

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE



Fakulta stavební
Katedra konstrukcí pozemních staveb

**DŘEVĚNÁ TRÁMOVÁ ZHLAVÍ V CIHELNÉM ZDIVU
S VNITŘNÍ TEPELNOU IZOLACÍ**

„WOODEN BEAM ENDS IN MASONRY WITH INTERNAL INSULATION“

Diplomová práce

Mirek Dragoun

Leden 2018

Vedoucí diplomové práce: Ing. Pavel Kopecký, Ph.D.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Dragoun Jméno: Mírek Osobní číslo: 410775
Zadávající katedra: K124 - Katedra konstrukcí pozemních staveb
Studijní program: Budovy a prostředí
Studijní obor: Budovy a prostředí - zaměření Konstrukce budov

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Dřevěná trámová zhlaví v cihelném zdivu s vnitřní tepelnou izolací
Název diplomové práce anglicky: Wooden beam ends in masonry with internal insulation

Pokyny pro vypracování:

- 1) Diplomant sestaví stručný přehled o současném stavu problematiky trámových zhlaví v souvislosti s vnitřním zateplením.
- 2) Diplomant provede stručný teoretický rozbor problému trámového zhlaví. Popíše zdroje vlhkosti, které připadají pro daný problém v úvahu a transportní procesy, které mohou vlhkost dopravit do okolí dřevěného trámu.
- 3) Diplomant provede podrobné vyhodnocení měřených údajů z experimentu v klimatické místnosti na UCEEBu (TP2, TP3, období 2015 - 2017) a porovná mezi sebou různá provedení trámových kapes.
- 4) Diplomant provede výpočtovou studii, jakými způsoby je možné zlepšit tepelně vlhkostní podmínky v trámových kapsách.
- 5) Diplomant stanoví z měřených údajů zatížení testovací fasády větrem hnaným deštěm a vyhodnotí, zda má větrem hnaný dešť vliv na změnu vlhkosti v trámových kapsách. Dále diplomant popíše a vyhodnotí krátkodobý experiment - skrápění fasády provedené v červenci 2017.

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího diplomové práce: Ing. Pavel Kopecký, Ph.D

Datum zadání diplomové práce: 2.10.2017

Termín odevzdání diplomové práce: 8. 1. 2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

[Signature]
Podpis vedoucího práce

[Signature]
Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

10.10.2017
Datum převzetí zadání

[Signature]
Podpis studenta(ky)

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

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

V Praze 6. ledna 2018

.....
Mirek Dragoun

Poděkování

Děkuji Ing. Pavlovi Kopeckému, Ph.D. za poskytnuté podklady, věcné rady a za čas, který mi věnoval při vedení diplomové práce. Zároveň bych chtěl poděkovat za možnost být součástí experimentu Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze (Buštěhrad).

Anotace

Diplomová práce se zabývá problematikou dřevěných trámových zhlaví v obvodových stěnách s aplikovaným systémem vnitřního zateplení. V práci je nejprve proveden teoretický rozbor dané problematiky a je sestaven stručný přehled o dosavadních poznatcích k tomuto tématu. Hlavní část práce se zabývá popisnou statistikou naměřených údajů z oblasti trámových kapes, monitorovaných v rámci testovací fasády Univerzitního centra energeticky efektivních budov ČVUT v Praze. V práci jsou vyhodnocena data z období od března 2015 do října 2017. V navazující části je z měřených údajů vyčísleno zatížení testovací fasády větrem hnaným deštěm za doposud sledované období. Následně se práce věnuje zkoumání jeho vlivu na změnu vlhkostních podmínek v trámových kapsách. Dále je hodnocen vliv intenzivního umělého skrápění fasády z léta 2017. Poslední kapitola řeší tvorbu konzervativního výpočtového modelu trámového zhlaví v softwaru CUBE 3D. Jako podklad je použita reálná situace jednoho ze zhlaví monitorovaných v testovací fasádě na UCEEBu. Pomocí tohoto modelu jsou následně analyzovány různé možnosti opatření na zlepšení tepelně vlhkostních podmínek v trámových kapsách.

Klíčová slova

Trámová zhlaví, trámová kapsa, vnitřní zateplení, větrem hnaný déšť, teplota, relativní vlhkost, vodní pára, kondenzace, obsah vlhkosti, růst plísní

Abstract

The thesis addresses the issue of wooden beam ends in peripheral walls with applied internal insulation. The first part of the thesis involves a theoretical analysis of the respective problem and a brief overview of the current findings in this area. The main body of the thesis is constituted of descriptive statistics of measured details from the area of beam pockets monitored at the testing exterior wall of the University Center for Energy Efficient Buildings of the Czech Technical University in Prague. The thesis evaluates data from the period of March 2015 to October 2017. In the following section, the load of the tested exterior wall by wind driven rain is calculated from the measured data during the observed period. Subsequently, the thesis examines the effect of this wind driven rain on the change of humidity conditions in beam pockets. Furthermore, it examines the effect of intensive artificial spraying on the testing wall during summer 2017. The last chapter of the research focuses on the composition of a conservative computational model of wooden beam ends in CUBE 3D software. The actual scenario of one of the monitored beam ends on the testing wall of UCEEB is used as the basis. Using this model, various measures for improving hydrothermal conditions of beam pockets are analysed.

Keywords

Wooden beam ends, beam pocket, internal insulation, wind driven rain, temperature, relative humidity, water vapour, condensation, moisture content, mold growth

Obsah

1 Úvod	15
2 Problematika trémových zhlaví v souvislosti s vnitřním zateplením ..	17
2.1 Úvod do problematiky	17
2.2 Zdroje vlhkosti.....	22
2.2.1 Vodní pára šířící se v chladném období z interiéru	22
2.2.2 Další nahodilé zdroje vlhkosti	30
2.3 Přehled o současném stavu problematiky	33
3 Popis experimentu	41
3.1 Obecné informace	41
3.2 Popis testovacích polí	42
3.3 Monitoring.....	48
3.4 Harmonogram experimentu	49
4 Vyhodnocení měřených údajů	50
4.1 Přehled okrajových podmínek.....	50
4.2 Vyhodnocení úprav kapes po jednotlivých systémech	51
4.2.1 SYSTÉM S1a – CIUR 80 mm (dřevovláknité desky 80 mm)	52
4.2.2 SYSTÉM S1b – CIUR 140 mm (dřevovláknité desky 140 mm)	57
4.2.3 SYSTÉM S2 – ISOVER + RIGIPS (systém s „inteligentní“ parozábranou).....	62
4.2.4 SYSTÉM S3 – VA–Q–TEC (vakuové panely)	67
4.3 Vzájemné porovnání jednotlivých systémů	71
4.3.1 Situace v oblasti trémových kapes	71
4.3.2 Situace na rozhraní izolace/zdivo.....	73
4.4 Shrnutí výsledků pozorování.....	75
5 Vliv větrem hnaného deště	77
5.1 Místní situace	77
5.2 Vyčíslení větrem hnaného deště	78
5.3 Vyhodnocení vlivu větrem hnaného deště	82
5.3.1 SYSTÉM S1a – CIUR 80 mm (dřevovláknité desky 80 mm)	83
5.3.2 SYSTÉM S1b – CIUR 140 mm (dřevovláknité desky 140 mm)	85
5.3.3 SYSTÉM S2 - ISOVER + RIGIPS (systém s „inteligentní“ parozábranou)	87

5.3.4	SYSTÉM S3 - VA-Q-TEC (vakuové panely)	89
5.3.5	Porovnání sledovaného období s ostatními roky	91
5.3.6	Vyhodnocení vlivu větrem hnaného deště dle jeho týdenních úhrnů	94
5.4	Shrnutí výsledků pozorování	97
6	Krátkodobý kropící experiment	98
6.1	Popis experimentu	98
6.2	Vyhodnocení experimentu	104
6.2.1	SYSTÉM S1a - CIUR (dřevovláknité desky 80 mm)	105
6.2.2	SYSTÉM S1b - CIUR (dřevovláknité desky 140 mm)	108
6.2.3	SYSTÉM S2 - ISOVER + RIGIPS (systém s „inteligentní“ parozábranou)	111
6.2.4	SYSTÉM S3 - VA-Q-TEC (vakuové panely)	114
6.2.5	Porovnání jednotlivých systémů	117
6.2.6	Vyhodnocení následků skrápění	126
6.3	Shrnutí výsledků pozorování	130
7	Možnosti zlepšení tepelně vlhkostních podmínek v oblasti zhlaví ...	133
7.1	Tvorba referenčního modelu	133
7.1.1	Použitý software	133
7.1.2	Výběr referenčního zhlaví	133
7.1.3	Geometrie modelu	135
7.1.4	Materiálové vlastnosti	136
7.1.5	Stanovení ekvivalentních parametrů vzduchových dutin	137
7.1.6	Okrajové podmínky	146
7.1.7	Vyhodnocení referenčního modelu	148
7.2	Variety opatření	154
7.2.1	Varianta 1 – hliníkové oprátky	154
7.2.2	Varianta 2A – topný kabel 10 W/m	158
7.2.3	Varianta 2A – topný kabel 10 W/m – průběžné zapojení	162
7.2.4	Varianta 3A – PUR pěna s otevřenou strukturou	166
7.2.5	Varianta 3B – PUR pěna s uzavřenou strukturou	170
7.2.6	Varianta 4 – ocelová protěza	174
7.3	Vyhodnocení variant opatření	178
7.3.1	Vyhodnocení variant opatření z energetického hlediska	183
7.3.2	Vyhodnocení situace u trémové klešti	186

7.4	Shrnutí výsledků	189
8	Závěr	191
	Seznam použité literatury a zdrojů.....	195
	Seznam obrázků.....	197
	Seznam tabulek	203
	Seznam příloh	204



1 Úvod

V dnešní době je kladen velký důraz na snižování spotřeb a hospodárné využití energií spojených s provozem a užíváním budov. Právě v budovách je spotřebováváno cca 40 % veškeré „vyrobené“ energie. Jedním základním východiskem pro snížení energetické náročnosti budov je zateplení obvodových konstrukcí. Pro novostavby a většinu objektů z období výstavby po roce 1945 se preferuje standardní osvědčené řešení formou aplikace zateplovacího systému, ať už kontaktního nebo bezkontaktního, na vnější exteriérové straně obvodových konstrukcí. Vnější zateplení poté zároveň chrání obvodové konstrukce před vlivy venkovního prostředí. Existují ovšem případy, kdy je použití vnějšího zateplení nevhodné nebo dokonce není umožněno. Jedná se především o historické objekty nebo objekty, kde je z prostorových důvodů znemožněno přidání vrstvy izolace ze strany exteriéru. V těchto případech je nutné přistoupit k vnitřnímu zateplení.

Vnitřní zateplení přináší řadu nevýhod. V chladném období roku existuje riziko kondenzace vodní páry na rozmezí tepelné izolace a původní ochlazené konstrukce a s tím spojené omezení tloušťky izolantu, zmenšení vnitřního prostoru, omezené využití vnitřních povrchů, problematické vedení veškerých instalací, vyloučení tepelně akumuláční schopnosti hmotných konstrukcí a především je u stávajících objektů prakticky nemožné dokonale vyřešit tepelné mosty a vazby – vnitřní nosné stěny, stropní konstrukce atd. Navíc se vnitřní zateplení týká ve většině případů budov realizovaných do první poloviny 20. století. Typické pro tyto objekty jsou masivní zděné obvodové stěny a dřevěné trámové stropy. Jednotlivé trámy byly ukládány do vyzděných kapes ve zdivu. Při požadavku na zachování dřevěných stropů nastává problém s dřevěnými prvky prostupujícími skrze rovinu zateplení. Zhlaví dřevěných trámů jsou tedy v zimním období situována v chladné části konstrukce. Proto se zde zvýší relativní vlhkost a hrozí dokonce i kondenzace vodní páry.

Pokud budou dřevěná zhlaví delší dobu vystavena prostředí s relativní vlhkostí nad 80 %, hrozí napadení dřevokaznými houbami, růst plísní a následná degradace dřevěných prvků ve stropní konstrukci. Původní záměr na snížení energetické náročnosti budovy aplikací vnitřního zateplení může poté vést ke znehodnocení a degradaci stavebních konstrukcí v poměrně krátkém časovém horizontu. Pro rekonstrukce historických objektů má však vnitřní zateplení vysoký potenciál a do budoucna lze předpokládat jeho častější použití. Praktická zkušenost s dlouhodobějším vlivem vnitřního zateplení na trámová zhlaví je stále nedostatečná, a proto je nutné této problematice věnovat pozornost. 3D Simulace tohoto problému pomocí počítačových softwarů je náročná a výsledky se často liší v závislosti na přístupu k tvorbě výpočtového modelu. Pro zmapování této problematiky se tedy často přistupuje k dlouhodobému monitorování chování trámových zhlaví na skutečných realizacích vnitřního zateplení nebo na experimentech ve skutečném měřítku v rámci výzkumných center. Výstupy počítačových softwarů je následně možné porovnat se skutečností a získat tak zkušenosti pro budoucí návrhy vnitřního zateplovacího systému.



Ve snaze získat další poznatky a zkušenosti v problematice trémových zhlaví ve zdivu s vnitřním zateplením se tato práce věnuje především analýze naměřených dat z oblasti trémových kapes monitorovaných v rámci dlouhodobého experimentu na UCEEBu (Buštěhrad). V práci je zahrnuto období od počátku experimentu v březnu 2015 do října 2017.

Hlavní cíle práce:

- vyhodnotit pomocí naměřených dat situaci v trémových kapsách a porovnat vliv různých úprav kapes
- vyčíslit z naměřených údajů zatížení testovací fasády větrem hnaným deštěm a zhodnotit jeho případný vliv na změnu vlhkostní situace v trémových kapsách
- popsat průběh krátkodobého experimentu umělého skrápění testovacích polí z léta 2017 s následným vyhodnocením vlivu na vlhkostní situaci v oblasti zhlaví
- vytvořit zjednodušený výpočtový model trémového zhlaví (např. v softwaru CUBE 3D), na kterém budou analyzovány další možnosti, jak zlepšit tepelně vlhkostní podmínky v trémových kapsách.

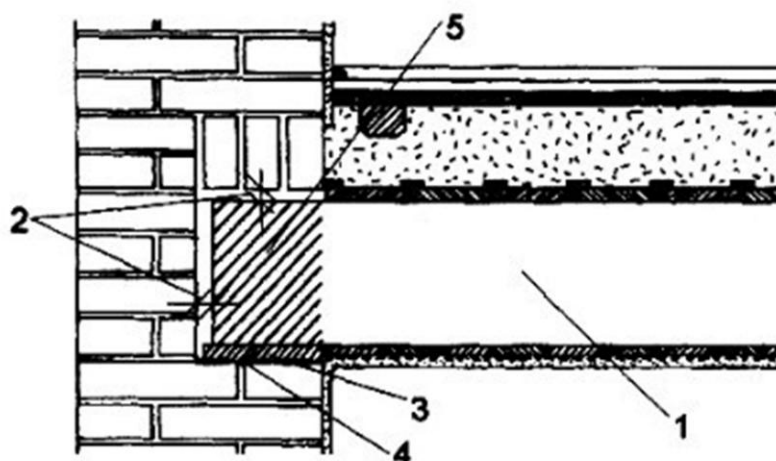


2 Problematika trámových zhlaví v souvislosti s vnitřním zateplením

2.1 Úvod do problematiky

Dřevo je nasákvavý a hygroskopický materiál. Vlhkost tedy dokáže přijímat nejen z kontaktu s kapalnou vodou, ale absorbuje i vzdušnou vlhkost z prostředí, kde je umístěno. Pokud bude delší dobu vystaveno prostředí o relativní vlhkosti nad 80 %, hrozí zvýšení hmotnostní vlhkosti dřeva nad 18 %. Při překročení této hodnoty nastává riziko napadení dřevokaznými houbami a škůdci. Některé dřevokazné houby jako například dřevomorka domácí nepotřebují po svém rozvinu již další přísun vlhkosti, produkují si potřebnou vlhkost samy. Ani sebelepší zlepšení vlhkostní situace poté nemusí zajistit její zahubení. Dalším rizikem souvisejícím se zvyšující se vlhkostí zhlaví je bobtnání dřeva. Zvětšování objemu dřeva může způsobit silové účinky na přiléhající nepoddajné konstrukce a zapříčinit zde vznik trhlin nebo prasklin. V oblasti dřevěných prvků je proto cílem nejen vyloučit nebo minimalizovat přítomnost kapalné vody, ale i udržet relativní vlhkost pod hranicí 80 %.

Aby byly vlastnosti dřeva stropních trámů co nejméně ovlivněny tepelně vlhkostním stavem okolního obvodového zdiva, byly stropní trámy ukládány do vyzděných kapes a kolem konců trámů byla ponechána vzduchová mezera. Tím byly umožněny objemové změny dřeva a i rychlé vysychání případně zvýšené vlhkosti. Jako podložka trámů bylo často používáno vlhkosti odolnější tvrdé dubové dřevo. Podložka i zhlaví se navíc pro zvýšení odolnosti proti škůdcům a plísním ošetřovalo například volskou krví s různými příměsemi (saze, hašené vápno....) nebo například nátěrem samotným hašeným vápnem [1].

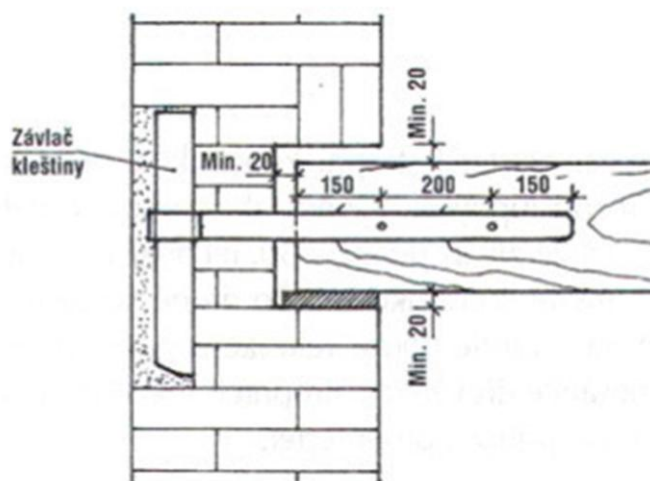


*obr. 1 – Schéma zhlaví stropního trámu;
1 – stropní trám, 2 – vzduchová mezera 20 až 50 mm, 3 – impregnovaný podkladek, 4 – izolace proti vlhkosti,
5 – impregnované zhlaví,
zdroj [1]*



Tato opatření zajišťovala před aplikací vnitřního zateplení většinou dostatečnou ochranu trámových zhlaví. Přispívalo tomu ovšem více faktorů.

Původními zdroji tepla byly ve starších objektech zpravidla spalovací kotle s přísunem vzduchu pro hoření přímo z interiéru. V otopném období tak vznikal v interiéru mírný podtlak. Jelikož tehdy byla obálka plná netěsností, docházelo nejen při větrání k přísunu venkovního suchého vzduchu do interiéru. Obvodové konstrukce tak byly přirozeně vysoušeny a i vzduch interiéru byl sušší. Navíc byla také produkce vodní páry v interiéru nižší – Lidé se méně často umývali, méně se vařilo a mylo nádobí.... Relativní vlhkost vnitřního vzduchu se tak během chladného období roku běžně pohybovala pod 40 %. Při teplotě vzduchu v interiéru 20 °C a RH 40 % je teplota rosného bodu přibližně 6 °C. I v trámových kapsách, kde je obvodové zdivo nejvíce oslabeno, hrozí pokles na takto nízkou teplotu až při výraznějších mrazech. Při zdejších mírných zimních podmínkách ke kondenzaci vodní páry v okolí trámových zhlaví běžně nedocházelo a případné zvýšené vlhkosti byl při zlepšení podmínek umožněn rychlý odvod vlivem proudění vzduchu v kapse. Rizikové místo tak představovala většinou jen zhlaví trámů obsahující ocelové kleště, které zajišťovaly prostorovou tuhost objektu (viz obr. 2).



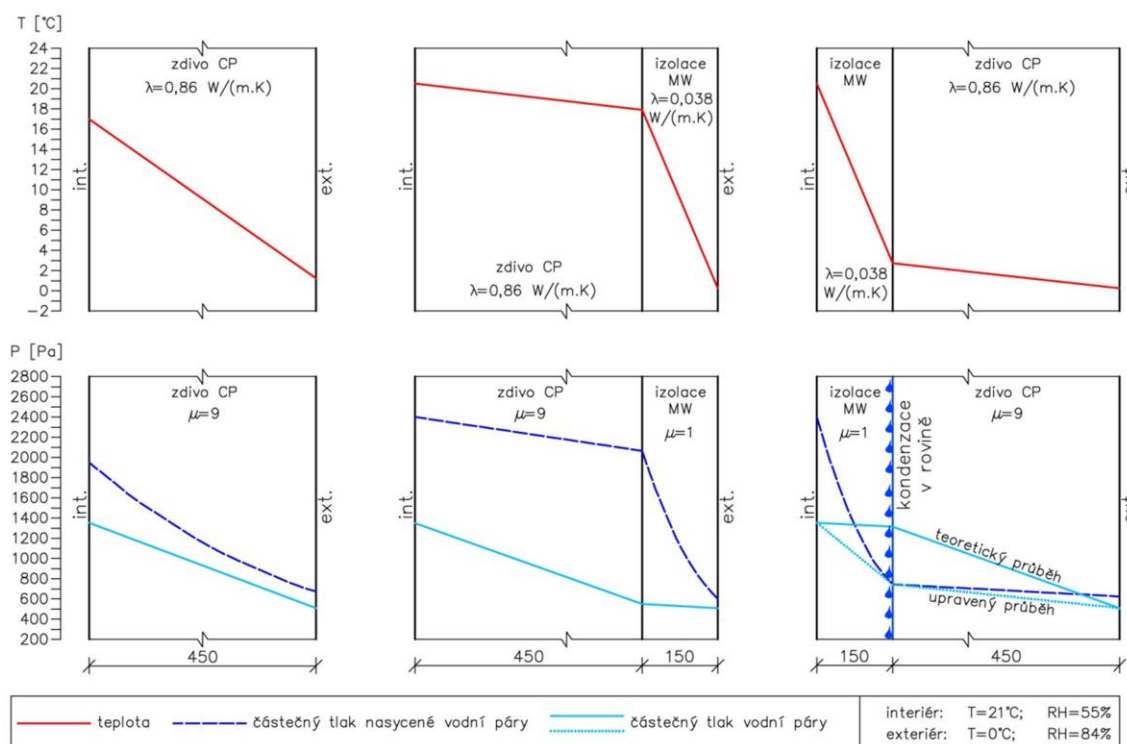
obr. 2 – Schéma trámového zhlaví opatřeného ocelovou trámovou kleští, zdroj [1]

Větší vlhkostní problémy nejen u zhlaví se mohou začít vyskytovat po výměně zdroje tepla, utěsnění netěsností v obálce (například výměnou oken), zvýšením vlhkosti vnitřního vzduchu, změnou provozu nebo například záměrným vlhčením v nově instalovaném klimatizačním zařízení. Teplota rosného bodu se pak zvyšuje a tím roste i riziko kondenzace a vyšší relativní vlhkosti v oblasti vnitřního povrchu obvodových konstrukcí a i v trámových kapsách. Často ale dochází ke kombinaci výše uvedených zásahů společně s aplikací zateplovacího systému ve snaze snížit energetickou náročnost budovy.



Pokud na obvodové stěny aplikujeme vnitřní zateplení, prakticky oddělíme původní stěnu od vytápěného interiéru. Původní konstrukce vystavená venkovnímu prostředí je v chladném období oproti nezateplenému stavu více prochlazená. Jelikož tepelný odpor původní stěny je zpravidla velmi malý, je i teplota na rozhraní vnitřní tepelné izolace a původního zdiva nízká – často hluboko pod teplotou rosného bodu pro koncentraci vodní páry v interiéru. Pokud je vodní páře obsažené ve vlhkém interiérovém vzduchu umožněno šíření k tomuto rozhraní, hrozí zde její kondenzace.

Pro představu je na obr. 3 zobrazen jednoduchý **příklad 1** porovnávající průběhy teplot a tlaků vodní páry pro zděnou cihelnou stěnu tloušťky 450 mm nezateplenou, zateplenou z exteriéru, zateplenou z interiéru. Skladba stěny je zjednodušená pouze na zdivo a vrstvu tepelné izolace z minerálních vláken. Na straně interiéru je uvažováno s teplotou 21 °C a RH 55 % a ze strany exteriéru s teplotou 0 °C a RH 84 %. Je zde uplatněn pouze přenos tepla vedením a šíření vlhkosti difuzí (Glaserova metoda)!



obr. 3 – Porovnání průběhu teplot a tlaků vodní páry pro stěnu nezateplenou, zateplenou z exteriéru a zateplenou z interiéru (výpočet programem Teplo 2014 Edu)

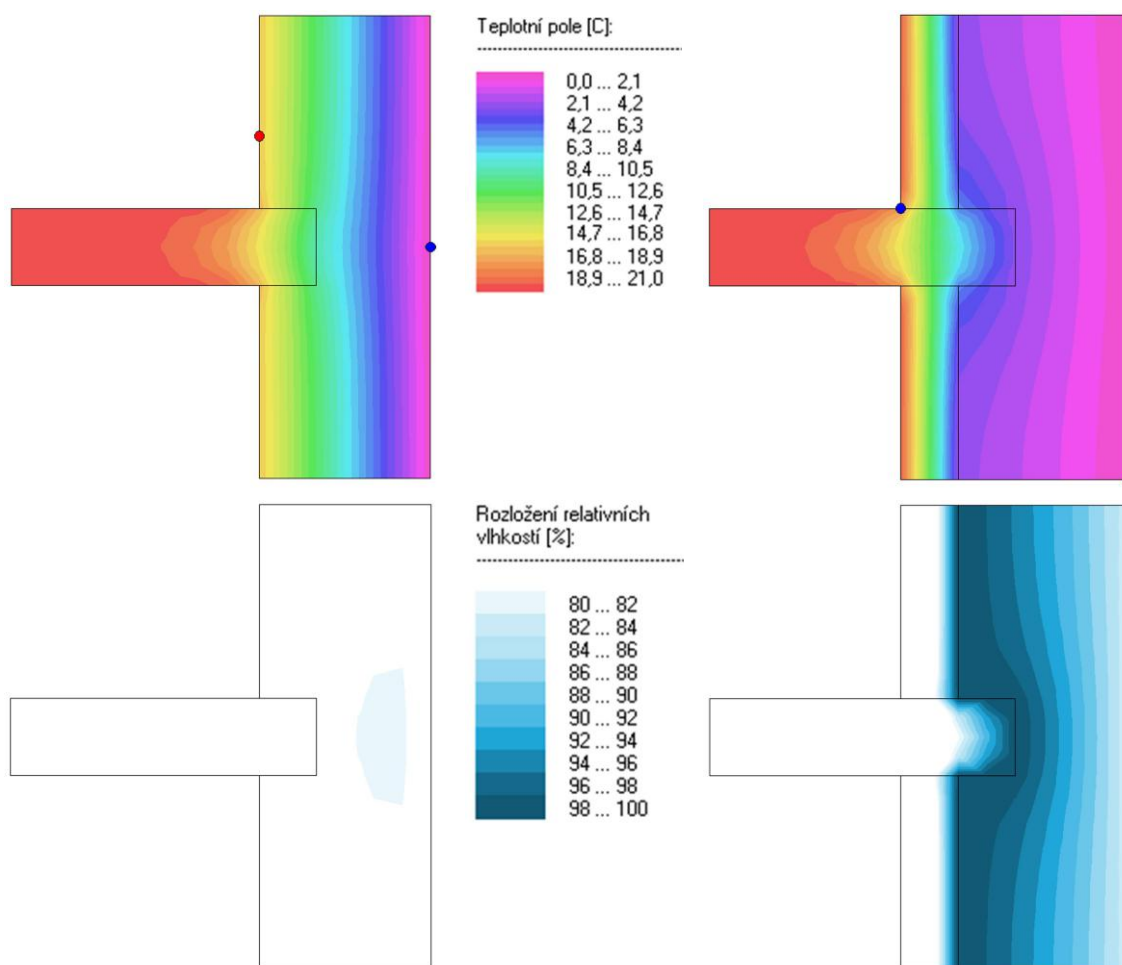
Z obr. 3 je patrné, že u varianty s běžným vnějším zateplením dochází k výraznému zlepšení teplotních podmínek a případné riziko kondenzace vodní páry v konstrukci je přesouváno až k vnějšímu líci izolantu. Tento stav lze zajistit dodržением podmínky, aby tepelný odpor vrstev směrem k exteriéru rostl, zatímco difuzní odpor klesal. Varianta s vnitřním zateplením představuje přesný opak. Teplota na rozhraní je pouze 3 °C již při těchto mírných okrajových podmínkách. V případě uvedeném na obr. 3 je použita na vnitřní zateplení pouze samotná



izolace z minerálních vláken s faktorem difuzního odporu $\mu = 1,0$. Vodní páře obsažené v interiérovém vzduchu tedy nic nebrání k prostupu na chladné rozhraní. S klesající teplotou se částečný tlak vodní páry blíží stavu nasycení. Jakmile pak vodní pára dorazí na původní stěnu, která zároveň představuje vrstvu s vyšším difuzním odporem, dojde nejčastěji právě zde k její kondenzaci.

V úrovni dřevěné stropní konstrukce je situace ještě zhoršena vlivem oslabení stěny kapsami pro uložení stropních trámů. Dřevěné trámy sice po zateplení do jisté míry představují tepelné mosty (tepelná vodivost dřeva rovnoběžně s vlákny je přibližně 10 x vyšší než u tepelných izolací) a „vytápějí“ tak prostor kapsy, nicméně teploty vzduchu v kapse a především v čele kapsy jsou stále příliš nízké. Je zde tedy důvodné riziko vysokých relativních vlhkostí a kondenzace vodní páry.

Na obr. 4 je na jednoduchém modelu představujícím řez stropní konstrukcí v místě trámového zhlaví zobrazeno porovnání polí teplot a relativních vlhkostí před a po aplikaci vnitřního zateplení. Vzduchová kapsa je zanedbána – to může představovat reálnou situaci napevno zazděného zhlaví. Skladba stěny a okrajové podmínky jsou uvažovány totožné s příkladem stěny. Opět je zde uplatněn pouze přenos tepla vedením a šíření vlhkosti difuzí (Glaserova metoda)!



obr. 4 – Porovnání polí teplot a relativních vlhkostí nad 80 % před a po aplikaci vnitřního zateplení v místě trámového zhlaví (zjednodušený 2D model vytvořený v programu AREA 2014 Edu)



Na obr. 4 je opět vidět výrazné prochlazení původní stěny po aplikaci vnitřního zateplení. V oblasti zhlaví je sice teplotní situace mírně zlepšena vyšší tepelnou vodivostí dřeva, ale teploty jsou zde stále o přibližně 6 °C nižší než v nezatepleném stavu. Zásadní problém ovšem představuje změna relativních vlhkostí. V původní variantě dle výpočtového modelu nedocházelo vůbec ke kondenzaci vodní páry a relativní vlhkost nad 80 % byla překročena jen mírně v části stěny v úrovni stropu. Za zvolených okrajových podmínek tedy nedocházelo k vlhkostním problémům. Ve variantě s vnitřním zateplením dochází ke kondenzaci vodní páry na rozhraní izolace / zdivo a po obvodě zhlaví. Navíc v rozsahu celé původní konstrukce je relativní vlhkost nad 80 %.

Po aplikaci vnitřního zateplení nastává tedy v chladném období odůvodněné riziko vysoké relativní vlhkosti a kondenzace vodní páry na rozhraní izolace / zdivo a v okolí prostupujících dřevěných prvků - trámových zhlaví. Konce trámů nejsou navíc ohroženy jen zvýšenou vlhkostí a kondenzací v bezprostřední blízkosti. Pokud je použit nenasákavý izolant, může k úrovni zhlaví stékat většími póry ve zdivu i kondenzát vznikající na rozhraní typické skladby. Kapilárními póry může naopak kondenzát vzlínat i směrem vzhůru z míst pod úrovní stropní konstrukce. Zároveň dřevo a většina okolních stavebních materiálů (malta, cihly) dokážou vlhkost přijímat sorpcí z okolního vlhčího prostředí. Následkem dlouhodobější zvýšené vlhkosti může docházet nejen k degradaci stavebních materiálů, zhoršování tepelně izolačních vlastností tepelné izolace, ale zvyšuje se i riziko vzniku a bujení plísní a s tím spojené zhoršené životní prostředí v interiéru budov.

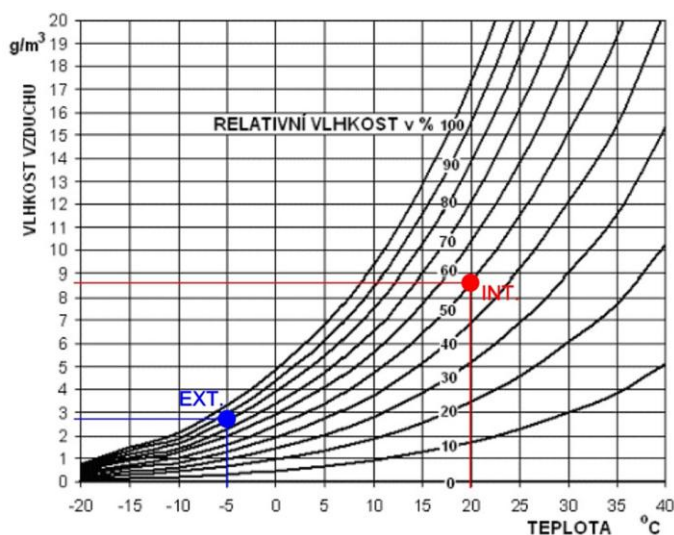
Charakteristickým zdrojem vlhkosti během chladného období je tedy pro systém vnitřního zateplení vodní pára obsažená v interiérovém vzduchu. Způsoby, kterými se vodní pára může dopravit k rizikovému rozhraní izolace / zdivo a trámovým zhlavím jsou popsány v následující kapitole.



2.2 Zdroje vlhkosti

2.2.1 Vodní pára šířící se v chladném období z interiéru

Vodní pára se do vnitřního vzduchu dostává běžným užíváním budov – mytí nádobí, sprchování, vaření, dýchání lidí, vytírání podlah, zalévání rostlin, anebo je vzduch záměrně vlhčen klimatizačním zařízením. Interiérový vzduch je v zimním období mnohem teplejší než vzduch v exteriéru. S klesající teplotou vzduchu klesá i jeho schopnost pojímat vodní páru. Chladný vzduch v exteriéru tak může pojímat pouze malé množství vodní páry. Teplý vnitřní vzduch tedy i přes nižší relativní vlhkost obsahuje v zimním období větší koncentraci vodní páry, než vzduch venkovní viz obr. 5.



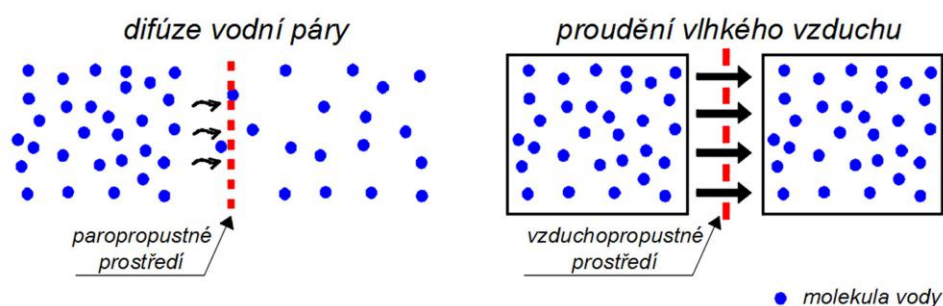
obr. 5 – Porovnání koncentrací vodní páry pro interiérový a exteriérový vzduch během zimního období (diagram převzat z [2])

Vodní pára se může šířit dvěma způsoby – difuzí vodní páry a prouděním vzduchu.

U difuze je hnací silou rozdíl koncentrací vodní páry (případně po přepočtu – rozdíl částečných tlaků vodní páry). Přirozeně dochází ke snaze o rovnovážný stav a vodní pára se tak samovolně šíří z místa vyšší koncentrace do místa s nižší koncentrací (obr. 6). Ve standardních provozech budov se tedy v zimním období vodní pára difuzí šíří z interiéru do exteriéru. Během letního období je situace opačná. Důležité je, že difuze vodní páry může probíhat i v prostředí, které je pro vzduch nepropustné. Prakticky materiál, jehož struktura umožňuje průchod molekuly vody (krychle opsaná molekule H_2O má hranu přibližně $3 \times 10^{-10} m$) umožňuje difuzi vodní páry. Schopnost propouštět vodní páru difuzí je tedy vlastnost konkrétního materiálu a závisí na jeho struktuře.



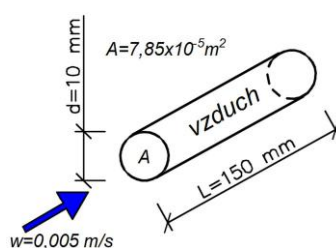
Při šíření vodní páry prouděním dochází k přesunům objemu vzduchu včetně vodní páry, která je v tomto objemu uložena (obr. 6). Hnací silou pro proudění vzduchu je rozdíl tlaku vzduchu. Proudění se odehrává z místa vyššího tlaku směrem k místu s nižším tlakem vzduchu. Rozdíl tlaků může být způsoben přirozeně rozdílnou hustotou vzduchu o různých teplotách (teplejší vzduch je lehčí a proudí vzhůru) nebo například vlivem působení větru na obálku objektu. Dalším faktorem ovlivňujícím tlakový rozdíl mezi interiérem a exteriérem je přístup k větrání objektu (přirozené; hybridní podtlakové/přetlakové; nucené rovnotlakové/podtlakové/přetlakové). Proudění vzduchu je ovlivněno mnoha faktory a je tak oproti difuzi méně předvídatelné. Zároveň může proudění vzduchu probíhat jiným směrem nezávisle na směru difuze vodní páry. Vzduchopropustné jsou materiály s velkými propojenými póry nebo například vláknité tepelné izolace – rákosové, slaměné, ale i flexibilní dřevovláknité izolace a izolace z minerálních a skelných vláken. Důležité je, že co je vzduchotěsné, nemusí být parotěsné, ale naopak, co je parotěsné nebo alespoň difuzně uzavřené, to je zároveň vzduchotěsné.



obr. 6 – Schéma šíření vodní páry difúzí a prouděním vzduchu

Z obr. 6 je patrné, že při proudění vlhkého vzduchu dochází k mnohem většímu přenosu vlhkosti oproti difuzi. Pro představu je uveden jednoduchý **příklad 2**.

V předešlém **příkladu 1** je v interiéru teplota 21 °C a RH = 55 % (odpovídá částečnému tlaku vodní páry $p_1 = 1\,367\text{ Pa}$, nebo koncentraci vodní páry $v_1 = 0,01\text{ kg/m}^3$) na rozhraní je teplota přibližně 3 °C a dochází zde ke kondenzaci vodní páry → RH = 100 % (odpovídá částečnému tlaku nasycené vodní páry $p_2 = 757\text{ Pa}$). Rozdíl částečných tlaků vodní páry je tedy $\Delta p = 610\text{ Pa}$. Nyní si můžeme představit, že se v zateplovacím systému nachází netěsnost (viz obr. 7), kterou dochází k proudění vzduchu z interiéru rychlostí $w = 0,005\text{ m/s}$. Součinitel difuze vodní páry ve vzduchu $\delta = 1,9 \times 10^{-10}\text{ kg/(m.s.Pa)}$ dle [3]. Jinými slovy, vrstvou vzduchu o ploše 1 m² a tloušťce 1 m projde při tlakovém rozdílu 1 Pa za časový úsek 1 sekundu celkem $1,9 \times 10^{-10}\text{ kg}$ vodní páry.



obr. 7 – Schéma netěsnosti



Hmotnostní tok vodní páry G [kg/s]:

$$G_{\text{difuze}} = \delta \cdot A \cdot \Delta p / L = 1,9 \cdot 10^{-10} \cdot 7,85 \cdot 10^{-5} \cdot 610 / 0,15 = \underline{6,07 \cdot 10^{-11} \text{ kg/s}}$$

$$G_{\text{proudění}} = v_1 \cdot w \cdot A = 0,01 \cdot 0,005 \cdot 7,85 \cdot 10^{-5} = \underline{3,93 \cdot 10^{-9} \text{ kg/s}}$$

Na **příkladu 2** je vidět, že dotace vlhkosti prouděním řádově převyšuje přenos vodní páry difuzí, a to i při velmi nízkých rychlostech proudění vzduchu. Stále přitom platí, že s klesající teplotou vzduchu se snižuje jeho kapacita pro vodní páru. Pokud je tedy systémem vnitřního zateplení umožněno proudění vlhkého vzduchu k chladnému rozhraní izolace a zdiva nebo do kapes trémových zhlaví, hrozí zde značná kondenzace vodní páry.

Zajištění vzduchotěsnosti vnitřního zateplovacího systému je tak zásadním předpokladem pro omezení množství kondenzující vodní páry v kritických oblastech. Zároveň je na vzduchotěsnosti závislá i správná tepelně izolační funkce, kterou poskytuje u většiny izolací právě nehybný vzduch v pórech nebo mezi vlákny. Navíc většina běžných výpočtů uvažuje s šířením vodní páry pouze difuzí, a pokud ve skutečnosti dochází v systému zateplení k proudění vzduchu, jsou výsledky těchto výpočtů výrazně zkreslené a podceněné.

Vzduchotěsnosti v ploše zateplovacího systému lze docílit poměrně snadno. Většinou je zajištěna v úrovni vnitřního povrchu omítkou či omítkovou stěrkou. Další možností je záklop deskovými materiály (sádkarton, OSB...) nebo je přímo použita tepelná izolace s uzavřenou pórovou strukturou. Zde je třeba předejít případným mezerám a věnovat pozornost utěsnění styků desek. Problémové místo v ploše zateplovacího systému můžou představovat i například neutěsněné zásuvkové krabičky. Velmi důležité je zabránit vzniku propojených dutin v oblasti mezi tepelnou izolací a zdivem. I malá netěsnost v zateplovacím systému, která by tento systém dutin propojila s prostředím interiéru, by mohla vést k závažným přenosům vlhkosti v celé ploše zateplení. Navíc by zde vznikající kondenzát mohl velmi snadno stékat do míst, kde může působit větší škody. Nerovné zdivo je tak nutné před aplikací zateplení vyrovnat nebo lze použít izolanty, které svou flexibilitou nerovnost vykompenzují. Pokud se tepelně izolační desky na podklad lepí, tak je nutné lepit celoplošně nebo alespoň dodržovat systém lepení s obvodovým rámečkem, aby případné dutiny byly po výšce přerušeny. Lepení pouze na tzv. buchty je nedostačující!

Z hlediska řešení vzduchotěsnosti představují problém především detaily navazujících konstrukcí a případné prostupy vnitřním zateplovacím systémem. Jedním z těchto kritických míst jsou i trémová zhlaví. Často mají stropní trámy výsušné trhliny nebo mají nepravidelný tvar, čímž je značně ovlivněna proveditelnost vzduchotěsného utěsnění (viz obr. 8). Je zde nutné použít například vzduchotěsnící lepicí pásy v kombinaci s těsnícími tmely a zátkami nebo různé nátěry či tekuté hydroizolace na bázi asfaltu.

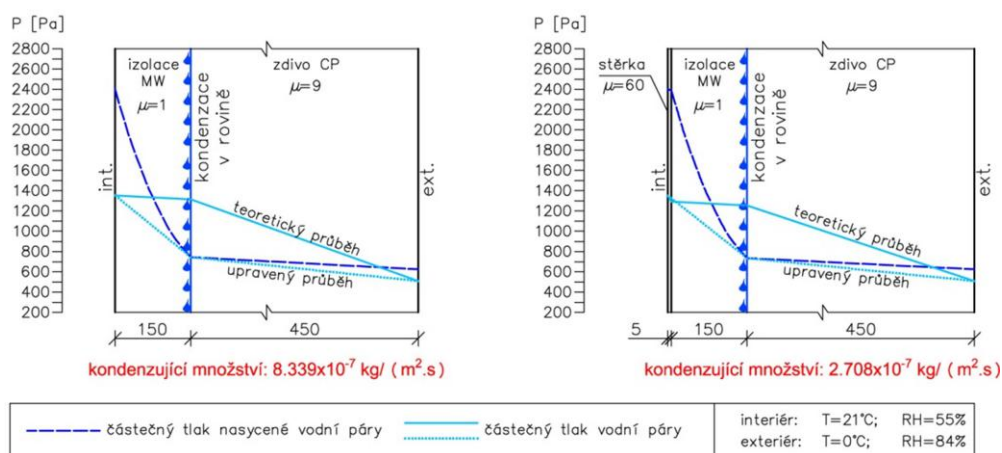


obr. 8 – Výsušné trhliny ve dřevěných hranolech, zdroj [4]

Někdy je dokonce nepřijatelné zasahovat do konstrukcí podlah a podhledů. Zateplovací systém je v místě stropní konstrukce nutné zcela přerušit. Kapsy kolem stropních trámů tak zůstávají bez opatření a jsou zcela otevřené do prostoru stropní dutiny, případně jsou částečně zasypány násypem. Vlhkost obsažená ve vzduchu ve stropní dutině může poté snadno putovat k prochlady kapsám, kde hrozí kondenzace vodní páry. Při změně klimatických podmínek je zde, ale oproti utěsněným kapsám umožněn rychlejší odpar. Otázkou je, jaký z přístupů zajistí dlouhodobě lepší podmínky v oblasti trámových zhlaví.

Stropní konstrukce bez zásahu je proto také součástí experimentu na UCEEBu. Vyhodnocení monitorování z roku 2015 – 2017 je rovněž předmětem této diplomové práce.

Pouhé zajištění vzduchotěsnosti zateplovacího systému, ale ve většině případů nevede k úplnému vyloučení kondenzace nebo jejímu omezení na přijatelnou úroveň. Dostatečným zdrojem vlhkosti je i difuze vodní páry. Pro představu je uveden **příklad 3**.



obr. 9 – Porovnání tlaků vodní páry pro zateplení bez a se vzduchotěsnou povrchovou úpravou + uvedení kondenzujícího množství vodní páry (výpočet v programu Teplo 2014 Edu – šíření vodní páry pouze difuzí!)



Ke skladbě z **příkladu 1** je ze strany interiéru přidána omítková stěrka o tloušťce 5 mm s faktorem difuzního odporu $\mu = 60$ (tato vrstva by zajišťovala dostačující vzduchotěsnost). Po aplikaci této vrstvy se kondenzující množství vodní páry snížilo přibližně třikrát (v obou případech je počítáno pouze se šířením vodní páry difuzí!). Nicméně ke kondenzaci stále dochází, a pokud přepočteme kondenzující množství na časový úsek jednoho dne, získáme hodnotu $0,023 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{den})$.

V příkladu představujícím ustálený stav je sice na straně bezpečné vyloučen vliv akumulace tepla a je zanedbáno sluneční záření, ale použité okrajové podmínky jsou poměrně mírné a mohou během zimního období v našem klimatickém podnebném pásmu běžně nastat. I při těchto mírných podmínkách tedy vzduchotěsná omítková stěrka dostatečně neomezí vstup vodní páry a vzniká velké množství kondenzátu – alespoň dle výpočtu Glaserovou metodou [5]!

Požadavkem normy ČSN 73 0540-2 v čl. 6.1.2 [6] přitom je, aby bylo kondenzaci vodní páry uvnitř konstrukcí zcela zabráněno, pokud by tím mohla být ohrožena požadovaná funkce konstrukce. Tento výklad normy je poněkud zmatečný, protože téměř vždy může kondenzát nějakou z funkcí konstrukce ohrozit.

Dále je dle [6] pro ostatní konstrukce obsahující dřevěné prvky (kde kondenzát „neohroží“ požadovanou funkci) připuštěno následující množství kondenzátu $M_{c,a,N}$ [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$]:

$$M_{c,a,N} \leq 0,1 \text{ kg}/\text{m}^2 \cdot \text{rok}$$

$M_{c,a,N} \leq 3 \%$ plošné hmotnosti materiálu, v němž vodní pára kondenzuje (pro materiály s objemovou hmotností nad $100 \text{ kg}/\text{m}^3$) nebo 5% plošné hmotnosti materiálu (pro materiály s objemovou hmotností pod $100 \text{ kg}/\text{m}^3$)

Uvažuje se menší z hodnot $M_{c,a,N}$ [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})$] [6]

Dále musí platit, že zkondenzované množství vodní páry je meziročně menší než odpařitelné množství vodní páry

$$M_{c,a,N} \leq M_{ev,a,N} \text{ [kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{rok})] \quad [6]$$

Aby konstrukce byla považována za spolehlivou, měl by být zároveň splněn i požadavek na pozitivní roční bilanci zkondenzované a vypařitelné vodní páry vypočtené po jednotlivých měsících dle ČSN EN ISO 13788 [7].

Výpočetní postupy pro posouzení vlhkostního chování jsou v obou normách [6] a [7] založeny na Glaserově metodě [5].



Pokud chceme tyto požadavky norem dodržet, je nutné efektivně bránit i prostupu vodní páry difuzí a navrhnout difuzně uzavřený systém vnitřního zateplení.

Jedním z možných přístupů, je používat jako izolant difuzně uzavřené materiály (např. XPS, vakuové panely, desky z fenolických pěn s uzavřenou strukturou, pěnové sklo) nebo zajistit parotěsnost u vnitřního povrchu fóliovými parozábranami. U takto provedeného systému vnitřního zateplení je pak výrazně omezováno množství vodní páry prostupující na kritickou hranici izolantu s původní stěnou. Kondenzaci je tím zabráněno nebo je alespoň množství kondenzátu minimalizováno na přípustnou úroveň.

Bohužel zajištění dokonalé parotěsnosti, je prakticky nemožné. U fóliových materiálů plnicích funkci parozábrany je nutné na straně bezpečnosti uvažovat ve výpočtech se snížením faktoru difuzního odporu o 1 až 2 řády. Jedná se o konzervativní přístup, jak zohlednit případné nedostatky v provedení parotěsné vrstvy – přelepované spoje, propíchnutí fólie, utěsnění okolo prostupů atd. Další nevýhodou při použití parotěsných vrstev je výrazné snížení potenciálu pro vysychání vlhkosti směrem do interiéru. Nedokonale provedená parotěsná vrstva nebo její perforace vlivem užívání objektu může vést k výrazně většímu množství kondenzátu oproti předpokládanému stavu dle výpočtů. Kondenzát se pak meziročně nemusí stihnout odpařit a s každým kondenzačním obdobím pak narůstá jeho množství. Dále je omezeno i vysychání vlhkosti způsobené jinými zdroji než je vodní pára prostupující v zimním období z interiéru (viz kapitola 2.2.2). Pro vnitřní zateplení tohoto typu je tedy často vhodné použít materiály s proměnným difuzním odporem. Ten se v principu mění v závislosti na okolních podmínkách (teplota a relativní vlhkost). V zimním období se v konstrukci zpravidla chovají jako difuzně uzavřené a v letním období naopak umožňují účinnější vysychání do interiéru.

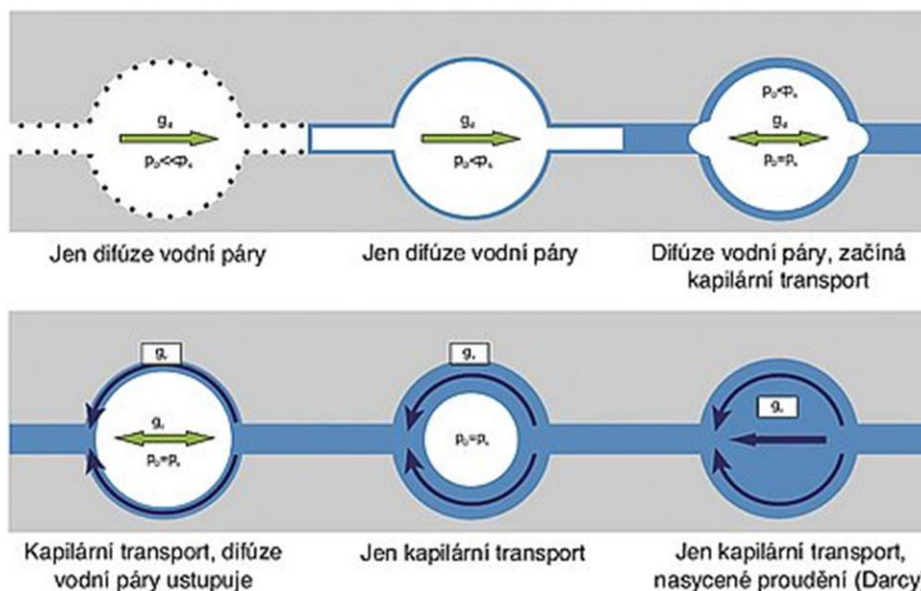
Navíc je třeba si uvědomit, že i když v ploše zajistíme dostatečné omezení difuze vodní páry, tak může docházet k přenosu vodní páry tzv. boční difuzí přes navazující konstrukce, které jsou difuzi otevřené. Mimo vnitřních nosných stěn to mohou být právě i prostupující dřevěné stropní trámy. Struktura dřeva připomíná svazek dutých trubiček a faktor difuzního odporu je tak ve směru rovnoběžně s vlákny velmi nízký (přibližně $\mu = 4,5$). I když budou trámy v rovině vnitřního povrchu stěny dokonale utěsněny a napojeny na parotěsné vrstvy, tak skrze ně může docházet k difuzi vodní páry. V místě typické skladby, tak může být kondenzace v zimním období zcela vyloučena, ale v problémové oblasti trámových kapes k ní dále dochází. Vlivem okolního utěsnění poté může trvat delší dobu, než se vlhkost odpaří. Aby difuze skrze trámy byla omezena, je teoreticky možné dřevo utěsnit injektáží nebo zabránit přístupu vodní páry do struktury dřeva například pomocí nepropustných nátěrů. Další možnost je utěsnit celou stropní konstrukci v úrovni podlahy a podhledu.

Vzhledem k velkým nárokům na kvalitu provedení je obecně tento přístup k vnitřnímu zateplení nevhodný pro rekonstrukce, kde se jen těžko lze vyhnout problémovým detailům.



Ve snaze vyhnout se rizikům difúzně uzavřených systémů je v současné době upřednostňován druhý přístup k vnitřnímu zateplení, a to použití kapilárně aktivních materiálů. Jako izolant se používají například desky dřevovláknité, kalciumsilikátové, desky z minerální vlny s hydrofilní úpravou, polyuretanové desky s otevřenou strukturou atd. Typickou vlastností je smáčivost, otevřený pórový systém, a tudíž i nízký difúzní odpor. Tyto systémy tedy umožňují snadný vstup vodní páry difúzí, a tím i kondenzaci vodní páry. Principem kapilárně aktivních materiálů je ale bezpečné uložení případného kondenzátu a později bezproblémový odpar zpět do interiéru.

Jakmile vodní pára z kondenzuje na studeném rozhraní izolace / zdivo, dochází díky kapilárním silám ke zpětnému zavlečení kapalného kondenzátu do otevřené pórové struktury. Kondenzát je postupně rozšiřován do objemu izolantu a odpařuje se zpět do interiéru. Pokud se voda dostane kapilárním transportem až k vnitřnímu povrchu, dochází k urychlení vysychání i díky proudění vzduchu kolem povrchu stěny.



obr. 10 – Schéma funkce kapilárně aktivních materiálů, zdroj [8]

Ovšem bez rozsáhlé kondenzace vodní páry, nefunguje ani kapilární transport. Vlivem difúzní otevřenosti přitom mohou u rozhraní izolace / zdivo nastat vysoké relativní vlhkosti nad 80 % i při relativně mírných okrajových podmínkách. Vystává tak otázka, zda samotný materiál izolantu nebo zdiva není ohrožen růstem plísní, a to především, když jsou jako izolant použity organické materiály – například dřevovláknité desky.

Lze předpokládat, že v chladném období, kdy v systému hrozí zvýšená vlhkost nebo kondenzace, jsou pro růst plísní na rozhraní příliš nízké teploty. Pokud je zajištěn kontakt izolantu se stěnou, není zde v podstatě ani prostor k rozvoji plísní a není zde přísun vzduchu. Materiály jako kalciumsilikátové desky navíc svou vysokou alkalitou vytvářejí nevhodné podmínky pro růst plísní. Nicméně stav izolantu a zdiva po dlouhodobé aplikaci vnitřního zateplení je stále nejasný.



Hlavní nespornou výhodou kapilárně aktivních systémů je ale zabránění hromadění a pohybu kapalně vody v rovině rozhraní, kde by jinak mohla působit problémy – například v okolí prostupujících trémových zhlaví. Pro správnou funkci je ovšem nezbytně nutné zajistit kontakt kapilárně aktivního materiálu s konstrukcí, na níž je očekáváno riziko kondenzace.

Vliv zachyceného kondenzátu na změnu tepelně izolačních vlastností přitom není velký. Kondenzující množství, které běžně vychází pro tyto systémy zateplení, představuje zpravidla jen zlomek dostupné kapacity. Například dle [9] dokáže kalciumsilikátová deska o ploše 1 m² a tloušťce 2 cm nasáknout 20 litrů vody. Důležité je před samotnou aplikací vnitřního zateplení odstranit trvalé zdroje vlhkosti jako například vzlínání vlhkosti z podloží, aby nedošlo k nasycení izolantu.

Další výhodou systémů bez parozábrany je možnost jednoduché povrchové úpravy formou omítek či stěrek. Většina systémů používá předepsané omítkové stěrky s nízkým difuzním odporem. Nicméně u některých systémů je pro zajištění dobrých vlastností izolantu možné regulovat množství kondenzátu použitím omítkové stěrky s vyšším difuzním odporem – ovšem na úkor zhoršení vysychání do interiéru. Dále je možné použít například hliněné omítky, čímž je ještě více podpořeno udržování rovnovážné vlhkosti vzduchu v interiéru a také je částečně navracena tepelně akumuláční schopnost izolovaných konstrukcí.

Zásadním problémem kapilárně aktivních systémů je ovšem téměř nemožné splnění požadavků norem [6] a [7] založených na Glaserově metodě [5]. Výpočet za ustáleného stavu, zohledňující šíření vlhkosti pouze difuzí, nedokáže totiž zohlednit funkci kapilárně aktivních materiálů a vede k velmi konzervativním výsledkům (viz obr. 9).

Pro hodnocení těchto systémů umožňuje norma [6] použití sofistikovanějších výpočetních metod pro posouzení vlhkostního chování konstrukcí podle ČSN EN 15026 [10]. Tyto metody uvažují dynamicky proměnné okrajové podmínky. Dále je zde podrobně zahrnut vliv tepelné akumulace a šíření a ukládání vlhkosti. Některé softwary navíc umožňují započítání vlivu slunečního záření a větrem hnaného deště.

Konstrukce je následně považována za vyhovující, pokud se výpočtem podle [10] prokáže, že se v žádné vrstvě konstrukce meziročně nezvyšuje hmotnostní vlhkost. Zároveň stále platí podmínka, že případný kondenzát neohrozí požadovanou funkci konstrukce.

Oproti jednoduchému posouzení na základě Glaserovy metody jsou podrobnější metody velmi náročné na vstupní data a následně na výpočetní čas. Další problém představuje posuzování 3D detailů, jako například právě trémových zhlaví.

Zatímco pro problematiku 1D a 2D modelů existuje dostatek softwarů (například Wufi, Delphin...), tak pro posuzování 3D detailů je situace horší. Je možné využít například univerzální software Comsol Multiphysics, jehož současná poslední verze 5.3 obsahuje již i modul šíření vlhkosti a tepla ve stavebních materiálech. Jelikož se ale nejedná o software primárně určený pro posuzování stavebních konstrukcí, je uživatelsky více komplikovaný a neobsahuje dostatečnou materiálovou databázi. Velké množství vstupů a výpočetních vztahů je tak nutné zadávat ručně. Komplexní dynamické tepelně vlhkostní posouzení 3D detailů je navíc obecně velmi náročné na výpočetní čas.



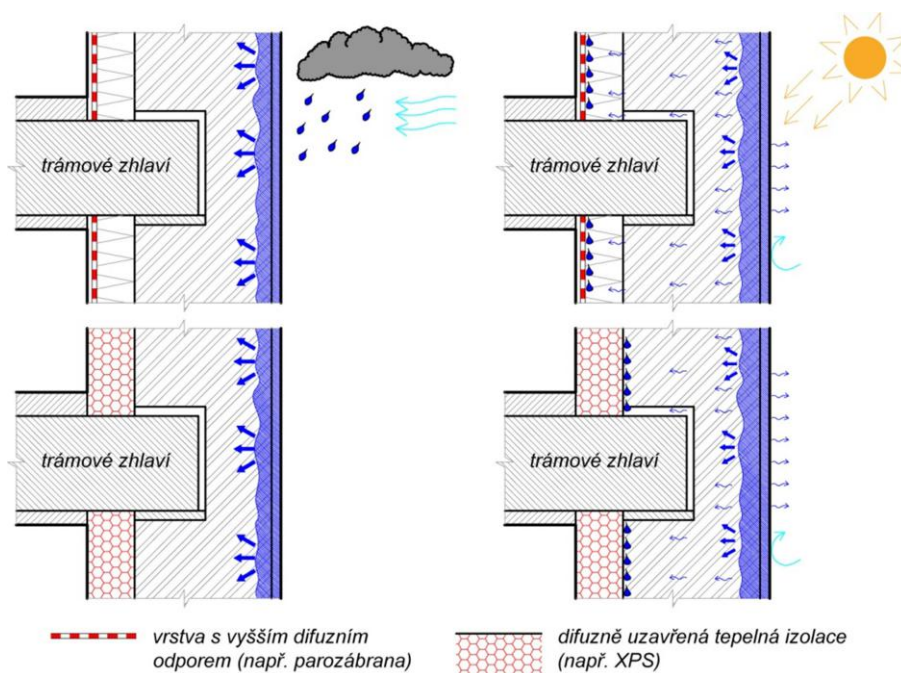
2.2.2 Další nahodilé zdroje vlhkosti

Zvýšená vlhkost či kapalná voda v systému vnitřního zateplení a trámových zhlaví nemusí být pouze důsledkem šíření vodní páry z interiéru. Dalšími více nahodilými zdroji vlhkosti může být například dešť, tání sněhu, vlhkost vztlínající z podloží, nebo zabudovaná vlhkost.

Větre hnaný dešť

Potencionálním zdrojem vlhkosti pro obvodové stěny je větrem hnaný dešť. Toto riziko se týká zejména stěn vystavených převládajícímu směru větru. Například na většině území České republiky převládá směr větru od západu. Při silném dešti a současném působení větru může i na svislé plochy fasád dopadat nezanedbatelné množství vody. Z mokré části zdiva se následně voda šíří kapilárními silami hlouběji do stěny. Většími póry nebo prasklinami se voda může šířit i vlivem gravitace. U vnějšího povrchu sice po dešti dochází k odparu vody zpět do exteriéru, ale do míst trámových kapes, kde je zdivo oslabeno, může kapalná voda stihnout doputovat. Často jsou navíc na historických fasádách v úrovni stropních konstrukcí různé římsy, na kterých se může dešťová voda snáze zachycovat. Od těchto prvků pak může odšťikovat na fasádu voda i z vertikálního deště.

Pokud navíc po dešti nastane teplé a slunečné období, tak se vlivem dopadajícího solárního záření ohřívá povrch fasády a v mokré části stěny tak dochází ke zvýšení parciálního tlaku vodní páry. Vlhkost se pak může směrem do interiéru šířit nejen kapilárními silami, ale i difuzí. Jakmile pak vodní pára narazí na vrstvy s vyšším difuzním odporem, hrozí její kondenzace (viz obr. 11). I u trámových kapes utěsněných okolo trámu může tedy nastat kondenzace vodní páry.



obr. 11 – Schéma působení větrem hnaného deště



Silné deště a současné působení větru přitom na našem území hrozí většinou během letních bouřek. Zvýšená relativní vlhkost v trámových kapsách v kombinaci s vyššími teplotami během léta, tak vytvářejí ideální podmínky pro růst plísní. Situace v kapsách tedy může být horší než při kondenzaci vodní páry během zimního období, kdy jsou teploty pro růst plísní příliš nízké.

Množství pohlcené dešťové vody je možné omezit použitím vodoodpudivých úprav fasády – silikonové, akrylátové fasádní stěrky a nátěry. Další vlastností těchto materiálů je ale vyšší difuzní odpor. Pro historické objekty, které mají velmi často problémy s vlhkostí je použití těchto materiálů nevhodné. Jejich použití je někdy vyloučeno i požadavkem památkových úřadů na zachování tradičních stavebních materiálů. Pokud by se ovšem prokázalo, že větrem hnaný déšť představuje dominantní zdroj vlhkosti v systému vnitřního zateplení, je snížení nasákavosti fasády určitě namístě. Pokud je to možné, je vhodné alespoň na větrem nejvíce exponované straně objektu, zajistit co největší přesah střechy.

