

Měření probíhala na třech stavbách realizovaných jednou společností a v jednom systému skladby stěny. Měření prokázala nepatrné rozdíly ve vzduchotěsnosti mezi zkoumanými objekty. U všech měřených staveb se podařilo splnit normové hodnoty intenzity výměny vzduchu n50. Nejproblematictější se ukázal objekt RD Příbram, který obsahoval nejvíce netěsností, které byly však operativně řešeny přímo na místě stavby.

Všechny tři zkoumané objekty byly zrealizovány systémem celostěnových panelů na bázi dřeva, který je dle mého názoru z pohledu vzduchotěsnosti nejlepším možným řešením pro výstavbu. Tím, že dochází ke kompletní prefabrikaci tohoto systému jsou veškerá vzduchotěsní opatření vč. přípravy pro montáž provedena již ve výrobní hale dle PD a s předepsanými směrnici kvality a také její fyzickou kontrolou, což má za následek vysokou kvalitu provedení nejen vzduchotěsnících vrstev. Při montážích už tak není důvod pro improvizaci a pokud budou dodrženy veškeré předepsané postupy, tak kvality tohoto systému musí jasně převládat nad ostatními konstrukcemi např. typu two by four, které jsou realizovány na místě a většinou bez větší možnosti kontroly tak, jak je tomu právě u celostěnových panelů. Nicméně se jedná pouze o polemizování a skutečná fakta o vzduchotěsnosti by v budoucnu bylo vhodné ověřit srovnáním právě těchto dvou systémů výstavby. Cenným přínosem by v budoucím výzkumu mohlo být také srovnání měření vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb od různých stavebních společností využívajících odlišné konstrukční systémy a skladby materiálů. Taková analýza by mohla poskytnout důležité poznatky a umožnit ještě mnohem hlubší pochopení problematiky zajištění vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb.

Navržená vzduchotěsní opatření vyskytující se v navržených konstrukčních detailech (vzduchotěsní pásy, folie, tmely apod.) považuji za vhodná a v souladu s obecně uznávanými pravidly. Jejich reálná účinnost však závisí na precizním provedení

při výrobě a montáži. Opatření jsou nicméně navržena tak, aby byla vhodná jak pro realizaci ve výrobní hale, tak pro montáž na stavbě a nedošlo k jejich poškození.

Stanovené hlavní zásady pro zajištění vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb shrnují současný stav poznání a měly by být respektovány při všech nových realizacích.

Zajištění vzduchotěsnosti u dřevostaveb je komplexní problematikou, která si žádá pečlivý přístup napříč všemi fázemi výstavby od návrhu až po realizaci. Respektování ověřených zásad, důraz na kvalitu provedení detailů a vzdělávání pracovníků jsou klíčovými předpoklady pro dosažení požadovaných parametrů. Přestože se v této oblasti dřevostavby postupně zlepšují, prostor pro další vývoj stále zůstává. I když je problematika vzduchotěsnosti mnoha organizacemi i jednotlivci intenzivně zkoumána, tak v oblasti dřevostaveb zbývá ještě mnoho otazníků, kterými bude jednoznačně nutné se zabývat. Budoucí výzkum by se měl zaměřit na vývoj nových vzduchotěsnících materiálů speciálně určených pro panelové dřevostavby a jednodušších možnostech zajištění vzduchotěsnosti při montážích. Zvýšený důraz by měl být kladen na optimalizaci a možnosti ověření vzduchotěsných spojů a napojení. Současně je velice nutné klást vyšší důraz na praktické aspekty výstavby – dodržování vhodných pracovních postupů, zvyšování kontroly a zajištění vzdělávání všech účastníků stavby například různými manuály, školeními apod. Velice aktuální je také otázka životnosti a dlouhodobé funkčnosti vzduchotěsnících systémů, které by se měl věnovat jeden z dalších budoucích výzkumů. Jen tak lze naplno využít potenciál dřevěných konstrukcí pro výstavbu energeticky úsporných a zároveň zdravých budov odpovídajících současným trendům udržitelného stavitelství.

