

# ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA KONSTRUKCÍ POZEMNÍCH STAVEB



Tepelně vlhkostní chování oken v obvodovém  
plášti dřevostavby

Hygrothermal performance of windows  
in the envelope of a timber building

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2024

Matěj Dvořák

Studijní program: N3649 – Budovy a prostředí

Studijní obor: 3608T006 – Budovy a prostředí

Vedoucí práce: Ing. Kamil Staněk, Ph.D.





## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE


### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Dvořák</u>	Jméno: <u>Matěj</u>	Osobní číslo: <u>483347</u>
Zadávací katedra: <u>K124 - Katedra konstrukcí pozemních staveb</u>		
Studijní program: <u>N3649 - Budovy a prostředí</u>		
Studijní obor/specializace: <u>3608T006 - Budovy a prostředí</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Tepelně vlhkostní chování oken v obvodovém plášti dřevostavby</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Hygrothermal performance of windows in the envelope of a timber building</u>	
Pokyny pro vypracování:	
1) rešerše	
- provádění oken v obvodových pláštích dřevostaveb (požadavky, postupy, kvalita)	
- požadavky a výpočetní postupy v oblasti šíření tepla a vlhkosti dle českých a vybraných zahraničních norem	
2) experiment pro ověření tepelně-technického chování obvodové stěny dřevostavby se zabudovaným oknem	
- návrh experimentu: stavební řešení vzorku, volba zkušebních postupů, umístění snímačů	
- prováděcí dokumentace vzorku s variantním řešením v oblasti připojovací spáry	
- stavební realizace vzorku a osazení snímačů	
- měření vzduchotěsnosti	
- měření tepelně vlhkostního chování	
- vyhodnocení výsledků měření	
3) výpočetní část	
- simulace experimentu v programech WUFI a WUFI 2D a porovnání s výsledky měření	
- výpočty tepelně vlhkostního chování vybraných detailů obvodových plášťů dřevostaveb v programech Area a WUFI 2D a porovnání výsledků s požadavky českých i vybraných zahraničních norem	
Seznam doporučené literatury:	
ČSN 730540-2 Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky	
DIN 4108-3 Thermal protection and energy economy in buildings - Part 3: Protection against moisture subject to climate conditions - Requirements, calculation methods and directions for planning and construction	
ÖNORM B 8110-2 Wärmeschutz im Hochbau - Teil 2: Wasserdampfdiffusion, -konvektion und Kondensationsschutz	
J. Hazucha, J. Bárta. Konstrukční detaily pro pasivní domy. Grada 2014	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Kamil Staněk, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>25.09.2023</u>	Termín odevzdání DP v IS KOS: <u>08.01.2024</u>
	
Podpis vedoucího práce	Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
<u>25.9.2023</u>	
Datum převzetí zadání	Podpis studenta(ky)



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci *Tepelně vlhkostní chování oken v obvodovém plášti dřevostavby* vypracoval a napsal samostatně, za přispění odborných konzultací a uvedené literatury.

V Praze dne 7. ledna 2024

Matěj Dvořák

## Poděkování

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce Ing. Kamilu Staňkovi, Ph.D. za čas strávený debatami, skvělou komunikací, ochotou a odborné rady. Dále děkuji Univerzitnímu centru energeticky efektivních budov za poskytnutí zázemí pro vypracování práce a technikům Ing. Radimu Havlíčkovi, Ing. Janu Vítovcovi a Drahomíru Hodkovi za asistenci při realizaci experimentálního vzorku.

## Abstrakt

Diplomová práce se zabývá primárně tepelně vlhkostním chováním zabudovaného okna v obvodovém plášti dřevostavby s uplatněním více přístupů – měřením experimentálního vzorku a simulací numerických modelů. V teoretické části je popsán současný stav návrhu a realizace oken v obvodovém plášti s analýzou vad, doplněný o specifika dřevostaveb. Druhá část teorie se zabývá vlhkostí ve stavební konstrukci z pohledu českých norem a norem z německy mluvících zemí, opět s důrazem na dřevo a výrobky na bázi dřeva. V experimentální části jsou popsány návrh a realizace experimentálního vzorku reprezentující okno zabudované v obvodovém plášti dřevostavby, na kterém jsou měřeny a dále vyhodnoceny průvzdušnost a tepelně vlhkostní chování. Měření průvzdušnosti je pro doplnění dále provedeno na malých vzorcích. Ve výpočetní části jsou v softwaru vytvořené numerické modely, které jsou validovány s výsledky experimentálního měření. Na základě těchto modelů jsou sestaveny a zanalyzovány varianty detailů ostění.

### Klíčová slova

okno, dřevostavba, připojovací spára, průvzdušnost, vlhkost

## Abstract

The thesis deals primarily with the hygrothermal performance of a built-in window in the envelope of a timber building using several approaches – measurement of an experimental model and simulation of numerical models. In the theoretical part, the current state of the art of design and implementation of windows in the envelope is described with the analysis of defects, supplemented by the specifics of timber buildings. The second part of the theory deals with moisture in building construction from the perspective of Czech standards and standards from German-speaking countries, again with emphasis on wood and wood-based products. The experimental part describes the design and realization of an experimental model representing a window built into the envelope of a timber building, on which the air permeability and hygrothermal performance are measured and further evaluated. The measurements of the air permeability are further performed on small samples for completeness. In the computational part, numerical models are created in the software and validated with the experimental measurement results. Based on these models, variations of the lining details are constructed and analysed.

### Keywords

window, timber building, connection joint, air permeability, humidity





# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>Okna v obvodových pláštích dřevostaveb</b> .....	<b>13</b>
	2.1 Realizace oken.....	13
	2.2 Vady.....	15
	2.3 Hodnocení kvality .....	17
<b>3</b>	<b>Vlhkost v konstrukci</b> .....	<b>19</b>
	3.1 Česká republika.....	19
	3.2 Německo.....	20
	3.3 Rakousko .....	22
	3.4 Švýcarsko.....	23
	3.5 Porovnání vlhkostních limitů .....	24
<b>4</b>	<b>Experimentální vzorek</b> .....	<b>25</b>
	4.1 Zkušební zařízení.....	25
	4.2 Parametry vzorku .....	25
	4.3 Realizace.....	30
<b>5</b>	<b>Měření</b> .....	<b>37</b>
	5.1 Průvzdušnost experimentálního vzorku .....	37
	5.1.1 Úvod.....	37
	5.1.2 Metody .....	39
	5.1.3 Výsledky .....	42
	5.1.4 Výpočty .....	46
	5.1.5 Diskuse.....	48
	5.1.6 Závěr .....	49
	5.2 Průvzdušnost malého vzorku .....	50
	5.2.1 Úvod.....	50
	5.2.2 Metody .....	50
	5.2.3 Výsledky .....	53
	5.2.4 Diskuse.....	54
	5.2.5 Závěr .....	55
	5.3 Tepelně vlhkostní simulace.....	56
	5.3.1 Úvod.....	56
	5.3.2 Metody .....	59

5.3.3	Výsledky.....	63
5.3.4	Diskuse.....	73
5.3.5	Závěr.....	74
<b>6</b>	<b>Výpočetní část.....</b>	<b>75</b>
6.1	Validace výpočetních modelů dle experimentálního vzorku .....	75
6.1.1	Skladba stěny v programu WUFI Pro a Teplo .....	76
6.1.2	Detail ostění v programu WUFI 2D a Area.....	79
6.1.3	Diskuse.....	83
6.1.4	Závěr.....	83
6.2	Analýza variant detailu ostění.....	84
6.2.1	Modely WUFI 2D.....	84
6.2.2	Doplňkový model Area.....	94
6.2.3	Vyhodnocení variant.....	98
6.2.4	Diskuse.....	99
6.2.5	Závěr.....	99
<b>7</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>101</b>

# 1 Úvod

Okna jsou jedním z klíčových prvků obvodových plášťů budov, která se z pohledu uživatele významně podílí na estetice a komfortu interiéru. V kontextu moderního stavitelství jsou na zabudovaná okna kladeny požadavky na vzduchotěsnost a tepelnou prostupnost, v systémech budov přinášejí do interiéru solární tepelné zisky a mohou být součástí větrání vnitřních prostor. Hrají také významnou roli v akustice a denním osvětlení budov. Vždy závisí na požadavcích konkrétní budovy, způsobu užívání a klimatických podmínkách, proto je nutné uplatnit vhodná, mnohdy rozdílná stavební řešení.

Výše zmíněné nároky musí v fungovat vzájemně v souladu po celou dobu životnosti kompletačních konstrukcí. Jejich životnost je v praxi právě nejvíce ovlivněna tepelně vlhkostním chováním. Podcenění návrhu detailů zabudovaného okna a špatná realizace může mít za následek kondenzaci vodních par, následnou degradaci a v konečném důsledku ztrátu uvedených funkcí.

Tepelně vlhkostní problematika je zvláště umocněna aktuálním rozmachem přírodního a ekologického stavitelství, ve kterém dominují dřevo a výrobky na bázi dřeva jako hlavní stavební materiál. Dřevo je z pohledu vlhkosti vysoce citlivý materiál, a proto současné normativní prostředí zahrnuje mnoho limitů usměrňujících jeho správné použití v konstrukci.

Z toho vyplývá, že okno zabudované v obvodovém plášti dřevostavby je mimořádně důležitým detailem a pro výrobce oken, projektanty pozemních staveb a realizační praxi to přináší náročnou výzvu.

Hlavním cílem této diplomové práce je pomocí experimentů a výpočtů objasnit tepelně vlhkostní chování oken v obvodovém plášti dřevostavby s ohledem na rozdílné materiálové složení a kvalitu provedení v širším kontextu. Motivací je také přispět k diskusi o kvalitě zabudovaných oken a poskytnout doporučení pro projektanty a stavitele.



## 2 Okna v obvodových pláštích dřevostaveb

### 2.1 Realizace oken

Norma ČSN 74 0677 Okna a vnější dveře – Požadavky na zabudování [1] je hlavní dokument pro návrh a provádění montáže oken a dveří, jejíž cílem je zabudovaný prvek splňující požadavky ohledně bezpečnosti, odolnosti proti povětrnosti a tepelné techniky. Okna a dveře neboli otvorová výplň (OV), jsou stavební výrobek, který se zabudováním do konstrukce stává její součástí a následně je nutné se řídit jinými předpisy pro prokázání vlastností, měření kvality a hodnocení vad.

#### Připravenost otvoru

Stavební otvor musí být proveden v požadované přesnosti. Zmíněná norma předepisuje mezní odchylky rozměrů otvoru, dále tolerance rovinnosti ostění, pravoúhlosti, svislosti a vodorovnosti, v závislosti na velikosti otvoru a způsobu úpravy povrchu. Povrch musí být vždy čistý, suchý, únosný, bez trhlin a nerovností. V případě dřevostaveb tvoří ostění obvykle KVH hranoly, OSB desky, nebo hrany CLT panelů, kde dodržení tolerancí nebývá problém. Zvláště u prefabrikovaných konstrukcí je geometrická přesnost vysoká. Specifikum u širších otvorů v rámci rámové dřevostavby je důležitost mezní deformace dřevěného překladu dle statického výpočtu, v praxi není výjimkou použití prvků z vrstveného dýhového dřeva. [1] [2]

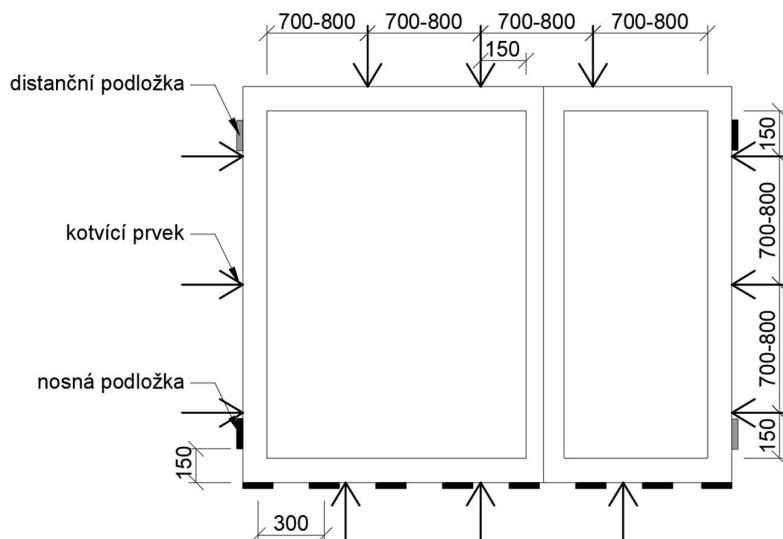
#### Kotvení okna

Kotvení okna musí být navrženo tak, aby jako jediné přeneslo zatížení z výrobku do nosné konstrukce stěny. Síly vzniklé vlastní tíhou v rovině okna přenáší nosné podložky, vodorovné zatížení kolmo na okno (vítr) přenáší kotvící prvky. Distanční podložky slouží pouze pro vymezení rozměrů připojovací spáry. Případné pomocné klínky jsou po připevnění okna ihned odstraněny ze spáry. [1]

Kotvení lze dle zmíněné normy provádět okenními šrouby pro přímou montáž (šroub je primárně namáhán na smyk, dále omezí možnost teplotní roztažnosti – v praxi není doporučeno), vodíci profily nebo osazovací rámy (umožní velký vzájemný pohyb konstrukce a okna), nejběžněji pásovými kotvami (teplotní dilataci umožní svým ohybem. Možností kotvení oken způsobem předsazené montáže je v současnosti mnoho a vždy závisí na konkrétním výrobku, obecně se jedná o úhelníky či profily z kompozitních materiálů. Pro výběr vhodné nosné podložky je určující pevnost v tlaku – vhodným řešením jsou podložky z tvrdého dřeva nebo z tvrzeného plastu. Nahrazení expandovaným polystyrenem nebo pěnou je nepřijatelné. [1] [3]

Kotvící prvky jsou rozmístěny po celém obvodu rámu okna ve vzájemné vzdálenosti max. 800 mm (dřevěná, kovová okna) nebo 700 mm (plastová), dále 150 mm od vnitřních koutů svisle a od vnitřních příček. Nosné podložky v parapetní oblasti je doporučeno umístit po cca 300 mm, v případě otevíravých oken se dále

umístí diagonálně v místě ostění. Většina veřejně dostupných dokumentů zabývajících se montáží oken obvykle doporučuje umístění kotvicích prvků pouze v ostění, nikoli v úrovni parapetu a nadpraží. Tento přístup je velmi častý i v praxi a pravděpodobně tato odchylka od normy nevede za běžných podmínek k poruchám, pokud je počet kotev staticky vyhovující. [1]

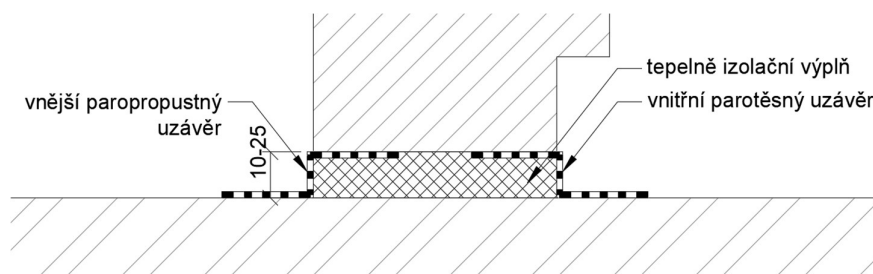


obrázek 2.1.1 - schéma umístění kotvicích prvků a podložek (zpracováno dle [1])

V případě dřevostaveb často používané pásové kotvy je v první fázi nutné připevnit k rámu okna zespod mimo okenní otvor. Následně se ohnou pro dvojitý ohyb pro vymezení spáry. Okno se při osazování do otvoru umístí na nosné podložky, následně vyklínkuje při kontrole svislé a vodorovné roviny. Poté lze kotvy přivrátovat ke konstrukci stěny. [4]

### Připojovací spára

Připojovací spára obsahuje 3 zóny – vnitřní uzávěr, tepelně izolační výplň a vnější uzávěr. Je nutné, aby spára byla vzduchotěsná a odolná proti hnanému dešti. Vnitřní uzávěr musí být proveden parotěsně (je běžně součástí hlavní vzduchotěsné vrstvy), zatímco vnější vodotěsně. Při výskytu vlhkosti musí spára zajistit vysychání a vnitřní uzávěr má mít vyšší ekvivalentní difuzní tloušťku než vnější. Zásadní předpokladem pro správné fungování detailu je použití systémových výrobků a dodržení pokynů výrobce pro montáž. [1] [5]



obrázek 2.1.2 - detail připojovací spáry (zpracováno dle [1])

Šířka přípojovací spáry se odvíjí podle součinitele teplotní roztažnosti materiálu rámu okna a rozměru okna. Běžnou praxí je provedení spáry na 15 mm, norma ovšem u plastových a dřevěných oken do 1,0 m (1,5 m) připouští 10 mm, zatímco u zvláště hliníkových oken s rozměrem nad 3,0 m je doporučeno 25 mm. [1]

Při výběru materiálu je nutné brát ohled na jejich odolnost vůči stříhu příčným a podélným, dále pak na prodloužení a stlačení. Součinitele teplotní roztažnosti materiálů musí být vyšší než u přilehlých konstrukcí a současně dovolená deformace musí být minimálně 2 mm. Pro uzávěry norma dovoluje použití tmelů v kombinaci např. s pěnovým provazcem (tmel musí být trvale elastický a přípustný pouze u spár do 15 mm), dále komprimované těsnící pásy (primárně pro vnější uzávěr) a v dnešní době dominantní těsnící folie. Pro tepelně izolační výplň norma popisuje použití nízkoexpanzní plnicí pěny. Pěna smí plnit funkci pouze izolační, nikoli funkci nosnou pro otvorovou výplň. [1]

Konkrétní postup realizace je vždy závislý na konkrétním umístění okna v otvoru, druhu nosné konstrukce dřevostavby, případně na dalších detailech, jako je provedení vnějšího žaluziového boxu, hlavní vzduchotěsné vrstvy apod. Následující popis je určen pro v praxi nejběžnější způsob osazování.

Před provedením přípojovací spáry musí být přilehlé plochy zbavené prachu, nečistot a jejich teplota během realizace by se měla pohybovat v rozmezí +5 °C až +40 °C. V případě těsnících folií, zvláště u parotěsné vnitřní folie, se prvně přilepí na rám zespod před umístěním do otvoru. Folii je doporučeno přitlačit k rámu a v rozích vytvořit přesah pro jednodušší instalaci v koutech ostění. Po připevnění okna v otvoru se folie přilepí k parobrzděné zábraně (v případě difúzně otevřené skladby) tvořené v případě rámové dřevostavby KVH hranolem nebo OSB deskou. Z vnější strany se spára vyplní expanzní pěnou. Před pěněním je nutné osadit okenní křídla pro eliminaci deformace rámu a spáru navlhčit, jelikož pěna expanduje za přítomnosti vzdušné vlhkosti. Pěnu je vhodné nanášet ve dvou pruzích pro zajištění dosahu pěny do celého objemu spáry. Po vyvrání pěny se případné přebytky oříznou. Vnější paropropustná folie se obvykle nalepí v posledním kroku přes rám okna. Zvláště u vnitřní folie, je nezbytné veškeré netěsnosti, případně prostupy kotev přes folii, utěsnit, například vzduchotěsným tmelem. [4]

## 2.2 Vady

Otvorová výplň zabudovaná v obálce budovy generuje z tepelně vlhkostního hlediska slabá místa, ve kterých hrozí zvýšené riziko kondenzace vodní par. Je proto účelné se zabývat pečlivým návrhem a realizací okna do okenního otvoru, a to s ohledem na způsob užívání objektu. Příčiny vzniku kondenzátu norma ČSN 74 0677 dělí do tří oblastí:

### a) Nedostatky při užívání vnitřních prostor

Norma uvádí jako jeden z nedostatků provádění vlhkých procesů v novostavbě po montáži oken a tím uzavření nadměrné zabudované vlhkosti v místnostech. Nutností pro zamezení trvalého poškození (zvláště u dřevěných) oken a vznik kondenzátu v oslabených detailech je tak intenzivní větrání. V praxi je tento

stav běžný, obvykle jsou při realizaci vlhkých procesů (např. hliněná omítka) okna a dveře uzavřeny a větrání probíhá až poté. Vzhledem ke krátkému trvání uzavřené vlhkosti lze dopady na funkci a životnost OV v zabudovaném stavu zanedbat. [6]

V případě výměny oken u starších objektů dojde k násobně nižší výměně vzduchu infiltrací, je tedy vhodné z důvodu odvodu vlhkosti (nebo škodlivin) dostatečně větrat otevřenými okny, případně zajistit další systém, např. nuceného větrání. Dalším nedostatkem je nezajištění dostatečného proudění vzduchu kolem oken, např. zakrytím oken závěsy, zakrytím otopného tělesa pod oknem. Problém může nastat v prostorech s vysokou vlhkostní zátěží, typicky koupelny, sušárny, kde je opět nutné navýšit intenzitu větrání, nebo volit materiály, které nemohou být kondenzátem ohroženy. [1]

### b) Vady zabudování

Nevhodně provedená připojovací spára může mít za následek vznik kondenzátu na vnitřním povrchu, ale i uvnitř připojovací spáry. Tím degraduje výplň spáry, sníží se její životnost a vzniká riziko rozvoje plísní na ostění, zvláště u nasákových a organických materiálů. Snížení izolační schopnosti a vznik netěsností má v neposlední řadě vliv na energetickou náročnost. [1]

Často popisovaným závažným problémem jsou chyby v provedení parotěsné folie, tedy vnitřního uzávěru. Bez očištění povrchů před aplikací fólie se sníží její přilnavost a vodní pára může procházet do spáry. Případně není folie aplikována po celém obvodu okna, není výjimkou její absence v rozích nebo v celé parapetní oblasti. Častou v praxi vídanou chybou je nedostatečné vyplnění připojovací spáry montážní pěnou. Pěna málo expanduje, tedy nevyplní spáru po celém obvodu a v hloubce, anebo nepřilne k povrchu kvůli zanedbání očištění a předvlhčení spáry. Důsledkem je zhoršení izolačních vlastností výplně spáry. Pro vnější uzávěr jsou rizika realizace velmi podobná vnitřnímu uzávěru, zvláště u folií. U komprimačních pásek může být problém příliš velké nebo malé stlačení, u tmelů jejich nepřilnavost. U vnějšího uzávěru je špatným provedením ohrožena jedna ze základních funkcí – vodotěsnost, hrozí tedy průnik tlakové vody skrz spáru do konstrukce. [7] [8]



obrázek 2.2.1 - chybný detail parotěsné folie (zdroj: archiv autora)



### c) Vady výrobku

Za vadu výrobku lze považovat jeho nevhodná konstrukce – nekvalitní těsnění, nedostatečné tepelně izolační vlastnosti vzhledem k požadavkům a účelu, tedy nedostatečné vlastnosti zasklení, případně nekvalitní distanční rámeček. Dále může být vada způsobena během montáže chybným seřízením. Zkoumání vad výrobku není předmětem této práce. [1] [8]

## 2.3 Hodnocení kvality

### Výrobek

Technické požadavky na okna a dveře (OV) jsou dány Nařízením Evropského parlamentu prostřednictvím harmonizované normy ČSN EN 14351-1+A2 [9], která zavádí systém značení výrobku CE. Podle normy je povinné například prokázat následující vlastnosti OV (pro jiné než požární účely) - odolnost proti zatížení větrem, vodotěsnost, uvolňování nebezpečných látek, únosnost bezpečnostních zařízení, akustické vlastnosti, součinitel prostupu tepla, radiační vlastnosti, průvzdušnost. Ty jsou prokázány počáteční zkouškou typu (ITT), a následně deklarovány v Prohlášení o vlastnostech. Dále norma uvádí přípustné metody stanovení vlastností OV. [10]

### Zabudovaná OV

Metody hodnocení kvality zabudované OV jsou založené primárně na materiálové a geometrické shodě výrobku. Výrobek by tedy měl co nejvíce odpovídat zkoušenému výrobku během průkazných zkoušek ITT, aby vykazoval deklarované vlastnosti. Měřenými parametry jsou např. pozice a rozměry křídla vůči rámu okna, svěšení a prohnutí křídla, výška překrytí, seřízení okna. Dále se ověří vnitřní prostředí interiéru. Z ČSN EN 14351-1+A2 vyplývá, že pro hodnocení kvality zabudované OV jsou nepřipustná měření jejich průvzdušnosti, vodotěsnosti, odolnosti proti zatížení větrem nebo součinitele prostupu tepla. [10]

### Montáž OV

Hodnocení kvality montáže probíhá na základě porovnání s pokyny danými normou ČSN 74 0677, jedná se tedy o geometrickou přesnost, dodržení použití předepsaných materiálů a technologie realizace. Geometrická přesnost otvoru ale není zodpovědností dodavatele oken. Reálné požadavky mohou být odlišné od normy, tyto změny by měly být smluvně ošetřeny.



## 3 Vlhkost v konstrukci

### 3.1 Česká republika

#### Vlhkostní bezpečnost konstrukce

Základním předpisem je soubor norem řady ČSN 73 0540. Hlavní požadavky obsahuje ČSN 73 0540-2 [11]:

- V případě, kdy zkondenzovaná vodní pára může ohrozit požadovanou funkci konstrukce, není přípustný žádný kondenzát, tedy  $M_c = 0$  [kg/m<sup>2</sup>a].
- V případě, kdy zkondenzovaná vodní pára neohrozí požadovanou funkci konstrukce, platí  $M_c \leq M_{c,N}$  [kg/m<sup>2</sup>a].
- Pro jednoplášťové střechy, konstrukce se zabudovanými dřevěnými prvky, nebo pro konstrukci s vnějším tepelně izolačním systémem je hodnota  $M_{c,N} = 0,10$  kg/m<sup>2</sup>a nebo 3 % plošné hm. materiálu (obj. hm. nad 100 kg/m<sup>3</sup>), kde dochází ke kondenzaci (při  $\rho \leq 100$  kg/m<sup>3</sup> platí 6 % plošné hm.).
- Pro ostatní konstrukce platí  $M_{c,N} = 0,50$  kg/m<sup>2</sup>a.

Dále norma prostřednictvím Změny Z1 zmiňuje, že dojde-li k překročení k rovnovážné hmotnostní vlhkosti 18 % u dřeva nebo materiálu na bázi dřeva za normových podmínek užívání, je požadovaná funkce ohrožena. V případě překročení musí být v odůvodněných případech zajištěn snadný odvod vlhkosti z konstrukce. [11]

V roční bilanci kondenzace a vypařování vodní páry nesmí zbýt žádné množství kondenzátu, které by tak zvyšovalo vlhkost konstrukce. Ověření požadavku se provádí pomocí bilančního výpočtu po měsících podle ČSN EN ISO 13788 [12], případně podle ČSN 73 0540-4 [13]. V případě použití pokročilejších metod musí být mimo jiné splněno, že se hmotnostní vlhkost u žádného z materiálů trvale nezvyšuje. [11]

Princip výpočtu dle prvně zmíněné normy [12] stojí na prostém porovnání ročního množství zkondenzované a vypařitelné vodní páry. Pro určení množství se použijí průměrné měsíční teploty a relativní vlhkosti vnějšího vzduchu. Množství zkondenzované v. p.  $M_{c,a}$  je dáno součtem nezáporných hodnot za jednotlivé měsíce, množství vypařitelné v. p.  $M_{ev,a}$  pak dáno součtem záporných hodnot. Podle druhé normy [13] se výpočet opět řídí porovnáním ročního množství zkondenzované a vypařitelné vodní páry. Obě hodnoty  $M_{c,a}$  a  $M_{ev,a}$  jsou součtem dílčích množství  $M_{a,j}$  pro teploty pokrývající rozsah teplot venkovního vzduchu během roku při kroku  $\Delta\theta_e=5K$ . Při znalosti měsíčních hodnot klimatických údajů se použije ČSN EN ISO 13788, při obou způsobech výpočtu rozhodne nepříznivější výsledek.

#### Ochrana dřeva

Základním předpisem pro ochranu dřeva je norma ČSN EN 335 [14] z roku 2013 nahrazující předchozí normy ČSN 335-1,2,3, která zavádí celkem 5 tříd použití:

- *Třída použití 1 – zcela chráněné vnitřní konstrukce s trvalou vlhkostí dřeva do 20 % a bez ohrožení houbami, dřevokazný hmyz možný*
- *Třída použití 2 – vnitřní konstrukce občasně vystavená vlhkosti nad 20 %, od této třídy dále riziko napadení dřevokazným hmyzem a houbami*
- *Třída použití 3 – typicky exteriérové dřevo vystavené povětrnostním vlivům s vlhkostí často přesahující 20 %; tato třída je dále dělena na 3.1 a 3.2*
- *Třída použití 4 – dřevo v kontaktu se zeminou a sladkou vodou; trvale přes 20 %*
- *Třída použití 5 – dřevo v kontaktu se slanou vodou; trvale přes 20 %*

Norma nepopisuje důsledky zařídění do tříd a z toho plynoucí opatření pro ochranu dřeva. Doplnující normou tak je ČSN EN 350 [15], která třídí dřevo a materiály na bázi dřeva podle 5 tříd trvanlivosti proti napadení dřevokaznými houbami (1 – Velmi trvanlivé, 5 – Netrvanlivé) a 2 třídy trvanlivosti proti napadení dřevokaznými brouky (D – Trvanlivé, S – Netrvanlivé).

V ČR nevíce používané konstrukční dřevo – Smrk ztepilý (*Picea abies*) se řadí do třídy trvanlivosti 4 (málo trvanlivé proti napadení dřevokaznými houbami) a S (netrvanlivé proti napadení dřevokaznými brouky). Dle ČSN EN 460 [16] pro třídu trvanlivosti 4 a třídy použití 1 až 3.1 (většina konstrukcí pozemních staveb) je přirozená trvanlivost až na výjimky dostačující.

## 3.2 Německo

### Vlhkostní bezpečnost konstrukce

Německé normy jsou v oblasti vlhkostní bezpečnosti velmi robustní a detailně popisují způsob návrhu a limity. Základním předpisem je soubor norem řady DIN 4108. Nejvíce informací poskytuje v této oblasti DIN 4108-3 [17]:

- *Stejně jako v českém prostředí platí, že vzniklý kondenzát nesmí ohrozit životnost konstrukce (ekvivalent  $M_c = 0$  [kg/m<sup>2</sup>a]).*
- *Dále veškerá zkondenzovaná voda musí být v letním období odpařena (ekvivalent  $M_c \leq M_{c,N}$  [kg/m<sup>2</sup>a]).*
- *Obecně je maximální množství kondenzátu v konstrukci nastaveno na 1,0 kg/m<sup>2</sup>, v případě zabudovaných vrstev bez absorpčních a kapilárních vlastností (např. folie) je hodnota snížena na 0,5 kg/m<sup>2</sup>; lze chápat jako celkové aktuální množství.*
- *V dřevěné konstrukci je maximální množství kondenzátu ve styku s dřevěným prvkem omezeno hodnotou rovné hmotnostní vlhkosti dřeva  $\Delta u_m = 5$  %, v případě prvků na bázi dřeva  $\Delta u_m = 3$  %.*

Základním výpočetním způsobem, kterým je nutné prokázat ochranu proti kondenzaci, je Glaserova metoda podle DIN 4108-3, případně lze použít realistickou simulaci dle DIN EN 15026 s ověřením, že se hmotnostní vlhkost u žádného z materiálů trvale nezvyšuje. Bilanční výpočet po měsících podle DIN EN ISO 13788 je shodný s českým zněním a v Německu používaný při specifických okrajových podmínkách (např. vysoká vlhkostní zátěž v interiéru). Glaserova metoda podle DIN 4108-3 vychází z odlišných okrajových podmínek, než popisuje české normativní prostředí. Vlhkostní bilance stojí na periodické bilanci dvou 90-ti denních

období. Období kondenzace v zimních měsících zahrnuje prosinec–únor. Okrajové podmínky jsou shodné pro všechny spolkové země [18] [19] [20]:

- Vnitřní prostředí: 20 °C + 20 % relativní vlhkost
- Vnější prostředí: -5 °C + 80 % relativní vlhkost

Období vypařování pro letní měsíce červen-srpen má zadané podmínky následující:

- Vnitřní prostředí: parciální tlak vodní páry 1200 Pa
- Vnější prostředí: parciální tlak vodní páry 1200 Pa

Dále existuje soubor pravidel, za kterých není nutné ověření provádět. Důležitou podmínkou je splnění minimální tepelné ochrany dané normou DIN 4108-2 a vzduchotěsnosti dle DIN 4108-7. Z ověřování jsou vyloučeny konstrukce navržené podle vzorových skladeb na bázi dřeva dle DIN 68800-2 nebo skladby s hodnotou ekvivalentní difúzní tloušťky  $s_d$  [m] 6x větší na vnitřní straně než na vnější. [19]

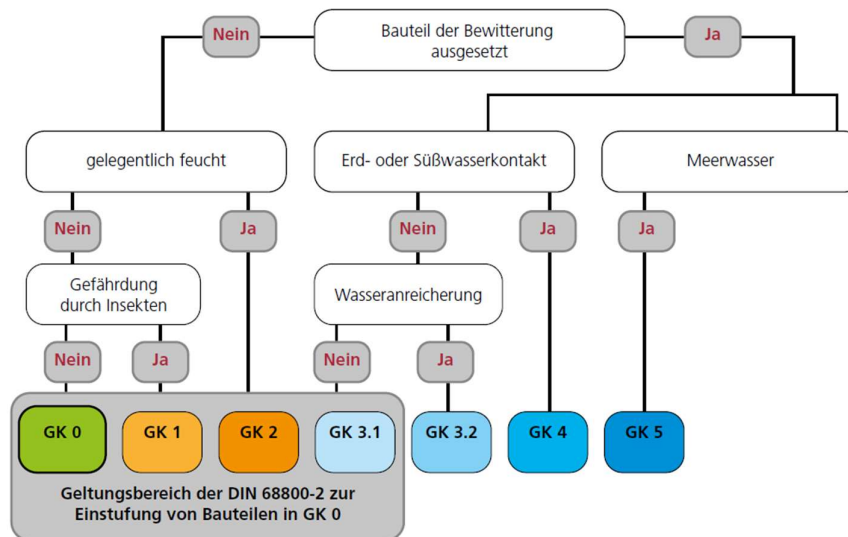
Německým specifíkem při návrhu dřevěných konstrukcí oboustranně opláštěných je požadavek výše zmíněné DIN 68800-2, která pracuje s tzv. vlhkostní rezervou, tedy navýšeném množství vypařitelné vodní páry, při výpočtech roční bilance zkondenzované vodní páry v konstrukci. Vlhkostní rezerva je nastavena z důvodu nedokonalé vzduchotěsnosti a tím vzniklé netěsnosti, které způsobí transport vodní páry konvekci, jež je násobně větší než transport difúzí. Základní hodnota rezervy je 250 g/m<sup>2</sup>a. Pokud je testována vzduchotěsnost budovy a jsou splněny minimální požadavky DIN 4108-7, lze požadovanou rezervu na vysychání snížit na 150 g/m<sup>2</sup>a. Pro stěny na bázi dřeva je požadavek dále zmírněn na 100 g/m<sup>2</sup>a. [21] [22]

### Ochrana dřeva

Základním předpisem pro ochranu dřeva je norma DIN 68800-2, která definuje celkem 6 tříd použití GK. Zařazení do třídy GK se řídí jako dle českých norem vlhkostní zátěží a rozlišuje se dřevo trvale suché, příležitostně, často nebo trvale vlhké. [18]

- *Třída použití GK0 – konstrukce s trvalou vlhkostí dřeva do 20 % (85 % RH); bez ohrožení houbami a dřevokazným hmyzem*
- *Třída použití GK1 – konstrukce s trvalou vlhkostí dřeva do 20 % (85 % RH); ohrožení dřevokazným hmyzem*
- *Třída použití GK2 – konstrukce s občasnou vlhkostí dřeva nad 20 % (přes 85 % RH); ohrožení houbami a dřevokazným hmyzem*
- *Třída použití GK3 – konstrukce vystavené povětrnostním podmínkám s vlhkostí dřeva nad 20 % (přes 85 % RH); ohrožení houbami a dřevokazným hmyzem; dále děleno na GK3.1 – bez akumulace vody a GK3.2 – možná akumulace vody*
- *Třída použití GK4 – konstrukce s trvalou vlhkostí dřeva nad 20 % (85 % RH), v kontaktu se zeminou nebo sladkou vodou; ohrožení houbami, hnilobou a dřevokazným hmyzem*

- Třída použití GK5 – konstrukce s trvalou vlhkostí dřeva nad 20 % (85 % RH), v kontaktu se slanou vodou; ohrožení houbami, hnilobou a dřevokazným hmyzem



obrázek 3.2.1 - řazení konstrukce do tříd použití [18]

Filozofie stojí na upřednostnění konstrukčních opatření a doložení nutnosti užití chemického opatření. Cílem je tak návrh na GK0, kdy není nutné užití biocidních prostředků na ochranu. Konstrukce zařazená do GK0 musí splnit základní konstrukční opatření, které nařizují maximální vlhkost dřeva při zabudování 20 % (výrobky na bázi dřeva 17 %), dále se týkají ochrany dřeva proti vlhkosti a srážkám. Maximální vlhkost dřeva v konstrukci by však měla být podle DIN 18334 18 % z důvodu nepříznivých účinků smršťování, u masivních 15 ± 3 % kvůli snížené kapacitě vysychání. [18] [23]

V případě prvotního zařazení do tříd GK1–GK3.1 norma předepisuje speciální konstrukční opatření pro následné přeřazení do GK0. Mezi tato opatření se řadí například výpočetní průkaz zajištění požadavků ochrany proti kondenzaci, použití technicky vysušeného dřeva, použití hoblovaného dřeva, zajištění dostatečného větrání v dřevěné konstrukci, zajištění odtoku vody od konstrukce, návrh konstrukční bariéry proti vniku vody. [18] [23]

### 3.3 Rakousko

#### Vlhkostní bezpečnost konstrukce

Rakouskou normou s požadavky na vlhkostní bezpečnost je ÖNORM B 8110-2 [24] a základní princip v navrhování konstrukcí je velmi podobný s německou DIN 4108-3:

- Opět platí, že vzniklý kondenzát nesmí ohrozit životnost konstrukce (ekvivalent  $M_c = 0$  [kg/m<sup>2</sup>a]).
- Veškerá zkondenzovaná voda musí být v letním období odpařena (ekvivalent  $M_c \leq M_{c,N}$  [kg/m<sup>2</sup>a]).