Zabudovaná vlhkost

Jak již bylo uvedeno, u rekonstrukcí se lze běžně potkat s nerovným povrchem stěn, které jsou určeny pro aplikaci vnitřního zateplení. Podklad je nutné nejdříve vyspravit a vyrovnat například novým omítnutím. Často je k tomu zapotřebí vrstva omítky silná i několik centimetrů. Pro schnutí omítek platí přibližně pravidlo, že 1 mm vrstvy má vysychat 1 den. Pro nutnou úsporu času se ale často začne s aplikací zateplovacího systému na stále vlhký podklad. Pro upevnění některých typů tepelných izolací na stěny je navíc používán mokřý proces lepení cementovým lepidlem. Pokud se jedná o difuzně uzavřený systém vnitřního zateplení, je pak výrazně omezeno vysychání zbývající vlhkosti směrem do interiéru. Pokles vlhkosti tak může být velmi pomalý, a než dojde k vyschnutí na bezpečnou úroveň, může hrozit vznik plísní. V okolí prostupujících dřevěných prvků by sice vysychání probíhalo pravděpodobně rychleji, ale dřevo je na vznik plísní více náchylné a mohlo by tedy být ohroženo. Ještě před dokončením rekonstrukce tak může být nastartována degradace stavebních konstrukcí.

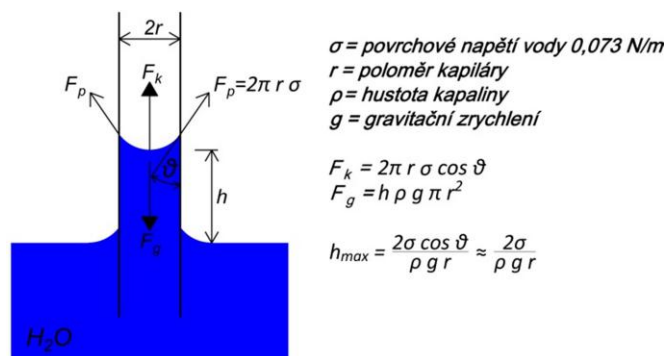
Tající sníh

Pokud z fasády v úrovni stropní konstrukce vystupují římsy nebo například konstrukce balkonů, hrozí zde v zimním období zadržování napadaného sněhu. Při oteplení nebo pouze vlivem působení solárního záření začne sníh odtávat. K šíření vody směrem k interiéru pak může docházet opět kapilárními silami v pórovém systému zdiva nebo v případných prasklinách vlivem gravitace. Oproti dešti, může ale tající vrstva sněhu způsobit i vztlínání vody například pod zasněžené spoje a přesahy oplechování. Tající sníh navíc může být zdrojem vlhkosti i v soklové části zdiva podobně jako odstříkující dešťová voda.



Vlhkost z podloží

Objekty, u kterých se uvažuje s aplikací vnitřního zateplení, jsou ve většině případů vystavěny před rokem 1945. Izolace proti vlhkosti z podloží je často nedostatečná nebo žádná není. Nadzákladové zdivo je zpravidla vyžděno z plných pálených cihel nebo se jedná o smíšené zdivo. Vlhkost z podloží tak může vzlínat kapilárními póry v cihelném zdivu směrem vzhůru. Výška vzlinutí je přitom závislá na poloměru kapilár (viz obr. 12).



obr. 12 – Princip kapilárního vzlinutí

Většina pórů v cihelném střepe má poloměr okolo 1×10^{-5} m, čemuž odpovídá maximální výška vzlinutí přibližně 1,5 m. Zhlaví stropních trámů tak zpravidla nejsou vlhkostí vzlínající z podloží ohrožena, pokud se nejedná o stropní konstrukci nad suterénem. I v místě běžné skladby vnitřního zateplení může ovšem vlhkost z podloží působit problémy. Většinou je tedy nutné tento zdroj vlhkosti odstranit ještě před aplikací vnitřního zateplení například injektáží zdiva, nebo jeho podřezáním a dodatečným odizolováním. Jinou možností k zabránění vzlinutí vody může být také využití elektroosmózy. Vnitřní zateplení je poté v prvním nadzemním podlaží vhodnější pojmout zároveň jako sanační opatření – například pomocí kalciumsilikátových desek, které mají horší tepelné izolační vlastnosti, ale dokážou dobře odvádět vlhkost ze zdiva.

poznámka:

Dalším zdrojem vlhkosti může být například i havárie nebo netěsnost vodovodního, odpadního nebo teplovodního potrubí. Nepatrný únik vody z těchto rozvodů je přitom někdy více nebezpečný než velká havárie, jelikož si ho nemusíme delší dobu všimnout. Malá, ale trvalá dotace vlhkosti především v blízkosti dřevěných prvků může způsobit rychlou degradaci konstrukcí. Nejlepší prevencí před tímto zdrojem vlhkosti je tedy veškeré rozvody umístit mimo obvodové konstrukce, kde má být aplikováno vnitřní zateplení a obecně dbát na důkladné provádění a těsnost rozvodů.



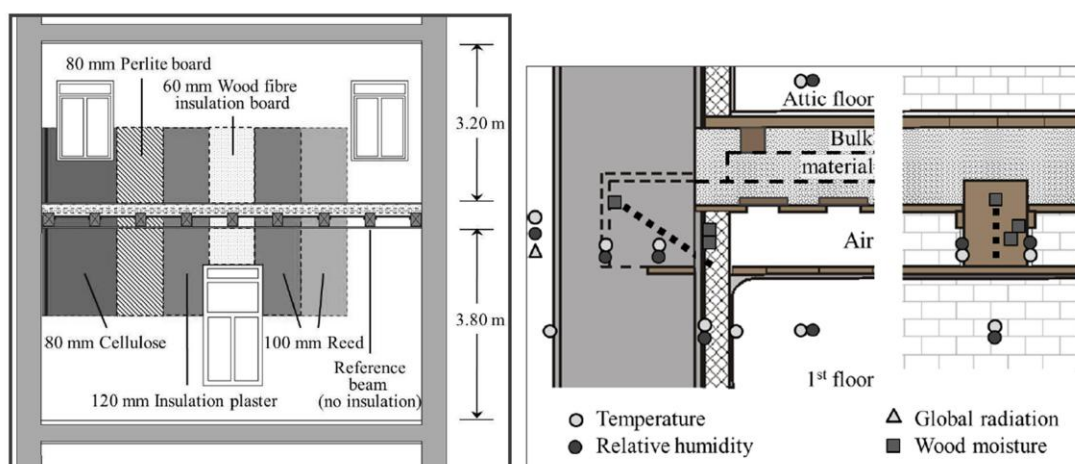
2.3 Přehled o současném stavu problematiky

V této části je představen velmi stručný přehled o současném stavu poznání v problematice trámových zhlaví v souvislosti s vnitřním zateplením. Jsou zde především citovány poznatky z různých prací věnujícím se dlouhodobým experimentům na reálných objektech.

Z článku Ulricha Ruisingera [11] (Technická univerzita Drážďany)

V rámci technické univerzity v rakouském Grazu běží od roku 2010 dlouhodobý experiment sledující tepelně-vlhkostní chování trámových zhlaví při aplikaci vnitřního zateplení.

Na reálném objektu z roku 1885/1886 využívaném v současné době jako mateřská škola se testuje 5 různých systémů vnitřního zateplení. Jihozápadně orientována obvodová zděná stěna tloušťky cca 550 mm je z vnitřní strany zateplena na rozmezí 1. NP a 2. NP, aby byl zahrnut dřevěný trámový strop (viz obr. 13). Ve spodní místnosti využívané jako školková třída probíhá běžný provoz. Horní místnost, sloužící jako sklad, je v době experimentu využita pro umístění měřicích zařízení a monitoring.



obr. 13 – pohled na monitorovanou stěnu (vlevo), situace a rozmístění senzorů v oblasti zhlaví (vpravo), zdroj [11]

Pro experiment byly uvažovány následující difúzně otevřené systémy vnitřního zateplení:

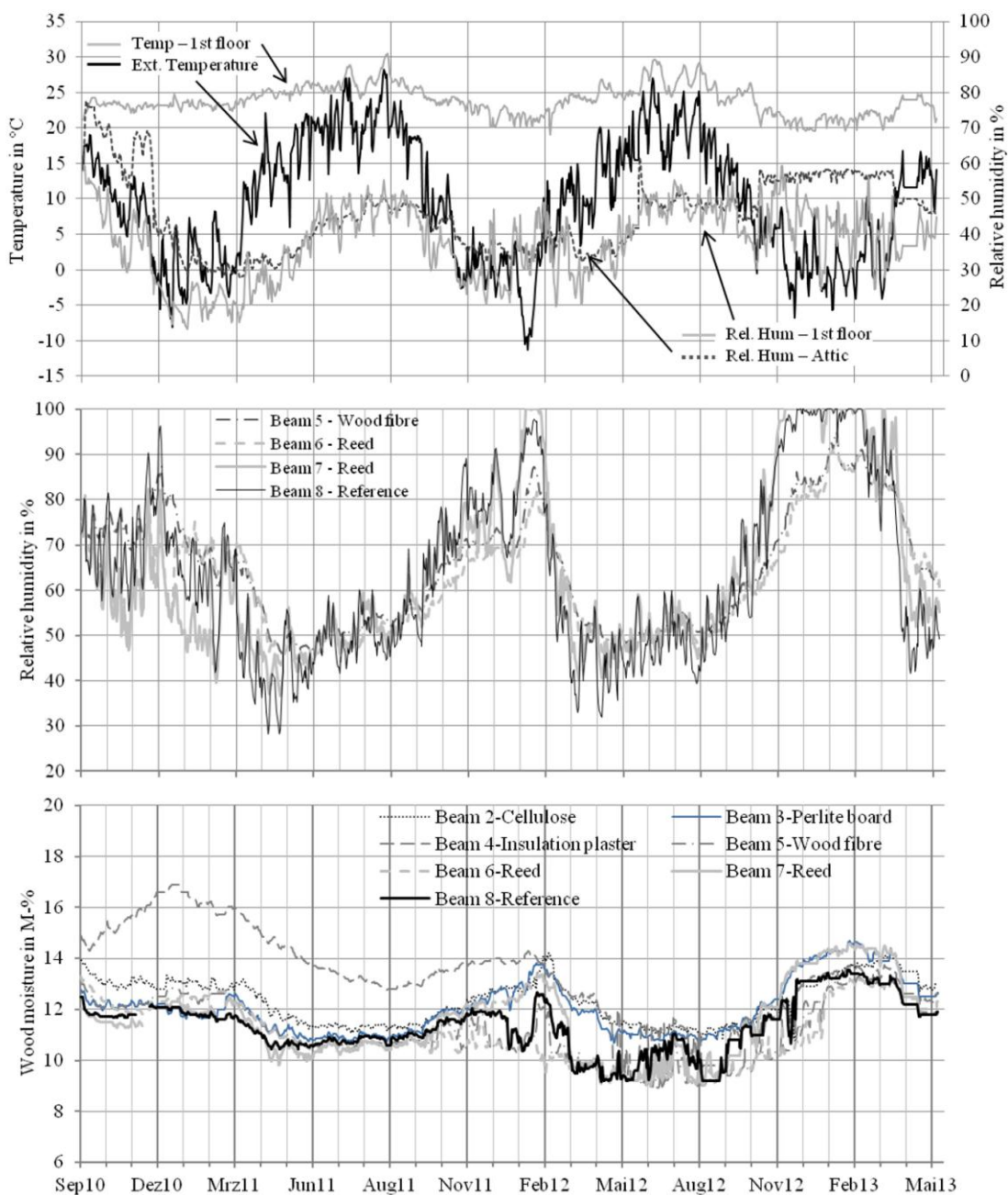
- stříkaná celulóza 80 mm + 13 mm vápenocementová omítka
($R_{IS}=1,59 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; $s_{d,IS}=0,27 \text{ m}$)
- perlitové desky 80 mm + 6 mm adhesivní malta + 4 mm omítková stěrka
($R_{IS}=1,79 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; $s_{d,IS}=0,63 \text{ m}$)
- tepelně izolační omítka 120 mm (plnivo - thermosilit) + 4 mm vápenná omítková stěrka
($R_{IS}=1,61 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; $s_{d,IS}=1,02 \text{ m}$)
- dřevovláknitá deska 60 mm + 4 mm adhesivní hliněná malta + 13 mm hliněná omítka
($R_{IS}=1,49 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; $s_{d,IS}=0,49 \text{ m}$)
- rákosová izolace 100 mm + 4 mm adhesivní hliněná malta + 20 mm hliněná omítka
($R_{IS}=1,70 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$; $s_{d,IS}=0,34 \text{ m}$) [11]



Podhled byl přerušen a zateplovací systém je aplikován až k úrovni spuštěného záklopu (viz obr. 13). Z horní strany přiléhá zateplení k podlaze. Prostor mezi spuštěným záklopem a podlahou je vyplněn původním sypkým materiálem a nebylo do něj zasahováno.

Spára mezi kapsou a trámovým zhlavím pod úrovní záklopu byla u prvních šesti trámů (zleva - viz obr. 13) řádně vzduchotěsně utěsněna maltou a lepicí páskou. Výsušné trhliny byly ucpány dřevěnými zátkami. Sedmý trám v systému s rákosovou izolací a osmý referenční nezateplený trám zůstal bez utěsnění [11].

Naměřené průběhy RH a hmotnostní vlhkosti dřeva z oblasti trámových kapes jsou za období 2010 – 2013 patrné z obr. 14.



obr. 14 - Denní průměry - teplota v exteriéru a interiéru + relativní vlhkost v interiéru (nahore), relativní vlhkost v čele trámových kapes (uprostřed), hmotnostní vlhkost u konce zhlaví (dole), zdroj [11]

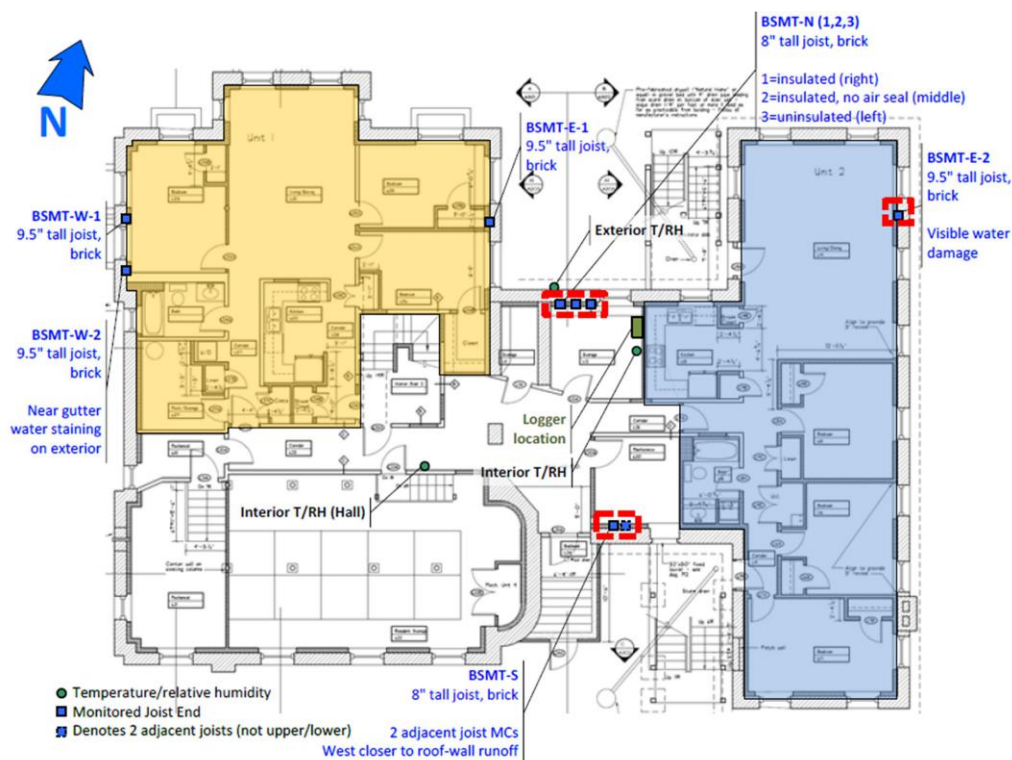


Bylo zjištěno, že neutěsněné zhlaví 7 má z hlediska průběhu RH podobné chování jako referenční zhlaví 8 bez zateplení. Oproti utěsněným kapsám zde dochází k výraznějšímu ovlivnění klimatickými podmínkami, a proto zde v chladném období nastávají vyšší hodnoty RH, a dokonce kondenzace vodní páry. Ke kondenzaci v neutěsněných kapsách došlo i v chladném období 2011/2012 s nízkou relativní vlhkostí vnitřního prostředí (průměrně RH, 35 % mezi prosincem 2011 a březnem 2012). Po instalaci vlhčení vzduchu bylo v chladném období 2012/2013 průměrně dosaženo 57% RH v horním patře a 42% RH v 1. NP, čímž došlo k výraznému prodloužení kondenzačního období. Hmotnostní vlhkost dřeva ale nepřesáhla u žádného z monitorovaných konců zhlaví během hodnoceného období hodnotu 18 %.

Závěrem dokumentu [11] bylo, že trámová zhlaví zde nejsou po aplikaci vnitřního zateplení výrazněji ohrožena. Nicméně během sledovaného období 2010 – 2013 nedošlo k výraznému vystavení monitorované fasády hnanému dešti. Zároveň bylo konstatováno, že obvodové zdivo je vyzděno z cihel s abnormální pórovitostí, což mohlo v oblasti zhlaví zajistit lepší tepelně vlhkostní podmínky.

Kohta Ueno (2015) [12]

Tato práce se věnovala sledování vlhkostní situace v oblasti trámových zhlaví po aplikaci vnitřního zateplení v rámci rekonstrukce zděného objektu lokalizovaného v chladné klimatické oblasti - Lawrence ve státě Massachusetts (USA). V celé budově bylo sledováno celkem 11 trámových zhlaví v různě orientovaných obvodových stěnách objektu. Tato práce shrnuje výsledky měření od prosince 2012 do dubna 2015.

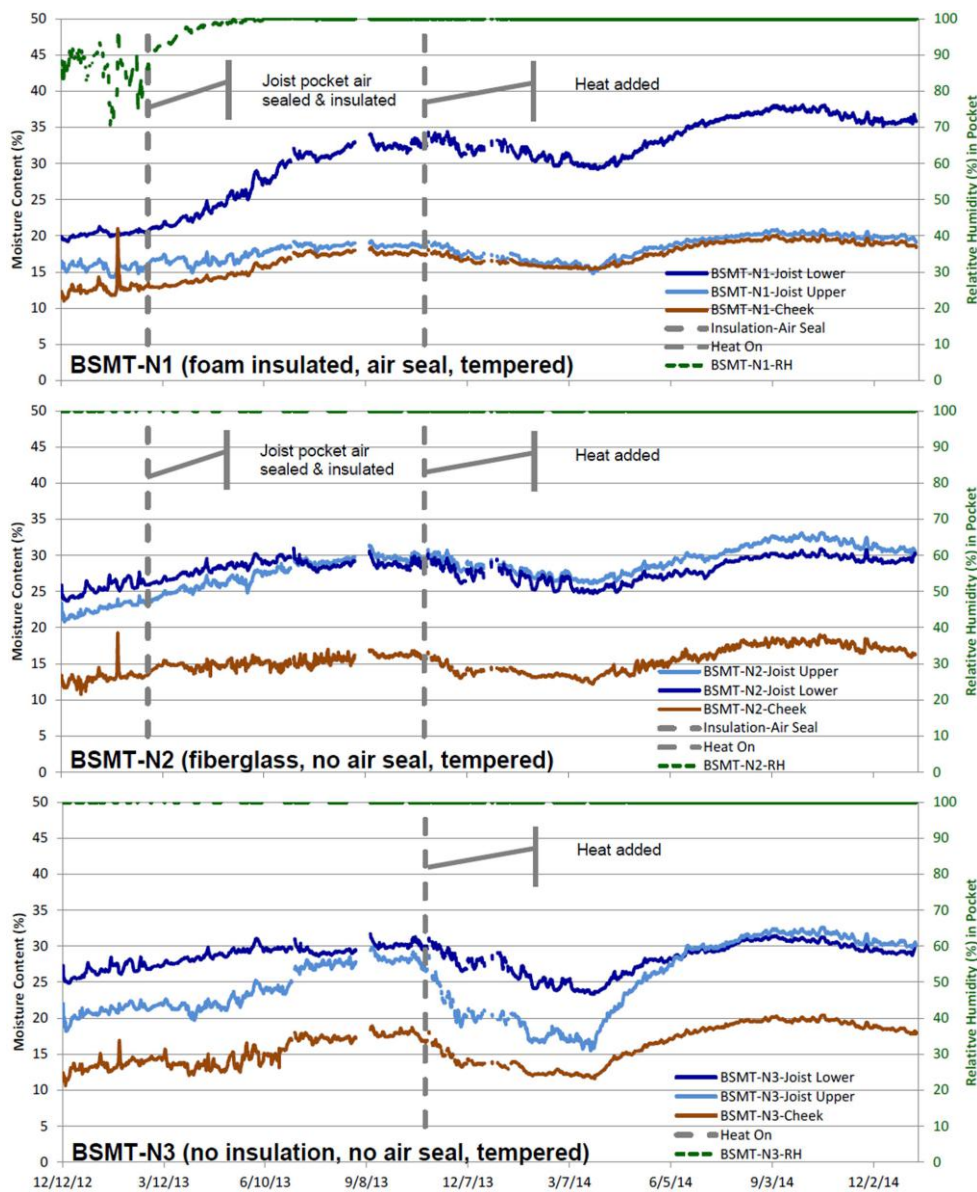


obr. 15 – Poloha monitorovaných trámových zhlaví na úrovni suterénu, zdroj [12]



obr. 16 – Situace u trámových zhlaví v suterénu [12]

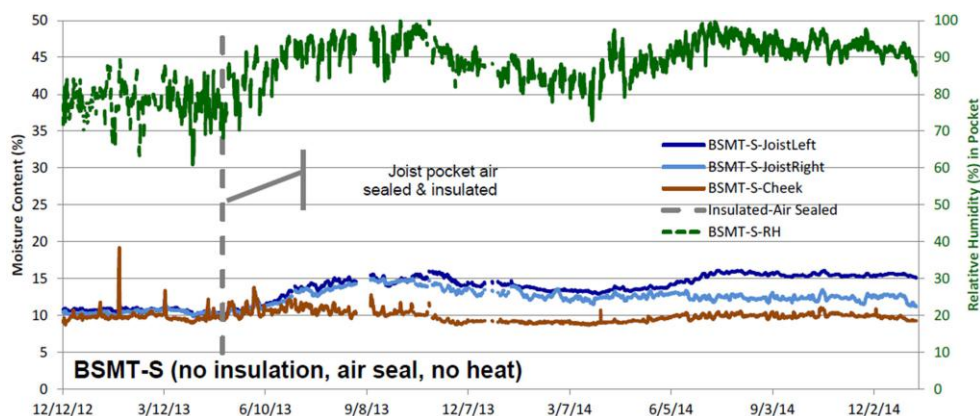
Situace v oblasti trámových zhlaví umístěných v severní stěně objektu je patrná na obr. 17.



obr. 17 – Vlhkostní situace u zhlaví v severní stěně suterénu – relativní vlhkost na čele zhlaví a hmotnostní vlhkost v konci trámu, zdroj [12]



Situace v oblasti trámových zhlaví umístěných v jižní stěně objektu je patrná na obr. 18.



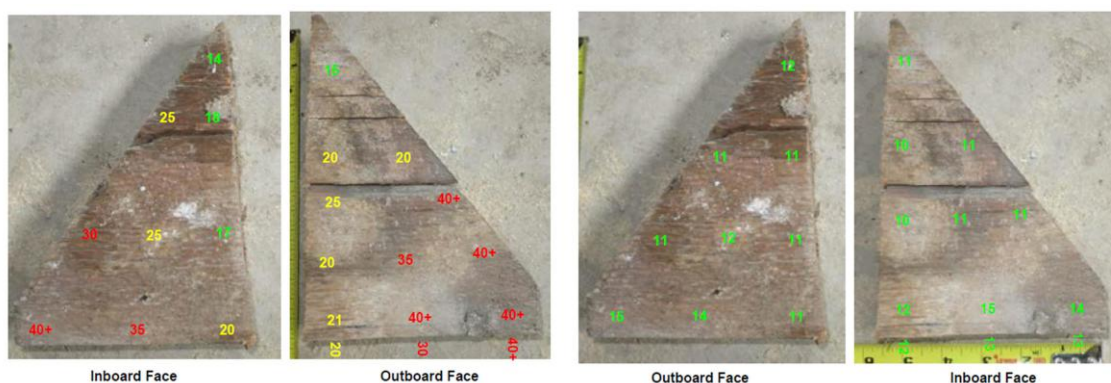
obr. 18 - Vlhkostní situace u zhlaví v jižní stěně suterénu – relativní vlhkost na čele zhlaví a hmotnostní vlhkost v konci trámu, zdroj [12]

Byly srovnávány izolované a neizolované trámové konce čelní stěny směřující k severu a nebyl mezi nimi pozorován zásadní rozdíl mezi průběhy RH a hmotnostní vlhkosti ve zhlaví. Všechny tři trámové kapsy zůstaly v podstatě 100% RH [12].

Spodní konec trámu byl konzistentně vlhčí než horní konec trámu, což lze připsat kontaktu s kapsou zdiva, gravitačnímu stékání kapalné vody ke spodní části kapsy, snazšímu vysychání horní části nosníku nebo hlubšímu uložení spodní části zhlaví v kapse [12].

Bylo zjištěno, že zejména na severní straně objektu je obsah vlhkosti v trámu vysoký (20-30 % nebo vyšší), což je vyšší než rozsah, který je považován za příznivý pro dlouhodobou životnost; Hodnoty RH často zůstaly na úrovni 100 %. Na dalších, solárně vyhřívaných orientacích (jih), je obsah vlhkosti v bezpečném rozsahu 10-13 %. Orientace na východ a západ měly smíšené výsledky. Některé byly v bezpečném pásmu, jiné však překročily 20 % [12].

Nicméně po odstranění konců nosníků se ukázalo, že i přes vysokou hmotnostní vlhkost některých zhlaví se zde neprojevují viditelné známky degradace (viz obr. 19). To zřejmě naznačuje, že tyto použité dřevěné prvky z pomalu rostlého letitého dřeva mohou přežít i tento obsah vlhkosti bez poškození [12].



obr. 19 – Odříznuté konce trámových zhlaví – hmotnostní vlhkost ve zhlaví z jihovýchodní části objektu (vlevo) a z jihozápadní části (vpravo), zdroj [12]



Důležitým faktorem bylo, že během sledovaného období stále probíhala rekonstrukce objektu. Jelikož nebyl objekt obsazen, nenastaly v interiéru typické teploty pro zimní otopné období a nenastala ani významnější vlhkost v interiéru. Okrajové podmínky tedy nebyly zcela referenční pro vyhodnocení problematiky [12].

Dumont a kol. (2005) [13]

Dumont a kol. se zaměřili na monitorování dřevěných trémových zhlaví zabudovaných do zdiva dvou nízkopodlažních objektů s dodatečně aplikovaným systémem vnitřního zateplení. První z objektů byl lokalizován ve vnitrozemní suché klimatické oblasti ve Wolseley, Saskatchewan (Kanada). Zde bylo použito zateplení minerální vlnou s PE parozábranou.

Druhý objekt se nachází naopak v pobřežní oblasti s vlhčím podnebím - Kincardine, Ontario (Kanada). V tomto případě je vnitřní zateplení provedeno stříkanou PUR izolační pěnou. Pěna zde důkladně obklopila trémová zhlaví.

U obou objektů byl sledován průběh hmotnostní vlhkosti v dřevěných zhlavích. U domu ve Wolseley se systémem s parozábranou byla hmotnostní vlhkost ve sledovaném období udržována na bezpečné úrovni 10 až 15 %. Nicméně byl tento systém obecně vyhodnocen jako rizikový z hlediska případného pronikání vlhkosti z exteriéru například vlivem hnaného deště, a dobré vlhkostní podmínky v oblasti zhlaví tak byly přisouzeny především tamnímu suchému klimatu s nízkými srážkami.

Dům v Kincardine vykazoval na několika místech trvale zvýšenou hmotnostní vlhkost (20 % a vyšší). Autoři předpokládali, že zdrojem vlhkosti byl kapilární transport z vlhkého podloží, ale vlivem tvarování a detailům povrchu fasády nebyl vyloučen jako možný zdroj hnaný déšť. Přispívajícím faktorem byla patrně i omezenější možnost vysychání do interiéru přes vrstvu PUR pěny.

Kohta Ueno (2012) [14]

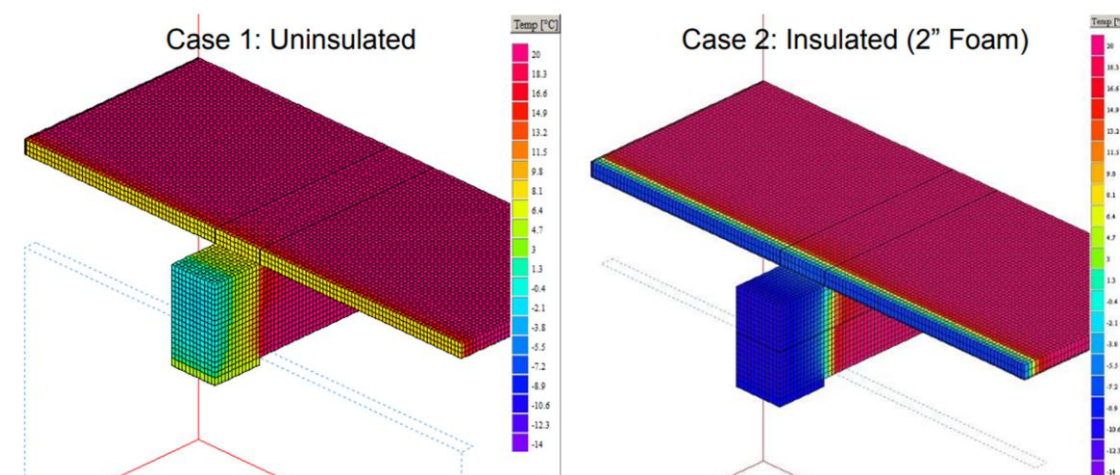
Tato práce se zabývala trojrozměrnou tepelnou simulací situace nastávající v oblasti trémových zhlaví po aplikaci vnitřního zateplení. Pro tvorbu výpočtového modelu byl použit software HEAT3 v. 5.1. Potvrdilo se, že zateplením z vnitřní strany zdiva dochází v chladném období k výraznému snížení teplot v oblasti zhlaví oproti nezateplenému stavu (viz obr. 20). Tím se zde zvyšuje riziko vysokých relativních vlhkostí a kondenzace vodní páry.

Pomocí různých úprav zhlaví byly tedy ve výpočtovém modelu následně analyzovány možnosti na zajištění vyšších teplot v prostoru konců dřevěných trémů.

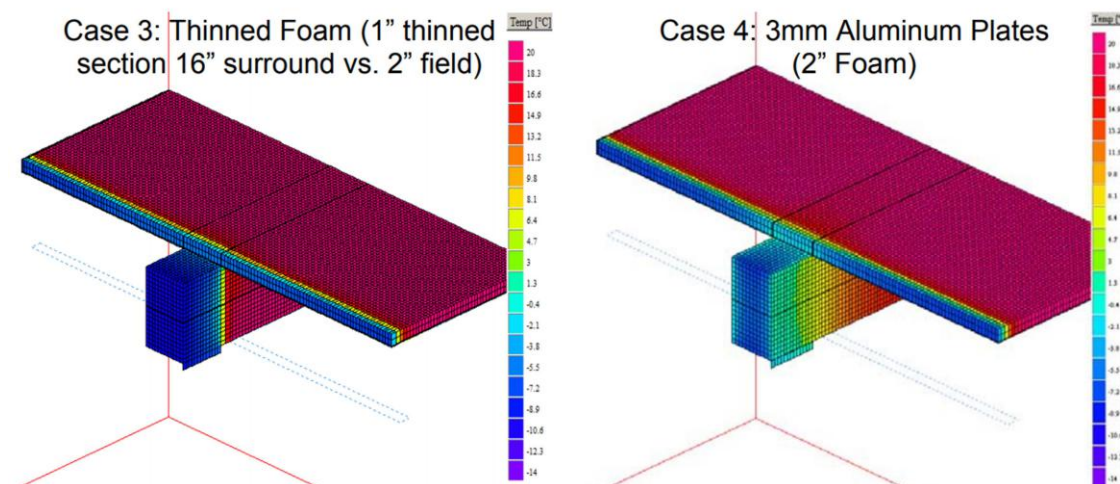
Ukázalo se, že obalení konce trému pěnovou izolací o tloušťce 25 mm nevedlo téměř k žádnému zlepšení situace (viz obr. 20 vlevo).



Jako další opatření, byly uvažovány hliníkové destičky přiložené na boky trámu. Nejeefektivnější se na základě iteračního postupu jevila tl. 3 mm se zavlečením na celou hloubku uložení trámu (200 mm) a přesahem do interiéru o dvojnásobku této hloubky. Toto opatření zajistilo na bocích trámů podobné teploty jako před aplikací vnitřního zateplení (viz obr. 21). Nicméně na čele trámu nastávají stále výrazně nižší teploty. Zároveň bylo konstatováno riziko kondenzace vodní páry na hliníkových deskách v úrovni interiéru a pravděpodobně komplikované zajištění vzduchotěsnosti kolem zhlaví.



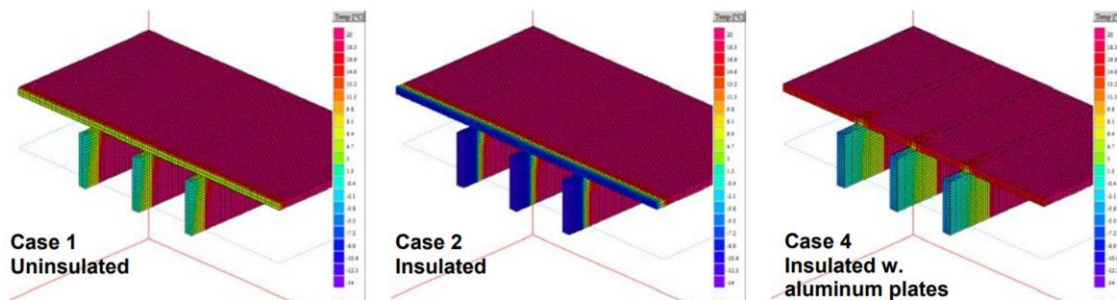
obr. 20 – 3D teplotní pole - nezateplená stěna (vlevo), stěna s vnitřním zateplením (vpravo), zdroj [14]



obr. 21 – 3D teplotní pole - zateplená stěna + obalení zhlaví pěnovou izolací tl. 25 mm (vlevo), zateplená stěna + přiložení Alu destiček tl. 3 mm k bokům zhlaví (vpravo), zdroj [14]

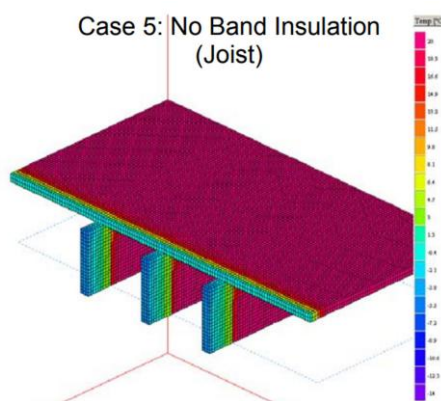


Autor hodnotil použití opatření v podobě Alu destiček i pro případ subtilnějších stropních nosníků (viz obr. 22). Oproti masivním stropním trámům bylo sice pozorováno výraznější prohnutí úzkých stropních nosníků, ale vzhledem k vyššímu potřebnému počtu destiček pro tento charakter stropní konstrukce a zmíněným rizikům v předchozí části, bylo jejich použití vyhodnoceno jako nepravděpodobné.



obr. 22 – 3D teplotní pole - nezateplená stěna (vlevo), stěna s vnitřním zateplením (uprostřed), zdroj [14]

Velmi efektivní zvýšení teplot v oblasti zhlaví stropních nosníků přineslo vynechání pruhu tepelné izolace v celém pásu stropní konstrukce (viz obr. 23). Pole teplot se zde podobalo situaci původní nezateplené stěny. Pokud, ale nebude dodatečně zajištěna vzduchotěsnost kapes, je zde v zimním období podezření na kondenzaci vodní páry uvnitř dutin. Dále bylo zjištěno, že tato úprava vede zhruba k dvojnásobnému navýšení tepelných ztrát prostupem u hodnoceného výseku konstrukce oproti průběžnému vnitřnímu zateplení.



obr. 23 – 3D teplotní pole – opatření v podobě vynechání pruhu izolace v úrovni stropní konstrukce, zdroj [14]

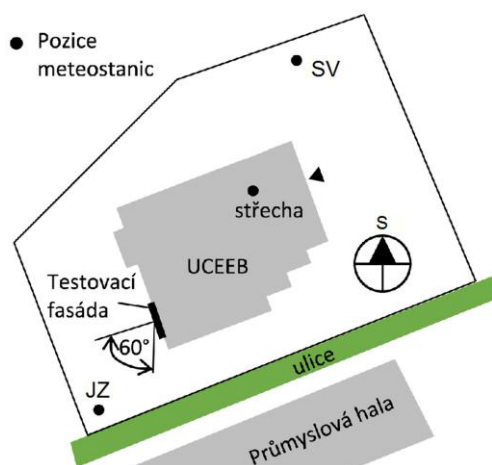
V závěru práce autor doporučil podrobnější monitorování reálných trámových zhlaví ve zdivu nezatepleném /s aplikovaným vnitřním zateplením.



3 Popis experimentu

3.1 Obecné informace

Na UCEEBu je realizován dlouhodobý experiment zabývající se tepelně vlhkostrním chováním trámových zhlaví při použití systému vnitřního zateplení. Monitorování probíhá od jara 2015. Pro účely experimentu ve skutečném měřítku byla využita 2 ze 6 testovacích polí experimentální fasády (obr. 24).



obr. 24 - Poloha experimentální fasády UCEEB, vyznačení dvou testovacích polí vyhrazených pro experiment, zdroj [15]

V exteriéru jsou monitorovány následující veličiny:

- teplota a relativní vlhkost vzduchu v exteriéru [$^{\circ}\text{C}$, %]
- sluneční ozáření fasády [W/m^2]
- dlouhovlnná radiace [W/m^2]
- dešťové srážky [mm]
- rychlost a směr větru [m/s , $^{\circ}$]

Jihozápadní orientace fasády navíc zajišťuje vystavení testovacích polí působení větru. Pomocí údajů z jihozápadní meteostanice je tedy umožněno i vyhodnocení vlivu větrem hnaného deště.

Z vnitřní strany přiléhá k testovacím polím klimatizovaná místnost, kde jsou sledovány následující veličiny:

- teplota a relativní vlhkost vzduchu v interiéru [$^{\circ}\text{C}$, %]
- tlakový rozdíl mezi interiérem a exteriérem [Pa]

V interiéru lze upravovat teplotu vzduchu a je umožněno i jeho vlhčení. Odvlhčovač není instalován, vlhkost vzduchu tedy nemůže být uměle snížena a v letním období je do značné míry ovlivněna podmínkami v exteriéru.



3.2 Popis testovacích polí

V testovacích polích č. 2 a 3 je vyzděna stěna tloušťky 290 mm (300 mm) z plných pálených cihel. Venkovní povrch stěn je opatřen vápenocementovou jádrovou omítkou. Z vnitřní strany je do připravených vyzděných kapes osazeno celkem 16 trémových zhlaví, vždy 8 v každém z polí. Na vnitřní povrch stěn jsou aplikovány následující 3 druhy zateplovacích systémů:

Skladba S1

Na zateplení pole číslo 2 byl aplikován difuzně otevřený kapilárně aktivní systém. Jako izolant jsou použity dřevovláknité desky UdiIN RECO mechanicky kotvené talířovými hmoždinkami. Na jedné polovině pole je použita tloušťka izolace 80 mm (**skladba S1a**) a na druhé polovině tloušťka 140 mm (**skladba S1b**). Povrchovou úpravu tvoří speciální systémová stěrka Udi MULTIGRUND, která má regulovat prostup vodní páry. Foto z realizace systému viz obr. 25.

Skladba S2

V testovacím poli číslo 3 je na jedné polovině použito zateplení deskami z minerální vlny Isover Aku tl. 90 mm ukládaných za předsazený rastr ze sádrokartonářských ocelových pozinkovaných profilů. Přes profily je napnuta „inteligentní“ parotěsná fólie Isover VARIO KM DUPLEX s proměnným difuzním odporem. Následně je proveden záklop SDK deskami. Realizace této skladby je zachycena na obr. 26.

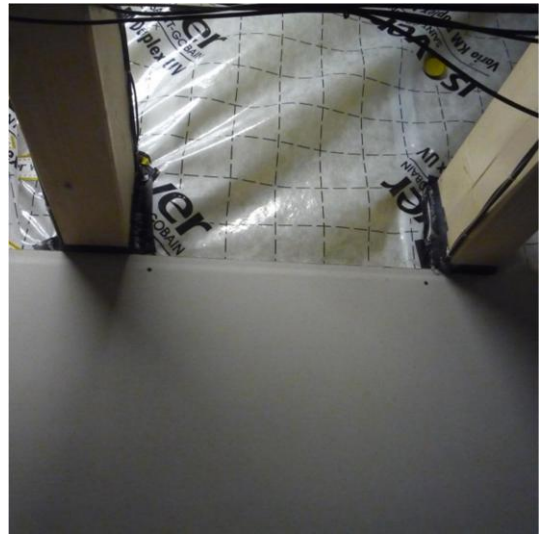
Skladba S3

Druhá polovina pole č. 3 je izolována vakuovými deskami Va-Q-VIP F-EPS tloušťky 40 mm (10 mm EPS gray + 20 mm vakuová izolační deska + 10 mm EPS gray) lepenými na zdivo cementovým lepidlem. Povrchová úprava je provedena cementovou stěrkovou hmotou. Tento systém je zobrazen na obr. 27.

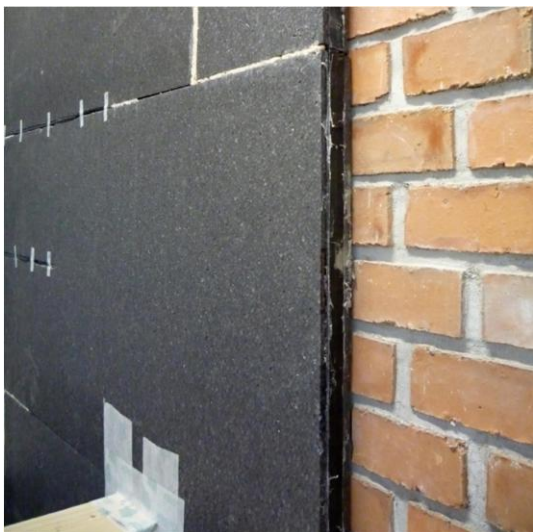
Rozdělení testovacích polí je znázorněno na obr. 28. Schémata skladeb včetně popisu jednotlivých vrstev a jejich tloušťek jsou uvedena v tabulce 1.



obr. 25 – Systém zateplení dřevovláknitými deskami UdiIN RECO (skladba S1), zdroj [15]



obr. 26 - Systém zateplení deskami z minerální vlny Isover AKU + „inteligentní“ fóliová parozábrana (skladba S2), zdroj [15]



obr. 27 – Systém zateplení vakuovými deskami Va-Q-VIP F-EPS (skladba S3), zdroj [15]

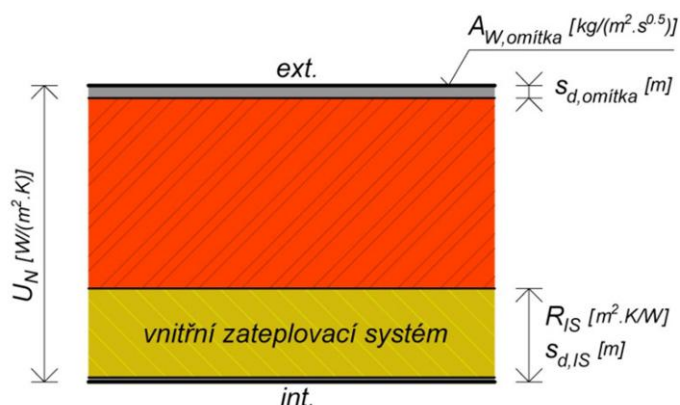


obr. 28 – Rozdělení testovacích polí s označením skladeb zateplovacích systémů, zdroj [15]



Tabulka 1 – Skladby použitých systémů vnitřního zateplení

Ozn.	Schéma skladby	Popis skladby	d [mm]
S1a		<ul style="list-style-type: none"> omítka vápenocementová jádrová 	20
		<ul style="list-style-type: none"> zdivo z CP na maltu vápenocementovou 	290
		<ul style="list-style-type: none"> dřevovláknitá izolační deska UdiIN RECO 	80
		<ul style="list-style-type: none"> omítková stěrka Udi Multigrund vyztužená sklotextilní síťovinou 	5
S1b		<ul style="list-style-type: none"> omítka vápenocementová jádrová 	20
		<ul style="list-style-type: none"> zdivo z CP na maltu vápenocementovou 	290
		<ul style="list-style-type: none"> dřevovláknitá izolační deska UdiIN RECO 	140
		<ul style="list-style-type: none"> omítková stěrka Udi Multigrund vyztužená sklotextilní síťovinou 	5
S2		<ul style="list-style-type: none"> omítka vápenocementová jádrová 	20
		<ul style="list-style-type: none"> zdivo z CP na maltu vápenocementovou 	290
		<ul style="list-style-type: none"> izolace z minerální vlny Isover Aku 	90
		<ul style="list-style-type: none"> vzduchová mezera – rastr z ocelových pozinkovaných CD profilů 	27
		<ul style="list-style-type: none"> „inteligentní“ parozábrana – fólie Isover VARIO KM DUPLEX 	0,2
<ul style="list-style-type: none"> sádrokartonová deska Rigips RB (A) 	12,5		
S3		<ul style="list-style-type: none"> omítka vápenocementová jádrová 	20
		<ul style="list-style-type: none"> zdivo z CP na maltu vápenocementovou 	290
		<ul style="list-style-type: none"> cementová lepicí stěrka 	5
		<ul style="list-style-type: none"> vakuové desky Va-Q-VIP F-EPS 	40
		<ul style="list-style-type: none"> cementová stěrka vyztužená sklotextilní síťovinou 	5



obr. 29 – Vyznačení charakteristických parametrů konstrukce s vnitřním zateplením

Tabulka 2 – Přehled parametrů systémů vnitřního zateplení

Zateplovací systém	U_N [W/(m ² .K)]	R_{IS} [W/(m ² .K)]	$s_{d,IS}$ [m]	$s_{d,omítka}$ [m]	$A_{w,omítka}$ [kg/(m ² .s ^{0.5})]
S1a	0,373	2,121	0,54	< 0,6	0,20
S1b	0,256	3,346	0,6	< 0,6	0,20
S2	0,298	2,798	5,21 (0,51)	< 0,6	0,20
S3	0,247	3,490	∞	< 0,6	0,20

U_N = součinitel prostupu tepla zateplené stěny stanovený dle [16]

R_{IS} = tepelný odpor vnitřního zateplovacího systému (včetně povrchové úpravy)

$s_{d,IS}$ = ekvivalentní difuzní tloušťka vnitřního zateplovacího systému (včetně povrchové úpravy)

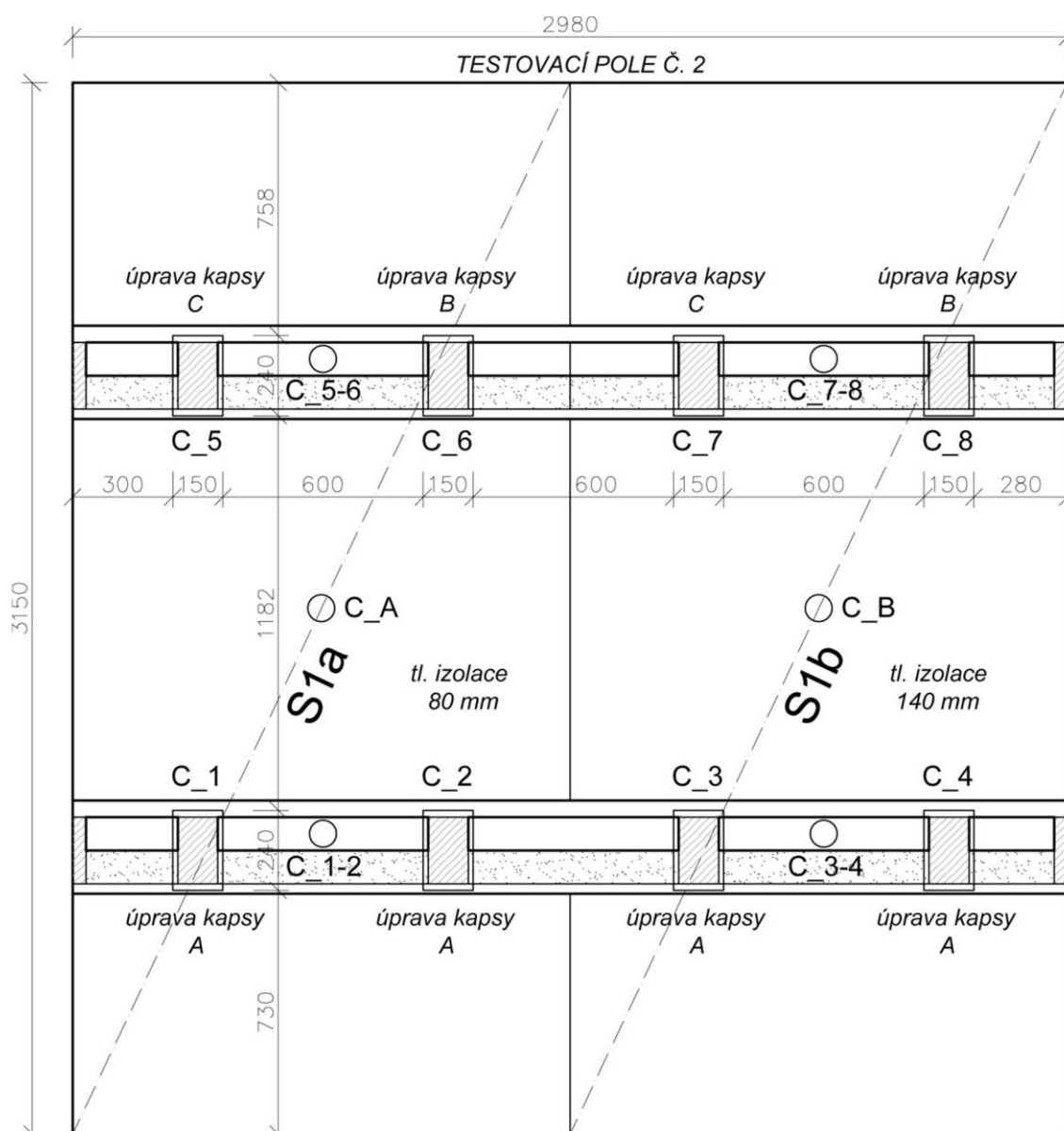
$s_{d,omítka}$ = ekvivalentní difuzní tloušťka venkovní omítky (včetně povrchové úpravy)

$A_{w,omítka}$ = koeficient nasákavosti venkovní omítky [laboratorně stanovená hodnota - UCEEB]

Stropní konstrukce

Stropní trámy jsou osazeny v každém testovacím poli ve dvou horizontálních úrovních představujících část skutečné stropní konstrukce. Délka vyložení do interiéru činí přibližně 1 m. Stropní konstrukce jsou pak ukončeny příčným trámem, který je podepřen sloupky při krajích testovacích polí. Podlahu tvoří záklop prkny, na kterém je uloženo 15 mm kročejové izolace z minerální vlny, ta je pak zakryta OSB deskami tloušťky 15 mm. Podhled je řešen prkenným záklopem a následně je opláštěný SDK deskami. Dutiny mezi trámy jsou částečně zasypany keramzitem (vrstva cca 100 mm). Spodní strop v testovacím poli č. 2 simuluje situaci, kdy není možné zasahovat do konstrukce stropu – tedy případ, kdy podhled ani podlaha není demontována. Trámové kapsy jsou zde ponechány bez jakýchkoliv úprav a vnitřní zateplení je v úrovni stropu přerušeno. V ostatních případech prostupují rovinu tepelné izolace pouze samotná zhlaví a trámové kapsy jsou různými způsoby upraveny.

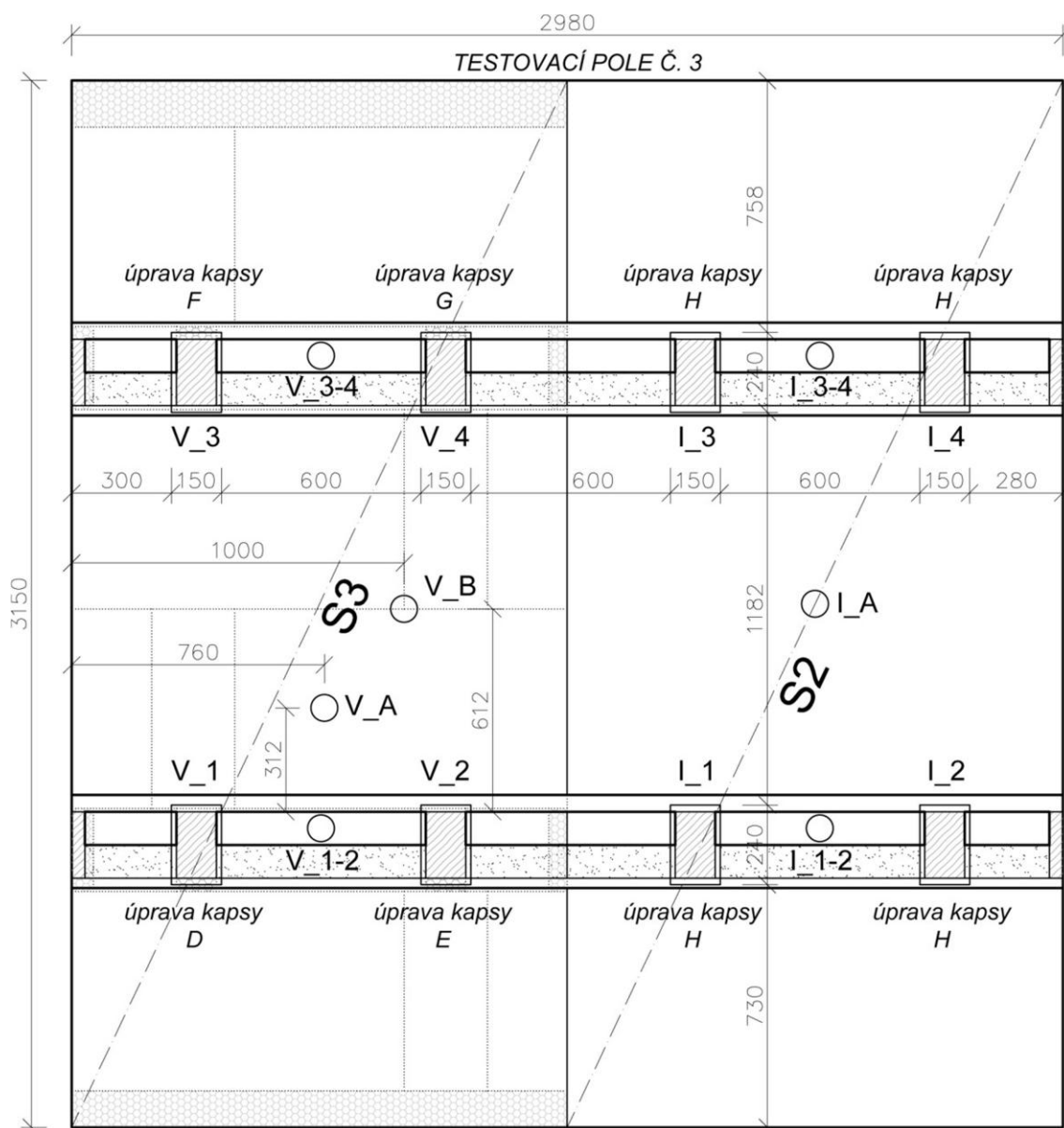
Pro názornost je pozice trámů a přístup k úpravě trámových kapes uveden na obr. 30 a obr. 31.




úprava A - kapsa ponechána bez úpravy - přístup bez zásahu do stropní konstrukce
 úprava B - dutina v kapse ponechána a spára vzduchotěsně a parotěsně přelepena na zdivo
 úprava C - dutina v kapse vyplněna dřevovláknitou izolací a spára parotěsně přelepena na zdivo

○ - monitorovaná oblast konstrukce

obr. 30 – Schéma rozmístění trémových zhlaví v rámci testovacího pole č. 2 včetně popisu úprav jednotlivých kapes



- úprava D - dutina v kapse ponechána a spára vzduchotěsně a parotěsně přelepena na zdivo
- úprava E - dutina v kapse ponechána a spára vzduchotěsně a parotěsně přelepena na vrchní EPS
- úprava F - dutina v kapse i spára okolo trámu ponechána bez úprav
- úprava G - dutina v kapse vyplněna PU pěnou a spára nebyla přelepována
- úprava H - dutina v kapse ponechána a spára parotěsně přelepena v rovině parozábrany

- - monitorovaná oblast konstrukce
-  doplnění izolačního systému z vakuových desek přířezy z EPS

obr. 31 - Schéma rozmístění trámových zhlaví v rámci testovacího pole č. 3 včetně popisu úprav jednotlivých kapes

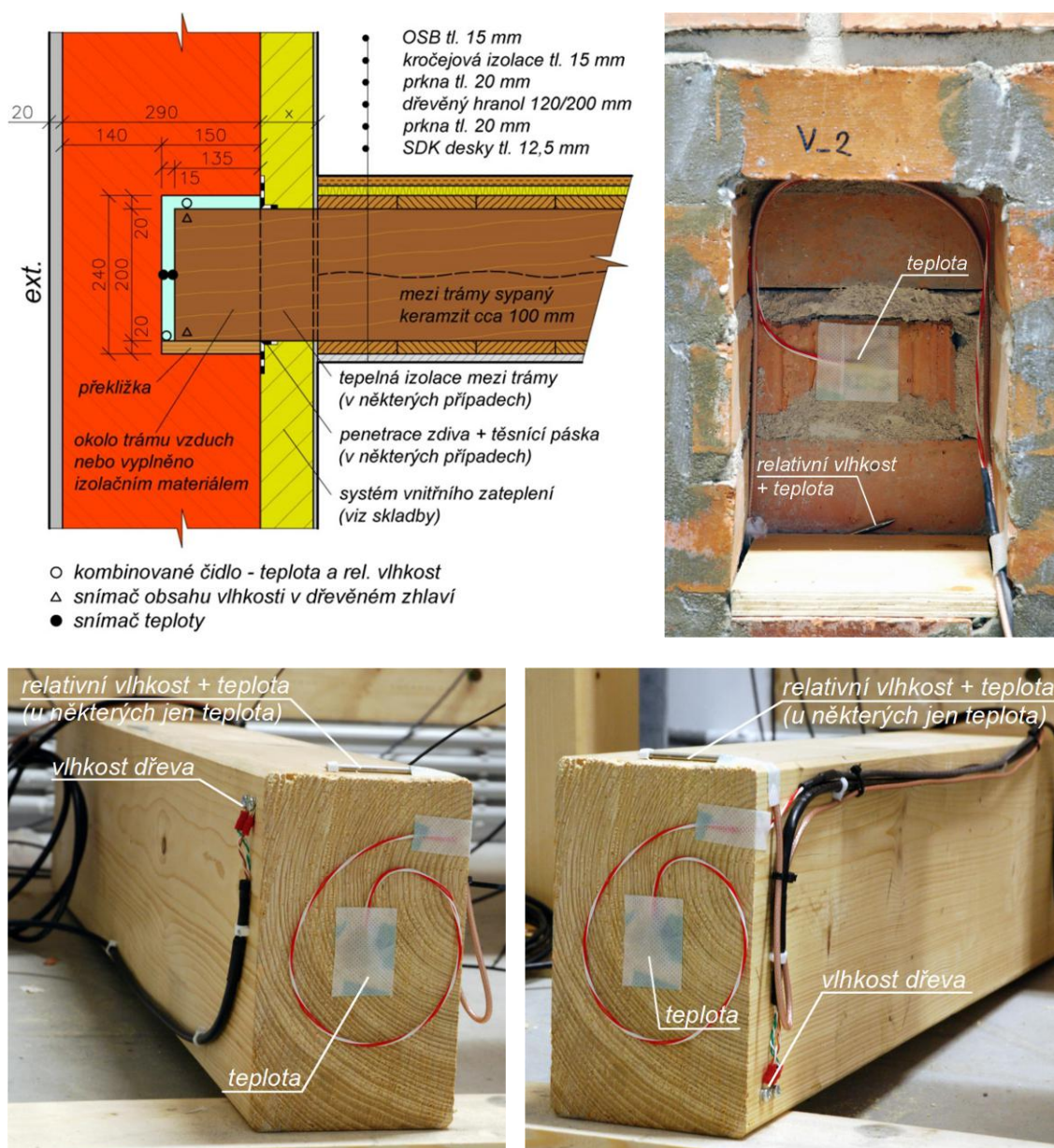


3.3 Monitoring

Pro účely experimentu je v trámových kapsách, prostoru stropní konstrukce a v místě typické skladby zateplení osazeno celkem 143 senzorů (70 v testovacím poli č. 2 a 73 v testovacím poli č. 3). Monitorované oblasti jsou naznačeny na předchozím obr. 30 a obr. 31.

V jednotlivých kapsách je sledována teplota a relativní vlhkost. Dále je monitorována hmotnostní vlhkost dřevěného zhlaví. Obr. 32 zobrazuje schematický řez trámovou kapsou a skutečné rozmístění čidel v kapse a na trámovém zhlaví.

Pro svou rozsáhlost jsou podrobné výkresy jednotlivých trámových kapes a skladeb zateplovacích systémů včetně vyznačení a popisu veškerých čidel uvedeny v **PŘÍLOZE 1**



obr. 32 – Schematický řez trámovou kapsou s vyznačením polohy snímačů (nahore vlevo), osazení čidel v trámové kapse (nahore vpravo), osazení čidel na trámovém zhlaví (dole), zdroj fotografií [15]



3.4 Harmonogram experimentu

Experiment v současné době stále probíhá, nicméně tato práce se zabývá vyhodnocením naměřených dat z období od začátku měření 7. března 2015 do 1. října 2017.

Během průběhu experimentu byly záměrně měněny okrajové podmínky ze strany interiéru. Cílem bylo nasimulovat možné reálné situace, které mohou ve vnitřním prostředí budov běžně nastat. Přehled nastavovaných parametrů pro vnitřní prostředí je uveden v tabulce 3.

Tabulka 3 – Harmonogram řízených změn vnitřního klima

<i>Časový interval</i>	<i>Požadovaná teplota [°C]</i>	<i>Požadovaná relativní vlhkost [%]</i>
<i>07. 03. 2015 až 04. 10. 2016</i>	20	50
<i>04. 10. 2016 až 06. 10. 2016</i>	20	70
<i>06. 10. 2016 až 18. 10. 2016</i>	20	50
<i>18. 10. 2016 až 02. 11. 2016</i>	20	60
<i>02. 11. 2016 až 02. 01. 2017</i>	24	60
<i>02. 01. 2017 až 23. 01. 2017</i>	18	40
<i>23. 01. 2017 až 06. 06. 2017</i>	24	60
<i>06. 06. 2017 až 01. 10. 2017</i>	21	<i>bez vlhčení</i>

Jak již bylo uvedeno, klimatická místnost nedisponuje odvlhčovačem vzduchu. Řízené snížení vlhkosti tedy není umožněno (jako u většiny provozů reálných budov). Během letního období je tak nejen teplota, ale i relativní vlhkost vzduchu v interiéru do značné míry ovlivněna podmínkami v exteriéru (viz kapitola 4 obr. 33).