7. Závěr

V rámci této diplomové práce byla nejprve provedena literární rešerše zaměřená na problematiku vzduchotěsnosti konstrukcí panelových dřevostaveb. Byly popsány historie vývoje, rozdělení panelů podle různých kritérií a zároveň byl znázorněn postup výroby a montáže dřevostaveb z celostěnových panelů. Zvláštní pozornost byla věnována možnostem zajištění vzduchotěsnosti, metodám jejího měření, materiálům pro vzduchotěsnící rovinu, příčinám a typům netěsností a metodám jejich měření a detekce.

Praktická část práce obsahuje měření vzduchotěsnosti na třech realizovaných stavbách formou celostěnových panelů na bázi dřeva ve spolupráci s Výzkumným a vývojovým ústavem dřevařským v Praze, s.p. V této části byl detailně popsán postup měření metodou tlakového spádu s externím ventilátorem (tzv. Blower-door test) a následně byly vyhodnoceny dosažené výsledky měření vzduchotěsnosti společně s analýzou zjištěných netěsností a možností oprav pro každý měřený objekt zvlášť.

Na základě získaných poznatků byly vypracovány konstrukční detaily zaměřené na návrh a řešení vzduchotěsnosti v kritických místech dřevostaveb z celostěnových panelů. Zpracované detaily reprezentují nejvíce problematické oblasti z hlediska zajištění vzduchotěsnosti a zároveň díky jejich charakteru a přehlednosti je umožněno jejich složení do jednoduché a ucelené konstrukce nebo objektu.

Závěrem této práce byla shrnuta doporučená pravidla a zásady pro návrh, výrobu a montáž dřevostaveb z celostěnových panelů s ohledem na zajištění požadované vzduchotěsnosti a v souladu s platnými normami. Jsou zde shrnuty hlavní zásady týkající se návrhu vzduchotěsnících vrstev, výběru materiálů, zpracování detailů, průběhu výroby a montáže, měření kvality, koordinace a školení pracovníků i údržby hotových konstrukcí.

Celková realizace diplomové práce mi obohatila a prohloubila znalosti v odvětví vzduchotěsnosti panelových dřevostaveb. Diplomová práce poskytuje ucelený teoretický rámec i praktická řešení přispívající ke zvýšení kvality při zajišťování vzduchotěsnosti obálky dřevostaveb z celostěnových panelů. Výsledkem je dokument, jehož závěry a výsledky mohou sloužit jako podklad pro všechny zúčastněné strany realizované stavby a přispět tak ke snížení rizika vzniku nežádoucích netěsností a nedostatků konstrukce.

8. Seznam použitých informačních zdrojů

Odborné publikace:

BREYER, Donald E., Kenneth J. FRIDLEY, Kelly E. COBEEN a David G POLLOCK, JR. *Design of wood structures ASD/LRFD*. Vyd. 6. New York: McGraw-Hill, 2007. ISBN 978-0-07-145539-8.

BRICH, Jiří. Jak diagnostika dřevostavby předchází problémům? In: *Dřevo & stavby.cz [online]*. 2023, roč. **15**, č. 2, [cit. 2024-01-06]. Dostupné z: <https://www.drevoastavby.cz/drevostavby-archiv/stavba-drevostavby/izolace/7253-diagnostika-drevostavby>

ČESKÁ, Dagmar. Co je to vlastně parozábrana? *Dřevo & stavby*. 2022, roč. **14**, č. 2, s. 100-104. ISSN 1803-6996.

EARCH.CZ. Prefabrikované dřevostavby/ výhra nad časem. In: *EARCH.CZ [online]*. Praha: art Echo, 2010 [cit. 2023-09-30]. Dostupné z: <https://www.earch.cz/architektura/clanek/prefabrikovane-drevostavby-vyhra-nad-casem>

ELMROTH, Arne a Per LEVIN. *Air Infiltration Control in Housing - A Guide to International Practice* [online]. Stockholm: Swedish Council for Building Research, 1983 [cit. 2024-10-12]. ISBN 91-540-3853-7. Dostupné z: https://www.aivc.org/sites/default/files/members_area/medias/pdf/Guides/GU01%20AIR%20INFILTRATION%20CONTROL%20IN%20HOUSING.PDF

HAIRSTANS, Robert. *Off-site and industrialised timber construction 2nd edition*. Vyd. 2. High Wycombe: BM Trada, 2019. ISBN 978-1-909594-81-4.