- *Maximální množství kondenzátu v konstrukci je  $0,5 \text{ kg/m}^2$ , v případě zabudovaných vrstev bez absorpčních a kapilárních vlastností (např. folie); jako v DIN 4108-3 lze chápat jako celkové aktuální množství.*
- *Zvýšení vlhkosti v konstrukci nesmí snížit její tepelně izolační schopnost o více než 10 %, respektive nesmí v zimním období dojít ke zvýšení průměrného tepelného toku o více než 10 %.*
- *V dřevěné konstrukci a v konstrukci na bázi dřeva je maximální množství kondenzátu omezeno hodnotou rovné hmotnostní vlhkosti  $\Delta u_m = 3 \%$ .*

Ochrana proti kondenzaci se prokazuje shodným postupem jako je uvedeno v DIN 4108-3, dále v ÖNORM EN ISO 13788. V normě ÖNORM B 8110-2:2020 je nově zaveden pojem modifikovaná Glaserova metoda, zahrnující transport vlhkosti prouděním. [25]

Dle ÖNORM B 8110-2 by maximální hmotnostní vlhkost masivního dřeva a výrobků z masivního neměla překročit 20 % (v 1. roce 22 %), zatímco pro výrobky na bázi dřeva platí přísnější limit 18 %. [25]

Obdobně jako v Německu je nutné v souladu s normou ÖNORM B 8110-2 prokázat vlhkovou rezervu  $250 \text{ g/m}^2\text{a}$ . Důvod je opět možný transport vlhkosti konvekci, případně možná zvýšená počáteční vlhkost. Požadavek se vztahuje na konstrukce z biogenních materiálů (např. dřevěná rámová konstrukce) z obou stran uzavřené vrstvami o minimální ekvivalentní difúzní tloušťce  $0,5\text{m}$ . [25]

### 3.4 Švýcarsko

#### Vlhkostní bezpečnost konstrukce

Pro doplnění jsou stručně uvedeny požadavky ohledně vlhkovou bezpečnosti, popsané v SIA 180 [26]. Princip je opět velmi podobný jako v ostatních německy mluvících zemích:

- *Kondenzát nesmí ohrozit životnost konstrukce (ekvivalent  $M_c = 0 \text{ [kg/m}^2\text{a]}$ )*
- *Veškerá zkondenzovaná voda musí být na konci léta odpařena (ekvivalent  $M_c \leq M_{c,N} \text{ [kg/m}^2\text{a]}$ )*
- *Maximální vlhkovou limit v konstrukci je  $0,8 \text{ kg/m}^2$  v případě porézních materiálů*
- *Množství kondenzátu musí odpovídat maximálně 1 % objemu tepelněizolační vrstvy*
- *V dřevěné konstrukci a v konstrukci na bázi dřeva je maximální množství kondenzátu omezeno hodnotou rovné hmotnostní vlhkosti  $\Delta u_m = 3 \%$*

Dle normy je limit maximální hmotnostní vlhkosti dřeva shodný s ÖNORM B 8110-2, tedy 20 % hmotnostní vlhkosti.

V otázce vlhkovou bezpečnosti lze opět postupovat pomocí EN ISO 13788. Případně podle SIA 180 se shodným postupem, ale odlišnými klimatickými údaji (Jenischovými) - výsledky však bývají méně realistické kvůli vyšším průměrným měsíčním teplotám ve venkovním prostředí. Oproti ostatním normám pouze v normě SIA 180 je poznámka, že Glaserova metoda není určena k výpočtu skutečné

vlhkosti v konstrukci, ale je pouze metodou pro odhad akumulace vlhkosti ve skladbě. [27]

### 3.5 Porovnání vlhkostních limitů

Přehled požadavků z hlediska vlhkostní bezpečnosti uvnitř konstrukce:

Norma	ČSN 73 0540-2	DIN 4108- 3	ÖNORM B 8110-2	SIA 180
Kondenzát na konci letního období	Bez kond.	Bez kond.	Bez kond.	Bez kond.
Kondenzát dle $\Delta u_m$ – dřevo	-	$\leq 5 \%$	$\leq 3 \%$	$\leq 3 \%$
Kondenzát dle $\Delta u_m$ – na bázi dřeva	-	$\leq 3 \%$	$\leq 3 \%$	$\leq 3 \%$
Kondenzát u vrstvy bez absorpční schopnosti	-	$\leq 0,5$ kg/m <sup>2</sup>	$\leq 0,5$ kg/m <sup>2</sup>	-
Snížení tepelně izolační schopnosti	-	-	$\leq 10 \%$	-
Kondenzát dle V [%] TI vrstvy	-	-	-	$\leq 1 \%$
Kondenzát u porézních materiálů	-	-	-	$\leq 0,8$ kg/m <sup>2</sup>
Kondenzát obecně v konstrukci	$\leq 0,5$ kg/m <sup>2</sup> a	$\leq 1,0$ kg/m <sup>2</sup>	-	-
Kondenzát v 1pl. střeších/se zabudovaným dřevem/s vnější TI	$\leq 0,1$ kg/m <sup>2</sup> a	-	-	-
Kondenzát ohrožující funkci	$M_c = 0$	-	-	-
Hm. vlhkost dřeva (obecně)	$\leq 18 \%$	$\leq 18 \%$	$\leq 20 \%$	$\leq 20 \%$

Tabulka 3.5.1 - porovnání vlhkostních limitů



## 4 Experimentální vzorek

Příprava podkladů pro realizaci probíhala v srpnu 2023. Realizace vzorku proběhla na testovací hale UCEEB v období 6.9. - 25.9. 2023.

### 4.1 Zkušební zařízení

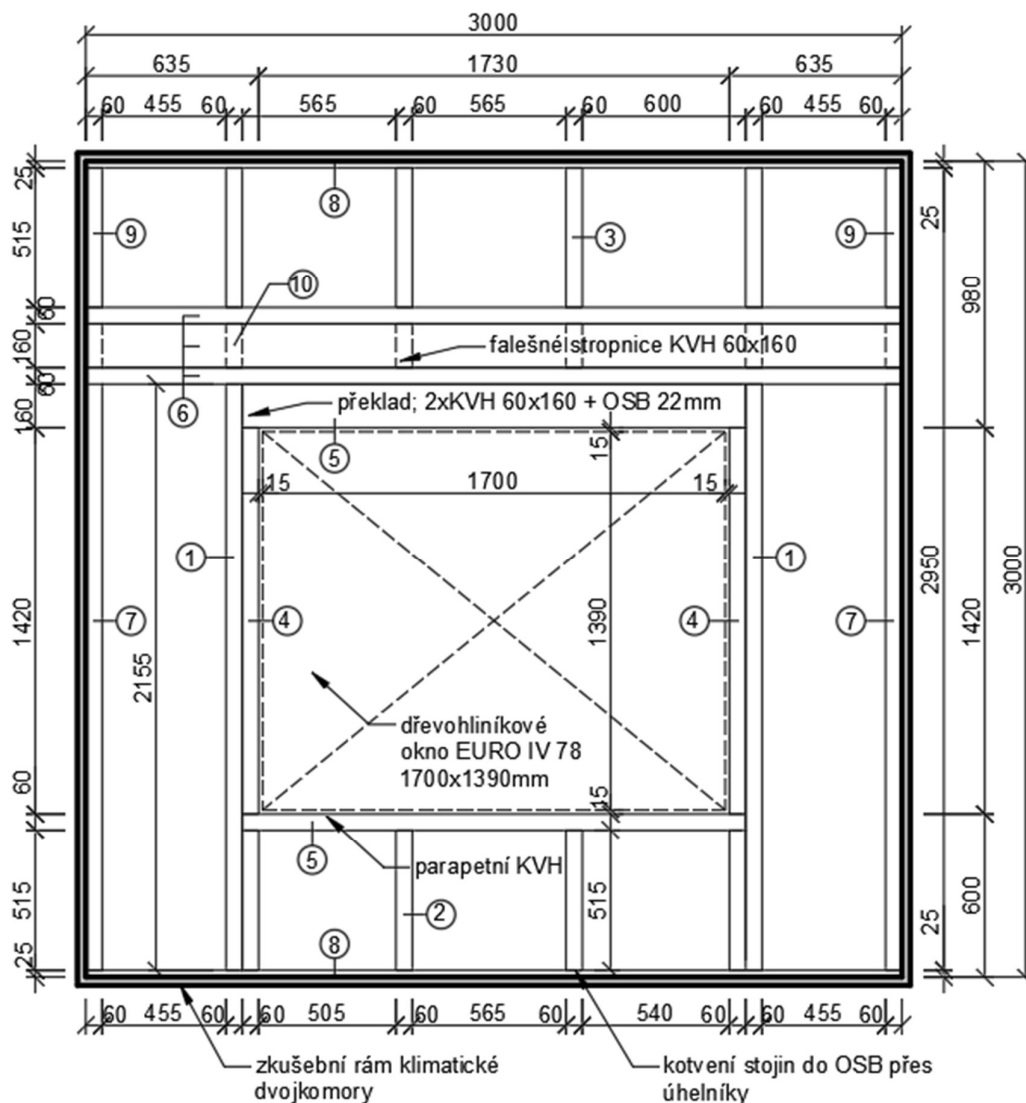
Experimentální vzorek byl testován ve velké klimatické dvojkomoře Viessmann na testovací hale UCEEB. Zařízení je vhodné pro měření chování konstrukcí v měřítku 1:1. Venkovní a vnitřní komora umožní přesnou regulaci teploty, RH a tlakového rozdílu.



obrázek 4.1.1 - klimatická dvojkomora

### 4.2 Parametry vzorku

Vzorek je vestavěn do zkušebního rámu 3x3 m. Jedná se o výsek typické části obvodového pláště dřevostavby se zabudovaným oknem a provedeným detailem v místě uložení stropnic. Konstrukčně jde o rámovou dřevostavbu (2x4 systém) se stojkami v osové vzdálenosti 625 mm. Skladba je difúzně otevřená, hlavní vzduchotěsná vrstva (HVV) je z OSB desek na vnitřní straně, tepelně izolační výplň je z minerální vaty. Vnější izolace je z tuhé dřevovláknité desky primárně určené pro fasádní omítkové systémy, vzorek je ovšem připraven na instalaci vnějšího obkladu s provětrávanou dutinou (nebyl realizován). Vnitřní instalační předstěna nebyla provedena. Součástí vzorku není vnitřní a vnější parapet. Okno je realizované standartní montáží v ostění. Provedení překlady z vnější strany simuluje přípravu na žaluziový box. Vzorek svou konstrukcí a použitými materiály z velké části reprezentuje běžnou stavební praxi v ČR v oblasti dřevostaveb [28]. Samotný technologický postup neodpovídá v plné míře skutečné realizaci, ale je uzpůsoben podmínkám experimentu.



obrázek 4.2.1 - výkres experimentálního vzorku

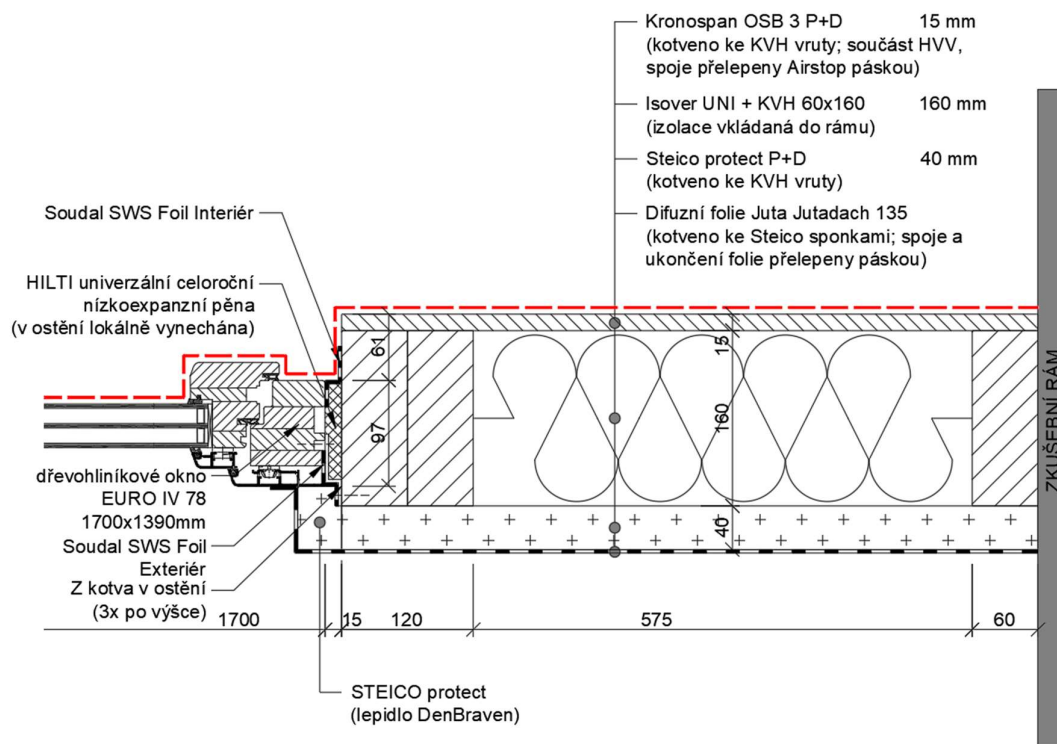
### Materiály pro nosnou rámovou konstrukci

- Kostra nosné rámové konstrukce: KVH fošny 60x160 mm
- Vnitřní opláštění (tuhost stěny, součást HVV): Kronospan OSB 3 P+D 15 mm
- Tepelně izolační výplň rámu: Isover Uni 160 mm
- Vnější izolační deska: Steico Protect P+D 40 mm / Steico Universal P+D 35 mm
- Ostatní izolace: Knauf Akustik Board 100 mm / XPS deska 10 mm
- Vnější difúzní folie: difúzně propustná folie Jutadach 135
- Těsnící pásky / folie: Airstop páska / Gaffa páska (černá)
- Tmely: butylenový tmel / akrylový tmel
- Spojovací prostředky: úhelníky, vruty (rozměry dle konkrétního spoje)

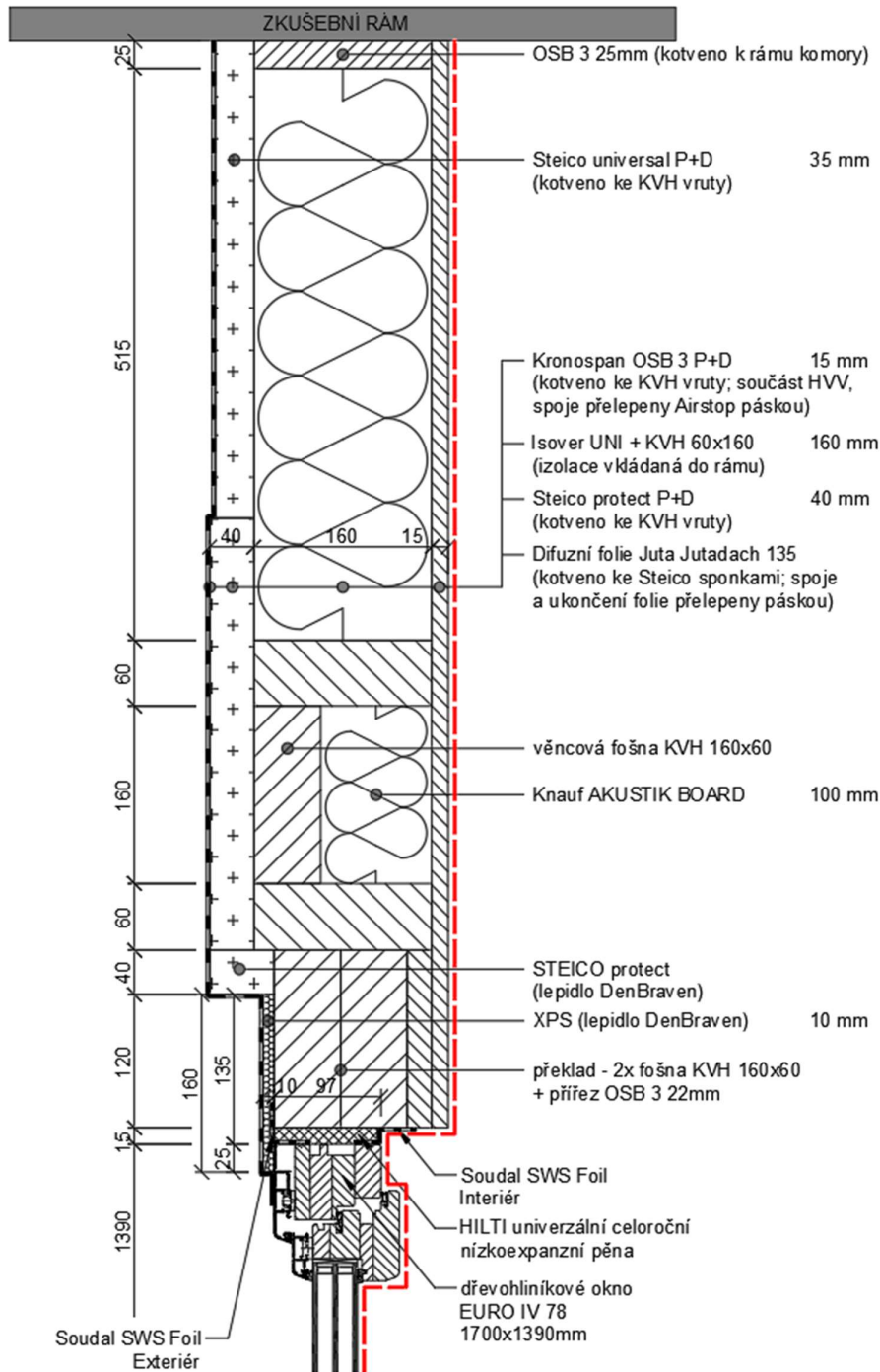
## Materiály pro detail okna

Okno pro experimentální vzorek bylo zvoleno tak, aby dostatečně reprezentovalo běžně používané výrobky. Vybraný výrobek je dřevěné okno EURO IV 78 mm s hliníkovým exteriérovým rámečkem o rozměrech 1700x1390 mm se dvěma okenními křídly. Doplnující materiály pro montáž okna jsou následující:

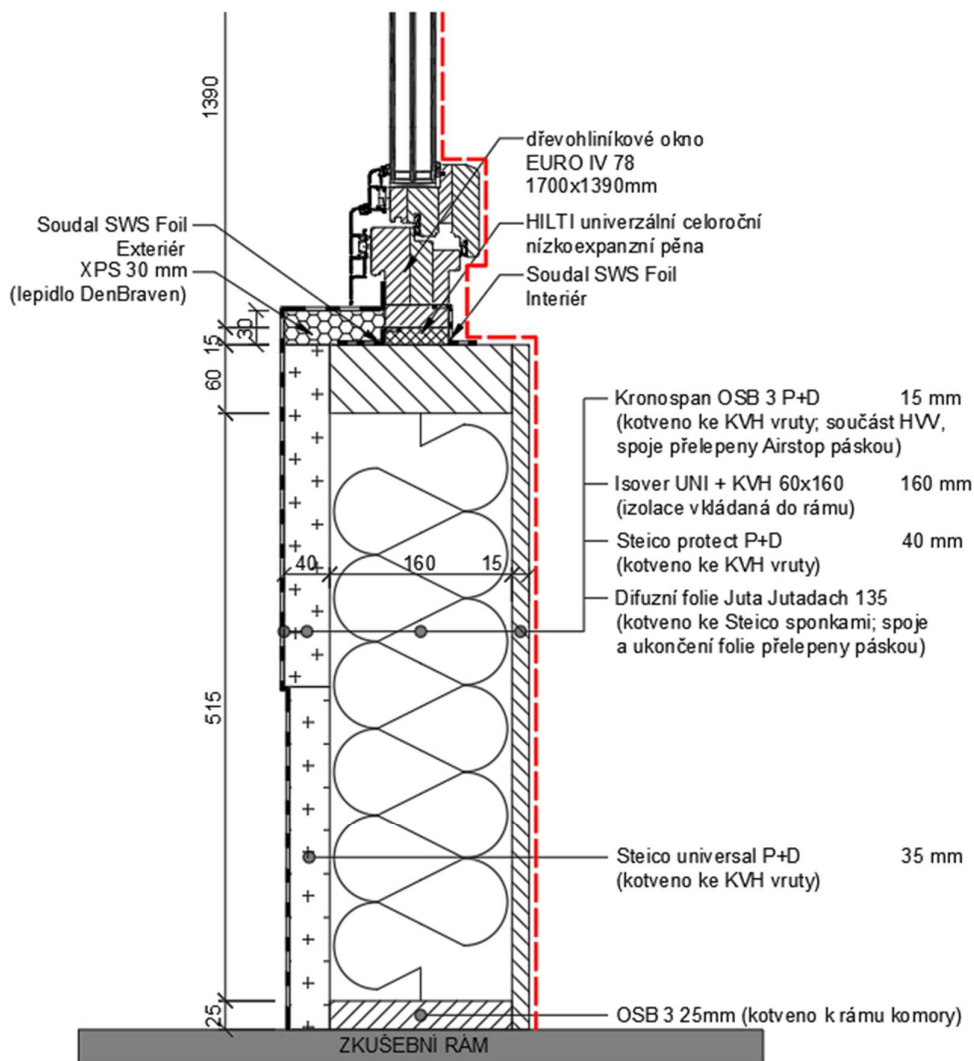
- Kotvicí prvky: pásová Z kotva
- Nosné podložky: výřez z OSB desek tl. 15 mm
- Vnitřní uzávěr: Soudal SWS Foil Interiér 70 mm / illbruck ME500 70 mm
- Vnější uzávěr: Soudal SWS Foil Exteriér 70 mm / illbruck ME500 70 mm
- Tepelněizolační výplň spáry: HILTI univerzální celoroční pěna nízkoexpanzní
- Tmely: butylenový tmel
- Spojovací prostředky: vruty (rozměry dle konkrétního spoje)



obrázek 4.2.2 - detail ostění



obrázek 4.2.3 - detail nadpraží



obrázek 4.2.4 - detail parapetu

### Rozdílné provedení připojovací spáry

V připojovací spáře byly navrženy folie dvou výrobců – od firmy Soudal (SWS Foil Interiér/Exteriér), dále na výseku 400 mm v oblasti parapetu folie illbruck ME500 s deklarovaným použitím pro interiér a exteriér. Dále se na vzorku realizovaly dvě dutiny bez PUR pěny s rozdílnou výškou – 300 mm a 150 mm v ostění. Detailní popis spolu s umístěním čidel viz kap. 5.3.2.

## 4.3 Realizace

### Geometrické požadavky na zabudování okna

Doporučená šířka připojovací spáry je pro otvory do rozměru 3,0 m stanovena na 15 mm při použití rámového profilu okna na bázi dřeva a kovu. Použité okno má rozměry 1700x1390 mm, otvor musí mít tedy rozměry 1730x1420 mm. Mezní odchylky rozměrů otvoru jsou při daných rozměrech okna 10 mm. Při montáži překladu je nutné dále kontrolovat pravoúhlost otvoru pomocí měření uhlopříček (např. pomocí provázku), tolerance je 8 mm. Vzdálenost kotev pro dřevěná okna je stanovena na max. 800 mm a 150 mm od vnitřního rohu rámu okna. Nosné podložky v připojovací spáře je doporučeno umístit ve vzdálenosti po 300 mm. [1]

### Příprava

Prostor montáže byl vyznačen a ohraničen pro minimalizaci rizika úrazu. Před samotnou realizací vzorku se vyčistily a odmastily vnitřní plochy zkušebního rámu, dále i rám a křídla okna. Na zkušební rám byly nalepena žlutá páska v pruzích kvůli těsnění tmelem a pro vytyčení polohy nosné konstrukce vzorku, která byla realizována na osu hloubky rámu.

### Nosná rámová konstrukce

KVH fošny a OSB desky byly nařezány na stolní pile dle potřebných rozměrů. Spoje byly realizovány na sraz s vruty, nebo s kovovými úhelníky. Vzhledem k tomu, že zkušební vzorek nebyl silově namáhaný, bylo použito minimum spojovacích prostředků kvůli usnadnění následné demontáže.

- a) V první fázi se zhotovilo obvodové orámování. Ke spodní části zkušebního rámu byly připevněny OSB desky tl. 25 mm o šířce 160 mm (8) přes vruty na osu rámu. Ke svislým plochám rámu se připevnily KVH fošny (7) do výškové úrovně uložení stropnice (2155 mm).
- b) Následně se provedl rastr konstrukce v oblasti okenního otvoru navrženého symetricky na svislou osu zkušebního rámu. Do konstrukce se připevnily dvě KVH stojky délky 2155 mm (1) pomocí vrtů a úhelníků do OSB desek. Konstrukce pod parapetem vychází z rastru 625 mm (2+5). Překlad se zhotovil ze dvou KVH fošen (5) a OSB desky tl. 22 mm orientovaných na výšku. Překlad a parapet se podepřely zdvojením stojek (4) v oblasti ostění tak, aby se zatížení přenášelo tlakem, nikoli stříhem přes spojovací prostředky.
- c) Konstrukce v oblasti uložení stropu se zhotovila z věncové fošny připevněné na výšku (6), dále z „falešných stropnic“ - zkrácené KVH fošny na délku 100 mm (10) a ze základové fošny (6) pro konstrukci následujícího podlaží. Zbýlý prostor k horní hraně zkušebního rámu byl opět doplněn stojkami v rastru 625 mm (3+9) a OSB deskami tl. 25 mm přivrutovanými ke zkušebnímu rámu (8).
- d) Z pohledu interiéru se zrealizovalo opláštění z desek Kronospan OSB 3 15 mm na pero a drážku. Před zakrytím oblasti stropnic se umístila dvě čidla (kap. 5.3.2) a prostor byl vyplněn izolací Knauf Akustik Board. Hrana se stykem OSB desek a KVH fošen v oblasti ostění byla před montáží okna přelepena Airstop páskou.

Průběžně se kontrolovaly požadavky na geometrickou přesnost dle [1].



obrázek 4.3.1 - realizace rámu a) a b)



obrázek 4.3.2 - realizace rámu c)



obrázek 4.3.3 - realizace rámu d)



obrázek 4.3.4 - detail překladu

## Montáž okna

- a) Rám okna se před montáží odmastil a očistil. Na rám se zespod nalepila vnitřní parotěsná folie s přesahem v rozích, následně se k povrchu přitlačila válečkem. V konkrétním případě daném geometrií se na rám stejným způsobem aplikovala i vnější paropropustná folie. Současně se k rámu připevnila čidla dle kap. 5.3.2.
- b) Následně se na rám vruty připevnily předem ohnuté Z kotvy (celkem 6 kotev) po vzdálenosti 500 mm v místě ostění. V místě parapetu a překladu se kotvy nenacházejí, je to tedy vědomý odklon od normy [1]. Ještě před umístěním otvoru byly zespod k rámu připevněny nosné podložky po 300 mm u parapetu, dále dvě diagonálně v ostění.
- c) Rám okna byl bez křídel osazen do otvoru. Poloha v konstrukci je patrná z detailů, okno lícuje z exteriérové strany s hranou překladu. Pro rovinnost se připojovací spára vyklínkovala a kotvy se přivrutovaly k rámu. Klínky bylo nutné poté bezprostředně odstranit. Následně byla ke KVH přilepena parotěsná folie a válečkem přitlačena.
- d) Z exteriéru se připojovací spára navlhčila a vyplnila nízkoexpanzní PUR pěnou ve dvou pruzích. Ihned po vypěnění se nasadila okenní křídla. Následně se spára uzavřela paropropustnou vnější folií.



obrázek 4.3.5 - přitlačení folie válečkem a)



obrázek 4.3.6 - přesah v rozích a)





obrázek 4.3.7 - detail s kotvou, illbruck folií, nosnou podložkou; dále detail aplikace Airstop pásky b) a c)



obrázek 4.3.8 - pohled na připevněné okno s nalepenou vnitřní folií c)



obrázek 4.3.9 - vypěnění spáry s vytvořenou dutinou (měřeno čidlem) d)



obrázek 4.3.10 - detail nalepené vnější folie

## Izolace, těsnění, detaily

- a) Paralelně s montáží okna se provádělo vyplnění rámu konstrukce z exteriérové strany izolací Isover Uni 160 mm, dále se konstrukce zaklápěla dřevovláknitými deskami Steico Protect P+D 40 mm a Steico Universal P+D 35 mm. Umístění desek a sparořezu je patrné z obrázků. Z desky Steico Protect bylo zhotoveno i vnější ostění tak, aby izolace vytvářela přesah rámu okna 25 mm. Desky byly připevněny ke KVH vruty
- b) V místě vnějšího parapetu se přilepila XPS deska tl. 30 mm a v místě žaluziového boxu XPS deska tl. 10 mm.
- c) Spáry OSB desek se přelepovaly postupně Gaffa/Airstop páskou podle konfigurace měření vzduchotěsnosti dle kap. 5.1.2. Veškeré vnitřní netěsnosti v oblasti parotěsné folie, dále v místech prostupu kabelu bylo nutné utěsnit butylenovým tmelem nebo plastickou hmotou. Styk OSB desek a zkušebního rámu se přetmelil akrylovým tmelem.
- d) Na vnější dřevovláknité desky se přisponkovala difuzní folie Jutadach 135 tak, aby výše umístěný díl folie překrýval spodní. K rámu okna byla folie přilepena páskou.



obrázek 4.3.11 - rám vyplněný izolací Isover a)



obrázek 4.3.12 - rám zaklopený izolací Steico a)



obrázek 4.3.13 - detail ostění se Steico a)



obrázek 4.3.14 - nalepení XPS b)



obrázek 4.3.15 - detail parapetu s přitížením b)



obrázek 4.3.16 - difuzní folie d)



## 5 Měření

### 5.1 Průvzdušnost experimentálního vzorku

#### 5.1.1 Úvod

V případě experimentálního vzorku je hlavním cílem měření jeho tepelně vlhkostního chování. Pro získání vhodných a relevantních dat ze senzorů a možnost následného porovnání s numerickými modely je nezbytné, aby transport tepla a vlhkosti proběhl předvídatelně. Teplo se tedy musí šířit vedením a vlhkost difuzí. Tento požadavek je hlavní motivací, proč se zabývat měřením průvzdušnosti.

#### Význam vzduchotěsnosti

Vzduchotěsnost obvodového pláště moderní budovy hraje významnou roli pro snížení tepelných ztrát a zajištění vlhkostní bezpečnosti, a tedy životnosti konstrukce. Netěsnosti v obálce budovy způsobí šíření tepla prouděním a v důsledku způsobí zvýšenou potřebu tepla na vytápění spojenou s vyššími provozními náklady. Na druhé straně netěsnosti spolu s proudícím vzduchem transportují vodní páru, jejíž množství je násobně vyšší než v případě šíření vodní páry difuzí. Neplánované zvýšené množství vodní páry v konstrukci ji nadměrně zatěžuje a proudící vzduch způsobující ochlazení v konstrukci vytváří podmínky pro kondenzaci. [29]

#### Rovnice netěsnosti

Pro vyvolání proudění vzduchu skrz netěsnosti v obálce budovy je nutný rozdílný tlak vzduchu mezi vnitřním prostředím budovy a vnějším. Tlakový rozdíl může být způsobený rozdílem teplot, působením větru, dále tlakovým rozdílem vyvolaným větracím systémem budovy, v praxi se jedná o kombinaci vlivů. Závislost proudění vzduchu na tlakovém rozdílu popisuje rovnice netěsnosti:

$$\dot{V} = C * \Delta p^n \quad (1)$$

kde:  $\dot{V}$      objemový tok vzduchu [ $m^3/h$ ]

$C$      součinitel proudění [ $m^3/(h*Pa^n)$ ]

$\Delta p$     tlakový rozdíl [ $Pa$ ]

$n$      exponent proudění (udává charakter proudění) [-]

Hodnoty  $C$  a  $n$  lze zjistit při experimentálním měření. Změřené hodnoty objemových toků při vyvolaném přetlaku se obvykle vynášejí v logaritmickém měřítku. Parametr  $n$  odpovídá směrnici přímky proložené body a parametr  $C$  je průsečík přímky s osou  $y$ . Další možností je metoda lineární regrese popsaná v ČSN EN 12114 *Tepelné chování budov – Stanovení průvzdušnosti stavebních dílců a prvků – Laboratorní zkušební metoda* [31]. [30]

## Požadavky na vzduchotěsnost

Požadavky v oblasti vzduchotěsnosti upravuje ČSN 73 0540-2 v kapitole 7.1 Průvzdušnost [11]. Tu lze chápat jako schopnost propouštět vzduch (synonymum pro obecný pojem vzduchotěsnost). Základní filozofií normy je trvalé zamezení netěsností v obvodovém plášti budovy s výjimkou funkčních spár výplní. Průvzdušnost obálky budovy se zjistí experimentálně pomocí celkové intenzity výměny vzduchu  $n_{50}$  při tlakovém rozdílu 50 Pa [ $h^{-1}$ ]. Je doporučeno, aby získaná hodnota byla menší nebo rovna doporučeným hodnotám  $n_{50,N}$  uvedených v normě:

$$n_{50} \leq n_{50,N} \quad (2)$$

Hodnoty  $n_{50,N}$  jsou rozdílné dle způsobu větrání v budově, dále se dělí do dvou úrovní - I (doporučené splnit vždy) a přísnější II (doporučené splnit přednostně). Doporučená hodnota  $n_{50,N}$  je pro pasivní budovy s nuceným větráním se zpětným získáváním tepla  $0,6 h^{-1}$  (úroveň I) a  $0,4 h^{-1}$  (úroveň II).

Nově upravené znění ČSN 73 0540-2:2023 [32] splnění podmínky maximální intenzity výměny vzduchu přímo požaduje. Změnou je upravená definice hodnoty  $n_{50,RQ}$  nově zohledňující vliv plochy obálky budovy ku jejímu vnitřnímu objemu:

$$n_{50} \leq n_{50,RQ} \quad (3)$$

$$n_{50,RQ} = \frac{A_E}{V} * q_{E50,RQ} \quad (4)$$

kde:  $n_{50,RQ}$             *objemový tok požadovaná hodnota intenzity výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa [ $h^{-1}$ ]*

$A_E$                     *plocha obálky budovy [ $m^2$ ]*

$V$                       *objem budovy [ $m^3$ ]*

$q_{E50,RQ}$             *požadovaná hodnota průvzdušnosti obálkou budovy dle tabulky [ $m^3/(h*m^2)$ ]*

Dle předchozího znění bylo nutné splnit jednotné požadavky  $n_{50,N}$  dle tabulky bez ohledu na geometrii objektu, proto objekty s komplikovaným tvarem musely vykazovat nižší průvzdušnost na jednotku plochy obálky. Nově pro tento typ objektů vychází požadovaná hodnota  $n_{50,RQ}$  nižší. Pro budovy s vnitřním objemem do  $1500 m^3$  lze podíl  $A_E/V$  uvažovat jako jedna. Hodnota  $q_{E50}$  je pro pasivní budovy s nuceným větráním se zpětným získáváním tepla shodná jako v předchozí verzi normy u  $n_{50,N} = 0,6 m^3/(h*m^2)$  ( $q_{E50,RQ}$  = požadovaná hodnota) a  $0,4 m^3/(h*m^2)$  ( $q_{E50,REC}$  = doporučená hodnota). U typické dřevostavby velikosti rodinného domu tedy upravená norma požadované hodnoty nemění.