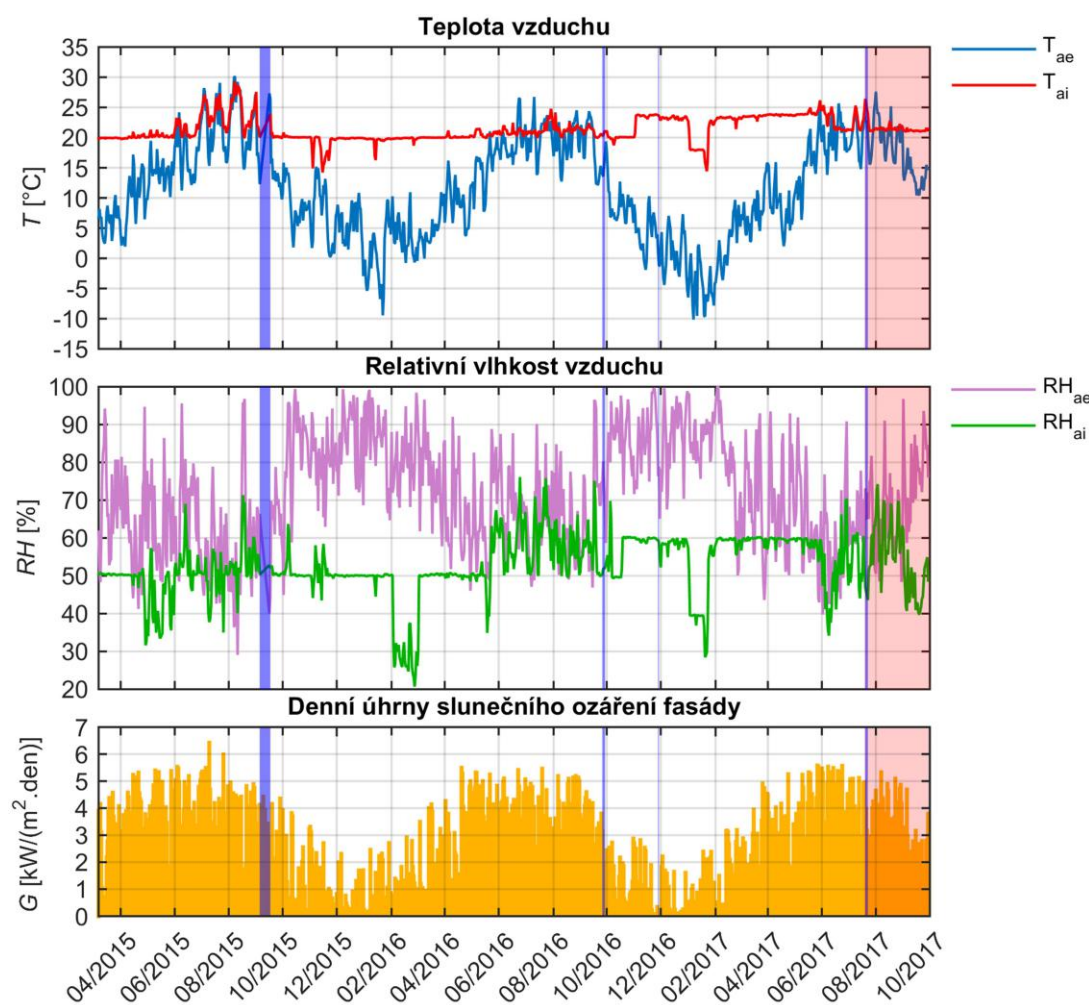


4 Vyhodnocení měřených údajů

V následující kapitole jsou vyhodnocovány naměřené údaje z testovacích polí TP2 a TP3 v rámci testovací fasády na UCEEBu (viz kapitola 3 - Popis experimentu) za období od počátku měření 7. 3. 2017 do 19. 7. 2017, kdy proběhlo umělé skrápění fasády. Zbývajícímú krátkému období je věnována samostatná kapitola 6. Ve vyhodnocení jsou i tak zachycena 2 kompletní zimní období 2015/2016 a 2016/2017. Pro účely této práce je hodnocena především situace v trémových kapsách. Nicméně je zde sledováno i chování v místě typické skladby zateplovacích systémů.

4.1 Přehled okrajových podmínek

Pro komplexní představu o působení okolního prostředí na testovací pole jsou zobrazeny nejprve základní okrajové podmínky (viz obr. 33). Průběh teplot vzduchu a relativní vlhkosti v interiéru a exteriéru je vyjádřen denními průměry. Dále jsou zobrazeny denní úhrny slunečního ozáření testovací fasády. Významnější výpadky měření nad 48 hodin jsou označeny modrými oblastmi – chybějící data jsou zde interpolována. Červená oblast značí období po umělém skrápění testovacích polí 19. 7. 2017.



obr. 33 – Přehled okrajových podmínek – denní průměry teplot a rel. vlhkosti vzduchu + denní úhrny slunečního ozáření fasády (výpadky měření nad 48 hodin označeny modrou oblastí), období po kroupení (červená oblast)



4.2 Vyhodnocení úprav kapes po jednotlivých systémech

V této kapitole jsou na základě naměřených průběhů teplot (T) relativní vlhkosti (RH) a hmotnostní vlhkosti dřevěných zhlaví (u) vyhodnocovány různé úpravy trámových kapes v rámci jednotlivých systémů vnitřního zateplení. Zároveň jsou podmínky v trámových kapsách porovnávány se situací na rozhraní zateplovacího systému a zdiva.

Dále je pomocí výpočetního modelu (VTT mold model - Viitanen and Ojanen 2007) [17] na základě teplot a RH v trámových kapsách vyhodnocováno i riziko vzniku plísní. Jako další vstupní parametry byl zadán druh dřeva – smrk a úprava povrchu – hoblovaný. Časový krok výpočtu byl uvažován hodinový (na základě naměřených hodinových dat teplot a RH).

Pro vyhodnocení míry rizika vzniku plísní je přiložena stupnice MI dle [17]

0 - žádný růst

1 - malé množství plísně na povrchu (sledováno mikroskopem), počáteční fáze místního růstu

2 - několik lokálních kolonií růstu plísní na povrchu (sledováno mikroskopem)

3 - vizuální nálezy plísní na povrchu, < 10% pokrytí nebo < 50% pokrytí při sled. mikroskopem

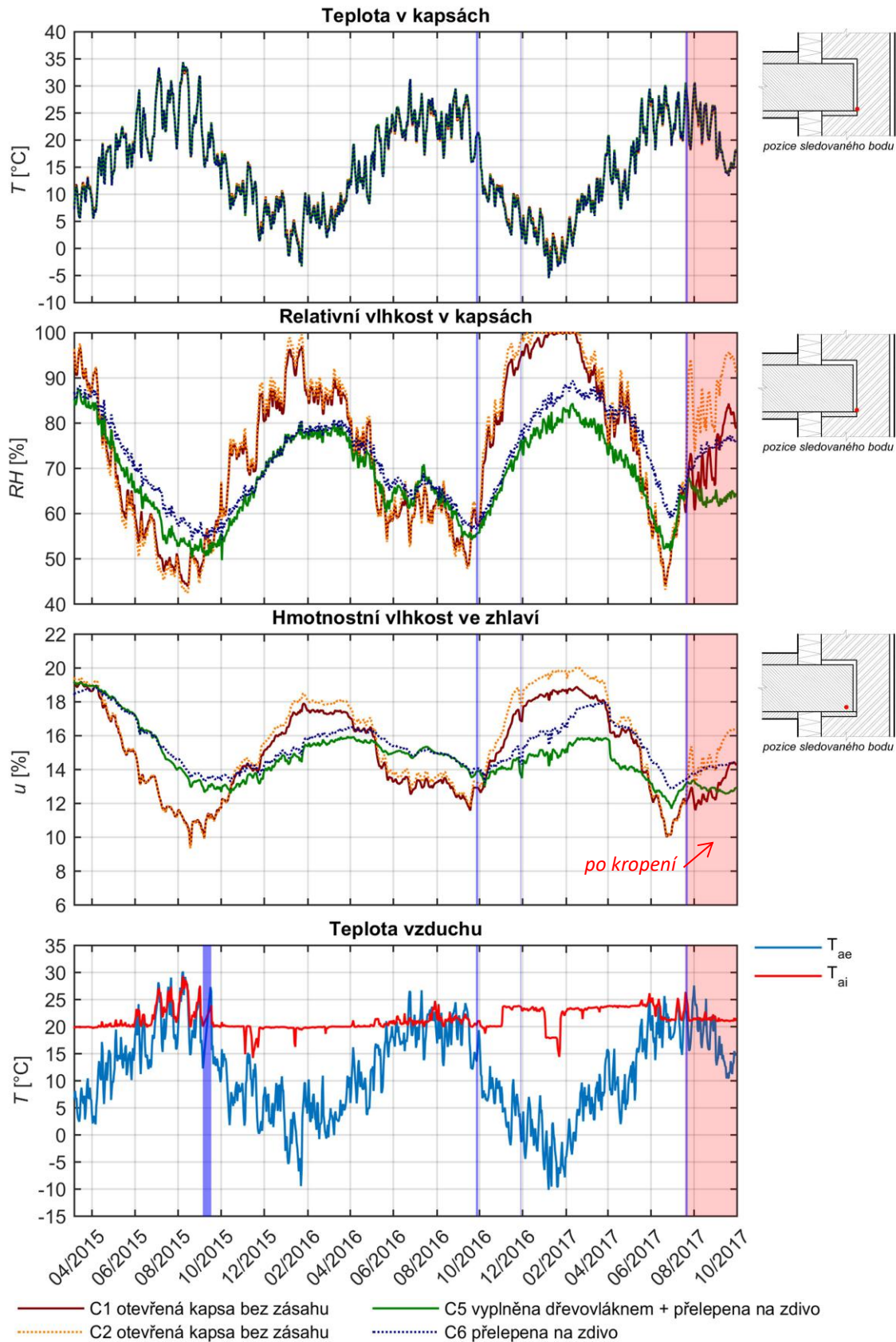
4 - vizuální nálezy plísní na povrchu, 10 - 50% pokrytí nebo >50% pokrytí při sled. mikroskopem

5 - velký růst na povrchu, > 50% pokrytí (vizuální)

6 - silný růst, pokrytí 100%



4.2.1 SYSTÉM S1a – CIUR 80 mm (dřevovláknité desky 80 mm)



obr. 34 – Denní průměrné hodnoty teplot a relativních vlhkostí v oblasti trémových kapes a hmotnostní vlhkost ve zhlavích – systém S1a Ciur 80 mm

*v případě kapsy C_6 je průběh hmotnostní vlhkosti ve spodní části zhlaví neobjektivní a je nahrazen průběhem v horní části zhlaví



Z obr. 34 lze pozorovat, že rozdíly mezi průběhy teplot jsou pro všechny kapsy ze systému S1a minimální. I při podrobnějším sledování hodinových dat bylo zjištěno, že v otevřených kapsách C_1 a C_2 ve stropní konstrukci bez zásahu se teploty liší maximálně v rozsahu 1 °C oproti utěsněným kapsám C_5 a C_6.

V průběžích relativních vlhkostí jsou patrné značné rozdíly mezi otevřenými a utěsněnými kapsami. Otevřené kapsy C_1 a C_2 reagují mnohem výrazněji na průběh teplot. Tento jev musí být způsoben rozdílnou koncentrací vodní páry v otevřených kapsách, jelikož teploty jsou zde téměř shodné jako v utěsněných. Lze očekávat, že u otevřených kapes nastávají v chladném období, kdy se vodní pára šíří difuzí z interiéru do exteriéru, vyšší koncentrace vodní páry, a tudíž i vyšší relativní vlhkost. V teplém období roku je situace opačná, když může vlhkost z otevřených kapes odcházet do interiéru snáze než v případě utěsněných kapes.

Relativní vlhkost u obou otevřených kapes v chladném období 2015/2016 překračuje rizikovou hranici 80 % přibližně na dobu 4 měsíců. V celkově chladnějším období 2016/2017, kdy je navíc záměrně v interiéru simulováno teplejší a vlhčí klima (T 24 °C; RH 60 %), je pak 80% hranice překročena dokonce až na 6 měsíců. V zimních měsících zde navíc nastává, dle naměřených dat, kondenzace vodní páry.

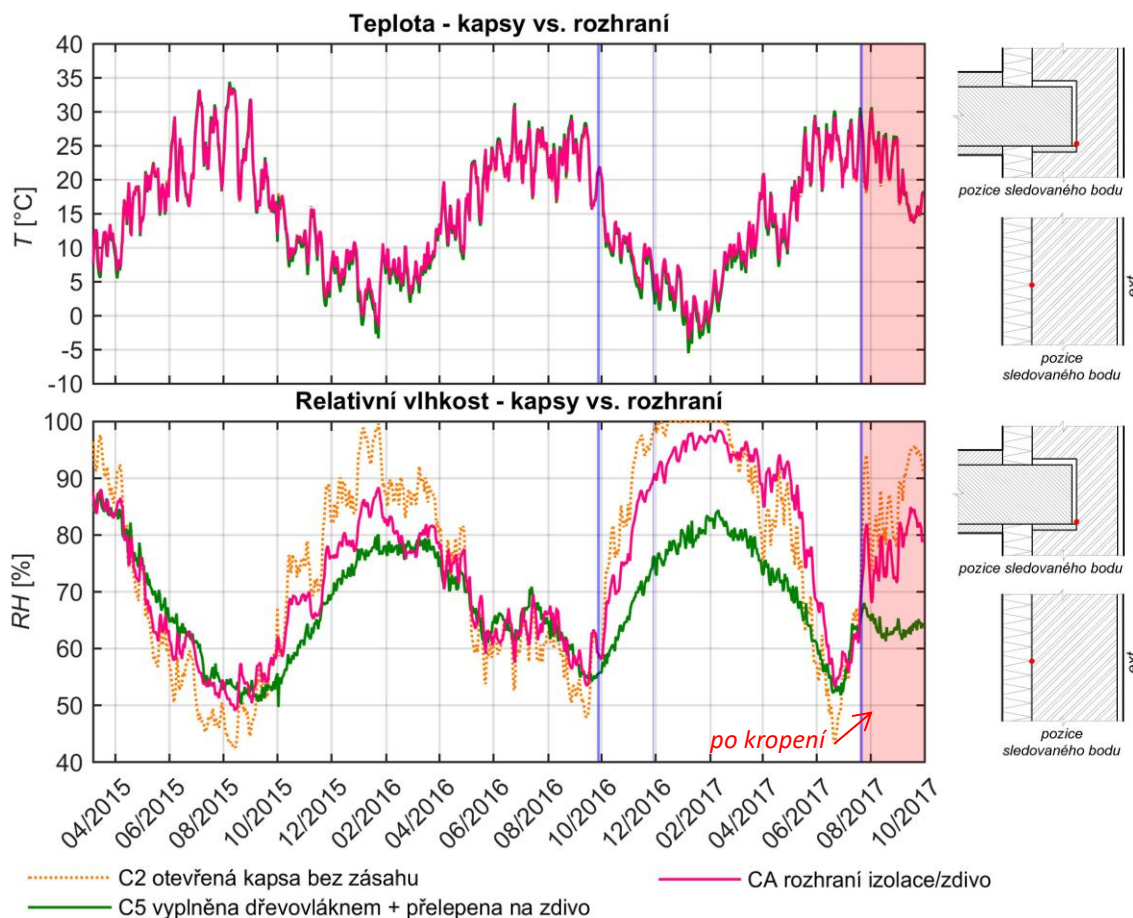
Utěsněné kapsy C_5 a C_6 ve stropní konstrukci s průběžným zateplením se z vlhkostního hlediska chovají mnohem příznivěji. Průběh relativní vlhkosti je zde vlivem utěsnění výrazně plošší a hladší. Zároveň je zde dobře patrná celkově pomalejší reakce na změnu podmínek okolního prostředí. V létě nedochází k tak výraznému poklesu RH jako v případě otevřených kapes, ale naopak v chladném období jsou relativní vlhkosti výrazně nižší. Mimo počátečního období experimentu zde byla hranice 80% relativní vlhkosti překročena až v chladném období 2016/2017 s méně příznivými podmínkami v interiéru i v exteriéru. Zároveň si lze všimnout, že právě zvýšením teploty a relativní vlhkosti v interiéru došlo k výraznějšímu odlišení průběhů RH mezi utěsněnými kapsami. Zatímco kapsa C_5 vyplněná dřevovláknitou izolací a přelepená Airstop páskou, překročila 80% hranici RH jen krátkodobě, tak pouze přelepená kapsa C_6 si udržela relativní vlhkost nad 80 % po dobu 5 měsíců.

Podobná situace jako v průběžích RH je propána i do průběhů hmotnostní vlhkosti v trámových zhlavích. Bohužel není známa počáteční vlhkost dřeva před zabudováním, ale je vidět, že pro všechna zhlaví v systému S1a je na počátku měření v březnu 2015 na hodnotě přibližně 19 %. Hmotnostní vlhkost zhlaví je tak hned od začátku experimentu nad kritickou hodnotou pro napadení dřeva plísními 18 %. Nicméně i u utěsněných kapes C_5 a C_6 dochází v teplém období k vyschnutí na bezpečnou úroveň 13 – 14 %. Výrazněji nad 18 % pak hmotnostní vlhkost stoupne pouze u zhlaví v otevřených kapsách C_1 a C_2, a to až v chladnějším období 2016/2017 s nastavenými přísnými podmínkami v interiéru. Zároveň lze v tomto období opět pozorovat podobné odlišení průběhu mezi utěsněnými kapsami C_5 a C_6 jako u průběhů relativních vlhkostí.

Z difuzně otevřeného systému S1a se tedy jako nejbezpečnější jeví úprava kapsy C_5 s vyplněním hygroskopickým materiálem (dřevovláknitá vlna) a přelepením v úrovni zdiva Airstop páskou.



Situace na rozhraní izolace / zdivo



obr. 35 – Porovnání denních průměrných hodnot teplot a relativních vlhkostí v oblasti trámových kapes a na rozhraní izolace/zdivo – systém S1a Ciur 80 mm

Z obr. 35 je patrné, že výrazný rozdíl teplot nenastává ani mezi kapsami a bodem na rozhraní tepelného izolantu a zdiva.

Při sledování průběhů teplot v hodinovém kroku bylo zjištěno, že teploty na rozhraní jsou oproti kapsám v nejchladnějších obdobích utlumeny přibližně o 2 °C a vlivem teplotní setrvačnosti zděné stěny jsou výkyvy teplot na rozhraní zpožděné přibližně o 3 hodiny za kapsami. V letním období dochází v nejteplejších dnech k útlumu teplot na rozhraní zhruba jen o 3 °C se zpožděním maximálně 5 hodin oproti kapsám.

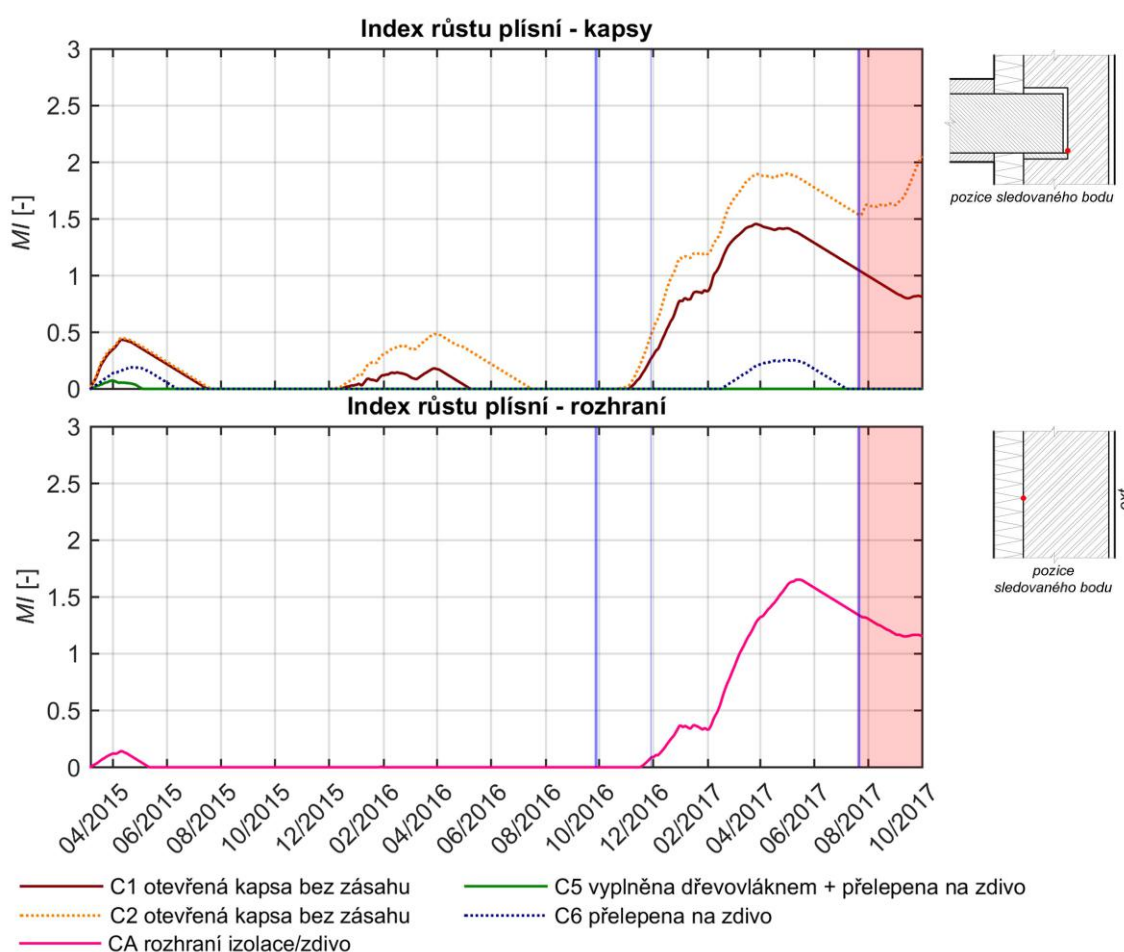
Na obr. 35 lze dále pozorovat, že charakter průběhu RH na rozhraní v bodě C_A je více podobný průběhu v otevřené kapse C_2. Nicméně v chladných obdobích leží převážně mezi průběhy otevřené kapsy C_2 a utěsněné kapsy C_5. Je zde tedy zřejmě vyšší koncentrace vodní páry než v utěsněných kapsách, ale zároveň nižší než v otevřených. Nižšímu průběhu RH v bodě C_A oproti otevřené kapse C_2 zřejmě také přispívají i mírně vyšší teploty (viz výše).

Zároveň porovnání průběhů vypovídá o tom, že do utěsněných kapes se boční difuzí skrze stropní konstrukci a samotné zhlaví dostane méně vodní páry než samotnou skladbou difuzně



otevřeného systému S1a. Důležité je ale především pozorování, že v difuzně otevřeném systému vnitřního zateplení nedošlo ke kondenzaci za celé sledované období. Dokonce i v chladnějším období 2016/2017, kdy bylo navíc v interiéru nastaveno vlhčí prostředí ($T\ 24\ ^\circ\text{C}$; $\text{RH}\ 60\ \%$), nepřesáhla naměřená relativní vlhkost na rozhraní hodnotu $98\ \%$. Lze si tak udělat představu o nadhodnocení rizika kondenzace vodní páry na základě konzervativních výpočtů Glaserovo metodou – viz příklad 3 v kapitole 2.2 – Zdroje vlhkosti.

Index růstu plísní dle [17]



obr. 36 – Index růstu plísní stanovený dle [17] pro jednotlivé úpravy kapes a rozhraní izolace/zdivo, systém S1a Ciur 80 mm

Z obr. 36 lze pozorovat, že z hlediska rizika vzniku plísní jsou ohroženy pouze otevřené kapsy C_1 a C_2 ve stropní konstrukci bez zásahu. Podobná situace jako u otevřených kapes pak vzniká i na rozhraní izolace/zdivo (zde byly použity stejné vstupy jako pro kapsy, protože izolant je také na bázi dřeva). Index růstu plísní zde dosahuje hodnoty okolo 1,5 až 2. Podle stupnice na str. 51 to již představuje riziko několika lokálních výskytů plísní pozorovaných mikroskopem.

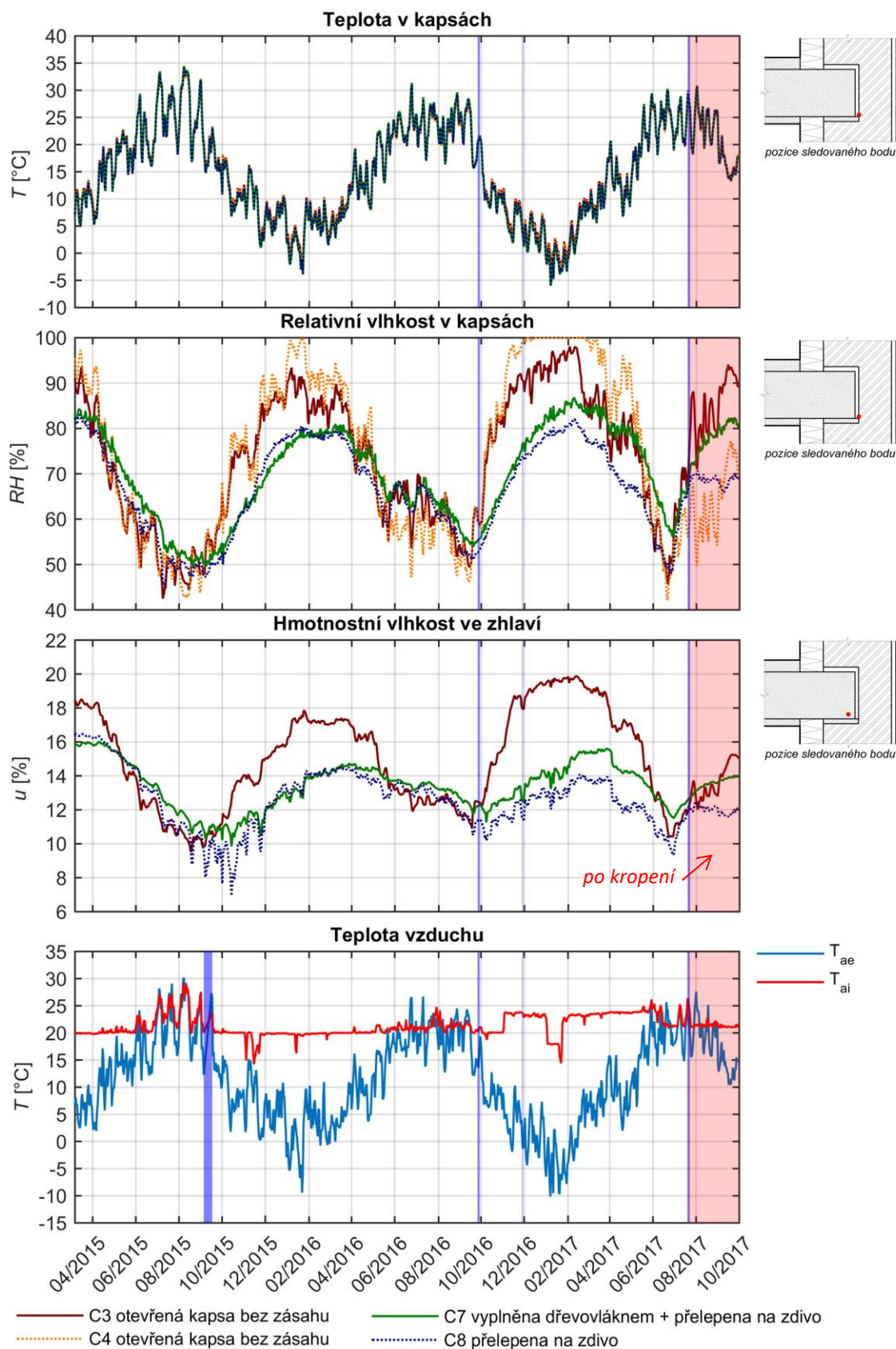


Z průběhů vypočtených hodnot indexu růstu plísní lze pozorovat, že hodnoty indexu dosahují lokálního maxima vždy v období dubna. Při porovnání s průběhy teplot a RH na obr. 34 je vidět, že v tomto období nastává v kapsách kombinace stále ještě vysokých relativních vlhkostí nad 80 % a zvyšujících se teplot vzduchu. Nejvhodnější podmínky pro vznik plísní tak nastávají až v tomto přechodném jarním období. Nicméně až do chladného období 2016/2017 se simulovaným vlhčím provozem v interiéru ($T\ 24\ ^\circ\text{C}$; $RH\ 60\ \%$), byla situace bezpečná i u otevřených kapes. Index růstu plísní do té doby nepřesáhl hodnotu 0,5 – tedy téměř bez rizika vzniku plísní.

Při běžných podmínkách v interiéru s teplotou vzduchu $21\ ^\circ\text{C}$ a relativní vlhkostí vzduchu do 50 % během chladného období, lze tedy na základě uvedeného výpočtu indexu růstu plísní, předpokládat poměrně bezpečné vlhkostní podmínky i v otevřených kapsách a na rozhraní difuzně otevřeného zateplovacího systému S1a.



4.2.2 SYSTÉM S1b – CIUR 140 mm (dřevovláknité desky 140 mm)



obr. 37 – Denní průměrné hodnoty teplot a relativních vlhkostí v oblasti trámových kapes a hmotnostní vlhkost ve zhlavích – systém S1b Ciur 140 mm

*v případě kapsy C_4 je průběh hmotnostní vlhkosti ve spodní i horní části zhlaví neobjektivní a je tedy vynechán



V systému S1b je situace velmi podobná jako v předchozím systému S1a, který se liší pouze tloušťkou izolantu. Oba systémy jsou zde tedy rovnou porovnány.

Z průběhu relativních vlhkostí v otevřených kapsách C_3 a C_4 je vidět opět silná závislost na průběhu teplot. Zajímavá je ale mírná odlišnost v průběhu mezi těmito totožnými kapsami. Zatímco v předchozím systému měly otevřené kapsy C_1 a C_2 téměř shodný průběh relativní vlhkosti, tak zde má během chladného období roku kapsa C_3 ztelně níže položený průběh RH oproti kapse C_4. V kapse C_3 tedy patrně během chladných období nastávají nižší koncentrace vodní páry. Možným vysvětlením je přítomnost netěsnosti v podobě například nedokonale vymaltované spáry ve zdivu před kapsou. Vodní pára by případnou netěsností mohla lépe procházet až do exteriéru, čímž by se v kapse udržovaly nižší hodnoty RH. Nicméně i v kapse C_3 nastávají v každém ze zimních období relativní vlhkosti nad 80 %.

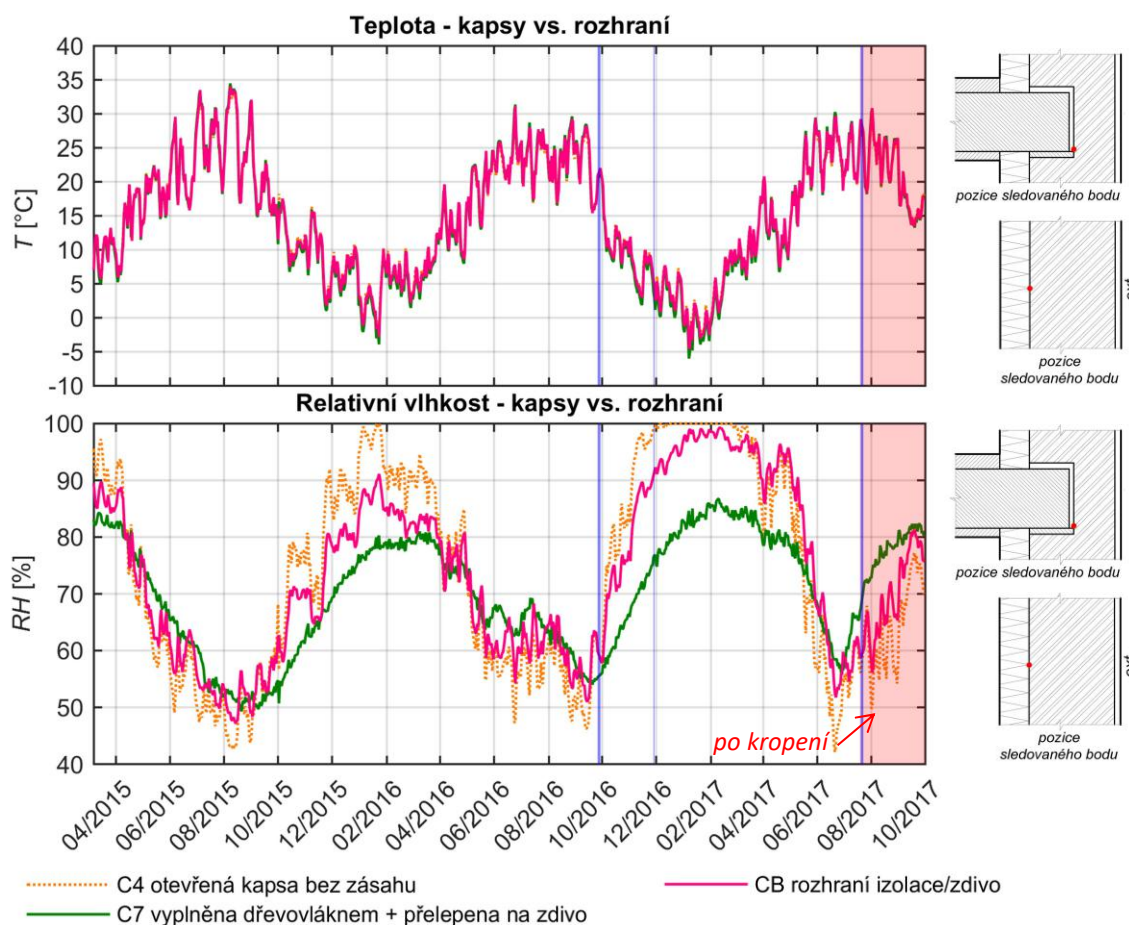
V utěsněných kapsách C_7 a C_8 jsou průběhy relativní vlhkosti téměř shodné jako u utěsněných kapes C_5 a C_6 ze systému S1a. Ovšem tentokrát je situace opačná. Kapsa C_7, která je mimo přelepení ještě vyplněna dřevovláknitou vlnou, v systému S1b projevuje chování jako pouze přelepená kapsa C_6 ze systému S1a. Obdobně je to u kapes C_8 a C_5. Lepší vlhkostní podmínky tedy v systému S1b zajišťuje pouze přelepená kapsa C_8. Hodnota RH nad 80 % je u této kapsy překročena pouze ve více chladném období 2016/2017 s vlhčím vnitřním prostředím, a to pouze na krátkou dobu přibližně 1 měsíce. Přelepená a vyplněná kapsa C_7 v tomto období překračuje 80% hranici RH přibližně na 4 měsíce.

Průběhy hmotnostní vlhkosti ve zhlavích systému S1b mají také podobný charakter jako v systému S1a, ale u utěsněných zhlaví C_7 a C_8 jsou zhruba o 3 % poníženy. Naměřená hmotnostní vlhkost pak u těchto kapes nepřekračuje hranici 16 %. Jelikož je ale průběh relativních vlhkostí téměř totožný pro systémy S1a i S1b, dalo by se i při počáteční rozdílné vlhkosti dřeva očekávat i pozdější sjednocení průběhů hmotnostní vlhkosti. Zde jsou ale průběhy posunuté za celé sledované období. To může být pravděpodobně způsobeno rozdílnou hustotou dřeva mezi elektrodami snímače vlhkosti – například přítomností suku nebo naopak praskliny. Nicméně i z charakteru průběhu je zřejmé, že nižší hmotnostní vlhkost dřevěného zhlaví zajistí utěsněné kapsy C_7 a C_8. V souladu s průběhem RH se opět lépe jeví kapsa C_8, která je pouze přelepena.

Celkově lze na základě porovnání jednotlivých průběhů na obr. 37 a 34 tvrdit, že rozdílné tloušťky izolantu v difuzně otevřeném systému S1a a S1b nemají překvapivě významný vliv na změnu tepelně vlhkostních podmínek v trémových kapsách. Ovšem zatímco v systému S1a se jako jednoznačně nejbezpečnější úprava ukázala kapsa C_5 přelepená a vyplněná hygroskopickým materiálem, tak v systému S1b zajišťuje lepší vlhkostní podmínky pouze přelepená kapsa C_8. Nelze tak jednoznačně určit nejvhodnější variantu úpravy zhlaví. Ovšem vzhledem k velmi podobným charakterům průběhů u obou typů úprav v porovnání mezi systémy S1a a S1b je otázkou, zda nedošlo k chybné evidenci čidel v těchto kapsách. Nicméně je zřejmé, že přelepené kapsy ve stropní konstrukci s průběžným zateplením zajišťují během sledovaného období příznivější vlhkostní podmínky v oblasti zhlaví.

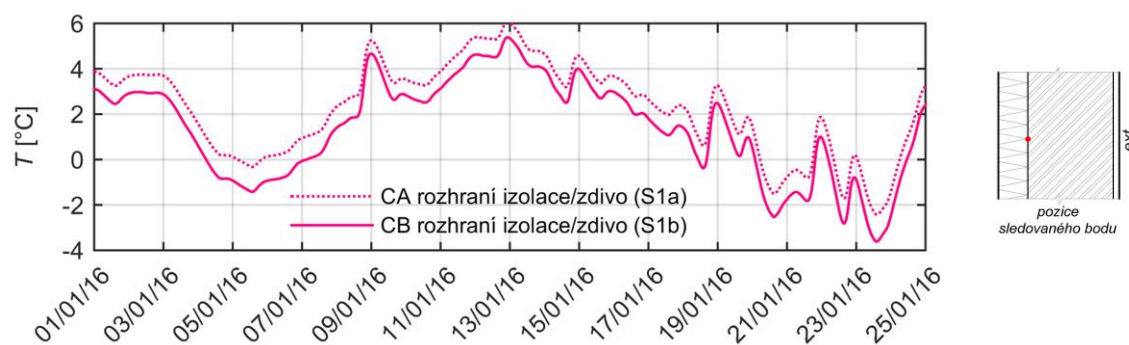


Situace na rozhraní izolace / zdivo



obr. 38 – Porovnání denních průměrných hodnot teplot a relativních vlhkostí v oblasti trámových kapes a na rozhraní izolace/zdivo – systém S1b Ciur 140 mm

Na obr. 38 je vidět opět podobná situace jako v předchozím systému S1a, který se liší pouze tloušťkou použitého izolantu. Rozdíl mezi teplotami v kapsách a na rozhraní se při sledování hodinových průběhů nelišil od poznatku z předchozího systému (viz str. 54). Nicméně vlivem větší tloušťky dřevovláknité izolační desky v systému S1b došlo k účinnějšímu odizolování zdiva od prostředí interiéru a teploty v bodě C_B na rozhraní tak v chladných obdobích klesly přibližně o 1 °C oproti bodu C_A na rozhraní předchozího systému S1a (viz obr. 39).



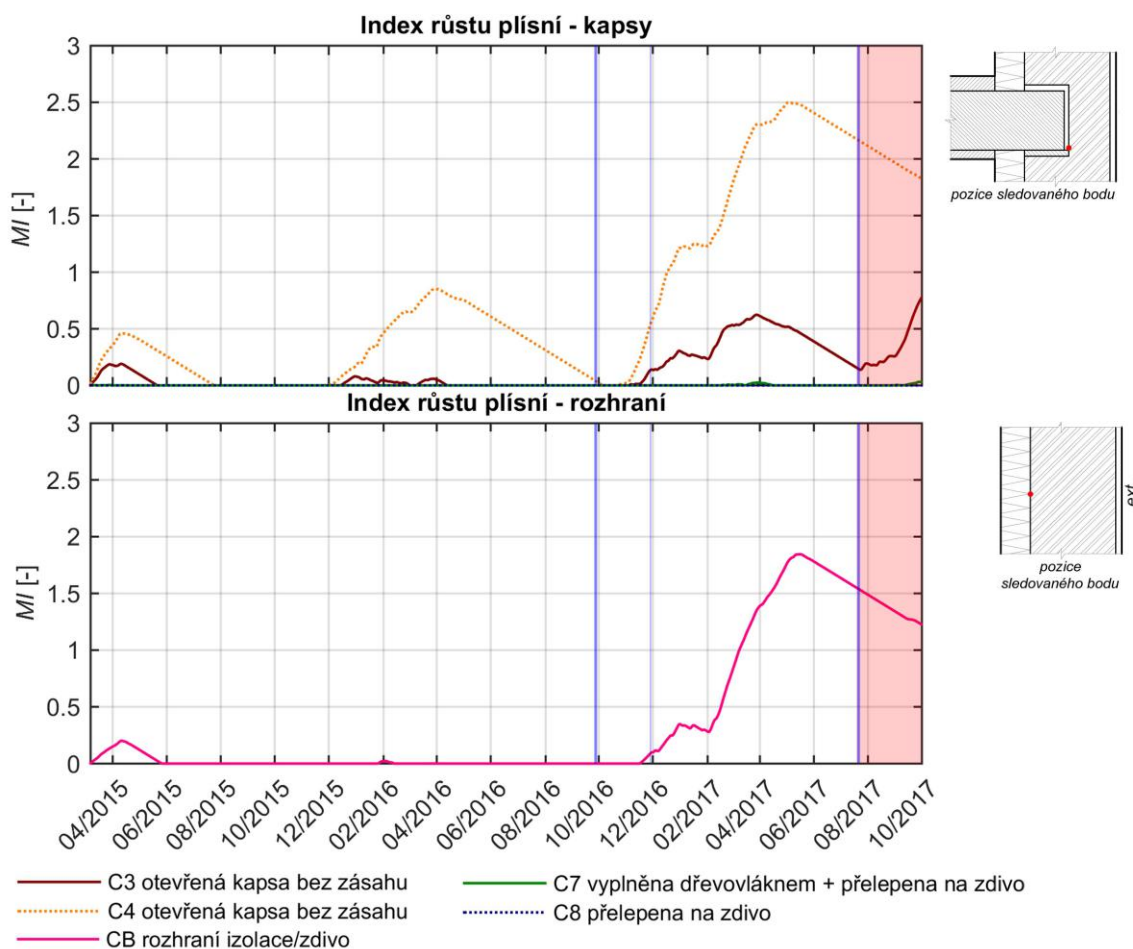
obr. 39 – Detail hodinového průběhu teplot na rozhraní izolace/zdivo pro systém S1a a S1b



Vlivem nižší teploty na rozhraní izolace/zdivo u systému S1b pak v tomto místě nastávají i mírně vyšší relativní vlhkosti oproti předchozímu systému S1a. Ovšem ani u systému S1b s větší tloušťkou izolantu nedochází za celé sledované období ke kondenzaci vodní páry na rozhraní. V celkově chladnějším období 2016/2017 s vlhčím vnitřním prostředím je dosaženo maximální hodnoty RH 99 %. Stejně jako v předchozím systému S1a se i zde potvrzuje, že výpočty založené na Glaserově metodě dávají oproti realitě velmi konzervativní výsledky na straně bezpečné – alespoň v případech posuzování systémů vnitřního zateplení aplikovaného na zděné obvodové stěny – viz příklad 3 v kapitole 2.2 – Zdroje vlhkosti. Zároveň tím, že na rozhraní nenastává kondenzace vodní páry, nedochází během sledovaného období ani k plnému využití potenciálu kapilární aktivity dřevovláknitých desek.

Zajímavým zjištěním je, že oproti systému S1a s tloušťkou izolantu 80 mm došlo u systému S1b s tloušťkou izolantu 140 mm pouze k minimálnímu navýšení průběhu relativní vlhkosti v řádu jednotek %. Zásadní vliv větší tloušťky izolantu na zvýšení relativních vlhkosti se v tomto konkrétním případě během sledovaného období neprojevil. U obou systémů S1a i S1b, ale nastávají během nejméně příznivého chladného období 2016/2017 dlouhodoběji (přibližně na 6 měsíců) relativní vlhkosti nad 80 %. Otázkou tedy zůstává, jak na takové podmínky zareaguje izolant v podobě dřevovláknitých desek.

Index růstu plísní dle [17]



obr. 40 – Index růstu plísní stanovený dle [17] pro jednotlivé úpravy kapes a rozhraní izolace/zdivo, systém S1b Ciur 140 mm

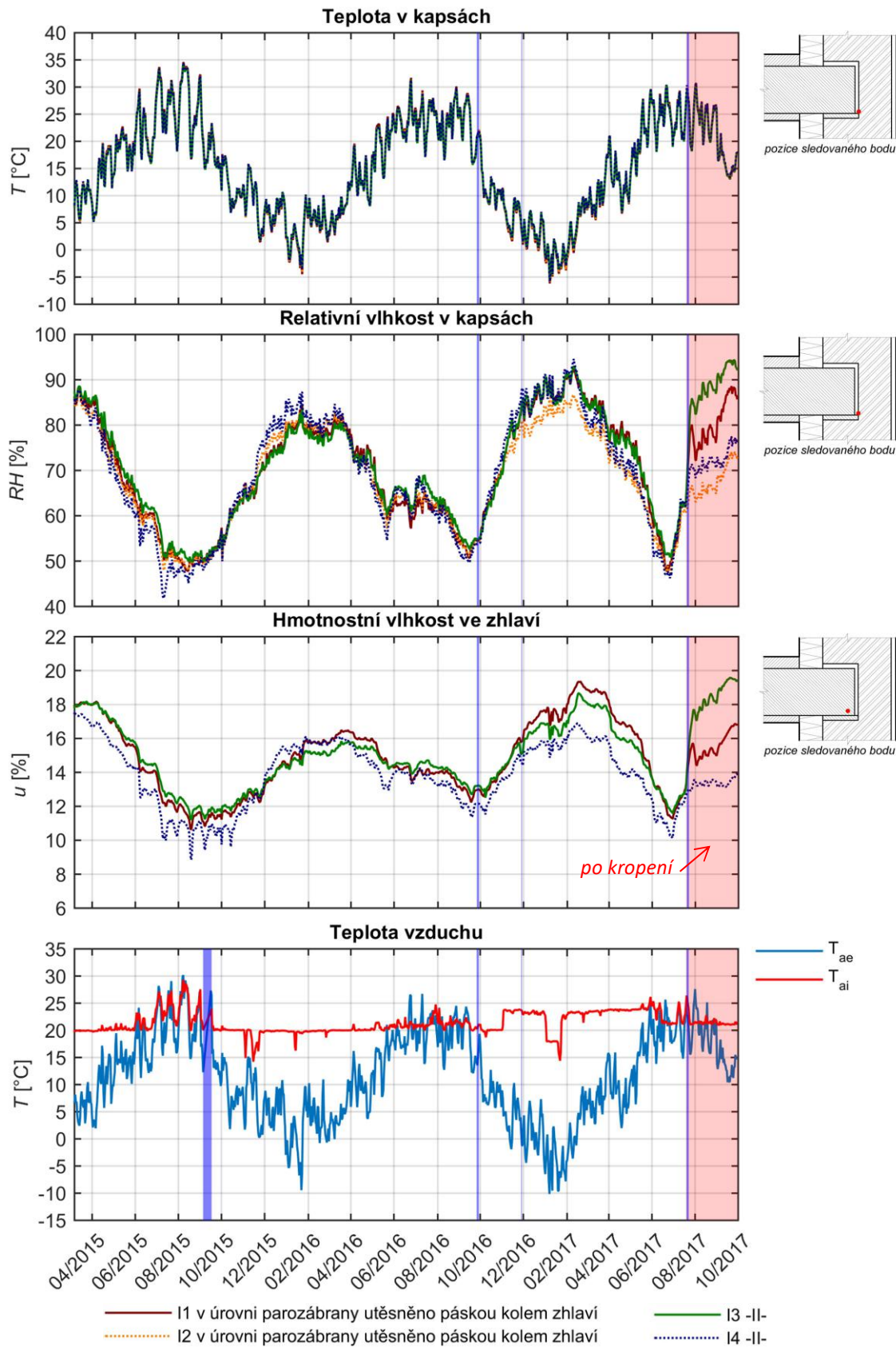


Situace z hlediska rizika vzniku plísní u systému S1b je dle očekávání opět podobná jako v případě systému S1a. Ovšem u otevřené kapsy C_4 je po nepříznivém chladném období 2016/2017 dosaženo vyššího indexu 2,5. Na rozhraní je maximální hodnota indexu mírně zvýšená oproti předchozímu systému, ale stále je v rozmezí 1,5 až 2. U kapsy C_4 a v oblasti rozhraní tak dle stupnice na str. 51 opět hrozí lokální mikroskopický výskyt plísní. Naopak u druhé otevřené kapsy C_3 došlo pouze k mírnému překročení hodnoty indexu 0,5 (před klopením fasády). Vznik plísní zde tedy pravděpodobně nehrozí. I když byla relativní vlhkost v kapse C_3 během chladných období delší dobu nad 80 %, tak zřejmě mírně nižší průběh RH oproti kapse C_4 (přisuzovaný případné netěsnosti před čelem kapsy), zajistil poměrně bezpečné vlhkostní podmínky.

Nicméně je také vidět, že u otevřené kapsy C_4 bylo mírné riziko vzniku plísní již po chladném období 2015/2016. Celkově navíc u systému S1b nastávají mírně vyšší hodnoty indexu růstu plísní. Vliv větší tloušťky izolantu se tedy projevil na průbězích RH jen malým zvýšením, ale stačilo to na patrnější zhoršení z hlediska rizika vzniku plísní. I u systému S1b lze ale na základě průběhu vypočteného indexu růstu plísní předpokládat poměrně bezpečné chování i v otevřených kapsách při udržení běžných podmínek v interiéru během zimního období.



4.2.3 SYSTÉM S2 – ISOVER + RIGIPS (systém s „inteligentní“ parozábranou)



obr. 41 – Denní průměrné hodnoty teplot a relativních vlhkostí v oblasti trémových kapes a hmotnostní vlhkost ve zhlaví – systém S2 Isover + Rigips

*v případě kapsy I_2 je průběh hmotnostní vlhkosti ve spodní i horní části zhlaví neobjektivní a je tedy vynechán, v případě kapsy I_3 je průběh hmotnostní vlhkosti ve spodní části zhlaví neobjektivní a je nahrazen průběhem v horní části zhlaví



Dle očekávání jsou v kapsách u systému S2 podobné nejen průběhy teplot, ale vlivem totožné úpravy všech kapes i průběhy relativní vlhkosti a hmotnostní vlhkosti ve zhlaví.

U průběhu relativních vlhkostí lze pozorovat, že i když se jedná o systém s parozábranou, dochází v chladných obdobích k RH v kapsách nad 80 %. V zimě 2015/2016 kolísá kolem této hodnoty relativní vlhkost ve všech kapsách po dobu přibližně 3 měsíců. V celkově chladnějším období 2016/2017, kdy bylo navíc v interiéru záměrně simulováno vlhčí prostředí, pak byla 80% hranice překročena výrazněji na dobu kolem 4 měsíců. Nicméně během teplých období roku nastává v kapsách překvapivě výrazný pokles relativní vlhkosti. Každé léto zde dochází ke snížení úrovně RH přibližně na hodnotu 50 %. Otázkou je, do jaké míry na to má vliv použití „inteligentní“ parozábrany Isover Vario KM Duplex s proměnným difuzním odporem v reakci na změnu RH okolního prostředí. Zajímavé by bylo porovnání průběhů RH při použití standardní parozábrany.

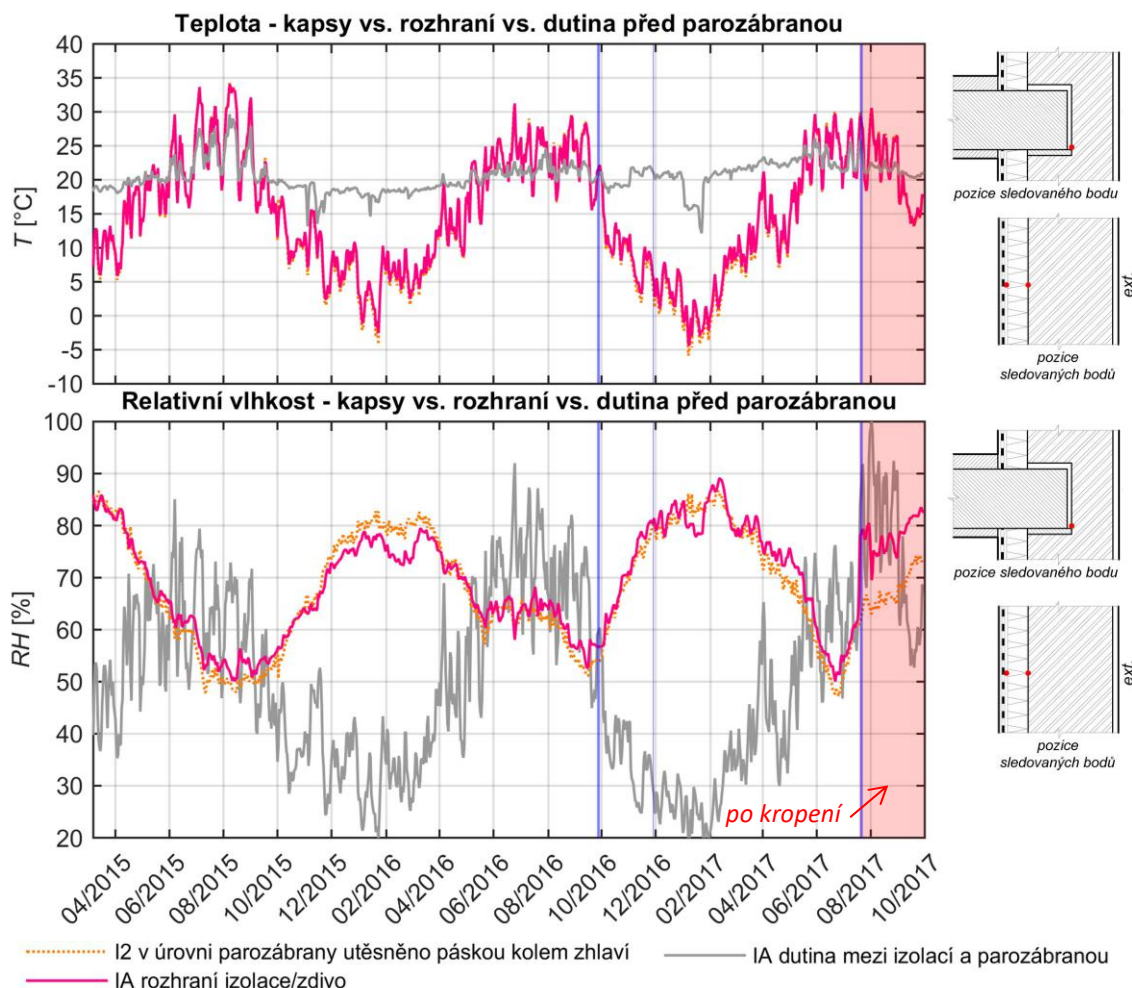
Z hlediska hmotnostní vlhkosti ve zhlavích jsou zobrazené průběhy velmi podobné až do chladnějšího období 2016/2017 s přísnějšími podmínkami v interiéru. Zajímavé je, že poloha průběhů hmotnostní vlhkosti zde neodpovídá průběhům RH v kapsách. Zatímco kapsy I_1, I_3 a I_4 mají v tomto období téměř shodný průběh RH, tak hmotnostní vlhkost ve zhlaví I_4 je oproti zhlaví I_1 a I_3 nižší. Celkově má ale tento průběh mírně odlišný charakter a zřejmě zde bude mezi elektrodami snímače vlhkosti anomálie například v podobě suku nebo naopak vzduchové mezírky, což mohlo ovlivnit naměřené hodnoty.

Nicméně hmotnostní vlhkost ve zhlavích v chladném období 2015/2016 dosahuje přibližně 16 %. V chladném období 2016/2017 s méně příznivými podmínkami přesáhne vlhkost ve zhlavích I_1 a I_4 hranici 18 % poměrně krátkodobě - na dobu přibližně 2 měsíců.

Celkově je vlhkostní situace ve všech stejně upravených kapsách systému S2 s „inteligentní“ parozábranou sporná. Relativní vlhkost 80 % je zde překračována v každém ze sledovaných zimních období, a to i na delší dobu. Na základě zobrazených průběhů nelze jednoznačně určit vhodnost této varianty opatření trémových kapes. Nicméně dle vyhodnocení rizika vzniku plísní na str. 66 je vlhkostní situace v oblasti trémových zhlaví velmi bezpečná.



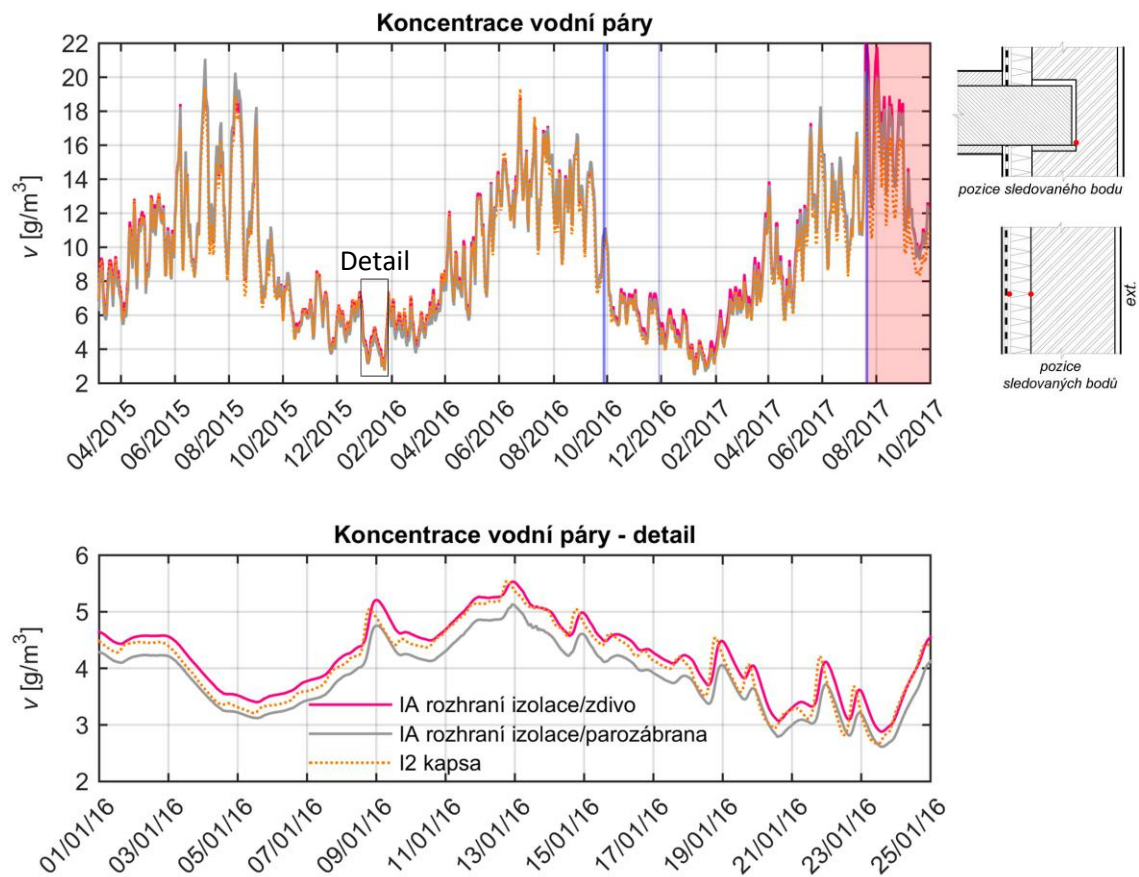
Situace na rozhraní izolace / zdivo a mezi izolací a parozábranou



obr. 42 – Porovnání denních průměrných hodnot teplot a relativních vlhkostí v oblasti trémových kapes, na rozhraní izolace/zdivo a před parozábranou – systém S2 Isover + Rigips

Na obr. 42 lze pozorovat, že na rozhraní tepelné izolace z minerálních vláken a zdiva nastává velmi podobný průběh relativní vlhkosti jako v kapsách. To je zřejmě způsobeno tím, že za parozábranou již nejsou kapsy dodatečně utěšňovány. Tepelný izolant z minerální vlny je velmi difúzně propustný (podobně jako vzduch). V prostoru za parozábranou a v kapsách tak nastávají podobné koncentrace vodní páry (viz obr. 43). Jelikož i teplota v kapsách a na rozhraní se liší minimálně, jsou poté průběhy relativní vlhkosti téměř totožné.

Dále je pro tento systém zobrazena i situace na rozhraní tepelné izolace a parozábrany. V tomto místě je dle očekávání velmi podobný průběh teplot jako v interiéru. Lze si ale především všimnout odlišnosti v průbězích relativní vlhkosti na rozhraní a před parozábranou. Nicméně na obr. 43 je vidět, že dopočítaná koncentrace vodní páry je v obou místech téměř totožná. Rozdíl mezi průběhy je tak způsoben hlavně vlivem rozdílných teplot.

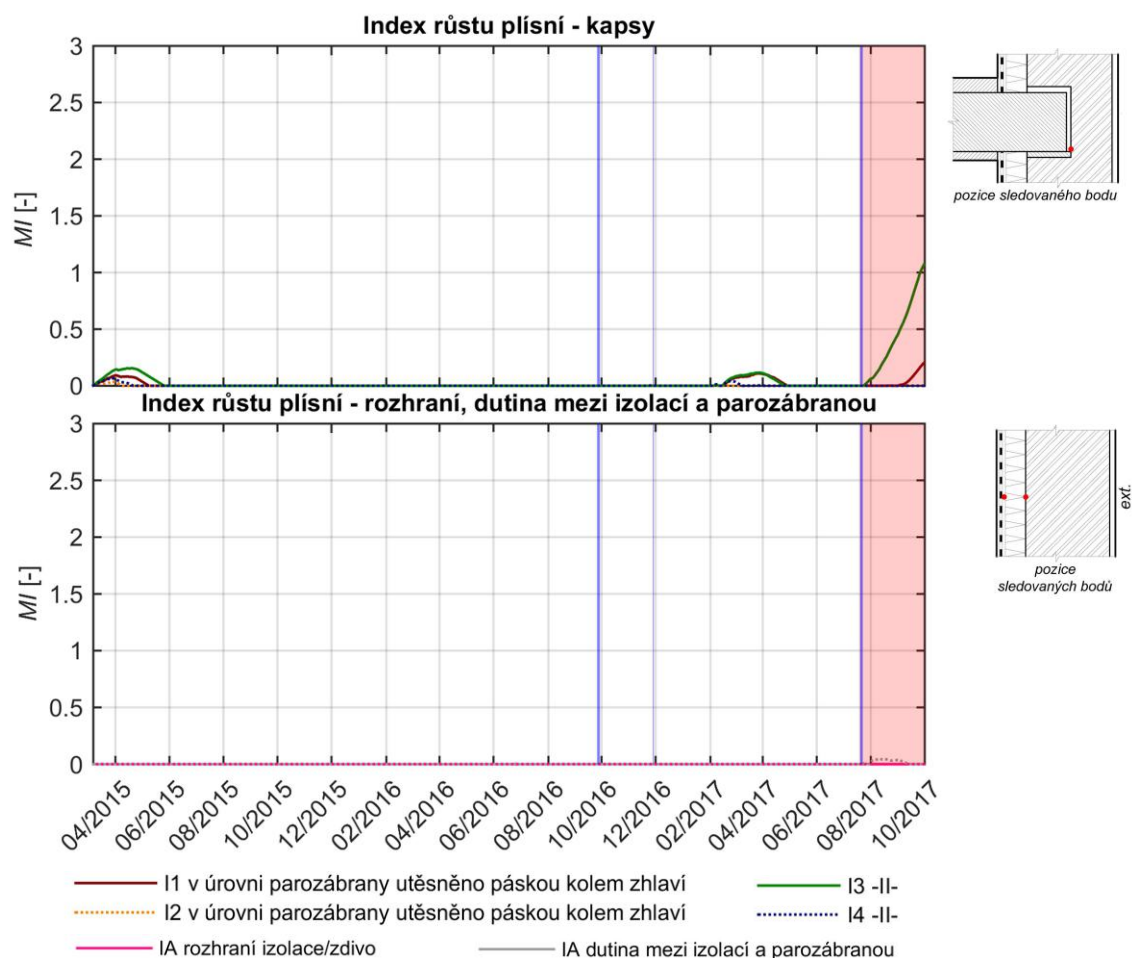


obr. 43 – Dopočítané denní průměrné hodnoty koncentrace vodní páry v kapse, na rozhraní izolace/zdivo a před parozábranou + detail hodinového průběhu koncentrací

Z obr. 43 je také patrné, že vyšší koncentrace vodní páry v celém systému S2 nastávají v teplém období roku. To odpovídá obrácenému difuznímu toku vodní páry z exteriéru do interiéru. Nicméně i přes vyšší koncentrace převládá vliv vyšších teplot a průběh relativní vlhkosti tak v teplém období klesá.