HERZOG, Thomas, Julius NATTERER, Roland SCHWEITZER, Michael VOLZ a Wolfgang WINTER. *Timber construction manual*. Detail. Basel: Birkhäuser, c2004. ISBN 978-3-7643-7025-1.

KARABEGOVIĆ, Isak, ed. *New Technologies, Development and Application II* [online]. Cham: Springer, c2020 [cit. 2024-09-07]. ISBN 978-3-030-18072-0. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-18072-0>

KOLB, Josef. *Dřevostavby: Systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště*. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-2275-7.

KOLB, Josef. *Dřevostavby: Systémy nosných konstrukcí, obvodové pláště*. 2., aktualiz. vyd. v České republice. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-4071-3.

MATTSSON, Björn a Johan CLAEISSON. A Transient Pressurization Method for Measurements of Airtightness. *Journal of Building Physics* [online]. 2007, **31**(1), 35-53 [cit. 2024-01-19]. ISSN 1744-2591. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1744259107079021>

NOVÁK, Jiří. *Vzduchotěsnost obvodových plášťů budov*. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-1953-5.

PEŠTA, Jan, David TESAŘ a Viktor ZWIENER. *Diagnostika staveb: hydroizolace, termografie, blower door test, akustika*. Vyd. 2. Praha: DEK, 2014. ISBN 978-80-87215-15-9.

RŮŽIČKA, Martin. *Moderní dřevostavba*. Praha: Grada, 2014. ISBN 978-80-247-3298-5.

ROULET, Claude – Alain a Luk VANDAELE. *Air Flow Patterns within Buildings Measurement Techniques*. Document AIC-TN-W-lm1. Coventry: Air Infiltration and Ventilation Centre, 1991. ISBN 0-946075-64-6.

ŠTEFKO, Jozef, Ladislav REINPRECHT a Petr KUKLÍK. *Dřevěné stavby: konstrukce, ochrana a údržba*. 2. české vyd. Bratislava: JAGA, 2009. Home. ISBN 978-80-8076-080-9.

Legislativní zdroje:

ČSN EN 12114. *Tepelné chování budov – Stanovení průvzdušnosti stavebních dílců a prvků – Laboratorní zkušební metoda*. Praha: Český normalizační úřad, 2001, 16 s. Třídící znak 730572.

ČSN EN ISO 9972. *Tepelné chování budov – Stanovení průvzdušnosti budov – Tlaková metoda*. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017, 32s. Třídící znak 730577.

ČSN 73 0540–2. *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 56 s. Třídící znak 730540.

Internetové zdroje:

CENTRUM PASIVNÍHO DOMU. Nejvýhodnější komín pro pasivní dům. In: *Centrum pasivního domu [online]*. Brno: Centrum pasivního domu, 2023 [cit. 2024-03-20].

Dostupné z: <https://www.pasivnidomy.cz/nejvyhodnejsi-komin-pro-pasivni-dum/t5046?s=1>

ČSÚ [článek úřad]. *Bytové výstavbě se loni mimořádně dařilo [online]*. 19.6.2023, 1 [cit. 2023-08-04]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/csu/czso/bytove-vystavbe-se-loni-mimoradne-darilo>

DÖRKEN. Parotěsné a vzduchotěsné zábrany pro úspory energií. In: *DÖRKEN [online]*. Praha: DÖRKEN Membranes Česká republika, 2024 [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://www.doerken.com/cz/cs/vyrobyky/parotesne-a-vzduchotesne-zabrany>