## Měření průvzdušnosti v praxi

Nejrozšířenější způsob měření průvzdušnosti obálky budovy, případně její části, je tlaková metoda (tzv. blower door test), popsaná v normě ČSN EN ISO 9972 [33]. Metoda je založená na měření objemového průtoku vzduchu za hodinu [ $\text{m}^3/\text{h}$ ] obálkou budovy při vyvolaném tlakovém rozdílu, intenzita výměny vzduchu se tedy přímo neměří, ale lze ji dopočítat. Zmíněný tlakový rozdíl je vytvořen externím ventilátorem s proměnnými otáčkami obvykle umístěný do otvoru v obálce budovy (typicky dveře). Zbýlý prostor otvoru vyplní vzduchotěsná plachta zajištěná teleskopickým rámem. [30]



obrázek 5.1.1 - zařízení pro blower door test (zdroj: archiv autora)

### 5.1.2 Metody

Laboratorní zkušební metodu pro stanovení průvzdušnosti stavebních dílců a částí obvodových plášťů budov určuje norma ČSN EN 12114 [31]. Měření je v principu shodné s postupem popsaným v normě ČSN EN ISO 9972 [32], ovšem okrajové podmínky byly předem nastaveny a rozdíl tlaků byl vyvolán ventilátorem v Indoor komoře klimatické dvojkomory.

#### Zkušební vzorek a zařízení

Zkušební zařízení je popsáno v kapitole 4.1 a vzorek v kapitole 4.2. Pro účely měření průvzdušnosti vzorku je součástí Indoor komory ventilátor s proměnnými otáčkami umožňující vytvoření řízeného tlakového rozdílu. Ventilátor je řízen vlastním regulátorem otáček podle požadovaného tlaku. V komoře je dále umístěný tlakoměr a přístroj schopný měřit objemový průtok vzduchu.

## Parametry měření

Zkouška pro její časovou náročnost proběhla pouze za kladného tlakového rozdílu, tedy za přetlaku v Indoor komoře. Byla zvolena řada celkem osmi statických tlakových rozdílů - 12 Pa, 25 Pa, 38 Pa, 57 Pa, 87 Pa, 131 Pa, 200 Pa a 300 Pa (norma ČSN EN ISO 9972 vyžaduje minimálně 5 měřících bodů). Časový úsek jednoho kroku byl nastaven na 1 hodinu a frekvence zaznamenávání dat 5 sekund. Dle normy ČSN EN 12114 se teplota ve zkušební Indoor komoře smí pohybovat v rozmezí 15-30 °C a relativní vlhkost vzduchu mezi 25 % a 75 %. Outdoor komora byla při měření průvzdušnosti vypnuta a otevřena, vnější okrajové podmínky tedy odpovídaly podmínkám na hale. Podmínky během každého měření zůstaly cca neměnné:

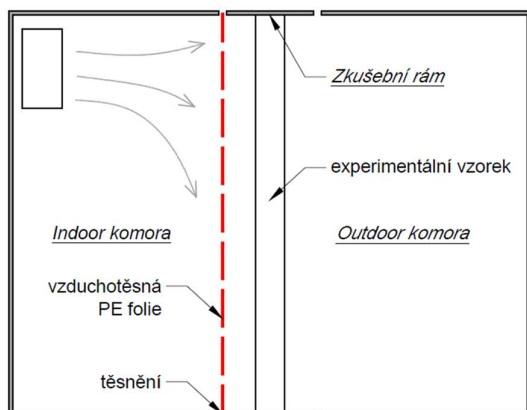
- Okrajové podmínky Indoor komora: teplota vzduchu: 25 °C  
relativní vlhkost: 42 %
- Okrajové podmínky Outdoor komora – hala: teplota vzduchu: 20 °C  
relativní vlhkost: 50 %

## Postup měření

Měření probíhalo v několika dnech v časovém rozmezí 25.09. - 06.10.2023.

Samotný postup podle normy ČSN EN 12114 závisí na těsnosti komory. Komora je považována za těsnou, pokud je zbytkový objemový tok vzduchu menší než 5 % nejnižšího objemového toku, který má být změřen. V konkrétním případě autor klimatickou dvojkomoru považoval jako netěsnou, proto měření vzorku předcházela zkouška těsnosti obálky komory (dále kalibrační měření). Z důvodu nejisté těsnosti komory byl celý experiment rozdělen na 2 měřící etapy (ET).

V první etapě se kalibrační měření provedlo 2x. Mezi Indoor komoru a zkušební rám se na úrovni těsnění přes celou plochu vložila vzduchotěsná PE folie tl. 0,1 mm zakrývající vzorek tak, aby vzduch mohl protékat pouze obálkou samotné komory (případné oděrky ve folii byly přelepeny těsnící páskou). Při zapnutí ventilátoru se folie výrazně deformovala a měla tendenci se napínat ke vzorku.



obrázek 5.1.2 - schéma 1. kalibračního měření



obrázek 5.1.3 - vzduchotěsná PE folie



Následovalo měření celkového objemového toku v rozdělených konfiguracích:

- **OSB; bez Airstop 1.ET** – okno včetně připojovací spáry po hranu ostění zakryto PE folií (folie přilepena k OSB desce Airstop páskou); OSB desky odkryté; spáry mezi deskami nepřelepeny
- **OSB; Gaffa 1.ET** – okno včetně připojovací spáry po hranu ostění zakryto PE folií (folie přilepena k OSB desce Airstop páskou); OSB desky odkryté; spáry mezi deskami přelepeny Gaffa páskou\*
- **OSB (35 % zakryto); Gaffa 1.ET** – okno včetně připojovací spáry po hranu ostění zakryto PE folií (folie přilepena k OSB desce Airstop páskou); OSB desky z části odkryté (35 % desek překryto PE folií); spáry mezi deskami přelepeny Gaffa páskou

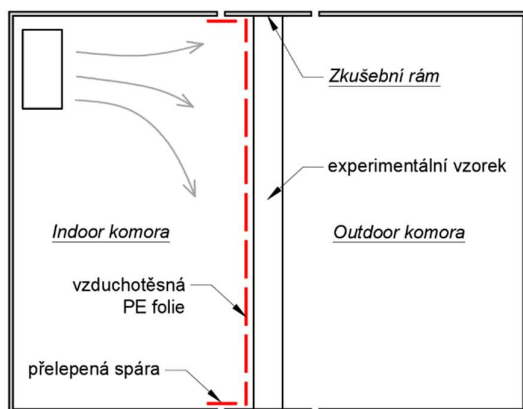


obrázek 5.1.4 - okno zakryté PE folií (1. konfigurace)

Důvodem k rozdělení měření vzorku se zakrytým oknem do více kroků bylo získat informace o příspěvku odkrytých spár mezi OSB k celkové průvzdušnosti obálky.

Výsledky prezentované v navazující kapitole 5.1.3 vedly k nejistotě správnosti provedení kalibračního měření. Proto v následující druhé etapě došlo k jeho úpravě. PE folie byla přímo přiložena ke vzorku a přilepena ke zkušebnímu rámu Airstop páskou. Odkrytá spára mezi Indoor komorou a zkušebním rámem byla přelepena Airstop páskou, která zde byla ponechána pro všechny následující kroky. Kalibrační měření proběhlo již pouze jednou.

*\*Gaffa páska je lepící PVC páska vyztužená bavlněnou tkaninou sloužící primárně pro filmový a divadelní průmysl pro přelepování např. kabelů na jevišti. V laboratořích stavební fyziky je vhodná pro její vysokou emisivitu kvůli matnému a černému povrchu. Na vzorek byla použita pro porovnání s Airstop páskou.*



obrázek 5.1.5 - schéma 2. kalibračního měření



obrázek 5.1.6 - detail přelepené spáry

Následovaly 3 měřící konfigurace:

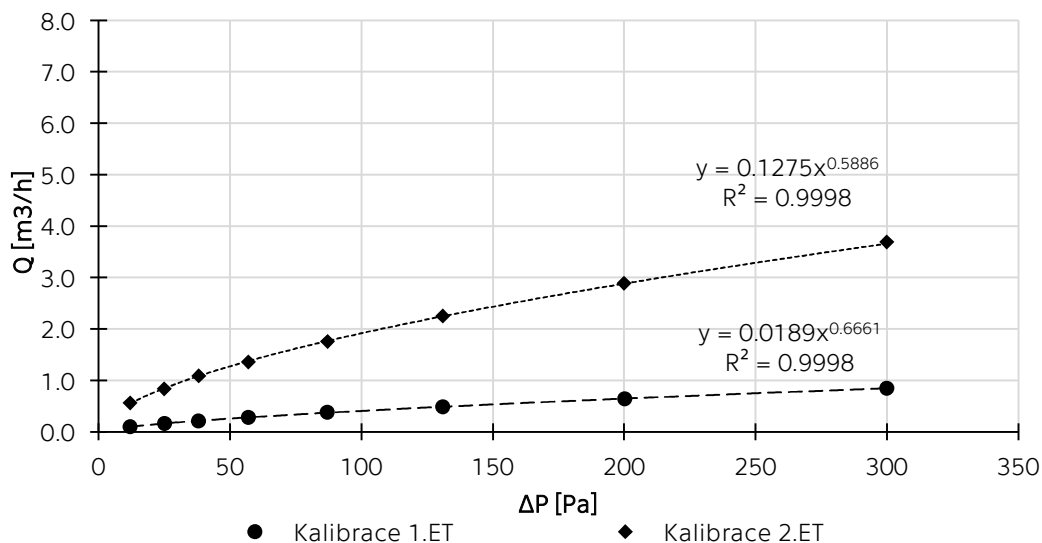
1. **OSB; bez Airstop 2.ET** – okno včetně připojovací spáry po hranu ostění zakryto PE folií (folie přilepena k OSB desce Airstop páskou); OSB desky odkryté; spáry mezi deskami nepřelepeny
2. **OSB; Airstop 2.ET** – okno včetně připojovací spáry po hranu ostění zakryto PE folií (folie přilepena k OSB desce Airstop páskou); OSB desky odkryté; spáry mezi deskami přelepeny Airstop páskou
3. **OSB; Airstop; Okno 2.ET** – okno včetně připojovací spáry po hranu ostění odkryté; OSB desky odkryté; spáry mezi deskami přelepeny Airstop páskou

### 5.1.3 Výsledky

Výsledky byly zpracovány vždy z posledních 30 minut měření daného tlakového rozdílu trvajících celkem 60 minut z důvodu ustálení objemového toku. Odečtením zjištěného zbytkového toku vzduchu od celkového se získá samotný tok procházející vzorkem, resp. částí vzorku (vždy odečteno v rámci dané etapy). Parametry rovnice netěsnosti  $C$  a  $n$  doporučuje norma ČSN EN 12114 určit metodou lineární regrese převedením rovnice do logaritmického tvaru. Při vyhodnocování této úlohy autor zvolil metodu regrese v lineárním měřítku. V programu Excel lze vytvořením spojnice trendu vyjádřit parametry  $C$  a  $n$  s určením spolehlivosti  $R^2$  (doporučeno normou ČSN EN ISO 9972 minimálně 0,98). Korekce výsledků vzhledem k referenčním podmínkám byla stanovena na  $-0,22 \text{ m}^3/\text{h}$ .

### Kalibrační měření

V případě první etapy (1.ET) byly hodnoty 2 kalibračních měření zprůměrovány.



Graf 5.1.1 - kalibrační měření

Je patrné, že při přiložení PE folie těsně ke vzorku a přelepení spáry Airstop páskou (2.ET) vykazuje plášť komory několikanásobně vyšší průvzdušnost, než v případě vložení PE folie na úroveň těsnění (1.ET). Rozdíl je dále patrný v následující tabulce:

tlak.rozdíl [Pa]	12	25	38	57	87	131	200	300	C [-]	n [-]
<b>1.ET</b> [m3/h]	0.10	0.16	0.21	0.28	0.38	0.48	0.64	0.85	0,19	0.67
<b>2.ET</b> [m3/h]	0.56	0.83	1.09	1.36	1.75	2.25	2.89	3.69	0.13	0.59
<b>rozdíl</b> [%]	465	410	422	385	364	364	351	335	-	-

Tabulka 5.1.1 - výsledky kalibračního měření

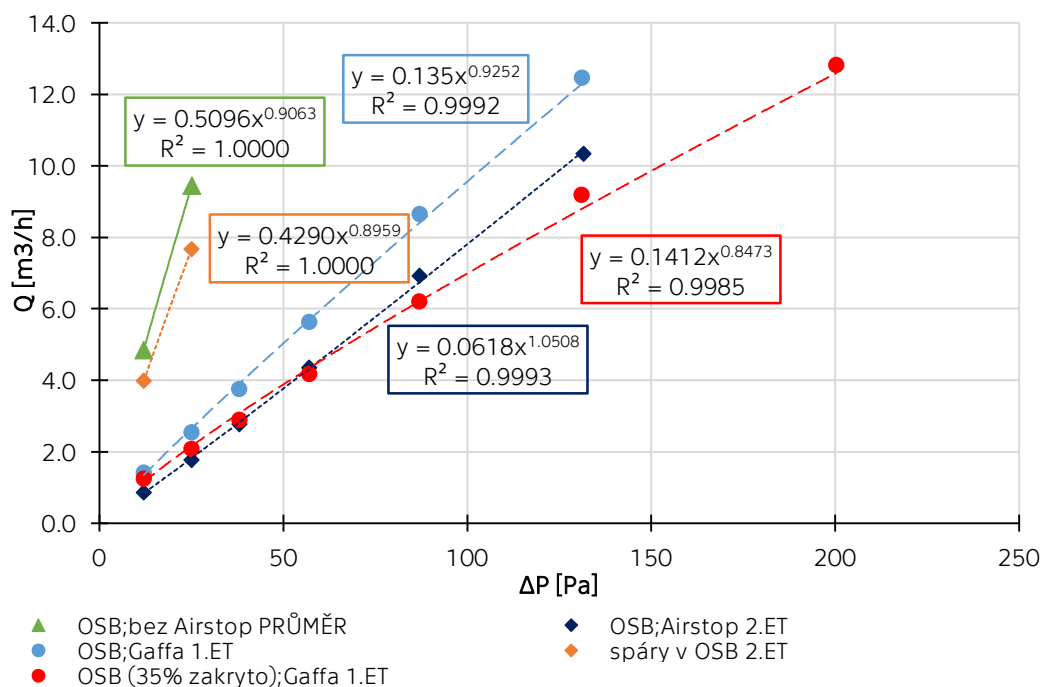
Podle normy ČSN EN 12114 nesmí být průvzdušnost zkušební komory vyšší než 30 % celkové průvzdušnosti zkušební komory a vzorku. V případě měření se zahrnutým oknem **OSB; Airstop; Okno 2.ET** tento limit není splněn pro přetlak 12 Pa, kdy je podíl roven 31,9 %.

## Vzorek

Měření vzorku bylo limitováno objemovým průtokem vzduchu komory 10 m<sup>3</sup>/h. Z toho důvodu nebylo možné pro vzorek v méně těsných konfiguracích měřit objemové průtoky při vyšších tlakových rozdílech. V těchto případech hodnoty posledního kroku měření odpovídají maximálnímu průtoku a tomu příslušnému tlakovému rozdílu (hodnota tlakového rozdílu byla tedy rozdílná od nastavené hodnoty dle řady tlakových rozdílů popsané v kap. 5.1.2). Poslední bod byl tedy metodou regrese přepočítán na nejbližší vyšší hodnotu přetlaku dle řady, pro možnost vzájemného porovnání výsledků. Nejnížší počet jsou 2 měřící body zaznamenány ve 2 konfiguracích.

## Konfigurace se zakrytým oknem

V následujícím grafu jsou porovnány výsledky měření pro plochu OSB desky se zakrytým oknem v různých konfiguracích (výsledky jsou odečteny od kalibrace):



Graf 5.1.2 - konfigurace se zakrytým oknem

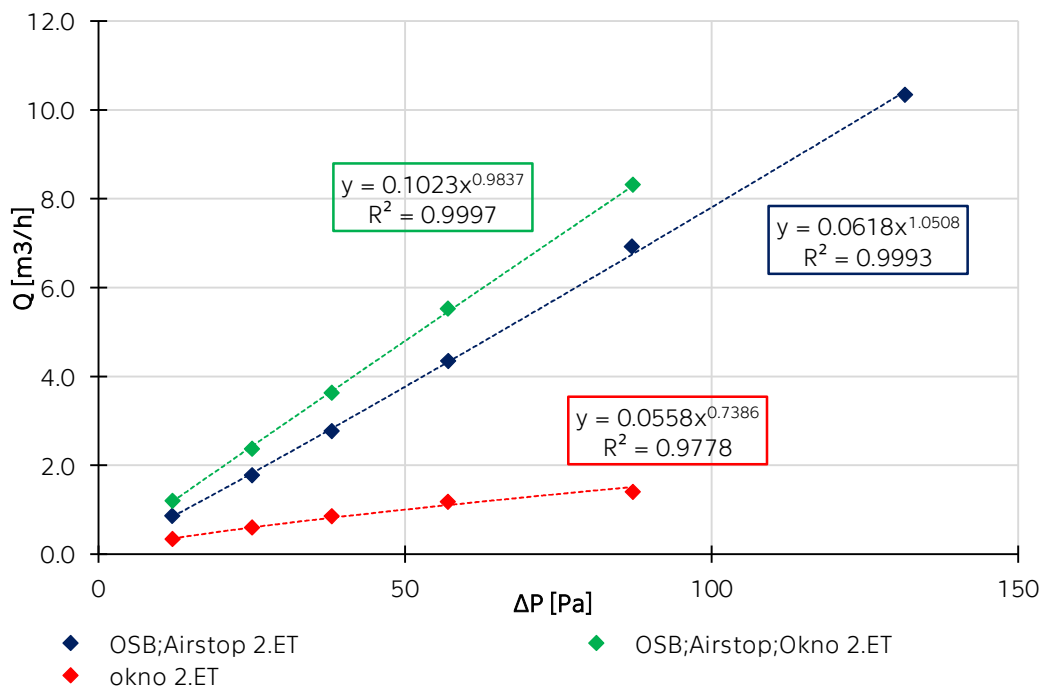
Hodnoty **OSB; bez Airstop 1.ET** a **OSB; bez Airstop 2.ET** byly zprůměrovány. V porovnání s **OSB; Airstop 2.ET** je patrný výrazný pokles průvzdušnosti po aplikaci Airstop pásky (přes 80 % v naměřených bodech). Celkovou průvzdušnost konfigurace s **OSB; Airstop 2.ET** lze vzhledem k vysoké kvalitě Airstop pásky vztáhnout pouze k samotným OSB deskám. Nezanedbatelný rozdíl je při porovnání aplikace Airstop pásky a Gaffa pásky, kde Gaffa zajistí pokles pouze přes 70 % v naměřených bodech. Zakrytí 35 % plochy OSB desek (65 % plochy odkryto) způsobí celkový pokles průvzdušnosti v průměru o 24 %.

tlak. rozdíl [Pa]		12	25	38	57	87	131	200	300	C [-]	n [-]
OSB;bez Airstop PRŮM.	[m3/h]	4.85	9.45	-	-	-	-	-	-	0.51	0.91
OSB;Airstop 2.ET	[m3/h]	0.86	1.77	2.77	4.35	6.92	10.34	-	-	0.062	1.05
pokles Airstop	[%]	-82	-81	-	-	-	-	-	-	-	-
OSB;Gaffa 1.ET	[m3/h]	1.41	2.54	3.76	5.63	8.65	12.47	-	-	0.14	0.93
pokles Gaffa	[%]	-71	-73	-	-	-	-	-	-	-	-
spáry 2.ET	[m3/h]	3.98	7.67	-	-	-	-	-	-	0.43	0.90
spáry (m') 2.ET	[m3/(h*m')]	0.50	0.97	-	-	-	-	-	-	0.061	0.89
OSB (35 %); Gaffa 1.ET	[m3/h]	1.25	2.08	2.90	4.18	6.21	9.19	12.83	-	0.14	0.85

Tabulka 5.1.2 - výsledky konfigurace se zakrytým oknem

### Konfigurace s odkrytým oknem

Z naměřených hodnot lze odečíst příspěvek celého okna po zabudování od celkové průvzdušnosti vzorku (**okno 2.ET = OSB; Airstop; Okno 2.ET – OSB; Airstop 2.ET**). Nelze však odděleně vyjádřit hodnoty průvzdušnosti zvláště pro připojovací a pro funkční spáru. Postup vyhodnocování výsledků pro samostatné okno podle ČSN EN 12114 proto není s těmito daty uplatnitelný.



Graf 5.1.3 - konfigurace s odkrytým oknem

Podíl okna na celkové průvzdušnosti vzorku je v průměru 23 % v naměřených bodech. Plošný podíl okna je 25 %. Plošná průvzdušnost konkrétního okna jako

zabudovaného konstrukčního prvku je proto blízká referenční plošné průvzdušnosti OSB desek.

tlak. rozdíl	[Pa]	12	25	38	57	87	131	200	300	C [-]	n [-]
OSB;Airstop 2.ET	[m3/h]	0.86	1.77	2.77	4.35	6.92	10.34	-	-	0.062	1.05
OSB;Airstop; Okno 2.ET	[m3/h]	1.20	2.37	3.63	5.53	8.32	-	-	-	0.102	0.98
okno 2.ET	[m3/h]	0.34	0.60	0.86	1.18	1.40	-	-	-	0.056	0.74
podíl okna	[%]	28	25	24	21	17	-	-	-	-	-

Tabulka 5.1.3 - výsledky konfigurace s odkrytým oknem

## 5.1.4 Výpočty

### Ekvivalentní plocha netěsnosti

Ekvivalentní plocha netěsnosti odpovídá velikosti otvoru s ostrými hranami a s výtokovým součinitel rovným jedné, kterým protéká stejný objemový tok vzduchu jako zkušebním vzorkem. Je vyjádřena pro celý vzorek ve finální konfiguraci **OSB;Airstop;Okno 2.ET**. Výpočet je proveden za referenčního tlakového rozdílu 50 Pa [31]:

$$A_L = C * \sqrt{\frac{\rho}{2}} * \Delta p^{(n-0,5)} = 0,102 * \sqrt{\frac{1,25}{2}} * 50^{(0,98-0,5)} = 0,53 \text{ m}^2 \quad (5)$$

### Referenční plošná průvzdušnost OSB desek

Referenční plošná průvzdušnost OSB desek  $q_{ref,A}$ , tedy objemový tok vztažený na jednotkovou plochu za referenčního tlakového rozdílu 50 Pa, je vypočtena následovně [30]:

$$q_{ref,A} = \frac{q_{ref}}{A} = \frac{3,77}{6,55} = 0,58 \text{ m}^3 / (\text{h} * \text{m}^2) \quad (6)$$

Objemový tok OSB desek 3,77 m<sup>3</sup>/h při 50 Pa je vypočten pomocí rovnice netěsnosti z výsledků **OSB;Airstop 2.ET** a plocha OSB desek je rovna 6,55 m<sup>2</sup>.

### Referenční průvzdušnost spár mezi OSB deskami

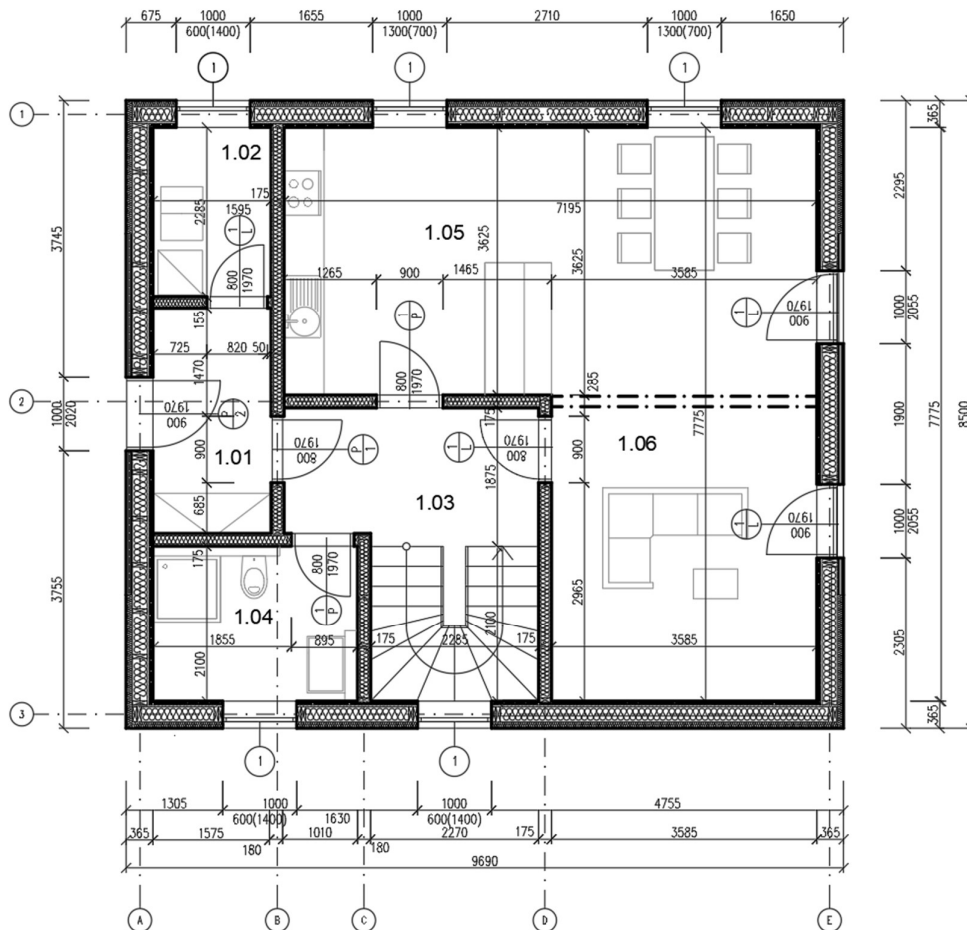
Objemový tok spár mezi OSB deskami je rozdíl výsledků **OSB;bez Airstop 2.ET** - **OSB;Airstop 2.ET**. Výsledná hodnota 14,54 m<sup>3</sup>/h je opět vztažena k 50 Pa. Celková délka spár na vzorku je 7,93 m. Výpočet referenční průvzdušnosti spár  $q_{ref,L}$  je následující [30]:

$$q_{ref,L} = \frac{q_{ref}}{L} = \frac{14,54}{7,93} = 1,83 \text{ m}^3 / (\text{h} * \text{m}) \quad (7)$$

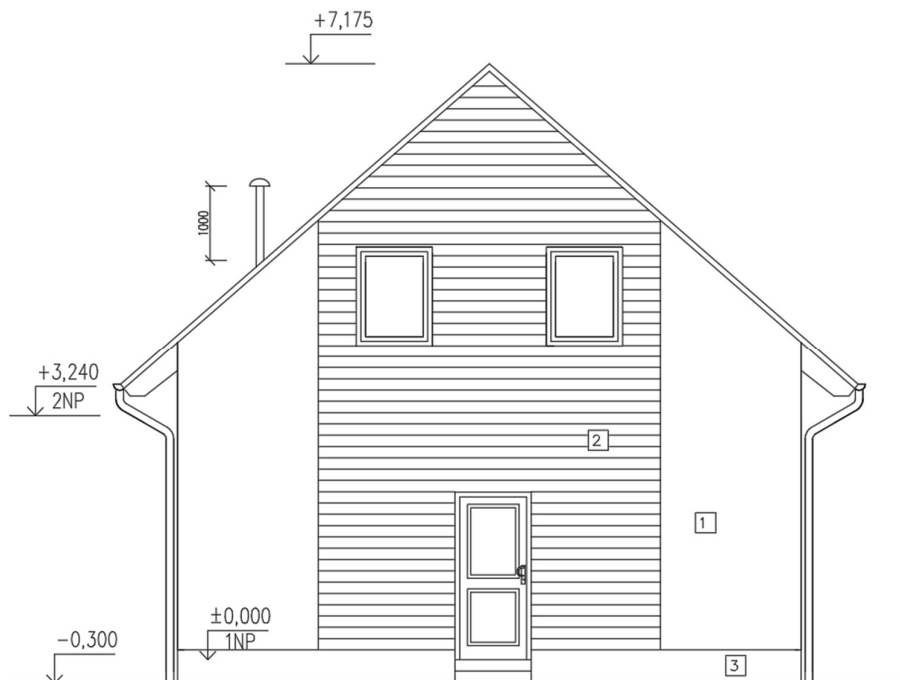
## Aplikace výsledků měření na referenční budovu

Výsledky měření **okno 2.ET** a **OSB; Airstop 2.ET** jsou přepočteny na referenční budovu – dvoupodlažní rodinný dům (zdroj: cvičení předmětu 124DRS). Pro něj je vypočtena intenzita výměny vzduchu při přetlaku 50 Pa. Pro plochu obálky je zjednodušeně uvažována referenční plošná průvzdušnost OSB desek a pro každou OV je uvažována shodná průvzdušnost dle měření. Budova má celkové vnitřní půdorysné rozměry 7,8 m x 9,0 m, výška je 7,2 m.

- Celková plocha obálky (bez OV): 232.2 m<sup>2</sup>
- Objem budovy: 379.8 m<sup>3</sup>
- Počet otvorových výplní: 16
- Referenční plošná průvzdušnost: 0.58 m<sup>3</sup>/(h\*m<sup>2</sup>)
- Průvzdušnost jedné OV: 1.01 m<sup>3</sup>/h



obrázek 5.1.7 - půdorys referenční budovy



obrázek 5.1.8 - pohled na referenční budovu

Výsledná intenzita výměny vzduchu  $n_{50}$  je  $0,41 \text{ h}^{-1}$  a je menší než doporučená hodnota pro pasivní budovy s nuceným větráním se zpětným získáváním tepla  $n_{50,N}$  pro úroveň I, tedy  $0,6 \text{ h}^{-1}$  podle ČSN 73 0540-2. Výpočet je pouze indikativní a zanedbává vliv např. detailů reálného objektu, přesto lze tvrdit, že zvolené materiály pro vzorek včetně jeho provedení jsou dobrým předpokladem pro splnění normového požadavku.

## 5.1.5 Diskuse

Rozdílné výsledky kalibračních měření vytváří otázku skutečné těsnosti komory a možná místa průtoku vzduchu. Dále není z výsledků zřejmé, která z provedených variant kalibračních měření je korektnější a který méně zkresluje data z měření vzorku. Vyšší objemové průtoky vzduchu v případě druhého kalibračního měření, kdy byla PE folie umístěna přímo ke vzorku, mohou pravděpodobně souviset s odhalenou plochou zkušebního rámu. Právě plocha rámu je vždy odhalena i u měření vzorku, proto tato varianta uchycení těsnící fólie může vést k přesnějším výsledkům. Významné omezení u ní může být limit 30 % průvzdušnosti komory z celkové průvzdušnosti. Informace o netěsnostech lze získat měřením průtoku vzduchu pomocí anemometru při kládání k místům s potenciální netěsností. Toto měření bylo provedeno z vnější strany pláště komory a při zapnutém ventilátoru vytvářející přetlak v Indoor komoře, ovšem anemometr nezaznamenal žádný průtok vzduchu.



## 5.1.6 Závěr

Z měření v rámci dvou etap a několika konfigurací je zřejmé, že je pro splnění normových podmínek nutné přelepit spáry mezi OSB deskami tvořících HVV, vzduchotěsnou páskou zajišťující pokles průvzdušnosti přes 80 %.

Gaffa páska reprezentující výrobek neurčený ke vzduchotěsným spojům vykazuje po nalepení na OSB vyšší průvzdušnost (pokles průvzdušnosti přes 70 % oproti variantě bez přelepených spár) a je tedy méně vhodná. Dále je u pásky sporná její dlouhodobá přilnavost vzhledem k tomu, že je určena pro dočasné lepení a snadno se odstraňuje. Z porovnání s Airstop páskou (pokles průvzdušnosti přes 80 %) proto autor doporučuje pro zajištění vzduchotěsnosti budovy vždy použít výrobky k tomu určené a dodržovat technologické postupy dané výrobcem.

Vztáhnutí výsledků referenční plošné průvzdušnosti OSB desky ( $0,58 \text{ m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$ ) a průvzdušnosti okna na referenční budovu naznačuje, že finální konfigurace obvodového pláště a okna je z pohledu materiálů, návrhu i realizace vyhovující. OSB 3 tl. 15 mm chápaná jako konstrukční deska s nižší kvalitou je tedy postačující. Navazující vlhkostní měření nebude ovlivněno transportem tepla a vlhkosti prouděním.

## 5.2 Průvzdušnost malého vzorku

### 5.2.1 Úvod

Rozdíly výsledků kalibračního měření vedly k možnému následnému zkreslení výsledků průvzdušnosti vzorku. Výsledky průvzdušnosti konfigurace OSB desek s Gaffa páskou, dále měřené na části vzorku, a konfigurace OSB s Airstop páskou jsou rozdílné bez skutečně známé příčiny. Dále nelze vyloučit přítomnost menšího otvoru v OSB desce, například předchozím využitím desek nebo během realizace. Nelze s jistotou oddělit jednotlivé vlivy a je proto provedeno měření průvzdušnosti na malých vzorcích v obdobných konfiguracích.

### 5.2.2 Metody

Laboratorní zkušební metoda je analogií k metodě popsané v kapitole 5.1.2. Rozdílem je opačný charakter veličin. Objemový průtok vzduchu [ml/s] je vstupní, kontrolovanou veličinou, a přetlak [Pa] je veličina měřená.

#### Zkušební vzorek a zařízení

Měření průvzdušnosti proběhlo na malých vzorcích OSB desek kruhového tvaru o průměru 140 mm. Vzorky byly vyříznuty z odřezků OSB 3 tl. 15 mm z realizace velkého vzorku, v dalších konfiguracích byly použity shodné pásky Gaffa a Airstop. Výsledky by tedy měly být porovnatelné s výsledky velkého vzorku.

Jako zkušební zařízení fungovala skleněná nádoba kruhového tvaru (analogie vnitřního prostředí – Indoor komory). Skrz utěsněný otvor je k nádobě připojen tlakoměr snímající přetlak v nádobě a hodnota je následně zobrazena v Datatakeru. Součástí měřicí výbavy je dále sada stříkaček pro vytvoření přetlaku o objemech 20 ml a 60 ml se stupnicemi po 1 ml.



obrázek 5.2.1 - zkušební vzorek a zařízení

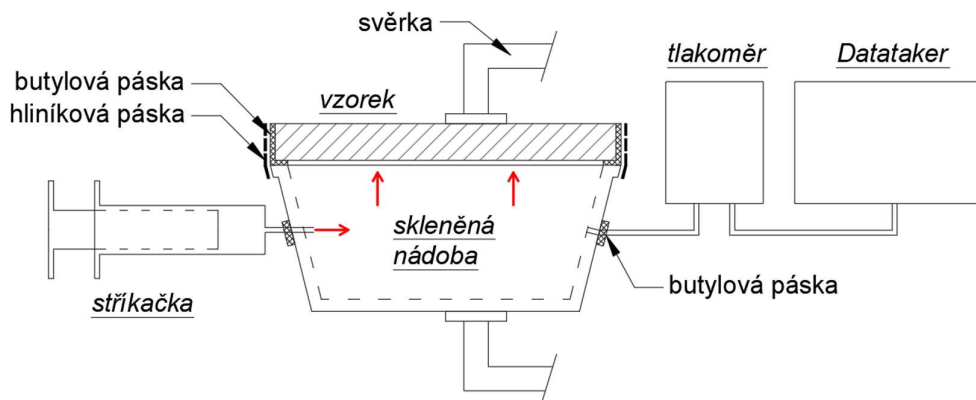
## Parametry měření

Zkouška probíhala za kladného tlakového rozdílu, tedy přetlaku v nádobě. Pro měření byla zvolena řada tří objemových průtoků pro konfigurace **1**, **3** a **4** - 1,0 ml/s, 1,5 ml/s a 2,0 ml/s. Pro konfiguraci **2** byly navrženy dvě hodnoty - 2,0 ml/s a 4,0 ml/s. Pro jednotlivé objemové průtoky bylo nutné vhánět vzduch vždy pro různé časové úseky, z důvodu ustálení transportu vzduchu skrz vzorek. Časové úseky byly zvoleny 10 s, 15 s, 20 s a 30 s a konkrétní kombinace časových úseků závisela na objemu stříkačky. Měření proběhlo s neměnnou teplotou a relativní vlhkostí.

## Postup měření

Měření probíhalo v laboratoři stavební fyziky UCEEB v několika dnech v časovém rozmezí 29.11. - 06.12.2023.

Samotný vzorek a nádoba byly před měřením řádně očištěny a vizuálně zkontrolovány. Na hranu OSB desky a na nádobu se nalepily těsnící butylové pásky, vzorek se následně mírně přitlačil na nádobu a spoj přelepen hliníkovou lepicí páskou. Celá sestava byla během měření dále stabilizována svěrkou.



obrázek 5.2.2 - schéma zkoušky



obrázek 5.2.3 - detail těsnění vzorku

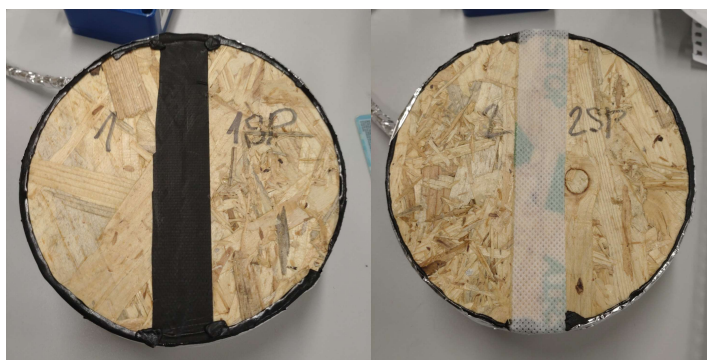
Následovalo samotné měření – stříkačkou skrz utěsněný otvor byl při kontrolovaném objemu vzduchu vháněn vzduch. Pro každý vzorek z konfigurací **1,3** a **4** byl vzduch vháněn 5x při různých časových úsecích pro každý ze tří objemových průtoků. Jednotlivý vzorek byl tedy změřen 15x.