Index růstu plísní dle [17]



obr. 44 – Index růstu plísní stanovený dle [17] pro jednotlivé úpravy kapes, rozhraní izolace/zdivo a dutinu mezi izolací a parozábranou - systém S2 Isover + Rigips

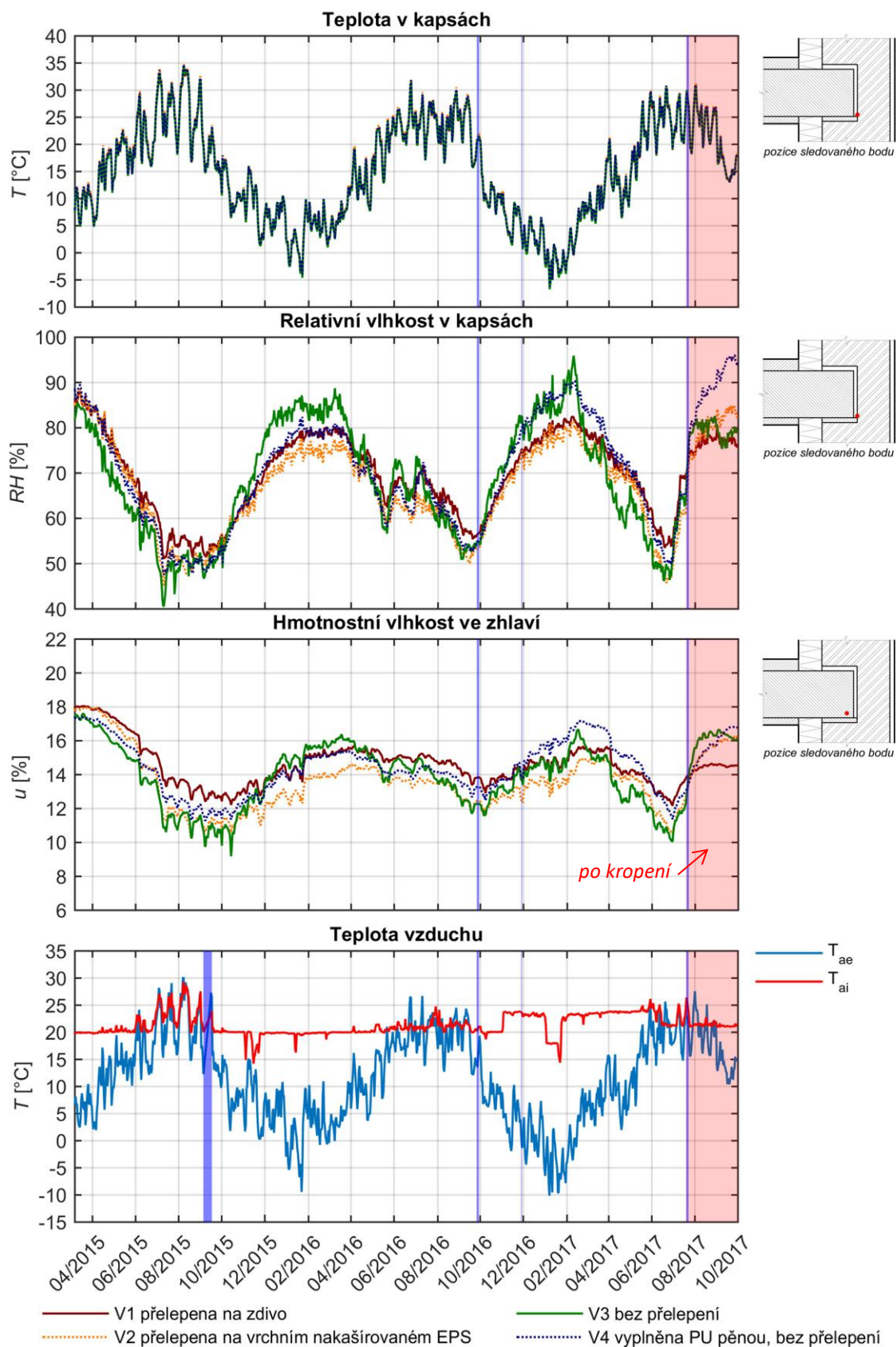
Na základě stanoveného průběhu indexu růstu plísní je zřejmé, že v žádné z kapes nehrozí během sledovaného období (před skrápěním fasády) žádné riziko vzniku plísní. Ani dlouhodobější (přibližně 4 měsíce) překročení relativní vlhkosti v kapsách nad 80 % z chladného období 2016/2017 tak zřejmě nemusí znamenat významnější riziko.

Zároveň byla pomocí výpočetního modelu [17] sledována i situace v typické skladbě systému. Jelikož se v tomto případě nejedná o dřevěné prvky, byl pro situaci na rozhraní zadán jako vstupní materiál beton (nahrazující zdivo) a pro místo před parozábranou byla zadána izolace ze skelných vláken. Na obr. 44 je pak zřejmé, že v těchto místech nevzniká žádné riziko vzniku plísní, což se dalo vzhledem k nižší citlivosti použitých materiálů na vznik plísní očekávat.

Vzhledem k výše uvedeným pozorováním lze tedy celkově systém S2 s „inteligentní“ parozábranou považovat z vlhkostního hlediska za velmi bezpečný.



4.2.4 SYSTÉM S3 – VA–Q–TEC (vakuové panely)



obr. 45 – Denní průměrné hodnoty teplot a relativních vlhkostí v oblasti trámových kapes a hmotnostní vlhkost ve zhlavích – systém S3 VA-Q-TEC



V systému S3 s vakuovými panely je nejpříznivějších průběhů RH dosaženo u kapsy V_2, kde je spára mezi zhlavím a izolantem přelepena Airstop páskou v úrovni vnitřního povrchu pod omítkovou stěrkou. Hranice relativní vlhkosti 80 % je u kapsy V_2 překročena jen nepatrně, a to pouze v celkově více chladném období 2016/2017 s nastaveným vlhčím prostředím v interiéru. V teplých obdobích navíc dochází téměř k nejvýraznějšímu poklesu RH až pod úroveň 50 %.

Podobný průběh má potom i kapsa V_1, která je přelepena Airstop páskou přímo na zdivo. Průběh relativní vlhkosti je zde oproti kapse V_2 mírně posunutý výše, ale i tak je 80 % hranice RH překročena jen přibližně 1 měsíc v nejvíce nepříznivém chladném období 2016/2017. I přes utěsnění přímo v úrovni zdiva dochází v letních obdobích k dostatečnému vysychání a poklesu RH přibližně na 55 %.

Kapsa V_4 ,pouze vyplněná PU pěnou, reaguje nejprve podobně jako přelepené kapsy V_1 a V_2. V chladném období 2016/2017 ale průběh RH stoupne výrazně nad 80 % na dobu přibližně 4 měsíců. Patrně se tedy v kapse V_4 projeví vyšší koncentrace vodní páry až vlivem vlhčího vnitřního prostředí (T 24 °C; RH 60 %) a více chladným obdobím v exteriéru.

Nejméně vhodná se jeví úprava kapsy V_3, která je pouze zaklopena zateplovacím systémem bez dalšího utěsnění. Dle očekávání reaguje RH v této kapse rychleji a výrazněji na změnu okrajových podmínek. Již v mírnějším chladném období 2015/2016 je v kapse V_3 překročena hranice 80% relativní vlhkosti na dobu přibližně 4 měsíců. V chladném období 2016/2017 je zde relativní vlhkost nad 80 % asi 3 měsíce, ale je dosaženo hodnoty RH až 95 %.

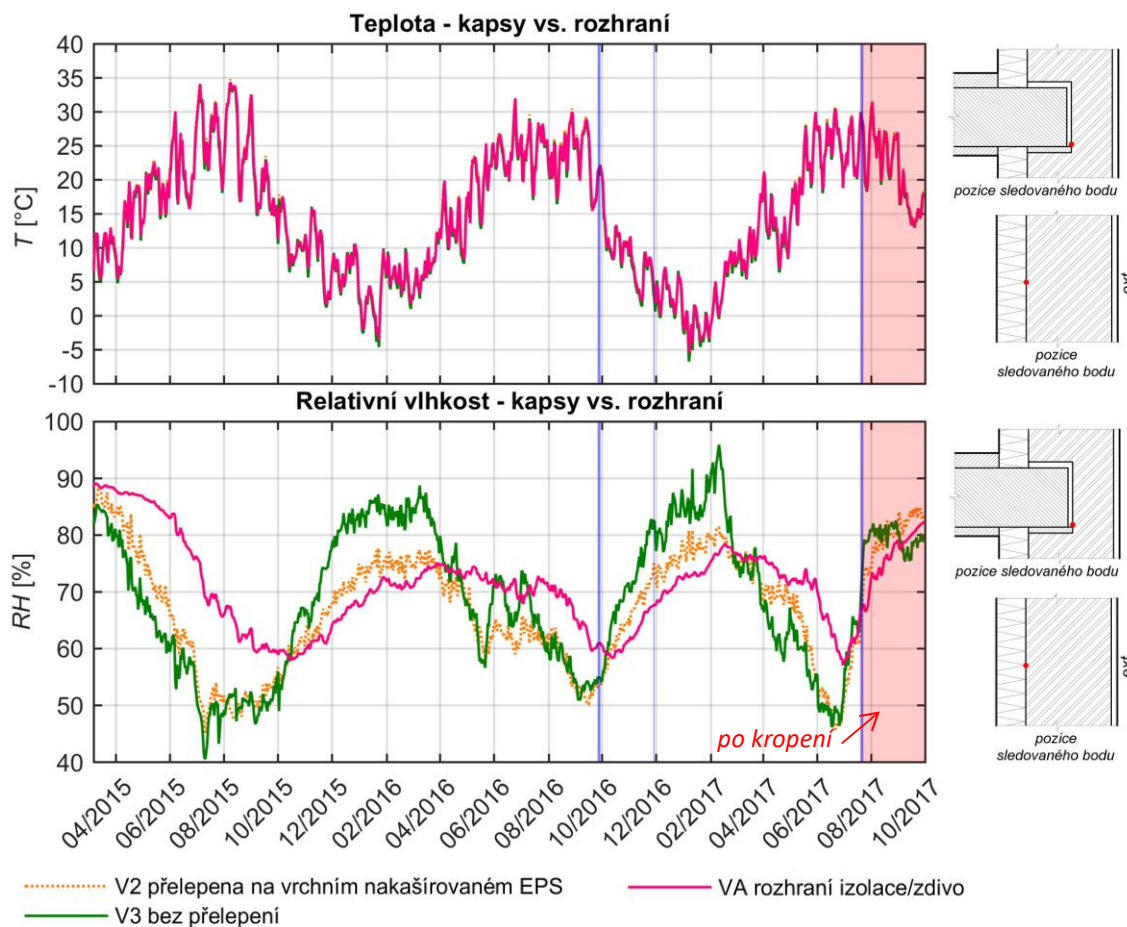
Průběhy hmotnostní vlhkosti jsou pro všechna zhlaví v rozsahu přibližně 10 až 17 % a odpovídají i charakteru průběhu relativní vlhkosti v kapsách. Mimo počátečního období experimentu tedy není vůbec dosaženo kritické hranice 18 %. Nicméně nejplošší a nejnižší průběh hmotnostní vlhkosti v rozsahu 11 až 15 % je pozorován v kapse V_2 s přelepením v úrovni vnitřního povrchu.

Ze systému S3 s vakuovými panely lze tedy na základě pozorovaných průběhů z obr. 45 stanovit následující pořadí vhodnosti úprav kapes:

1. V_2 - přelepena Airstop páskou v úrovni vnitřního povrchu pod omítkovou stěrkou
2. V_1 - přelepena Airstop páskou přímo v úrovni zdiva
3. V_4 – pouze vyplněna PU pěnou bez přelepení
4. V_3 – pouze zaklopena zateplovacím systémem - bez úprav (spíše nevhodná úprava)



Situace na rozhraní izolace / zdivo



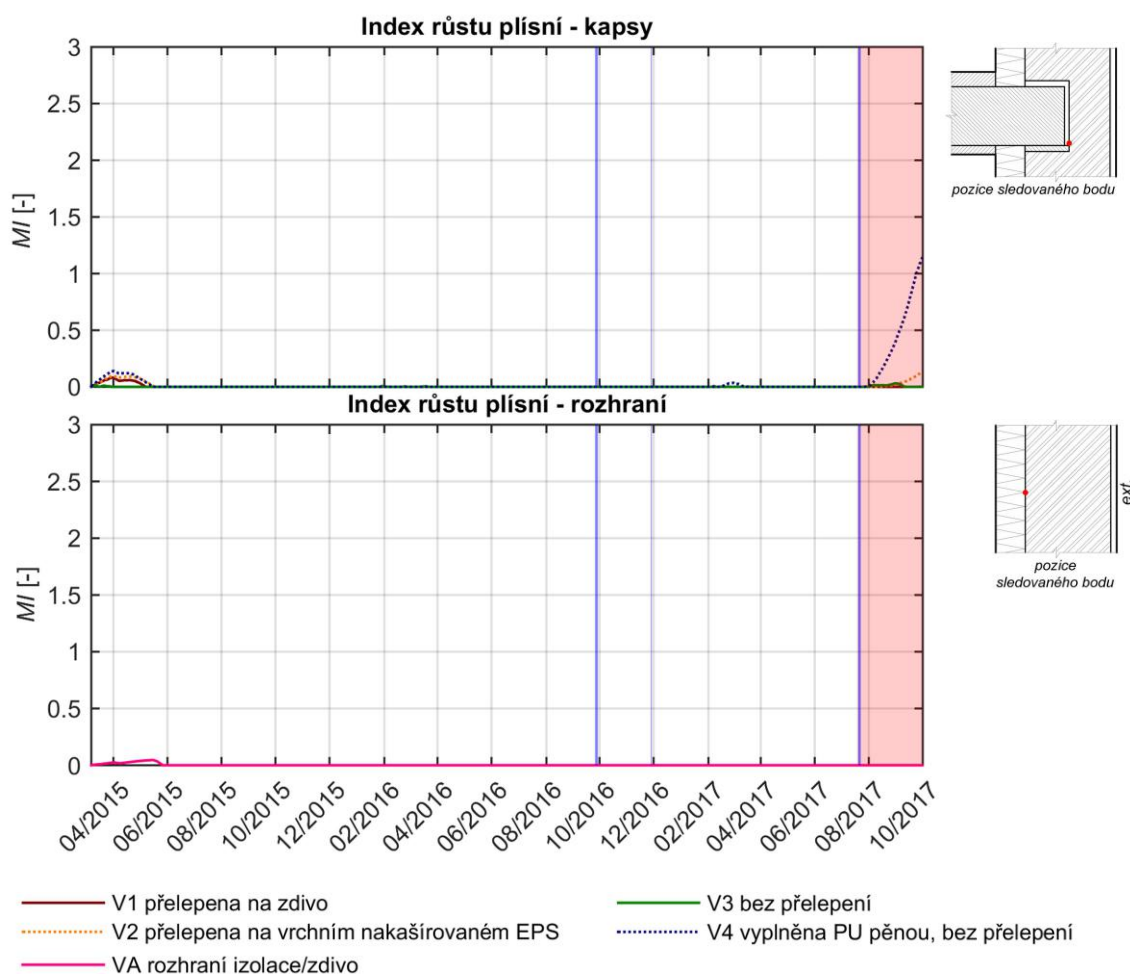
obr. 46 – Porovnání denních průměrných hodnot teplot a relativních vlhkostí v oblasti trámových kapes a na rozhraní izolace/zdivo – systém S3 VA-Q-TEC

Z obr. 46 lze pozorovat, že průběh RH na rozhraní mezi vakuovými panely a zdivem je dle očekávání spíše podobný průběhu v utěsněné kapse V₂. Nicméně průběh RH na rozhraní je celkově plošší a je zde patrná pozdější reakce na změnu okrajových podmínek. Toto chování odpovídá předpokladu větší těsnosti systému v typickém místě skladby než v oblasti prostupujících trámových zhlaví. Přes samotná dřevěná trámová zhlaví tak patrně může v zimním období snáze prostupovat vodní pára z interiéru do kapes, než skrze parotěsný vakuový panel k rozhraní. V letním období, kdy se difuzní tok vodní páry obrací, je pak kapsám umožněno mnohem intenzivnější vysychání. Nicméně mimo počátečního období experimentu se průběh relativní vlhkosti na rozhraní drží bezpečně pod hranicí 80 %, a to dokonce i v celkově chladnějším období 2016/2017 s nastaveným vlhčím prostředím v interiéru. U systému S3 je navíc jako u jediného tepelný izolant celoplošně lepen cementovým lepidlem na zdivo. I v případě vyšších relativních vlhkostí by zde tedy pravděpodobně nebyl prostor pro rozvoj plísní.



Dále je zajímavé, že na začátku měření v březnu 2015 byla na rozhraní vyšší relativní vlhkost než ve všech kapsách. To lze ale pravděpodobně přisoudit právě mokrému procesu lepení vakuových panelů na zdivo. Na počátku měření je ale relativní vlhkost zvýšená i ve všech ostatních systémech a kapsách. Mohlo se tedy například jednat i o vliv nedostatečně vyschlého nového zdiva v testovacích polích. Ovšem i přes zvýšenou relativní vlhkost na počátku experimentu došlo v následujícím letním období k poklesu RH na 60 %. Na podobnou úroveň pak klesá průběh RH i v následujících teplých obdobích.

Index růstu plísní dle [17]



obr. 47 - Index růstu plísní stanovený dle [17] pro jednotlivé úpravy kapes a rozhraní izolace/zdivo, systém S3 VA-Q-TEC

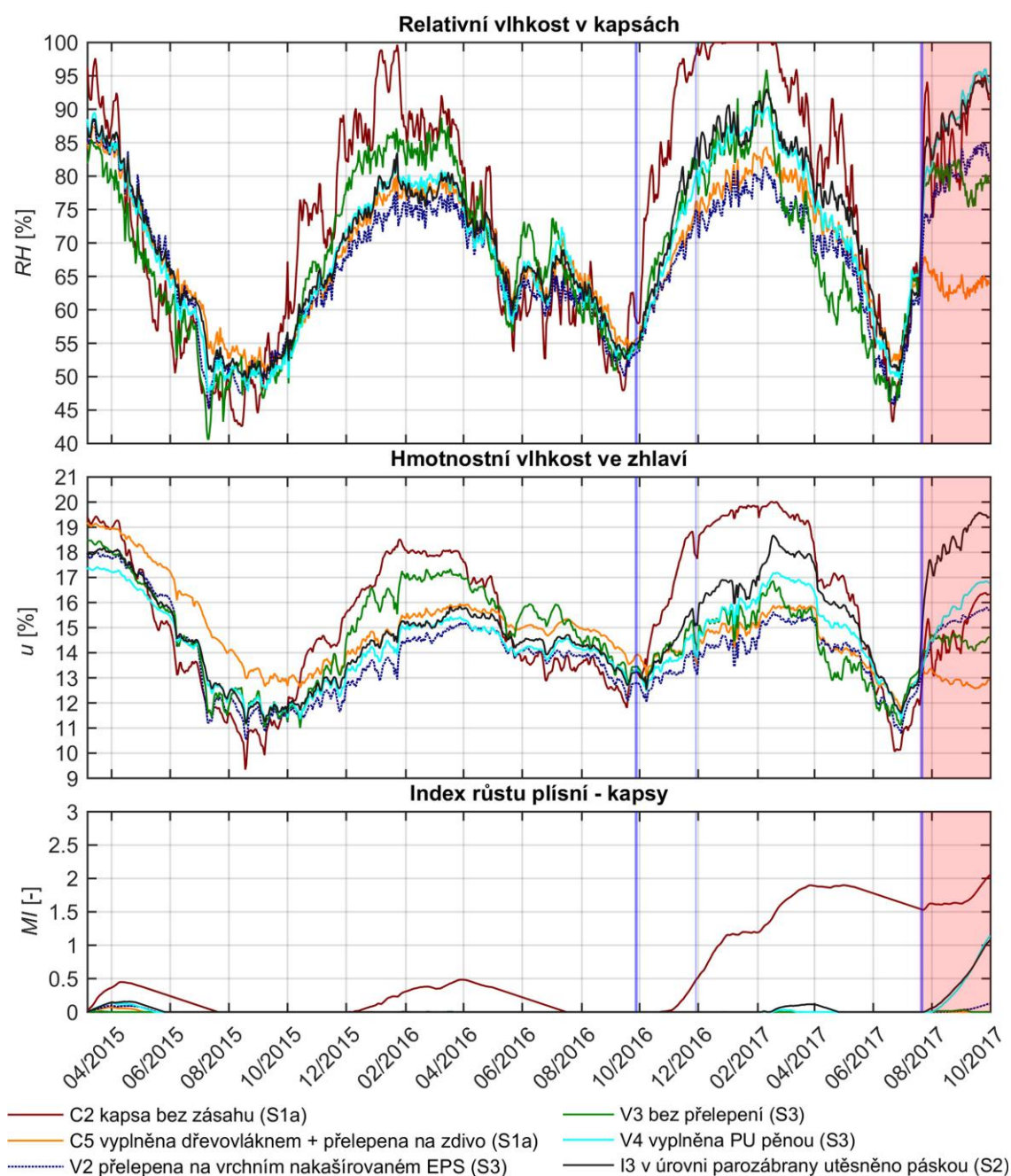
Dle obr. 47 lze pozorovat, že ani v kapse V_3 bez přelepení, kde docházelo pravidelně v zimním období k dlouhodobějšímu (přibližně na 4 měsíce) překročení 80% hranice RH, nehrozí dle výpočetního modelu [17] žádné riziko růstu plísní. Celkově se tak na základě vyhodnocení rizika vzniku plísní jeví systém vnitřního zateplení S3 s vakuovými panely jako velmi bezpečný jak v oblasti rozhraní, tak v případě všech použitých úprav kapes.



4.3 Vzájemné porovnání jednotlivých systémů

V této části je na základě předchozího vyhodnocení úprav kapes a skladeb v rámci jednotlivých systémů vnitřního zateplení provedeno pro lepší představu vzájemné porovnání naměřených údajů. Pro udržení přehlednosti jsou za jednotlivé systémy porovnávány jen vybrané kapsy s nejvíce odlišnými úpravami. Mimo oblasti trámových kapes je sledována i situace na rozhraních zateplovacích systémů a zdiva.

4.3.1 Situace v oblasti trámových kapes



obr. 48 – Vzájemné porovnání naměřených průběhů RH v kapsách a hmotnostní vlhkosti ve zhlavích jednotlivých systémů vnitřního zateplení + vypočtené průběhy indexu růstu plísní dle [17]



Z porovnání průběhů na obr. 48 je zřejmé, že nejhorší vlhkostní podmínky nastávají jednoznačně v otevřených kapsách v konstrukci stropu bez zásahu, které zde zastupuje kapsa C_1. V každém ze zimních období zde dochází k nejdelšímu období s hodnotami RH nad 80 % V chladném období 2015/2017 je 80% hranice překročena přibližně od poloviny listopadu do dubna. V chladnějším období 2016/2017 s nastaveným vlhčím prostředím v interiéru (T 24 °C; RH 60 %) pak již od konce října do května. V zimních měsících tohoto období navíc nastává i kondenzace vodní páry v kapse. Hmotnostní vlhkost zhlaví se během prvního zimního období 2015/2016 pohybuje od ledna do dubna těsně kolem kritické hodnoty 18 %. Lze ale pozorovat, že dle vypočteného indexu růstu plísní je v tomto období, a i po něm, situace stále bezpečná. V druhém zimním období 2016/2017 je pak 18% hranice hmotnostní vlhkosti výrazně překročena od poloviny listopadu do dubna, což nápadně souvisí se zvýšením rizika vzniku plísní na index 2, kdy již lze dle stupnice na str. 51 pozorovat mikroskopicky lokální růst plísní.

Použitý výpočetní model tak na základě RH a teplot v kapse a volby materiálu dává výsledky dobře odpovídající i průběhu hmotnostní vlhkosti ve zhlaví, a lze tak považovat za poměrně věrohodný.

Jako druhá nejméně vhodná varianta se jeví úprava kapsy V_3 v systému s vakuovými panely, která je pouze zaklopena zateplovacím systémem bez dalšího utěsnění kolem zhlaví. Ovšem, i když zde dochází k poměrně výraznému překročení 80% hranice relativní vlhkosti i během mírnějšího chladného období, tak průběh hmotnostní vlhkosti nestoupá nad 17 % a situace je bezpečná i na základě stanoveného průběhu indexu růstu plísní.

Další v pořadí je kapsa I_3 ze systému S2 s „inteligentní“ parozábranou. Prostup zhlaví fóliovou parozábranou je zde utěsněn parotěsnou lepicí páskou (stejná úprava pro všechny 4 kapsy). Průběh relativní vlhkosti má v této kapse velmi příznivý charakter. K většímu překročení 80% relativní vlhkosti dochází pouze v chladnějším období 2016/2017 s nepříznivými vlhkostními podmínkami v interiéru. Během tohoto období vystoupí hmotnostní vlhkost zhlaví velmi krátce nad 18 %. Průběh indexu plísní ale nenaznačuje žádné riziko a tato úprava se tedy jeví jako bezpečná.

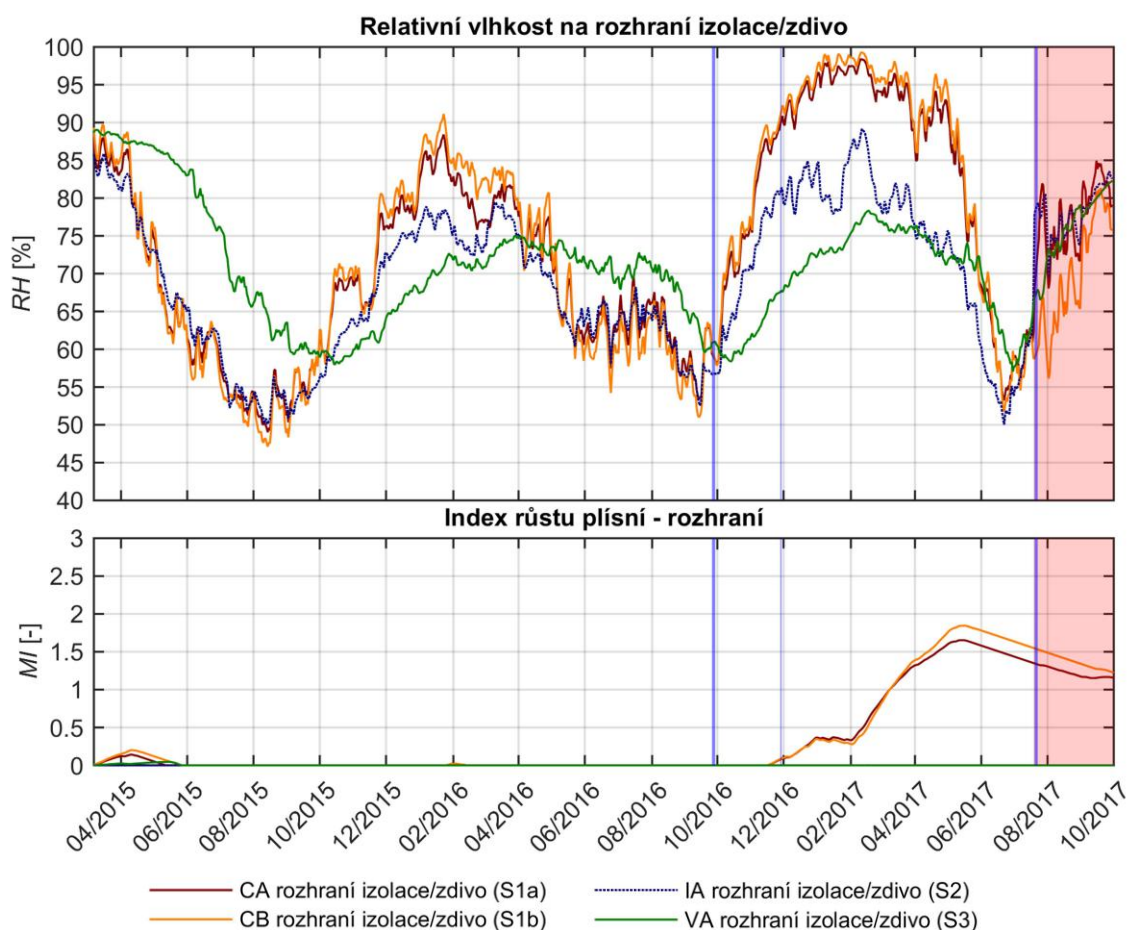
Z porovnání průběhů RH je zřejmé, že velmi podobné chování jako kapsa I_3 má i kapsa V_4 v systému s vakuovými deskami, která je vyplněna PU pěnou. Mírně se liší pouze průběh hmotnostní vlhkosti v chladnějším období 2016/2017, kdy ve zhlaví V_4 dosahuje maximální vlhkost hodnoty okolo 17 %.

Jako nejefektivnější z porovnávaných variant se jeví úprava kapsy C_5 a V_2. Kapsa C_5 z difuzně otevřeného systému S1a je vyplněna dřevovláknitou vlnou a přelepena přímo v úrovni zdiva Airstop páskou. Zhlaví V_2 ze systému S3 s vakuovými panely je utěsněno Airstop páskou až v úrovni vnitřního povrchu pod omítkovou stěrkou. V případě obou kapes jsou průběhy RH i hmotnostní vlhkosti velmi podobné. Po počátečním období experimentu již dochází k pouze minimálnímu překročení 80% hranice RH, a to v chladnějším období 2016/2017 s vlhčím vnitřním prostředím. Hmotnostní vlhkost u obou zhlaví nepřekračuje 16 %. Důležité je zmínit, že podobné průběhy byly při vyhodnocování úprav kapes v jednotlivých systémech pozorovány i u kapsy V_1, která je utěsněna přímo v úrovni zdiva a u kapsy C_8,



kteřá je oproti kapse C_5 jen přelepena bez vyplnění. Celkově tak utěsněné kapsy zajišťují během zde hodnoceného období bezpečnější vlhkostní podmínky v oblasti trámových zhlaví.

4.3.2 Situace na rozhraní izolace/zdivo



obr. 49 – Vzájemné porovnání naměřených průběhů RH na rozhraní zateplovacích systémů a zdiva + vypočtené průběhy indexu růstu plísní dle [17]

Na obr. 49 lze pozorovat, že nejvyšší relativní vlhkosti nastávají v chladných obdobích dle očekávání u difúzně otevřeného systému S1a a S1b. Jak již bylo uvedeno ve vyhodnocení po jednotlivých systémech, překvapivě zde během sledovaného období nedochází ke kondenzaci vodní páry. Zároveň ani při přímém porovnání obou systémů není u systému S1b s větší tloušťkou izolantu pozorováno zásadní zvýšení relativních vlhkosti během chladných období. Přesto u obou systémů dochází na rozhraní v každém zimním období k překročení 80% hranice RH. Jako izolant je přitom použita dřevovláknitá deska, a je zde tedy důvodné riziko vzniku plísní. Zatímco ale po chladném období 2015/2016 nenastalo dle vypočteného průběhu indexu růstu plísní žádné podezření, tak po chladném období 2016/2017 s nepříznivým vlhčím prostředím v interiéru hrozí již mikroskopický výskyt plísní.



U systému S2 s parozábranou v bodě I_A na rozhraní je během teplého období patrný téměř totožný průběh RH jako u difuzně otevřeného systému S1a a S1b. V chladných obdobích je pak průběh RH v bodě I_A výrazně nižší než u difuzně otevřeného systému. Tento charakter průběhu lze zřejmě přisoudit právě proměnnému difuznímu odporu „inteligentní“ parozábrany. V letním období se tak systém S2 chová podobně jako difuzně otevřený a při obrácení difuzního toku v chladném období, je zase bráněno prostupu vodní páry z interiéru na rozhraní. K překročení relativní vlhkosti nad 80 % pak dochází pouze v chladnějším období 2016/2017 s nastavenými vlhčími podmínkami v interiéru (T 24 °C; RH 60 %). Nicméně žádné riziko vzniku plísní není z vypočteného průběhu indexu růstu plísní pozorováno.

Nejpříznivější průběh relativní vlhkosti nastává na rozhraní systému S3 s vakuovými panely. Jak již bylo uvedeno ve vyhodnocení jednotlivých systémů, je to zřejmě dáno vysokou parotěsností vakuových panelů. I oproti systému S2 s „inteligentní“ parozábranou je tedy průběh RH na rozhraní V_A mnohem plošší. V letním období sice dochází k mírnějšímu poklesu na přibližně o 10 % vyšší úroveň RH než u ostatních systémů, ale v chladných obdobích vůbec nedochází k překročení hranice 80 %.

poznámka:

Podezřelé chování průběhů relativní vlhkosti v kapsách a na rozhraních zateplovacích systémů a zdiva v období léta 2016 se nápadně kryje s významnými dešťovými událostmi. Mohlo zde tedy dojít k ovlivnění průběhů RH větrem hnaným deštěm – podrobnější vyhodnocení tohoto období je uvedeno v kapitole 5 – Vliv větrem hnaného deště.



4.4 Shrnutí výsledků pozorování

Otevřené kapsy ve stropní konstrukci bez průběžného zateplení se dle očekávání ukázaly jako nejméně vhodné řešení z hlediska zajištění dobrých tepelně vlhkostních podmínek v oblasti trémových zhlaví. V chladných obdobích zde dlouhodobě nastávají relativní vlhkosti nad 80 %. V celkově chladnějším období 2016/2017 s nastaveným vlhčím prostředím v interiéru (T 24 °C; RH 60 %) zde dokonce nastává kondenzace vodní páry. Zároveň pouze u otevřených kapes vzniká dle výpočetního modelu [17] riziko vzniku plísní.

Nicméně i u otevřených kapes se vlhkostní situace jeví jako bezpečná při udržení standardních podmínek v interiéru během zimního období (T 21 °C; RH do 50 %). V tom případě nedochází k překročení 18% hranice hmotnostní vlhkosti ve zhlaví a i z hlediska vypočteného rizika vzniku plísní je situace bezpečná.

Ve stropních konstrukcích s průběžným systémem vnitřního zateplení se jako nejvíce efektivní ukázaly následující úpravy kapes s dodatečným utěsněním Airstop páskou.

- kapsa C_5 vyplněná dřevovláknitou vlnou s utěsněním Airstop páskou v úrovni zdiva (difuzně otevřený systém S1a s dřevovláknitými deskami tl. 80 mm)
- kapsa C_8 pouze utěsněná Airstop páskou v úrovni zdiva (difuzně otevřený systém S1b s dřevovláknitými deskami tl. 140 mm)
- kapsa V_1 pouze utěsněná Airstop páskou v úrovni zdiva (difuzně uzavřený systém S3 s vakuovými panely)
- kapsa V_2 utěsněná Airstop páskou v úrovni vnitřního povrchu tepelného izolantu pod omítkovou stěrkou (difuzně uzavřený systém S3 s vakuovými panely)

Ve výše uvedených kapsách došlo během hodnoceného období (před klopením fasády) pouze ke krátkodobému překročení 80% hranice RH (přibližně na 1 měsíc), a to v chladném období 2016/2017 s nastaveným vlhčím prostředím v interiéru (T 24 °C; RH 60 %). Zároveň hmotnostní vlhkost trémových zhlaví v těchto kapsách nepřesáhla po zkresleném počátečním období experimentu hodnotu 16 %.

Průběh relativních vlhkostí ve všech ostatních kapsách překračuje hranici 80 % výrazněji především ve zmíněném chladném období 2016/2017 s nepříznivými podmínkami v interiéru. Nicméně 18% hmotnostní vlhkost zhlaví zde zpravidla není překonána a nevzniká ani podezření na vznik plísní.



Vyhodnocení úprav jednotlivých trémových kapes provedené v této kapitole má vzhledem k malému počtu vzorků spíše informativní charakter a nelze na základě něho jednoznačně stanovit konkrétní závěr. I v rámci kapes se stejnou úpravou byly některé naměřené průběhy výrazně odlišné. Navíc je situace v rámci experimentu značně ulehčena použitím kvalitních pravidelných ohoblovaných „stropních trémů“ bez výsušných trhlin, uložených do kvalitně vyzděných poměrně subtilních trémových kapes. Zajištění dokonale vzduchotěsného utěsnění kolem zhlaví tak bylo poměrně jednoduché. Otázkou také je, jak moc by se situace z hlediska rizika vzniku plísní změnila v případě uvažování neohoblovaného povrchu stropních trémů do výpočtu indexu růstu plísní dle [17]

Situace na rozhraní zateplovacích systémů a zdiva

Zajímavým zjištěním bylo, že na rozhraní difuzně otevřeného kapilárně aktivního systému S1a a S1b nedošlo během celého sledovaného období ke kondenzaci vodní páry. Při nejméně příznivých vlhkostních podmínkách v chladném období 2016/2017 nastala na rozhraní maximální hodnota RH 99 %. Nicméně zde v chladných obdobích nastávají podobně jako u otevřených kapes dlouhodoběji relativní vlhkosti nad 80 %. Po chladném období 2016/2017 se simulovaným vlhčím prostředím v interiéru zde rovněž na základě vypočteného průběhu indexu růstu plísní nastává podezření na mikroskopický výskyt plísní.

V případě zbývajících dvou zateplovacích systémů S2 a S3 je překročena 80% hranice RH na rozhraní pouze krátkodobě u systému S2 s „inteligentní“ parozábranou. Vypočtený průběh indexu růstu plísní dle [17] ale žádné ohrožení neukázal.

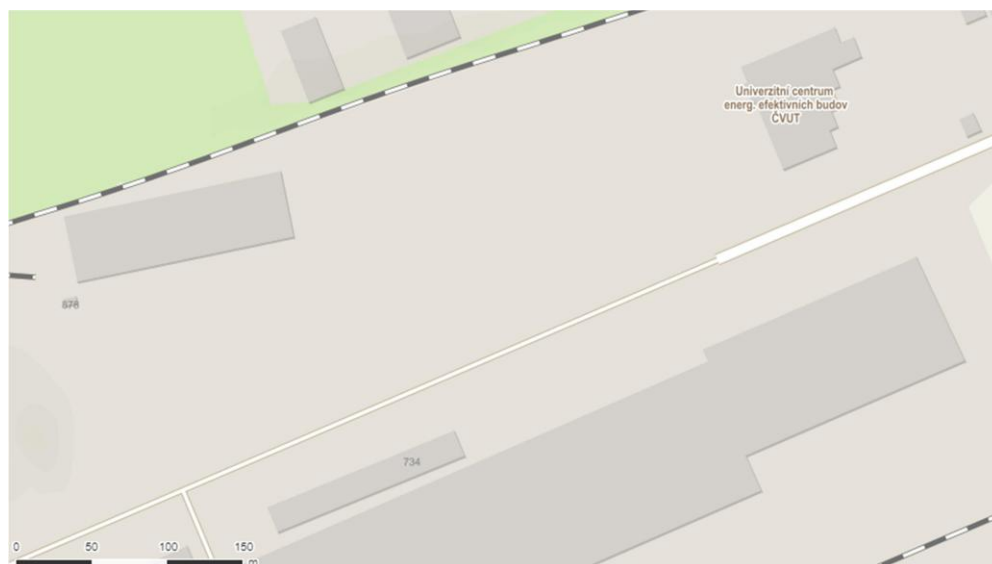


5 Vliv větrem hnaného deště

Tato kapitola se zabývá nejdříve vyčíslením větrem hnaného deště za období experimentu od počátku měření 7. 3. 2015 do 1. 10. 2017. Následně je zde vyhodnocován vliv vyčísleného větrem hnaného deště na změnu vlhkostních podmínek v jednotlivých trámových kapsách.

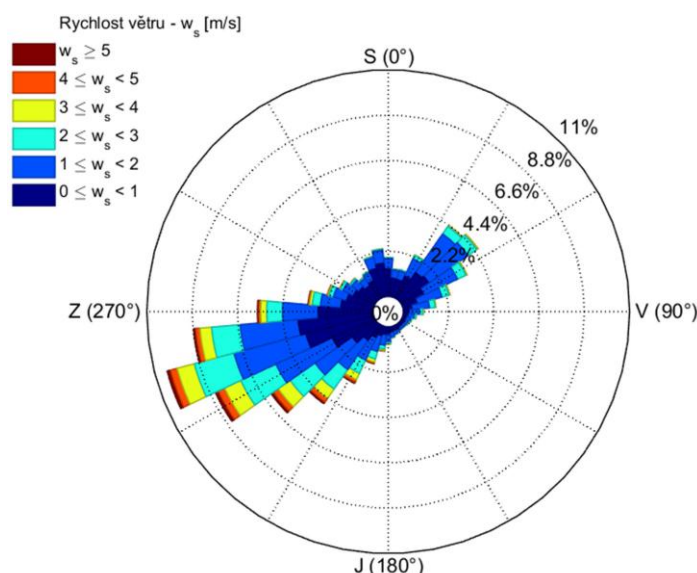
5.1 Místní situace

Testovací fasáda na UCEEBu je orientována na jihozápad. Jak již bylo uvedeno, na většině území České republiky převládá západní směr větru. Navíc místní situace zajišťuje účinné vystavení testovací fasády působení větru (viz obr. 50).



obr. 50 – Situace – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov – Buštěhrad (zdroj [18])

Z obr. 50 je patrné, že okolní průmyslové objekty, patřící ke komplexu Kladenských železáren, přispívají k nasměrování západního větru přímo na jihozápadně orientovanou testovací fasádu. Zároveň ale také chrání před případným větrem z jihu. Rozdělení větru podle působícího směru a rychlosti znázorňuje obr. 51. (jsou zde použita data z jihozápadní meteorostanice na UCEEBu za období dosavadního trvání experimentu od 7. 3. 2015 do 1. 10. 2017)



obr. 51 – Rozdělení větru podle směru působení a rychlosti

Obr. 51 potvrzuje převládající směr větru z jihozápadu a lze tak očekávat vystavení testovací fasády větrem hnanému dešti. Zároveň je zde ale patrné, že nejčastější rychlosti větru jsou poměrně nízké – do 2 m/s. Události s rychlostí větru nad 5 m/s jsou spíše vzácné.

5.2 Vyčíslení větrem hnaného deště

Větre hnaný dešť na fasádu s testovacími poli není veličina, kterou by bylo možné v rámci experimentu na UCEEBu přímo monitorovat. Aby tedy mohl být vyhodnocen vliv větrem hnaného deště na změnu vlhkostního stavu v systému vnitřního zateplení a v trámových kapsách, je nejprve nutné jeho vyčíslení. Pro stanovení větrem hnaného deště byla použita zjednodušená metoda dle Dr. Johna Straubeho [19].

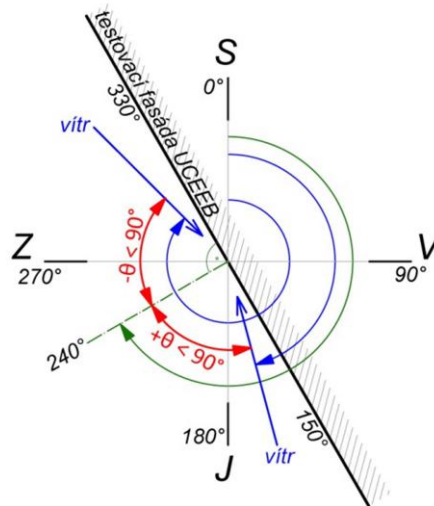
Podkladem pro výpočet větrem hnaného deště byla naměřená data z jihozápadní meteostanice na UCEEBu (umístěna cca 50 m jihozápadně od testovací fasády). Odtud bylo nutné použít následující měřené veličiny:

- intenzita srážek – vyjádřená v minutových impulsech [mm/min]
- rychlost větru [m/s]
- směr větru [°] (0° = severní vítr, 90° = východní směr větru)

Rozlišení mezi dešťovými a sněhovými srážkami bylo provedeno velmi zjednodušeně podle venkovní teploty vzduchu. Srážky při teplotě venkovního vzduchu < 1.0 °C byly označeny jako sníh a nebyly do výpočtu větrem hnaného deště dále uvažovány.



Dále byl pro množinu dat s azimutem směru větru stanoven odklon θ od normály testovací fasády (viz obr. 52). Pro výpočet větrem hnaného deště byl uvažován směr větru s odklonem od normály fasády v rozsahu $\pm 90^\circ$.



obr. 52 – Vyznačení uvažovaného odklonu směru větru θ od normály testovací fasády

Pomocí následujících vztahů podle [19] byl následně vyčíslen větrem hnaný dešť.

$$wdr = RAF \cdot DRF \cdot \cos(\theta) \cdot w_s \cdot r$$

$$DRF = 1/V_t$$

$$V_t = -0,166033 + 4,91844 \cdot \phi - 0,888016 \cdot \phi^2 + 0,54888 \cdot \phi^3$$

kde:

wdr = intenzita větrem hnaného deště [$\text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

RAF = faktor vlivu budovy [-], pro spodní část fasády budov bez přesahu střechy lze podle [19] uvažovat $RAF = 0,5$ [-]

DRF = faktor hnaného deště [-]

θ = úhel odklonu směru větru od normály fasády [rad]

w_s = průměrná rychlost větru [m/s]

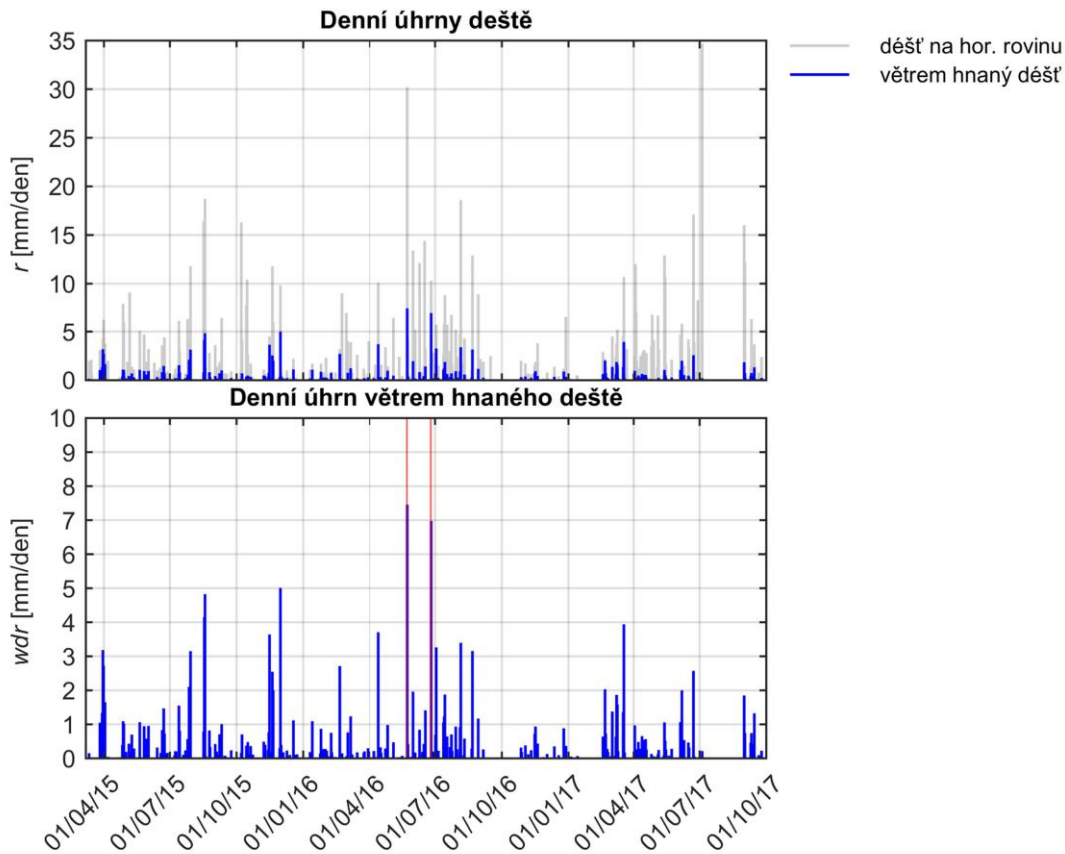
r = intenzita deště na horizontální rovinu [$\text{mm}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$]

V_t = koncová rychlost dešťové kapky v bezvětří [m/s]

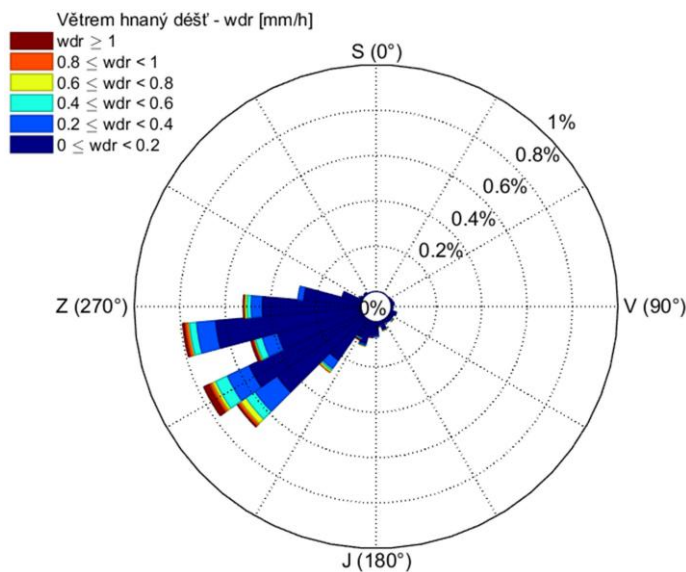
ϕ = ekvivalentní průměr dešťové kapky [mm], zjednodušeně lze uvažovat $\phi = r^{0,232}$ [mm]



Vypočtené hodnoty větrem hnaného deště jsou zobrazeny na obr. 53. Pro přehlednost je větrem hnaný déšť za dosavadní trvání experimentu vyjádřen denními úhrny a pro porovnání je zobrazen i denní úhrn deště na horizontální rovinu. Na obr. 54 je následně vidět i rozdělení větrem hnaného deště na fasádu podle jeho intenzity a působícího směru větru.



obr. 53 – Vypočtené denní úhrny větrem hnaného deště + porovnání s úhrny deště na horizontální rovinu



obr. 54 – Rozdělení větrem hnaného deště podle jeho intenzity v [mm/h] a směru větru



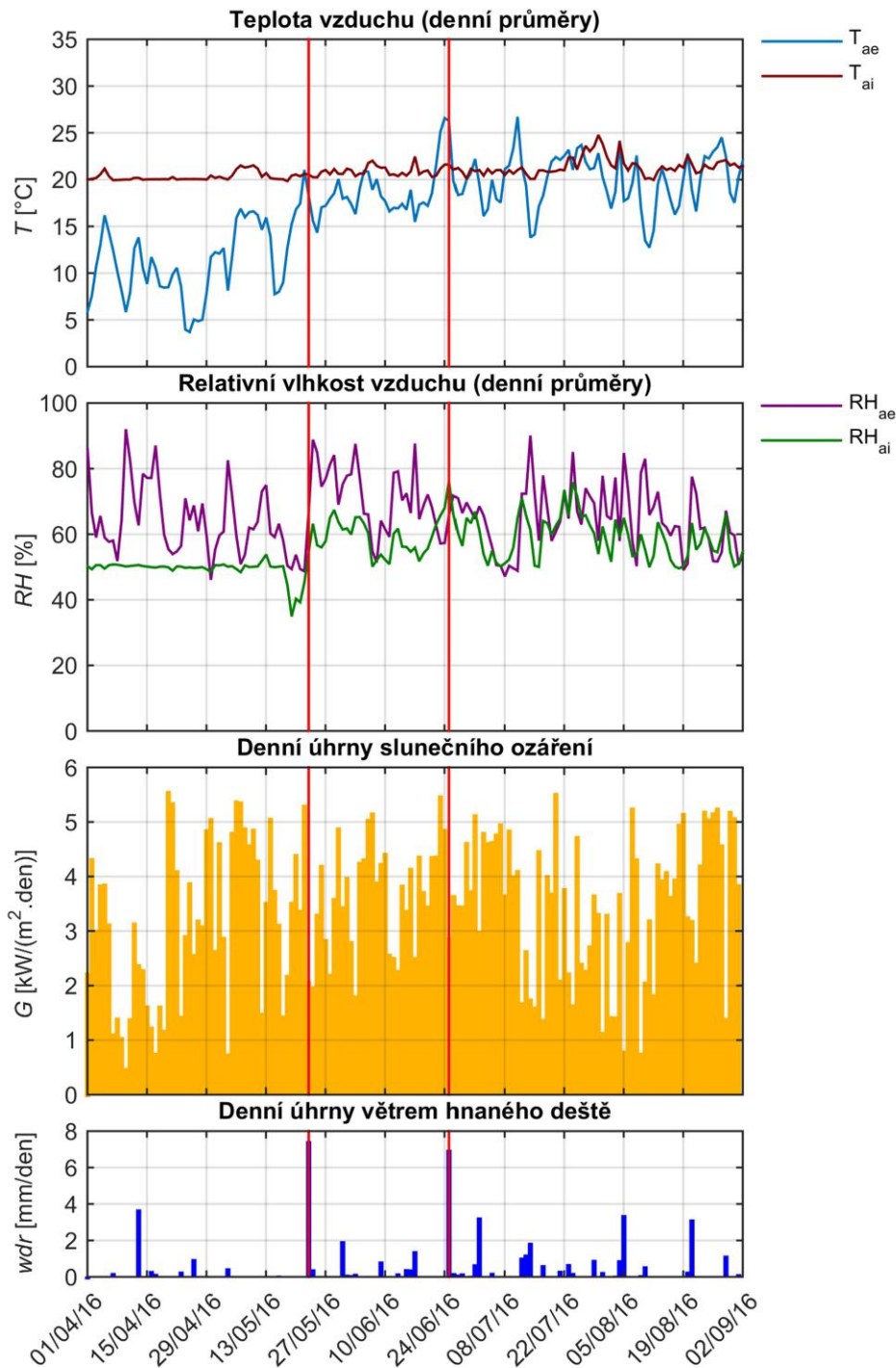
Z obr. 53 je patrné, že úhrny větrem hnaného deště jsou výrazně nižší než v případě deště dopadajícího na zem. V naprosté většině jsou denní úhrny hnaného deště pod 1 mm (lze si představit jako 1 l/m²). Na obr. 54 lze pozorovat, že hodinové úhrny hnaného deště jsou nejčastěji pod 0,4 mm. Testovací fasáda tak sice byla (dle zjednodušeného výpočtu) za období experimentu často vystavena větrem hnaným deštům, ale jednalo se spíše o zanedbatelné události. Nicméně červenými linkami jsou na obr. 53 zvýrazněny dny s nejvyšším úhrnem hnaného deště.

Prvním dnem je 23. 5. 2016 s denním úhrnem 7,5 mm (6 mm srážek tehdy na fasádu dopadlo za 40 minut). Druhým je 25. 6. 2016 s úhrnem 7 mm (na fasádu dopadlo celých 7 mm srážek za 80 minut). V obou případech se tedy jednalo o relativně intenzivní a krátkodobé vystavení fasády dešti. Jelikož se jedná o letní období, jsou tyto dešťové události vhodné pro sledování vlivu větrem hnaného deště na změnu vlhkostního stavu v trémových kapsách.



5.3 Vyhodnocení vlivu větrem hnaného deště

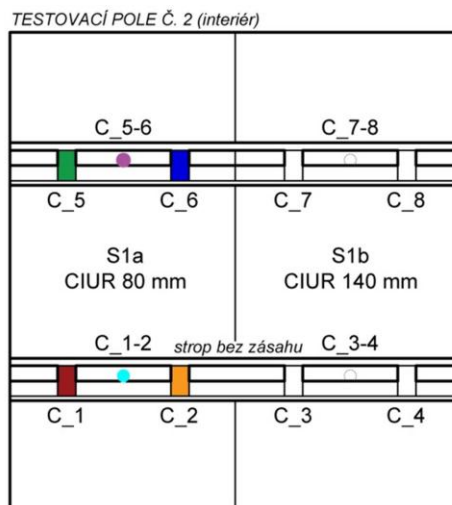
Pro vyhodnocení vlivu větrem hnaného deště jsou na obr. 55 zobrazeny i ostatní působící podmínky okolního prostředí za blízké období před a po výrazných hnaných deštích. Průběh teplot a relativních vlhkostí je zobrazen formou denních průměrných hodnot a sluneční ozáření a větrem hnaný dešť denními úhrny. Vybrané dny s největšími úhrny větrem hnaného deště (23. 5. 2016 a 25. 6. 2016) jsou vyznačeny svislou červenou čarou.



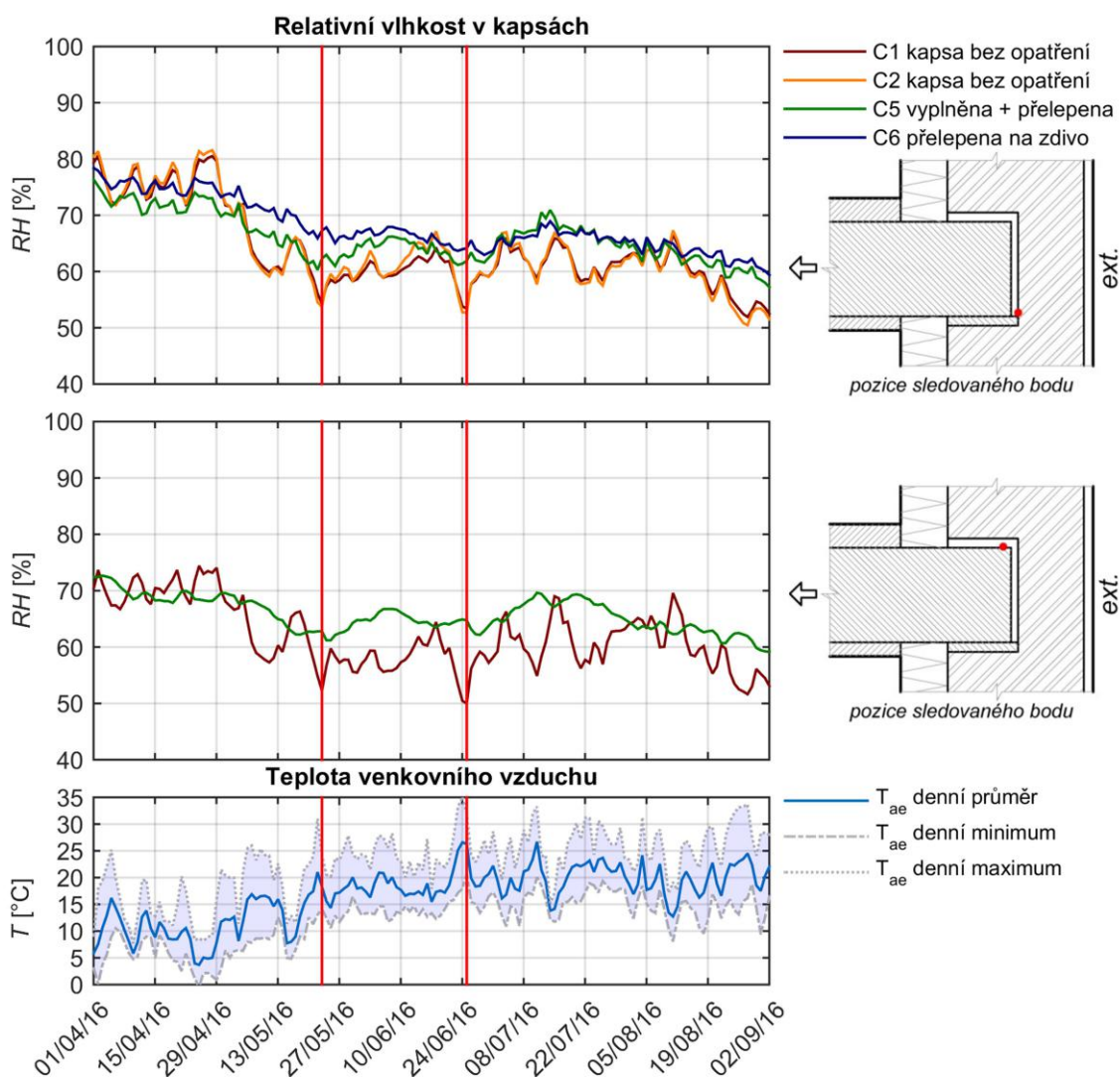
obr. 55 – Přehled okrajových podmínek pro vyhodnocení vlivu větrem hnaného deště



5.3.1 SYSTÉM S1a – CIUR 80 mm (dřevovláknité desky 80 mm)



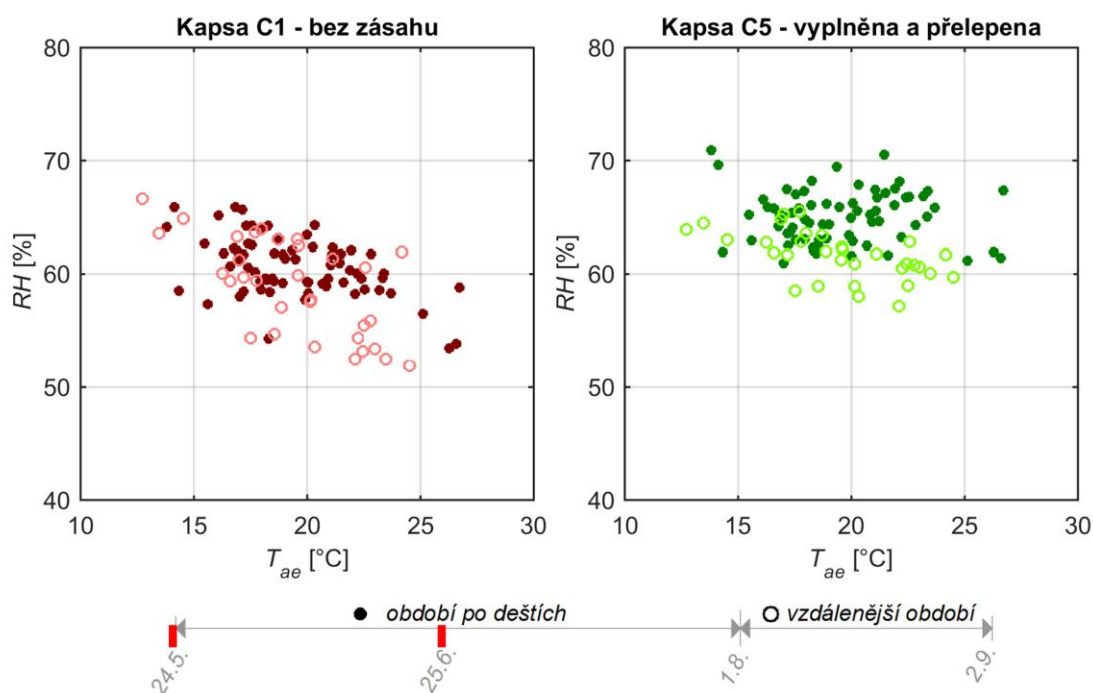
obr. 56 – Schéma test. pole č. 2 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S1a



obr. 57 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém CIUR 80 mm



Dle obr. 57 nedochází vlivem sledovaného větrem hnaného deště k jednoznačnému navýšení vlhkosti v kapsách systému S1a. Průběh relativní vlhkosti je zde pravděpodobně nejvíce ovlivněn teplotami venkovního vzduchu, jak je patrné především u kapes bez úpravy. Nicméně u utěsněných kapes C_5 a C_6 lze po dešťových událostech pozorovat mírné zvýšení relativní vlhkosti, zatímco průměrná teplota venkovního vzduchu se spíše ustálila. Na obr. 58 je tedy jednoduše porovnávána závislost RH v kapsách na teplotě venkovního vzduchu pro období po větrem hnaném dešti (23. 5 až 1. 8. 2016) a pro období, kdy opět nastává podobný klesající charakter relativní vlhkosti v kapsách jako před prvním deštěm (1. 8. až konec zde sledovaného období 2. 9. 2016).



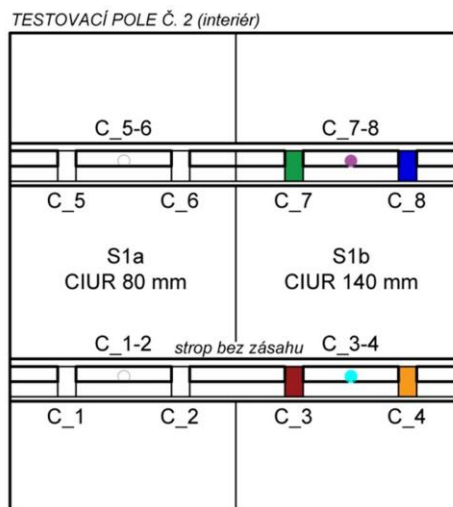
obr. 58 – Větrém hnaný dešť - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S1a) na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu

Z obr. 58 je patrné, že pro období po větrem hnaných deštích je v otevřené kapse C_1 téměř totožná závislost relativních vlhkostí na teplotě venkovního vzduchu jako pro pozdější období s podobným rozsahem teplot. Vliv větrem hnaného deště se zde tedy neprojevil. V utěsněné kapse C_5 je ale patrné mírné posunutí mračna bodů, znázorňujících RH v kapse v období po deštích, směrem vzhůru. Zvýšení RH v utěsněných kapsách tedy mohlo opravdu nastat v důsledku větrem hnaných dešťů. Navíc, to že se zvýšení projevilo především u utěsněných kapes, odpovídá předpokládanému efektu větrem hnaného deště (viz úvod).