ERHORN-KLUTTIG, Heike, Hans ERHORN, Hicham LAHMIDI a Ren ANDERSON. Airtightness requirements for high performance building envelopes. In: *AIVC [online]*. Ghent: International Network for Information on Ventilation and Energy Performance, 2009 [cit.2024-08-10]. Dostupné z: [Airtightness requirements for high performance building envelopes | AIVC](#)

H&W LUFTDICHTIGKEITSPRÜFUNG GBR. Die Ortung der Leckagen. In: *H&W Luftdichtigkeitsprüfung GbR [online]*. Schöllnach: H&W Luftdichtigkeitsprüfung GbR, 2024 [cit.2024-02-25]. Dostupné z: <http://www.luftdichtigkeitspruefung.com/leakageortung.html>

HK – DŘESTAV. Technické informace. In: *HK – dřestav [online]*. Sedlčany: HK – dřestav [cit. 2023-10-01]. Dostupné z: <https://drestav.cz/technicke-informace#konstrukceDomu>

HRUBÝ, Libor. Vzduchotěsnost stavby. In: *Centrum pasivního domu [online]*. Brno: Centrum pasivního domu, 2020 [cit. 2024-02-01]. Dostupné z: <https://www.pasivnidomy.cz/infolist19-07-vzduchotesnost-a-testovani/f8158>

ISOCELL. Systémy vzduchotěsnosti – produkty. In: *ISOCELL [online]*. Wallersee: ISOCELL GmbH & Co KG, 2024 [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://www.isocell.com/cs/systemy-vzduchotesnosti/produkty?page=1>

LIŠKA, Luděk. Historie panelových dřevostaveb. In: *Tzbinfo [online]*. Praha: Topinfo, 2012 [cit. 2023-07-02]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/8545-historie-panelovych-drevostaveb>

LOIRA. Blower door test – kontrola vzduchotesnosti. In: *Loira [online]*. Topolčany: Loira, 2023 [cit. 2023-07-12]. Dostupné z: <http://loira.sk/0/uvod/39/blower-door-test-kontrola-vzduchotesnosti.html>

PILA MARTINICE. Rodinné domy. In: *Martinice group [online]*. Martinice: Pila Martinice [cit. 2023-10-04]. Dostupné z: <https://www.martinicegroup.cz/rodinne-domy>

MAXWELL, Sean. Air infiltration and ventilation association of Australia. In: *The Fifth Estate [online]*. Sydney: The Fifth Estate, 2018 [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://thefifthestate.com.au/columns/spinifex/why-we-should-change-our-building-air-tightness-metrics/>

RIGIPS. Dřevostavby: Difuzně otevřená nebo uzavřená skladba? In: *RIGIPS – SAINT-GOBAIN CONSTRUCTION PRODUCTS CZ A.S. [online]*. Praha: Saint – Gobain Construction Products CZ, 2024 [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://www.rigips.cz/clanky/drevostavby-difuzne-otevrena-nebo-uzavrena-skladba/>

TRANDOVÁ, Lenka. Třetinu dřevostaveb v Česku postavily členské firmy ADMD. In: *ADMD [online]*. Brno: ADMD, 2023 [cit. 2023-08-04]. Dostupné z: <https://www.admd.cz/clanky-a-vida/o-drevostavbach/tretinu-drevostaveb-v-cesku-postavily-clenske-firmy-admd>

TYWONIAK, Jan. Větrání budovy a šíření vzduchu podle ČSN 73 0540-2. In: *Tzbinfo [online]*. Praha: Topinfo, 2011 [cit. 2024-10-02]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/normy-a-pravni-predpisy-vetrani-klimatizace/7981-vetrani-budovy-a-sireni-vzduchu-podle-csn-73-0540-2>

VÝZKUMNÝ A VÝVOJOVÝ ÚSTAV DŘEVAŘSKÝ. Principy, pravidla a omezení Blower Door testu. In: *Výzkumný a vývojový ústav dřevařský [online]*. Praha: Výzkumný a vývojový ústav dřevařský, 2024 [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.vvud.cz/>

ZWIENER, Viktor. Odhalování netěsností v domech v pasivním a nízkoenergetickém standardu. In: *Tzbinfo [online]*. Praha: Topinfo, 2009 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/nizkoenergeticke-stavby/5952-odhalovani-netesnosti-v-domech-v-pasivnim-a-nizkoenergetickem-standardu>

Ostatní zdroje:

BRICH, Jiří. *Výsledky měření staveb* [elektronická pošta]. Message to: xsvev013@studenti.czu.cz. 15. února 2024 [cit. 2024-02-16]. Osobní komunikace.