Jednotlivé konfigurace jsou následující:

1. **Malý vzorek OSB** – vyříznutá OSB deska v náhodných místech; různá orientace a velikosti třísek; průměr 140 mm; 5 vzorků
2. **Malý vzorek OSB + spára** – vyříznutá OSB deska v náhodných místech s perem a drážkou procházející středem vzorku (délka 140 mm); různá orientace a velikosti třísek; průměr 140 mm; 2 vzorky
3. **Malý vzorek OSB + Gaffa** – konfigurace 2 se spárou přelepenou Gaffa páskou; 2 vzorky
4. **Malý vzorek OSB + Airstop** – konfigurace 2 se spárou přelepenou Airstop páskou; 2 vzorky



obrázek 5.2.4 - vzorky pro konfiguraci 1

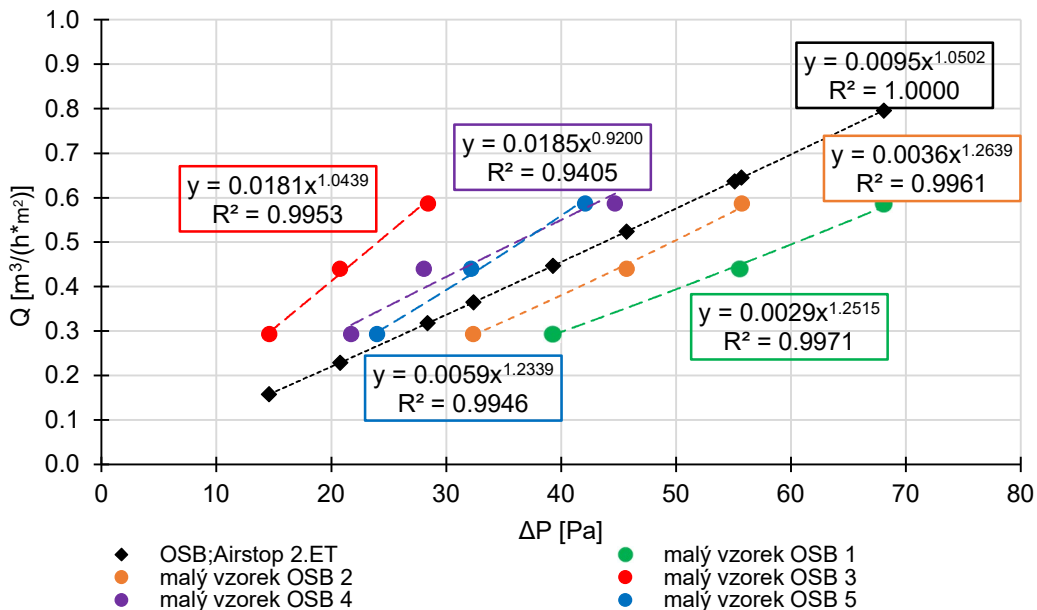


obrázek 5.2.5 - vzorky pro konfigurace 2,3,4

## 5.2.3 Výsledky

Výsledky přetlaků za různých časových úseků pro jednotlivý vzorek byly vždy zpřůměrovány pro každý ze tří objemových průtoků. Stejným způsobem, jako je popsáno v kapitole 5.1.3, jsou určeny parametry rovnice netěsnosti  $C$  a  $n$ . Výsledky malých vzorků jsou dále interpretovány pro porovnání spolu s výsledky velkého vzorku, proto jsou objemové průtoky vztaheny na jednotkovou plochu  $m^2$ .

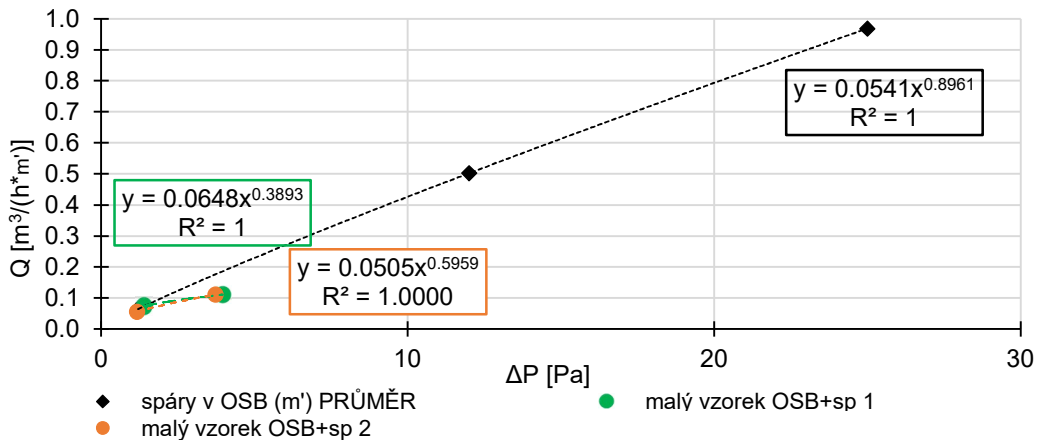
### Malý vzorek OSB



Graf 5.2.1 - malý vzorek OSB

Z grafu je patrné, že průvzdušnost jednotlivých vzorků je velmi odlišná, a je způsobena nehomogenitou materiálu viditelnou z obrázku. Je zřejmé, že průběh průvzdušnosti velkého vzorku (*OSB; Airstop 2.ET*) je v intervalu malých vzorků.

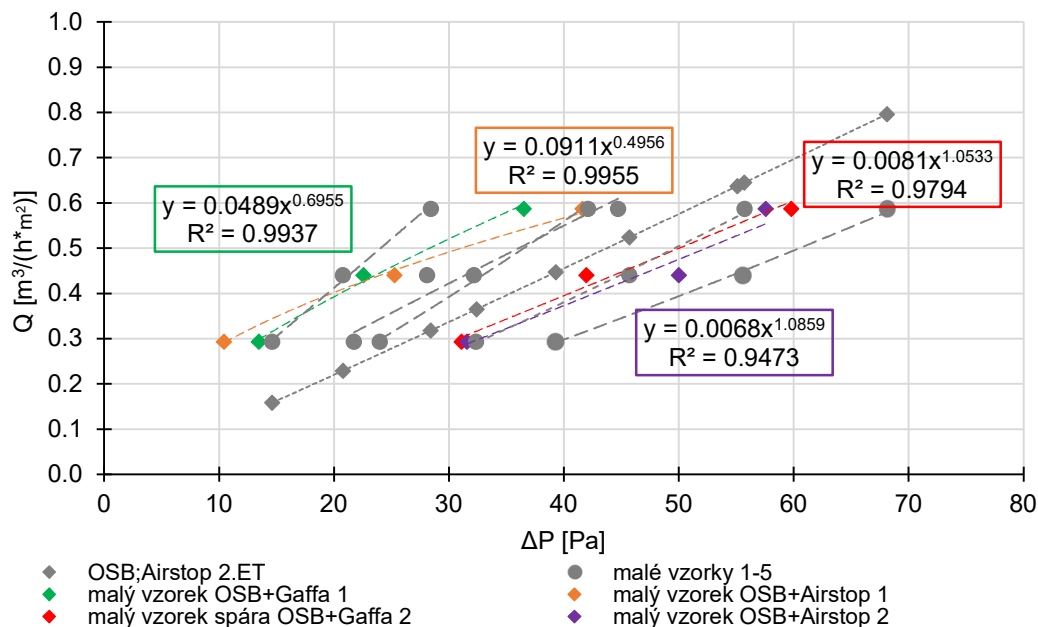
### Malý vzorek OSB + spára



Graf 5.2.2 - malý vzorek OSB + spára

Nižší průvzdušnost malých vzorků při vyšším objemovém průtoku může spočívat ve vyšší těsnosti spáry na malém vzorku. Vyšší nepřesnost měření vzniklá vhnáním vzduchu stříkačkou za vyšší rychlosti mohla výsledek zkreslit. Řádkově shodné výsledky potvrzují, že s nepřelepenou spárou v OSB nelze dosáhnout požadované vzduchotěsnosti budovy dle normy.

#### Malý vzorek OSB + Gaffa/Airstop



Graf 5.2.3 - malý vzorek OSB + Gaffa/Airstop

Vzorky s přelepenou spárou jsou zobrazeny spolu se vzorky bez spáry. Přestože průvzdušnost vztažená na  $\text{m}^2$  se pro vzorky se spárou nezdá být korektní, tak je z grafu patrné, že vzájemné rozdíly mezi přelepení Gaffa páskou nebo Airstop páskou jsou minimální a průběhy se pohybují v intervalu malých vzorků OSB 1-5.

#### 5.2.4 Diskuse

Jelikož jsou výsledky jednotlivých vzorků velmi odlišné, tak je nezbytné pro heterogenní materiál, jakým je OSB, stanovit průvzdušnost na větším množství vzorků.

Velmi podobné výsledky spáry přelepené Gaffa páskou a Airstrop páskou na malém vzorku mohou indikovat jejich rovnocennost použití. Na malém vzorku je na druhou stranu podstatně jednodušší aplikace pásky a z principu je zde dosaženo vyšší kvality provedení. Naopak velký vzorek (nebo reálná konstrukce) může být spíše zatížen chybami. Jako pravděpodobné vysvětlení vyšší průvzdušnosti Gaffa pásky na velkém vzorku může být její náchylnost na kvalitu nalepení.

Kvalita měření závisí na způsobu vhnání vzduchu do vzorku. Konstantní vtláčování vzduchu stříkačkou po delší časový úsek, zvláště za vyšších objemových

průtoků, vyžaduje vyšší míru zručnosti a trpělivosti. Důsledkem toho je v průměru nižší spolehlivost  $R^2$  při stanovení rovnice netěsnosti.

### 5.2.5 Závěr

Zkouškou průvzdušnosti malých OSB vzorků bylo prokázáno, že lze získat velmi podobné výsledky jako na velkém vzorku. Dále zkouška ukázala, že OSB funguje v navržené skladbě jako plnohodnotná HVV. Ostatní vrstvy ve velkém vzorku se na celkové vzduchotěsnosti pravděpodobně nepodílí.

Bylo také zjištěno, že pro výslednou průvzdušnost má výraznější význam kvalita OSB desky a volba konkrétního dílce, než volba mezi Gaffa nebo Airstop páskou (graf 5.2.3). Podmínkou je ovšem kvalitní nalepení pásky dosažitelné v laboratorních podmínkách. V praxi se spíše projeví vyšší náchylnost kvality aplikace Gaffa pásky na průvzdušnost, proto ji autor nedoporučuje jako výrobek pro řešení vzduchotěsnosti.

## 5.3 Tepelně vlhkostní simulace

### 5.3.1 Úvod

Tepelně vlhkostní simulace provedená na experimentálním vzorku povede k objasnění chování v klíčových místech vzorku v závislosti na kvalitě provedení a volbě materiálů za proměnných okrajových podmínek v Indoor a Outdoor komoře. Následující principy jsou uvedeny pouze pro kontext ve vztahu k vyhodnocení výsledků měření a ke stavbě numerických modelů. Jsou zde uvedeny termíny a parametry používané v následujících kapitolách.

#### Šíření tepla v konstrukci [34]

Transport tepla je vyvolán gradientem teplot, ve směru z místa s vyšší teplotou do místa s teplotou nižší. Teplo se může šířit vedením, prouděním, nebo sáláním. V případě experimentálního vzorku je šíření tepla v konstrukci uvažováno vedením. Princip vedení tepla je definován Fourierovým zákonem:

$$q_{cd} = -\lambda * grad \theta \quad (8)$$

kde:  $q_{cd}$  hustota tepelného toku [ $W/m^2$ ]

$\lambda$  součinitel tepelné vodivosti [ $W/m*K$ ]

$\theta$  teplota [ $^{\circ}C$ ]

Pro analýzu jednorozměrného šíření tepla vedením v konstrukci lze rovnici vyjádřit jako:

$$q_{cd} = \lambda \frac{\Delta\theta}{d} = \frac{\lambda}{d} (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (9)$$

kde:  $d$  tloušťka materiálu ve směru tepelného toku [ $m$ ]

$\theta_{si}$  teplota vnitřního povrchu konstrukce [ $^{\circ}C$ ]

$\theta_{se}$  teplota vnějšího povrchu konstrukce [ $^{\circ}C$ ]

V případě ustáleného stavu je hustota tepelného toku ve všech místech konstrukce, včetně povrchů, shodná, dále je v homogenní vrstvě průběh teplot lineární. Proto lze při znalosti hustoty tepelného toku vyjádřit teplotu v libovolné vrstvě konstrukce.

Sumou podílů tloušťky vrstev a jejich součinitelů tepelné vodivosti lze vyjádřit tepelný odpor konstrukce  $R$  [ $m^2K/W$ ]:

$$R = \sum \frac{d_i}{\lambda_i} \quad (10)$$

Zohledněním tepelných odporů při přestupu tepla  $R_{si}$  a  $R_{se}$  [ $m^2K/W$ ] lze získat tepelný odpor při prostupu tepla  $R_T$  [ $m^2K/W$ ]:

$$R_T = R_{si} + R + R_{se} \quad (11)$$



Převrácená hodnota potom vyjadřuje součinitel prostupu tepla  $U$  [ $W/m^2K$ ]:

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (12)$$

### Hodnoty $R_{si}$ [34] [35]

Teplu se mezi prostředím a povrchem konstrukce vyměňuje prouděním, vlivem rozdílu teplot vnitřního povrchu konstrukce a vnitřního vzduchu, a sáláním, vlivem rozdílu teplot povrchu konstrukce a středních teplotou ostatních povrchů. Tepelný tok je tedy ovlivněn rozdílem teplot a účinkem proudění a sálání:

$$q_{si} = (h_{ci} + h_{ri}) * (\theta_i - \theta_{si}) = (h_{si}) * (\theta_i - \theta_{si}) \quad (13)$$

kde:  $h_{ci}$  součinitel přestupu tepla prouděním [ $W/m^2K$ ]

$h_{ri}$  součinitel přestupu tepla sáláním [ $W/m^2K$ ]

$h_{si}$  součinitel přestupu tepla na vnitřním povrchu [ $W/m^2K$ ]

$\theta_{si}$  teplota vnitřního povrchu [ $^{\circ}C$ ]

$\theta_i$  operativní teplota (ekvivalentní vnitřní teplota jako průměr teploty vzduchu a váženého průměru teploty povrchů) [ $^{\circ}C$ ]

Součinitel  $h_{ri}$  je závislý na teplotě a na emisivitě povrchů,  $h_{ci}$  právě na směru tepelných toků. Převrácená hodnota  $(h_{ci} + h_{ri})$  vyjadřuje součinitel při přestupu tepla  $R_{si}$  [ $m^2K/W$ ]:

$$R_{si} = \frac{1}{(h_{ci} + h_{ri})} = \frac{1}{h_{si}} \quad (14)$$

V praxi se odpory při přestupu tepla na vnitřním povrchu uvažují hodnoty  $0,13 m^2K/W$  pro vodorovný tepelný tok,  $0,10 m^2K/W$  pro tepelný tok směrem vzhůru a  $0,17 m^2K/W$  pro tepelný tok dolů. Ovšem při výpočtu vnitřní povrchové teploty se hodnota  $R_{si}$  uvažuje rozdílná -  $0,13 m^2K/W$  pro výplně otvorů a  $0,25 m^2K/W$  pro ostatní stavební konstrukce (včetně rámců oken a dveří) podle ČSN 73 0540-2 [11]. Dle ČSN EN ISO 13788 [12] zvýšená hodnota reprezentuje např. účinek koutů a nábytku.

### Hodnoty $R_{se}$ [34] [35]

Pro vnější prostředí platí stejný vztah, jako je výše popsáný.  $T_e$ , neboli ekvivalentní vnější teplota, navíc zahrnuje vliv krátkovlnného slunečního záření. Podíl  $1/(h_{ce} + h_{re})$  vyjadřuje součinitel při přestupu tepla  $R_{se}$ . Součinitel  $h_{ce}$  je zde závislý na rychlosti proudění vzduchu při vnějším povrchu  $v$  [ $m/s$ ]:

$$h_{ce} = 4 + 4 * v \quad (15)$$

Při zvyšujícím se proudění vzduchu (například ventilátor, nebo vítr) tedy hodnota  $R_{se}$  klesá. Je zajímavé, že pro  $R_{si}$  není její závislost na proudění vzduchu popsána.

## Šíření vlhkosti v konstrukci [34] [35]

Vodní pára vyskytující se ve vzduchu je schopna procházet stavební konstrukcí, její transport je vyvolán gradientem částečných tlaků vodních par, ve směru z místa s vyšším tlakem do místa s tlakem nižším. Vlhkostní tok je souhrnný pojem pro transport vodní páry difuzí, konvekcí a kapilárním vedením. V případě experimentálního vzorku jde o transport difuzí.

Difuze je v konkrétním případě chápána jako samovolný pohyb vodní páry při výskytu rozdílných koncentrací oddělenými pórovitým materiálem. Princip transportu vodní páry difuzí je popsán 1. Fickovým zákonem a je popsán následovně:

$$g = -\delta * \text{grad } p \quad (16)$$

kde:  $g$  hustota vlhkostního toku [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ]

$\delta$  součinitel difuze vodní páry [ $\text{s}$ ]

$p$  částečný tlak vodní páry [ $\text{Pa}$ ]

Pro hodnocení vodní páry v konstrukci, běžně pomocí Glaserovy metody je vzorec zjednodušen na následující varianty:

$$g = \delta * \frac{\Delta p}{d_{mat}} = \frac{\delta_0}{\mu} * \frac{\Delta p}{d_{mat}} = \delta_0 * \frac{\Delta p}{s_d} \quad (17)$$

Součinitel difuze vodní páry  $\delta$  [ $\text{s}$ ] popisuje schopnost materiálu propouštět vodní páru difuzí. Poměr tloušťky materiálu  $d_{mat}$  [ $\text{m}$ ] a  $\delta$  [ $\text{s}$ ] vyjadřuje difuzní odpor  $Z_p$  [ $\text{m}/\text{s}$ ]:

$$Z_p = \frac{d_{mat}}{\delta} \quad (18)$$

Poměrem součinitelů difuzní vodivosti vzduchu  $\delta_0$  [ $\text{s}$ ] (závislý na teplotě a atmosférickém tlaku) a materiálu  $\delta$  [ $\text{s}$ ] je popsán faktor difuzního odporu  $\mu$  [-]. Vyjadřuje, kolikanásobně hůře umožňuje materiál difuzi, oproti vzduchu:

$$\mu = \frac{\delta_0}{\delta} \quad (19)$$

Dále používaným parametrem je ekvivalentní difuzní tloušťka  $s_d$  [ $\text{m}$ ]:

$$s_d = \mu * d_{mat} \quad (20)$$

Popis platí pro jednorozměrné šíření vlhkosti za ustáleného stavu.

## 5.3.2 Metody

### Experimentální vzorek a zařízení

Zkušební zařízení je popsáno v kapitole 4.1 a vzorek v kapitole 4.2.

### Strategie umístění čidel

V experimentálním vzorku jsou umístěna čidla pro měření teploty [°C], relativní vlhkosti [%] a hustoty tepelného toku [W/m<sup>2</sup>]. Poloha čidel vychází ze zjednodušených modelů v programu Area, dále ze zkušeností techniků UCEEB.

Účelem zjednodušených modelů v programu Area byla analýza a odhalení kritických míst. Byly vytvořeny 3 modely – nadpraží, ostění a parapet v typických místech řezu. Výsledky všech tří modelů Area predikují největší vlhkostní zatížení v cca 1/3 hloubky připojovací spáry směrem z interiéru. Dalším slabým místem modelu je oblast uložení stropnic na rozhraní vložené minerální izolace a KVH věncové fošny. V těchto místech jsou proto umístěna čidla měřící relativní vlhkost a teplotu.

Zabudované okno bylo z interiérové strany osazeno čidly měřícími teplotu ve třech výškových úrovních. V každé úrovni se čidla nacházejí při zasklívací a připojovací spáře. Dále je čidlo umístěno uprostřed plochy zasklení spolu s čidlem měřícím hustotu tepelného toku. Důvodem měření ve více úrovních je očekávané ovlivnění povrchových teplot prouděním vnitřního vzduchu v blízkosti konstrukce.

Čidly měřícími teplotu a relativní vlhkost byla dále osazena skladba v jejím typickém místě. Čidlo se nachází na vnitřním a vnějším povrchu, poté vždy na rozhraní materiálů. Na rozhraní OSB desky a minerální izolace je navíc čidlo měřící hustotu tepelného toku.

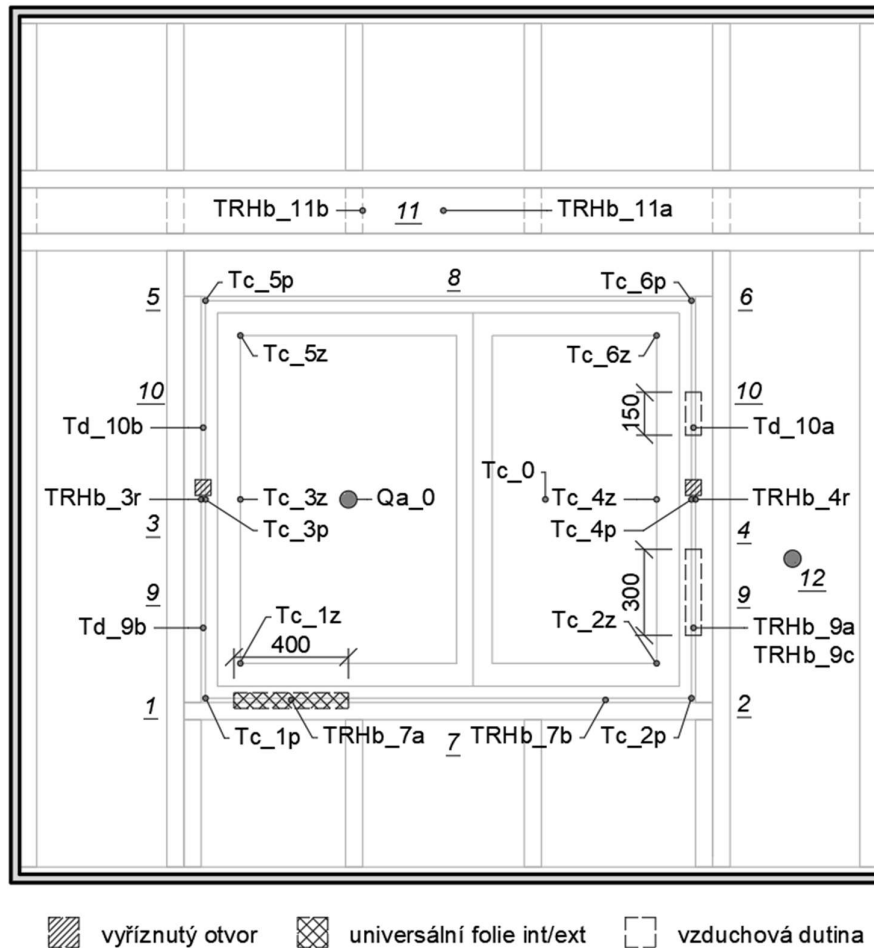
### Rozdílné provedení připojovací spáry

Pro vnitřní a vnější uzávěr připojovací spáry byly použity folie dvou výrobců s cílem popsat vliv typu folie na tepelně vlhkostní chování spáry. Dominantně byly použity folie od firmy Soudal (SWS Foil Interiér + SWS Foil Exteriér), pro vnitřní a vnější uzávěr se tedy jedná o rozdílné výrobky. Na výseku 400 mm v oblasti parapetu byla použita universální folie Ilbruck ME500 s deklarovaným použitím pro interiér a exteriér. V oblasti parapetu lze očekávat největší tepelně vlhkostní namáhání. Data budou získána senzorem TRHb\_7a umístěným v 1/3 hloubky připojovací spáry směrem z interiéru a porovnána se senzorem TRHb\_7b umístěným zrcadlově v místě folií firmy Soudal.

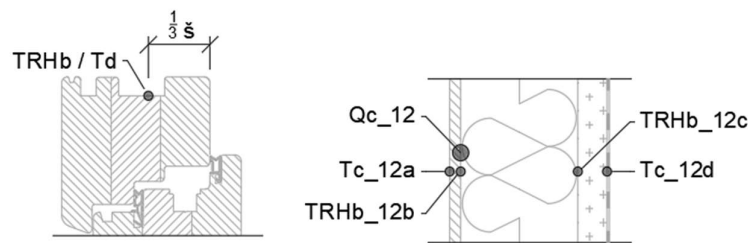
V připojovací spáře v ostění byla dále provedena „umělá vada“ v podobě vynechání montážní pěny, provedení tak reprezentuje častou montážní vadu dle normy ČSN 74 0677 [1] popsanou v kap. 2.2. Vynecháním vznikne vzduchová dutina, u které autor předpokládá chování spíše odpovídající nevětrané dutině bez pohybu vzduchu, tedy přijatelné tepelně izolační vlastnosti. Podmínkou je dokonalé utěsnění dutiny foliemi. Na vzorku se realizovaly dvě oblasti bez montážní pěny

s rozdílnou výškou – 300 mm a 150 mm v ostění. Důvodem rozdílných výšek je i přes předpoklad možná rozdílná cirkulace vzduchu daná teplou a ochlazovanou stranou. Data jsou měřena senzory TRHb\_9a a TRd\_10a umístěnými v 1/3 hloubky připojovací spáry směrem z interiéru ve spodní oblasti dutiny a porovnává se senzory Td\_9b a Td\_10b umístěným zrcadlově ve stejné výškové úrovni.

V pozdějších konfiguracích pro měření se vytvořily otvory vyříznutím části vnitřní folie ve dvou místech spáry simulující netěsnosti folie.



obrázek 5.3.1 - schéma umístění čidel



obrázek 5.3.2 - umístění čidel v rámu / ve skladbě

### Čidla na zasklení z interiérové strany

název	měřeno	umístění
Qa_0	[W/m <sup>2</sup> ]	uprostřed levého křídla
TC_0	[°C]	uprostřed pravého křídla
TC_1z	[°C]	zasklívací spára; levý dolní roh
TC_2z	[°C]	zasklívací spára; pravý dolní roh
TC_3z	[°C]	zasklívací spára; uprostřed výšky; vpravo
TC_4z	[°C]	zasklívací spára; uprostřed výšky; vlevo
TC_5z	[°C]	zasklívací spára; levý horní roh
TC_6z	[°C]	zasklívací spára; pravý horní roh

### Čidla u připojovací spáry z interiérové strany

název	měřeno	umístění
TC_1p	[°C]	levý dolní roh
TC_2p	[°C]	pravý dolní roh
TC_3p	[°C]	uprostřed výšky; vpravo
TC_4p	[°C]	uprostřed výšky; vlevo
TC_5p	[°C]	levý horní roh
TC_6p	[°C]	pravý horní roh

### Čidla v připojovací spáře připevněná k rámu

název	měřeno	umístění
TRHb_3r	[°C;% RH]	1/3 hl.; uprostřed výšky; vlevo
TRHb_4r	[°C;% RH]	1/3 hl.; uprostřed výšky; vpravo
TRHb_7a	[°C;% RH]	1/3 hl.; universální folie; parapet
TRHb_7b	[°C;% RH]	1/3 hl.; standartní folie; parapet
TRHb_9a	[°C;% RH]	1/3 hl.; 300mm dutina; vpravo
Td_9b	[°C]	1/3 hl.; porovnání s dutinou; vlevo
TRHb_9c	[°C;% RH]	u vnější folie; 300mm dutina; vpravo
Td_10a	[°C]	1/3 hl.; 150mm dutina; vpravo
Td_10b	[°C]	1/3 hl.; porovnání s dutinou; vlevo

### Čidla mimo oblast okna

název	měřeno	umístění
TRHb_11a	[°C;% RH]	věncová fošna (1/2 výšky stropnice)
TRHb_11b	[°C;% RH]	věncová fošna/stropnice (1/2 výšky)
Qa_12	[W/m <sup>2</sup> ]	skladba; rozhraní OSB/minerální izolace
TC_12a	[°C]	skladba; vnitřní povrch
TRHb_12b	[°C;% RH]	skladba; rozhraní OSB/Isover
TRHb_12c	[°C;% RH]	skladba; rozhraní Isover/Steico
TC_12d	[°C]	skladba; rozhraní Steico/difuzní folie

## Čidla měřící prostředí

název	měřeno	umístění
TRHa_Int	[°C;% RH]	Indoor komora
TRHa_Ext	[°C;% RH]	Outdoor komora

Tabulka 5.3.1 - seznam umístěných čidel

## Postup měření

Tepelně vlhkostní simulace a měření dat z čidel proběhlo ve dnech 18.10. - 15.11.2023. Během trvání simulace byly pootevřeny zátky mezi komorami a prostředím haly z důvodu odstranění tlakových rozdílů mezi komorami. Níže uvedené časy odpovídají zimnímu času (SEČ). Simulace byla rozdělena na několik etap (ET):

ET.	začátek	konec	den měření	Indoor teplota	Indoor RH	Outdoor teplota	Outdoor RH
1	18.10. 14:45	20.10. 16:34	1.-3. den	22 °C	50 %	22 °C	50 %
2	20.10. 16:34	27.10. 10:15	3.-10. den	22 °C	50 %	-3 °C	-
3	27.10. 10:15	05.11 12:25	10.-19.den	22 °C	50 %	-3 °C	70 %
4	05.11. 12:25	10.11. 12:55	19.-24.den	24 °C	70 %	-3 °C	70 %
5	10.11. 12:55	13.11 11:06	24.-27.den	24 °C	70 %	-13 °C	70 %
6	13.11 11:06	14.11 15:00	27.-28.den	přetlak 12 Pa		-13 °C	70 %
7	14.11 15:00	16.11 12:00	28.-30.den	24 °C	50 %	30 °C	60 %

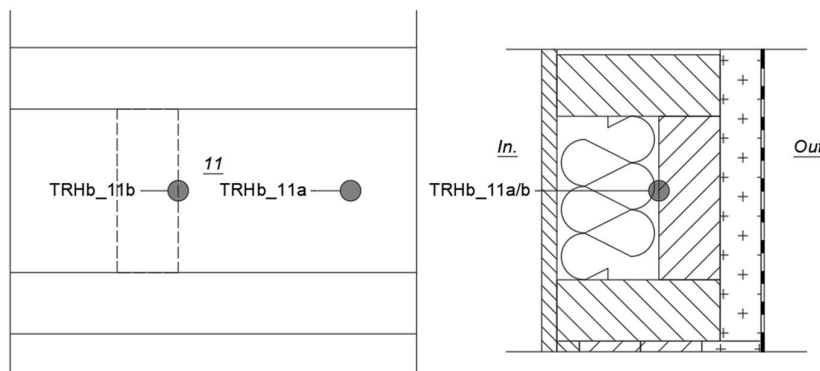
Tabulka 5.3.2 - etapy měření

## Poznámky k etapám:

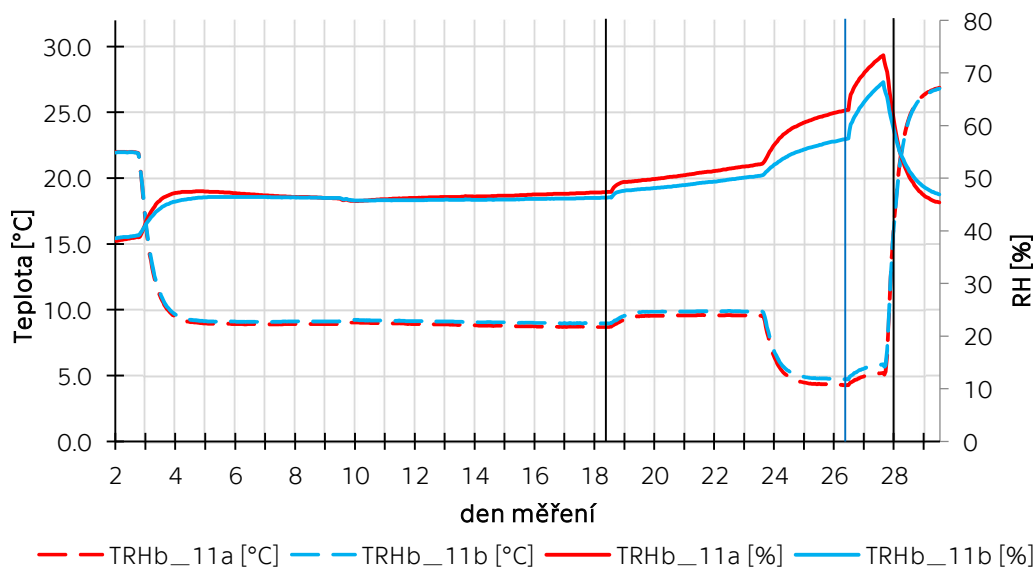
1. Cílem je ustálení teplot a relativní vlhkosti ve vzorku.
2. Předpoklad je simulace průměrných lednových okrajových podmínek podle ČSN EN ISO 13788 [12]. Bez regulace RH v Outdoor komoře – RH během tří dnů postupně klesala na 30 %, důvodem bylo namrzání vzdušné vlhkosti na kondenzátoru. V Indoor komoře byla před vzorkem zavěšená clona z omítkové výztuže s cílem potlačení proudění vzduchu z ventilátoru na vzorek – vyšší cirkulace vzduchu kolem konstrukce snižuje hodnotu  $R_{si}$ . RH v Outdoor komoře
3. Do Outdoor komory se umístila nádoba s roztokem NaCl a ventilátorem – opatření zvýšilo RH na cca 70 %. Nedostatečné potlačení proudění vzduchu z ventilátoru na vzorek vedlo k doplnění clony z geotextilie těsně před ventilátor, opatření se projevilo výrazněji –  $R_{si}$  se blíží hodnotám uvedeným v ČSN 73 0540-2 [11]. Změna dále pozitivně ovlivnila regulaci v Indoor komoře – omezilo se totiž kolísání teploty a relativní vlhkosti.
4. Nastavení Indoor komory odpovídá užívání vlhkostně zatížených prostor - např. koupelna. 07.11. 15:40 byly vyříznuté otvory ve vnitřní parotěsné folii.
5. Podmínky v Outdoor komoře odpovídají návrhovému zimnímu stavu
6. Přetlak 12 Pa v Indoor komoře (prvních 30 minut 50 Pa); teploty a RH ponechány
7. Podmínky v komorách odpovídají letnímu stavu

### 5.3.3 Výsledky

#### Uložení stropnice



obrázek 5.3.3 - umístění čidel v místě uložení stropnice

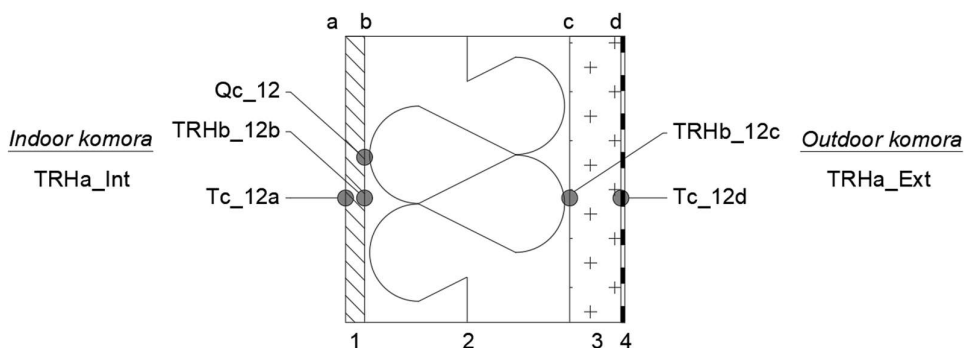


Graf 5.3.1 - chování v místě uložení stropnice

Obě čidla měřila velmi podobné hodnoty teplot. V 19. dnu měření při zvýšení teploty a RH v Indoor komoře čidla zaznamenají vzrůst teploty i RH (i částečného tlaku vodní páry). V 24. dnu při snížení teploty v Outdoor komoře klesne výrazně teplota a vzroste RH (hodnota částečného tlaku naopak klesá). V koutě umístěné čidlo TRHb\_11b naměřilo v porovnání s TRHb\_11a za vyššího vlhkostního spádu nižší relativní vlhkost až o 5,2 %. Rozdíl způsobuje větší množství dřeva absorbujícího vodní páru v okolí TRHb\_11b. [úsek ohraničený černou linií]

Vytvořením přetlaku mezi 27. a 28. dnem vzroste teplota o 1 °C a RH v průměru o 10 % (i částečný tlak v.p.) vlivem zvýšené průvzdušnosti OSB desek. [modrá linie]

## Skladba



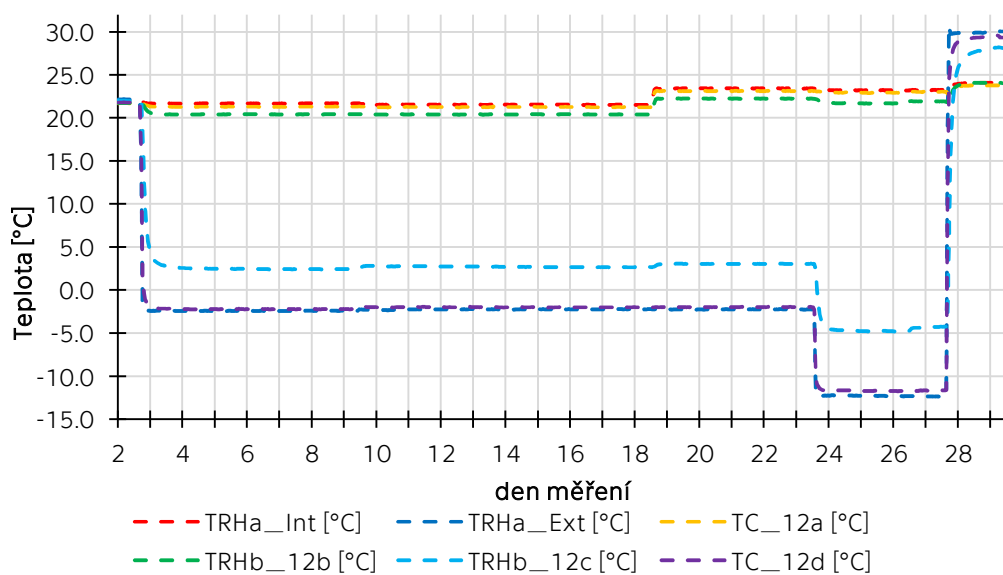
obrázek 5.3.4 - umístění čidel ve skladbě

Ze znalosti hustoty tepelného toku a teplot na rozhraní všech materiálů bylo možné zjistit  $\lambda$  jednotlivých vrstev. Součinitele tepelné vodivosti byly vypočteny ze zprůměrovaných hodnot mezi 15. a 19. dnem měření:

materiál	vrstva	$\lambda$ (návrh.) [W/mK]	$\lambda$ (vyp.) [W/mK]	rozdíl [%]
Kronospan OSB 3	1	0.1	0.077	-23 %
Isover Uni	2	0.038	0.039	3 %
Steico protect	3	0.05	0.037	-26 %

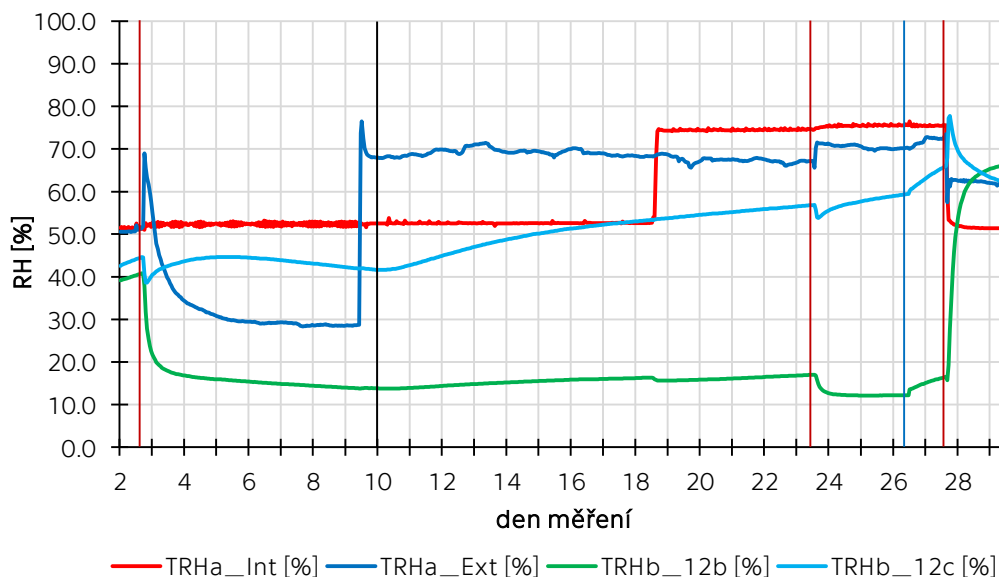
Tabulka 5.3.3 - výpočet součinitelů tepelné vodivosti

V případě OSB a Steico je rozdíl hodnot výrazný. Pro malou tloušťku vrstev je  $\lambda$  silně závislá na teplotách obou stran vrstvy. Čidlo měřící vnitřní povrch Tc\_12a bylo během měření zacloněné kabeláží a mohlo proto dojít ke zkreslení naměřené teploty OSB desky. V kontextu tepelně izolačních vrstev je však  $\lambda$  pro OSB méně důležitá.