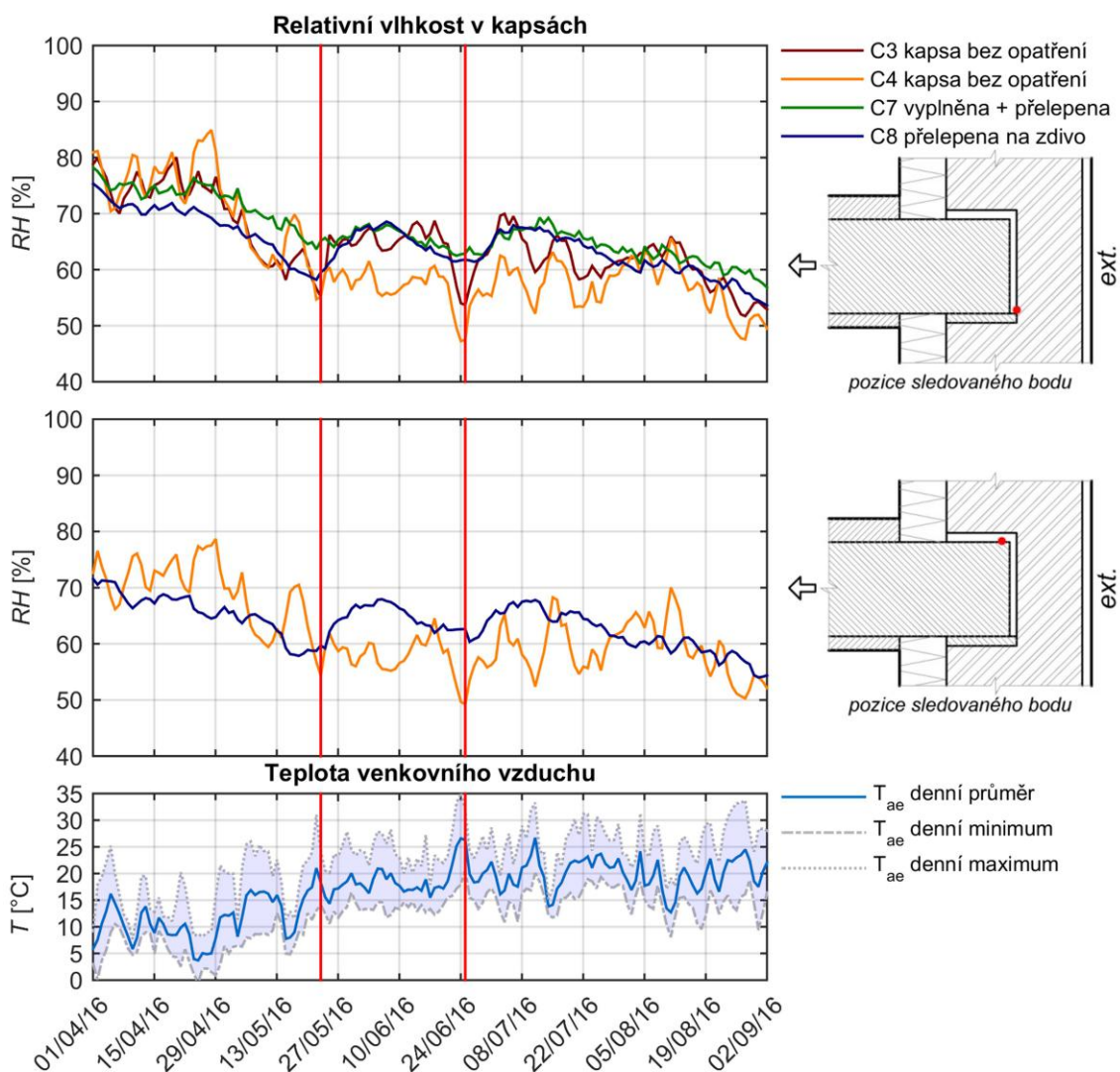
Nicméně toto zjednodušené porovnání nemusí jednoznačně značit pouze vliv hnaného deště. Odlišnost v relativních vlhkostech pro různá období z obr. 58 může být zároveň ovlivněna rozdílným charakterem průběhu venkovních teplot, rozdílnými úhrny slunečního záření, nebo například rozdílem ve vlhkosti okolního prostředí. Po dešti 23. 5. totiž výrazně na delší dobu vzrostla relativní vlhkost v exteriéru a následně i v interiéru (viz obr. 55). Vlhkost v kapsách tak mohla být zvyšována i vlivem deště, který nedopadal na fasádu – zvýšením vlhkosti venkovního vzduchu a následnou difuzí vodní páry do kapes s nižší koncentrací vodní páry.



5.3.2 SYSTÉM S1b – CIUR 140 mm (dřevovláknité desky 140 mm)



obr. 59 – Schéma test. pole č. 2 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S1b

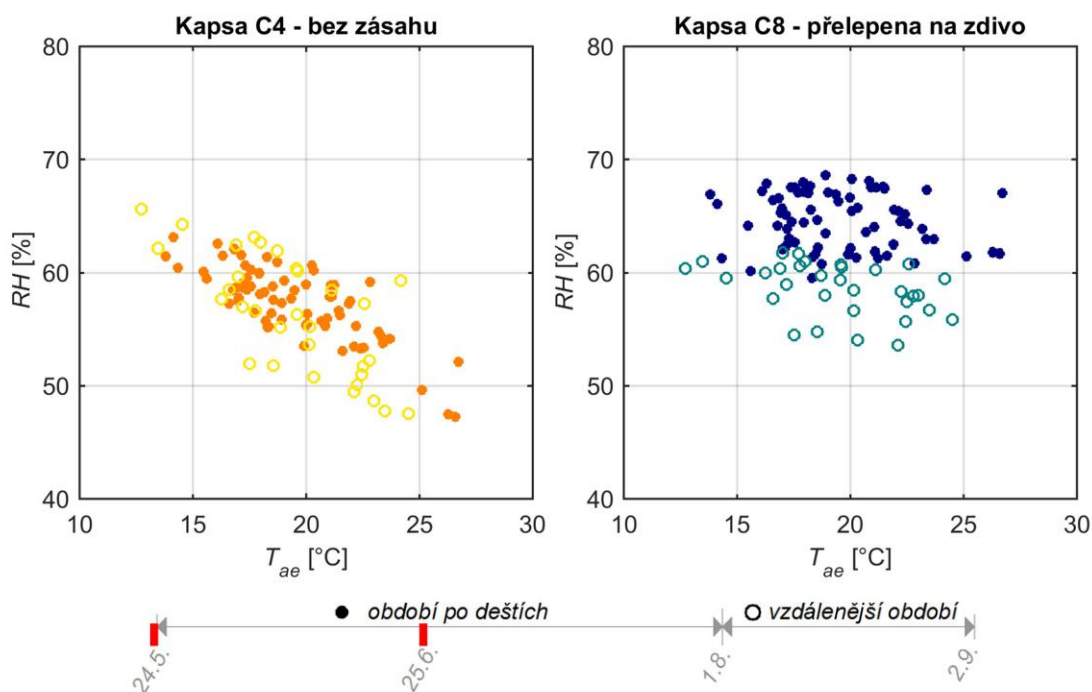


obr. 60 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém CIUR 140 mm



V případě systému S1b je dle očekávání situace velmi podobná jako v totožném systému S1a, který se liší pouze použitou tloušťkou izolantu. U utěsněných kapes C_7 a C_8 je zde, ale více patrné zvýšení RH po dešťových událostech, než tomu bylo u předchozího systému. Relativní vlhkost v otevřených kapsách C_3 a C_4 opět velmi rychle reaguje na teplotu venkovního vzduchu. Oproti předchozímu systému S1a, zde ale každá z otevřených kapes reaguje mírně odlišně na období po větrem hnaných deštích. U kapsy C_3 zde dochází k podobnému navýšení RH jako u utěsněných kapes C_7 a C_8, zatímco u druhé otevřené kapsy C_4 má průběh RH podobný charakter jako u otevřených kapes C_1 a C_2 ze systému S1a.

Odlišné průběhy RH mezi kapsou C_3 a ostatními otevřenými kapsami jsou ale patrné během celého experimentu. V kapse C_3 byla pravidelně v zimním období nižší relativní vlhkost než v ostatních otevřených kapsách. Pravděpodobně je tedy ve zdivu před kapsou C_3 nedostatečně vyplněná spára mezi cihlami, nebo je zde jiná netěsnost, kterou může v zimě vodní pára snadno prostupovat dál do exteriéru. Během větrem hnaného deště by se touto netěsností mohlo naopak dostávat do kapsy C_3 více vlhkosti, čímž by se odlišný průběh RH z obr. 60 vysvětloval.

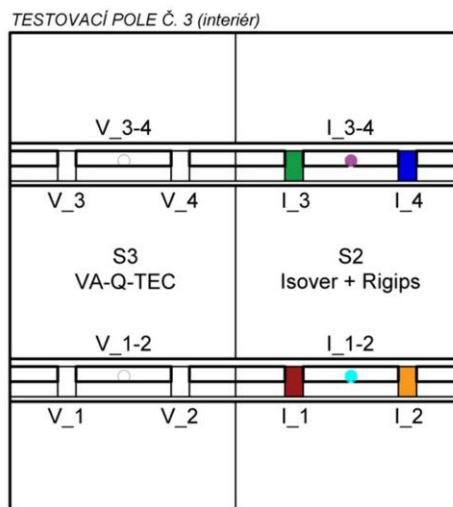


obr. 61 - Větrm hnaný dešť - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S1b) na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu

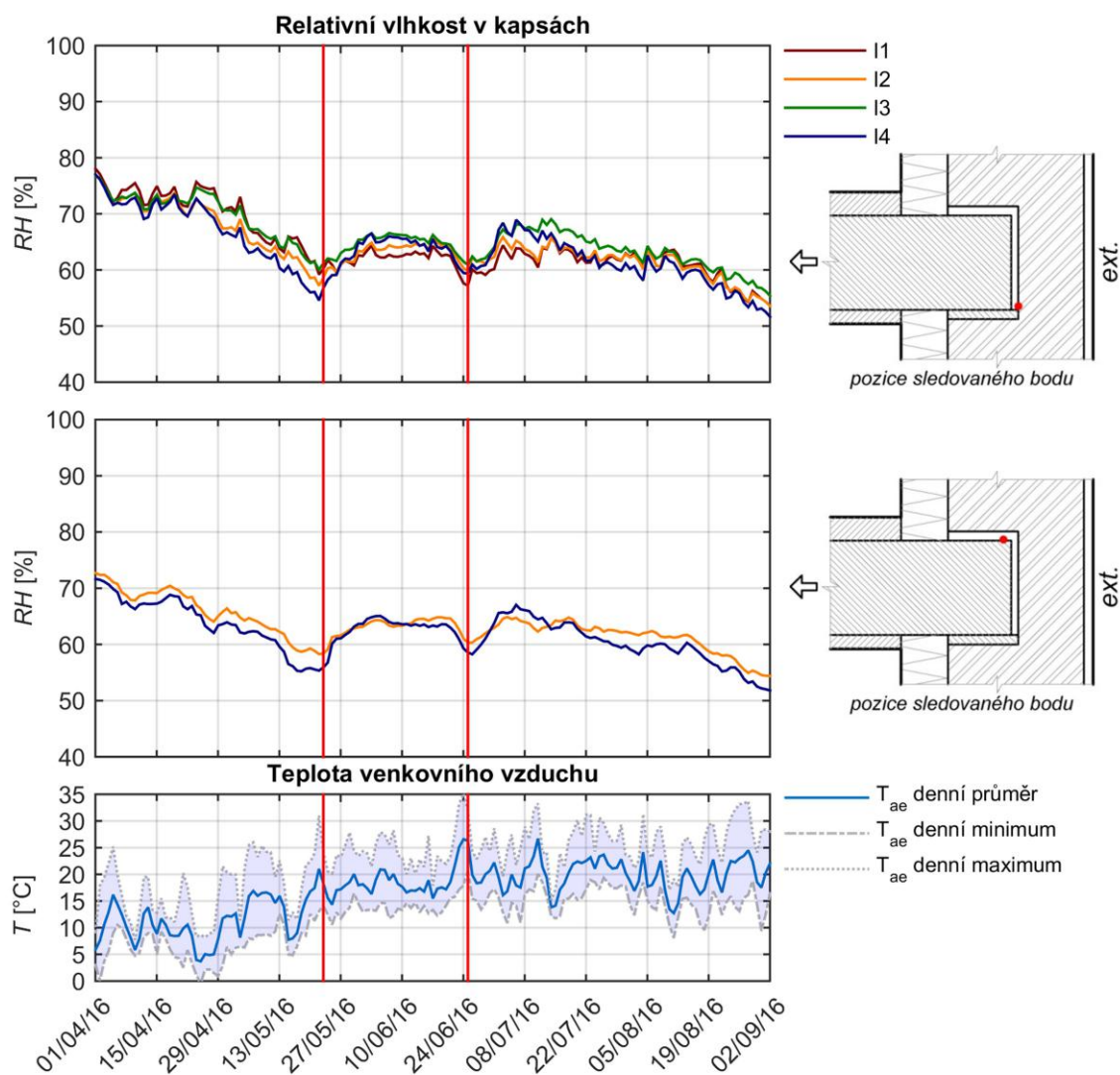
Na obr. 61 lze pozorovat, že otevřená kapsa C_4 na větrem hnané deště opravdu nereaguje a relativní vlhkost je zde ovlivněna především teplotou venkovního vzduchu podobně jako u otevřené kapsy C_1 z předchozího systému S1a. Utěsněná kapsa C_8 zareagovala tentokrát mnohem výrazněji a lze zde tedy skutečně předpokládat zvýšení relativní vlhkosti vlivem větrem hnaného deště.



5.3.3 SYSTÉM S2 - ISOVER + RIGIPS (systém s „inteligentní“ parozábranou)



obr. 62 - Schéma test. pole č. 3 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S2

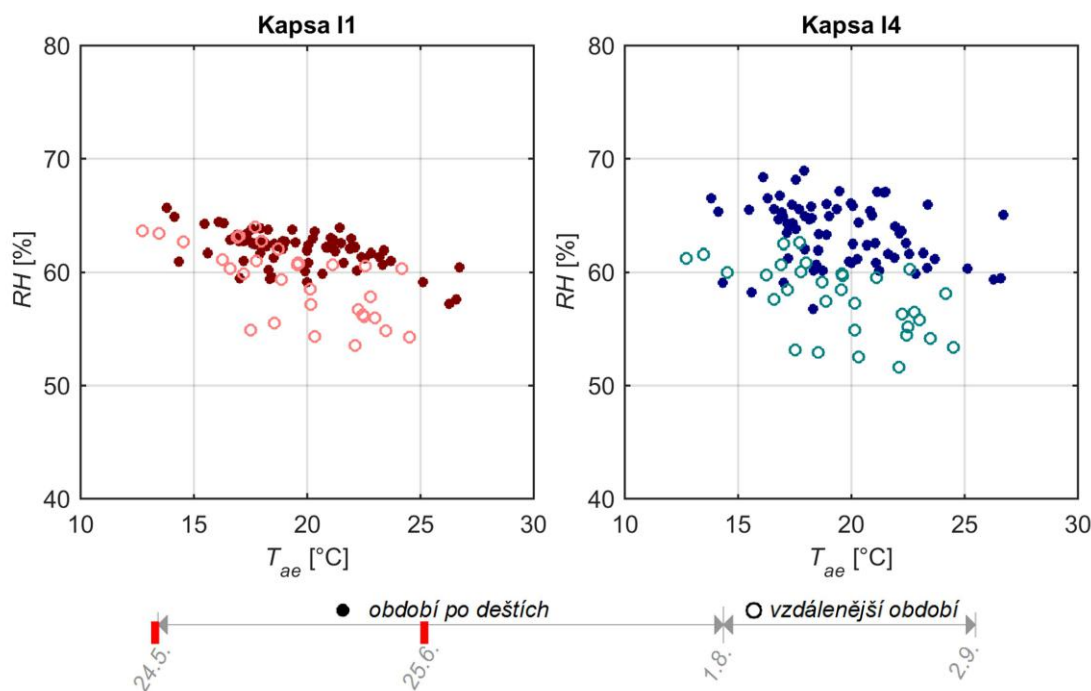


obr. 63 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém Isover + Rigips



U systému S2, kde jsou všechna 4 zhlaví trámů upravena stejným způsobem (přelepění parotěsnou páskou v úrovni parozábrany) lze dle očekávání pozorovat velmi podobné průběhy relativní vlhkosti v jednotlivých kapsách. Průběhy RH zde zároveň mají podobný charakter jako u přelepěných kapes v systému S1a a S1b.

Při podrobném porovnání průběhů relativní vlhkosti v kapsách systému S2 je vidět, že ve spodních kapsách I_1 a I_2 má průběh RH po deštích poněkud plošší průběh než u horních kapes I_3 a I_4. Je tedy možné, že větrem hnaný déšť měl větší účinek na horní polovinu testovacího pole.

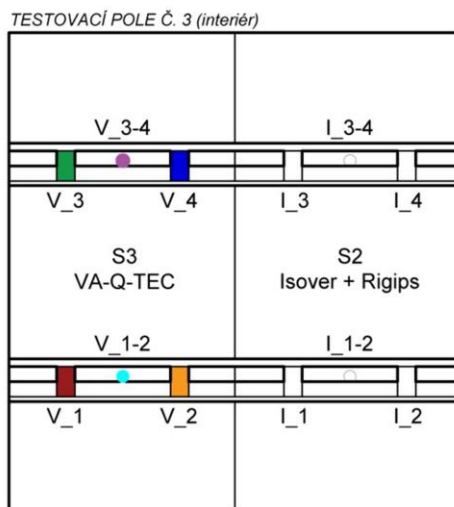


obr. 64 - Větrém hnaný déšť - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S2) na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu

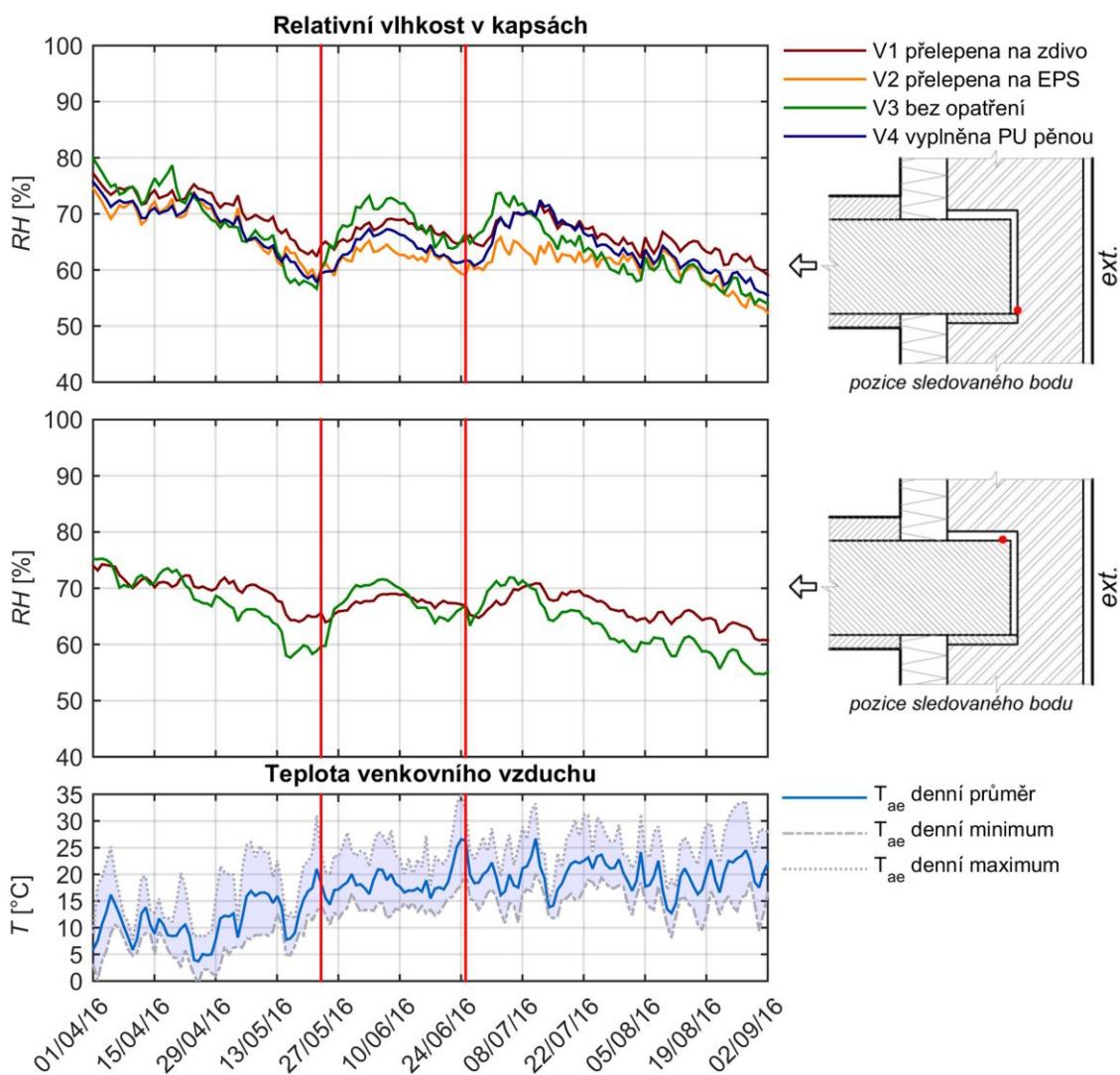
Na obr. 64 je závislost relativní vlhkosti v kapsách na teplotě venkovního vzduchu záměrně porovnána pro kapsy s nejvíce rozdílným chováním dle obr. 63. Zatímco RH ve spodní kapse I_1 zareagovala na období po větrem hnaných deštích jen mírně, tak u horní kapsy je RH tímto obdobím ovlivněna více. Otázkou tak je, zda větrem hnanému dešti nemohla ve spodní úrovni pole stínit například zaparkovaná vozidla. Ta by pak mohla následně stínit i slunečnímu záření, čímž by také mohl být omezen transport vodní páry do trámových kapes. Spodní část testovacího pole může být, ale i přirozeně vystavena menšímu vlivu větrem hnaného deště pro svou nízkou polohu nad úrovní terénu – tento vliv zohledňuje i metoda stanovení větrem hnaného deště [19]. Může se ale také jednat o přirozený rozptyl běžného chování takto upravených kapes způsobený rozdílnou kvalitou provedení.



5.3.4 SYSTÉM S3 - VA-Q-TEC (vakuové panely)



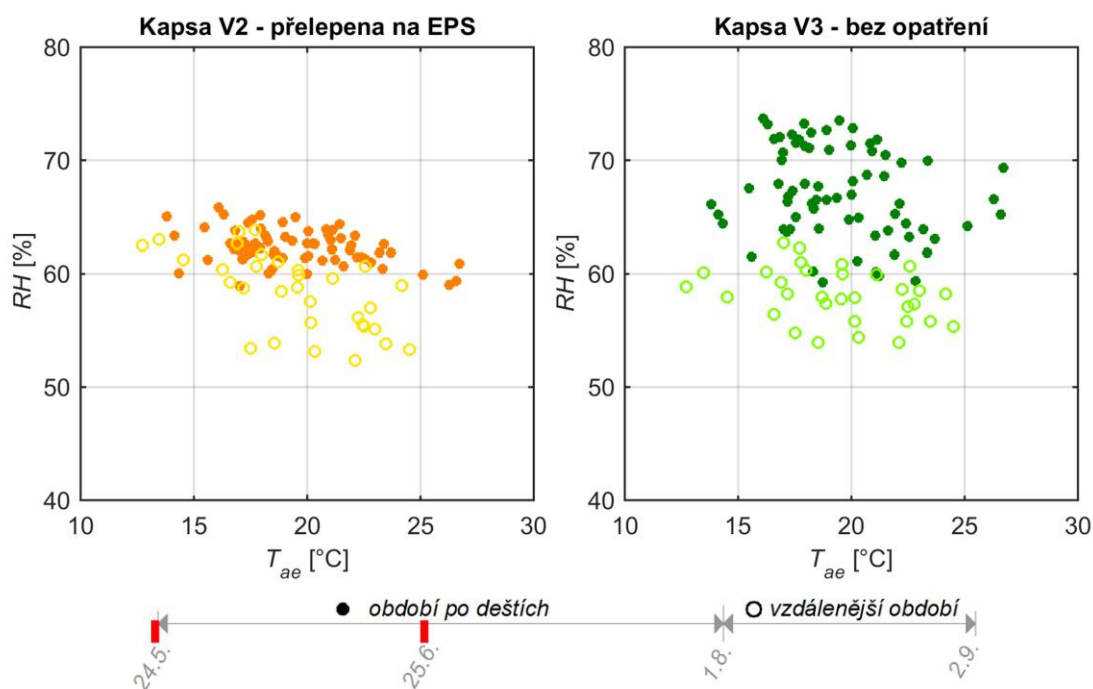
obr. 65 - Schéma test. pole č. 3 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S3



obr. 66 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém VA-Q-TEC



Průběhy relativní vlhkosti v kapsách systému S3 se chovají podobně jako u systému S2. Zřejmě vlivem rozdílných úprav kapes jsou, ale jednotlivé průběhy RH trochu více rozptýlené. Největší reakce na dešťové události nastává nečekaně u kapsy V_3 bez přelepení a u kapsy V_4 vyplněné PU pěnou. Utěsněné kapsy V_1 a V_2 mají průběhy RH po deštích výrazně plošší. Přitom by se dala očekávat spíše opačná situace, kdy v utěsněných kapsách bude RH po větrem hnaném dešti vyšší. Opět lze ovšem pozorovat, že více reagující kapsy jsou umístěny v horní polovině pole, tak jako tomu bylo v předchozím systému S2. Rozdílné chování tak nemůže být jednoznačně přisouzeno odlišným úpravám kapes.



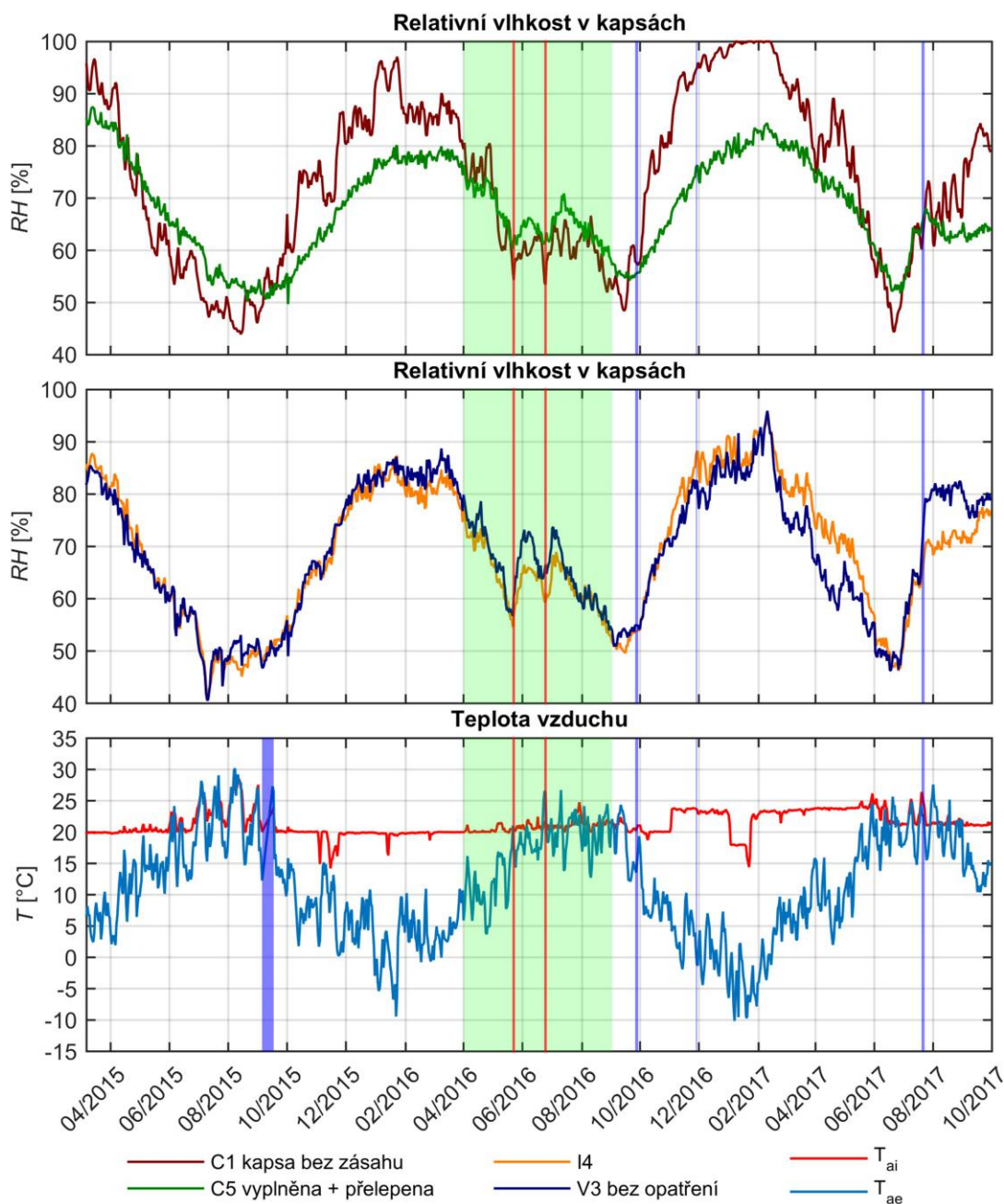
obr. 67 - Větre m hnaný dešť - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S3)
na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu

I z obr. 67 je patrné podobné chování jako u předchozího systému S2. Spodní utěsněná kapsa V_2 na období po deštích sice mírně reaguje a RH v kapse tak není ovlivněna pouze teplotou venkovního vzduchu, ale u horní neutěsněné kapsy V_3 je rozdíl v relativní vlhkosti pro dvě odlišná období mnohem výraznější. Lze se tedy domnívat, že horní kapsy byly opravdu vystavené vyšší intenzitě větrem hnaného deště než spodní.

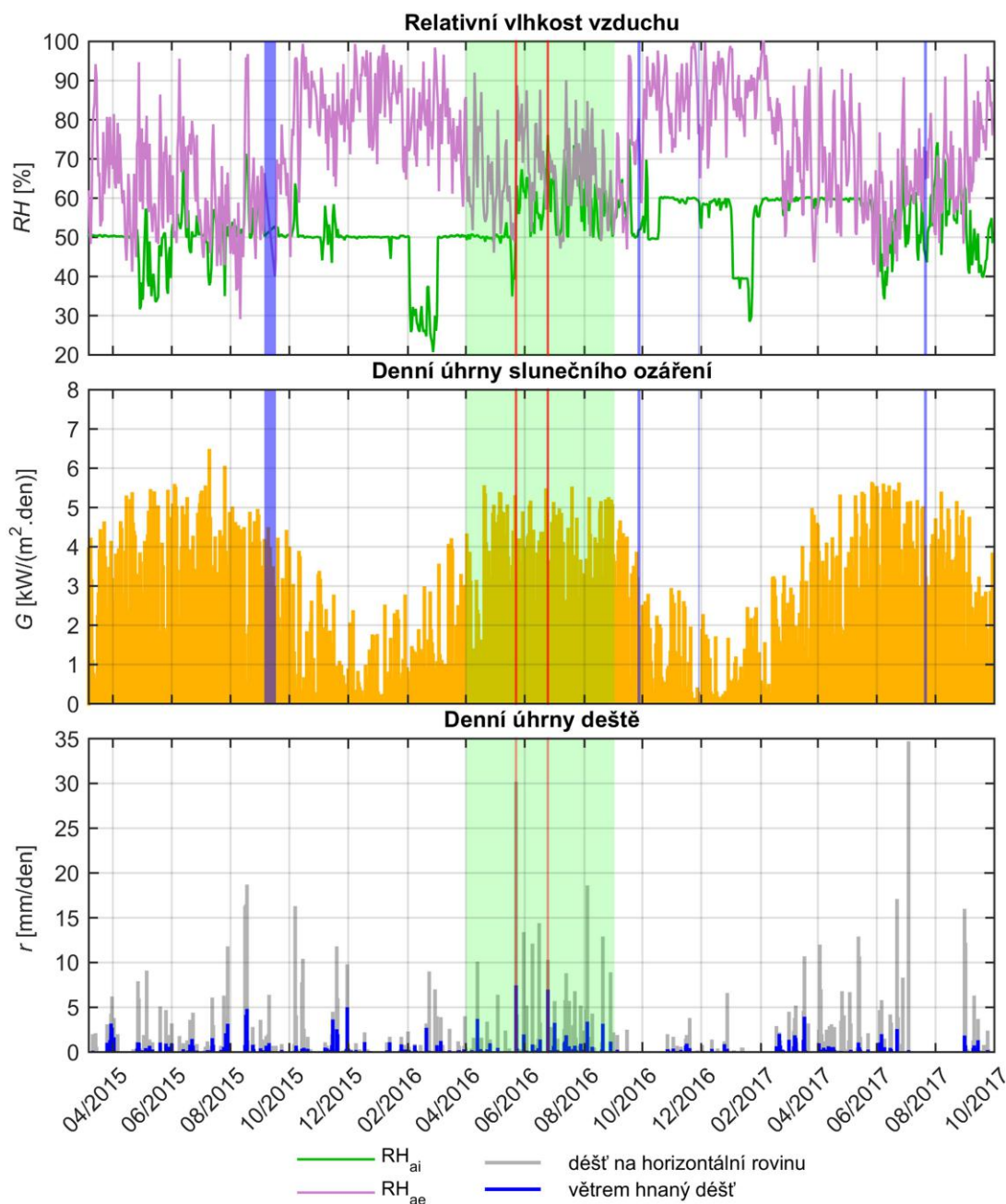


5.3.5 Porovnání sledovaného období s ostatními roky

Z předchozího zhodnocení vlivu větrem hnaného deště na trámové kapsy v jednotlivých systémech bylo dobře patrné rámcově podobné chování průběhu RH v kapsách ve sledovaném období od dubna do září 2016. Celkový dopad, ale nebyl zřejmý. Při zobrazení průběhu relativní vlhkosti ve vybraných kapsách za celé dosavadní období experimentu (viz obr. 68), je mnohem více patrný podezřelý průběh relativní vlhkosti ve sledovaném období léta 2016 (vyznačeno zelenou oblastí).



obr. 68 – Denní průměrné hodnoty RH v kapsách a denní průměrné hodnoty teploty venkovního vzduchu s vyznačením sledovaného období z hlediska vlivu větrem hnaného deště (zelená oblast), sledované dešťové události jsou vyznačeny červenými linkami, významnější výpadky měření nad 48 hodin jsou vyznačeny modrými oblastmi



obr. 69 – Denní průměrné hodnoty RH vnitřního a venkovního vzduchu + denní úhrny slunečního ozáření a denní úhrny deště s vyznačením sledovaného období z hlediska vlivu větrem hnaného deště (zelená oblast), sledované dešťové události jsou vyznačeny červenými linkami, významnější výpadky měření nad 48 hodin jsou vyznačeny modrými oblastmi

Z obr. 68 je patrné, že v období po sledovaných dešťových událostech vyznačených červenými linkami, byl pokles relativní vlhkosti v kapsách pozastaven. Zatímco začátkem léta 2015 a 2017 byla průměrná denní relativní vlhkost v kapsách okolo 50-55 %, tak po velkou část léta 2016 zůstala RH v kapsách nad 60 %. Při porovnání s průběhem teplot venkovního vzduchu, lze ale pozorovat, že léto 2015 bylo doposud nejteplejším za dosavadní dobu experimentu a navíc se jedná o první letní období po spuštění experimentu. Toto období je tedy pro srovnání nevhodné. V roce 2017 zase nastalo teplé období velmi brzy – již v polovině května. Oproti těmto rokům bylo léto 2016 mírnější jak z hlediska výše průměrných teplot venkovního vzduchu, tak z hlediska délky období s průměrnou denní teplotou venkovního



vzduchu nad 20 °C. Navíc na obr. 69 je patrné, že relativní vlhkost venkovního vzduchu se během léta 2016 drží celkově na vyšších hodnotách než v létě 2015 a 2017. Vyšší relativní vlhkost pak nastává i v interiéru. Zastavení poklesu RH v jednotlivých kapsách v létě 2016 tedy zřejmě nezavinil jen konkrétně větrem hnaný déšť, ale spíše vliv celkově více deštivého a tím pádem i chladnějšího a vlhčího léta. Průběh RH v otevřené kapse C_1 z obr. 58, který se dle porovnání na str. 84 ukázal jako neovlivněný větrem hnaným deštěm, lze tedy přibližně považovat za průběh, který by nastal i při nezasazení testovací fasády deštěm. Nicméně vlivu sledovaných větrem hnaných dešťů lze pravděpodobně přisoudit vznikající špičky v průběhu RH ostatních neotevřených kapes, jak již naznačovaly i bodové grafy závislosti RH v kapse na teplotě venkovního vzduchu v předchozím zhodnocení. Jak je patrné z obr. 68 jsou tato lokální navýšení relativní vlhkosti v rozsahu do 15 %. Podstatné ovšem je, že relativní vlhkost v kapsách nepřesáhla po sledovaných dešťových událostech hodnotu 80 %. Navíc v druhé polovině léta, došlo k dostatečnému snížení relativní vlhkosti v kapsách na úroveň přibližně 55 % a před obdobím s výrazným ochlazením tak nezůstala v kapsách zvýšená vlhkost. To že v následujícím zimním období byla v kapsách vyšší relativní vlhkost než v předchozích letech, lze s největší pravděpodobností přisoudit především méně příznivým podmínkám v interiéru (vyšší teplota a RH). Zároveň byla zima 2016 / 2017 chladnější než v předešlém roce.

poznámka:

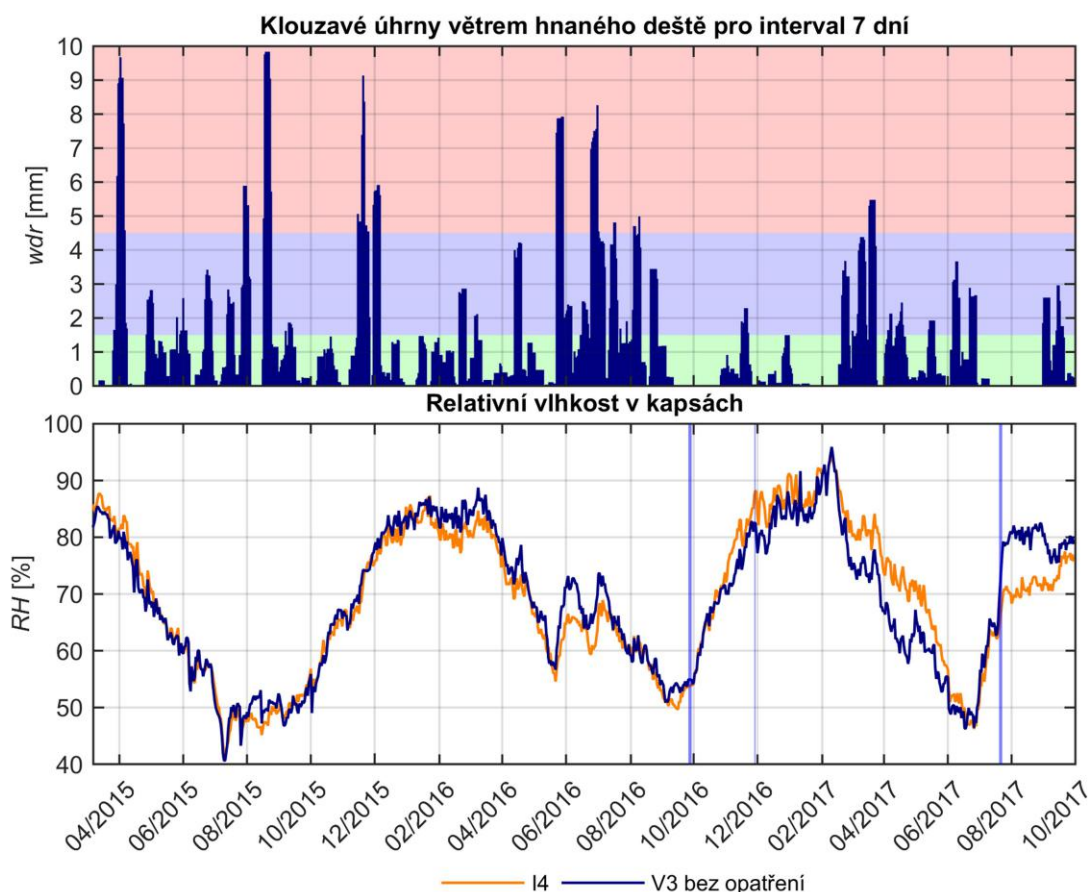
Zajímavý skok v průběhu relativních vlhkostí nastává na začátku července 2017, kdy během letního období za krátkou dobu vzroste RH v kapsách přibližně o 15 % (je myšleno období ještě před 19. 7. 2017, kdy proběhlo umělé skrápění fasády – viz kapitola 6 – Krátkodobý kropící experiment, pro lepší orientaci na obr. 68 - 20. 7. nastal výpadek označený modrou úzkou oblastí). Tím, že jsou zde okrajové podmínky dobře přehledné, můžeme pravděpodobně tuto náhlou změnu průběhu RH v kapsách přisoudit kombinaci více vlivů. Lze pozorovat, že koncem června a začátkem července nastaly vyšší úhrny běžného deště. Denní úhrn 35 mm srážek ze 4. 7. 2017 byl navíc prozatím nejvyšším za dosavadní období experimentu. Zároveň na konci června došlo k mírnému poklesu úhrnů slunečního ozáření a poklesla i teplota venkovního vzduchu. V exteriéru v tomto období vzrostla relativní vlhkost vzduchu, což se propsalo i do RH interiérového vzduchu. Zřejmě tomu přispěla i změna tepelně vlhkostního stavu v interiéru, kdy na začátku června došlo k odstavení vlhčení, a byla snížena i požadovaná teplota vzduchu. Prudce pak v interiéru poklesla koncentrace vodní páry, zatímco v exteriéru narůstala. Došlo tak zřejmě k výraznému obratu difuzního toku vodní páry. Všechny tyto změny jsou pravděpodobně vzájemně propojeny a celkově způsobily výraznější navýšení relativní vlhkosti v trémových kapsách.



5.3.6 Vyhodnocení vlivu větrem hnaného deště dle jeho týdenních úhrnů

Doposud byl pozorován pouze vliv dvou nejvýraznějších událostí větrem hnaného deště zvolených na základě maximálních denních úhrnů. Oba tyto deště zajistily relativně intenzivní skrápění fasády, ale pouze po krátkou dobu (40 a 80 minut). Nicméně i tak se u utěsněných kapes projevilo zvýšení relativní vlhkosti. Vliv méně intenzivních, ale za to dlouhodobějších a častěji se vyskytujících událostí větrem hnaného deště zde prozatím nebyl zkoumán. Pro zajímavost je tedy v následující části zjišťováno, zda se během experimentu projevuje i závislost relativních vlhkostí v kapse na úhrnech větrem hnaného deště za delší časový úsek například jednoho týdne.

Na obr. 70 jsou zobrazeny úhrny větrem hnaného deště, stanovené pro každý jednotlivý den sumou úhrnů za předcházejících 7 dní (klouzavý součet). Pro snadné pozorování případného vlivu klouzavých úhrnů na RH v kapsách je zde zobrazen i průběh relativní vlhkosti v kapsách I_4 a V_3, které dle zhodnocení v předešlých částech práce reagovaly na dešťové události nejvíce.



obr. 70 – Klouzavé týdenní úhrny větrem hnaného deště + odpovídající průběh RH v kapsách I_4 a V_3



Z obr. 70 je patrné, že ani týdenní klouzavé úhrny nepřevyšují výrazně úhrny denní (viz str. 80). Maximálním denním úhrnem bylo 7,5 mm ze dne 23. 5. 2016. Pro týdenní klouzavé úhrny je maximum v srpnu 2015 pouze necelých 10 mm srážek. Během dosavadního trvání experimentu tedy patrně nenastal týden, kdy by byla fasáda testovacích polí vystavena delší dobu větrem hnanému dešti, nebo kdy se během týdne vyskytovalo více intenzivnějších větrem hnaných dešťů. Ve zmíněném maximu v srpnu 2015 není při porovnání s průběhem RH v kapsách pozorováno žádné výrazné ovlivnění. Nejvíce průkaznými tak opět zřejmě zůstávají hnané deště z 23. 5. a 25. 6. 2016, které svou intenzitou zřejmě opravdu ovlivnily průběh RH ve většině kapes. Další případné ovlivnění průběhu RH je také patrné v březnu a koncem dubna 2017, z obr. 68 je ale zřejmé, že se spíše jedná o vliv změny teplot venkovního vzduchu (ta ovšem může být ovlivněna deštivým počasím).

Pro obecnější vyhodnocení míry vlivu větrem hnaného deště jsou klouzavé týdenní úhrny rozděleny podle velikosti do třech charakteristických úrovní, které jsou na obr. 70 odlišeny barevnými oblastmi.

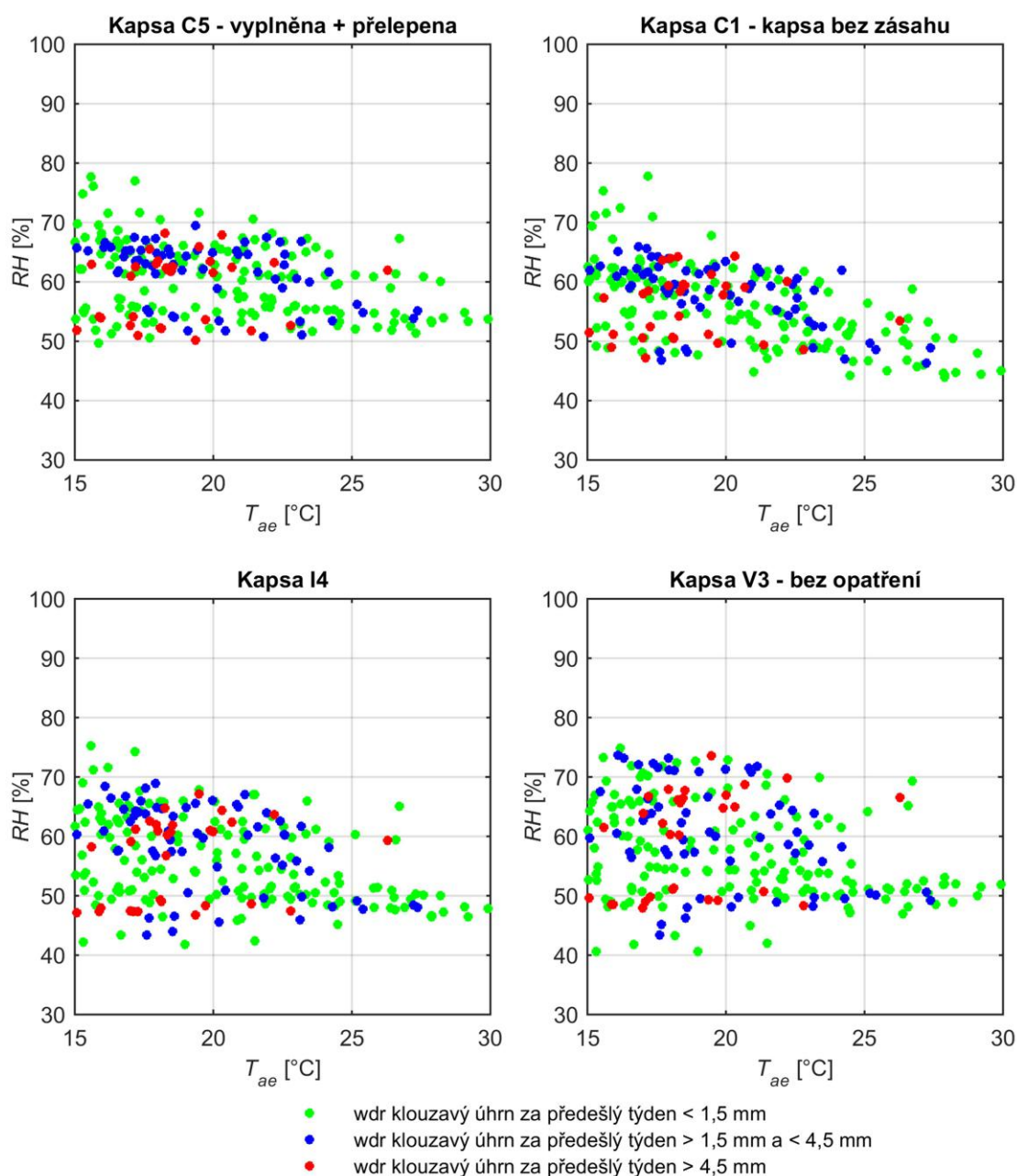
1. úroveň jsou úhrny $< 1,5$ mm (zelená oblast),
2. úroveň jsou úhrny $> 1,5$ mm a $< 4,5$ mm (modrá oblast),
3. úroveň jsou úhrny $> 4,5$ mm (červená oblast),

Průměrné denní relativní vlhkosti v kapsách jsou následně přiřazeny k příslušným hodnotám klouzavých úhrnů a podle velikosti úhrnů jsou rozřazeny do jednotlivých úrovní. Následně jsou RH v kapsách v příslušných barevně odlišených úrovních vyneseny v závislosti na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu (viz obr. 71). Pro toto porovnání jsou použita pouze data do 31. 10. 2016. V listopadu 2016 totiž byly pro interiér nastaveny přísnější tepelně vlhkostní podmínky, které by výsledky mohly značně zkreslit. V létě 2017 pak proběhl kropící experiment, který by výsledky ovlivnil určitě. Aby výstup nebyl ovlivněn lokálním zvýšením venkovních teplot v zimním období, je rozsah průměrných denních teplot zdola omezen hodnotou 15 °C.

Z obr. 71 lze ovšem pozorovat, že u žádné z vybraných kapes nenastává pevná závislost změny RH na velikosti klouzavých týdenních úhrnu větrem hnaného deště. Nicméně je zde patrný značný rozptyl hodnot relativní vlhkosti pro totožné hodnoty teplot venkovního vzduchu. Tento rozptyl je vyšší u kapes I_4 a V_3. Přitom dle celkového charakteru průběhů RH v kapsách by se dal očekávat přirozeně větší rozptyl spíše u otevřených kapes, například právě u zde zobrazené kapsy C_1. Větší rozsah RH u kapes I_4 a V_3 tak zřejmě odpovídá vlivu nejintenzivnějších hnaných dešťů z 23. 5. a 25. 6. 2016. Na tyto dvě události totiž v předchozím zhodnocení reagovaly kapsy I_4 a V_3 nejvíce, zatímco u otevřených kapes se vliv spíše neprojevil. Tomu odpovídá i skutečnost, že většina červených bodů (které pravděpodobně přísluší těmto událostem) leží v rozptylu RH u kapes I_4 a V_3 v horní části. Jelikož pak vliv těchto hnaných dešťů ovlivnil RH v kapsách na delší dobu než 7 dní, jsou v této horní části i body další barvy, což je celkově slabina tohoto způsobu vyhodnocení. Zároveň, jak již bylo uvedeno, léto 2015 bylo teplejší a RH v kapsách byla obecně nižší a léto 2016 bylo celkově



mírnější. Lze tak předpokládat, že dobře patrná nižší úroveň RH (přibližně od 40 do 55 %) na zobrazených grafech představuje léto 2015 a výše posunuté mračno bodů zase mírnější léto 2016 s vlivem dvou nejintenzivnějších větrem hnaných dešťů. Vliv míry týdenních úhrnů se zřejmě neprojevil proto, že i nejvyšší z nich jsou složeny z převážně nevýznamných událostí větrem hnaných dešťů a v součtu se pak blíží úhrnům denním nebo dokonce v porovnání s událostmi 23. 5. a 25. 6 2016 i hodinovým úhrnům. Rozdělení a vyhodnocení vlivu větrem hnaného deště dle jeho týdenních úhrnů, tak zde ztrácí význam a v grafech na obr. 71 se neprojevuje.



obr. 71 – Závislost denní průměrné RH v kapsách na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu s barevným rozlišením dle příslušných klouzavých týdenních úhrnů větrem hnaného deště



5.4 Shrnutí výsledků pozorování

Vliv reálného větrem hnaného deště za dosavadní období experimentu na UCEEBu se dle předchozího vyhodnocení výrazněji projevil pouze v případě dvou nejintenzivnějších krátkodobých událostí z 23. 5. a 25. 6. 2016. Otevřené kapsy ve stropní konstrukci bez zásahu se jeví jako nejméně ovlivněné. Výjimku představuje otevřená kapsa C_3, u které vzniká podezření na zvýšení vlhkosti vlivem pravděpodobné netěsnosti ve zdivu před čelem kapsy. Ostatní kapsy zareagovaly na tyto větrem hnané deště velmi podobně bez jednoznačného vlivu různých úprav kapes, a to zvýšením RH v rozsahu 5 až 15 %. Vypozorovaným předpokladem pro toto tvrzení ale je, že výchozí pozice RH v kapsách (přibližně 60 %) je v tomto období celkově vyšší vlivem mírnějších teplot na jaře a v létě 2016. Zároveň se jednalo o celkově vlhčí léto než v roce 2015 a 2017.

Zajímavým zjištěním bylo, že kapsy v systému S2 (Isover + Rigips), kde jsou všechny 4 kapsy upraveny stejným způsobem (přelepením okolo trámu v úrovni parozábrany) reagovaly mírně odlišně v závislosti na tom, zda se jedná o horní kapsy nebo spodní. Horní kapsy I_3 a I_4 totiž reagovaly výrazněji. Tento jev následně nastal i u systému S3 (vakuové panely). Zde jsou sice různé úpravy kapes, ale horní kapsy bez dodatečného utěsnění, reagovaly paradoxně trochu více než řádně utěsněné spodní kapsy. Je tedy možné, že na horní část testovacích polí měl větrem hnaný déšť vyšší účinek.

Důležité je, že ani vlivem zmíněných nejintenzivnějších událostí větrem hnaného deště nedošlo ke zvýšení relativní vlhkosti v kapsách nad úroveň 80 %. Během druhé poloviny léta 2016 pak navíc došlo k výraznému poklesu RH v kapsách na hodnotu cca 55 %.

Události větrem hnaného deště z 23. 5. a 25. 6. sice jsou nejintenzivnějšími za období experimentu, ale stále se nejedná o výraznější vystavení testovací fasády hnanému dešti. Na základě zjednodušeného výpočtu dle [19] dopadlo při intenzivnější události ze dne 23. 5. 2016 na plochu testovací fasády přibližně 6 mm srážek (z celkového denního úhrnu 7,5 mm) za 40 minut. To si lze představit jako průměrně 0,15 l/(m².min). Pro představu, zda na fasádu mohl během experimentu působit větrem hnaný déšť o větší intenzitě, bylo sledováno období 4. 7. 2017, kdy došlo k nejintenzivnějšímu dešti na horizontální rovinu. V maximu zde byl úhrn 15,9 mm/min. Jednalo se ale o velmi krátkou událost trvající přibližně 5 minut a i rychlost větru byla zanedbatelná (průměrně 0,3 m/s). Nedošlo tak téměř k žádnému zasažení fasády deštěm. Nicméně tento úhrn nám může posloužit jako referenční hodnota pro velmi intenzivní déšť, který může skutečně nastat. Pokud bychom tedy do výpočtu větrem hnaného deště dle [19] uvažovali s touto intenzitou deště na horizontální rovinu 15,9 mm/min, směrem větru kolmo na testovací fasádu (240°) a velmi častou rychlostí větru 1,5 m/s, tak vychází intenzita větrem hnaného deště 1,88 mm/min. To odpovídá hodnotě 1,88 l/(m².min). Oproti průměrné intenzitě větrem hnaného deště z 23. 5. 2016 se tak jedná o 12,5 x větší hodnotu.

Lze tedy předpokládat, že i takto výrazná událost větrem hnaného deště může ve skutečnosti nastat. Pro vyhodnocení vlivu podobných situací na změnu vlhkostního stavu v trámových kapsách a v systému vnitřního zateplení bylo 19. 7. 2017 uskutečněno umělé kropení testovacích polí (viz následující kapitola 6 – Krátkodobý kropící experiment).



6 Krátkodobý kropící experiment

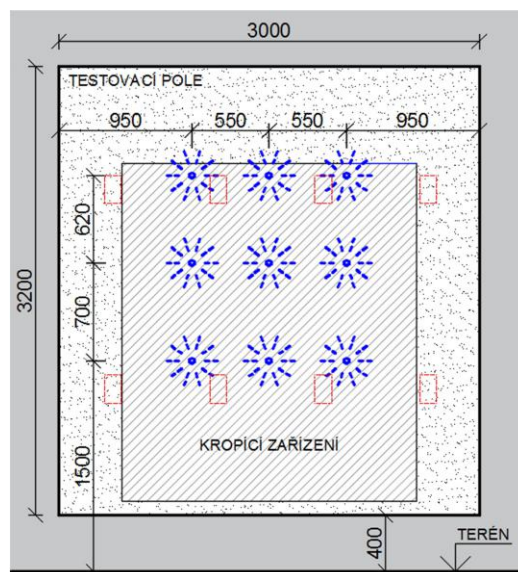
Na testovacích polích č. 2 a č. 3 experimentální fasády UCEEB byl dne 19. 7. 2017 proveden skrápěcí experiment. Cílem bylo nasimulovat silný letní déšť unášený větrem na povrch testovacích polí a následně zjistit míru vlivu tohoto „deště“ na vlhkostní podmínky v trámových kapsách. Dle předpovědi počasí byl záměrně zvolen termín experimentu, po kterém mělo bezprostředně nastat teplé slunečné období. Zvýšením parciálního tlaku vodní páry v zamokřené části zdivu vlivem dopadajícího slunečního záření, měl být zajištěn transport vlhkosti do interiéru nejen kapilárními silami, ale i difuzí. Pokud by následně monitoring trámových zhlaví (především u případů, kde je trámová kapsa parotěsně přelepena) ukázal výrazné zvýšení relativní vlhkosti, bylo by prokázáno, že vliv větrem hnaného deště může být nezanedbatelný.

6.1 Popis experimentu

Pro skrápění bylo použito zařízení vypůjčené z klimatické dvojkomory (obr. 72). Reflektory nebyly pro experiment potřebné, a pro ochranu před vodou byly zakryty střešní fólií. Skrápěcí stěna obsahuje 9 nízkotlakých trysek, které byly použity pro simulaci deště. Dalších 16 vysokotlakých trysek pro tvorbu vodní mlhy nebylo použito. Pomocí vysokozdvížného vozíku bylo kropící zařízení přistaveno nejdříve k testovacímu poli č. 3 a vyzvednuto do potřebné výšky. Poloha skrápěcího zařízení a aktivních trysek vůči testovacímu poli viz obr. 73.



obr. 72 – Kropící zařízení



obr. 73 – Umístění kropicího zařízení a poloha trysek vůči testovacímu poli

Na přítok vody byl osazen lopatkový vodoměr s možností impulzního měření viz obr. 74 vlevo. Množství vytryskané vody bylo v průběhu experimentu zaznamenáváno impulzním měřičem a pro kontrolu byl prováděn i ruční odečet z vodoměru. Voda odtékající z plochy fasády byla zachycena sběrným žlabem osazeným pod okapnicí testovacího pole a byla svedena do sběrné nádoby (obr. 74 vpravo). Z nádoby bylo odčerpáváno vždy cca konstantní množství vody (10 litrů), které v nádobě vymezovaly dvě rysky. Proměnné časy jednotlivých cyklů byly ručně zapisovány, aby následně mohla být vynesena přibližná křivka odtoku. Ztráty vody odkapáváním z trysek, a dopadem vody mimo testovací pole byly v průběhu experimentu pozorovány a stanoveny na cca 8% z celkového množství přitékající vody.

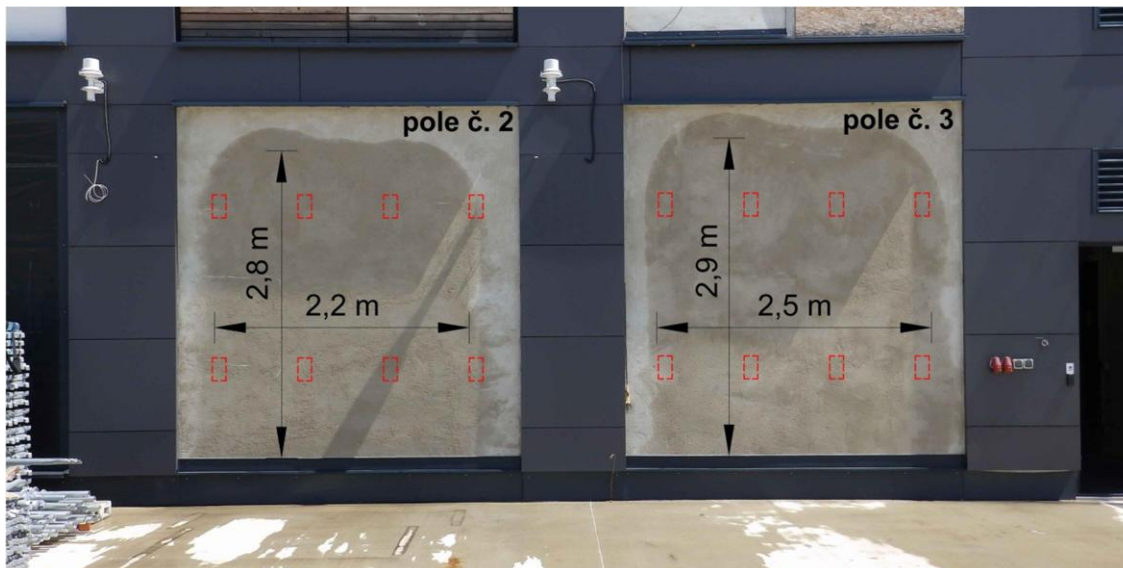


obr. 74 – Osazení vodoměru s impulzním výstupem na přívodu vody (vlevo), opatření pro zachycení odtékající vody z testovacího pole (vpravo)

Obě testovací pole byla obdobným způsobem skrápěna po dobu 40 minut. Měření odtoku probíhalo, dokud z testovacího pole stékala voda - cca 2 minuty po uzavření přívodu vody. Experiment probíhal v dopoledních hodinách a jihozápadní fasáda tedy byla po celou dobu kropení zastíněna. Nedošlo tak k nežádoucímu rychlému odparu vody z povrchu testovacích polí do exteriéru.



Jelikož trysky skrápěcího zařízení byly soustředěny spíše proti střední části testovacích polí, nebylo dosaženo celoplošného skropení. Po obvodě testovacího pole zůstal suchý pruh. Efektivně skropená plocha je vyznačena na obr. 75.



obr. 75 – Účinně skropená plocha testovacího pole

Naměřené hodnoty

Průměrný průtok přiváděné vody byl v případě testovacího pole č. 3 (napravo) cca 13 l/min. Testovací pole č. 2 (vlevo) bylo skrápěno s o něco menší intenzitou, průměrný průtok činil 12 l/min. Pro názornost jsou v tabulce 4 shrnuty základní výstupy z kropení fasády.