EGGER. OSB 3 pero – drážka. In: *EGGER CZ [online]*. Hradec Králové: EGGER CZ, 2024 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.egger.com/cs/building/product-detail/OSB3TG?country=CZ>

FERMACELL. Fermacell Vapor. In: *James Hardie Europe GmbH. [online]*. Praha: James Hardie Europe GmbH, 2024 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.fermacell.cz/cz/produkty/sadrovlnaknity-desky/fermacell-vapor>

GUTTA ČR. Paropropustná páska Guttaband DO Profi. In: *GUTTA ČR – PRAHA, [online]*. Lotouš: Gutta ČR, 2024 [cit. 2024-02-18]. Dostupné z: <https://www.guttashop.cz/paropropustna-paska-guttaband-do-profi-.8226>

ILLBRUCK. Produkty. In: *illbruck [online]*. Praha: Tremco CPG, 2024. [cit. 2024-02-23]. Dostupné z: <https://www.illbruck.com/cs-cz/produkty/>

KAISER. Luftdichte Hohlwand-Installation: Gerätedose O-range ECON® 63, luftdicht, Tiefe 49 mm. In: *Kaiser-elektro [online]*. Ramsloh: KAISER GmbH & Co. KG., 2024 [cit. 2024-02-23]. Dostupné z: https://www.kaiser-elektro.de/de_DE/produkte/elektro-installation/hohlwand/luftdichte-geraetedosen-geraete-verbindungs-dosen-zubehoer/176/geraetedose-o-range-econ-63-luftdicht-tiefe-49-mm?c=21

KOŘÍNEK, Viktor. *Hodnocení průvzdušnosti nízkoenergetických dřevostaveb metodou blower-test*. Praha, 2013. Diplomová práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta lesnická a dřevařská. Katedra dřevěných výrobků a konstrukcí. Vedoucí práce Doc. Ing. Martin Böhm, Ph.D.

NOVÁČEK, Petr. *Tepelně – technické vlastnosti dřevěných bytových staveb a diagnostika poruch*. Zvolen, 2012. Bakalářská práce. Technická univerzita ve Zvoleně, Dřevařská fakulta.

PAVLIK KOMÍNOVÉ SYSTÉMY. Parotěsný prostup CIKO. In: *Pavlik komínové systémy [online]*. Frýdek – Místek: Komínové centrum, 2024 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <http://www.ciko-komin.cz/parotesny-prostup-10-cm-pro-komin-nerez-vnejsi-plast-210mm--vyska-300mm/>

PROMAT. PROMATUBE®. In: *Promat [online]*. Praha: Promat, 2024 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.promatpraha.cz/produkty/promatube/>

STAVBY – KOMÍNY. Komínový a šachtový systém MULTI PREFA. In: *Stavby – komíny [online]*. Plánice: Stavby – Komíny, 2024 [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://www.stavby-kominy.cz/kominy/prefabrikovany-komin/multi-prefa>

SRBA, Jaromír. *Hodnocení průvzdušnosti obytných dřevostaveb metodou Blower-door test*. Praha, 2016. Disertační práce. Česká zemědělská univerzita v Praze. Fakulta lesnická a dřevařská. Katedra dřevěných výrobků a konstrukcí. Vedoucí práce Doc. Ing. Martin Böhm, Ph.D.