Graf 5.3.2 - chování ve skladbě





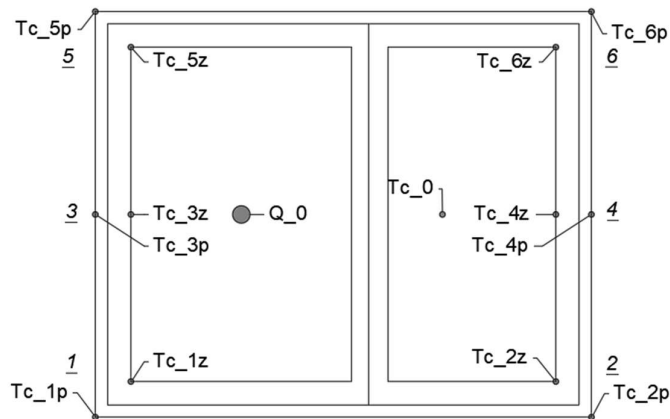
Graf 5.3.3 - chování ve skladbě

Čidla na změnu teplot prostředí reagují téměř okamžitě a velmi rychle dojde k ustálení, což dokládá nízkou tepelnou kapacitu materiálů.

Z hlediska vlhkostního chování nedošlo k úplnému ustálení, zvláště v místě s čidlem TRHb\_12c. Ve 3. dnu měření za výrazného snížení teploty a zvýšení RH v Outdoor komoře skokově klesla RH měřená TRHb\_12c, zatímco hodnota parciálního tlaku vodní páry klesala postupně. Ve 24. a 28. dnu čidlo reaguje na změnu teploty analogicky [červené linie]. Je zajímavé, že pokles RH nastane při poklesu teploty a naopak. Chování lze vysvětlit růstem sorpční kapacity materiálů na bázi dřeva při poklesu teploty. V 10. dnu při zvýšení RH Outdoor komory bez změny teploty již čidlo zaznamenalo postupný nárůst RH [černá linie]. Chování tedy prokazuje výrazně rychlejší reakci konstrukce na změnu teploty ve srovnání s vlhkostí. Princip chování v místě čidla TRHb\_12b je velmi podobný.

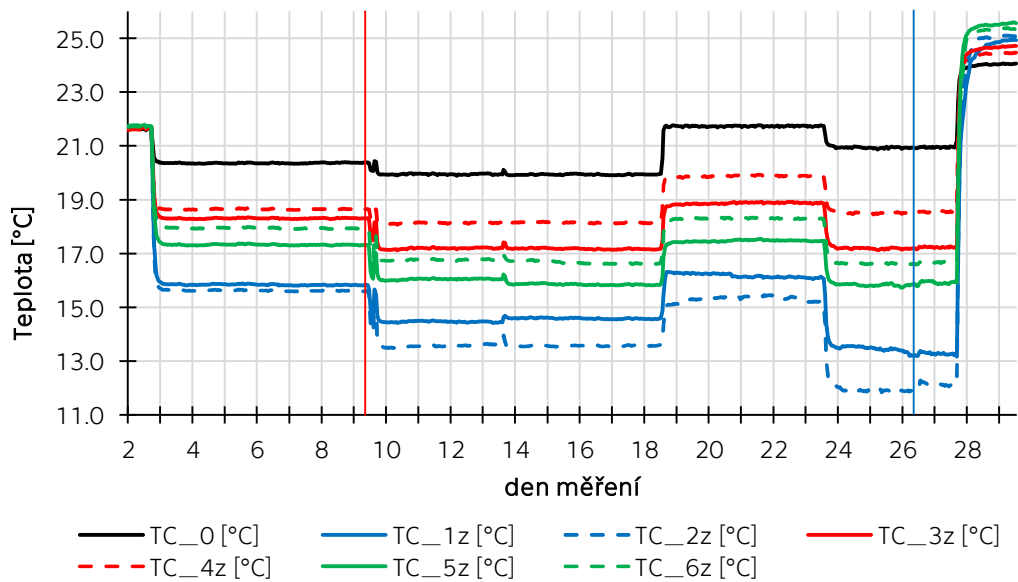
Během vytvořeného přetlaku mezi 27.-28.dnem došlo ke zvýšení naměřených hodnot v pozici **b** o 0,2 °C a 4,3 % RH a v pozici **c** o 0,5 °C a 6,5 % RH. Vyšší hodnoty dokládají zvýšení průvzdušnosti OSB desek. Naměřená povrchová teplota v pozici **a** ukázala zanedbatelnou změnu. [modrá linie]

## Vnitřní povrchové teploty okna

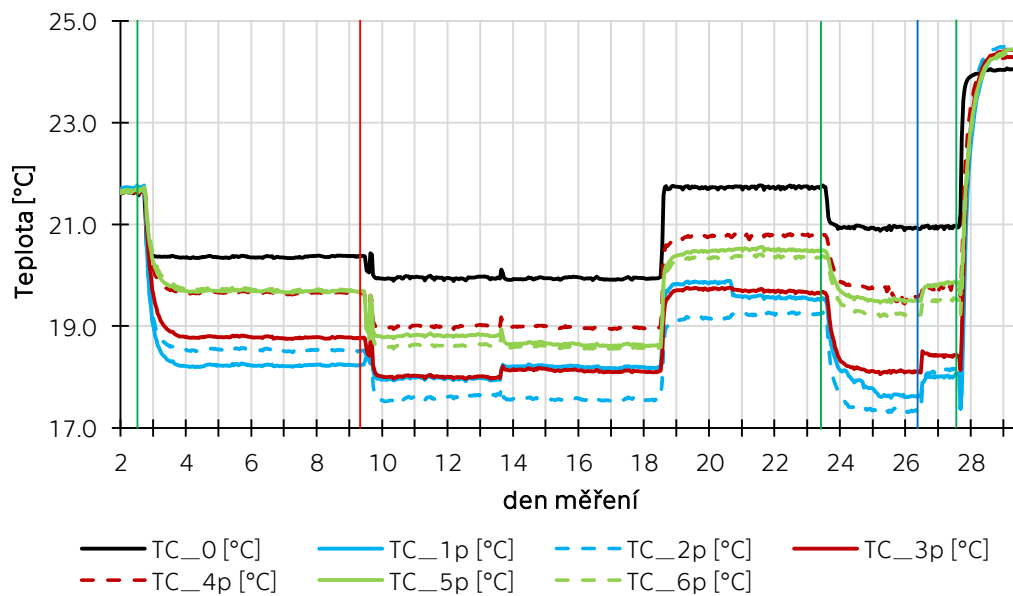


obrázek 5.3.5 - umístění čidel na povrchu okna

Ze znalosti hustoty tepelného toku a teplot obou prostředí (kombinace vzorců (9), (10), (11) a (12)) byl stanoven součinitel prostupu tepla zasklení  $U_g = 0,68$  W/m<sup>2</sup>K. Součinitel byl vypočten ze zprůměrovaných hodnot mezi 15. a 19. dnem měření.



Graf 5.3.4 - povrchové teploty zasklivačské spáry

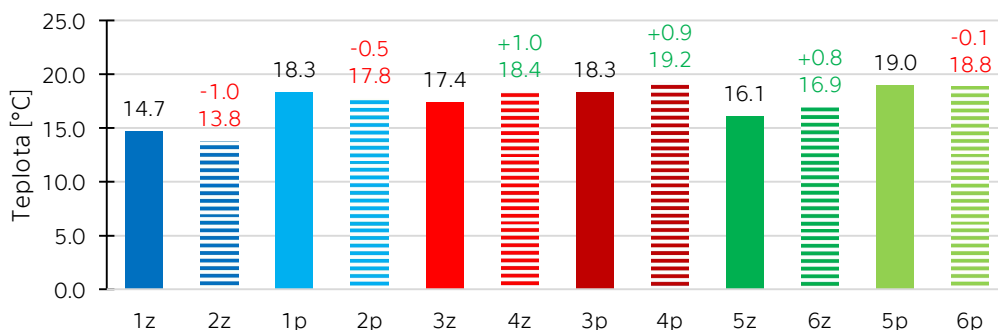


Graf 5.3.5 - povrchové teploty připojovací spáry

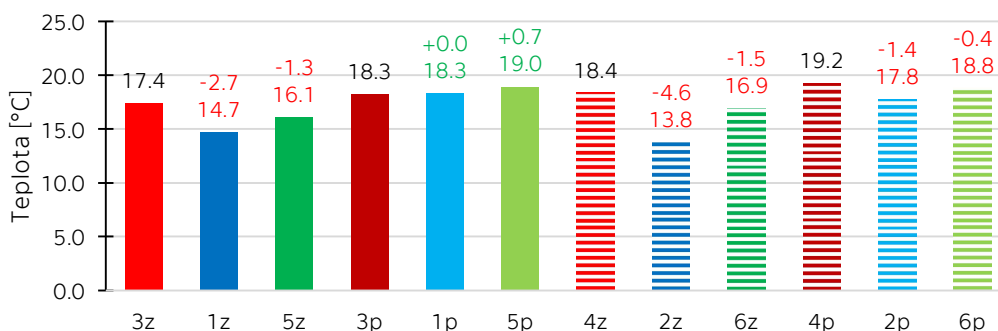
Povrchové teploty se mění primárně v důsledku změny teplot v obou komorách. V případě připojovací spáry při změně teplot v Indoor komoře (19. den) povrchová teplota reaguje skokově, zatímco při změně v Outdoor (3., 24. a 28. den) proběhla změna s větší setrvačností [zelené linie]. U zasklení je tento jev méně patrný. Z výsledků měření je dále znatelný vliv proudění vzduchu v Indoor komoře na povrchové teploty. V 10. dnu při instalaci geotextilie a poklesu proudění vzduchu došlo ke snížení všech měřených povrchových teplot, u zasklívací spáry v průměru o 1,2 °C, v případě připojovací v průměru o 0,8 °C [červená linie].

Při vytvoření přetlaku mezi 27. a 28. dnem čidla naměřila zvýšení teploty v případě připojovací spáry až o 0,8 °C (čidlo TC\_2p). V případě zasklení je maximální navýšení pouze 0,2 °C u TC\_2z. [modrá linie]

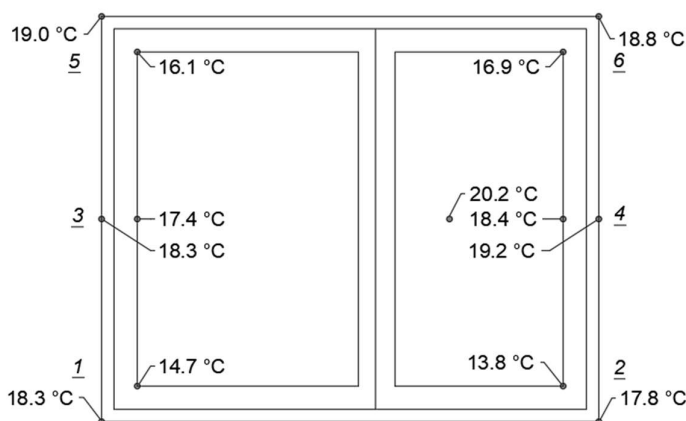
Při podmínkách Indoor komory nastavených na 22 °C a 50 % RH (do 19. dne) odpovídá teplota rosného bodu 11,4 °C. Z grafů je patrné, že této hodnotě se žádná pozice nepřiblížila. Při podmínkách 24 °C a 70 % RH (od 19. dne) je teplota rosného bodu výrazně vyšší, 18,2 °C. Pod ní klesla teplota povrchu připojovací spáry v místě parapetu (TC\_1p a TC\_2p) pouze při teplotě -13 °C v Outdoor komoře. V případě zasklívací spáry klesla teplota pod teplotu rosného bodu téměř u všech čidel (s výjimkou TC\_4z uprostřed výšky zasklení) již při teplotě - 3 °C v Outdoor komoře.



Graf 5.3.6 - porovnání ve vodorovném směru



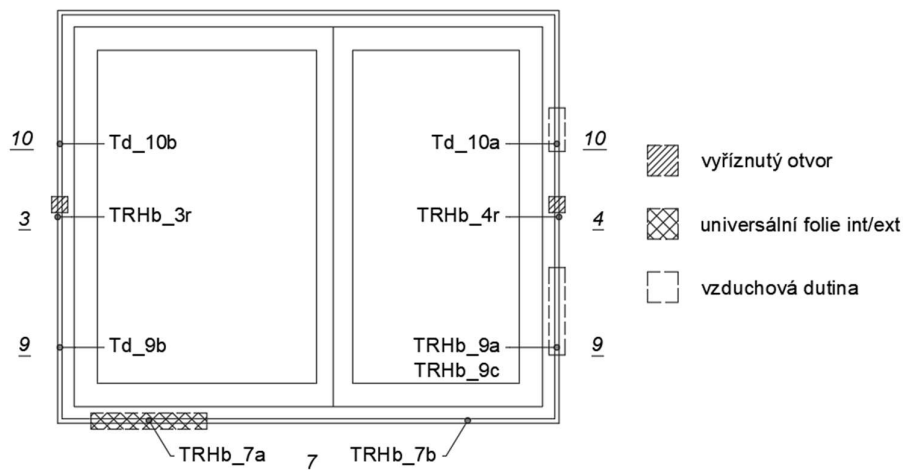
Graf 5.3.7 - porovnání ve svislém směru



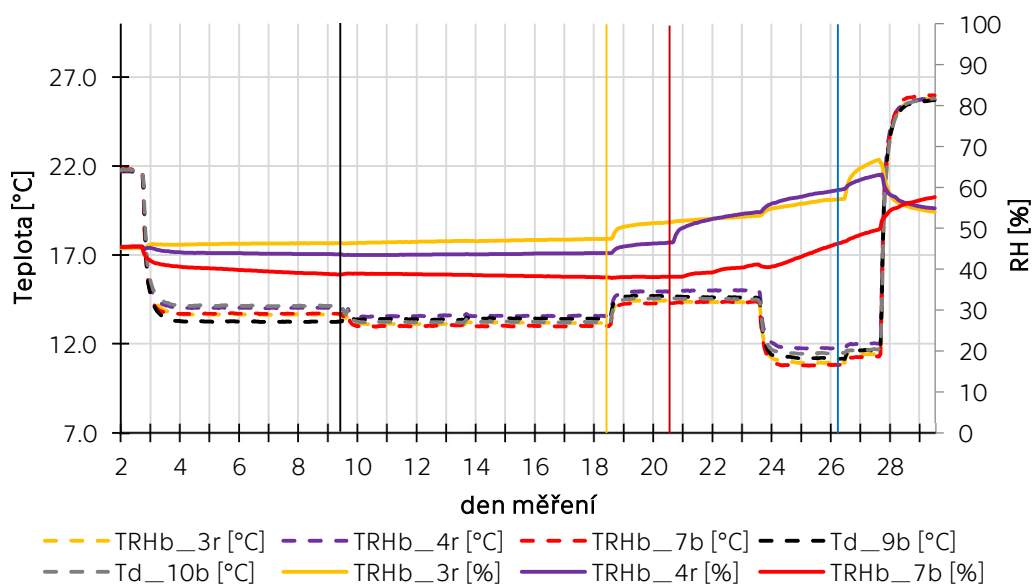
obrázek 5.3.6 - průměrné povrchové teploty

Vzájemné porovnání teplot vychází z průměrné teploty pro každé čidlo mezi 10. a 27. dnem měření (zimní stav při vytvořené cloně z geotextilie), kdy hodnota  $R_{si}$  nekolísá a je v průměru  $0,21 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Obecně platí, že povrchová teplota připojovací spáry je vždy v daném místě vyšší oproti teplotě zasklívací spáry. Z porovnání ve vodorovném směru mezi levým a pravým ostěním není patrná žádná korelace. Ve svislém směru je v případě zasklívací spáry teplota výrazně nejvyšší uprostřed výšky (pozice **3** a **4**) a nejnižší v místě parapetu (pozice **1** a **2**) – rozdíl může být důsledkem proudění vzduchu na vzorek z ventilátoru. V případě připojovací spáry jsou vzájemné rozdíly nižší.

## Připojovací spára



obrázek 5.3.7 - umístění čidel v připojovací spáře



Graf 5.3.8 - chování v připojovací spáře

V grafu jsou porovnány hodnoty všech čidel, ve kterých bylo provedení připojovací spáry velmi blízké. Je zřejmé, že teploty se po obvodu spáry výrazně neliší. Teplota se změnila při úpravě teplot v komorách (3., 19., 24. a 29. den), dále vlivem umístění geotextilie v Indoor komoře v 10. dnu teplota ve spáře poklesla v průměru o 0,6 °C, naopak čidlo Td\_9b zaznamenalo zanedbatelné zvýšení [černá linie].

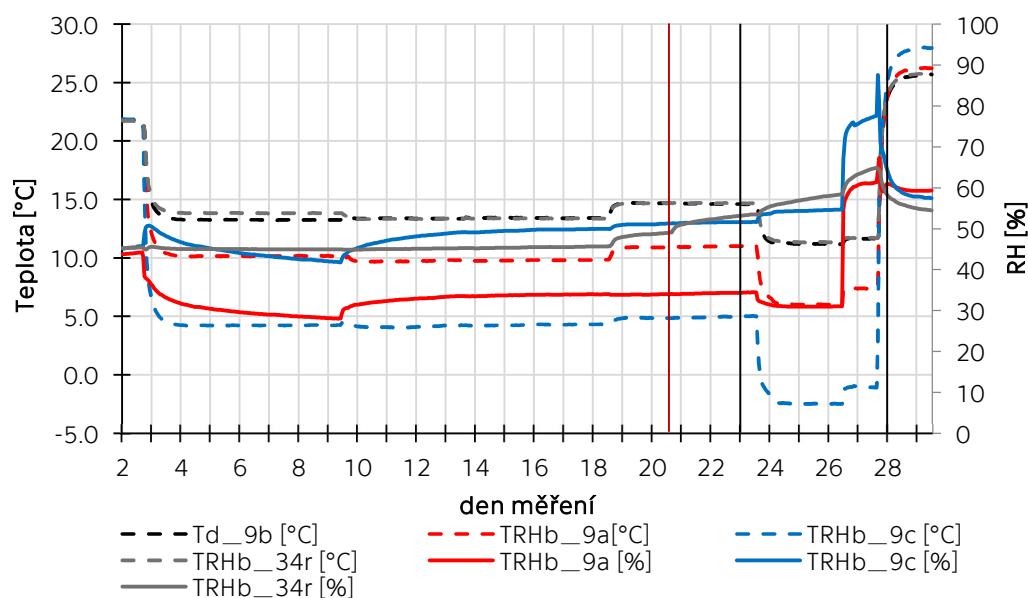
Z pohledu RH průběh v ostění má v porovnání s parapetem rozdílný charakter, zvláště patrný mezi 19. a 28. dnem měření. Zatímco v parapetu (čidlo TRHb\_7b) může být růst dán rozdílnou geometrií detailu a možnou vyšší difuzní uzavřeností směrem do exteriéru, v ostění byl růst způsoben více faktory. V 19. dnu

měření RH ve spáře v ostění (TRHb\_3r a TRHb\_4r) vzrostla o 3 % při zvýšení RH v Indoor komoře, zatímco v parapetu ke změně RH nedošlo [oranžová linie]. Efekt je velmi podobný chování ve skladbě, způsobený pravděpodobně opět vzrůstem sorpční kapacity materiálů na bázi dřeva při poklesu teploty. Další průběh RH v ostění už je ovlivněný vyříznutím parotěsné folie ve 21. dnu [červená linie]. Na vyříznutí bezprostředně reagovalo pouze čidlo TRHb\_4r zvýšením RH o cca 3,7 %. Důvodem rozdílné reakce může být způsob vypěnění spáry. Při vyříznutí folie u TRHb\_4r byly totiž patrné vzduchové dutinky v blízkosti čidla, prostup vodní páry k čidlu tak mohl mít vyšší intenzitu.

Přetlak v 27. dni měření zaznamenal nejvýrazněji čidlo TRHb\_3r – teplota se zvýšila o 0,5 °C a RH o 8,6 %, zatímco reakce TRHb\_4r je vlhkostně minimální [modrá linie].

### Vliv tepelněizolační výplně připojovací spáry

Čidlo Td\_10a umístěné v 150 mm vzduchové dutině neukazovalo žádná data, proto nebylo možné z něj zjistit vliv velikosti vzduchové dutiny na její tepelně vlhkostní chování. V grafu jsou tedy zobrazeny hodnoty čidel TRHb\_9a a TRHb\_9c v 300 mm vzduchové dutině, porovnané s teplotou Td\_9b ve shodné výškové úrovni a se zprůměrovanými hodnotami čidel TRHb\_3r a TRHb\_4r.



Graf 5.3.9 - chování v připojovací spáře – vynechaná PU pěna

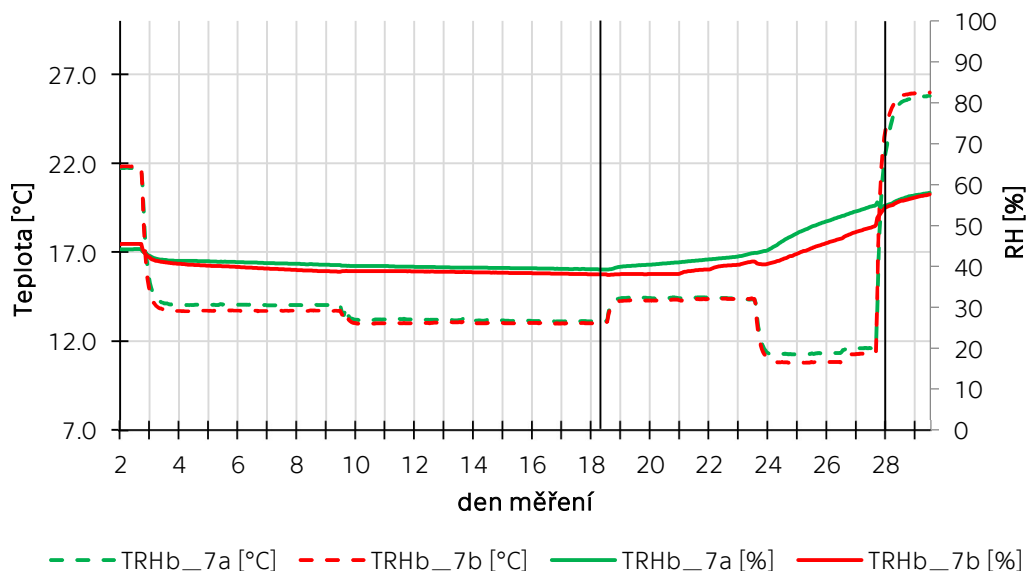
Teplota v hloubce 1/3 vykazuje v dutině nižší teplotu v průměru o 4 °C (TRHb\_9a) oproti místu s PUR pěnou (Td\_9b) a směrem k vnější paropropustné folii dále výrazně klesá (TRHb\_9c). Ve stejné pozici je RH v dutině až o 15 % nižší. Částečný tlak vodní páry je napříč dutinou shodný, a proto RH směrem k paropropustné folii roste.

Chování v dutině ani za zimních okrajových podmínek mezi 24. a 27. dnem měření neindikuje vznik pro dřevěnou konstrukci ohrožujícího stavu při 80 % RH.

K limitní hodnotě se vlhkost v dutině blíží při přetlaku mezi 27. a 28. dnem měření (navýšení RH v průměru o 25 % a teploty o 1,2 °C). Výchylka atakující 90 % RH je pouze důsledkem skokové změny podmínek v Outdoor komoře. [úsek ohraničený černou linií]

Relativní vlhkosti nelze porovnat od 21. dne, kdy TRHb\_34r ukazuje hodnotu zkrácenou vyříznutím folie. [červená linie]

### Rozdílné folie v přípojovací spáře

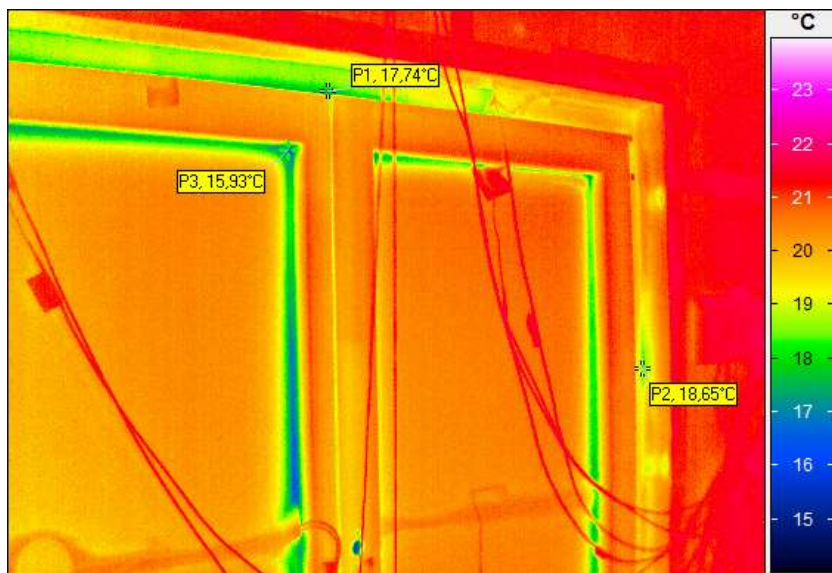


Graf 5.3.10 - chování v přípojovací spáře – rozdílné folie

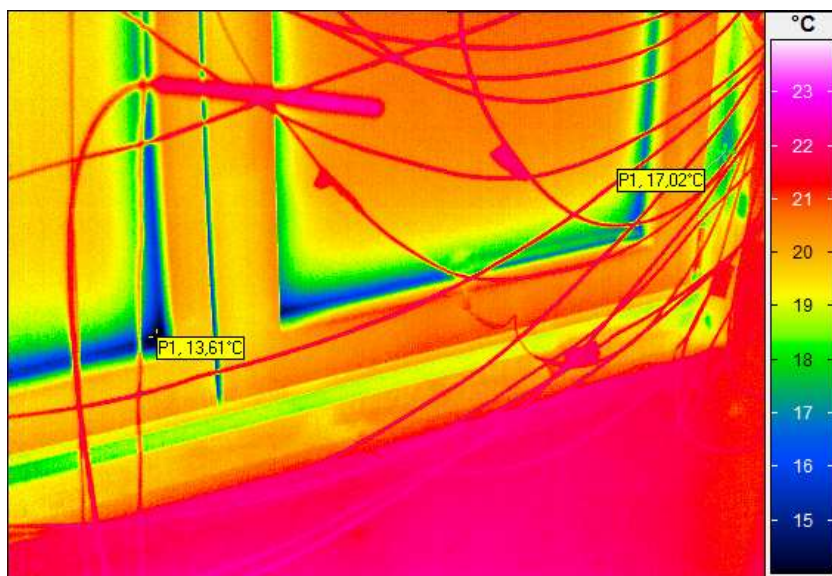
Rozdílné výrobky použité pro vnitřní a vnější uzávěr nezpůsobily během měření výrazné rozdíly v tepelně vlhkostním chování přípojovací spáry. Při větším vlhkostním spádu mezi 19. a 28. dnem měření je v případě illbruck folie (TRHb\_7a) v přípojovací spáře naměřena vyšší hodnota RH až o 5 % (také vyšší částečný tlak v.p.) oproti folii Vekra (TRHb\_7b) [úsek ohraničený černou linií]. Při opačném vlhkostním toku v letním stavu jsou hodnoty shodné.

## Termovizní kamera

Snímky termovizní kamerou byly pořízeny 31.10.2023 (14. den měření). V Indoor komoře bylo během focení nastaveno 22 °C a 50 % RH, v Outdoor -3 °C a 70 % RH. Pro účely snímkování bylo zasklení přelepeno matnou černou fólií.

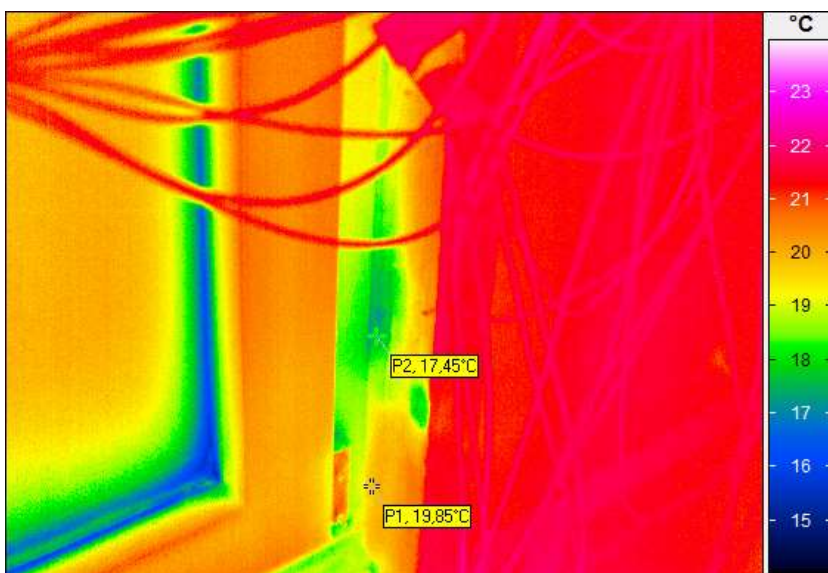


obrázek 5.3.8 - termovizní snímek 1



obrázek 5.3.9 - termovizní snímek 2





obrázek 5.3.10 - termovizní snímek 3

Snímky potvrzují výsledky měření, tedy že nejchladnější oblastí je zasklívací spára v parapetu následovaná zasklívací spárou v ostění. Dále je v přípojovací spáře u nadpraží viditelná chladnější oblast způsobená pravděpodobným nedokonalým seřízením okna.

Snímky také demonstrovují důsledek rozdílných výšek vzduchových dutin - 300 mm vysoká dutina je ve spodní části (17,45 °C) o více než 2 °C chladnější než nejbližší místo s PUR pěnou (19,85 °C). V případě 150 mm vysoké dutiny pokles teploty je méně výrazný (18,65 °C). S rostoucí velikostí dutiny tedy dochází k větší cirkulaci vzduchu, které se projeví snižováním povrchové teploty. Za okrajových podmínek v době měření jsou povrchové teploty dutin nad teplotou rosného bodu, riziko kondenzace však za okrajových podmínek následujících etap nelze vyloučit.

### 5.3.4 Diskuse

Do tepelně vlhkostního chování konstrukce se v přípojovací spáře a dále ve skladbě projevují sorpční vlastnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva. Relativní vlhkost má tendenci při zvýšení teploty skokově klesnout a naopak, z důvodu zvýšení sorpční kapacity dřeva při poklesu teploty.

Povrchové teploty v detailu okna se mění s výškou, kde nejchladnější oblast se nachází ve spárách v oblasti parapetu. Zde za vysoké vlhkostní zátěže v interiéru a při nízké teplotě v exteriéru dochází k výskytu kondenzátu. Faktorem ovlivňující povrchové teploty je proudění vzduchu vyvolané ventilátorem v Indoor komoře, s tím souvisí množství kabeláže, stínící například čidlo měřící teplotu u skladby TC\_12a a v důsledku zkreslující výsledek vypočtené hodnoty  $\lambda$ .

Během měření na žádném snímaném místě v konstrukci včetně míst s vytvořenými umělými vadami nedošlo ke kondenzaci vodní páry ani k překročení pro dřevěnou konstrukci ohrožujícího stavu při 80 % RH. Pozdější etapy ovšem

probíhaly v krátkých časových úsecích a nedošlo k vlhkostnímu ustálení. Nelze s jistotou konstatovat, že za okrajových podmínek podle 5. etapy (interiér 24 °C a 70 % RH; exteriér -13 °C a 70 % RH) nedojde k překročení 80 % RH v místech měřených ve spáře (TRHb\_7a, TRHb\_7b, TRHb\_3r, TRHb\_4r) a v místě uložení stropnice (TRHb\_11a, TRHb\_11b). Na druhou stranu zmíněné okrajové podmínky v reálu netrvají obvykle delší dobu.

Tepelně vlhkostní chování v reálné konstrukci bude ovlivněné některými prvky, které nejsou součástí experimentálního vzorku. Instalační předstěna s tepelnou izolací může způsobit kondenzaci vodních par na HVV při vyšším vlhkostním zatížení, dále změnit rozložení teplot v připojovací spáře. Případný venkovní obklad s provětrávanou dutinou v zimním stavu zvýší povrchovou teplotu na difuzní folii. Venkovní parapet z kovu může působit jako bariéra pro transport vodní páry.

### 5.3.5 Závěr

Výsledky měření prokázaly, že detail zabudovaného dřevohliníkového okna je v difúzně otevřené konstrukci na bázi lehkého skeletu bezpečný z pohledu tepelné techniky. Pro zvolenou konstrukci lze tvrdit, že menší nedostatky v provedení připojovací spáry nemají významný vliv na funkčnost a životnost detailu za běžných klimatických podmínek v ČR. Menším nedostatkem je v případě folie chápáno její lokální drobné porušení a u výplně spáry například nízká expanze, nedokonalé vypěnění, nebo vynechání pěny na malé ploše.