Tabulka 4 – Základní údaje a výstupy kropícího experimentu

Pole č.	Přítok celkem ⁽¹⁾ [l]	Přítok celkem ⁽²⁾ [l]	Odtok celkem [l]	Ztráty (8%) [l]	Zachycené množství vody [l]
2	471	471	352	38	81
3	521	516	375	41	100

(1) množství přivedené vody dle ručního odečtu na vodoměru

(2) množství přivedené vody dle impulzního výstupu – tato hodnota použita pro další výpočty

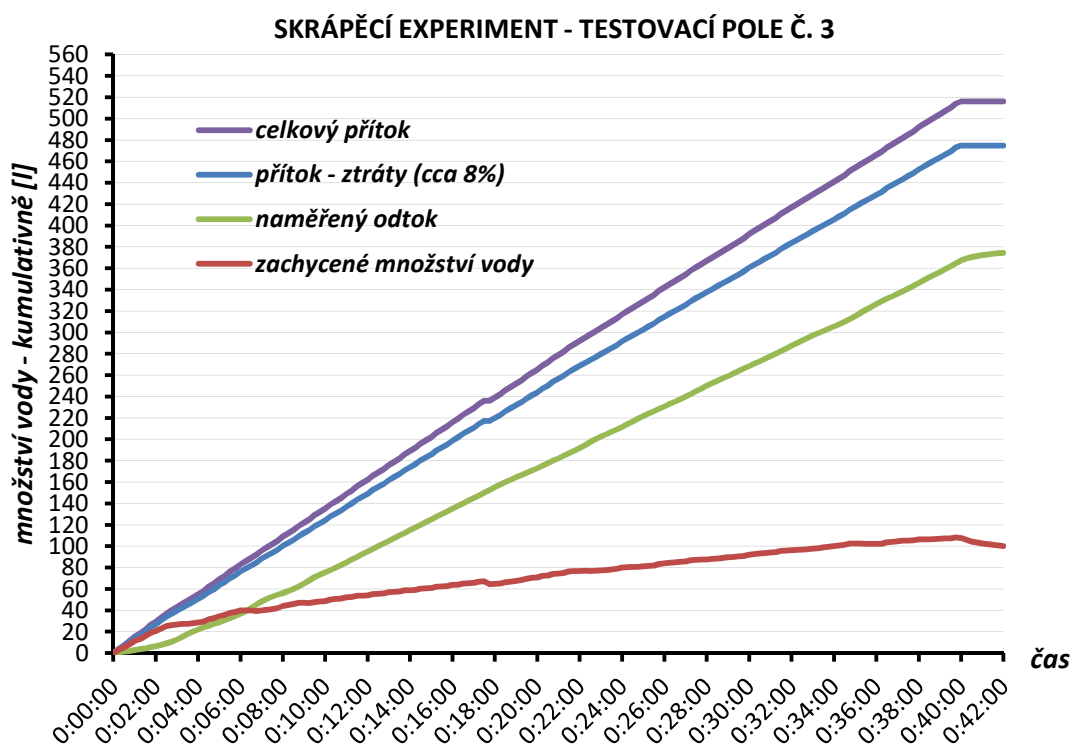
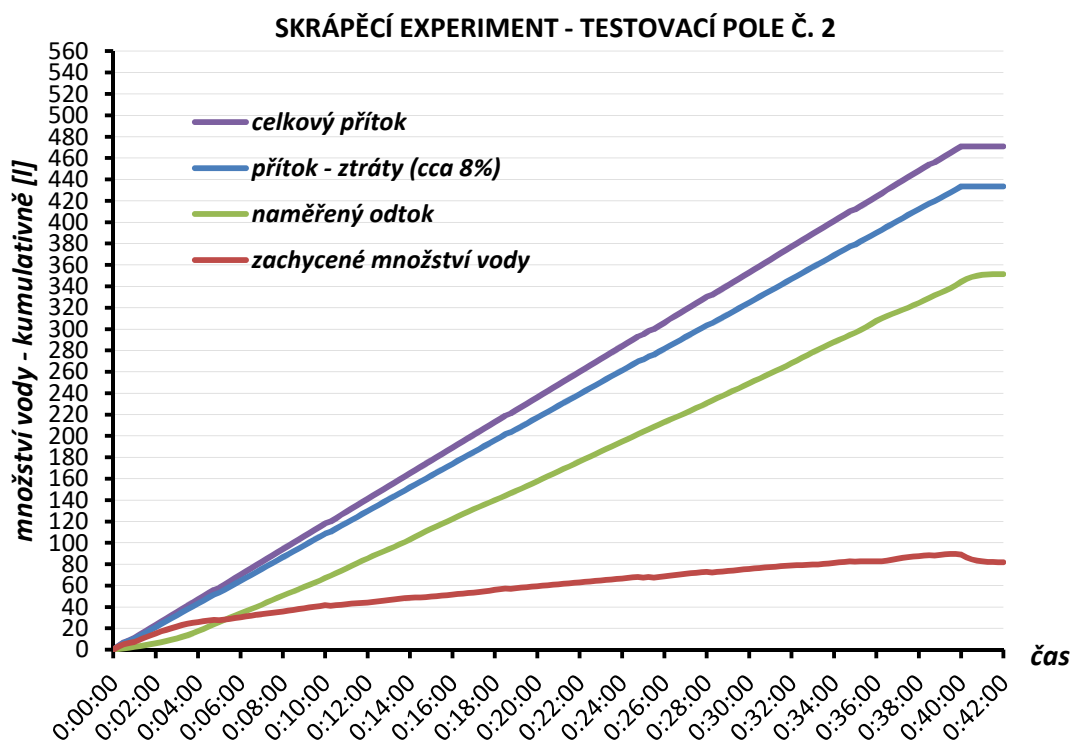
Pole č.	Doba kropení [min]	Ø průtok na přívodu vody [l/min]	Efektivně skrápěná plocha [m ²]	Ø množství vody dopadající na fasádu ⁽³⁾ [l/(m ² .min)]	Ø množství vody zachycené na fasádě ⁽⁴⁾ [l/(m ² .min)]
2	40	11,8	6,2	1,75	0,33
3	40	12,9	7,3	1,63	0,34

(3) průměrné množství vody dopadající pouze na fasádu – ztráty jsou již započítány (vlivem vyššího průtoku se zvýšil rozptyl trysek a tím i skrápěná plocha – paradoxně je pak pro vyšší průtok nižší průměrné množství vody dopadající na 1 m², zároveň je tím ale u pole č. 3 způsoben poměrově nižší odtok z povrchu a zachycené množství je tak vyšší

(4) průměrné množství vody vsakující se do fasády



Naměřená data z průběhu kroupení jsou znázorněna pomocí grafů na obr. 76.



obr. 76 – Naměřená data z průběhu kroupení testovacích polí



Stav po kropení

Po 40 minutovém skrápění fasád testovacích polí bylo ve stěnách zachyceno průměrně $13,4 \text{ l/m}^2$ vody. Bezprostředně po kropení byla fasáda stále zastíněna a nedocházelo tak k výraznému odparu do exteriéru. Přibližným odhadem pórovitosti vnější omítky a cihelného zdiva lze tedy orientačně stanovit tloušťku zamokřené části stěny.

Předpokládám, že vrstva omítky bude zcela zamokřena. Uložené množství vody uvádí tabulka 5.

Tabulka 5 – Odhad množství vody zachycené v omítce

Vrstva	Pórovitost ⁽¹⁾ [%]	Teor. kapacita pro vodu ⁽²⁾ [kg/m^3]	Tloušťka vrstvy [m]	Zachycené množství vody [l/m^2]
Omítka	24	240	0,02	4,8

⁽¹⁾ pórovitost odvozená z objemové hmotnosti dle [20] (uvažována spodní hranice pórovitosti pro zohlednění vlivu uzavřených pórů)

⁽²⁾ pro zjednodušení je uvažováno se zaplněním veškerých pórů vodou (hustota 1000 kg/m^3)

V omítce je uloženo $4,8 \text{ l/m}^2$ vody. Na zdivo zbývá $13,4 - 4,8 = 8,6 \text{ l/m}^2$ vody. Stanovení zamokřené části cihelného zdiva uvádí tabulka 6.

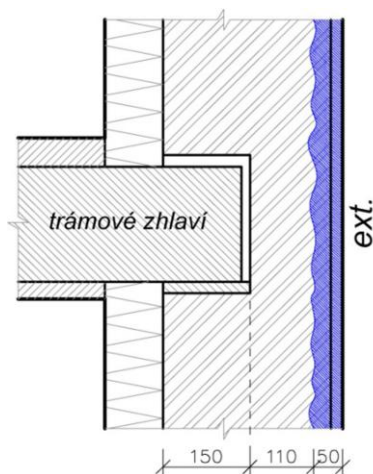
Tabulka 6 - Odhad tloušťky zamokřené části cihelného zdiva

Vrstva	Pórovitost ⁽¹⁾ [%]	Teor. kapacita pro vodu ⁽²⁾ [kg/m^3]	Zachycené množství vody [l/m^2]	Tloušťka vrstvy [m]
Cihla plná	30	300	8,6	0,029

⁽¹⁾ pórovitost odvozená z objemové hmotnosti dle [20] (uvažována spodní hranice pórovitosti pro zohlednění vlivu uzavřených pórů)

⁽²⁾ pro zjednodušení je uvažováno se zaplněním veškerých pórů vodou (hustota 1000 kg/m^3)

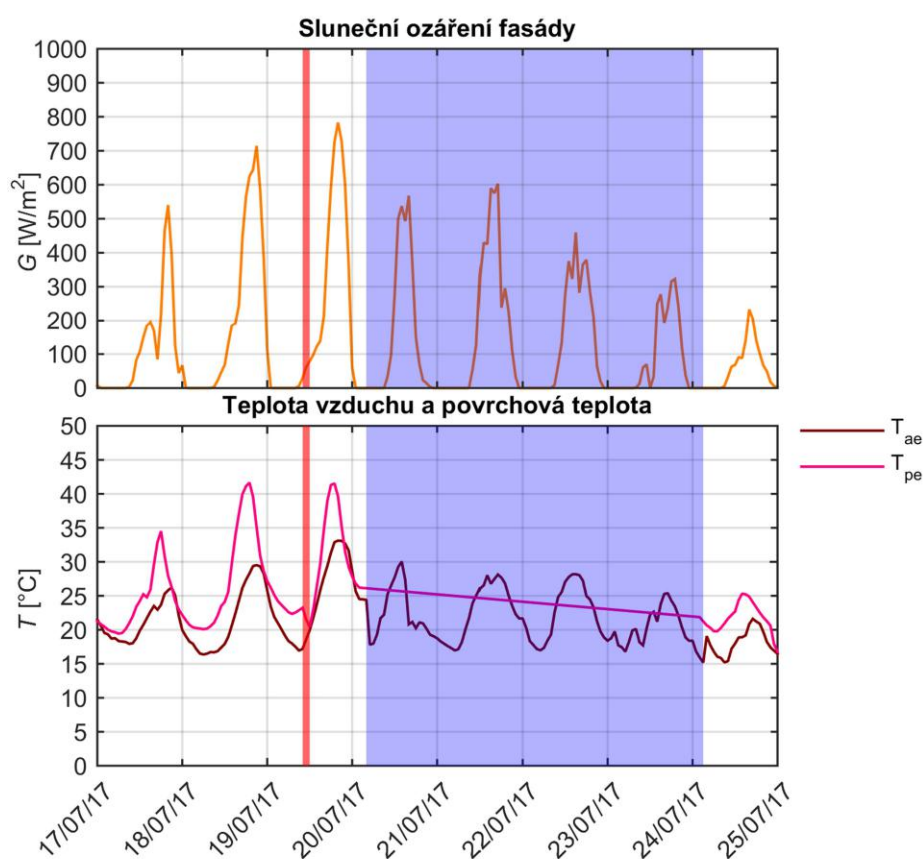
Cihelné zdivo je po kropení zamokřeno přibližně do hloubky 3 cm → celková zamokřená část stěny včetně omítky je tedy cca 5 cm viz (obr. 77).



obr. 77 – Zamokřená část stěny po skončení kropení



Podmínky působící na zkropená testovací pole jsou patrné z obr. 78. Doba kropení je vyznačena červenou oblastí. Bezprostředně po kropení fasády došlo k oslunění testovacích polí. Dále je patrné, že zbytek dne byl teplý a slunečný. Intenzita slunečního ozáření fasády dosahovala v maximu téměř 800 W/m^2 a „povrchová teplota“ naměřená čidlem ve vnější omítce vystoupala nad $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Bohužel v dalších dnech nastal výpadek měření (od 20. 7. 2017 5:00 do 24. 7. 2017 3:00 – vyznačeno modrou oblastí). Exteriérové podmínky jsou zde doplněny daty z jihozápadní meteostanice na UCEEBu. Data z čidel v interiéru a zabudovaných v testovacích polích mohla být pouze interpolována.

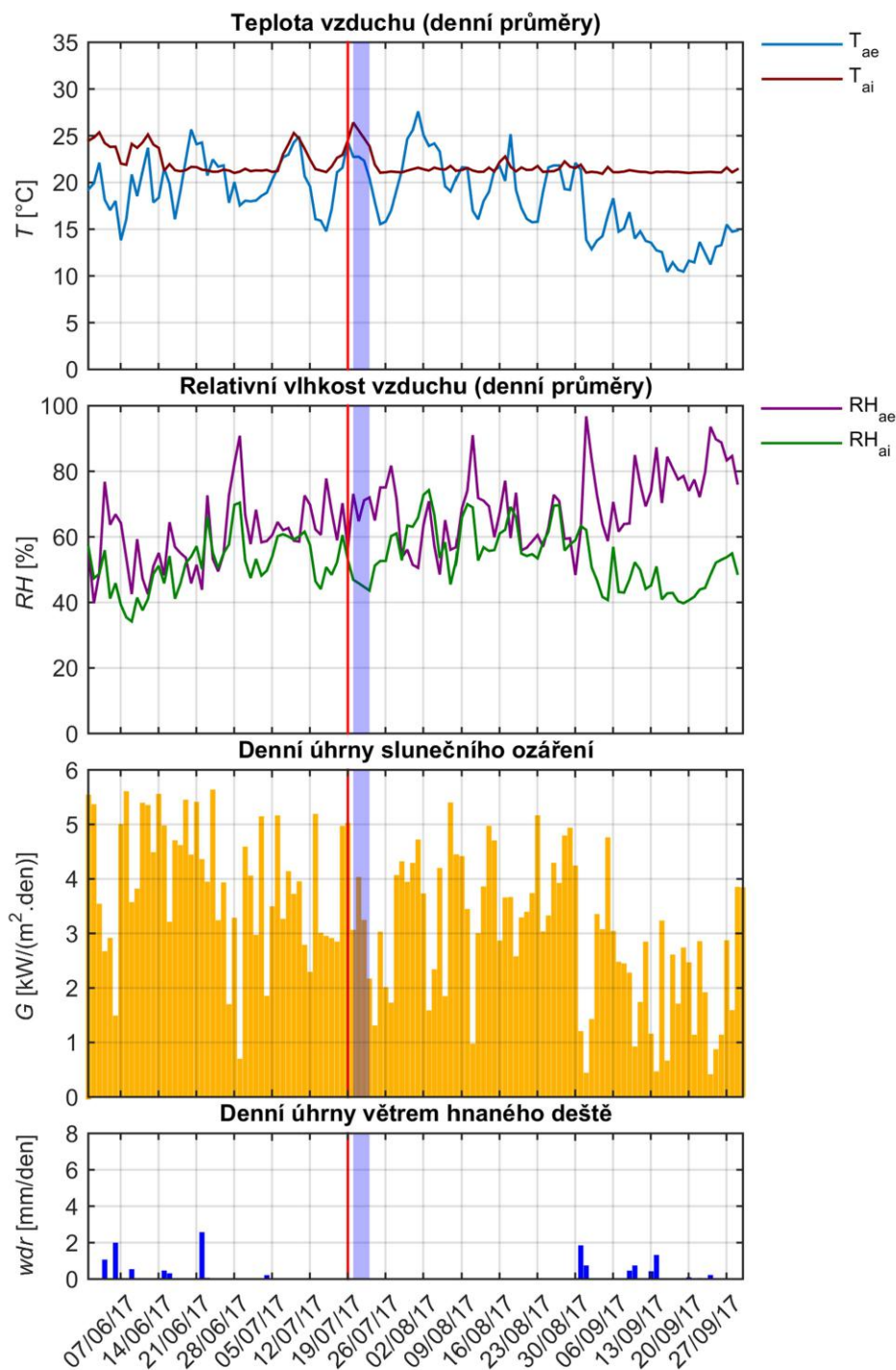


obr. 78 – Okrajové podmínky působící na skropená testovací pole (hodinová data)



6.2 Vyhodnocení experimentu

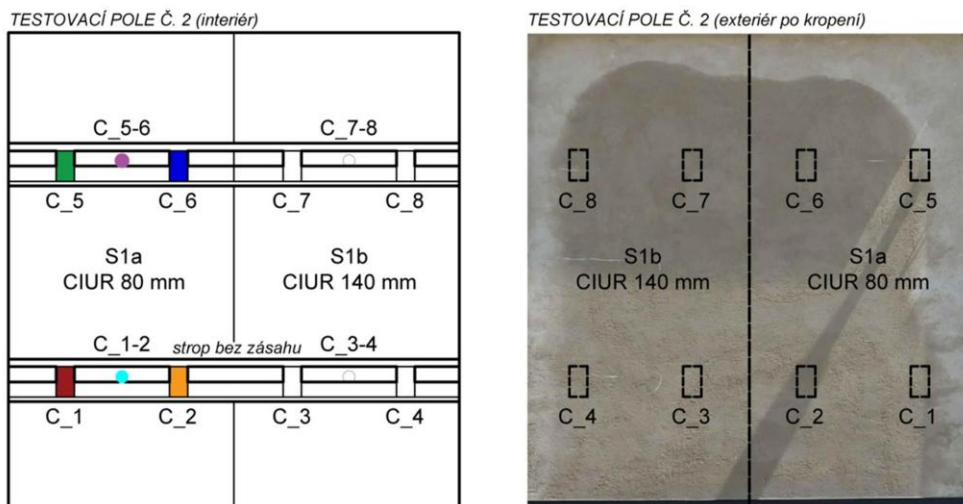
Aby bylo možné hodnotit dopad kropicího experimentu na prostředí v trámových kapsách, jsou na obr. 79 zobrazeny i ostatní působící vlivy okolního prostředí. Průběh teplot a relativních vlhkostí je zobrazen formou denních průměrných hodnot a sluneční ozáření a větrem hnaný déšť denními úhrny. Den skrápění fasády (19. 7. 2017) je vyznačen svislou červenou čarou. Modrá oblast označuje výpadek měření od 20. 7. do 24. 7. 2017. Data z exteriéru jsou zde opět doplněna daty z jihozápadní meteostanice na UCEEBu a ostatní data jsou interpolována.



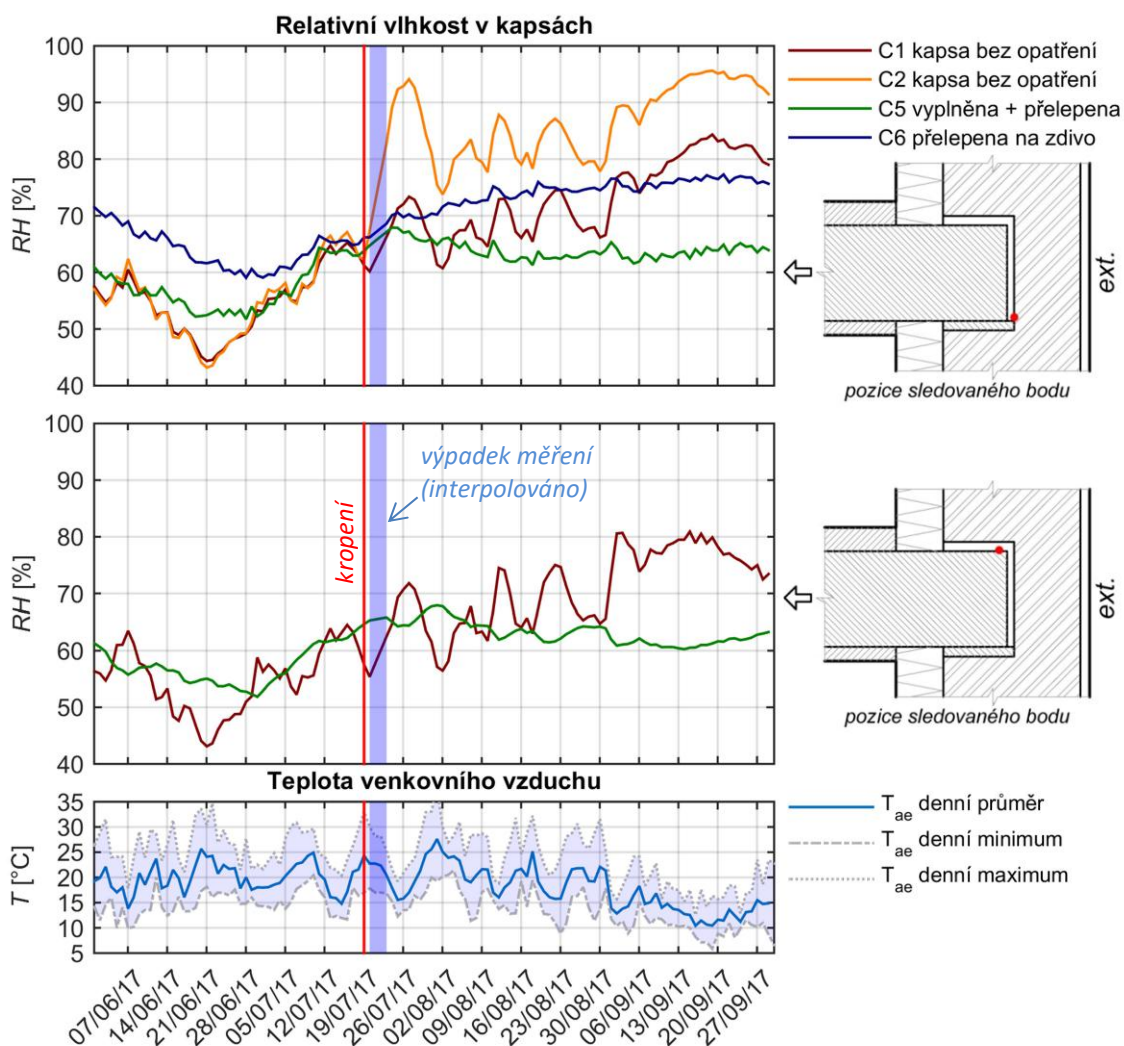
obr. 79 – Přehled okrajových podmínek v krátkém období před a po kropicím experimentu



6.2.1 SYSTÉM S1a - CIUR (dřevovláknité desky 80 mm)



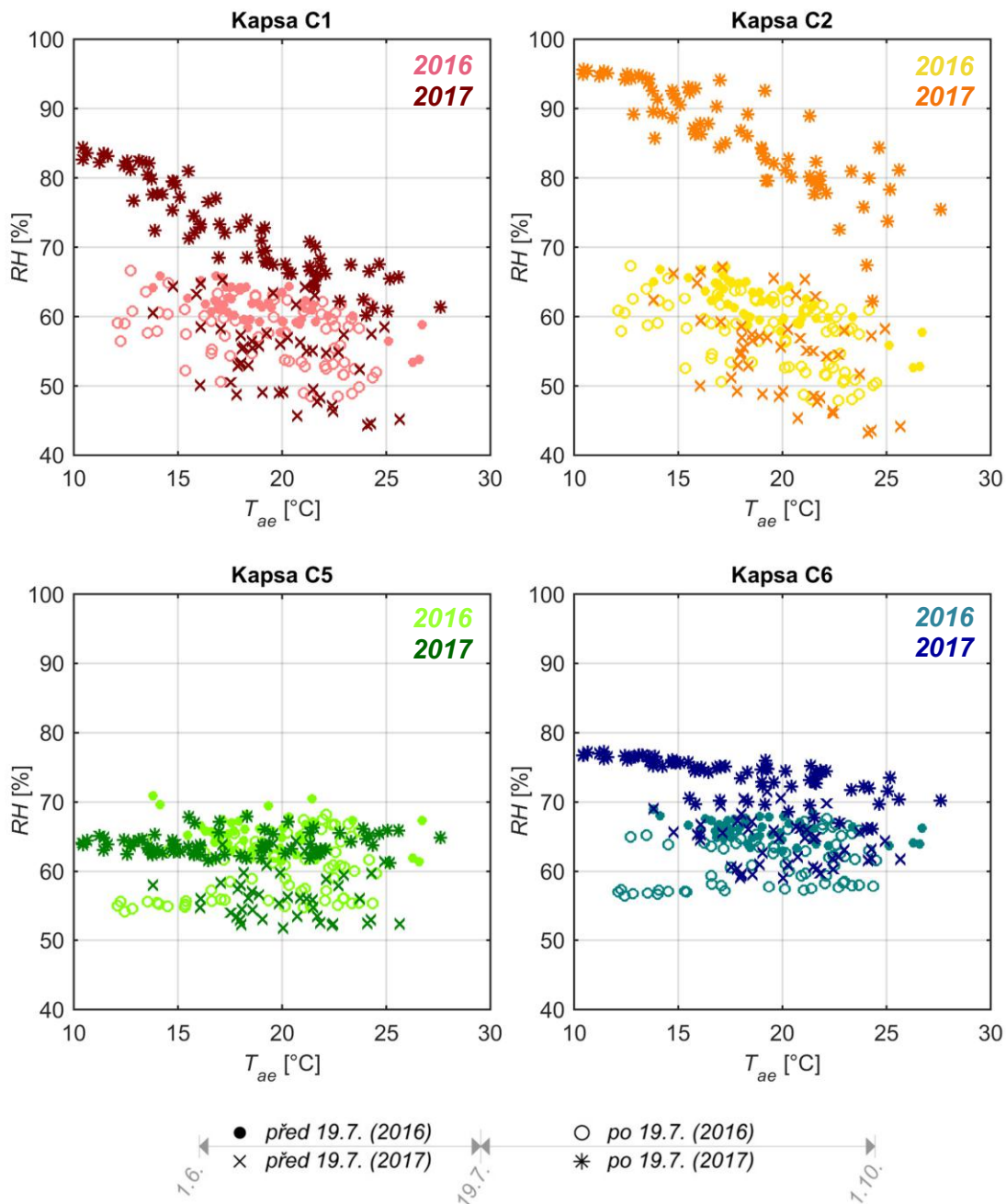
obr. 80 – Schéma test. pole č. 2 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S1a (vlevo), fasáda pole po kropení (vpravo)



obr. 81 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém CIUR 80 mm



Závislost RH v kapsách na teplotě venkovního vzduchu



obr. 82 – Kropicí experiment - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S1a) na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu

Z obr. 81 je patrné, že v systému S1a je kropením relativní vlhkost překvapivě ovlivněna nejvíce v kapse C_2. Jedná se otevřenou kapsu bez úprav ve stropní konstrukci bez zásahu (tepelná izolace je v úrovni stropu přerušena). Stejným způsobem řešená kapsa C_1 reagovala výrazně méně. Před kropením je zde průběh relativních vlhkostí téměř shodný jako u kapsy C_2, ale krátce po skrácení je relativní vlhkost v kapse C_1 nižší přibližně o 20 %. Charakter průběhu RH přitom zůstal u obou otevřených kapes podobný a dle očekávání je značně ovlivněn



teplotou venkovního vzduchu. U utěsněných kapes C_5 a C_6 je dobře patrný hladší průběh relativních vlhkostí méně ovlivňovaný změnou okrajových podmínek. Zatímco RH v kapse C_6, přelepené na zdivo Airstop páskou, po kropení mírně stoupá, tak v kapse C_5, která je kromě přelepení ještě po obvodě trámu vyplněna pružnou dřevovláknitou izolací, má průběh relativní vlhkosti jako u jediné klesající trend.

Nečekané rozdíly mezi stejnými otevřenými kapsami C_1 a C_2 a podobně řešenými utěsněnými kapsami C_5 a C_6 jsou ale zřejmě způsobeny rozdílnou mírou skropení. Na obr. 80 lze totiž vidět, že kapsa C_1 a kapsa C_5 jsou situovány v krajní části testovacího pole a nebyly dostatečně vystaveny kropení. Poloha trysek zobrazená na obr. 73 navíc zajišťovala zasažení krajních kapes pouze jednou tryskou – oproti vnitřním kapsám, kde se překrývalo tryskání minimálně dvou trysek. Krajní kapsy tak byly skrápěny s méně než poloviční intenzitou než kapsy vnitřní. Horní část pole byla navíc méně zatížena vodou stékající po povrchu fasády.

Z obr. 82 znázorňujícím závislost relativní vlhkosti na teplotě venkovního vzduchu je pak názorně vidět, které kapsy na experiment zareagovaly. V kapse C_5 sice došlo k mírnému zvýšení relativní vlhkosti v porovnání se stavem před kropením, ale i tak jsou zde relativní vlhkosti v rozsahu pro totožné období v roce 2016. Průběh relativní vlhkosti v této kapse tak lze i po skrápění přisoudit spíše vlivu měnící se teploty venkovního vzduchu.

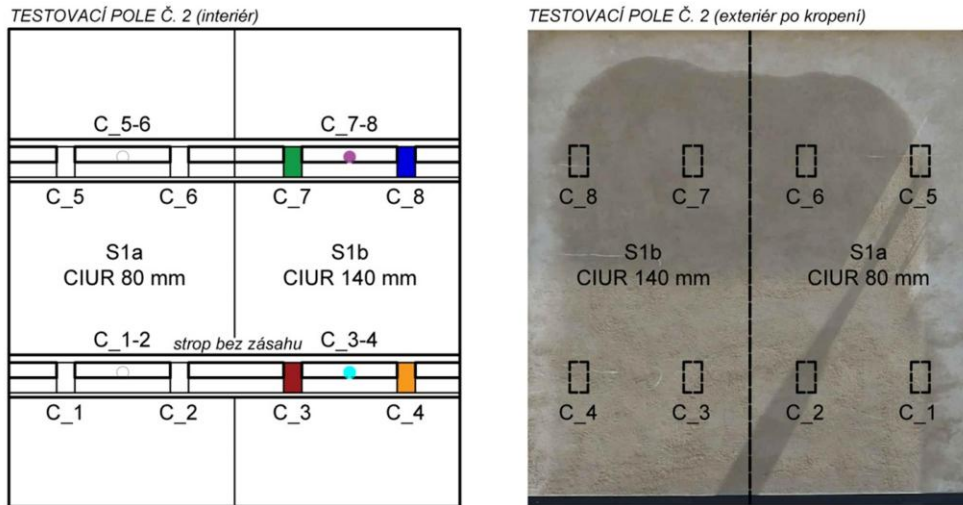
Zajímavostí k diskuzi je ale především to, že v otevřených kapsách je vlhkostní situace výrazně horší než u kapes utěsněných. V kapse C_2 totiž po kropení přetrvávají relativní vlhkosti nad 80 % a v kombinaci s teplým prostředím vyvstává důvodné riziko vzniku plísní. Oproti tomu v přelepené kapse C_6 je situace relativně bezpečná. Předpokladem přitom bylo, že vlivem větrem hnaného deště může dojít k výraznému zvýšení a zdržení vlhkosti právě v utěsněných kapsách, což se mimochodem potvrdilo i ve vyhodnocení vlivu skutečného větrem hnaného deště v předchozí kapitole.

poznámka:

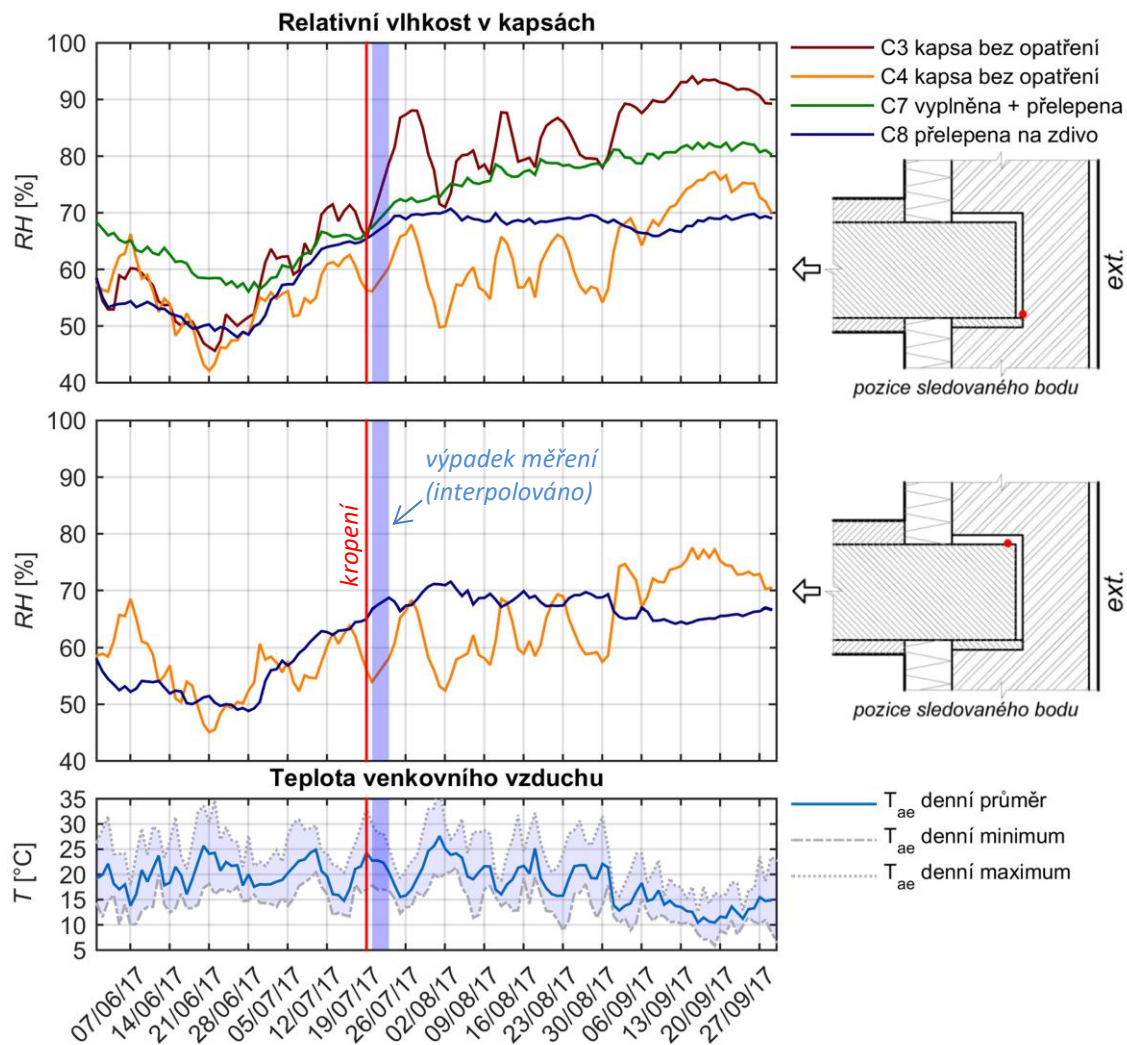
Na obr. 82 si lze také všimnout, že v období před 19. 7. 2016 byly relativní vlhkosti v kapsách v závislosti na teplotě venkovního vzduchu mírně vyšší než v následujícím období po 19. 7. 2016. Toto období je sledováno již v předchozí kapitole 5 - Vliv větrem hnaného deště a zřejmě zde dochází k ovlivnění relativní vlhkosti v kapsách větrem hnaným deštěm z 23. 5. a 25. 6. 2016. Zároveň během léta 2016 byla relativní vlhkost venkovního a tím pádem i interiérového vzduchu vyšší než v létě 2017. Na obr. 82 tedy není období kropícího experimentu z léta 2017 porovnáváno se zcela referenčními hodnotami z roku 2016. Nicméně i přes zmíněné jevy, které v porovnání bodů na obr. 82 mohou spíše potlačovat vliv skrápění fasády, se zde změna relativní vlhkosti v dostatečně zakropených kapsách výrazně projevila.



6.2.2 SYSTÉM S1b - CIUR (dřevovláknité desky 140 mm)



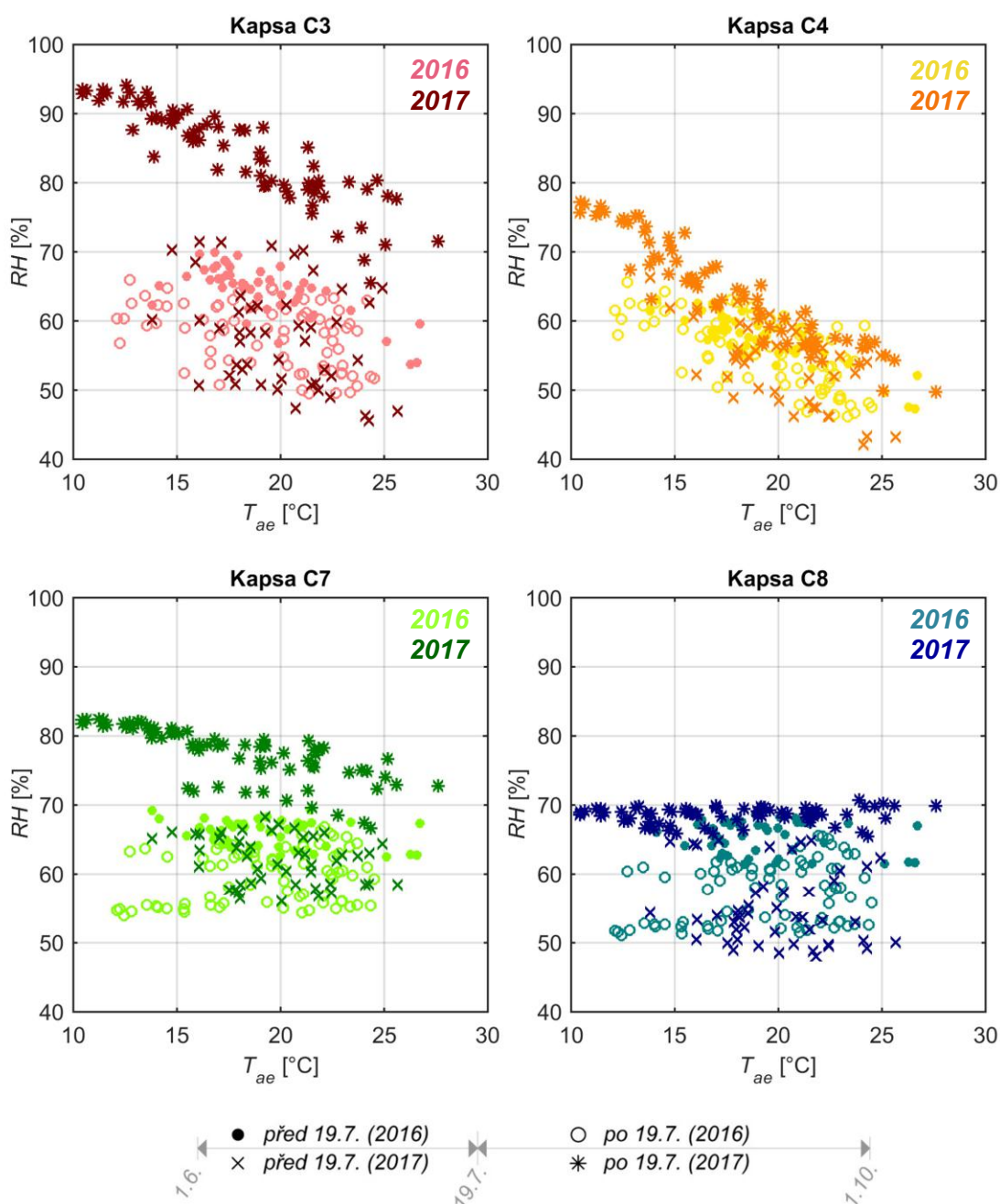
obr. 83 – Schéma test. pole č. 2 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S1b (vlevo), fasáda pole po kropení (vpravo)



obr. 84 – Kropicí experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém CIUR 140 mm



Závislost RH v kapsách na teplotě venkovního vzduchu



obr. 85 - Kropící experiment - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S1b)
 na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu

Z obr. 84 je zřejmé, že v systému S1b je situace velmi podobná jako v předchozím případě. Opět na kroupení překvapivě nejvíce zareagovala kapsa bez opatření – konkrétně vnitřní kapsa C_3. U druhé otevřené kapsy C_4 byla relativní vlhkost již před experimentem zhruba o 10 % nižší a zároveň se jedná o krajní kapsu, takže je zde i po kroupení nižší relativní vlhkost než u vnitřní intenzivněji skrácené kapsy. Ovšem je nutné připomenout, že kapsa C_3 měla podezřelé chování již při vyhodnocování skutečného větrem hnaného deště. Nečekané chování



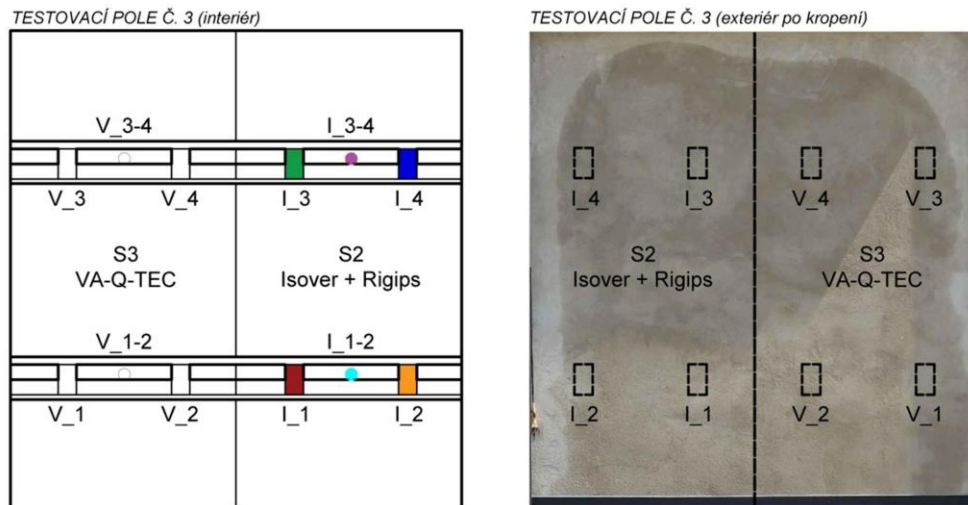
této kapsy bylo v předchozí kapitole přisuzováno pravděpodobné netěsnosti ve zdivu před čelem zhlaví, kudy by se kapalná voda mohla snáze dopravit až do prostoru kapsy a zvyšovat zde vlhkost. Tentokrát se ale podobně chová i otevřená kapsa C_2 z předchozího systému S1a. Buďto se tedy při větší intenzitě kroupení fasády projevila případná netěsnost i u této kapsy nebo je vysvětlení nutné hledat jinde.

Utěsněná kapsa C_7 vyplněná dřevovláknitou izolací je tentokrát umístěna ve střední části testovacího pole. Byla tedy řádně vystavena kroupení a průběh relativní vlhkosti se velmi podobá průběhu u obdobně umístěné pouze přelepené kapsy C_6 z předchozího systému S1a. Situace je podobná i pro případ kapsy C_8, která je jen přelepena, ale je nyní umístěna na kraji pole. Průběh relativní vlhkosti se zde blíží průběhu v kapse C_5 (přelepená a vyplněná) ze systému S1a, která je také umístěna na krajní části pole. Tím je prokázáno, že rozdíl v relativní vlhkosti po kroupení nezajišťuje tato odlišná úprava, ale jen jiná intenzita kroupení. Dále je vidět, že u utěsněných kapes C_7 a C_8 v systému S1b je po kroupení dosaženo mírně vyšších relativních vlhkostí než u utěsněných kapes C_5 a C_6 v systému S1a.

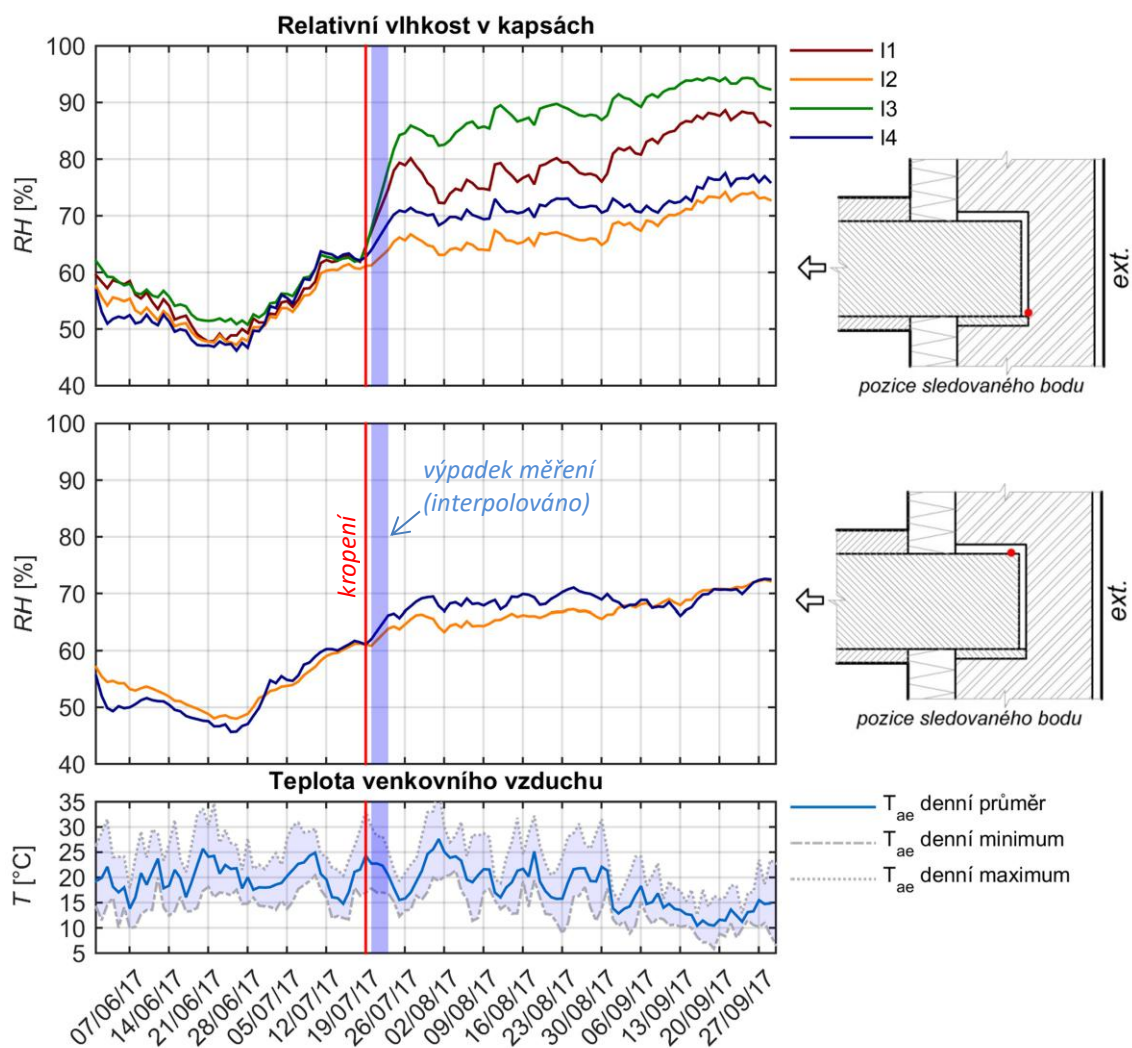
V utěsněné kapse C_7 se po kroupení relativní vlhkosti sice výrazněji zvýšily, ale stále je vlhkostní situace nejhorší v otevřené kapse C_3, což je v rozporu s předpokladem experimentu.



6.2.3 SYSTÉM S2 - ISOVER + RIGIPS (systém s „inteligentní“ parozábranou)



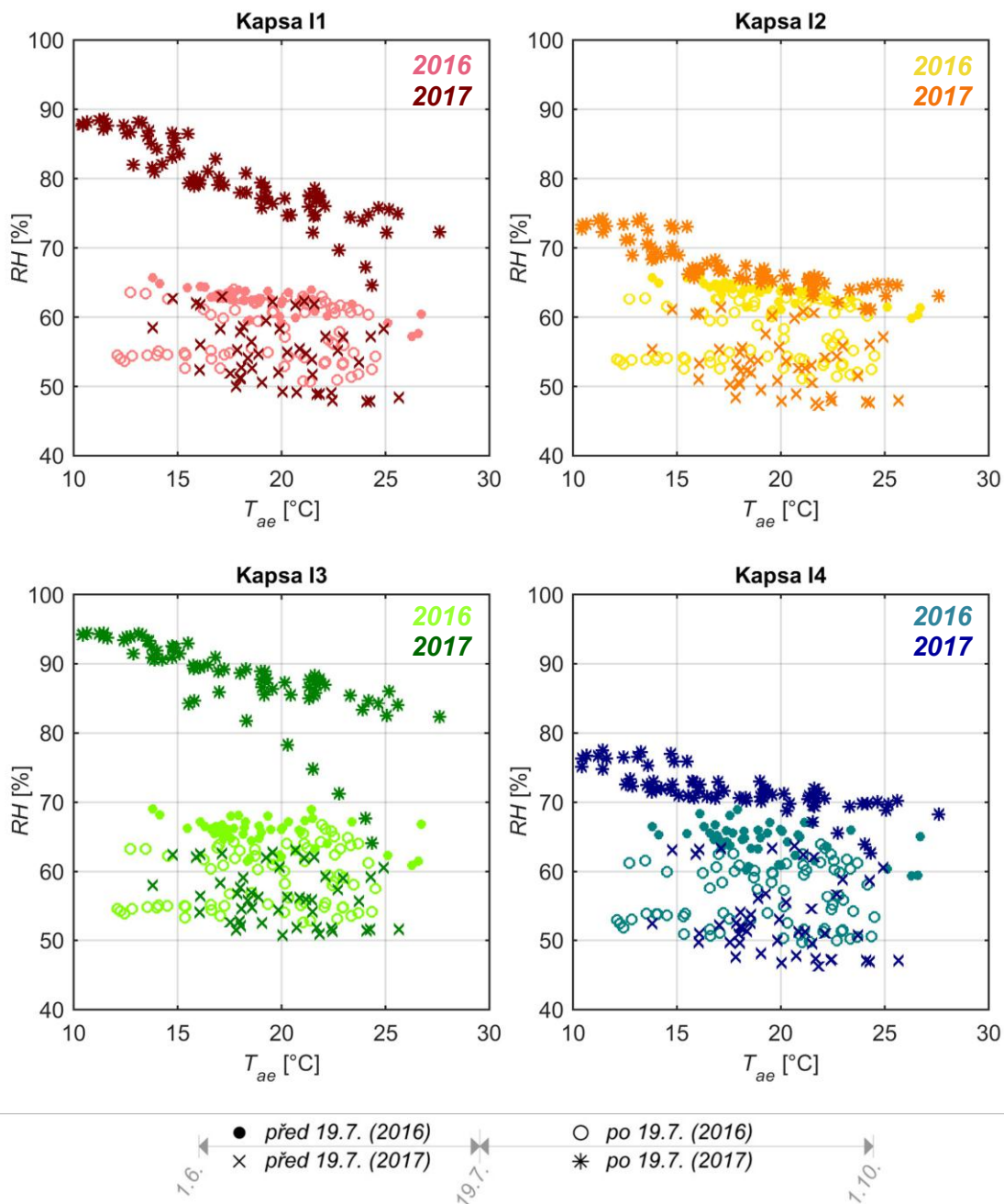
obr. 86 - Schéma test. pole č. 3 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S2 (vlevo), fasáda pole po kroupení (vpravo)



obr. 87 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém Isover + Rigips



Závislost RH v kapsách na teplotě venkovního vzduchu



obr. 88 - Kropící experiment - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S2) na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu

V systému S2 je vliv kropícího experimentu na relativní vlhkost v kapsách velmi dobře patrný (viz obr. 87). Úprava všech zhlaví je zde totiž shodná formou přelepení parotěsnou páskou v úrovni parozábrany. Průběh relativní vlhkosti v kapsách před kroupením je navíc velmi podobný. Rozdíly v chování po skrápění by tedy měly být pouze důsledkem rozdílné intenzity kroupení. Krajní kapsy I_2 a I_4 jsou dle očekávání ovlivněny nejméně. Kapsy ve střední části pole reagovaly výrazněji. Průběhy relativních vlhkostí po kroupení si ovšem zachovávají podobný

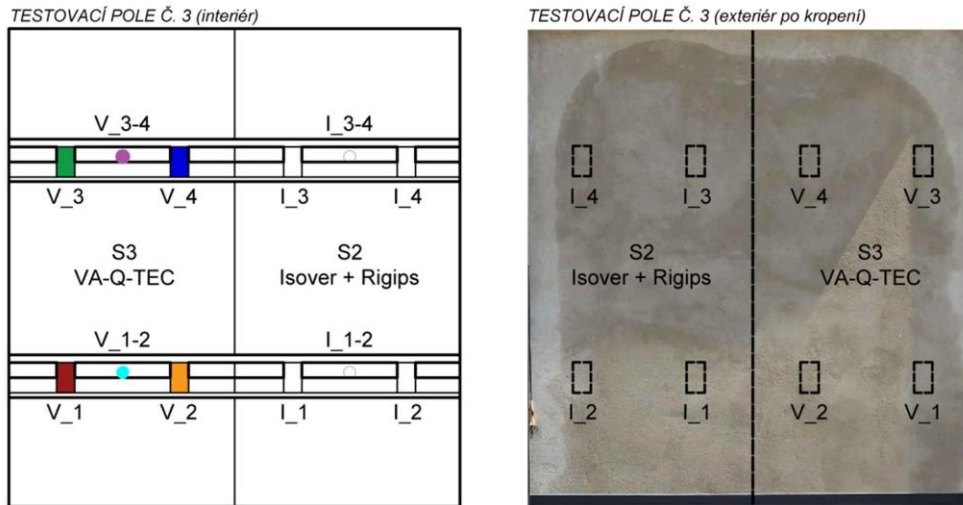


charakter. Zajímavé je, že nejvyšších relativních vlhkostí bylo dosaženo u horní kapsy I_3, u které by se očekávalo nižší zamokření vlivem menšího množství stékající vody po povrchu. Dle obr. 73 je ale horní kapsa vystavena přímému kroupení ze 4 trysek, zatímco spodní kapsa pouze ze dvou. Testovací pole číslo 3 bylo navíc kroupeno s větší intenzitou (viz tab. 4 na str. 100) a tryskání tak mělo i větší účinek.

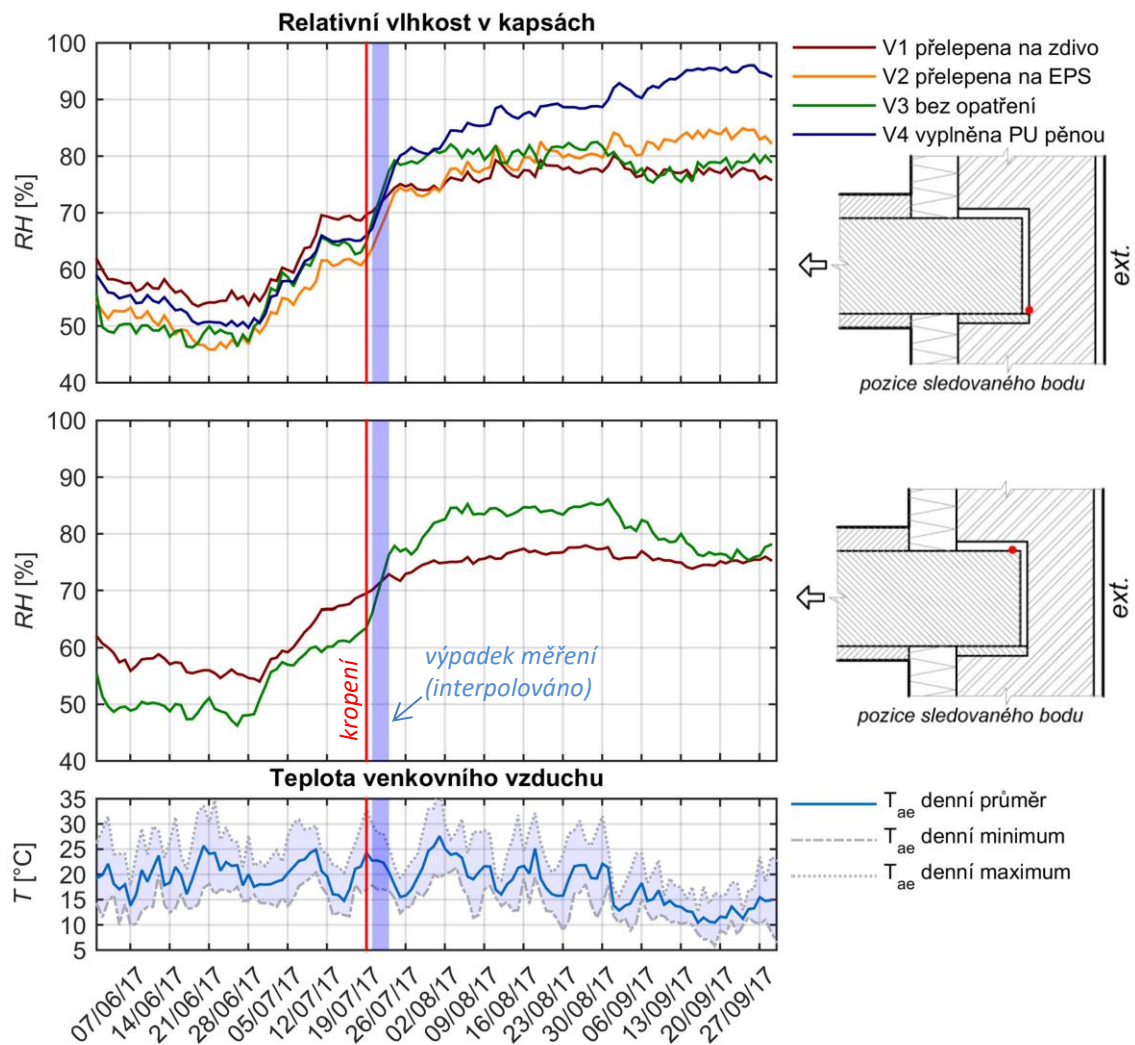
Důležité ovšem je, že v kapse I_3 po kroupení přetrvávají vysoké relativní vlhkosti nad 80 %. V maximu ke konci září dosahuje relativní vlhkost v kapse téměř 95 % a teprve zde dochází k náznaku snižování relativní vlhkosti. V následujícím období lze ovšem očekávat výraznější pokles venkovních teplot a může tak naopak dojít k dalšímu nárůstu relativní vlhkosti. I když je pro tento systém použita „inteligentní“ parozábrana s proměnným difuzním odporem, stále se očividně jedná o relativně difuzně uzavřenou konstrukci a vysychání je značně omezeno. Pro systém S2 by tedy kroupení fasády mohlo znamenat počátek dlouhodobějších vlhkostních problémů a rozhodně by bylo vhodné sledovat následující období od října 2017.



6.2.4 SYSTÉM S3 - VA-Q-TEC (vakuové panely)



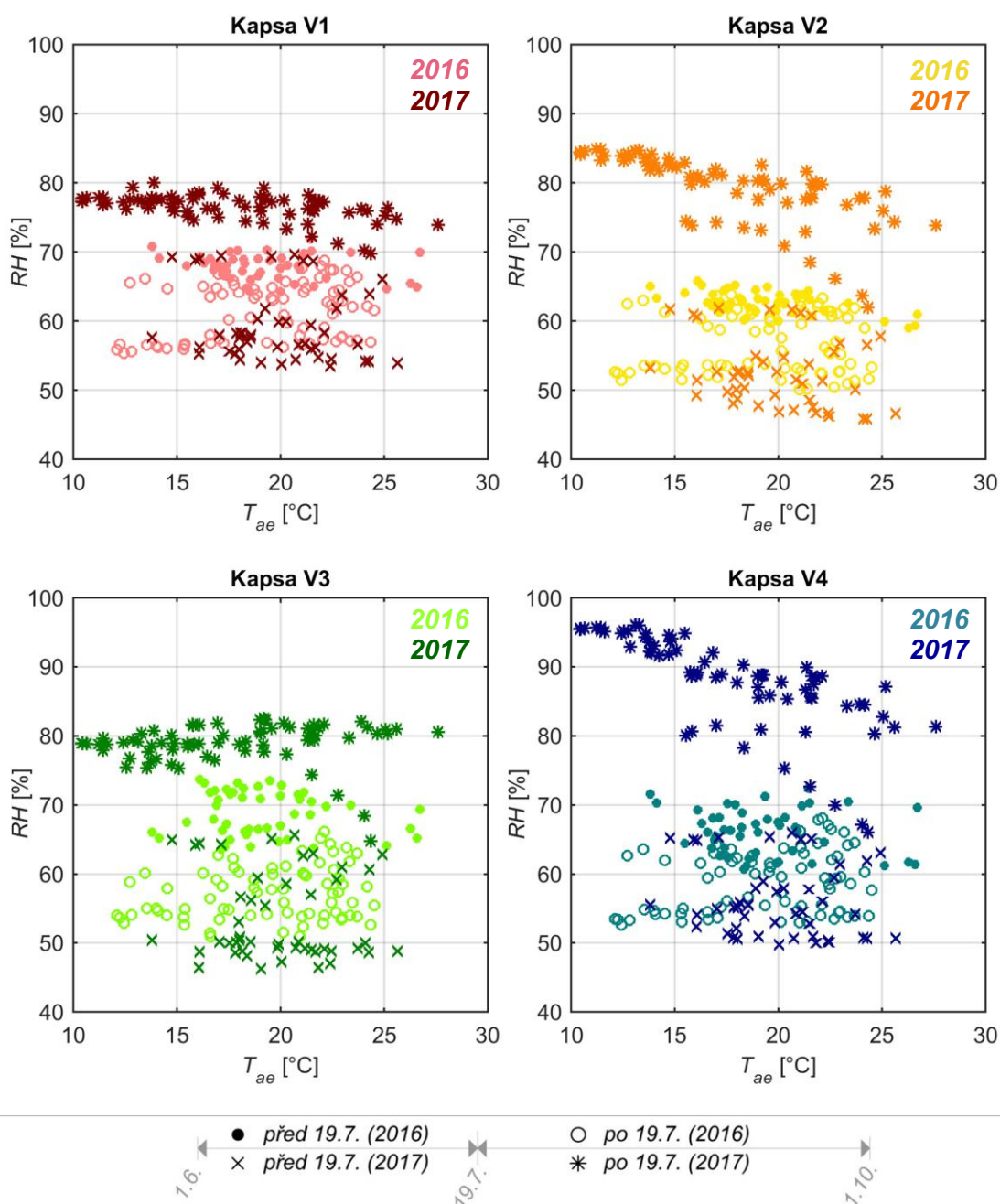
obr. 89 - Schéma test. pole č. 3 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S3 (vlevo), fasáda pole po kroupení (vpravo)



obr. 90 – Kropicí experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém VA-Q-TEC



Závislost RH v kapsách na teplotě venkovního vzduchu



obr. 91 - Kropící experiment - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S3)
 na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu

V systému S3 má průběh relativních vlhkostí před klopením pro všechny kapsy velmi podobný charakter (viz obr. 90). Pro jednotlivé úpravy kapes se zde liší relativní vlhkost do 10 %. Po skrácení došlo k nejvýraznějšímu zvýšení RH u vnitřní horní kapsy V_4, která je pouze vyplněna PU pěnou. Relativní vlhkost zde rychle po klopení vzrostla nad 80 % a na konci hodnoceného období dosáhla více než 95 %. Spodní zhlaví V_2 přelepené Airstop páskou na izolant v úrovni vnitřního povrchu, zareagovalo méně, ale průběh relativní vlhkosti



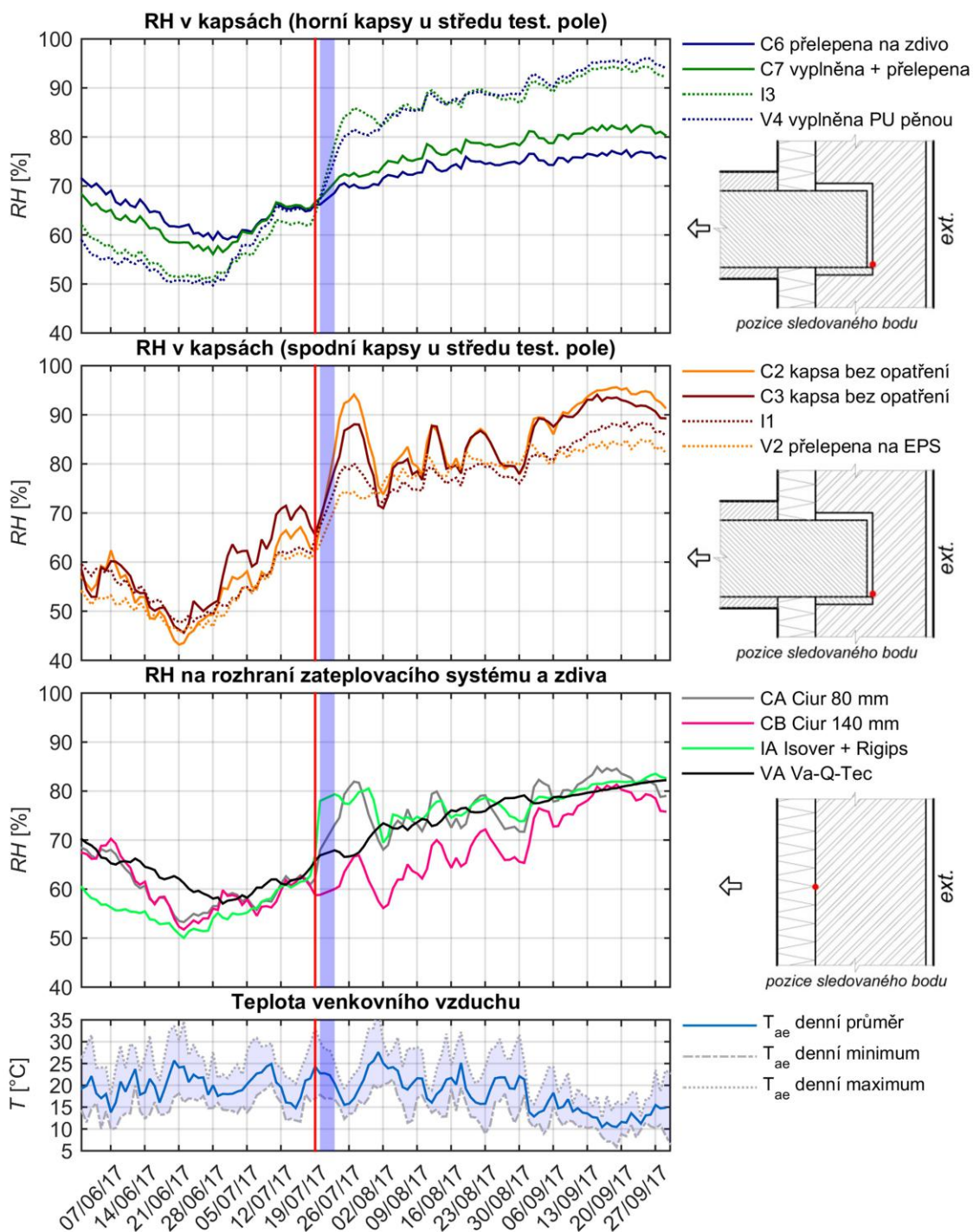
po kropicí má podobný stoupající trend. Bohužel nelze rozdílné reakce jednoznačně přisoudit různým úpravám kapes, jelikož podobný rozdíl mezi vnitřní horní a vnitřní dolní kapsou nastal i u systému S2, a přitom se jednalo o kapsy se stejnou úpravou. Krajní kapsa V_1 bez přelepení a V_3 přelepená Airstop páskou na zdivo na kropicí také zareagovaly (viz obr. 91) a relativní vlhkost se pak ustálila okolo 80 %.

Podobně jako u kapsy I_3 v systému S2 je i zde u vnitřní horní kapsy V_4 podobná situace. Téměř do konce hodnoceného období na konci září 2017 má relativní vlhkost tendenci narůstat a při dalším poklesu venkovních teplot pravděpodobně nedojde ke zlepšení. I tento difuzně uzavřený systém S3 je tedy kropicím značně ovlivněn a existuje důvodné riziko vlhkostních problémů.