Seznam ilustrací

Obrázek 1 - malorozměrový panel (EARCH, 2010).	20
Obrázek 2 - středněrozměrový panel (EARCH, 2010).	21
Obrázek 3 - celostěnový panel (autor práce, 2023).	21
Obrázek 4 - prostorové buňky (EARCH, 2010).	22
Obrázek 5 - skladba vnější obvodové stěny (Pila Martinice, 2023).	25
Obrázek 6 - difuzně uzavřená konstrukce HK – DŘESTAV (HK – Dřestav, 2023).	34
Obrázek 7 - difuzně otevřená konstrukce DIFU ECO ENERGO (Pila Martinice, 2023).	36
Obrázek 8 - Principy zajištění vzduchotěsnosti (Novák, 2008).	37
Obrázek 9 - odlišná poloha HVV jako příčina komplikovaného detailu. (Novák, 2008)	38
Obrázek 10 - příklad zajištění vzduchotěsné obálky jednopodlažní budovy (autor práce, 2023).	38
Obrázek 11 - příklad zajištění vzduchotěsné obálky dvoupodlažní budovy (autor práce, 2023).	39
Obrázek 12 - různá řešení rozvodů elektroinstalací v obvodové stěně dřevostavby. (Novák, 2008)	40
Obrázek 13 - Princip metody tlakového spádu s externím ventilátorem (Novák, 2008) 41	
Obrázek 14 - příklad použití těsnícího balónku a hustilky (autor práce, 2024).	43
Obrázek 15 - Minneapolis Blowerdoor (autor práce, 2024)	43
Obrázek 16 - Princip metody tlakového spádu s vnitřním ventilátorem (Roulet, Alain, 1991).	44
Obrázek 17 - Princip metody s harmonicky proměnným tlakovým spádem (Roulet, Alain, 1991).	45
Obrázek 18 - Isocell Airstop Vap (Isocell ©2024).	47
Obrázek 19 - Isocell Airstop 1500 (Isocell ©2024).	47
Obrázek 20 - Isocell öko natur (Isocell ©2024).	48
Obrázek 21 - OSB Egger 3 (Egger ©2024).	48
Obrázek 22 - Fermacell Vapor (Fermacell ©2024).	48
Obrázek 23 – ISOCELL AIRSTOP ELASTO lepicí páska (Isocell ©2024).	49
Obrázek 24 - paropropustná páska Guttband DO Profi (Gutta ©2024).	49
Obrázek 25 - ISOCELL UNI SPREJ PRIMER (Isocell ©2024).	49

Obrázek 26 - ISOCELL OMEGA DB těsnící páska (Isocell ©2024).....	49
Obrázek 27 - illbruck illmod Trio + (illbruck ©2024).	50
Obrázek 28 - okenní fólie illbruck interiér VV (illbruck ©2024).	50
Obrázek 29 - ISOCELL AIRSTOP VBB flís – bitumenkaučuková páska (Isocell ©2024).....	50
Obrázek 30 - těsnící tmel (illbruck ©2024).....	51
Obrázek 31 - AIRSTOP SPRINT těsnící tmel (Isocell ©2024).	51
Obrázek 32 - illbruck illac 600 (illbruck ©2024).	52
Obrázek 33 - AIRSTOP D1 manžeta na kabely (Isocell ©2024).....	52
Obrázek 34 - AIRSTOP RGD manžeta na trubky (Isocell ©2024).....	52
Obrázek 35 - AIRSTOP FRGD skládací manžeta na trubky (Isocell ©2024).	52
Obrázek 36 - OMEGA UDOS manžeta na trubky (Isocell ©2024).	52
Obrázek 37 – vzduchotěsná krabice KAISER (Kaiser ©2024).....	53
Obrázek 38 - vzduchotěsný komín MULTI PREFA (Stavby – komíny ©2024)	53
Obrázek 39 – PROMATUBE (Promat s.r.o. ©2024).	54
Obrázek 40 - vyvíječ kouře (H&W Luftdichtigkeitsprüfung GbR, ©2024).	57
Obrázek 41 – kouřová trubička (autor práce, 2024).	57
Obrázek 42 - kouřové pero (autor práce, 2024).....	58
Obrázek 43 - anemometr (autor práce, 2024).	58
Obrázek 44 - nejčastější místa netěsností (Maxwell, 2018).	59
Obrázek 45 - utěsnění odpadu papírovou páskou (autor práce, 2024).	63
Obrázek 46 - utěsnění komínu pomocí těsnícího balónku (autor práce, 2024).	63
Obrázek 47 - RD Zichovec ve fázi rozestavěnosti při provádění Blower-door testu (Brich, 2024).....	68
Obrázek 48 - RD Zichovec ve fázi rozestavěnosti při provádění Blower-door testu (Brich, 2024).....	68
Obrázek 49 - RD Zichovec ve fázi předávky investorovi (autor práce, 2024).	69
Obrázek 50 - Utěsnění potrubí lokálního odvětrání (Brich, 2024).....	70
Obrázek 51 - Utěsnění vstupu do půdního prostoru (Brich, 2024).....	70
Obrázek 52 - Utěsnění prostupu komínového tělesa (Brich, 2024).....	70
Obrázek 53 - Utěsnění vývodu odpadního potrubí (Brich, 2024).	70
Obrázek 54 - RD Příbram ve fázi rozestavěnosti při provádění Blower-door testu (Brich, 2024).	71