Předpokladem tvrzení je celkově velmi kvalitní návrh a provedení detailu kombinovaný se skutečně jednou lokální chybou. Dále nesmí docházet k jejich kumulaci. Přesto autor důsledně doporučuje provedení bez chyb podle normy ČSN 74 6077 [1].

## 6 Výpočetní část

Výpočetní část je provedena v programech Teplo, Area, WUFI Pro a WUFI 2D.

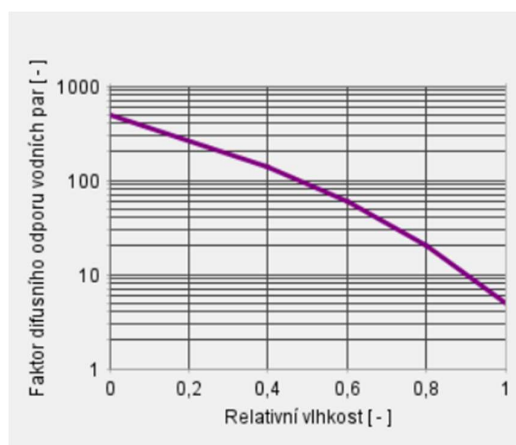
### 6.1 Validace výpočetních modelů dle experimentálního vzorku

#### Zadané parametry materiálu

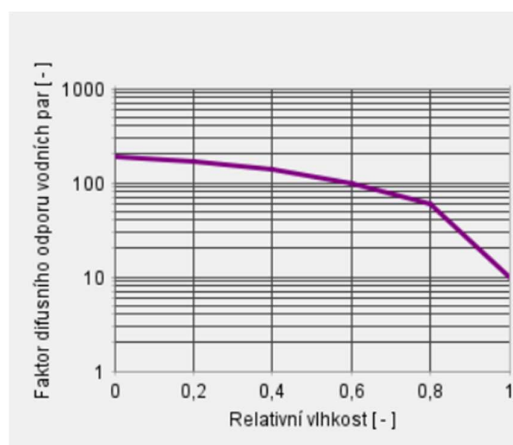
Zadané parametry tepelně izolačních materiálů a folií odpovídají hodnotám uvedených v technických listech výrobců, případně databázi materiálů v programech. Pro součinitele tepelné vodivosti  $\lambda$  se využily hodnoty vypočítané z měření na vzorku (materiály ve skladbě a zasklení). V případě OSB a smrkového dřeva byla do WUFI zanesena závislost faktoru difuzního odporu vodních par na relativní vlhkosti:

materiál	$\lambda$ [W/mK]	$\mu$ [-]
Kronospan OSB 3	0.077	200 (WUFI dle RH)
KVH	0.09	130 (WUFI dle RH)
dřevěný rám okna	0.09	130 (WUFI dle RH)
Isover Uni	0.039	1
Steico Protect	0.037	5
PUR pěna	0.04	10
zasklení (zadáno kompletně)	0.033	1 000 000
Soudal SWS Foil interiér	-	$s_d=550$ m
Soudal SWS Foil exterér	-	$s_d=0.06$ m
Juta Jutadach 135	-	$s_d=0.02$ m

Tabulka 6.1.1 - materiálové charakteristiky



obrázek 6.1.1 - závislost RH na  $\mu$  OSB (WUFI)



obrázek 6.1.2 - závislost RH na  $\mu$  KVH (WUFI)

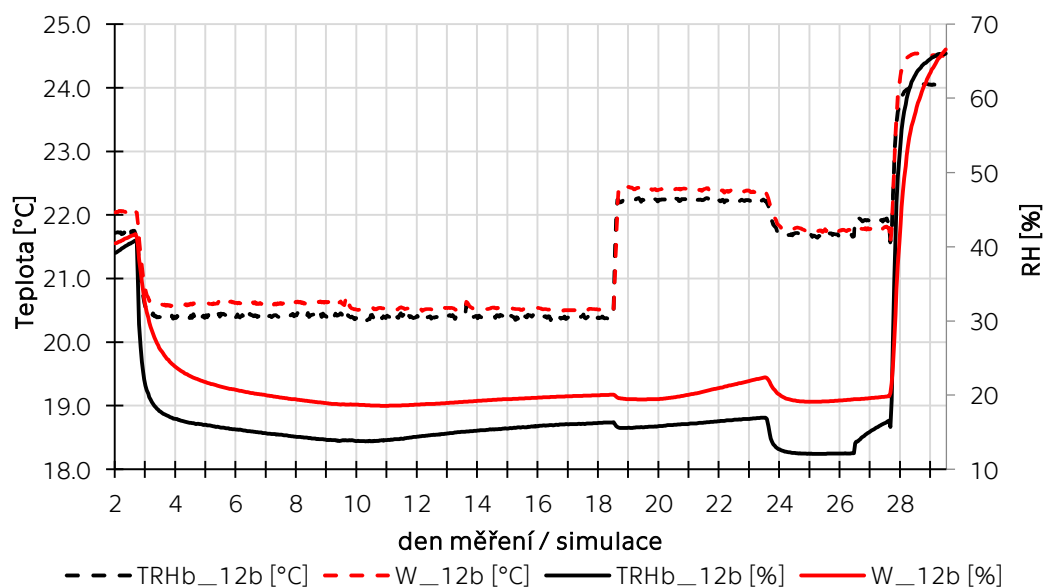
## 6.1.1 Skladba stěny v programu WUFI Pro a Teplo

### Porovnání s programem WUFI Pro

konstrukce	skladba
charakter	neustálený stav
porovnávaný úsek měření	2. - 30. den měření
okrajové podmínky interiéru	proměnné dle etapy
okrajové podmínky exteriéru	proměnné dle etapy
odpor při přestupu tepla $R_{si}$	0,064 m <sup>2</sup> K/W
odpor při přestupu tepla $R_{se}$	0,055 m <sup>2</sup> K/W

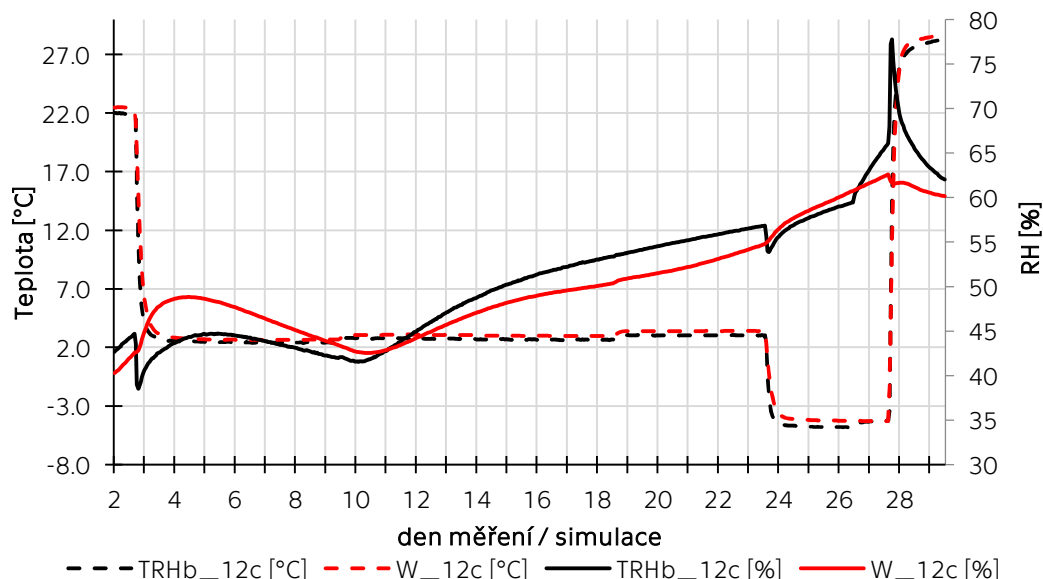
Tabulka 6.1.2 - charakter modelu ve WUFI Pro

Natavená počáteční relativní vlhkost na počátku na 40 % a teplota 22 °C odpovídá počátečnímu ustálení v klimatické dvojkomoře do 3. dne. Hodnoty  $R_{si}$  a  $R_{se}$  jsou vypočteny z průměrných výsledků 14.-19. dne měření a odpovídají stavu se zakrytým ventilátorem geotextilií. V následujících grafech jsou průběhy měření zobrazeny černou barvou, výsledky simulace z WUFI Pro červenou (v legendě symbol W):



Graf 6.1.1 - chování ve skladbě – OSB | ISOVER (pozice b)

Simulace ve WUFI v pozici **b** (obrázek 5.3.4) ukazuje téměř shodný charakter průběhu hodnot v porovnání s měřením. Odchylna v chování je pouze mezi 27. a 28. dnem měření způsobená nastaveným přetlakem. Rozdíl teplot je téměř zanedbatelný, celkově WUFI ukazuje vyšší teplotu – průměrně o 0,2 °C, maximálně o 0,5 °C. Z hlediska relativní vlhkosti je rozdíl ve WUFI vyšší – průměrně o 4,3 %, maximálně o 10,9 %.



Graf 6.1.2 - chování ve skladbě – ISOVER | STEICO (pozice c)

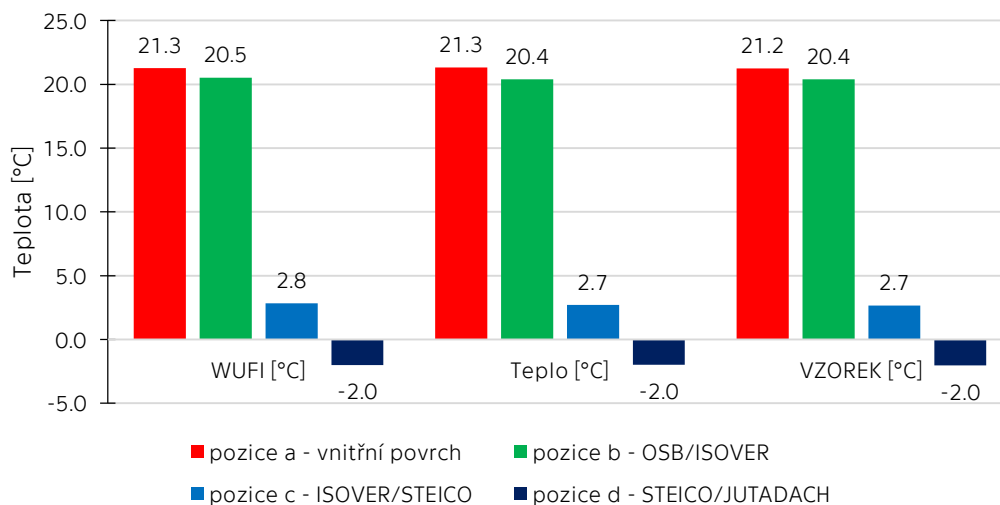
V pozici **c** je rozdíl teplot shodně zanedbatelný, celkově WUFI ukazuje opět vyšší teplotu – průměrně o 0,4 °C, maximálně o 1,4 °C. Z globálního pohledu lze průběh RH prohlásit charakterem za podobný, ovšem s vyššími rozdíly – mezi 3. a 11. dnem je RH podle WUFI v průměru vyšší o 2,8 %, maximálně o 5,3 %, mezi 11. a 23. dnem naopak WUFI ukazuje hodnotu RH nižší průměrně o 2,2 %, maximálně o 3,1 %. Výrazný nesoulad je viditelný z 3., 24. a 28. dne, kde se měřené RH mění skokově (v 28. dni způsobený rozdíl až 16 %), zatímco simulace WUFI skokové chování neukazuje – program zřejmě neumí pracovat s proměnnou sorpční kapacitou v závislosti na teplotě.

### Porovnání s programem Teplo

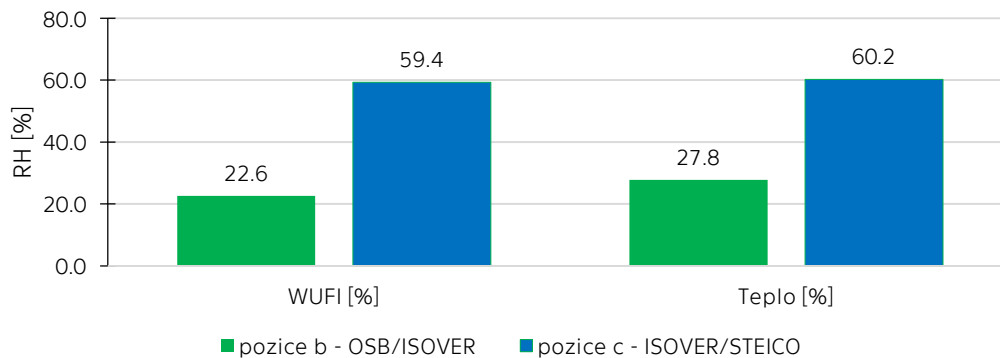
konstrukce	skladba
charakter	ustálený stav
porovnávaný úsek měření	14. - 18. den měření
okrajové podmínky interiér	21,53 °C; 52,62 % RH
okrajové podmínky exteriér	-2,25 °C; 69,20 % RH
odpor při přestupu tepla $R_{si}$	0,064 m <sup>2</sup> K/W
odpor při přestupu tepla $R_{se}$	0,055 m <sup>2</sup> K/W

Tabulka 6.1.3 - charakter modelu v programu Teplo

Z hlediska transportu vlhkosti nebylo během simulace v klimatické dvojkomoře dosaženo ustáleného stavu, pro hodnocení výsledků v programu Teplo byl proto ustálený stav dosimulován v programu WUFI Pro. Do programu byly vloženy okrajové podmínky odpovídající průměrným hodnotám změřených parametrů prostředí v komoře ze 4 dnů 14.-18. dne, následně jsou průměrné okrajové podmínky nastaveny na dalších 42 dní (6 týdnů). Hodnoty  $R_{si}$  a  $R_{se}$  odpovídají stavu při zakrytém ventilátoru geotextilií.



Graf 6.1.3 - porovnání výsledků ve skladbě – teplota



Graf 6.1.4 - porovnání výsledků ve skladbě – relativní vlhkost

Z pohledu průběhu teplot jsou rozdíly zanedbatelné. Vyšší rozdíl RH přes 5 % v pozici **b** způsobilo zřejmě zohlednění závislosti faktoru difuzního odporu na RH ve WUFI.

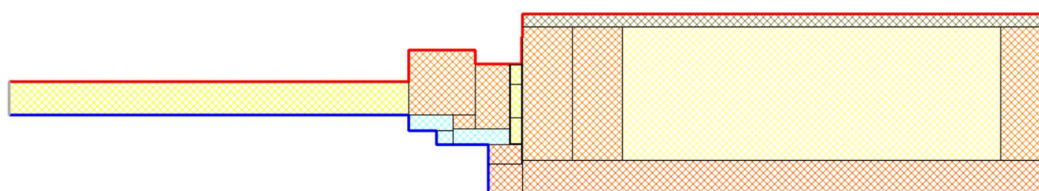
## 6.1.2 Detail ostění v programu WUFI 2D a Area

### Porovnání s programem WUFI 2D

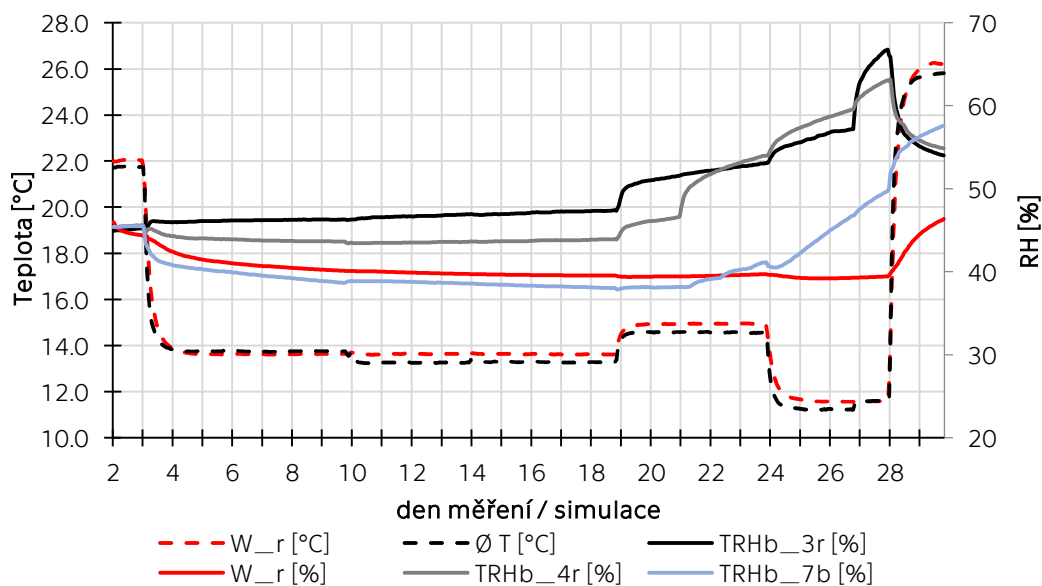
konstrukce	Detail ostění
charakter	neustálený stav
porovnávaný úsek měření	2. - 30. den měření
okrajové podmínky interiér	proměnné dle etapy
okrajové podmínky exteriér	proměnné dle etapy
odpor při přestupu tepla $R_{si}$	0,064 m <sup>2</sup> K/W (okno 0,21 m <sup>2</sup> K/W)
odpor při přestupu tepla $R_{se}$	0,055 m <sup>2</sup> K/W

Tabulka 6.1.4 - charakter modelu ve WUFI 2D

Strategie výpočtu detailu odpovídá výpočtům skladby. Na obou stranách modelu je nastavena adiabatická hranice (pravá strana byla na vzorku v kontaktu se zkušebními rámem, přesto je vzdálenost od detailu dostatečná pro jeho zanedbání).



obrázek 6.1.3 - detail ostění ve WUFI 2D



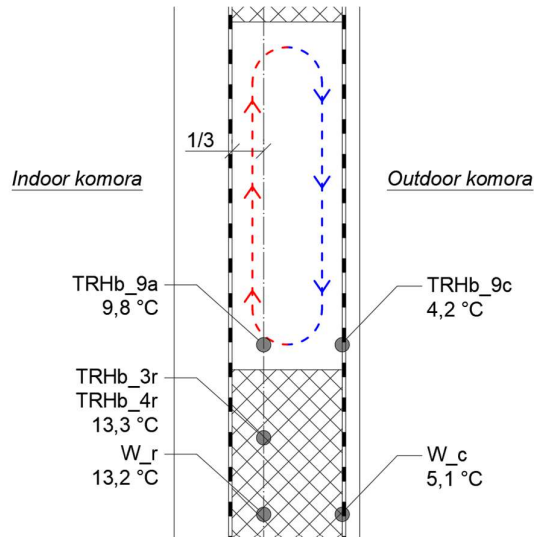
Graf 6.1.5 - chování v připojovací spáře

Průběh teplot ve WUFI je porovnán se zprůměrovanými hodnotami čidel TRHb\_3r, TRHb\_4r, Td\_9b a Td\_10b. Vzájemné rozdíly jsou minimální, od 9. dne čidla ukazují nižší teplotu o 0,4 °C.

Z pohledu RH se simulace ve WUFI do 19. dne měření přibližně shoduje s měřeními hodnotami. Mezi 19. a 28. dnem dochází u vzorku k výrazným nárůstům RH, zatímco ve WUFI je hodnota přibližně ustálená na 40 %.

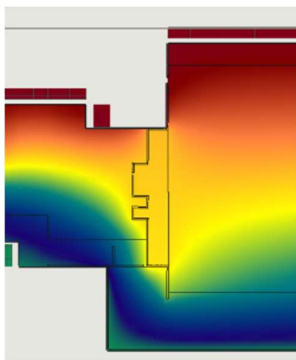
### Vynechaná PUR pěna v programu WUFI 2D

Místo s vynechanou PUR pěnou vytvářející vzduchovou dutinu není množné ve WUFI 2D věrně nasimulovat. Důvodem je cirkulace vzduchu v dutině způsobená teplou stranou v místě parotěsné folie a chladnou stranou v místě paropropustné folie. Pro popis detailního odůvodnění je vybrán 15. den měření:

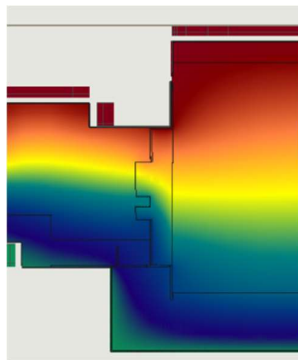


obrázek 6.1.4 - svislý řez přípojovací spárou v místě dutiny

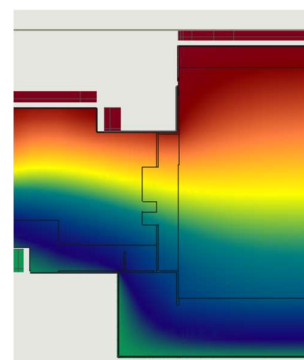
Čidlo TRHb\_9a umístěné ve spodní úrovni 300mm dutiny na rámu v konkrétní den naměřilo průměrně teplotu 9,8 °C, zatímco čidlo TRHb\_9c umístěné na KVH u vnitřního líce paropropustné folie 4,2 °C. Průměrná teplota ve stejné době v místech PUR pěny je 13,3 °C (podle WUFI 13,2 °C), u vnitřního líce paropropustné folie WUFI ukazuje 5,1 °C. Zatímco teploty u paropropustné folie jsou podobné bez ohledu na vyplnění (rozdíl 0,9 °C), teplota na rámu okna je nižší o 3,5 °C. Z následujících výstřižků z WUFI 2D je zřejmé, že úpravou parametrů přípojovací spáry nelze docílit poklesu teploty ve sledované pozici 1/3 hloubky rámu:



obrázek 6.1.5 - přípojovací spára kov (WUFI 2D)



obrázek 6.1.6 - přípojovací spára aerogel (WUFI 2D)



obrázek 6.1.7 - přípojovací spára PUR pěna (WUFI 2D)



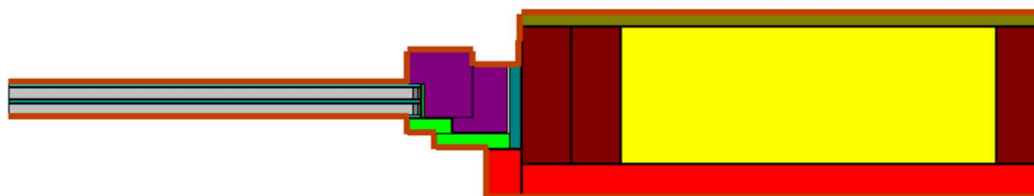
Špatný izolant (kov) zvýší teplotu, zatímco velmi výkonný izolant (aerogel) teplotu zanedbatelně sníží. Řešením by bylo jedinečně výrazně snížit součinitel tepelné vodivosti rámu okna, tento krok by byl ovšem chybný. Není tak možné ve WUFI 2D zadat parametry odpovídající vzduchové dutině pomocí libovolného materiálu, který by zajistil teplotu na rámu blízkou měřené hodnotě a dále sledovat důsledky.

### Porovnání s programem Area

konstrukce	Detail ostění
charakter	ustálený stav
porovnávaný úsek měření	14. - 18. den měření
okrajové podmínky interiér	21,53 °C; 52,62 % RH
okrajové podmínky exteriér	-2,25 °C; 69,20 % RH
odpor při přestupu tepla $R_{si}$	0,064 m <sup>2</sup> K/W (okno 0,21 m <sup>2</sup> K/W)
odpor při přestupu tepla $R_{se}$	0,055 m <sup>2</sup> K/W

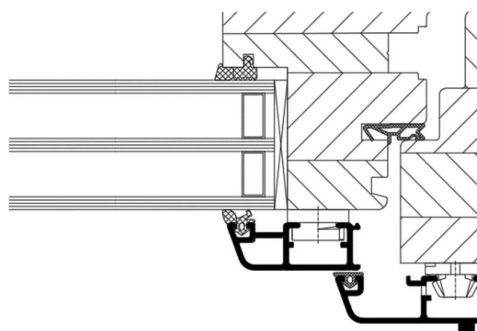
Tabulka 6.1.5 - charakter modelu v programu Area

Geometrie detailu zadaná v Area je pozměněná oproti detailu ve WUFI 2D. V připojovací spáře je vymodelovaná jednoduchá geometrie se snahou odhalit, zda je toto provedení pro praxi dostatečné. Naproti tomu je detail zasklívací spáry proveden Two-box modelem pro rychlé porovnání teplot zasklívací spáry s měřeními.

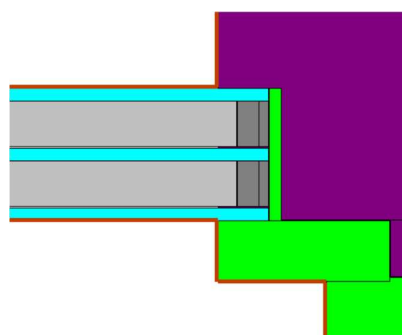


obrázek 6.1.8 - detail ostění v Area

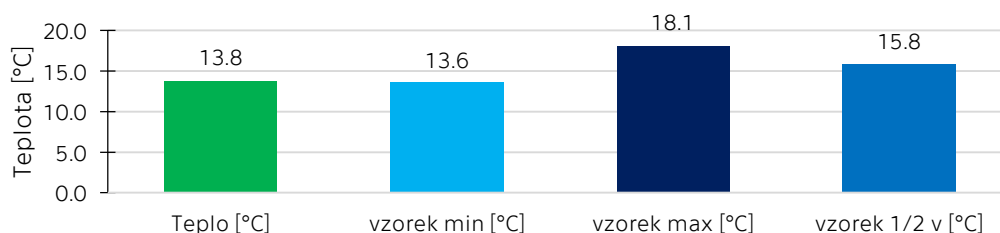
Two-box model je výpočetní postup pro zjednodušené vymodelování distančních rámečků v místě zasklívací spáry okna s vyjádřením ekvivalentní tepelné vodivosti. Distanční rámeček je nahrazen dvěma boxy s danými rozměry. Spodní box 1 má pevně danou výšku 3 mm a  $\lambda = 0,4 \text{ W/mK}$ . Horní box má výšku odvislou od výšky samotného rámečku a  $\lambda_{eq}$  je získána porovnáním zjednodušeného a reálného detailu po dosažení shodné velikosti tepelného toku. Ekvivalentní hodnoty většinou udávají výrobci distančních rámečků. V konkrétním okně použitý rámeček Chromatech Ultra F je nahrazen boxem 2 s výškou 6,9 mm a  $\lambda_{eq} = 0,28 \text{ W/mK}$  [36].



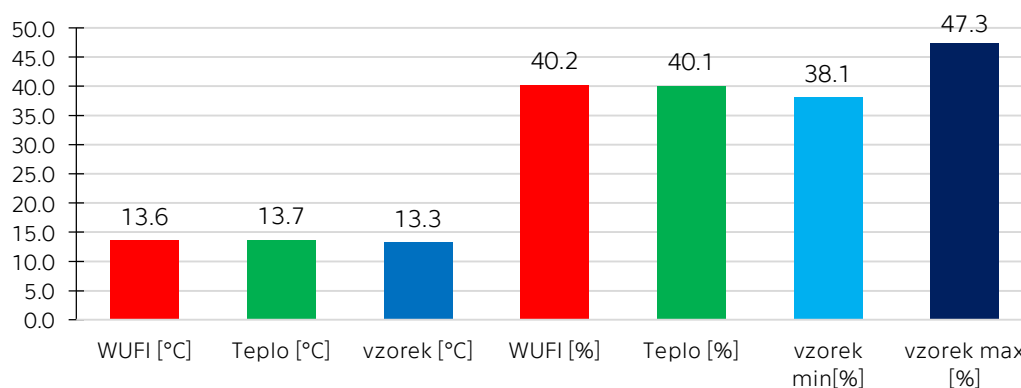
obrázek 6.1.9 - skutečný detail zasklení



obrázek 6.1.10 - two box model (Area)



Graf 6.1.6 - porovnání výsledků zasklívací spáry – teplota



Graf 6.1.7 - porovnání výsledků 1/3 hl. rámu – teplota a RH

Výsledky ustáleného stavu zobrazené pro WUFI 2D opět vznikly simulací ustáleného stavu po 42 dnů.

Teplota zasklívací spáry je velmi blízká minimální naměřené teplotě u parapetu (čidlo TC\_2z), oproti čidlu uprostřed výšky zasklení (TC\_5z) je ovšem nižší o 2 °C.

Teplota připojovací spáry se v programech liší o zanedbatelných 0,1 °C a jsou téměř shodné s měřením. To samé platí pro RH. Přímé porovnání ustálené RH v programech s výsledky měření může být zavádějící, v grafu spíše slouží pro doplnění, že se vypočítané hodnoty neodchylují.

### 6.1.3 Diskuse

V případě **skladby** bylo dosaženo následujících výsledků:

- a) Rozdíl průběhů teplot ve WUFI Pro a z měření je téměř zanedbatelný a z pohledu RH se rozdíl pohyboval kolem 5 %. Skokové výchyly ve WUFI Pro nebyly zaznamenány a pravděpodobně souvisí s proměnnou sorpční kapacitou v závislosti na teplotě. Výchyly RH na experimentálních vzorcích nastaly pouze za výrazných změn okrajových podmínek a v krátkém čase, proto nemusí být považované za rizikové.
- b) Výsledky WUFI Pro a Teplo se v ustáleném stavu shodují se zanedbatelným rozdílem

V případě **detailu ostění** bylo dosaženo následujících výsledků:

- a) Průběh teplot v připojovací spáře se ve WUFI 2D s měřením shoduje v celém rozsahu, RH pouze do 19. dne. Rozdílný detail připojovací spáry v parapetu (TRHb\_\_7b), dále limit programu zanedbávající závislost sorpční kapacity dřeva na teplotě, vyříznutí folie, vytvoření přetlaku v komoře (TRHb\_\_3r a TRHb\_\_4r) – výčet těchto faktorů vede k tomu, že výsledek simulace ve WUFI 2D lze i po 19. dnu považovat za dostatečně kvalitní. Vyšší přesnost korelující s měřením lze dosáhnout výrazným snížením ekvivalentní difuzní tloušťky  $s_d$  vnitřní parotěsné folie (z 550 m na 55 m), úprava by ovšem nebyla korektní.
- b) Program Area v porovnání s WUFI 2D ukazuje téměř identické výsledky velmi blízké měření vzorku. Rozdíl není patrný ani z pohledu rozdílné geometrie rámu v připojovací spáře.
- c) Vzduchovou dutinu nelze v místě vynechané PUR pěny v programu WUFI 2D provést. Programy zřejmě není možné použít na detaily, ve kterých se objevuje vertikální cirkulace vzduchu – z toho důvodu nelze věrně namodelovat detail u parapetu, který je ovlivněný prouděním vzduchu v interiéru.

### 6.1.4 Závěr

Validace výpočetních modelů dle experimentálního vzorku prokázala, že lze sestrojít numerické modely věrně simulující skutečné chování konstrukce. Použité programy jsou pro hodnocení při ustáleném stavu rovnocenné.

## 6.2 Analýza variant detailu ostění

Cílem úlohy je zanalyzovat vliv rozdílné skladby, okna a celkového provedení na tepelně vlhkostní chování připojovací spáry ve WUFI 2D, dále doplňkově v Area. Úloha se zabývá pouze variantami detailu ostění, jelikož pro detaily parapetu a nadpraží použité programy neumí zohlednit vertikální proudění vzduchu u vnitřního povrchu.

Geometrie všech variant je v maximální možné míře vzájemně shodná. Vzhledem k tomu, že všechny níže popsané varianty jsou v praxi běžně realizované, tak jsou jejich výsledky dále vyhodnoceny podle českých a zahraničních norem.

### 6.2.1 Modely WUFI 2D

#### Parametry výpočetního modelu

Všechny tepelně vlhkostní parametry materiálů jsou převzaty z technických listů výrobců, případně z databáze materiálů v programech. Důvodem je vysoká nejistota měření hustoty tepelného toku ve skladbě. Pro všechny varianty je vymodelovaná v interiéru instalační předstěna s minerální izolací a dřevěným roštem.

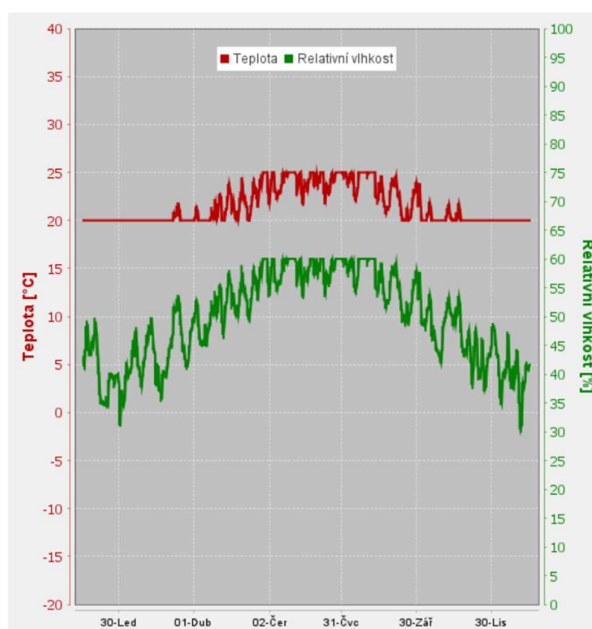
materiál	$\lambda$ [W/mK]	$\mu$ [-]
Kronospan OSB 3	0.13	200 (WUFI dle RH)
KVH	0.09	130 (WUFI dle RH)
dřevěný rám okna	0.09	130 (WUFI dle RH)
plastový rám okna	0.09	1 000 000
Isover Uni	0.038	1
Steico Protect	0.05	5
pěnový polystyren	0.037	50
PUR pěna	0.04	10
zasklení (zadáno kompletně)	0.033	1 000 000
Soudal SWS Foil interiér	-	$s_d=550$ m
Soudal SWS Foil exteriér	-	$s_d=0.06$ m
illbruck ME350 interiér	-	$s_d=10$ m
illbruck ME351 exteriér	-	$s_d=2$ m
Juta Jutadach 135	-	$s_d=0.02$ m
Parotěsná folie	-	$s_d=30$ m
Fermacell deska	0.32	13
Vnější omítkové souvrství	-	$s_d=2.5$ m

Tabulka 6.2.1 - materiálové charakteristiky

V Programu WUFI 2D byl nastaven pro všechny varianty jednotný výpočetní postup. Adiabatická hranice je uvažovaná na obou stranách modelu. Orientace modelu je nastavena na sever.

konstrukce	detail ostění
charakter	neustálený stav
hodnocený úsek měření	1.10. 2018 - 1.10.2021
Počáteční podmínky	15 °C a 60 % RH
okrajové podmínky interiér	střední vlhk. zat. (ČSN EN 15026 [37])
okrajové podmínky exteriér	Hradec Králové
odpor při přestupu tepla $R_{si}$	0,13 m <sup>2</sup> K/W (okno 0,25 m <sup>2</sup> K/W)
odpor při přestupu tepla $R_{se}$	0,04 m <sup>2</sup> K/W (2pl 0,13 m <sup>2</sup> K/W)

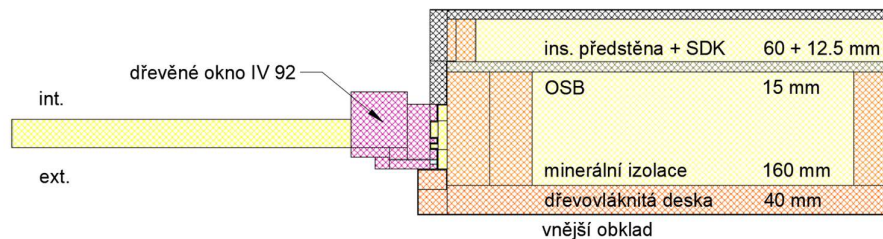
Tabulka 6.2.2 - charakter normového detailu ostění ve WUFI 2D



obrázek 6.2.1 - vnitřní okrajové podmínky ve WUFI 2D dle ČSN EN 15026 [37]

### Varianta 1a – dvouplášťová fasáda + dřevěné okno

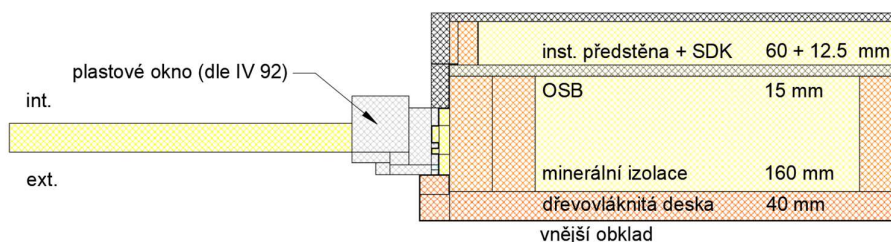
Rám okna je celodřevěný a geometrií odpovídá eurooknu IV 92. Vnější obklad není součástí modelu. Součinitel prostupu tepla  $U = 0,160 \text{ W/m}^2\text{K}$  odpovídá doporučené hodnotě pro pas. domy  $U_{pas} = 0,18 - 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$  dle ČSN 73 0540-2 [11].



obrázek 6.2.2 - varianta 1a ve WUFI 2D

### Varianta 2a – dvouplášťová fasáda + plastové okno

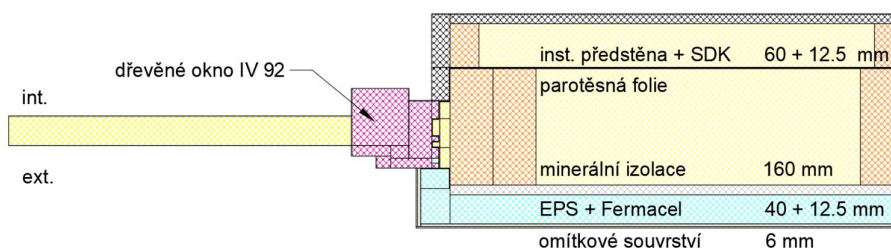
Rám okna geometrií odpovídá eurooknu IV 92, ovšem materiálově je nastaven na plast. Vnější obklad není součástí modelu. Součinitel prostupu tepla  $U = 0,160 \text{ W/m}^2\text{K}$  odpovídá doporučené hodnotě pro pas. domy  $U_{\text{pas}} = 0,18 - 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$  dle ČSN 73 0540-2 [11].



obrázek 6.2.3 - varianta 2a ve WUFI 2D

### Varianta 3a – skladba s KZS + dřevěné okno

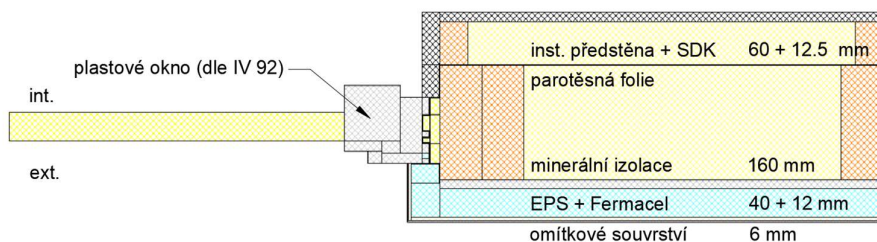
Rám okna je celodřevěný a geometrií odpovídá eurooknu IV 92. Jako podklad pro EPS je navržena sádrovláknitá deska s lepidlem. Z interiéru je namísto OSB desky navržena parotěsná zábrana. Součinitel prostupu tepla  $U = 0,155 \text{ W/m}^2\text{K}$  odpovídá doporučené hodnotě pro pas. domy  $U_{\text{pas}} = 0,18 - 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$  dle ČSN 73 0540-2 [11].



obrázek 6.2.4 - varianta 3a ve WUFI 2D

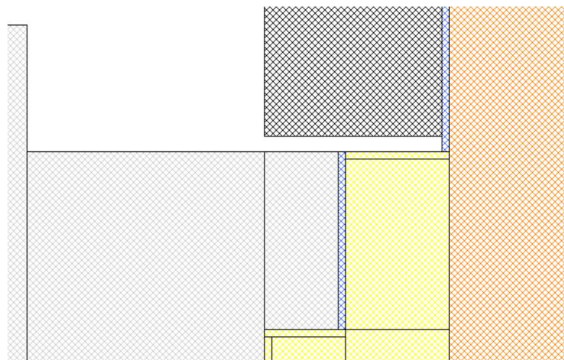
### Varianta 4a – skladba s KZS + plastové okno

Rám okna geometrií odpovídá eurooknu IV 92, materiálově je nastaven na plast. Jako podklad pro EPS je navržena sádrovláknitá deska s lepidlem. Z interiéru je namísto OSB desky navržena parotěsná zábrana. Součinitel prostupu tepla  $U = 0,155 \text{ W/m}^2\text{K}$  odpovídá doporučené hodnotě pro pas. domy  $U_{\text{pas}} = 0,18 - 0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$  dle ČSN 73 0540-2 [11].