6.2.5 Porovnání jednotlivých systémů

Aby mohl být přehledněji vyhodnocen vliv skrápění fasády na jednotlivé úpravy trámových kapes, jsou na obr. 92 pro porovnání zvoleny pouze kapsy, u kterých se dá očekávat velmi podobná míra skropení. Pro komplexnost jsou zobrazeny i průběhy RH na rozhraní izolantu a zdiva v místě typické skladby.



obr. 92 – Kropící experiment – denní průměrné RH v kapsách a na rozhraní zateplovacích systémů



Z obr. 92 je patrné, že průběhy relativní vlhkosti v přelepených kapsách C_6 a C_7 v systému S1a a S1b s dřevovláknitými deskami zareagovaly na skrápění nejmírněji. Zároveň bylo z naměřených údajů vysledováno, že rozdíly mezi průběhy teplot v jednotlivých kapsách všech systémů jsou během teplého období zanedbatelné. U těchto utěsněných kapes C_6 a C_7 tedy pravděpodobně nedochází v období po kroupení k tak výraznému zvyšování koncentrace vodní páry jako u ostatních. Vysvětlením zřejmě je, že se zde jedná o kapsy v difuzně otevřeném systému vnitřního zateplení. I když je pak kapsa kolem trémového zhlaví přelepena na rozhraní izolantu a zdiva Airstop páskou, může vodní pára difundovat mimo samotným zhlavím, také kolem utěsnění a následně poměrně snadno do interiéru. Reakce průběhu RH v těchto kapsách na skrápění fasády by pravděpodobně mohla být ještě mírnější, pokud by se utěsnění provedlo až v úrovni vnitřního povrchu pod omítkovou stěrkou. Dále si lze všimnout, že průběhy RH jsou pro obě kapsy velmi podobné. Kapsa C_6, která je pouze přelepená, má ale celkově v tomto sledovaném období mírně plošší průběh RH než kapsa C_7, která je navíc vyplněna dřevovláknitou vlnou. Každá z kapes, ale náleží systému s rozdílnou tloušťkou izolantu a odlišnost průběhu RH tak nelze jednoznačně přisoudit rozdílným úpravám.

Průběh relativní vlhkosti v kapse I_3 (systém S2 s parozábranou) a V_4 (systém S3 s vakuovými panely) je téměř totožný. Krátce po intenzivním kroupení fasády zde v obou případech výrazně vzrostla relativní vlhkost přibližně o 20 %. U spodních kapes I_1 a V_2 lze pozorovat podobný průběh, pouze snížený vlivem pravděpodobně nižší intenzity skrápění. Počáteční reakce byla překvapivě mírnější u kapes V_2 a V_4, ke kterým ihned přiléhá difuzně uzavřený izolant, než u kapes I_1 a I_3, kde je parozábrana situována až u vnitřního povrchu pod záklopem SDK deskami. Možná je to ale způsobené zkresleným průběhem během výpadku měření. U systému s vakuovými panely jsou také k doplnění prostoru okolo stropních trámů použity přířezy z EPS a doplnění PUR pěnou a kapsa V_4 je navíc také pouze vypěněna PUR pěnou bez dalšího utěsnění. V tomto místě je tedy systém S3 s vakuovými panely pravděpodobně méně těsný pro šíření vodní páry difuzí. Velmi důležité zjištění ovšem je, že systém S2 s „inteligentní“ parozábranou s proměnným difuzním odporem (Isover Vario KM Duplex) nezajistil ani po delší době zásadnější zlepšení vlhkostní situace RH v kapsách.

Otevřené kapsy C_2 a C_3 ve stropní konstrukci bez zásahu zde reagují nejvíce, což již bylo označeno za překvapivé při vyhodnocení jednotlivých systémů na předchozích stránkách. U kapsy C_3 je sledováno podezřelé chování již v přechozích kapitolách. V zimním období je totiž průběh RH v této kapse nižší než v ostatních otevřených kapsách. Při událostech větrem hnaného deště z 23. 5. a 25. 6. 2016 opět jen v této jediné z otevřených kapes, došlo ke zdatelnému navýšení RH. Toto chování tedy bylo přisouzeno pravděpodobně netěsnosti ve zdivu před čelem kapsy, kterou by docházelo ke snadnějšímu přenosu vlhkosti ať už z interiéru do exteriéru nebo opačně. Pro obecnou představu o kvalitě provedení zdiva je na obr. 93 pohled do jedné z kapes a na zdivo ze strany exteriéru (bohužel se ale nejedná přímo o konkrétní situaci kapsy C_3).



obr. 93 – Pohled do prázdné trámové kapsy (vlevo) a na neomítnuté zdivo testovacího pole ze strany exteriéru (vpravo), zdroj [15]

Z obr. 93 je patrné, že ve zdivu před čelem kapes skutečně mohou být netěsnosti především v místě nedokonale vyplněných styčných spár. Zdivo v testovacím poli má navíc tloušťku jen 300 mm a v místě kapsy je oslabeno pouze na 140 mm. To že by do kapsy C_3 skutečně voda ze skrápění mohla případnou skulinou zatékat, tedy není vyloučeno. Jelikož ale na skrápění podobně zareagovala i kapsa C_2, jejíž průběh za předchozí monitorování nevykazoval neobvyklé chování, je zde pravděpodobně i další souvislost způsobující takto zvýšený průběh relativní vlhkosti.

Další vysvětlení může být následující. Pro účely experimentu je ze strany interiéru zřízena pouze malá část stropní konstrukce (viz kapitola 3 - Popis experimentu). Ta je následně řádně utěsněna (viz obr. 94). Z horní strany konstrukci podlahy uzavírá OSB deska, ze spodní strany je na prkenném záklopu proveden podhled ze sádkokartonových desek a v ukončení stropu je konstrukce utěsněna PE fólií. Spára mezi konstrukcí stropu a přiléhajícím zateplovacím systémem je utěsněna akrylátovým tmelem.

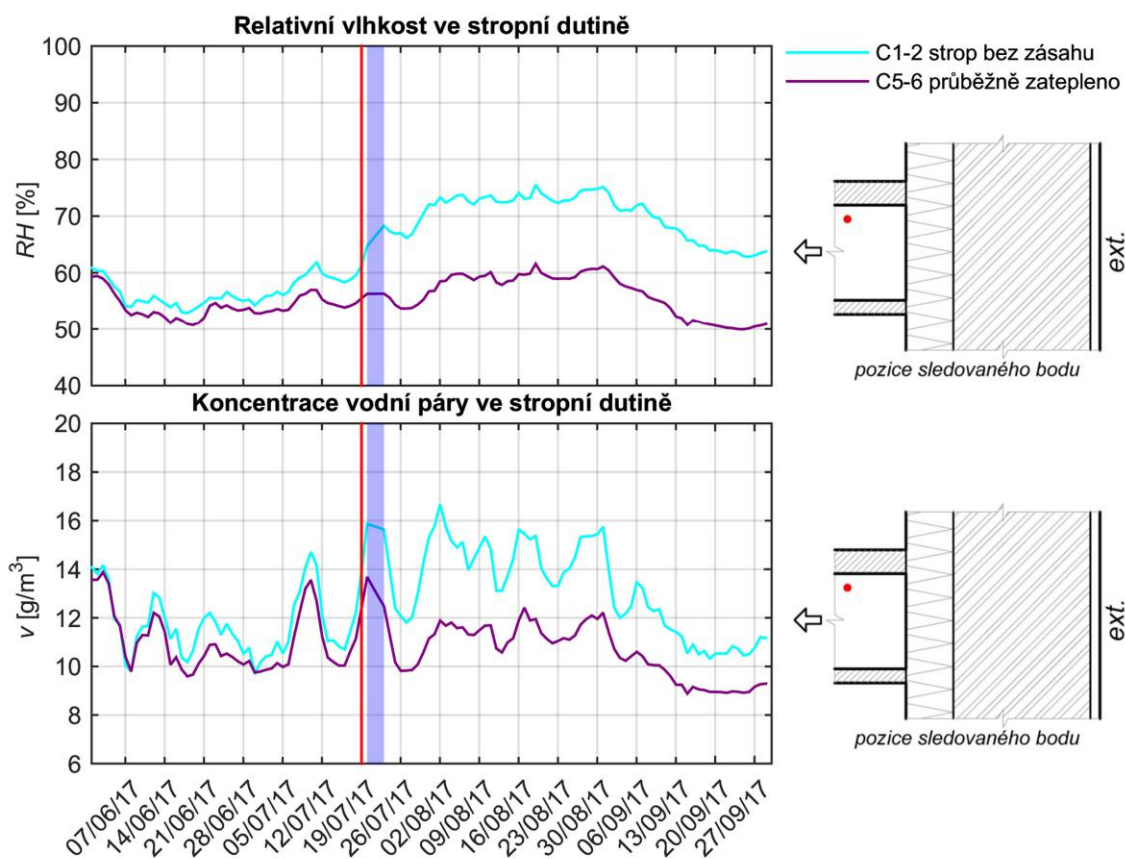


obr. 94 – Utěsnění stropní konstrukce v rámci experimentu na UCEEBu, zdroj [15]



V případě varianty simulující stropní konstrukci bez zásahu, přiléhají otevřené trámové kapsy přímo tomuto utěsněnému prostoru. Po skrápění tak zřejmě nedošlo k nelogickému navýšení RH v otevřených kapsách jako takových, ale spíše v celé dostatečně utěsněné stropní dutině. Dá se říct, že i otevřené kapsy se pak chovaly jako kapsy utěsněné s pouze větší vzduchovou dutinou. Oproti samostatným utěsněným kapsám, zde ale navíc mohlo po skrápění dojít k výraznější dotaci vodní páry. Stropními dutinami jsou totiž v podstatě propojeny všechny 4 otevřené kapsy. U obou intenzivně skrápěných kapes C_2 a C_3 se tak přes společnou dutinu mohl vliv kropení kombinovat. Byla zde tedy celkově vyšší koncentrace vodní páry a tím i vyšší RH v kapsách.

Bohužel stropní dutina mezi nejintenzivněji skrápěnými vnitřními kapsami není monitorována. Pro představu je tak na obr. 95 zobrazeno porovnání průběhu RH a koncentrace vodní páry pro sousedící stropní dutinu C_1-2 ve stropě bez zásahu, a pro stropní dutinu C_5-6 s průběžným zateplením přes úroveň stropu.



obr. 95 – Kropící experiment – denní průměrné RH a koncentrace vodní páry ve stropních dutinách

Z obr. 95 je patrné, že ve stropní dutině C_1-2 ve stropní konstrukci bez zásahu došlo po skrápění opravdu k výraznějšímu navýšení relativní vlhkosti než v případě stropní dutiny C_5-6, která je od kapes oddělena průběžným vnitřním zateplením. To že se nejedná pouze o vliv rozdílné teploty v těchto dutinách, potvrzuje i rozdílný průběh dopočtené koncentrace vodní páry. V dutině mezi kapsami C_2 a C_3 (není monitorována), které byly obě intenzivně skrápěné, by tak patrně nastalo ještě výraznější zvýšení RH.



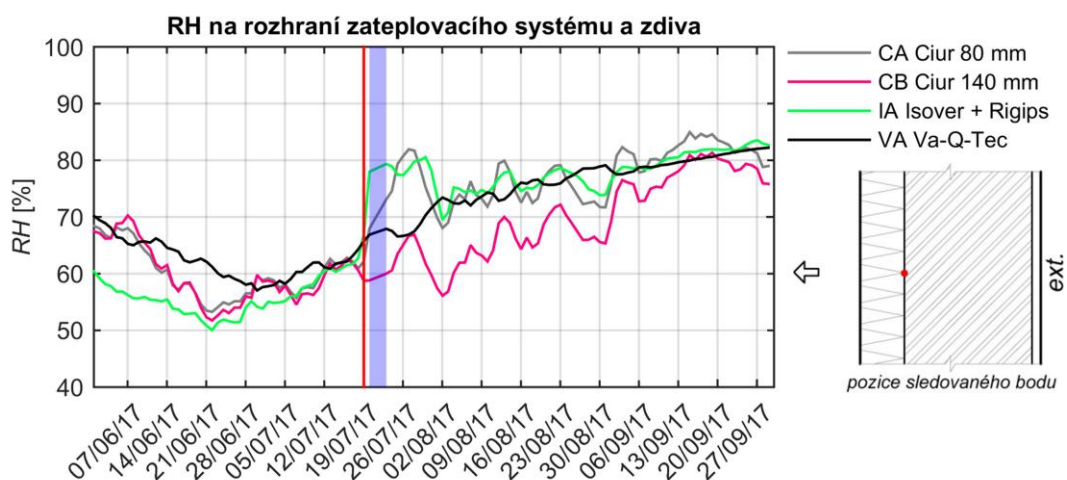
V otevřených kapsách C_2 a C_3 je tedy zvýšená relativní vlhkost po skrápění pravděpodobně způsobena vlivem přiléhající utěsněné stropní konstrukce. Tím, že je zde vyšší koncentrace vodní páry, je i závislost průběhu RH na teplotě venkovního vzduchu výrazně silnější.

Ve skutečnosti by ale pravděpodobně tento jev nenastal. Plocha stropní konstrukce by byla rozsáhlejší a i objem vzduchu ve stropních dutinách by tak byl vyšší. Zároveň by stropní konstrukce pravděpodobně nebyla tak dokonale utěsněna. Ani po vystavení fasády větrem hnanému dešti o podobné intenzitě jako mělo vyhodnocované skrápění, by tak zřejmě nedošlo k takovému zvýšení koncentrace vodní páry ve stropní dutině.

Vzhledem k tomuto jevu, je otázkou, zda v přechodí kapitole vyhodnocení vlivu skutečného větrem hnaného deště nedošlo k mylnému názoru. Otevřené kapsy se zde jevily jako minimálně ovlivněné, což bylo i předpokladem účinku větrem hnaného deště na tyto kapsy. Zároveň to bylo podpořeno porovnáním změny závislosti RH v kapsách na teplotě venkovního vzduchu pro období během dešťů (a krátce po nich) a dále pro vzdálenější období po deštích. Vyšší RH v kapsách v první polovině léta 2016 byla pak přisouzena mírnějším teplotám venkovního vzduchu a celkově vlhčímu létu. Ve skutečnosti, mohl být ale průběh RH v otevřených kapsách stále ovlivněn i pro druhé porovnávané období po deštích, právě vlivem utěsněné stropní konstrukce. To by znamenalo, že míra vlivu větrem hnaných dešťů z 23. 5. a 25. 6. 2016 byla ve skutečnosti vyšší a neprojevila se pouze na utěsněných kapsách.

Vliv skrápění na situaci na rozhraní izolantu a zdiva

Na obr. 92 (str. 117) je dále vidět porovnání průběhů relativní vlhkosti na rozhraní zateplovacího systému a zdiva v místě typické skladby. Pro názornost jsou tyto průběhy znovu zobrazeny na obr. 96. Jelikož jsou monitorovaná místa na rozhraní vždy ve středu jednotlivých systémů, lze zde předpokládat vystavení fasády skrápění o podobné intenzitě. Při sledování naměřených dat bylo navíc zjištěno, že teploty na rozhraní jsou během teplého období roku téměř shodné u všech systémů. Průběh RH je zde tedy pravděpodobně ovlivněn pouze rozdílnou koncentrací vodní páry, která je na rozhraní zadržována.



obr. 96 – Kropící experiment – denní průměrné RH na rozhraní zateplovacích systémů



Z obr. 96 je patrné, že i na rozhraní zateplovacích systémů a zdiva došlo k ovlivnění průběhu RH skrápěním. Po skrápění zde převládá stoupající trend RH a na konci léta je zde u všech systémů relativní vlhkost okolo 80 %. Ovšem je nutné zdůraznit, že rostoucímu charakteru zde stejně jako u trémových kapes přispívá i klesající průběh venkovních teplot v druhé polovině léta 2017. Nicméně v průbězích RH lze opět sledovat nečekané chování.

Zajímavý rozdíl mezi průběhy RH nastává na rozhraní v bodech C_A a C_B. Jedná se přitom o totožné systémy vnitřního zateplení s dřevovláknitými deskami, které se liší pouze tloušťkou izolantu. Jelikož jde o difuzně otevřený systém, nemělo by na rozhraní docházet k výraznému zvýšení RH, čemuž odpovídá chování v bodě C_B. V bodě C_A, ale krátce po kropení vzroste RH na úroveň přibližně o 15 % vyšší než v bodě C_B. Před kropením byl přitom průběh téměř shodný. Jak již bylo uvedeno, teploty na rozhraní se dají považovat za totožné a muselo zde tedy dojít k vyššímu nárůstu koncentrace vodní páry. Při průzkumu fotodokumentace z provádění zateplovacího systému bylo nalezeno možné vysvětlení (viz obr. 97).

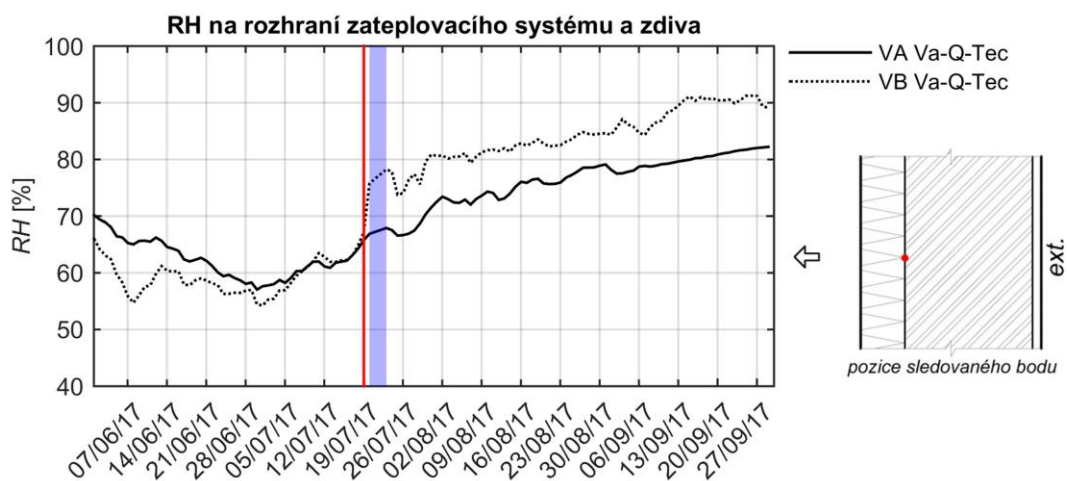


obr. 97 – Strop bez zásahu – situace u trémových kapes (vlevo), aplikace zateplovacího systému Ciur 80 mm (vpravo), zdroj [15]

Z obr. 97 je patrné, že z otevřených kapes ve stropní konstrukci bez zásahu mohlo po skrápění docházet ke snadnému šíření vlhkosti i mimo stropní dutinu. Mezi dřevovláknitou deskou tloušťky 80 mm a zdivem pak mohla při provádění vzniknout mezera snáze než v případě desky tlusté 140 mm, která má silnější vrstvu flexibilní části a je tedy i poddajnější vůči nerovnostem podkladu. Případnou mezerou by se mohla vlhkost šířit lépe než skrze samotný zateplovací systém. Měřící bod C_A umístěný přibližně 0,5 m nad stropní konstrukcí, tak mohl naměřit vyšší RH. Otázkou je, zda by se ovšem přítomnost takovéto mezery výrazněji neprojevila i v průběhu RH za celé období dlouhodobého experimentu. Žádné další vysloveně podezřelé chování zde nebylo totiž pozorováno. Dalším vysvětlením tak opět může být lokální netěsnost ve zdivu v blízkosti čidla, která by představila pro difuzi vodní páry otevřenější cestu než okolní zdivo.



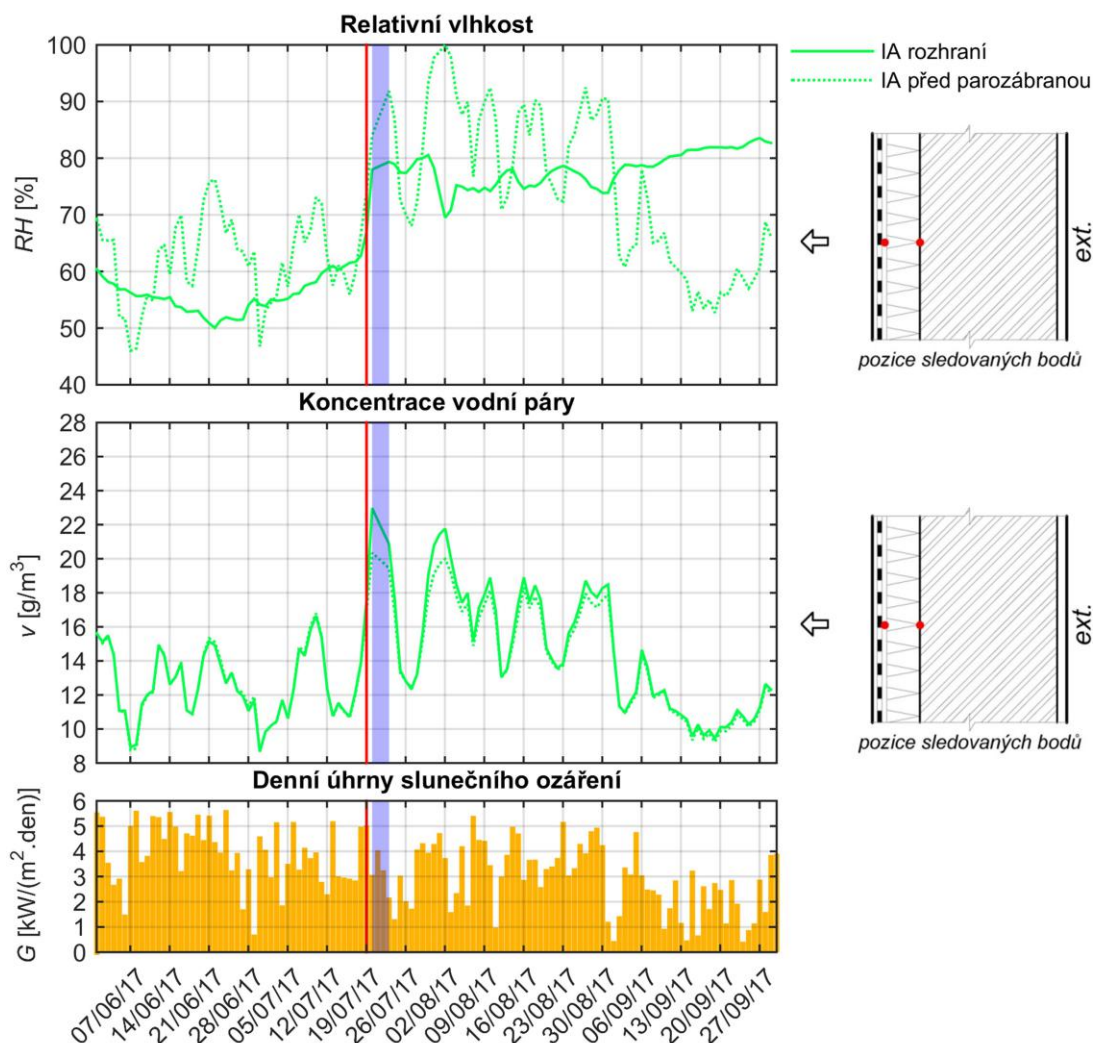
Opačný problém lze na obr. 96 pozorovat u difuzně uzavřených systémů. Zatímco u systému S2 s parozábranou došlo v bodě I_A na rozhraní k předvídatelnému navýšení RH, tak u systému S3 s vakuovými panely nenastalo v bodě V_A na rozhraní žádné skokové zvýšení. Počáteční reakce může být sice zkreslena výpadkem měření, ale i tak by se právě u tohoto systému očekávalo dlouhodobější zdržení vlhkosti na rozhraní izolantu a zdiva. Hodnoty RH naměřené čidlem v bodě V_A na rozhraní jsou tedy velmi podezřelé. Pro porovnání je tedy na obr. 98 zobrazen ještě průběh RH na rozhraní v dalším sledovaném bodě V_B (na styku 3 vakuových panelů).



obr. 98 – Kropící experiment – denní průměrné RH na rozhraní zateplovacího systému S3 (vakuové panely)

Z obr. 98 je patrné, že v bodě V_B na rozhraní má relativní vlhkost průběh mnohem více odpovídající předpokládanému chování. Charakter průběhu RH se zde zároveň velmi podobá průběhu v kapsách tohoto systému. Navíc je při porovnání s průběhy RH na rozhraní ostatních systémů (viz obr. 96) vlhkostní situace nejhorší právě u tohoto systému, což již více odpovídá představě o následcích větrem hnaného deště. RH je v bodě V_B na konci sledovaného období okolo 90 %. V podezřele se chovajícím čidle v bodě V_A by přitom mohla být situace ještě zhoršena, jelikož oproti bodu V_B se zde nenachází styk izolačních desek, kudy může snáze prostupovat vodní pára do interiéru.

V systému S2 s parozábranou, došlo v bodě I_A na rozhraní nejprve k podobnému nárůstu RH po skrápění jako v nově sledovaném bodě V_B. Následně v tomto systému překvapivě relativní vlhkost poklesla a charakter průběhu si dále udržoval nižší úroveň než průběh v bodě V_B. To je zřejmě způsobeno tím, že u systému S2 s parozábranou k rozhraní nejprve přiléhá difuzně velmi otevřený izolant z minerální vlny. Oproti systému s vakuovými panely tak zde vzniká prostor vyplněný vzduchem, ve kterém se prostupující vodní pára z exteriéru může více rozptýlit. Proto je zřejmě na rozhraní izolace a zdiva v bodě I_A nižší koncentrace vodní páry, a tudíž i průběh RH se snížil. Vhodnějším místem pro sledování vlivu skrápění pro systém S2 tedy bude spíše přímo čidlo mezi izolací z minerálních vláken a parozábranou, která představuje významnou bariéru pro vodní páru. Porovnání situace na rozhraní a před parozábranou je zobrazeno na obr. 99.



obr. 99 – Kropící experiment – průměrné denní RH a koncentrace vodní páry pro systém S2 v místě typické skladby (I_A)

Z obr. 99 je patrné, že relativní vlhkost po skrápění fasády skutečně vzrostla výrazněji před parozábranou než v místě rozhraní. Bylo zde dokonce dosaženo hodnoty RH 100 %. Zároveň si lze ale všimnout, že dopočtené hodnoty koncentrace vodní páry jsou zde nejprve mírně vyšší na rozhraní a až později se koncentrace v obou sledovaných místech téměř vyrovnávají. Vyšší relativní vlhkosti před parozábranou, tak pravděpodobně zajišťuje vliv teploty. Z porovnání průběhů RH a úhrnů slunečního ozáření fasády je totiž dobře patrné, že po obdobích s vysokými úhrny ozáření dochází k poklesu RH na rozhraní, které se ohřeje, a k vysokému nárůstu RH před parozábranou, kde jsou teploty vlivem odizolování nižší. Při ochlazení je pak situace zase opačná. I při podobném průběhu koncentrace vodní páry je tedy průběh RH na rozhraní a před parozábranou značně odlišný. Jakmile pak v září nastal výrazný pokles venkovních teplot, došlo i k výraznému poklesu koncentrace vodní páry na obou sledovaných místech. Zatímco pro průběh RH před parozábranou, kde se pokles



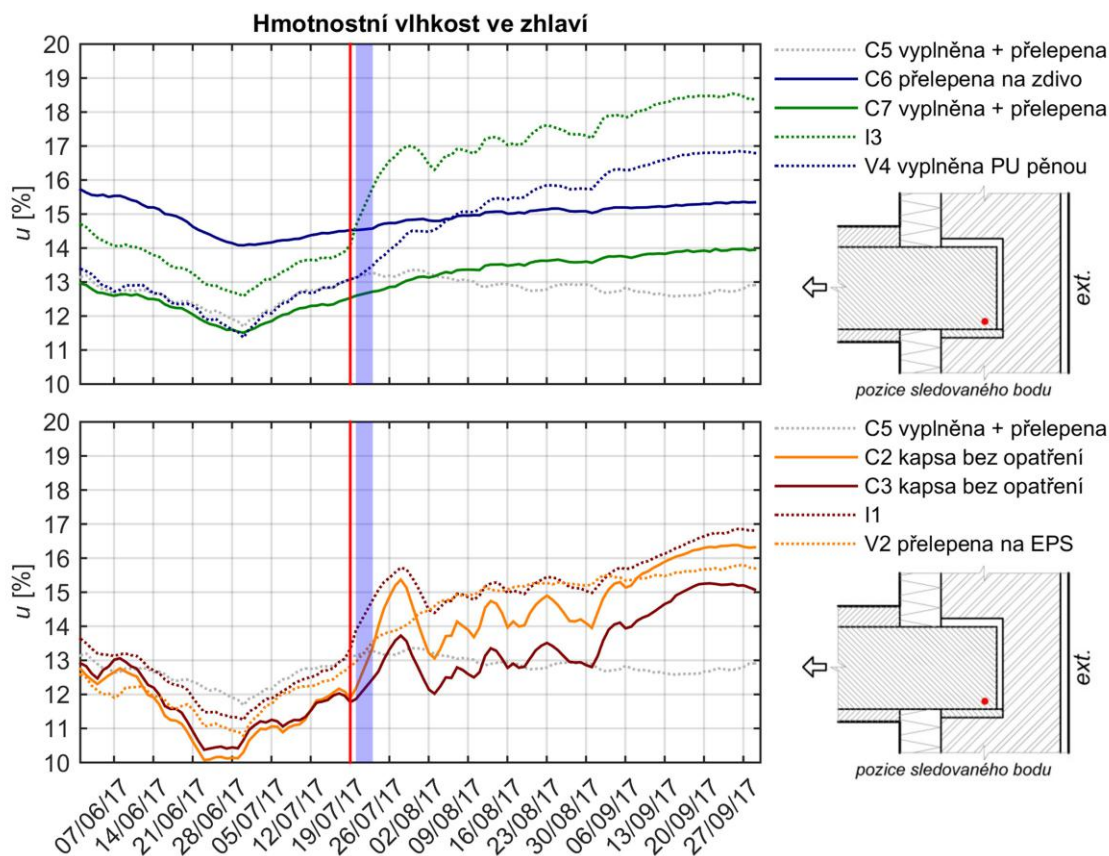
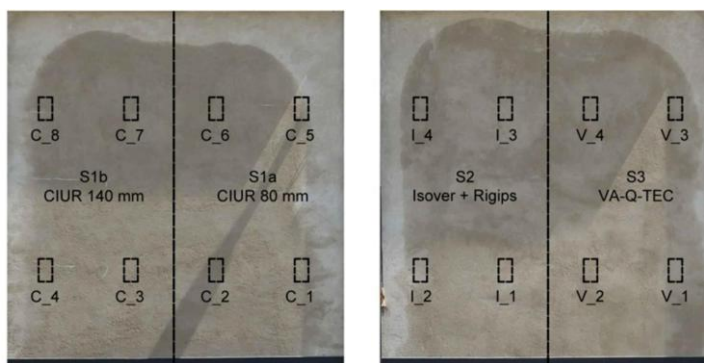
venkovních teplot projevily minimálně, to znamenalo také značný pokles, tak na ochlazeném rozhraní i takto snížená koncentrace vodní páry znamenala zvýšení RH.

Nicméně oproti bodu V_B na rozhraní systému s vakuovými panely se situace v bodě I_A na rozhraní i před parozábranou jeví jako dlouhodobě bezpečnější. Před parozábranou sice nastává po skrápění období s vysokými RH až 100 %, ale na začátku září dochází k výraznému poklesu RH pod 80 %. Na rozhraní má RH sice stále stoupající charakter, ale hranice 80 % je překročena až na konci sledovaného období. Oproti tomu v bodě V_B na rozhraní je RH nad 80 % již krátce po skrápění a na konci sledovaného období je zde relativní vlhkost okolo 90 %. Otázkou je, do jaké míry je průběh RH v systému S2 ovlivněn použitím parozábrany s proměnným difuzním odporem. Zajímavé by bylo porovnání s obdobným systémem s běžnou parozábranou. Již z obr. 92 je však zřejmé, že v prostoru trámových kapes v systému S2 nezajistilo ani použití „inteligentní“ parozábrany bezpečnou úroveň RH.



6.2.6 Vyhodnocení následků skrápění

Doposud byl sledován především vliv skrápění na zvýšení relativní vlhkosti v trámových kapsách a ve skladbě zateplovacích systémů. Pro představu o skutečném dosavadním dopadu skrápěcího experimentu především na trámová zhlaví je v následující části zobrazen průběh hmotnostní vlhkosti naměřený snímači na koncích stropních trámů. Dále je zde zobrazen průběh indexu růstu plísní stanoveného na základě teplot a RH v trámových kapsách pomocí výpočetního modelu (VTT mold model - Viitanen and Ojanen 2007) [17]. Jako další vstupní parametry byl zadán druh dřeva – smrk a úprava povrchu – hoblovaný. Časový krok výpočtu byl uvažován hodinový (na základě hodinových dat teplot a RH). Zde zobrazené výsledky jsou následně vyneseny denními průměry. Pro vyhodnocení byly použity pouze vybrané kapsy dostatečně vystavené skrápění (kapsy u středu pole - totožné jako na obr. 92) a jako referenční byla zobrazena i kapsa C_5, která byla skrápěním nejméně zasažena.

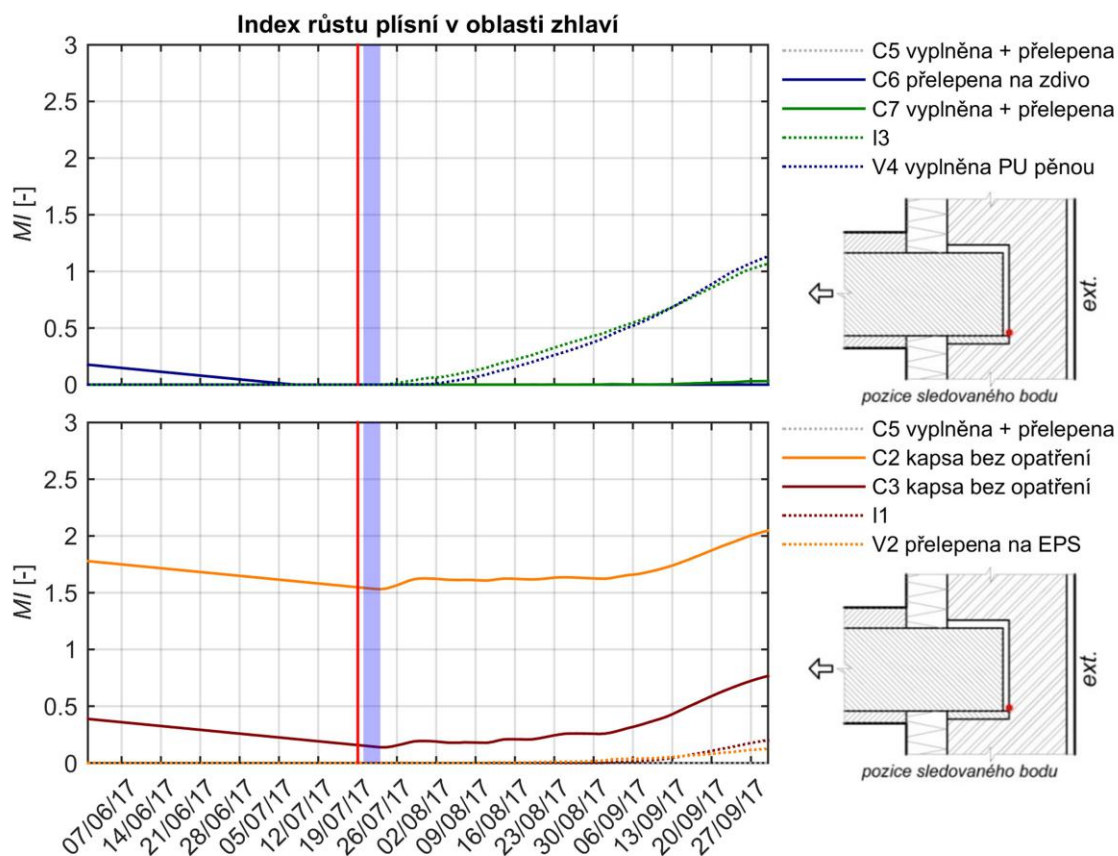


obr. 100 – Kropící experiment – hmotnostní vlhkost trámových zhlaví + pohled na skropená testovací pole



Při porovnání obr. 100 a 92 na str. 117 je patrné, že průběhy hmotnostní vlhkosti ve zhlaví překvapivě rychle reagují na změny RH v kapsách. Zpoždění mezi výkyvy RH a reakcí hmotnostní vlhkosti jsou přibližně dvoudenní. Dále je dobře vidět, že i když průběhy mají podobný charakter je dle očekávání průběh hmotnostní vlhkosti ve zhlaví hladší. Na obr. 100 lze pozorovat, že nejméně reagovala zhlaví v utěsněných kapsách C_6 a C_7 v difuzně otevřeném systému s dřevovláknitými deskami. Oproti referenční utěsněné kapse C_5 (málo zasažena skrápěním) zde ale stále přetrvává stoupající charakter hmotnostní vlhkosti, takže vliv skrápění je tu zřejmý. Zhlaví v kapse I_3 v systému s parozábranou jako jediné přesáhlo během sledovaného období kritickou hodnotu hmotnostní vlhkosti 18 %. V tomto zhlaví byl ale oproti ostatním zhlavím se stejnou úpravou průběh hmotnostní vlhkosti vyšší po celou dobu dlouhodobého experimentu. To je patrné i zde při porovnání s kapsou I_1 se stejnou úpravou. U zhlaví C_2 a C_3 v otevřených kapsách dochází zase k odlišnému průběhu až po skrápění. Průběh RH přitom byl podobný a intenzita skrápění také. Tyto odlišnosti ale mohou být snadno způsobeny anomáliemi ve struktuře dřeva, kde je osazen snímač vlhkosti materiálu. Mezi elektrodami totiž může být suk nebo prasklina což může měření ovlivňovat.

Kritická hodnota hmotnostní vlhkosti dřeva 18 % tedy byla překročena pouze v případě zhlaví I_3. Senzor vlhkosti materiálu ale stanovuje hmotnostní vlhkost dřeva hlouběji pod povrchem. Při povrchu zhlaví tedy mohou po skrápění nastat pravděpodobně i vyšší hodnoty hmotnostní vlhkosti. Navíc průběhy relativní vlhkosti v některých kapsách byly dlouhodobě nad 80 % v kombinaci s příznivými teplotami pro vznik plísní. Na obr. 101 je tedy zobrazen průběh indexu růstu plísní stanovený dle [17].



obr. 101 – Kropící experiment – Index růstu plísní v oblasti trámových zhlaví



Na obr. 101 lze pozorovat, že nejvyšší riziko vzniků plísní nastává u zhlaví I_3, V_4 a C_2. V případě zhlaví I_3 v systému s parozábranou a zhlaví V_4 v systému s vakuovými panely je prudký vzestup indexu růstu plísní až po skrápění fasády. Zároveň se jedná o kapsy, u kterých kropící experiment způsobil nejrizikovější vlhkostní podmínky. Relativní vlhkost v kapse C_2 byla sice kropícím experimentem překvapivě také značně ovlivněna (zřejmě vlivem přiléhající utěsněné stropní konstrukce viz str. 119), ale index růstu plísní zde měl vyšší hodnotu již v předešlém období. Po skrápění pak došlo u obou otevřených kapes C_2 a C_3 k podobnému mírnějšímu navýšení. To že měly otevřené kapsy vyšší průběh indexu růstu plísní již před skrápěním je způsobeno téměř jistě tím, že v chladných obdobích v nich nastávají horší tepelně vlhkostní podmínky než v utěsněných kapsách. Nižší index růstu plísní pro otevřenou kapsu C_3 lze pak přisoudit mírnějšímu průběhu právě během zimních období, způsobenému zřejmě již diskutovanou netěsností ve zdivu před kapsou.

Pro vyhodnocení míry rizika vzniku plísní je přiložena stupnice MI dle [17]

0 - žádný růst

1 - malé množství plísně na povrchu (sledováno mikroskopem), počáteční fáze místního růstu

2 - několik lokálních kolonií růstu plísní na povrchu (sledováno mikroskopem)

3 - vizuální nálezy plísní na povrchu, < 10% pokrytí nebo < 50% pokrytí při sled. mikroskopem

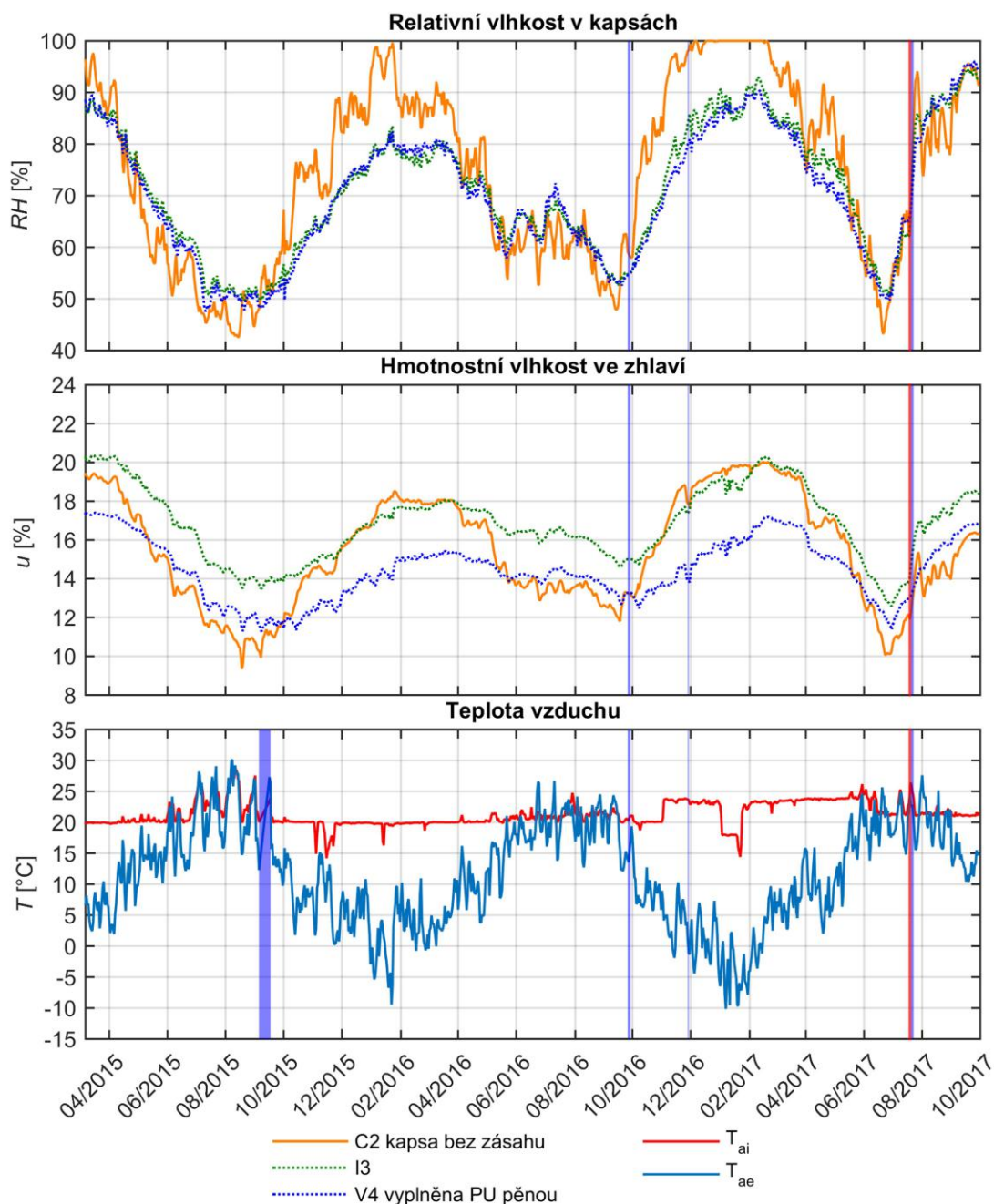
4 - vizuální nálezy plísní na povrchu, 10 - 50% pokrytí nebo >50% pokrytí při sled. mikroskopem

5 - velký růst na povrchu, > 50% pokrytí (vizuální)

6 - silný růst, pokrytí 100%

Hodnoty indexu růstu plísní pro kapsy nejvíce ovlivněné skrápěním (viz obr. 101) jsou ve sledovaném období kropícího experimentu prozatím pod hodnotou MI = 2. Lze zde tedy očekávat maximálně mikroskopický výskyt plísní. Trend RH v těchto intenzivně skropených kapsách je ale stále převážně rostoucí. Zároveň sledované období končí v říjnu 2017 a lze tak očekávat další zhoršení vlhkostní situace vlivem poklesu teplot. Chladné období na přelomu roku 2017 / 2018 tak bude zřejmě pro trémová zhlaví kritické a bude tedy velmi zajímavé pro další sledování.

Pro obecnější představu o vlivu kropícího experimentu na chování trémových kapes je na obr. 102 zobrazen průběh RH a hmotnostní vlhkosti zhlaví v nejvíce ovlivněných kapsách za celé dosavadní období dlouhodobého experimentu na UCEEBu.



obr. 102 - Denní průměrné hodnoty RH v kapsách a hmotnostní vlhkosti ve zhlavích + denní průměrné teploty vnitřního a venkovního vzduchu s vyznačením dne umělého skrápění (červená čára), významnější výpadky měření nad 48 hodin jsou vyznačeny modrými oblastmi

Z obr. 102 je patrné, že v období po kropícím experimentu (vyznačeno svislou červenou čarou) je situace v kapsách výrazně horší oproti předešlým letním obdobím. Zatímco v předešlých letech došlo v období od srpna do října k poklesu RH v kapsách na úroveň 50 až 55 %, tak v roce 2017 je v tomto období ovlivněném skrápěním RH v kapsách nad 80 % a má stále rostoucí charakter. I průběh hmotnostní vlhkosti v jednotlivých zhlavích byl během konce léta 2015 a 2016 níže přibližně o 2 až 4 % než v roce 2017. Nicméně je nutné zdůraznit, že vliv skrápění z 19. 7. 2017 je značně podpořen i těsně předchozím obdobím, kdy na konci června 2017 prudce stoupla relativní vlhkost v kapsách, jak je z obr. 102 dobře patrné. To bylo zřejmé



způsobeno náhlým zvýšením RH v exteriéru a mírným poklesem venkovních teplot a úhrnů slunečního záření. Zároveň vlivem předchozího odstavení vlhčení v interiéru došlo zřejmě k obrácení difuzní toku vodní páry a probíhal nyní z exteriéru do interiéru (toto období bylo sledováno již v předchozí kapitole 5 – Vliv větrem hnaného deště. Ihned po skrápění nastalo teplé a slunečné období, což zřejmě zajistilo účinný transport vlhkosti směrem k interiéru. Následně pak ke zvyšování RH v kapsách v druhé polovině léta 2017 přispíval i pokles venkovních teplot. Kombinací těchto vlivů tedy došlo v dostatečně skropených kapsách k výraznému zhoršení vlhkostních podmínek a v porovnání s předchozími roky lze tedy důvodně očekávat i výraznější zhoršení během zimy 2017 / 2018.

6.3 Shrnutí výsledků pozorování

Skrápěcím experimentem ze dne 19. 7. 2017 byl simulován silný letní déšť za současného působení větru směrem na fasádu testovacích polí. Intenzita skrápění činila průměrně $1,7 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$. Při nejvýraznější události skutečného větrem hnaného deště za období experimentu dopadlo na fasádu průměrně $0,15 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$. Oproti reálnému vystavení testovacích polí větrem hnanému dešti, se tak jednalo o mnohonásobně vyšší intenzitu. Z maximálního minutového úhrnu deště na horizontální rovinu za sledované období byla ale zjednodušeně vypočtená teoretická hodnota zatížení fasády větrem hnaným deštěm (viz strana 97) o intenzitě $1,88 \text{ l}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$. Této hodnotě se intenzita umělého skrápění velmi podobá a nemusí se tak jednat o nereálné zatížení fasády deštěm.

Skrápění probíhalo na každé z testovacích polí 40 minut a za tu dobu se do stěny vsáкло průměrně $13,4 \text{ l}/\text{m}^2$. Bohužel vzhledem k nedostatečným rozměrům kropící stěny nedošlo k celoplošnému skropení testovacího pole. Zároveň byly kropící trysky vůči poloze trámových kapes v testovacím poli nerovnoměrně rozmístěny. Vlivem toho byly jednotlivé kapsy zřejmě skrápěny s rozdílnou intenzitou a krajní kapsy byly zasaženy výrazně méně. Nicméně po skrápění následovalo teplé a slunečné období, což bylo předpokladem pro zajištění účinného transportu vodní páry směrem k interiéru nejen kapilárními silami, ale i difuzí.

Kapsy

Z průběhů relativních vlhkostí naměřených v jednotlivých kapsách po skrápění bylo zřejmé, že krajní kapsy C_1, C_4, C_5, C_8, I_2, I_4, V_1 a V_3 byly skutečně výrazně méně ovlivněny kropením než vnitřní kapsy C_2, C_3, C_6, C_7, I_1, I_3, V_2 a V_4. Navíc bylo pozorováno, že vnitřní horní kapsy byly skrápěny zřejmě s větší intenzitou než vnitřní spodní kapsy (vlivem polohy trysek). Nebylo tak možné objektivně porovnávat všechny různé úpravy kapes mezi sebou. Nicméně vnitřní intenzivně skrápěné kapsy byly podrobněji sledovány.

Nejvíce nepříznivá vlhkostní situace po skrápění nastala u kapsy I_3 v systému S2 s „inteligentní“ parozábranou. Relativní vlhkost zde vzrostla krátce po kropení nad 80 % a měla stále stoupající trend až na konec sledovaného období (začátek října 2017). Parozábrana s proměnným difuzním odporem, tak zřejmě nezajistí dostatečně účinné vysychání směrem do interiéru. Spodní kapsa I_1 se stejnou úpravou reagovala méně zřejmě vlivem menší intenzity skrápění. I zde je ale stále stoupající trend a na konci sledovaného období RH téměř 90 %.



Velmi podobným způsobem jako kapsa I_3 zareagovala i kapsa V_4 v systému S3 s vakuovými panely. Kapsa V_4 je vyplněna PU pěnou bez dalšího dodatečného utěsnění kolem zhlaví a zareagovala výrazně více než spodní vnitřní kapsa V_2, která je prázdná, ale v úrovni vnitřního povrchu stěny je utěsněná airstop páskou. Zřejmě se tak potvrdila menší intenzita skrápění spodní kapsy V_2. Další možností je, že u vyplněné kapsy V_4 je před čelem vytvořena dutina, kde se snáze zvýší koncentrace vodní páry a tím i relativní vlhkost. Nicméně i v méně reagující kapse V_2 je na konci sledovaného období také RH nad 80 %.

Nejbezpečněji překvapivě reagují utěsněné kapsy C_6 a C_7 v systému S1a a S1b s dřevovláknitými deskami. Obě kapsy jsou přelepené airstop páskou na zdivo. Jako jediné z intenzivně skrápěných kapes přitom nezareagovaly skokovým zvýšením RH. Zároveň se zde i přes stoupající charakter udržuje nejnižší průběh RH ze všech dostatečně skropených vnitřních kapes. Zřejmě tím, že se jedná o difuzně otevřený systém, mohlo docházet boční difuzí vodní páry k obcházení utěsnění a následnému šíření vodní páry do interiéru. Kapsa C_7, která je mimo přelepení Airstop páskou vyplněna dřevovláknitou izolací, má mírně vyšší průběh RH, který ke konci sledovaného období překračuje hodnotu 80 %. Jelikož je ale každá z kapes v systému s jinou tloušťkou izolace, nelze tento jev přisoudit jednoznačně odlišné úpravě.

Největším překvapením skrápěcího experimentu bylo ale prudké zvýšení RH v otevřených kapsách C_2 a C_3, které představují situaci bez zásahu do stropní konstrukce. Relativní vlhkost zde proti předpokladům experimentu krátce po skrápění vzrostla až na hodnotu okolo 90 %. Následně byl průběh značně ovlivňován výkyvy venkovních teplot, což sice odpovídá charakteru otevřených kapes, ale stále se zde udržovaly podezřele vysoké relativní vlhkosti. Na konci sledovaného období zde dosahovala relativní vlhkost hodnoty 95 %. Nepředpokládané chování bylo nakonec přisouzeno příliš důkladně utěsněné stropní konstrukci, se kterou jsou otevřené kapsy přímo propojeny. Otevřené kapsy se pak společně s těsnou a relativně malou stropní dutinou zřejmě chovaly jako utěsněná kapsa větších rozměrů. V tomto ohledu se zřejmě jedná o slabinu experimentu, která pravděpodobně neodpovídá vlastnostem skutečné stropní konstrukce.

Skladby

Situace na rozhraní zateplovacích systémů a zdiva v místě typické skladby byla pro komplexnost také sledována. Obecně bylo zjištěno, že průběhy relativní vlhkosti po skrápění jsou zde nižší než v případě samotných kapes. Dlouhodobě nejhorší situace nastala dle očekávání na rozhraní difuzně uzavřeného systému s vakuovými deskami. Potvrdil to ale paradoxně až druhý sledovaný bod v monitorované oblasti V_B na styku tří vakuových panelů. Průběh vlhkosti zde měl podobný charakter jako v hodnocené kapse V_4 a na konci sledovaného období zde byla relativní vlhkost okolo 90 %.

U systému S2 bylo v monitorovaném bodě I_A sledováno i místo mezi izolací z minerálních vláken a parozábranou. Dle očekávání zde po skrápění došlo k vyšším RH než na rozhraní izolace a zdiva. Zároveň zde byla pozorována značná závislost vzrůstu RH s vyššími úhrny slunečního záření na fasádě. V nejteplejším období pak mezi parozábranou a izolací vzrostla RH až na 100 %. Následně zde s poklesem venkovních teplot na začátku září výrazně klesl i průběh



relativní vlhkosti až na hodnotu 55 %. Oproti tomu na rozhraní měla relativní vlhkost stále tendenci narůstat a na konci sledovaného období zde byla RH nad 80 %.

Překvapivě vysoké relativní vlhkosti okolo 80 % nastaly na konci sledovaného období i na rozhraní difuzně otevřených systémů S1a a S1b. Větší rozdíl v průběhu RH mezi těmito systémy, které se liší pouze tloušťkou izolantu, přitom nastal krátce po skrápění. Hodnota RH na rozhraní v systému S1a s tloušťkou izolantu 80 mm zde byla přibližně o 15 % vyšší než v bodě na rozhraní systému S1b s tloušťkou izolantu 140 mm. Intenzita skrápění fasády a průběh teploty na rozhraní zde přitom byly totožné. Zvýšená relativní vlhkost u systému S1a tedy byla přisouzena možné dutině mezi izolantem a zdivem. Tudy by se pak mohla snáze šířit vlhkost z blízkých otevřených trámových kapes a ovlivňovat RH na senzoru na rozhraní v místě typické skladby.

Celkový dopad

Na konci kapitoly byl zjišťován dosavadní dopad vysokých relativních vlhkostí v intenzivně skropených kapsách. Ukázalo se, že na konci sledovaného období na začátku října 2017 byla kritická hranice hmotnostní vlhkosti dřeva 18 % mírně překonána pouze u zhlaví I_3 (systém s parozábranou). Index růstu plísni stanovený metodou dle [17] pak ukázal, že na konci sledovaného období hrozí lokální mikroskopický výskyt plísni především v oblasti zhlaví I_3, V_4 a C_2. Zatímco, ale u zhlaví I_3 a V_4 riziko vzniku plísni vzrostlo až po skrápění, tak v otevřené kapse C_2 bylo zvýšené již vlivem tepelně vlhkostních podmínek z předchozího období. Po skrápění zde pak došlo k dalšímu zvýšení rizika vzniku plísni.

Již v krátkém sledovaném období do října 2017 se tedy vlivem kropícího experimentu z 19. 7. 2017 projevil riziko vzniku plísni na trámových zhlavích I_3, V_4 a C_2. Ale i ve všech ostatních dostatečně skrápěných kapsách přetrvávají až do konce sledovaného období vysoké relativní vlhkosti okolo 80 %. V následujícím období od října 2017 lze přitom očekávat další pokles venkovních teplot a tedy i další zhoršení vlhkostních podmínek v oblasti trámových zhlaví. Určitě tak bude velmi zajímavé sledovat i nadále situaci nejen v oblasti trámových zhlaví.

Již nyní lze ale říci, že větrem hnaný déšť o intenzitě, která byla simulována kropícím experimentem, by měl zásadní dopad na zhoršení vlhkostní situace nejen v trámových kapsách, ale v celém systému vnitřního zateplení - alespoň tedy v případech konstrukcí stěn, které přibližně odpovídají testovacím zděným stěnám v rámci experimentu na UCEEBu. Je nutné totiž znovu zdůraznit, že stěny zde mají tloušťku pouhých 300 mm. U reálných objektů se lze zpravidla setkat s většími tloušťkami zdiva. Otázkou tak stále zůstává, jaký vliv by měl takto intenzivní větrem hnaný déšť na změnu vlhkostních podmínek v podobně řešených trámových kapsách, pokud by zdivo mělo tloušťku například 600 mm. Zajímavé by přitom bylo sledovat i vliv různých povrchových úprav fasády. Například, jak by se celková situace změnila, pokud by zdivo bylo ponecháno jako režné, nebo by byla naopak aplikována vodoodpudivá povrchová úprava.



7 Možnosti zlepšení tepelně vlhkostních podmínek v oblasti trémového zhlaví

Tato studie se nejprve zabývá tvorbou zjednodušeného, ale dostatečně výstižného výpočtového modelu trémového zhlaví ve zdivu s vnitřním zateplením. Pro možnost porovnání modelované situace a reálného stavu je použito jedno z trémových zhlaví sledovaných v rámci experimentu na UCEEBu. Výpočtový model je vzhledem k možnostem použitého softwaru řešen ve stacionárním stavu. Z naměřených údajů v rámci experimentu bylo vyhledáno období v chladné části roku, které lze považovat za přibližně ustálený stav. Tímto způsobem byly získány referenční okrajové podmínky a možnost zhodnocení věrohodnosti modelu. V dalším kroku jsou modelována různá opatření, která by mohla zlepšit tepelně vlhkostní podmínky v oblasti trémové kapsy. Vliv jednotlivých opatření je pak vyhodnocován jak pro referenční, tak posléze i pro návrhové okrajové podmínky v zimním období.

7.1 Tvorba referenčního modelu

7.1.1 Použitý software

Pro tvorbu výpočtového modelu byl použit software CUBE 3D 2017 od Svoboda software umožňující výpočet 3D stacionárního pole teplot a tlaků vodní páry podle EN ISO 10211 metodou konečných prvků. Oblast kondenzace je zde řešena iteračně. Pokud při výpočtu nastane, že se částečný tlak vodní páry nachází nad hodnotou částečného tlaku nasycené vodní páry, je nalezen vrchol s největším rozdílem tlaků a následně je tento rozdíl vynulován a výpočet pole tlaků vodní páry probíhá opětovně. Oblast kondenzace je tímto způsobem vymezena přesněji než při prostém porovnání částečného tlaku vodní páry s částečným tlakem nasycené vodní páry.

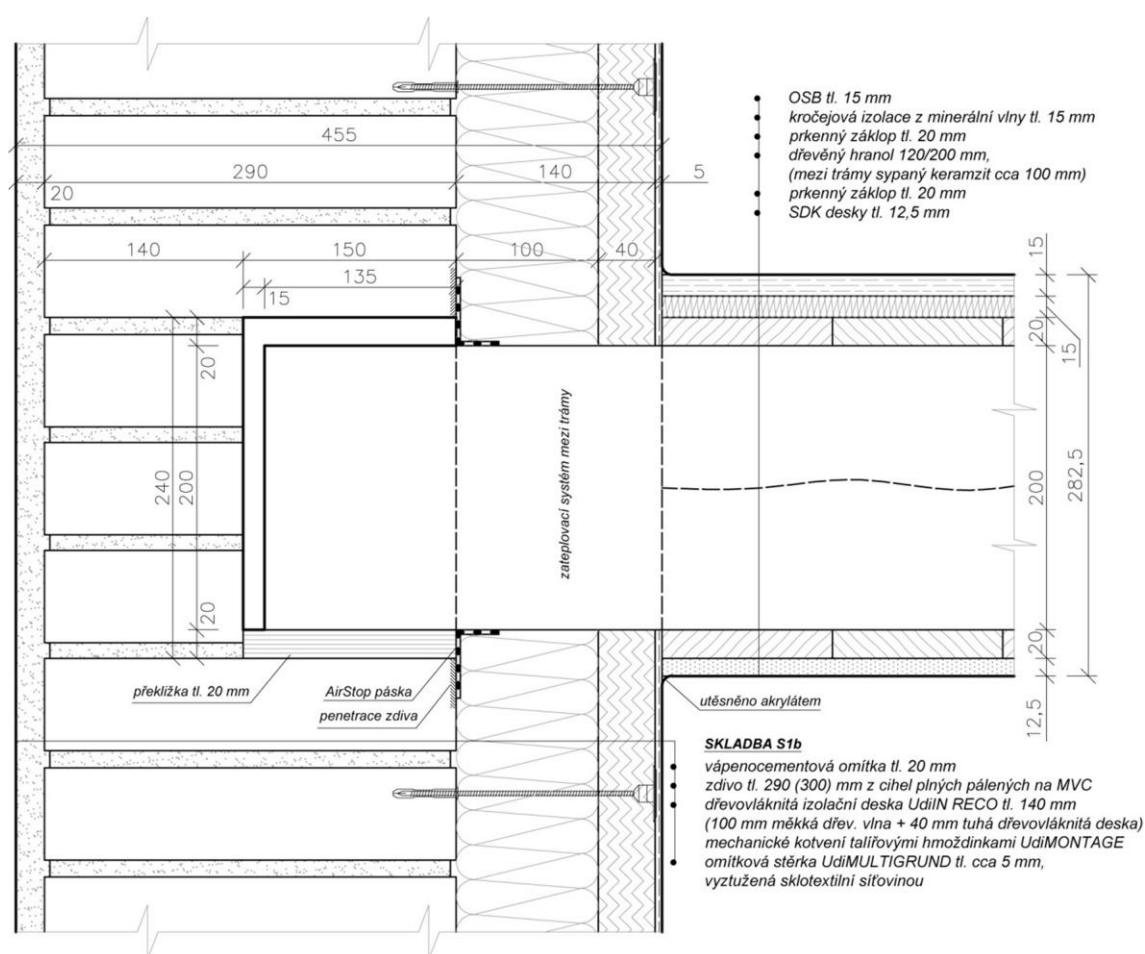
7.1.2 Výběr referenčního zhlaví

Jelikož program CUBE 3D modeluje pouze šíření tepla vedením a šíření vodní páry difúzí, připadají v úvahu jako vhodné varianty pro referenční model pouze ta zhlaví, kde je co nejvíce zamezeno konvektivnímu pohybu vzduchu. Kapsy ve stropní konstrukci bez zásahu (C_1 až C_4 viz kapitola 3 - Popis experimentu), kde je vzduchová dutina stropu přímo propojena s trémovou kapsou, jsou tedy pro tvorbu modelu nevhodné. Naopak jako nejvhodnější se jeví varianty, kde je vzduchová dutina v kapse vyplněna tepelněizolačním materiálem a kapsa je vzduchotěsně utěsněna. Jelikož ale některá navrhovaná opatření budou uvažovat s prázdnou vzduchovou dutinou okolo trémového zhlaví, byla jako referenční zvolena situace s prázdnou dutinou a vzduchotěsným utěsněním kapsy.



I v samotné uzavřené dutině dochází ovšem k proudění vzduchu. Zároveň zde ve skutečnosti dochází i k přenosu tepla sáláním mezi povrchy v dutině. Vliv přenosu tepla prouděním a sáláním v kapse musí tedy být zohledněn ekvivalentní hodnotou součinitele tepelné vodivosti (viz kapitola 7.1.5).

Pro výpočtový model bylo zvoleno zhlaví C_8 v systému zateplení Ciur Unger Diffutherm (dřevovláknité desky UdiIN Reco tl. 140 mm). Kapsa C_8 je ponechána s prázdnou vzduchovou dutinou a je utěsněna v úrovni rozhraní izolace / zdivo airstop páskou (viz obr. 103).