Obrázek 55 - RD Příbram ve fázi rozestavěnosti při provádění Blower-door testu (Brich, 2024).	72
Obrázek 56 - RD Příbram ve fázi předávky investorovi (autor práce, 2024).	72
Obrázek 57 - Utěsnění vstupu do půdního prostoru (Brich, 2024).	74
Obrázek 58 - Utěsnění vývodu odpadního potrubí (Brich, 2024).	74
Obrázek 59 - Utěsnění externího přívodu vzduchu pro krbová kamna (Brich, 2024).	74
Obrázek 60 - Utěsnění průduchu komínového tělesa (Brich, 2024).	74
Obrázek 61 - Utěsnění vývodu výdechového/nasávacího potrubí VZT. (Brich, 2024).	75
Obrázek 62 - Utěsnění průduchu kabelu skrze kabelovou chráničku (Brich, 2024).	75
Obrázek 63 - RD Mělnická Vrutice ve fázi rozestavěnosti při provádění Blower – door testu (Brich, 2024).	76
Obrázek 64 – RD Mělnická Vrutice ve fázi rozestavěnosti při provádění Blower-door testu (Brich, 2024).	76
Obrázek 65 - RD Mělnická Vrutice ve fázi předávky investorovi (autor práce, 2024).	77
Obrázek 66 - Utěsnění vývodu odpadního potrubí (Brich, 2024).	78
Obrázek 67 - Utěsnění průduchu komínového tělesa a externího přívodu vzduchu pro krbová kamna (Brich, 2024).	78
Obrázek 68 - Utěsnění vstupu do půdního prostoru (Brich, 2024).	79
Obrázek 69 - Utěsnění průduchu pro digestoř (Brich, 2024).	79
Obrázek 70 - Únik vzduchu ve funkční spáře HS portálu v místě vodičích kolejnic (Brich, 2024).	84
Obrázek 71 - Únik vzduchu v místě podkladního profilu balkonových dveří způsobený nedostatečným utěsněním elektroinstalace (Brich, 2024).	84
Obrázek 72 - Utěsnění místa styku pohledové kleštiny krovu s hlavní vzduchotěsnicí vrstvou (Brich, 2024).	85
Obrázek 73 - Únik vzduchu okolo potrubí pro tepelné čerpadlo (Brich, 2024).	89
Obrázek 74 - Únik vzduchu v místě styku komínového tělesa s průchodkou z pěnoskla (Brich, 2024).	89
Obrázek 75 - Únik vzduchu v místě napojení obvodového panelu na základovou desku (Brich, 2024).	90
Obrázek 76 - Únik vzduchu ve funkční spáře dveří (Brich, 2024).	90
Obrázek 77 - Únik vzduchu v místě krycí lišty sestavy oken (Brich, 2024).	91
Obrázek 78 - Parotěsný prostup pro nerezové komíny (PAVLIK KOMÍNOVÉ SYSTÉMY © 2024).	92