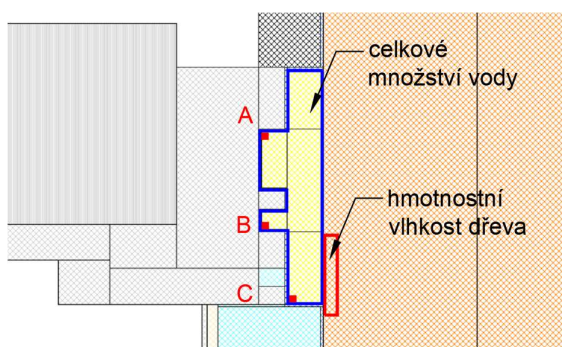
obrázek 6.2.5 - varianta 4a ve WUFI 2D

Poslední varianta byla dále modifikována do 3 podvariant – **varianta 4b** zahrnuje okenní folie illbruck ME350 interiér a illbruck ME351 exteriér; **varianta 4c** je provedena s chybějící vnitřní folií a s vnější Soudal SWS Foil exteriér; **varianta 4d** současně s chybějící folií zahrnuje vysokou vlhkostní zátěž v interiéru (ČSN EN 15026 [37]).



obrázek 6.2.6 - vynechaná vnitřní folie ve WUFI 2D (4c a 4d)

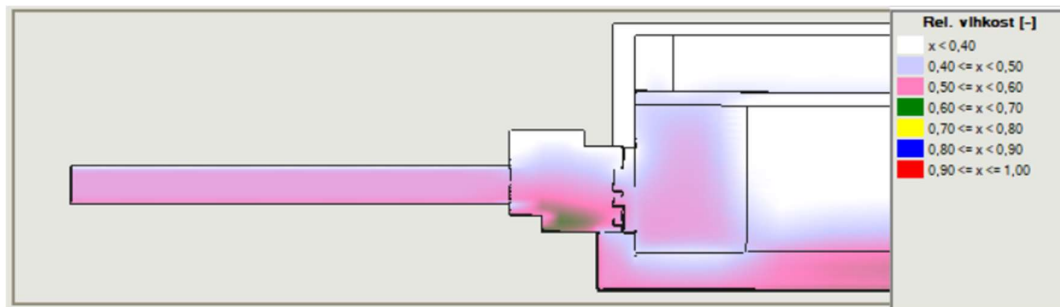
Pro zobrazení výsledků v grafech byly vybrány 3 měřící pozice v připojovací spáře – **pozice A** v 1/3 hloubky rámu z interiéru, **pozice B** v 2/3 hloubky rámu z interiéru a **pozice C** monitorující nejvíce vlhkostně zatížené místo. Dále jsou zobrazeny hodnoty celkového množství vody v připojovací spáře **W** a hmotnostní vlhkost dřeva u kritického místa připojovací spáry **M**. Pozice byly vybrány podle výsledků pro zimní noc v 1. roce simulace – 5.2. 3:00.



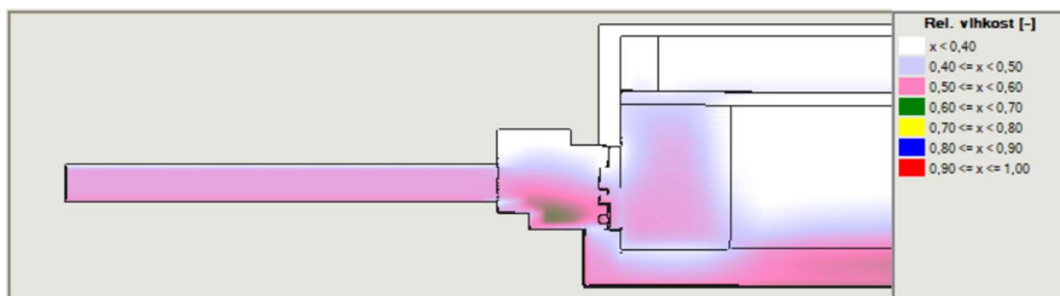
obrázek 6.2.7 - vybrané měřící pozice

## Výsledky základních variant

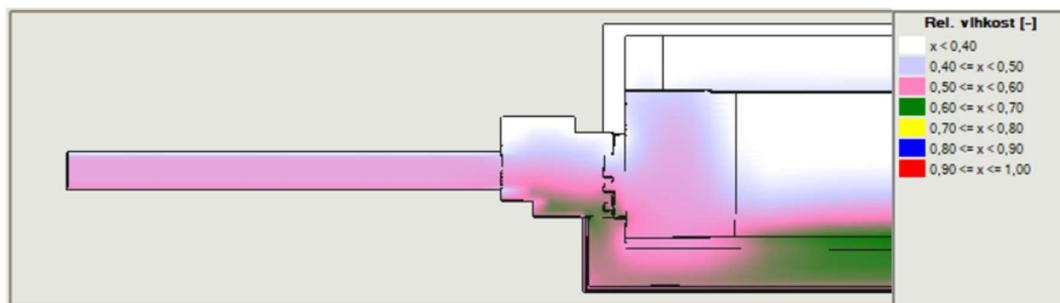
Rozložení RH v detailu je zobrazeno pro zimní noc v 1. roce simulace – 5.2. 3:00. Průběh hodnot v čase začíná pro 1.10. (říjen = měsíc 0-1).



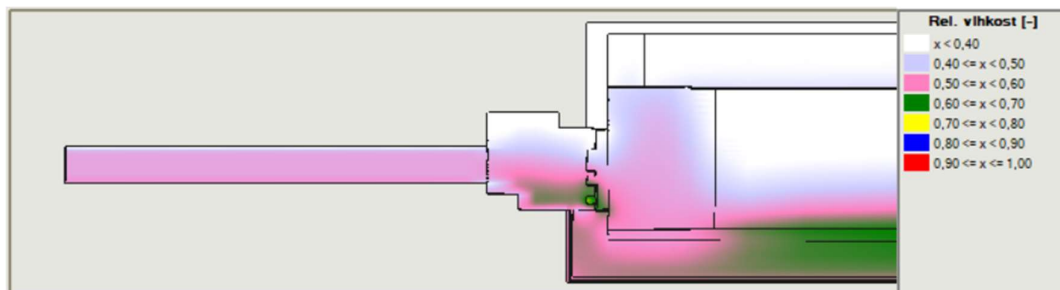
obrázek 6.2.8 - rozložení RH varianta 1a (WUFI 2D)



obrázek 6.2.9 - rozložení RH varianta 2a (WUFI 2D)

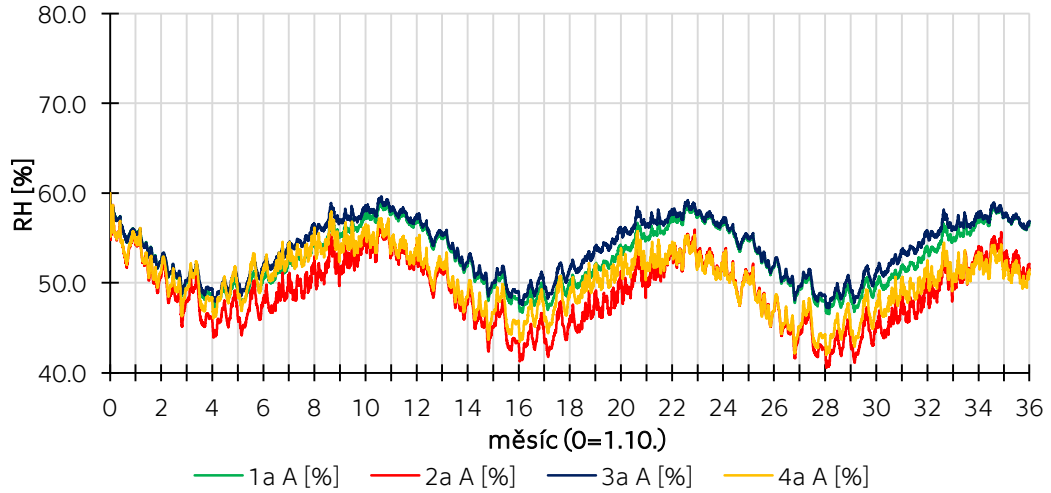


obrázek 6.2.10 - rozložení RH varianta 3a (WUFI 2D)

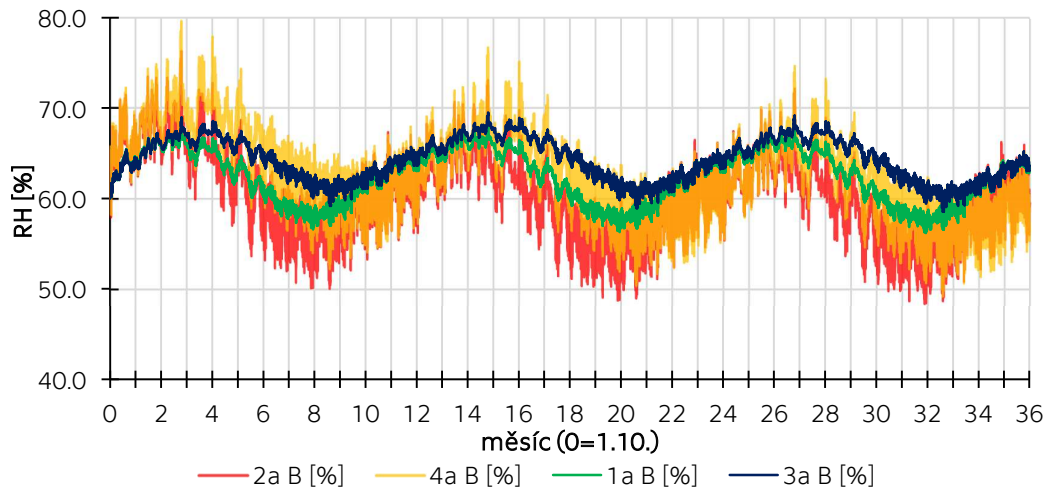


obrázek 6.2.11 - rozložení RH varianta 4a (WUFI 2D)

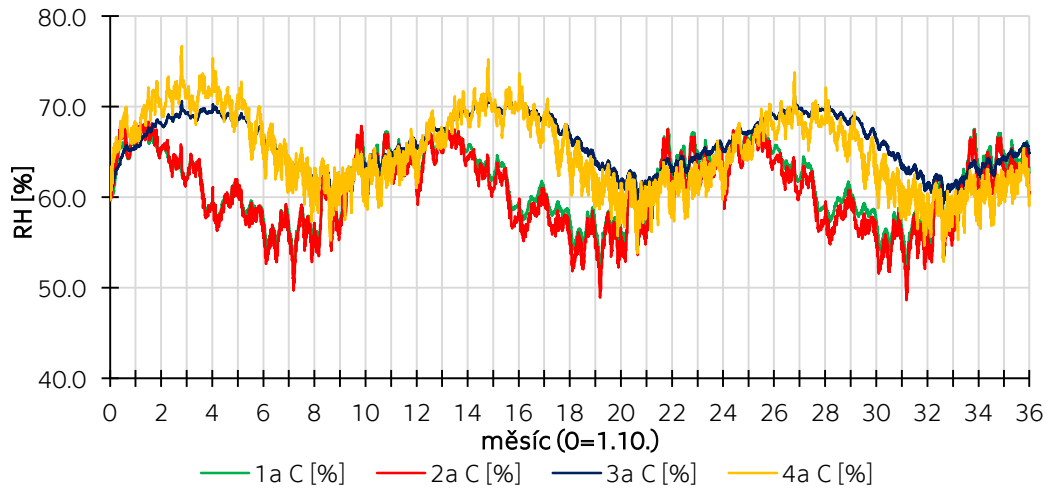




Graf 6.2.1 - RH v přípojovací spáře – pozice A



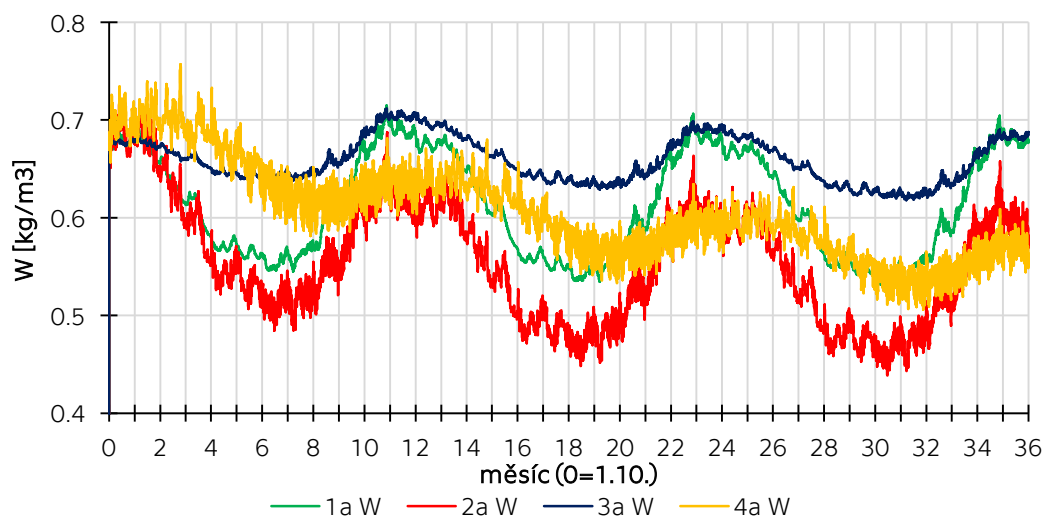
Graf 6.2.2 - RH v přípojovací spáře – pozice B



Graf 6.2.3 - RH v přípojovací spáře – pozice C

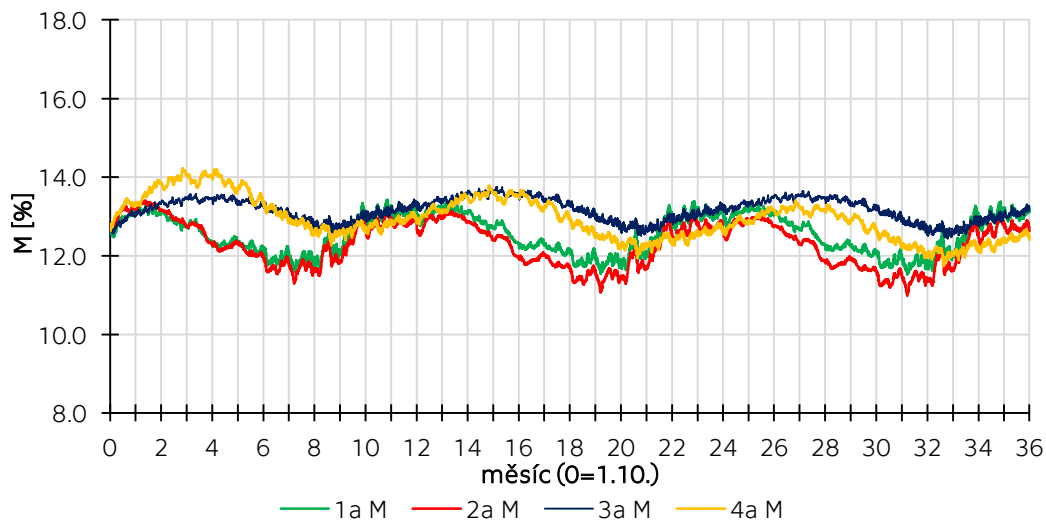
Ve všech pozicích je patrný rozdíl v použitém materiálu okna. Zatímco ve variantách s dřevěným rámem okna (1a a 3a) je průběh RH přímější, tak v případě plastového okna (2a a 4a) RH velmi výrazně osciluje. Rozdíl je dán sorpčními vlastnostmi dřevěného rámu. Vliv materiálu rámu okna se nejvíce projevuje v blízkosti vnitřní parotěsné folie (pro dřevěný rám je globálně RH v průměru o 3 % vyšší), směrem do exteriéru má materiál rámu z globálního pohledu malý význam.

Důsledek difúzně uzavřené skladby (3a a 4a) roste směrem do exteriéru a plně se projeví v pozici C u vnější folie, kde vzniká rozdíl přes 10 % RH. Rozdílná dynamika průběhu RH v pozici C vzniká faktem, že pozice C je kritická pouze pro difúzně uzavřenou konstrukci, pro dif. otevřenou je kritický bod blízký pozici B.



Graf 6.2.4 - objemová vlhkost v připojovací spáře

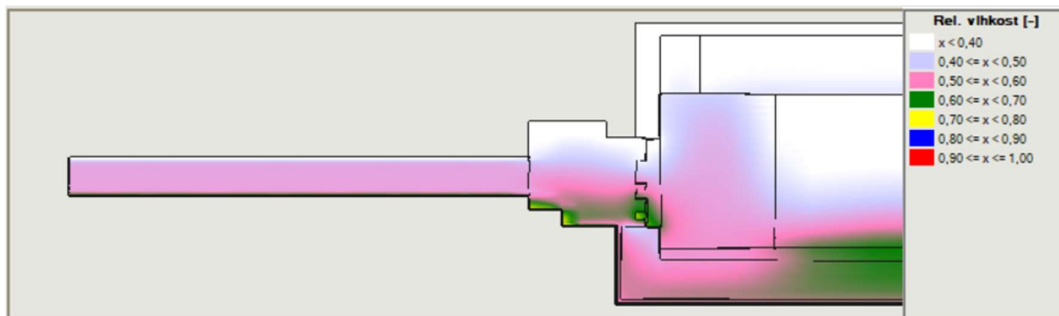
Maximální množství vodní páry v připojovací spáře v zimním období je ovlivněno volbou materiálu okenního rámu a více vodní páry se vyskytuje za použití dřevěného rámu, dále je míra poklesu v letním období určena difúzní otevřeností skladby, kde spára snáze vyschne přes dřevovláknitou izolaci. V případě difúzně uzavřené skladby s plastovým rámem (4a) je patrný výrazný dlouhodobý setrvalý pokles, daný kombinací výrazných vlhkostních bariér z interiéru - plastového okna a parotěsných folií.



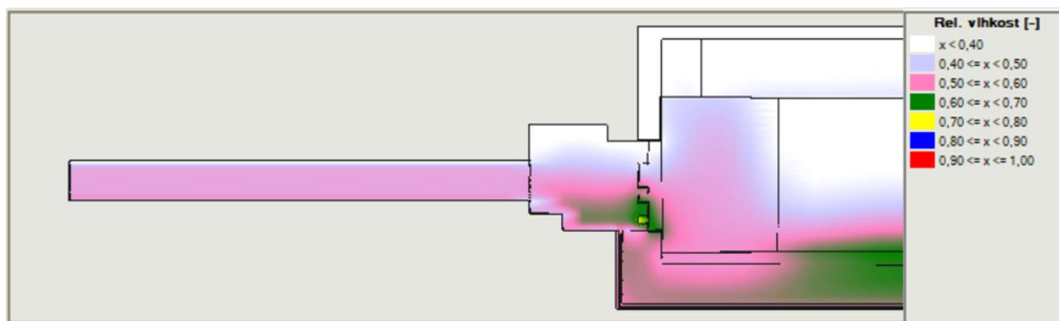
Graf 6.2.5 - hmotnostní vlhkost dřeva

Hmotnostní vlhkost dřeva logicky kopíruje průběh RH v nejbližší pozici C.

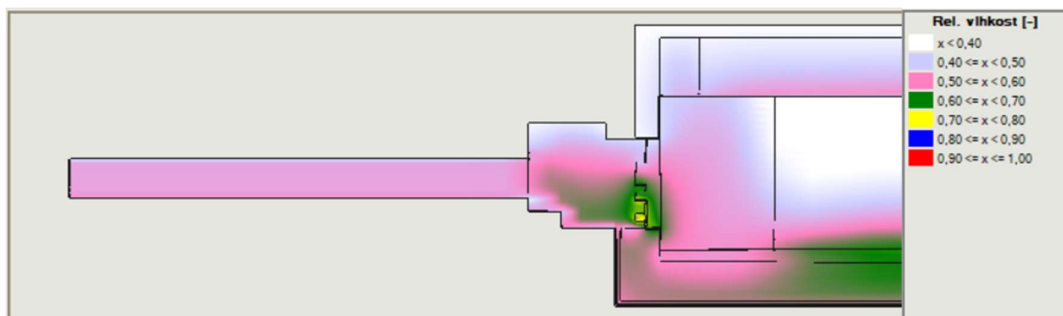
#### Výsledky upravené varianty 4



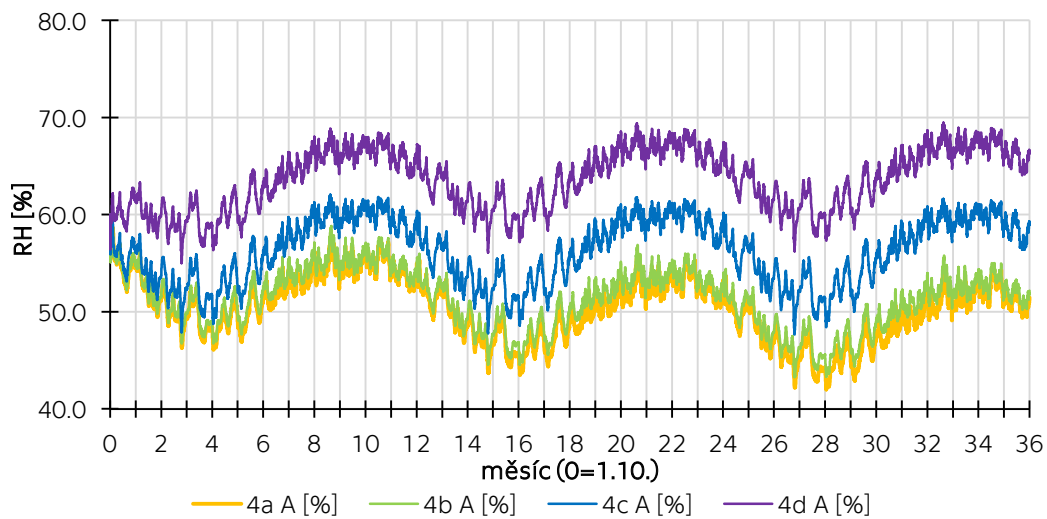
obrázek 6.2.12 - rozložení RH varianta 4b (WUFI 2D)



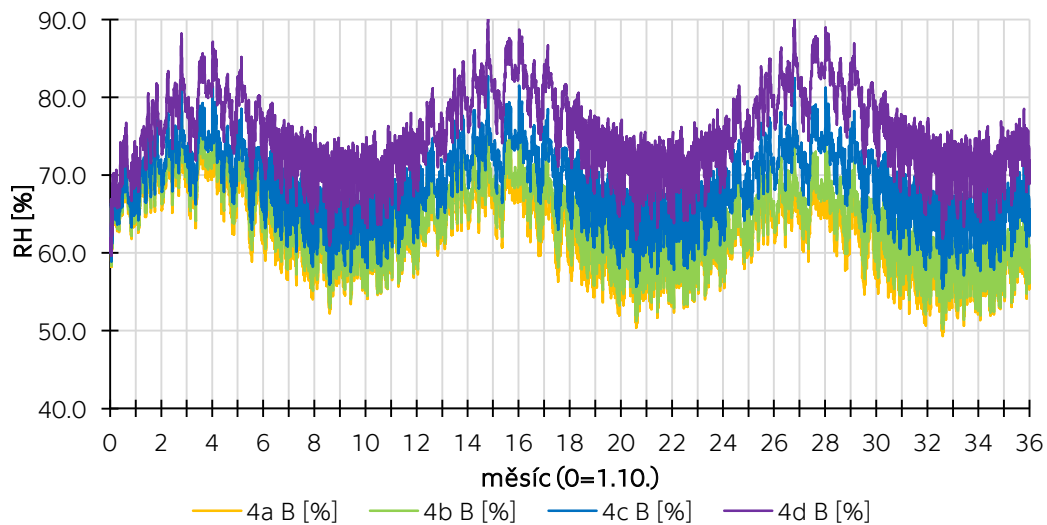
obrázek 6.2.13 - rozložení RH varianta 4c (WUFI 2D)



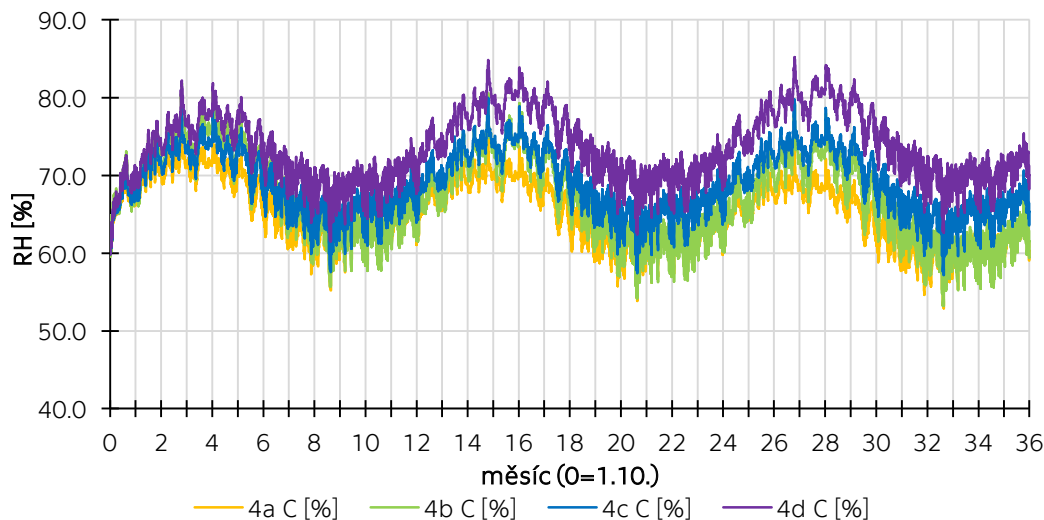
obrázek 6.2.14 - rozložení RH varianta 4d (WUFI 2D)



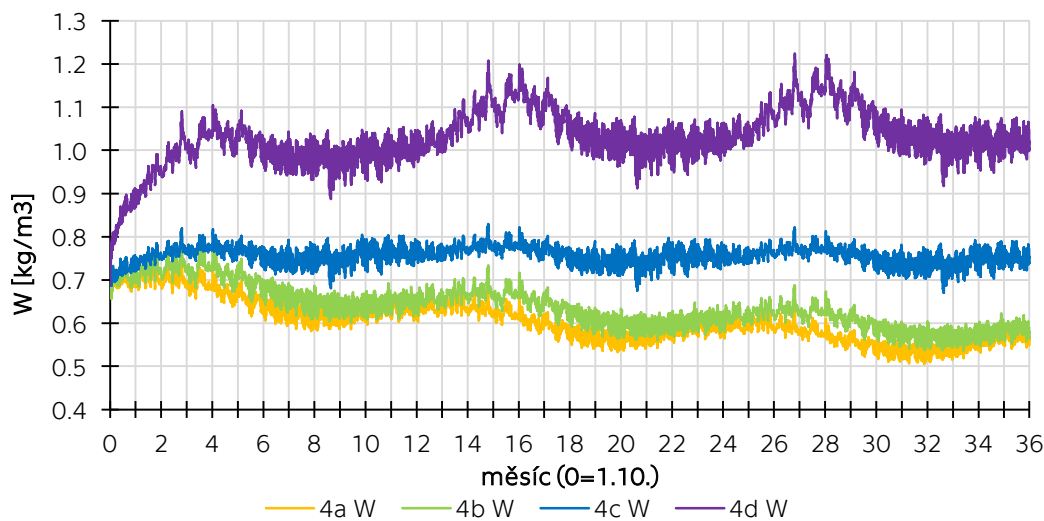
Graf 6.2.6 - RH v připojovací spáře – pozice A



Graf 6.2.7 - RH v připojovací spáře – pozice B

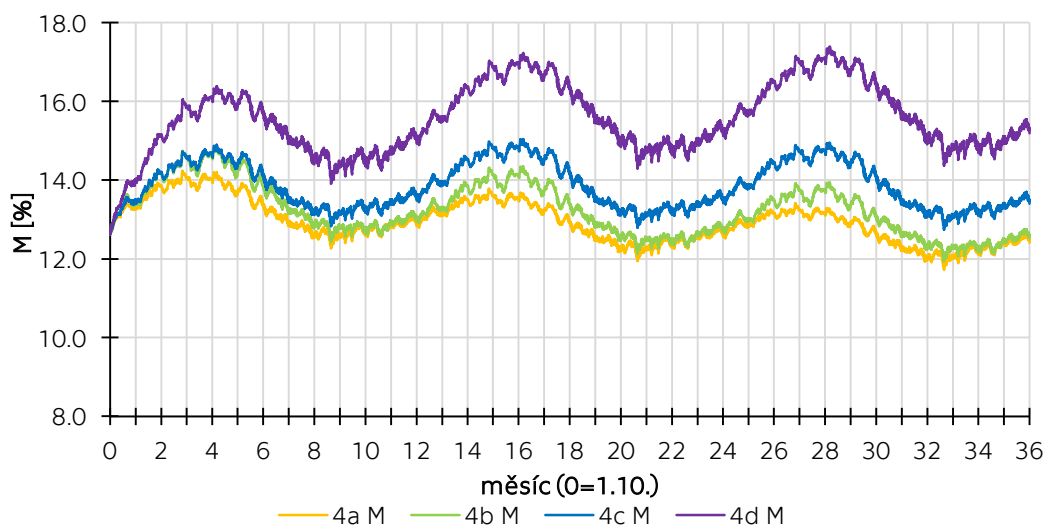


Graf 6.2.8 - RH v přípojovací spáře – pozice C



Graf 6.2.9 - celkové množství vody v přípojovací spáře

Detail s foliemi výrobce illbruck (4b) vykazuje oproti foliím Soudal mírně vyšší RH napříč celou spáru. Folie od illbruck mají totiž menší poměr ekvivalentní difuzní tloušťky interiérové a exteriérové folie 10:2 m, folie Soudal mají poměr 550:0,06 m. Dopad vynechané parotěsné folie Soudal se nejvíce projeví za zvýšené vlhkosti interiéru, kdy se množství vodní páry v roční bilanci zvyšuje. Při střední vlhkostní zátěži naopak během jednoho roku množství vodní páry mírně klesá.



Graf 6.2.10 - hmotnostní vlhkost dřeva

Hmotnostní vlhkost dřeva opět kopíruje průběh RH v nejbližší pozici C. I zde je patrná zvýšená citlivost na RH v interiéru v případě vynechané parotěsné folie. V roční bilanci u zmíněné varianty hmotnostní vlhkost roste, při například dalším zvýšením RH v interiéru může být dřevěná fošna při překročení 18 % hm. vlhkosti ohrožena.

## 6.2.2 Doplnkový model Area

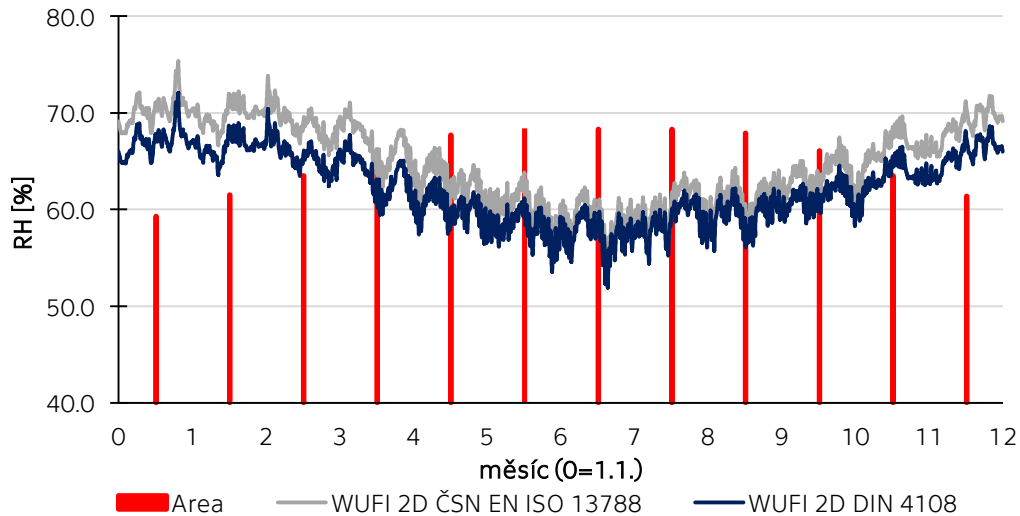
Model Area je zpracován pro **variantu 4a** (difúzně uzavřená skladba s plastovým rámem okna). Vlastnosti materiálů jsou shodné jako ve WUFI 2D. Geometrie je v připojovací spáře opět zjednodušená bez drážek v rámu. Adiabatická hranice je uvažovaná na obou stranách modelu.

konstrukce	detail ostění
charakter	ustálený stav
porovnávaný úsek měření	1 kalendářní rok
Počáteční podmínky	-
okrajové podmínky interiér	2. vlhk. tř. (ČSN EN ISO 13788 [12])
okrajové podmínky exteriér	prům. měsíční – Hradec Králové
odpor při přestupu tepla $R_{si}$	0,13 m <sup>2</sup> K/W (okno 0,25 m <sup>2</sup> K/W)
odpor při přestupu tepla $R_{se}$	0,04 m <sup>2</sup> K/W

Tabulka 6.2.3 - charakter normového detailu ostění v programu Area

Výsledky jsou interpretovány pro kritický bod v připojovací spáře **C**. Porovnání s WUFI 2D vychází ze simulace rozšířené na 10 let. Jelikož v předchozích úlohách byly ve WUFI podmínky pro interiér použity pouze podle ČSN EN 15026 [37], jsou zde dále navíc zobrazeny hodnoty na základě okrajových podmínek ČSN EN ISO 13788 (shodně s Area) [12].