Obrázek 79 - Pohledové kleštiny krovu vystupující do interiéru (Brich, 2024).....	93
Obrázek 80 - Únik vzduchu okolo elektroinstalace prostupující základovou deskou (Brich, 2024).....	97
Obrázek 81 - Únik vzduchu v místě připojovací spáry okna (Brich, 2024).	97
Obrázek 82 - Únik vzduchu v místě styku komínového tělesa se systémovou průchodkou (Brich, 2024).....	98

Seznam použitých tabulek

Tabulka 1 - montážní postup dřevostavby z celostěnových panelů (Pila Martinice, 2023).	30
Tabulka 2 - doporučené hodnoty celkové intenzity výměny vzduchu n50, N. (ČSN 73 0540–2, 2011.)	32
Tabulka 3 - rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu RD Zichovec – zkouška podtlaku.	81
Tabulka 4 - hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu RD Zichovec – zkouška podtlaku.	81
Tabulka 5 - rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu RD Zichovec – zkouška přetlaku.	82
Tabulka 6 - hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu RD Zichovec – zkouška přetlaku.	82
Tabulka 7 - rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu RD Příbram – zkouška podtlaku.	86
Tabulka 8 - hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu RD Příbram – zkouška podtlaku.	86
Tabulka 9 - rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu RD Příbram – zkouška přetlaku.	87
Tabulka 10 - hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu RD Příbram – zkouška přetlaku.	87
Tabulka 11 - rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu RD Mělnická Vrutice – zkouška podtlaku.	94
Tabulka 12 - hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu RD Mělnická Vrutice – zkouška podtlaku.	94
Tabulka 13 - rozdíly tlaku při nulovém průtoku vzduchu RD Mělnická Vrutice – zkouška přetlaku.	95
Tabulka 14 - hodnoty měření tlakových rozdílů a průtoků vzduchu RD Mělnická Vrutice – zkouška přetlaku.	95

Seznam použitých grafů

Graf 1 - konstrukce dřevostaveb 2022 (Trandová, 2023).	15
Graf 2 - graf časového průběhu vyvolaných tlaků po dobu měření vzduchové neprůvzdušnosti (Loira ©2023).	66
Graf 3 - Graf průtoku vzduchu RD Zichovec (Brich, 2024).	83
Graf 4 - Graf průtoku vzduchu RD Příbram (Brich, 2024).	88
Graf 5 - Graf průtoku vzduchu RD Mělnická Vrutice (Brich, 2024).	96

Seznam příloh

Blokové schéma výroby obvodového celostěnového panelu vycházejícího ze skladby obvodového panelu společnosti PILA MARTINICE s.r.o.

Tabulka porovnání výsledků měření vzduchotěsnosti třech staveb na bázi dřeva měřených za pomoci blower-door testu.

Detail č. 1 – Detail rohového spojení panelů z hlediska zajištění vzduchotěsnosti.

Detail č. 2 – Detail spojení základové desky s obvodovým panelem z hlediska zajištění vzduchotěsnosti.

Detail č. 3 – Detail napojení stropního panelu na obvodový panel z hlediska zajištění vzduchotěsnosti.

Detail č. 4 – Detail napojení konstrukce tesařsky vázaného krovu na obvodový panel z hlediska zajištění vzduchotěsnosti.

Detail č. 5 – Detail napojení příhradové konstrukce na obvodový panel z hlediska zajištění vzduchotěsnosti.

Detail č. 6 – Detail osazení okna do obvodového panelu z hlediska zajištění vzduchotěsnosti.

Detail č. 7 – Detail osazení vchodových dveří do obvodového panelu z hlediska zajištění vzduchotěsnosti.

Detail č. 8 – Detail umístění dvou balkonových dveří v místě rohu obvodové stěny z hlediska zajištění vzduchotěsnosti.