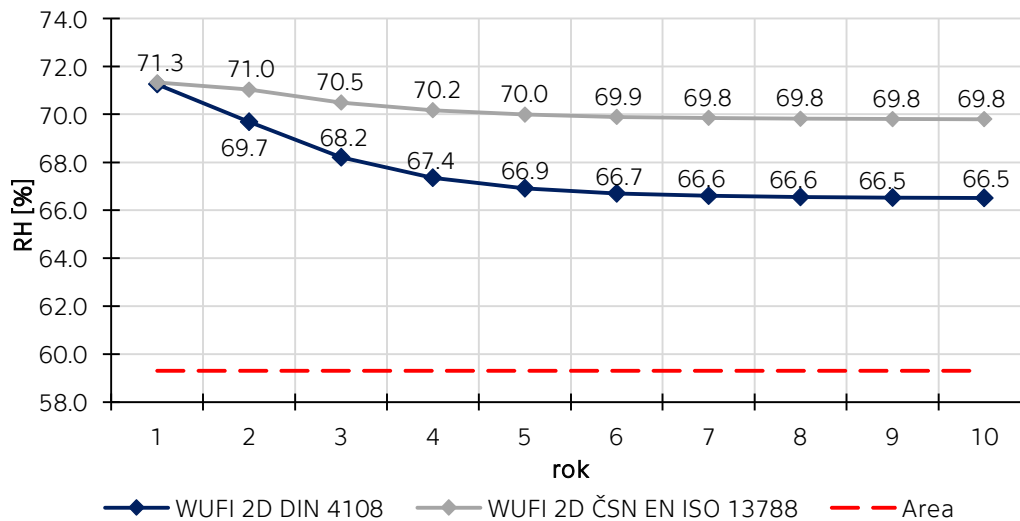
### Roční bilance RH



Graf 6.2.11 - RH v připojovací spáře 9. rok – pozice C

V roční bilanci je jasně patrný rozdíl průběhů RH, kdy dle WUFI 2D je maximum v 1. měsíci (leden), zatímco v Area v 7. měsíci (červenec). Area má ve zvoleném bodě C tendenci vykazovat příznivější výsledek.

### RH v lednu

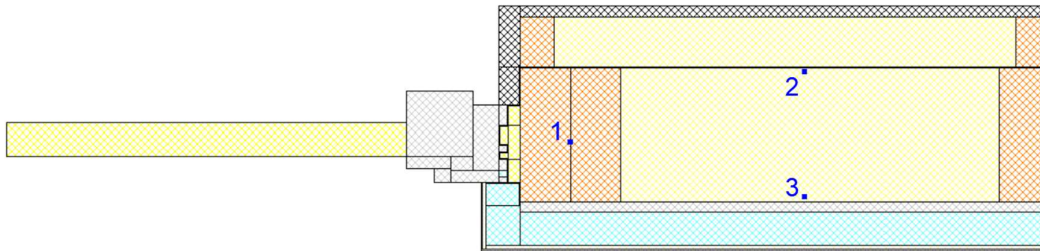


Graf 6.2.12 - průměrné RH v připojovací spáře leden – pozice C

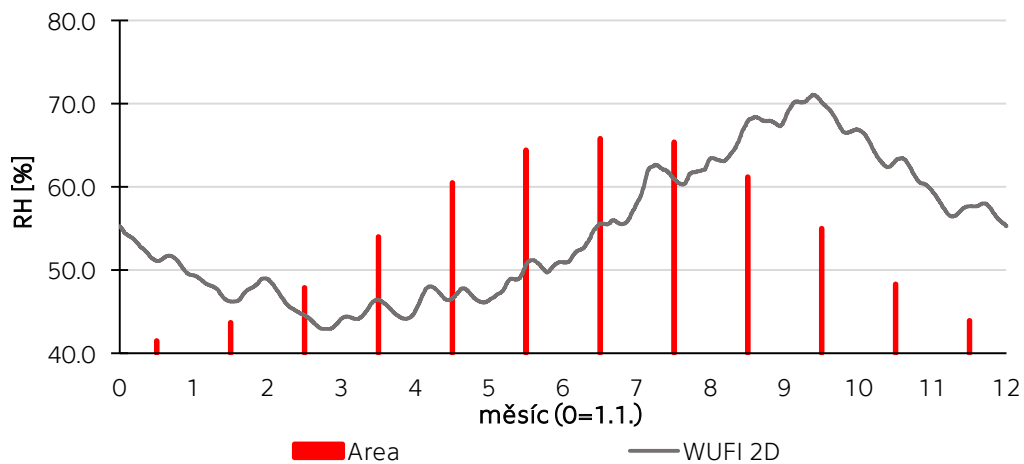
RH výrazněji klesá v prvních pěti letech, následující roky je pokles zanedbatelný. Za celé období hodnota neklesla k úrovni hodnoty z Area a rozdíl v lednu po 10 letech činí 7,2 % RH.

## Porovnání roční bilance ve více bodech

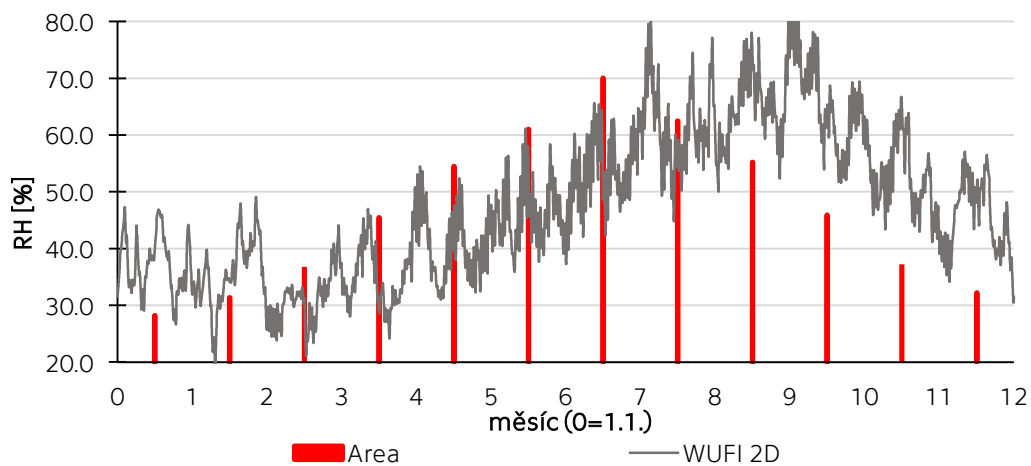
V připojovací spáře Area a WUFI ukazují rozdílné výstupy RH v roční bilanci za shodného rozložení teplot, rozdílné je tedy rozložení částečných tlaků v.p. Proto byly vytipovány následující pozice pro další porovnání – **bod 1** (v KVH), **bod 2** (za parotěsnou folii) a **bod 3** (před deskou Fermacell). Simulace ve WUFI proběhla již pouze pro 3 roky, pro KVH hranoly byla vynechána funkce rovnovážné vlhkosti a závislost faktoru difuzního odporu na RH. Okrajové podmínky byly nastaveny podle EN ISO13788 [12].



obrázek 6.2.15 - vybrané měřicí pozice (WUFI 2D)

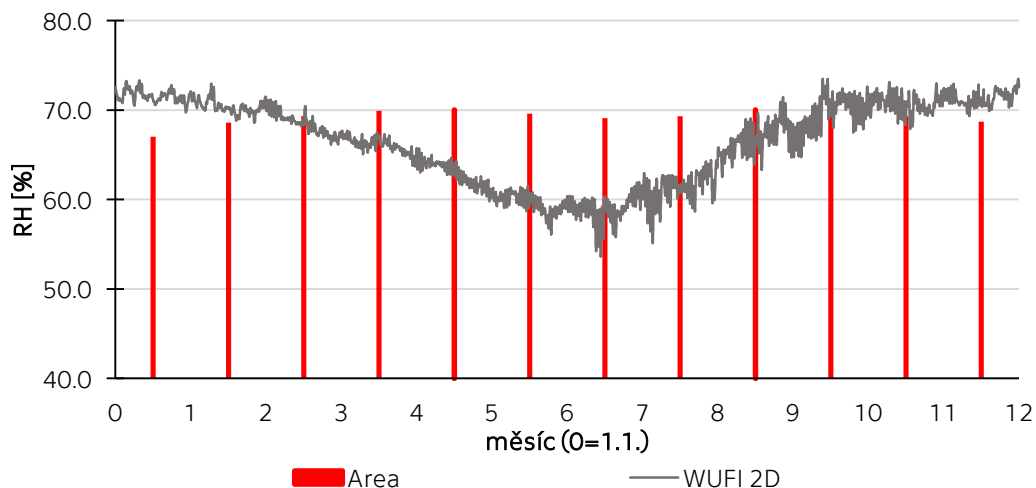


Graf 6.2.13 - RH 2. rok – bod 1



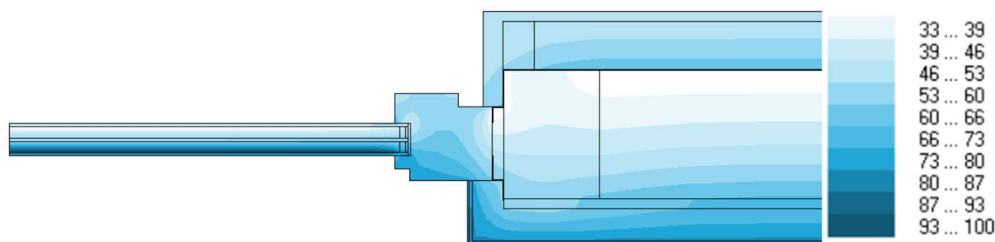
Graf 6.2.14 - RH 2. rok – bod 2



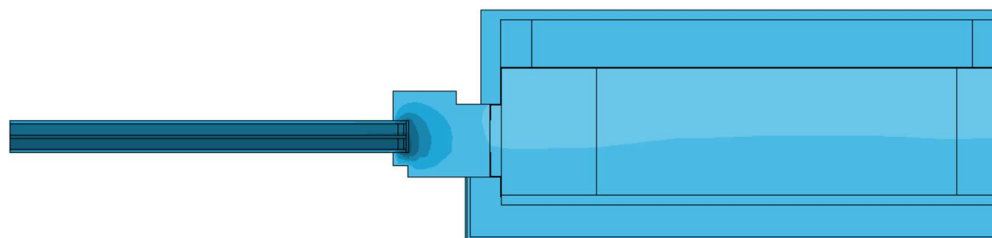


Graf 6.2.15 - RH 2. rok – bod 3

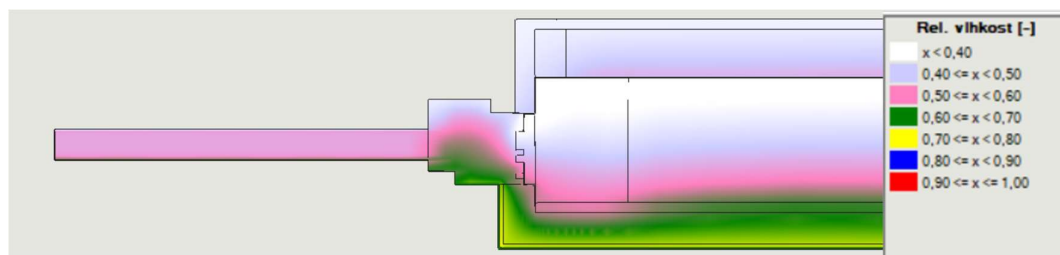
Průběh v bodě **1** a **2** koreluje a programy mají vzájemně posunutá maxima. Bod **3** je analogií k bodu **C** připojovací spáře (tedy pozice těsně před difúzně nepropustnější vrstvou) - i zde WUFI v letním období ukazuje pokles RH.



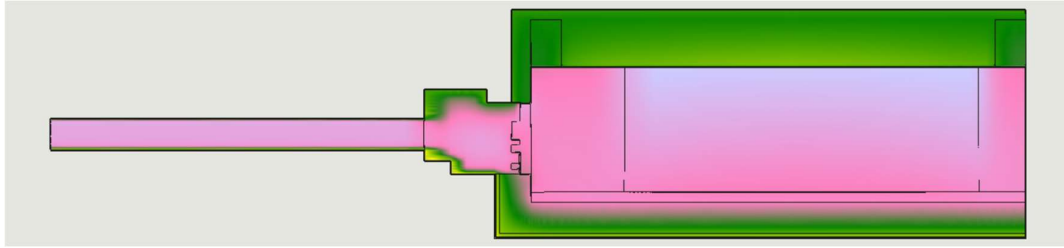
obrázek 6.2.16 - rozložení RH Area – leden



obrázek 6.2.17 - rozložení RH Area – červenec



obrázek 6.2.18 - přibližné rozložení RH WUFI 2D – leden



obrázek 6.2.19 - přibližné rozložení RH WUFI 2D – červenec

### 6.2.3 Vyhodnocení variant

Norma	ČSN 73 0540-2	DIN 4108-3	ÖNORM B 8110-2	SIA 180
Kondenzát na konci letního období	Bez kondenzátu	Bez kondenzátu	Bez kondenzátu	Bez kondenzátu
Hm. vlhkost dřeva	≤ 18 %	≤ 18 %	≤ 20 %	≤ 20 %

Tabulka 6.2.4 - vyhodnocení varianty 1a, 2a, 3a, 4a, 4b, 4c

U žádné z variant podle obou výpočetních programů nedochází v žádném místě detailu nebo skladby ke kondenzaci vodní páry, proto jsou veškerá dílčí kritéria týkající se limitu kondenzátu bezpředmětná. Navržené varianty za daných okrajových podmínek VYHOVÍ. Dokládá to, že shodná kvalitně navržená konstrukce v ČR splní kritéria i v německy mluvících zemích.

Norma	ČSN 73 0540-2	DIN 4108-3	ÖNORM B 8110-2	SIA 180
Kondenzát na konci letního období	Bez kondenzátu	Bez kondenzátu	Bez kondenzátu	Bez kondenzátu
Hm. vlhkost dřeva	≤ 18 %	≤ 18 %	≤ 20 %	≤ 20 %

Tabulka 6.2.5 - vyhodnocení varianty 4d

Varianta bez parotěsné folie a za zvýšené RH v interiéru podle tabulky splňuje kritéria vybraných norem, množství vodní páry se ale v připojovací spáře v bilanci trvale zvyšuje. Detail za daných okrajových podmínek NEVYHOVÍ.

## 6.2.4 Diskuse

Z navržených základních variant jsou patrné následující závislosti:

- a) **Materiál rámu okna** – nepropustný rám (plast, hliník) způsobí rychlejší vlhkostní odezvu v připojovací spáře na změnu prostředí, dále souvisí s nižším maximálním množstvím vodní páry v celé připojovací spáře.
- b) **Difúzní otevřenost skladby** – difúzně uzavřená skladba, respektive polystyren s omítkovým souvrstvím, má tendenci vytvořit vyšší rozdíl RH napříč hloubkou připojovací spáry a způsobí nejvyšší RH před paropropustnou folií v zimním období. Částečný tlak vodní páry ve vrstvách před polystyrenem totiž neklesá a s poklesem teploty roste RH. V letním období naopak polystyren brání intenzivnějšímu vysychání.
- c) **Celková propustnost směrem z interiéru** – kombinace nepropustného rámu a parotěsné folie způsobí z globálního pohledu intenzivnější meziroční pokles vodní páry ve spáře. Podmínkou je bezchybné provedení detailu.

Ze navržených odvozených variant jsou patrné následující závislosti:

- a) **Poměr ekv. difúzních tlouštěk okenních folií** – vyšší poměr ve prospěch vnitřní parotěsné folie má za následek celkově nižší množství vodní páry v připojovací spáře. Přesto, že rozdíl poměru porovnávaných folií je řádově rozdílný, RH se ve spáře změní pouze o jednotky procent.
- b) **Vynechaná vnitřní okenní parotěsná folie** – zapříčiní vyšší množství vodní páry ve spáře, spára je velmi citlivá na RH interiéru.

Výstupem programů Area a WUFI 2D při posuzování v roční bilanci jsou z pohledu vodní páry rozdílné výsledky jak ve velikosti maximálních hodnot, tak v celkovém ročním průběhu. Area v každé pozici ukazovala příznivější hodnoty.

## 6.2.5 Závěr

Detail ostění v dřevostavbě je nutné navrhnout a realizovat s vnitřním a vnějším uzávěrem připojovací spáry pro správné tepelně vlhkostní chování detailu. Přesto výpočetní model potvrzuje výsledek experimentálního měření, tedy že vynechaná, případně netěsná folie nemusí v kontextu vzduchotěsné dřevostavby znamenat ohrožení funkčnosti nebo životnosti detailu ostění.

Každá z navržených kombinací materiálu okna a obvodového pláště je v případě provedení bez vad vyhovující a v praxi bez problémů použitelná.

Použité softwary se v posuzovaném detailu při normovém vyhodnocování roční bilance liší svými výsledky, v chladných měsících Area ukazuje RH až o 5-10 % nižší v závislosti na vybrané pozici. Proto autor nedoporučuje v případě programu Area navrhovat detaily na hranu normových limitů.



## 7 Závěr

V rámci diplomové práce byl zrealizován experimentální vzorek reprezentující okno zabudované v obvodovém plášti dřevostavby, jehož součástí bylo variantní provedení uzávěrů připojovací spáry, způsob přelepení spár OSB desek, dále uměle vytvořené vady v podobě děr v parotěsné okenní folii a vzduchových dutin v připojovací spáře. Na vzorku bylo provedeno měření a následné vyhodnocení průvzdušnosti, doplněné měřením malých vzorků samotné OSB desky. Vzorek byl dále předmětem tepelně vlhkostní simulace v klimatické dvojkomoře, s jejíž výsledky byly validovány numerické modely. Na základě těchto modelů jsou sestaveny a normově posouzeny varianty detailů ostění. V práci bylo objasněno tepelně vlhkostní chování okna v zabudovaném stavu se zaměřením na rozdílné použití výrobků a materiálů, dále na různou kvalitu provedení. Dílčí úlohy práce vedou k následujícím závěrům:

- a) **Průvzdušnost experimentálního vzorku** – měření ve dvou etapách prokázalo, že pro splnění normových požadavků na průvzdušnost je nezbytné přelepení spár mezi OSB deskami vzduchotěsnou páskou. Páska by pro maximální účinek měla být výrobkem k tomu určená. Zjednodušený přepočít plošné průvzdušnosti vzorku na referenční rodinný dům naznačuje, že OSB 3 tl. 15 mm chápaná jako konstrukční deska s nižší kvalitou může být pro splnění požadavků na průvzdušnost dostačující.
- b) **Průvzdušnost malého vzorku** – výsledky malých vzorků OSB desek odpovídaly plošné průvzdušnosti desek z velkého vzorku. Heterogenita desky na malé ploše je příčinou vysokého rozptylu výsledků. Použití rozdílných pásek pro přelepení spáry zde vedly k zanedbatelným rozdílům. Dále bylo prokázáno, že ostatní vrstvy za OSB deskou se na vzduchotěsnosti nepodílí.
- c) **Tepelně vlhkostní simulace** – z měření bylo prokázáno, že detail zabudovaného dřevohliníkového okna je v difúzně otevřené konstrukci na bázi lehkého skeletu bezpečný z pohledu tepelné techniky. V konstrukci za žádných podmínek nedošlo k překročení hmotnostní vlhkosti dřeva 18 % při 80 % RH, případně ke kondenzaci vodní páry. Výjimkou je výskyt kondenzátu na povrchu zasklívací a připojovací spáry v oblasti parapetu a vzduchových dutin za vysoké vlhkosti v interiéru a nízké teploty v exteriéru.
- d) **Validace výpočetních modelů dle experimentálního vzorku** – numerické modely lze sestavit tak, aby věrně simulovaly skutečné chování konstrukce. Použité programy Teplo a WUFI Pro, dále Area a WUFI 2D jsou pro hodnocení při ustáleném stavu rovnocenné. Limitem programů je nemožnost simulovat vertikální uzavřené vzduchové dutiny s cirkulujícím vzduchem (vytvořená vada připojovací spáry).
- e) **Analýza variant detailu ostění** – všechny navržené kombinace materiálu okna a obvodového pláště (dřevěný / plastový rám okna; difúzně otevřená / uzavřená konstrukce) v případě provedení bez vad vyhovují podle českých a vybraných zahraničních tepelně technických norem. V praxi jsou tyto varianty bez problémů použitelné.

Výpočetní část je dílčím příspěvkem pro řešení detailů okna – zabývá se pouze detailem ostění. Detaily parapetu a nadpraží nebyly zpracovány, protože použité programy neumí zohlednit proudění vzduchu u vnitřního povrchu po výšce, ani v uzavřených dutinách rámu okna, dále mezi skly.

## Seznam zdrojů

- [1] ČSN 74 6077 *Okna a vnější dveře – Požadavky na zabudování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [2] HAZUCHA, Juraj. *Konstrukční detaily pro pasivní a nulové domy*. Praha: Grada Publishing, 2016. ISBN 978-80-247-4551-0.
- [3] *Kotvení a napojení oken a dveří ke stavební konstrukci*. Online. 2015. Dostupné z: <https://www.okna.eu/kotveni-a-napojeni-oken-a-dveri-ke-stavebni-konstrukci>. [cit. 2023-12-16].
- [4] REJL, Oldřich. *Montáž otvorových výplní do pasivních dřevostaveb* [online]. 2013 [cit. 2023-12-16]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/9888-montaz-otvorovych-vyplni-do-pasivnich-drevostaveb>
- [5] *Jak vidí správnou montáž oken jejich výrobci?* Online. Dostupné z: <https://www.ceskestavby.cz/clanky/jak-vidi-spravnu-montaz-oken-jejich-vyrobci-20503.html>. [cit. 2023-12-16].
- [6] *Pokyny ke zpracování ProCrea hliněné omítky*. PDF online. Hock GmbH & Co. K.G – Izolace konopí cz. [cit. 2024-01-02].
- [7] *Provedení připojovací spáry*. Online. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/okna-dvere/293-provedeni-pripojovaci-spary>. [cit. 2023-12-16].
- [8] *Chyby otvorových výplní v dřevostavbách*. Online. 2016. Dostupné z: [https://www.imaterialy.cz/rubriky/drevene-a-montovane-konstrukce/chyby-otvorovych-vyplni-v-drevostavbach\\_43259.html/](https://www.imaterialy.cz/rubriky/drevene-a-montovane-konstrukce/chyby-otvorovych-vyplni-v-drevostavbach_43259.html/). [cit. 2023-12-16].
- [9] ČSN EN 14351-1+A2 (746075) *Okna a dveře – Norma výrobku, funkční vlastnosti – Část 1: Okna a vnější dveře*. Řídicí centrum CEN-CENELEC: Avenue Marnix 17, B-1000 Brusel, 2016
- [10] JANDL, Čestmír a HORÁK, Vladimír. *Směrnice o posuzování některých vad zabudovaných otvorových výplní z plastových a dřevěných profilů: Možnosti a metody posuzování*. Online. 2020. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/normy-a-pravni-predpisy-okna-dvere/22283-smernice-o-posuzovani-nekterych-vad-zabudovanych-otvorovych-vyplni-z-plastovych-a-drevenych-profilu>. [cit. 2023-12-16].
- [11] ČSN 73 0540-2:2011 *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [12] ČSN EN ISO 13788 (730544) *Tepelně-vlhkostní chování stavebních konstrukcí a stavebních prvků – Vnitřní povrchová teplota pro vyloučení kritické povrchové vlhkosti a kondenzace uvnitř konstrukce – Výpočtové metody*.

- Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [13] ČSN 73 0540-4 *Tepelná ochrana budov – Část 4: Výpočtové metody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [14] ČSN EN 335 (490080) *Trvanlivost dřeva a materiálů na bázi dřeva – Třídy použití: definice, aplikace na rostlé dřevo a na výrobky na bázi dřeva*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [15] ČSN EN 350 (490081) *Trvanlivost dřeva a materiálů na bázi dřeva – Zkoušení a klasifikace odolnosti dřeva a materiálů na bázi dřeva proti biologickým činitelům*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.
- [16] ČSN EN 460 (490082) *Trvanlivost dřeva a materiálů na jeho bázi. Přirozená trvanlivost rostlého dřeva. Požadavky na trvanlivost dřeva pro jeho použití v třídách ohrožení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [17] DIN 4108-3:2018-10 *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz – Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN), 2018.
- [18] *Holzschutz: Bauliche Maßnahmen*. PDF. Reihe 5, teil 2, folge 2. Holzbau Deutschland-Institut e.V.
- [19] *Flachdächer in Holzbauweise*. PDF. reihe 3, teil 2, folge 1. Holzbau Deutschland-Institut e.V.
- [20] BAUNETZ WISSEN. *Tauwasser und Glaser-Verfahren: Nachweise und Nachweisfreie Konstruktionen Nach DIN 4108-3*. Online. Dostupné z: <https://www.baunetzwissen.de/bauphysik/fachwissen/feuchteschutz/tauwasser-und-glaser-verfahren-4421843>. [cit. 2023-12-17].
- [21] BORSCH-LAACKS, Robert. *Tauwasserschutz im Holzbau*. Online. Dostupné z: <https://informationsdienst-holz.de/urbaner-holzbau/kapitel-4-der-zeitgenoessische-holzbau/tauwasserschutz-im-holzbau>. [cit. 2023-12-17].
- [22] BACHINGER, Julia. *Feuchteverhalten von Flachdachaufbauten im Holzleichtbau: Insbesondere von nicht hinterlüfteten Flachdächern, deren Dämm-und Trägerebene zwischen Dampfsperre /-bremse und Dachhaut angeordnet ist*. Genf, April 2010. Dissertation. Technischen Universität Wien.
- [23] BAUNETZ WISSEN. *Baulicher Holzschutz: grundsätzliche und besondere bauliche Massnahmen*. Online. Dostupné z: <https://www.baunetzwissen.de/holz/fachwissen/holzschutz/baulicher-holzschutz-7029931>. [cit. 2023-12-17].



- [24] ÖNORM B 8110-2 *Wärmeschutz im Hochbau – Teil 2: Wasserdampfdiffusion, -konvektion und Kondensationsschutz*. Austrian Standards, 1020 Wien, Heinestraße 38, 2020.
- [25] MEINHARDT, Johannes Meinhardt. *Analyse der ÖNORM B 8110-2:2020 und ein Vergleich verschiedener Nachweisverfahren zur Bestimmung der Tauwasserbildung*. Masterarbeit. Graz: Technischen Universität Graz, April 2021.
- [26] SIA 180 *Wärmeschutz, Feuchteschutz und Raumklima in Gebäuden*. The Swiss Society of Engineers and Architects (SIA) is Switzerland, 2014.
- [27] FRANK, Thomas; MANZ, Heinrich a ZÜRCHER, Christoph. *Bauphysik: Bau & Energie*. 4. überarbeitete. Zürich, 2016. ISBN 978-3-7281-3608-4.
- [28] TRANDOVÁ, Lenka. *Třetinu dřevostaveb v Česku postavily členské firmy ADMD*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.admd.cz/clanky-a-vidoa/o-drevostavbach/tretinu-drevostaveb-v-cesku-postavily-clenske-firmy-admd>. [cit. 2023-12-17].
- [29] HRUBÝ, Libor. *Vzduchotěsnost pasivního domu*. 2020. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/pasivni-domy/13994-vzduchotesnost-pasivniho-domu>. [cit. 2023-12-20].
- [30] NOVÁK, Jiří. *Vzduchotěsnost obvodových plášťů budov*. Praha: Grada, 2008. ISBN 978-80-247-1953-5.
- [31] ČSN EN 12114 *Tepelné chování budov – Stanovení průvzdušnosti stavebních dílců a prvků – Laboratorní zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2001.
- [32] ČSN 73 0540-2:2023 *Tepelná ochrana budov – Část 2: Požadavky*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2023.
- [33] ČSN EN ISO 9972 *Tepelné chování budov – Stanovení průvzdušnosti budov – Tlaková metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [34] NOVÁK, Jiří a SVOBODA, Zbyněk. *Řešené příklady ze stavební fyziky: Šíření tepla konstrukcí v ustáleném stavu*. Online. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2014. [cit. 2023-12-28].
- [35] KOPECKÝ, Pavel. *Materiál a konstrukce: Šíření tepla, vzduchu a vlhkosti v budovách a stavebních prvcích* [online]. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2014 [cit. 2023-12-28].
- [36] *Data sheet Psi values for windows: CHROMATECH ultra F / F1*. PDF online. Swisspacer AG. [cit. 2023-12-30].
- [37] ČSN EN 15026 *Hodnocení šíření vlhkosti stavebními dílci pomocí numerické simulace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2007.

## Seznam obrázků

obrázek 2.1.1	schéma umístění kotvicích prvků a podložek (zpracováno dle [1])
obrázek 2.1.2	detail připojovací spáry (zpracováno dle [1])
obrázek 2.2.1	chybný detail parotěsné folie (zdroj: archiv autora)
obrázek 3.2.1	řazení konstrukce do tříd použití [18]
obrázek 4.1.1	klimatická dvojkomora
obrázek 4.2.1	výkres experimentálního vzorku
obrázek 4.2.2	detail ostění
obrázek 4.2.3	detail nadpraží
obrázek 4.2.4	detail parapetu
obrázek 4.3.1	realizace rámu a) a b)
obrázek 4.3.2	realizace rámu c)
obrázek 4.3.3	realizace rámu d)
obrázek 4.3.4	detail překladu
obrázek 4.3.5	přítlačení folie válečkem a
obrázek 4.3.6	přesah v rozích a)
obrázek 4.3.7	detail s kotvou, illbruck folií, nosnou podložkou; dále detail aplikace Airstop pásky b) a c)
obrázek 4.3.8	pohled na připevněné okno s nalepenou vnitřní folií c)
obrázek 4.3.9	vypěnění spáry s vytvořenou dutinou (měřeno čidlem) d)
obrázek 4.3.10	detail nalepené vnější folie
obrázek 4.3.11	rám vyplněný izolací Isover a)
obrázek 4.3.12	rám vyplněný izolací Steico a)
obrázek 4.3.13	detail ostění se Steico a)
obrázek 4.3.14	nalepení XPS b)
obrázek 4.3.15	detail parapetu s přitížením b)
obrázek 4.3.16	difuzní folie d)
obrázek 5.1.1	zařízení pro blower door test (zdroj: archiv autora)
obrázek 5.1.2	schéma 1. kalibračního měření
obrázek 5.1.3	vzduchotěsná PE folie
obrázek 5.1.4	okno zakryté PE folií (1. konfigurace)
obrázek 5.1.5	schéma 2. kalibračního měření
obrázek 5.1.6	detail přelepené spáry
obrázek 5.1.7	půdorys referenční budovy

obrázek 5.1.8	pohled na referenční budovu
obrázek 5.2.1	zkušební vzorek a zařízení
obrázek 5.2.2	schéma zkoušky
obrázek 5.2.3	detail těsnění vzorku
obrázek 5.2.4	vzorky pro konfiguraci 1
obrázek 5.2.5	vzorky pro konfigurace 2,3,4
obrázek 5.3.1	schéma umístění čidel
obrázek 5.3.1	schéma umístění čidel
obrázek 5.3.2	umístění čidel v rámu / ve skladbě
obrázek 5.3.3	umístění čidel v místě uložení stropnice
obrázek 5.3.4	umístění čidel ve skladbě
obrázek 5.3.5	umístění čidel na povrchu okna
obrázek 5.3.6	průměrné povrchové teploty
obrázek 5.3.7	umístění čidel v připojovací spáře
obrázek 5.3.8	termovizní snímek 1
obrázek 5.3.9	termovizní snímek 2
obrázek 5.3.10	termovizní snímek 3
obrázek 6.1.1	závislost RH na $\mu$ OSB (WUFI)
obrázek 6.1.2	závislost RH na $\mu$ KVH (WUFI)
obrázek 6.1.3	detail ostění ve WUFI 2D
obrázek 6.1.4	svislý řez připojovací spárou v místě dutiny
obrázek 6.1.5	připojovací spára kov (WUFI 2D)
obrázek 6.1.6	připojovací spára aerogel (WUFI 2D)
obrázek 6.1.7	připojovací spára PUR pěna (WUFI 2D)
obrázek 6.1.8	detail ostění v Area
obrázek 6.1.9	skutečný detail zasklení
obrázek 6.1.10	two box model (Area)
obrázek 6.2.1	vnitřní okrajové podmínky ve WUFI 2D dle ČSN EN 15026 [37]
obrázek 6.2.2	varianta 1a ve WUFI 2D
obrázek 6.2.3	varianta 2a ve WUFI 2D
obrázek 6.2.4	varianta 3a ve WUFI 2D
obrázek 6.2.5	varianta 4a ve WUFI 2D
obrázek 6.2.6	vynechaná vnitřní folie ve WUFI 2D (4c a 4d)
obrázek 6.2.7	vybrané měřicí pozice

obrázek 6.2.8	rozložení RH varianta 1a (WUFI 2D)
obrázek 6.2.9	rozložení RH varianta 2a (WUFI 2D)
obrázek 6.2.10	rozložení RH varianta 3a (WUFI 2D)
obrázek 6.2.11	rozložení RH varianta 4a (WUFI 2D)
obrázek 6.2.12	rozložení RH varianta 4b (WUFI 2D)
obrázek 6.2.13	rozložení RH varianta 4c (WUFI 2D)
obrázek 6.2.14	rozložení RH varianta 4d (WUFI 2D)
obrázek 6.2.15	vybrané měřící pozice (WUFI 2D)
obrázek 6.2.16	rozložení RH Area – leden
obrázek 6.2.17	rozložení RH Area – červenec
obrázek 6.2.18	přibližné rozložení RH WUFI 2D – leden
obrázek 6.2.19	přibližné rozložení RH WUFI 2D – červenec

## Seznam tabulek

Tabulka 3.5.1	porovnání vlhkostních limitů
Tabulka 5.1.1	výsledky kalibračního měření
Tabulka 5.1.2	výsledky konfigurace se zakrytým oknem
Tabulka 5.1.3	výsledky konfigurace s odkrytým oknem
Tabulka 5.3.1	seznam umístěných čidel
Tabulka 5.3.2	etapy měření
Tabulka 5.3.3	výpočet součinitelů tepelné vodivosti
Tabulka 6.1.1	materiálové charakteristiky
Tabulka 6.1.2	charakter modelu ve WUFI Pro
Tabulka 6.1.3	charakter modelu v programu Teplo
Tabulka 6.1.4	charakter modelu ve WUFI 2D
Tabulka 6.1.5	charakter modelu v programu Area
Tabulka 6.2.1	materiálové charakteristiky
Tabulka 6.2.2	charakter normového detailu ostění ve WUFI 2D
Tabulka 6.2.3	charakter normového detailu ostění v programu Area
Tabulka 6.2.4	vyhodnocení varianty 1a, 2a, 3a, 4a, 4b, 4c
Tabulka 6.2.5	vyhodnocení varianty 4d

## Seznam grafů

Graf 5.1.1	kalibrační měření
Graf 5.1.2	konfigurace se zakrytým oknem
Graf 5.1.3	konfigurace s odkrytým oknem
Graf 5.2.1	malý vzorek OSB
Graf 5.2.2	malý vzorek OSB + spára
Graf 5.2.3	malý vzorek OSB + Gaffa/Airstop
Graf 5.3.1	chování v místě uložení stropnice
Graf 5.3.2	chování ve skladbě
Graf 5.3.3	chování ve skladbě
Graf 5.3.4	povrchové teploty zasklívací spáry
Graf 5.3.5	povrchové teploty přípojovací spáry
Graf 5.3.6	porovnání ve vodorovném směru
Graf 5.3.7	porovnání ve svislém směru
Graf 5.3.8	chování v přípojovací spáře
Graf 5.3.9	chování v přípojovací spáře – vynechaná PU pěna
Graf 5.3.10	chování v přípojovací spáře – rozdílné folie
Graf 6.1.1	chování ve skladbě – OSB   ISOVER (pozice b)
Graf 6.1.2	chování ve skladbě – ISOVER   STEICO (pozice c)
Graf 6.1.3	porovnání výsledků ve skladbě – teplota
Graf 6.1.4	porovnání výsledků ve skladbě – relativní vlhkost
Graf 6.1.5	chování v přípojovací spáře
Graf 6.1.6	porovnání výsledků zasklívací spáry – teplota
Graf 6.1.7	porovnání výsledků 1/3 hl. rámu – teplota a RH
Graf 6.2.1	RH v přípojovací spáře – pozice A
Graf 6.2.2	RH v přípojovací spáře – pozice B
Graf 6.2.3	RH v přípojovací spáře – pozice C
Graf 6.2.4	objemová vlhkost v přípojovací spáře
Graf 6.2.5	hmotnostní vlhkost dřeva
Graf 6.2.6	RH v přípojovací spáře – pozice A
Graf 6.2.7	RH v přípojovací spáře – pozice B
Graf 6.2.8	RH v přípojovací spáře – pozice C
Graf 6.2.9	celkové množství vody v přípojovací spáře
Graf 6.2.10	hmotnostní vlhkost dřeva

Graf 6.2.11	RH v připojovací spáře 9. rok – pozice C
Graf 6.2.12	průměrné RH v připojovací spáře leden – pozice C
Graf 6.2.13	RH 2. rok – bod 1
Graf 6.2.14	RH 2. rok – bod 2
Graf 6.2.15	RH 2. rok – bod 3