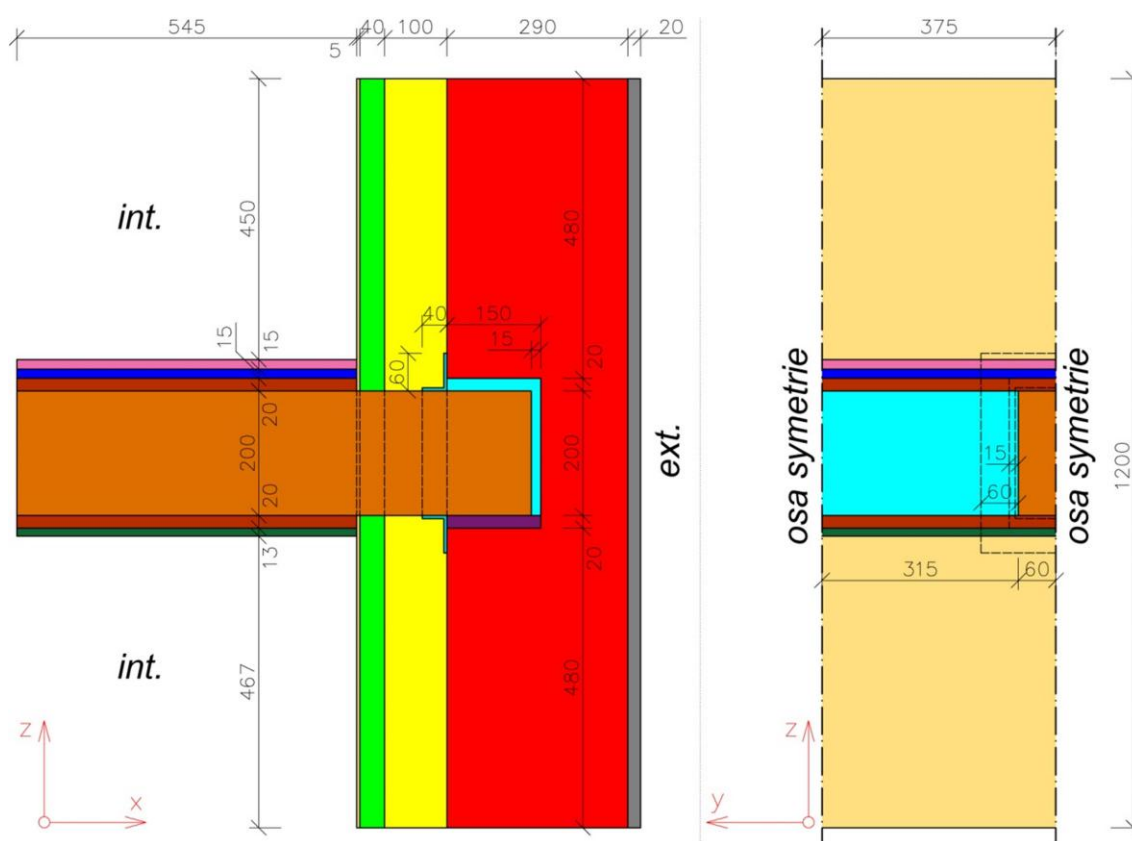


obr. 103 – Svislý řez zhlavím C_8



7.1.3 Geometrie modelu

Výpočtový model zachycuje charakteristický výsek reálné konstrukce zhlaví C_8. Je respektována osová vzdálenost stropních trámů 750 mm, která je použita v testovacích polích. Geometrie výpočtového modelu je znázorněna na obr. 104. Oproti skutečnosti je pouze zvětšena tloušťka airstop pásky (včetně přepočtu faktoru difuzního odporu), a to především z důvodu snížit přílišnou hustotu výpočetní sítě a tím zkrátit dobu výpočtu. Dále není uvažován násyp z keramzitu ve stropní dutině, jelikož v tomto případě lze předpokládat jeho zanedbatelný vliv na podmínky v trámové kapse. Zároveň je použití násypu ve stropní dutině při zateplení procházejícím rovinou stropu nepravděpodobné. Jelikož se jedná o úlohu symetrickou podle svislé osy a lze takto pojmout i uvažované varianty opatření, je v modelu této symetrie vhodně využito pro další úsporu výpočetního času.



obr. 104 – Schéma geometrie výpočtového modelu s barevným označením materiálů



7.1.4 Materiálové vlastnosti

Tabulka 7 uvádí přehled materiálů a jejich vlastností použitých pro výpočtový model. Pro přehlednost jsou jednotlivé materiály označeny barvou, která odkazuje na jejich zastoupení ve výpočtovém modelu (viz obr. 104). Vlastnosti materiálů jsou v případě konkrétních výrobků převzaty z technických listů výrobců. U ostatních blíže nespecifikovaných materiálů byla použita data z materiálové knihovny programu CUBE 3D 2017.

Tabulka 7 – Vlastnosti materiálů

Ozn.	Popis materiálu	Objemová hmotnost ρ_d [kg/m ³]	Měrná tepelná kapacita c [J/(kg.K)]	Součinitel tepelné vodivosti $\lambda^{(1)}$ [W/(m.K)]			Faktor difuzního odporu μ [-]		
				λ_x	λ_y	λ_z	μ_x	μ_y	μ_z
	Vnější omítka jádrová - vápenocementová	1800	800	0,74			25		
	Zdivo z cihel plných pálených	1700	900	0,8			8,5		
	Dřevovláknité desky UdiIN RECO flexibilní část	55	2100	0,04			1		
	Dřevovláknité desky UdiIN RECO omítací část	250	2100	0,05			5		
	Vnitřní omítková stěrka Udi Multigrund	1600	1000	0,55			60 ⁽²⁾		
	Dřevěný hranol – smrkové dřevo	400	2510	0,41	0,18	0,18	4,5	157	157
	Záklop z prken	400	2510	0,18	0,41	0,18	157	4,5	50 ⁽³⁾
	Podlaha z OSB desek	650	1700	0,13			80		
	Kročejová izolace z minerální vlny	148	800	0,04			1		
	Podhled ze sádkokartonových desek	750	1060	0,22			9		
	Podložka z překližky	500	1600	0,13			200	200	200
	Airstop páska Isocell ⁽⁴⁾	55	2100	0,04			2451		
	Uzavřené vzduchové dutiny	1,2	1010	viz kapitola 6.1.5					

⁽¹⁾ Ve výpočtovém modelu je uvažováno s návrhovými hodnotami součinitele tepelné vodivosti

⁽²⁾ Laboratorně stanovená hodnota [UCEEB]

⁽³⁾ Faktor difuzního odporu ve směru osy z je snížen z důvodu zohlednění mezer mezi prky záklopu.

⁽⁴⁾ Airstop páska byla pro úsporu zahuštění výpočetní sítě vymodelována v tl. 5 mm oproti skutečným 0,2 mm, faktor difuzního odporu pro Airstop pásku je tedy v modelu snížen v opačném poměru ze skutečných 61 275 na 2 451, vliv pásky na ovlivnění teplotního pole je ve skutečnosti zanedbatelný a ostatní materiálové vlastnosti jsou proto zadány totožně jako u okolního materiálu - flexibilní části dřevovláknité desky UdiIN RECO.

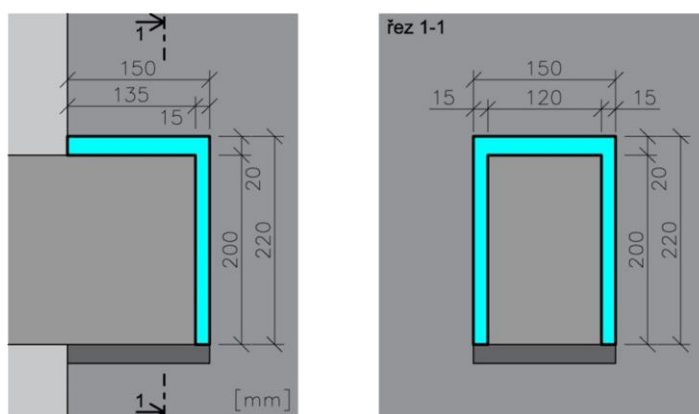


7.1.5 Stanovení ekvivalentních parametrů vzduchových dutin

V této kapitole je popsán postup stanovení ekvivalentní tepelné vodivosti a faktoru difuzního odporu vzduchových dutin obsažených ve výpočtovém modelu.

Ekvivalentní tepelná vodivost trámové kapsy

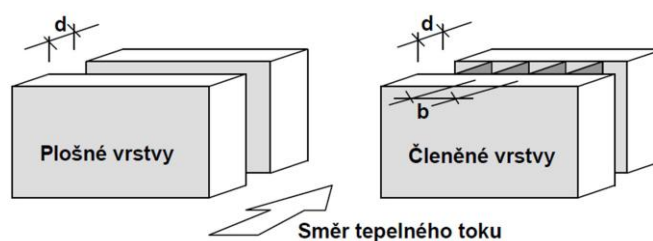
Pro poměrně komplikovanou geometrii této dutiny viz obr. 105 není možné určit jedinou hodnotu ekvivalentní tepelné vodivosti vystihující dostatečně vlastnosti vzduchové dutiny. Po zjednodušení uvažujícím s rozdělením kapsy na více jednoduchých dutin je možné stanovit ekvivalentní tepelnou vodivost pro každou z dílčích dutin, například dle ČSN EN ISO 6946 [21] nebo dle ČSN EN ISO 10077 [22].



obr. 105 – Skutečná geometrie vzduchové dutiny kolem trámového zhlaví

Postup dle ČSN EN ISO 6946 (dále jen [21])

Dle [21] lze stanovit ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti λ_g pro nevětrané členěné vzduchové vrstvy, jejichž tloušťka d ve směru tepelného toku nepřekračuje 0,1 násobek šířky b (viz schéma převzaté z normy – obr. 106) následujícím způsobem:



obr. 106 – Vzduchové vrstvy dle ČSN EN ISO 6946



$$\lambda_g = \frac{d}{R_g} \quad [W/(m.K)] \quad (1)$$

kde:

λ_g = ekvivalentní součinitel tepelné vodivosti nevětrané vzduchové vrstvy [W/(m.K)]

d = tloušťka vzduchové vrstvy ve směru tepelného toku [m]

R_g = tepelný odpor nevětrané vzduchové vrstvy [$m^2.K/W$]

$$R_g = \frac{1}{h_a + h_r} \quad [m^2.K/W] \quad (2)$$

kde:

h_a = součinitel přestupu tepla vedením a prouděním [W/($m^2.K$)],

h_r = součinitel přestupu tepla sáláním [W/($m^2.K$)]

$$h_a = \max \left\{ 1,25 ; \frac{0,025}{d} \right\} \quad [W/(m^2.K)] \quad \text{-pro tepelný tok vodorovně} \quad (3)$$

$$h_a = \max \left\{ 1,95 ; \frac{0,025}{d} \right\} \quad [W/(m^2.K)] \quad \text{-pro tepelný tok nahoru} \quad (4)$$

$$h_a = \max \left\{ 0,12 \cdot d^{-0,44} ; \frac{0,025}{d} \right\} \quad [W/(m^2.K)] \quad \text{-pro tepelný tok dolů} \quad (5)$$

poznámka:

výše uvedené vztahy pro výpočet součinitele přestupu tepla vedením a prouděním lze uvažovat pouze při rozdílu teplot obou povrchů dutiny do 5°C

$$h_r = \frac{2,27 \cdot 10^{-7} \cdot T_m^3}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 2 + \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \frac{d^2}{b^2} - \frac{b}{d}}}} \quad [W/(m^2.K)] \quad (6)$$

kde:

T_m = střední absolutní teplota [K]

ε_1 a ε_2 = emisivity povrchů [-]

b = šířka vzduchové dutiny [m] viz obr. 106

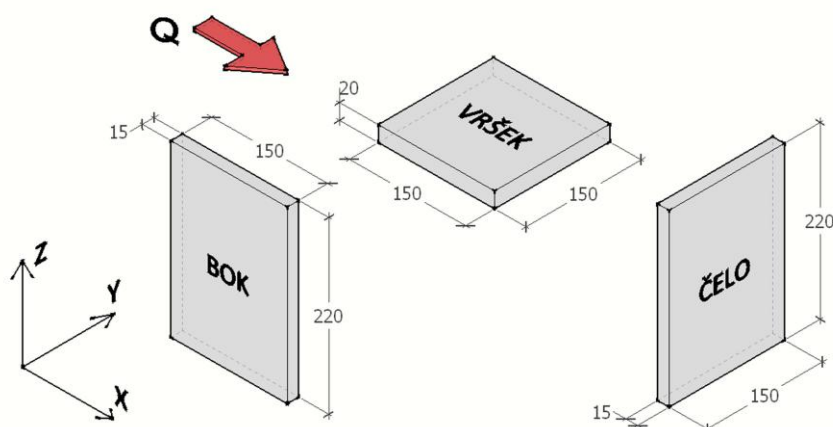
Z měřených údajů v rámci experimentu lze ve vzduchové dutině u trémového zhlaví předpokládat splnění podmínky maximálního rozdílu teplot povrchů dutiny do 5°C a mohou tedy být použity zjednodušené vztahy (3), (4), (5) pro výpočet součinitele přestupu tepla vedením a prouděním h_a . Jelikož má úloha v našem případě charakter svislé stěny s rozdílnými podmínkami na straně interiéru a exteriéru, bude použit konkrétně vztah (4), tedy pro vodorovný směr tepelného toku, tak jak naznačuje i obr. 106.

Postup dle [21] je ovšem použitelný pouze pro dutiny jednoduchého tvaru. Z toho důvodu je dutina obklopující zhlaví trému zjednodušeně rozložena na dílčí části viz obr. 107 (rozměry dílčích dutin byly pro účely stanovení λ_g uvažovány jako by se navzájem překrývaly).



Vzduchová kapsa okolo trámového zhlaví neobsahuje žádný nízkoemisivní materiál, takže je pro další výpočty uvažováno u všech povrchů s emisivitou standardních stavebních materiálů $\epsilon=0,9$ dle [23].

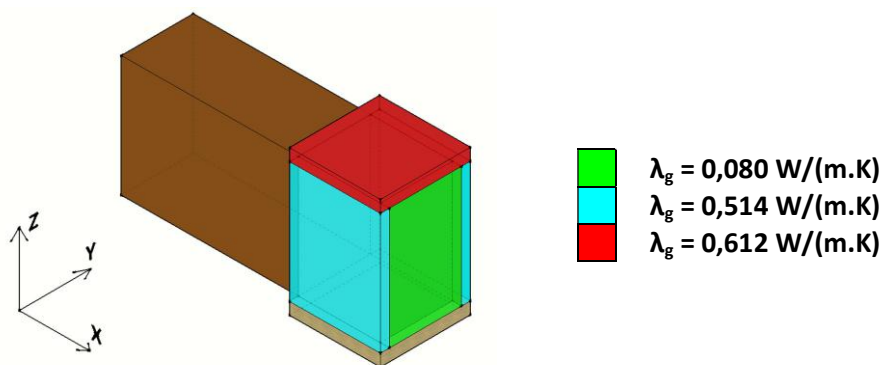
Podle naměřených teplot v trámových kapsách v rámci experimentu, kolísá průměrná teplota v kapsách během zimního období přibližně mezi -5 až $+5$ °C. Jako referenční střední teplotu pro stanovení součinitele přestupu tepla sáláním h_r uvažují tedy 0 °C respektive $273,15$ K. Hodnoty ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti λ_g vypočtené na základě této hodnoty budou dále pro zjednodušení ponechány konstantní i pro jiné okrajové podmínky v rámci hodnoceného zimního období.



obr. 107 – Schéma rozložení vzduchové kapsy s vyznačením uvažovaného směru tepelného toku

Tabulka 8 – Stanovení ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti λ_g dle [21]

Dílčí dutina	d [m]	b [m]	h_a [W/(m ² .K)]	h_r [W/(m ² .K)]	R_g [m ² .K/W]	λ_g [W/(m.K)]
čelo	0,015	0,150	1,67	3,637	0,189	0,080
bok	0,150	0,015	1,25	2,175	0,292	0,514
vršek	0,150	0,150	1,25	2,827	0,245	0,612



obr. 108 – Schéma rozdělení vzduchové dutiny a přiřazené hodnoty λ_g ve výpočetním modelu



Postup dle ČSN EN ISO 10077 (dále jen [22])

Norma [22] uvádí postup pro výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti nevětraných vzduchových vrstev v rámci okenních rámců. Dle [23] je ale tento postup vhodný i pro ostatní uzavřené vzduchové dutiny hodnocené z hlediska vícerozměrného šíření tepla. Na rozdíl od prvního postupu dle [21] se v tomto případě neurčuje pro příslušnou vzduchovou dutinu pouze jediná hodnota λ_g , ale určí se pro rovinný průřez dané dutiny jak pro směr tepelného toku vodorovně, tak pro směr svisle.

Základní vztahy (1), (2) pro výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti vzduchové vrstvy a jejího tepelného odporu zůstávají totožné jako v předchozím postupu dle [21]. Stejně tak parametry d a b vyjadřují tloušťku dutiny ve směru uvažovaného tepelného toku a šířku dutiny [m]. Mění se pouze postup stanovení součinitele přestupu tepla vedením a prouděním h_a a součinitele přestupu tepla sáláním h_r .

$$h_a = \max \left\{ 1,57 ; \frac{0,025}{d} \right\} \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (7)$$

$$h_r = 2,27 \cdot 10^{-7} \cdot T_m^3 \cdot E \cdot F \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (8)$$

kde:

E = součinitel vzájemného osálení povrchů ohraničujících vzduchovou vrstvu [-]

F = čítnel vzájemného osálení [-]

$$E = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad [-] \quad (9)$$

poznámka:

pro emisivitu standardních stavebních materiálů $\varepsilon = 0,9$ lze považovat součinitel $E = 0,818$

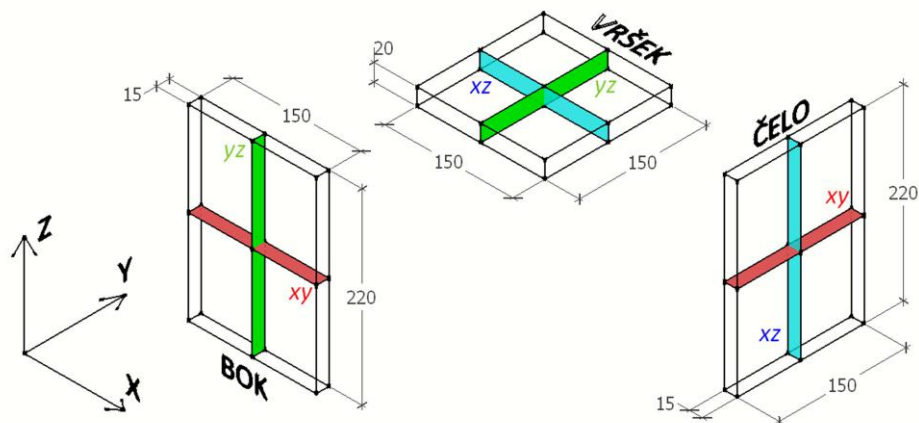
$$F = \frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \left(\frac{d}{b} \right)^2} - \frac{d}{b} \right) \quad [-] \quad (10)$$

poznámka:

vztah platí pro typickou dutinu s obdélníkovým tvarem



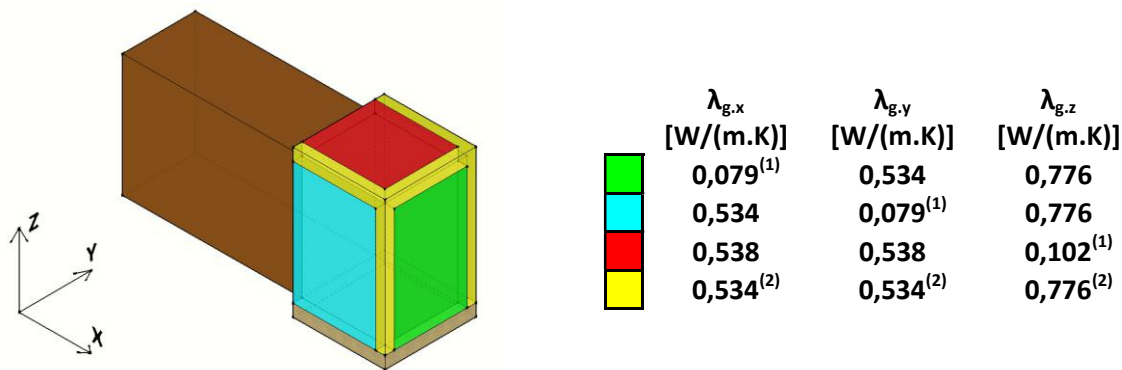
Pro stanovení λ_g dle [22] uvažují stejnou střední absolutní teplotu $T_m=273,15$ a emisivitu povrchů $\varepsilon=0,9$ jako v předchozím výpočtu. Zároveň je opět uvažováno s rozložením vzduchové dutiny na jednotlivé dílčí části viz obr. 109.



obr. 109 - Schéma rozložení vzduchové kapsy s vyznačením průřezů dutin pro výpočet λ_g ve směru x, y, z

Tabulka 9 - Stanovení ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti λ_g dle [22]

Dílčí dutina	Směr tepel. toku	d [m]	b [m]	h_a [W/(m ² .K)]	F [-]	h_r [W/(m ² .K)]	R_g [m ² .K/W]	λ_g [W/(m.K)]
čelo rovina xy	x	0,015	0,150	1,667	0,952	3,605	0,190	0,079
	y	0,150	0,015	1,570	0,525	1,987	0,281	0,534
čelo rovina xz	x	0,015	0,220	1,667	0,967	3,660	0,188	0,080
	z	0,220	0,015	1,570	0,517	1,957	0,284	0,776
bok rovina xy	x	0,150	0,015	1,570	0,525	1,987	0,281	0,534
	y	0,015	0,150	1,667	0,952	3,605	0,190	0,079
bok rovina yz	y	0,015	0,220	1,667	0,967	3,660	0,188	0,080
	z	0,220	0,015	1,570	0,517	1,957	0,284	0,776
vršek xz	x	0,150	0,020	1,570	0,533	2,018	0,279	0,538
	z	0,020	0,150	1,570	0,938	3,550	0,195	0,102
Čelo rovina yz	y	0,150	0,020	1,570	0,533	2,018	0,279	0,538
	z	0,020	0,150	1,570	0,938	3,550	0,195	0,102



⁽¹⁾ hodnoty získané zprůměrováním dvou hodnot připadajících na stejnou osu

⁽²⁾ hodnoty λ_g pro oblast koutu kapsy, kde se vlastnosti protínají:

pro směr x je uvažováno s pokračováním $\lambda_{g,x}$ modré a červené oblasti (cca stejné hodnoty);

pro směr y je uvažováno s pokračováním $\lambda_{g,y}$ zelené a červené oblasti (totožné hodnoty);

pro směr z je uvažováno s pokračováním $\lambda_{g,z}$ modré a zelené oblasti (totožné hodnoty)

obr. 110 - Schéma rozdělení vzduchové dutiny a přiřazené hodnoty λ_g ve výpočetním modelu

Postup dle [22] se jeví jako více sofistikovaný a pravděpodobně vystihuje lépe skutečné chování v dutině u trémového zhlaví. Především uvažování vyšší tepelné vodivosti ve směru svislé osy v oblasti čelní dutiny simuluje lépe přenos tepla prouděním. Dle prvního postupu je totiž pro čelní dutinu stanovena jediná ekvivalentní tepelná vodivost $\lambda_g=0,08$ W/(m.K), což odpovídá v podstatě situaci, kdy by před zhlavím byla například destička z pěnového skla.

Nicméně pro porovnání budou použity oba postupy. Model s parametry vzduchové kapsy stanovenými dle [21] je dále označen jako referenční model 1A a model s postupem dle [22] jako referenční model 2A. Souhrn vlastností vzduchové dutiny okolo trémového zhlaví pro jednotlivé referenční modely je pro přehlednost shrnut na konci kapitoly v tabulce 11.

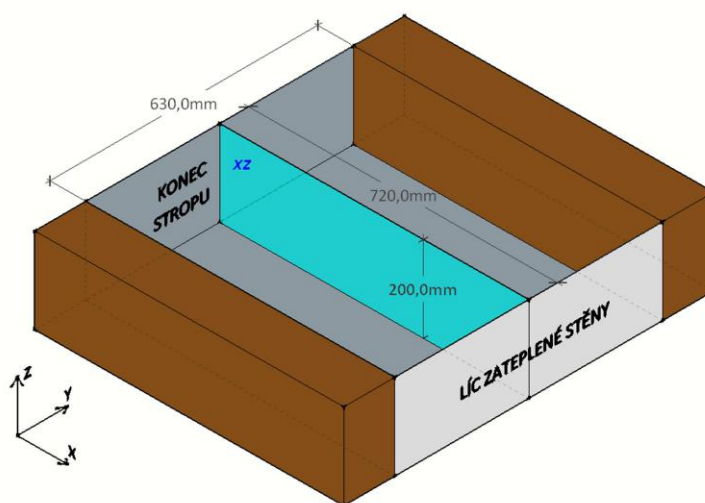
Ekvivalentní tepelná vodivost stropní vzduchové dutiny

Ekvivalentní tepelná vodivost vzduchové dutiny ve stropní konstrukci bude pro zjednodušení stanovena jen postupem dle [22]. Pro všechny porovnávané referenční modely jsou tedy hodnoty tepelné vodivosti stropní dutiny totožné (viz tabulka 10).

Na obr. 111 je znázorněna skutečná geometrie stropní dutiny tak, jak je provedena v experimentu (pouze bez násypu, který není uvažován). Ve výpočtovém modelu je konstrukce stropu ještě trochu zkrácena, nicméně parametry vzduchové dutiny odvozují z těchto rozměrů. Jelikož má tato dutina téměř čtvercový půdorys, postačí stanovit ekvivalentní tepelnou vodivost pouze pro tepelný tok ve směru osy x a z. Ve směru osy y bude uvažována stejná tepelná vodivost jako ve směru osy x. Samozřejmě dutina ve skutečné stropní konstrukci by měla mnohem větší délku a pravděpodobně i jiné parametry tepelné vodivosti než stanovuje tento výpočet. Jedná se ale pouze o orientační parametry, které jsou dle mého názoru pro účely této studie dostatečně výtěžné.



Teploty ve stropní dutině se blíží teplotě vzduchu v interiéru, proto v tomto případě uvažují ve výpočtu ekvivalentní tepelné vodivosti se střední absolutní teplotou $T_m=293,15$ K. Emisivitu povrchů v dutině opět uvažují $\epsilon=0,9$.



obr. 111 – Schéma stropní vzduchové dutiny s vyznačením průřezu dutiny pro výpočet λ_g ve směru x, z

Tabulka 10 - Stanovení ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti λ_g ve stropní dutině dle [22]

dutina	Směr tepel. toku	d [m]	b [m]	h_a [W/(m ² .K)]	F [-]	h_r [W/(m ² .K)]	R_g [m ² .K/W]	λ_g [W/(m.K)]
stropní dutina	x	0,720	0,200	1,570	0,568	2,658	0,236	3,044
	z	0,200	0,720	1,570	0,880	4,118	0,176	1,138

$\lambda_{g,x} = 3,044$ W/(m.K)	$\lambda_{g,y} = 3,044$ W/(m.K)	$\lambda_{g,z} = 1,138$ W/(m.K)
---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------

Faktor difuzního odporu vzduchových vrstev

Již z definice, faktor difuzního odporu μ vyjadřuje kolikrát je daný materiál méně propustný pro vodní páru než nehybný vzduch. Pro vzduch v klidu se tedy uvažuje se šířením vlhkosti pouze difuzí vodní páry a $\mu=1,0$.

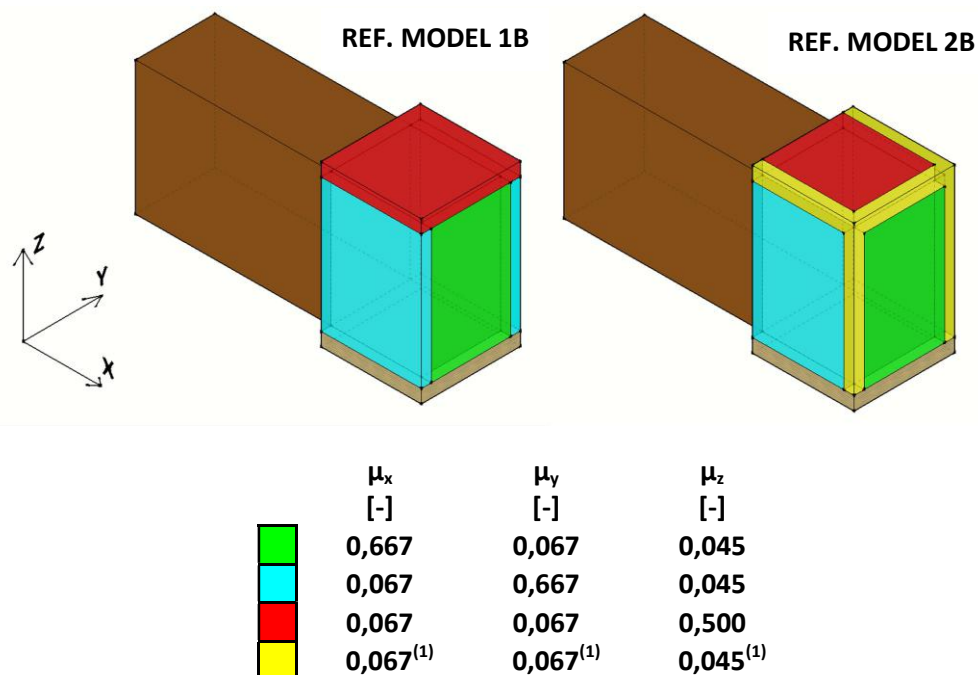
Ve skutečnosti dochází ve vzduchových dutinách k proudění vzduchu. Vodní pára se nešíří už jen difuzí, ale je nesena i proudícím vzduchem. Přenos vodní páry je tak výrazně usnadněn, což se zohlední ekvivalentním faktorem difuzního odporu $\mu < 1,0$.

Přístup, jak zohlednit vliv proudění ve vzduchových vrstvách je uveden například v ČSN EN ISO 13788 (dále jen [7]). Dle tohoto postupu má být faktor difuzního odporu vzduchové vrstvy upraven tak, aby výsledná ekvivalentní difuzní tloušťka s_d této vrstvy byla rovna 0,01 m.

V referenčním modelu 1A a 2A bude uvažováno s hodnotou $\mu=1,0$. Dále jsou vytvořeny referenční modely 1B a 2B s hodnotami μ dle [7]. Pro přepočítání μ vzduchových vrstev v rámci

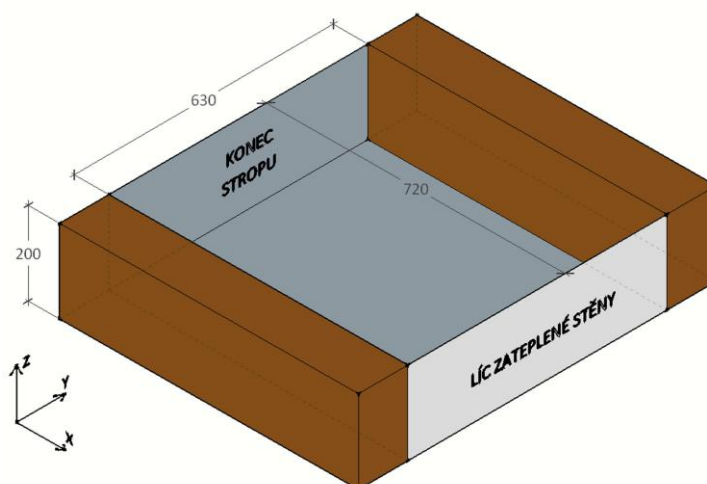


modelu dle [7] jsou opět použity rozměry dílčích dutin, stejně jako tomu bylo u stanovení λ_g . Výsledné přepočtené hodnoty a jejich přiřazení znázorňuje obr. 112 a obr. 113



⁽¹⁾ hodnoty μ pro oblast koutu kapsy, kde se vlastnosti protínají:
 pro směr x je uvažováno s pokračováním μ_x modré a červené oblasti (totožné hodnoty);
 pro směr y je uvažováno s pokračováním μ_y zelené a červené oblasti (totožné hodnoty);
 pro směr z je uvažováno s pokračováním μ_z modré a zelené oblasti (totožné hodnoty)

obr. 112 – Hodnoty μ vzduchových vrstev dle [4] přiřazené oběma variantám modelů



$\mu_x = 0,014$	$\mu_y = 0,016$	$\mu_z = 0,05$
-----------------	-----------------	----------------

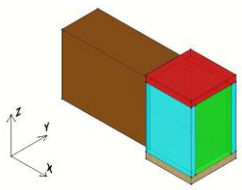
obr. 113 - Hodnoty μ stropní vzduchové dutiny dle [7]

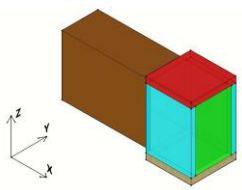


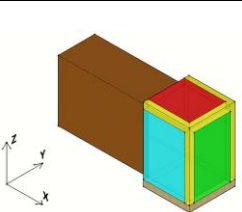
Shrnutí parametrů vzduchových vrstev

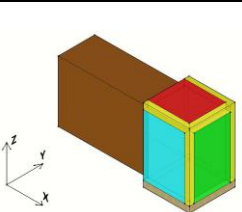
Na základě různých přístupů ke stanovení ekvivalentní tepelné vodivosti a faktoru difuzního odporu uzavřených vzduchových vrstev, jsou celkem vytvořeny 4 varianty referenčního výpočtového modelu. Pro přehlednost jsou použité parametry v jednotlivých modelech shrnuty v tabulce 11.

Tabulka 11 – Parametry vzduchových vrstev pro jednotlivé referenční modely

PARAMETRY VZDUCHOVÝCH VRSTEV - REFERENČNÍ MODEL 1A						
	$\lambda_{g,x}$ [W/(m.K)]	$\lambda_{g,y}$ [W/(m.K)]	$\lambda_{g,z}$ [W/(m.K)]	μ_x [-]	μ_y [-]	μ_z [-]
Green	0,080	0,080	0,080	1	1	1
Blue	0,514	0,514	0,514	1	1	1
Red	0,612	0,612	0,612	1	1	1
stropní dutina	3,044	3,044	1,138	1	1	1

PARAMETRY VZDUCHOVÝCH VRSTEV - REFERENČNÍ MODEL 1B						
	$\lambda_{g,x}$ [W/(m.K)]	$\lambda_{g,y}$ [W/(m.K)]	$\lambda_{g,z}$ [W/(m.K)]	μ_x [-]	μ_y [-]	μ_z [-]
Green	0,080	0,080	0,080	0,667	0,067	0,045
Blue	0,514	0,514	0,514	0,067	0,667	0,045
Red	0,612	0,612	0,612	0,067	0,067	0,500
stropní dutina	3,044	3,044	1,138	0,014	0,016	0,05

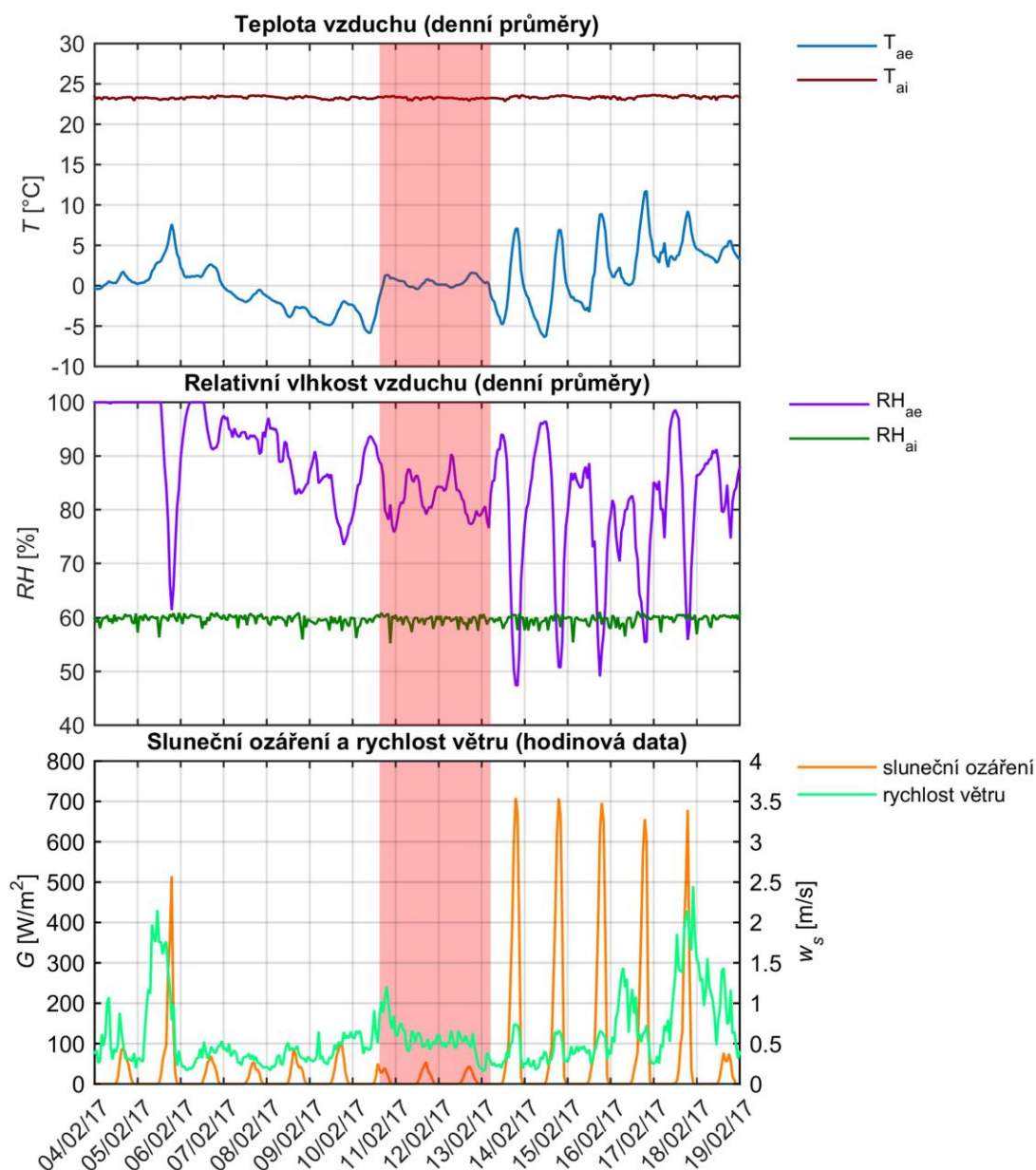
PARAMETRY VZDUCHOVÝCH VRSTEV - REFERENČNÍ MODEL 2A						
	$\lambda_{g,x}$ [W/(m.K)]	$\lambda_{g,y}$ [W/(m.K)]	$\lambda_{g,z}$ [W/(m.K)]	μ_x [-]	μ_y [-]	μ_z [-]
Green	0,079	0,534	0,776	1	1	1
Blue	0,534	0,079	0,776	1	1	1
Red	0,538	0,538	0,102	1	1	1
Yellow	0,534	0,534	0,776	1	1	1
stropní dutina	3,044	3,044	1,138	1	1	1

PARAMETRY VZDUCHOVÝCH VRSTEV - REFERENČNÍ MODEL 2B						
	$\lambda_{g,x}$ [W/(m.K)]	$\lambda_{g,y}$ [W/(m.K)]	$\lambda_{g,z}$ [W/(m.K)]	μ_x [-]	μ_y [-]	μ_z [-]
Green	0,079	0,534	0,776	0,667	0,067	0,045
Blue	0,534	0,079	0,776	0,067	0,667	0,045
Red	0,538	0,538	0,102	0,067	0,067	0,500
Yellow	0,534	0,534	0,776	0,067	0,067	0,045
stropní dutina	3,044	3,044	1,138	0,014	0,016	0,05



7.1.6 Okrajové podmínky

Aby bylo možné porovnat výstup ze stacionárních výpočetních modelů s reálnými podmínkami, které v oblasti zhlaví nastávají, bylo v naměřených údajích vyhledáno období v chladné části roku, které se alespoň přibližně podobá stacionárnímu stavu. Jako nejvhodnější bylo stanoveno období od 10. února 2017 do 14. února 2017 viz obr. 114.



obr. 114 – Přehled okrajových podmínek pro krátké období připomínající ustálený stav

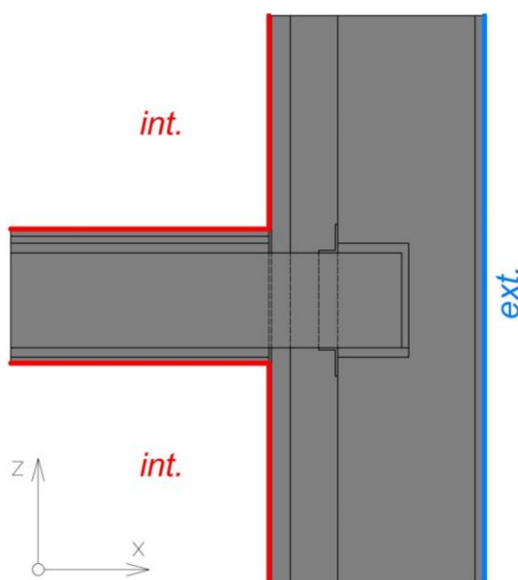


Období vyznačené na obr. 114 červenou oblastí představuje vhodné podmínky pro uvažování přibližně ustáleného stavu. Obloha byla v tomto období zřejmě zatažena, ozáření testovacích polí bylo nízké. Kvůli zatažené obloze je relativně stabilní teplota venkovního vzduchu a relativní vlhkost vzduchu v exteriéru v tomto období taktéž kolísá minimálně. Rychlost větru je nízká – téměř nepřesahuje hodnotu 1 m/s. Teplotu i relativní vlhkost v interiéru je možné považovat za konstantní a navíc bylo zachyceno období, kdy je v klimatické místnosti simulován provoz o vyšší teplotě 24 °C a vyšší relativní vlhkosti 60 %. Průměrné hodnoty klimatických údajů za sledovaný časový úsek jsou uvedeny v tabulce 12.

Tabulka 12 – Průměrné hodnoty klimatických údajů ze sledovaného období

$T_{ai,m}$ [°C]	$RH_{ai,m}$ [%]	$T_{ae,m}$ [°C]	$RH_{ae,m}$ [%]	G_m [W/m ²]	$v_{w,m}$ [m/s]
23,2	59,6	0,4	82,1	10,6	0,6

Ozáření fasády slunečním zářením dosahuje ve sledovaném období maximální hodnoty 54 W/m², a proto si ho dovoluji zcela zanedbat. Na základě ostatních průměrných hodnot jsou odvozeny referenční okrajové podmínky (viz obr. 115 a tabulka 13) pro výpočetní model. Tyto podmínky budou použity pro vyhodnocení věrohodnosti výpočtového modelu, a také pro hodnocení jednotlivých variant opatření na zlepšení tepelně vlhkostního chování v oblasti trámové kapsy.



obr. 115 – Schéma přiřazení okrajových podmínek pro výpočtový model



Tabulka 13 – Referenční okrajové podmínky odvozené z měřených údajů

REFERENČNÍ OKRAJOVÉ PODMÍNKY PRO VÝPOČETNÍ MODEL				
Okrajová podmínka	T_o [°C]	RH_o [%]	$R_s^{(1)}$ [m ² .K/W]	$h,p^{(2)}$ [1.10 ⁹ s/m]
interiér	23	60	0,13	10
exteriér	0	82	0,08	20

h,p = součinitel přestupu vodní páry při daném povrchu – uvažována je typická hodnota pro vnější a vnitřní povrch dle [24]

R_s = odpor při přestupu tepla při daném povrchu – pro interiér je uvažována typická hodnota pro hodnocení konstrukce stěny z hlediska součinitele prostupu tepla dle [25], pro exteriér je zde vzhledem k naměřené nízké rychlosti větru pod 1 m/s uvažována dle [21] zvýšená hodnota odporu při přestupu tepla 0,08 [m².K/W] namísto standardních 0,04 [m².K/W]

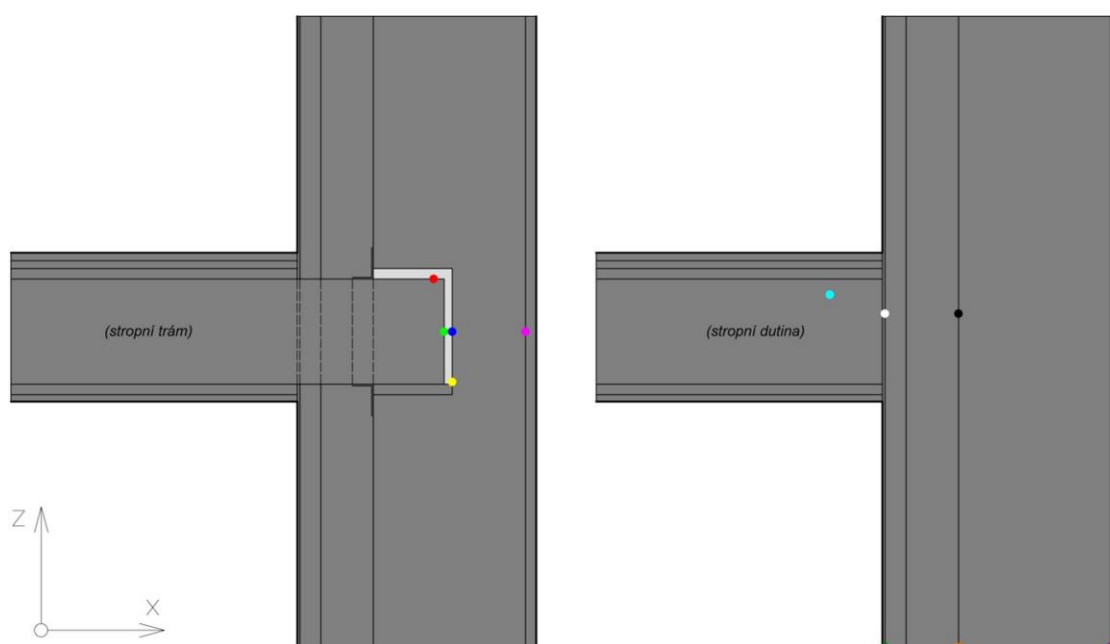
Aby bylo zajištěno komplexnější vyhodnocení jednotlivých opatření, je použita i druhá sada okrajových podmínek viz tabulka 14. Pro interiér je zde na straně bezpečné uvažováno se stejnými parametry jako u referenčních podmínek a na straně exteriéru jsou použity návrhové hodnoty pro Prahu dle [25]. Uvažování těchto podmínek má představovat krajní situaci, kdy je v exteriéru velmi nízká teplota a v interiéru naopak vysoká teplota i relativní vlhkost.

Tabulka 14 – Návrhové okrajové podmínky

NÁVRHOVÉ OKRAJOVÉ PODMÍNKY PRO VÝPOČETNÍ MODEL				
Okrajová podmínka	T_o [°C]	RH_o [%]	R_s [m ² .K/W]	h,p [1.10 ⁹ s/m]
interiér	23	60	0,13	10
exteriér	-13	84	0,04	20

7.1.7 Vyhodnocení referenčního modelu

Pro porovnání vypočtených a naměřených hodnot je k dispozici jen několik bodů, kde jsou osazeny senzory. Věrohodnost modelu je tedy možné vyhodnotit ve svislém řezu osou zhlaví, (viz obr. 116 vlevo) a dále ve svislém řezu vedeném osou mezi hranoly, kde je možné porovnat hodnoty nejen v úrovni stropní konstrukce, ale i v místě předpokládaného 1D šíření tepla (viz obr. 116 vpravo). Porovnání naměřených a vypočtených hodnot je následně uvedeno v tabulce 15. Odchytky mezi naměřenými a vypočtenými hodnotami jsou pro přehlednost vyneseny v grafu na obr. 117 a 118.



obr. 116 – Svislý řez osou trámového zhlaví (vlevo) a osou mezi hranoly (vpravo) s vyznačením porovnávaných bodů

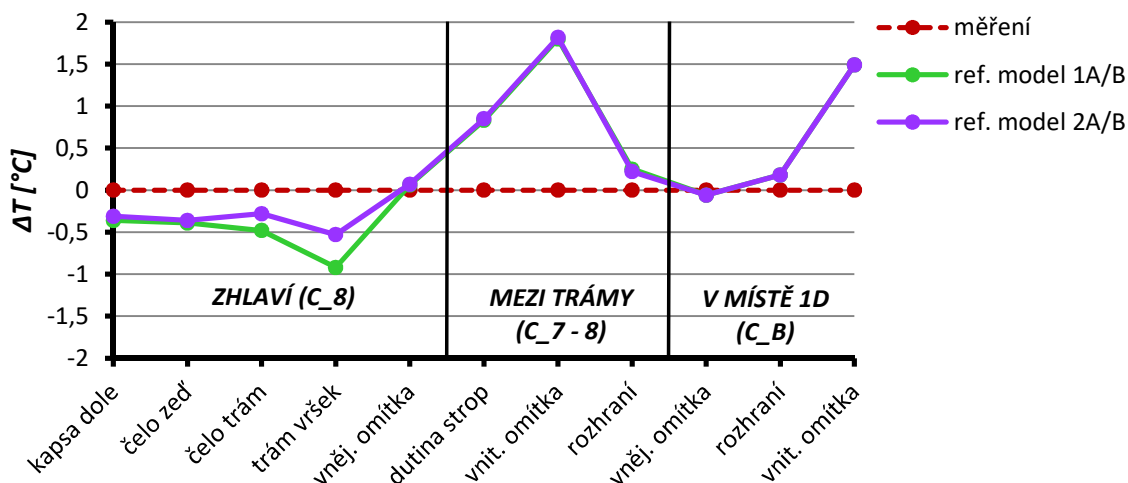
Tabulka 15 – Porovnání naměřených hodnot s hodnotami pro jednotlivé referenční modely

Pozice sledovaného bodu		Experiment ⁽¹⁾		Ref. model 1A		Ref. model 1B		Ref. model 2A		Ref. model 2B	
		T [°C]	RH [%]	T [°C]	RH [%]	T [°C]	RH [%]	T [°C]	RH [%]	T [°C]	RH [%]
zhlaví C_8	kapsa dole	2,22	81,7	1,86	99,5	1,86	100	1,91	99,3	1,91	100
	čelo zeď	2,29	X	1,90	100	1,90	100	1,93	100	1,93	100
	čelo trám	3,56	X	3,08	92,5	3,08	92,3	3,28	91,4	3,28	91,2
	trám vršek	3,69	73,6	2,77	96,0	2,77	94,8	3,16	93,3	3,16	92,3
	vněj. omítka	0,68	X	0,74	86,3	0,74	86,3	0,75	86,3	0,75	86,3
mezi trámy	dutina strop	21,02	45,4	21,85	52,0	21,85	53,0	21,87	51,9	21,87	52,9
	vnit. omítka	19,79	X	21,59	40,7	21,59	42,6	21,61	40,6	21,61	42,6
	rozhraní	2,76	96,1	3,01	100	3,01	100	2,98	100	2,98	100
1D (bod C_B)	vněj. omítka	0,72	X	0,66	85,2	0,66	85,2	0,66	85,2	0,66	85,2
	rozhraní	2,67	99,2	2,85	100	2,85	100	2,85	100	2,85	100
	vnit. omítka	20,70	X	22,19	47,1	22,19	47,1	22,19	47,1	22,19	47,1

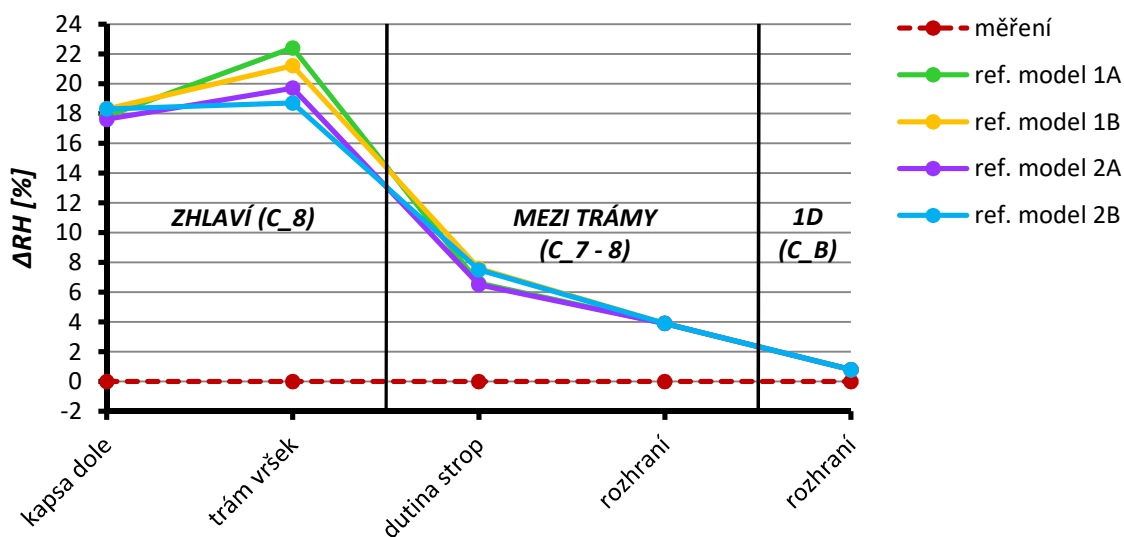
⁽¹⁾ hodnoty stanovené jako průměr z posledních 24 hodin sledovaného období (cílem je co nejvíce vyloučit vliv okrajových podmínek z předchozích dní)



Odchylky výpočetního modelu:



obr. 117 – Rozdíl teplot mezi měřeními a vypočtenými hodnotami



obr. 118 – Rozdíl v relativní vlhkosti mezi měřeními a vypočtenými hodnotami

Dle očekávání nedošlo ke změně teplotního pole mezi variantami modelu A a B, které se pro daný referenční model liší pouze přístupem ke stanovení faktoru difuzního odporu vzduchových vrstev. Na obr. 117 je vidět, že z hlediska teplot se měřeným údajům více blíží referenční model 2A respektive 2B. Největší odchylky teplot nabývají výpočtové modely ve sledovaných bodech v úrovni vnitřní omítky. Oproti měřeným údajům je zde vypočtená teplota vyšší téměř o 2 °C. To může být způsobeno mnoha faktory. Ve skutečnosti může být například odpor při přestupu tepla vlivem pomalejšího proudění vzduchu u povrchu v interiéru vyšší než bylo uvažováno výpočtem, tepelná izolace může mít mírně vyšší tepelnou vodivost vlivem zvýšené vlhkosti nebo se jen vlivem teplotní setrvačnosti nestihly sledované okrajové

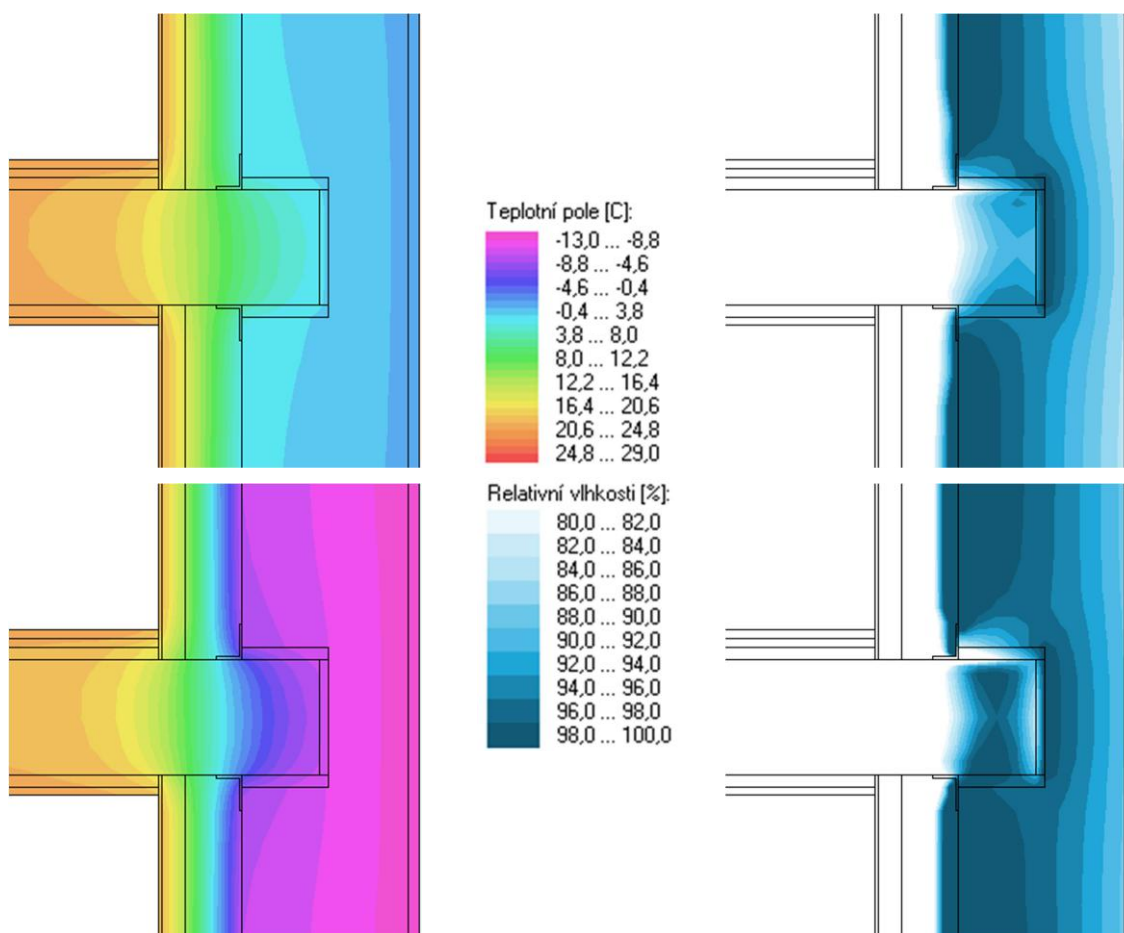


podmínky propsat až na stranu interiéru. V ostatních sledovaných bodech jsou odchylky relativně malé a z hlediska pole teplot považují referenční model 2A/B za dostatečně přesný.

Hodnoty relativní vlhkosti jsou v případě všech referenčních modelů velmi podobné. Rozdíl v relativní vlhkosti vypočtené pro modely A, kde je pro vzduchové vrstvy uvažováno $\mu=1,0$ a pro modely B, kde je μ vzduchových vrstev přepočteno dle [7], je nevýznamný (viz obr. 118). Vypočtené hodnoty ale výrazně převyšují naměřené - v místě zhlaví i o více než 20 %. V případě šíření vlhkosti se zde ale jedná o značně pomalejší proces než v případě šíření tepla, a to zejména při šíření vodní páry difuzí. Pro dosažení ustáleného stavu z hlediska relativní vlhkosti, by tak bylo zapotřebí mnohem více času, než poskytuje sledované období. Naměřené hodnoty tedy pravděpodobně zachycují situaci, kdy konstrukce teprve spěje do ustáleného stavu, který představuje stacionární výpočtový model. Pro účely studie, vyhodnotit možnosti zlepšení tepelně vlhkostrních podmínek v oblasti trámového zhlaví, představuje ale vyšší relativní vlhkost v referenčním modelu pouze konzervativnější přístup na straně bezpečné.

Na základě odchylek mezi měřenými a vypočtenými hodnotami volím jako nejvhodnější **referenční model 2B**. Pro další účely studie je tento model označován již jen **referenční model**.

Pro představu je zobrazeno pole teplot a relativních vlhkostí referenčního modelu (obr. 119). Vykreslen je stav pro referenční okrajové podmínky (nahore) i stav pro návrhové podmínky (dole). Pro větší názornost je zobrazen zásadní rozsah relativní vlhkosti od 80 do 100 %.



obr. 119 - Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční a návrhové okrajové podmínky



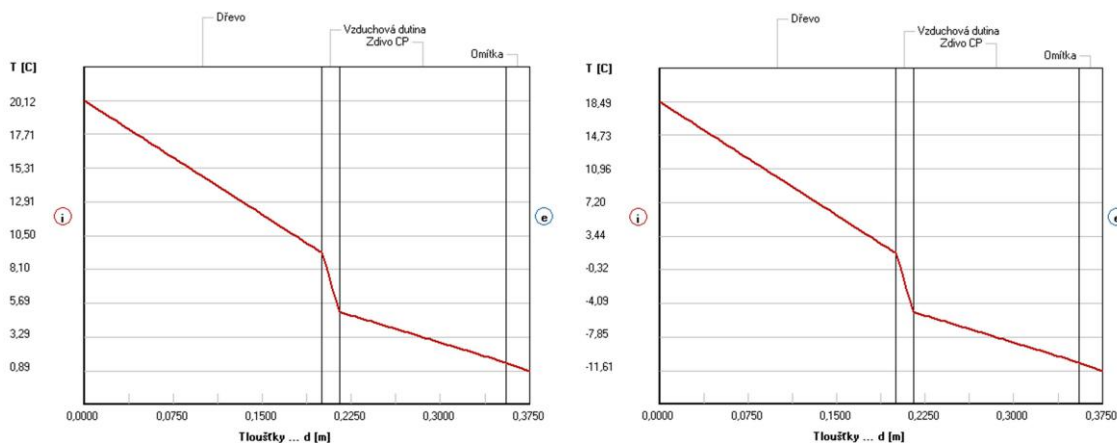
Zajímavý efekt nastává v poli relativních vlhkostí pro návrhové okrajové podmínky. Relativní vlhkost v trémovém zhlaví se zde sice zvýšila, ale při jeho povrchu v trémové kapse je situace nečekaně příznivější než za referenčních okrajových podmínek. Pro objasnění tohoto chování výpočetního modelu je situace zhlaví zjednodušena na problém v 1D pomocí softwaru Teplo 2014.

Stropní trém nahrazuji vrstvou dřeva silnou 200 mm, zbytek skladby má již reálné rozměry – vzduchová dutina 15 mm, zdivo 140 mm, vnější omítka 20 mm. Vlastnosti materiálů ponechávám totožné jako v referenčním modelu ve směru osy x (odpovídá směru tepelného a vlhkostního toku pro modelovanou 1D skladbu). Okrajové podmínky pro interiér a exteriér rovněž nechávám nezměněné.

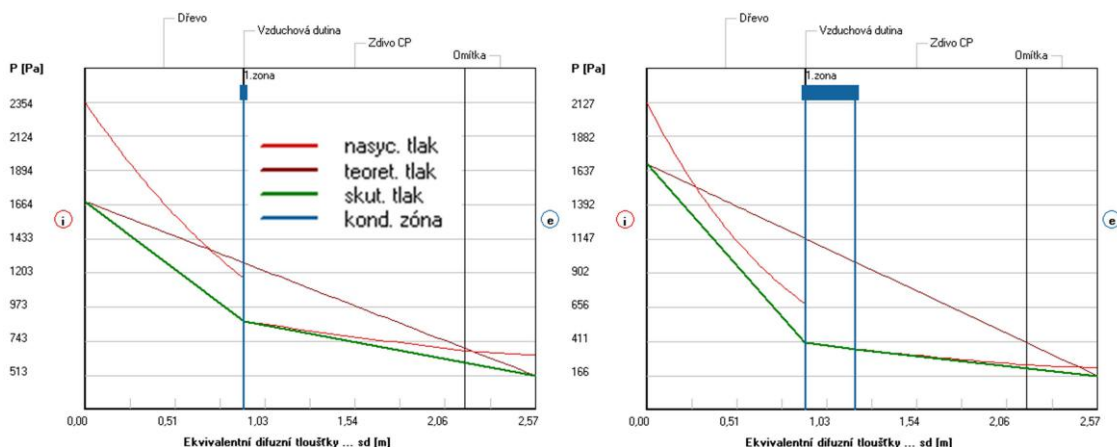
REFERENČNÍ OKRAJOVÉ PODMÍNKY

NÁVRHOVÉ OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Průběh teplot:



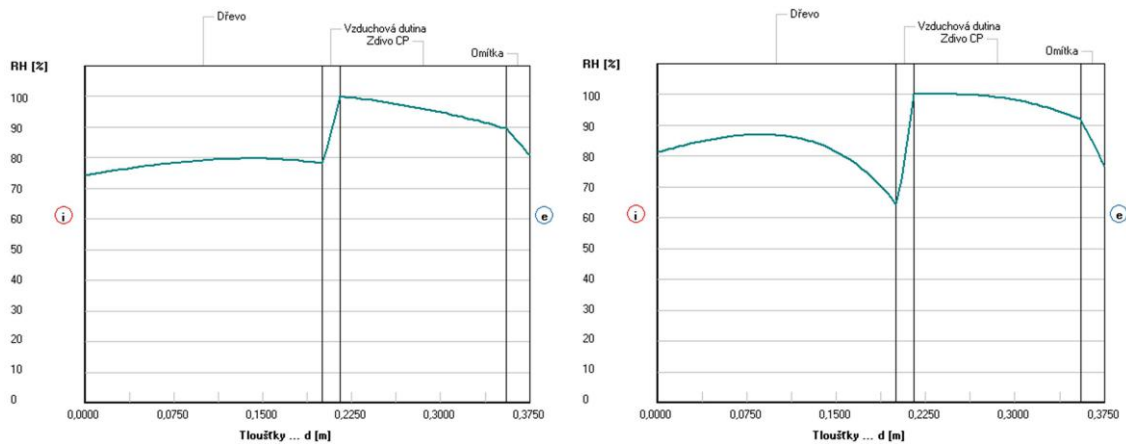
Porovnání tlaků vodní páry:



obr. 120 – 1D model zhlaví – porovnání průběhu teplot a tlaků vodní páry pro referenční a návrhové okrajové podmínky (výstup z programu Teplo 2014 Edu)

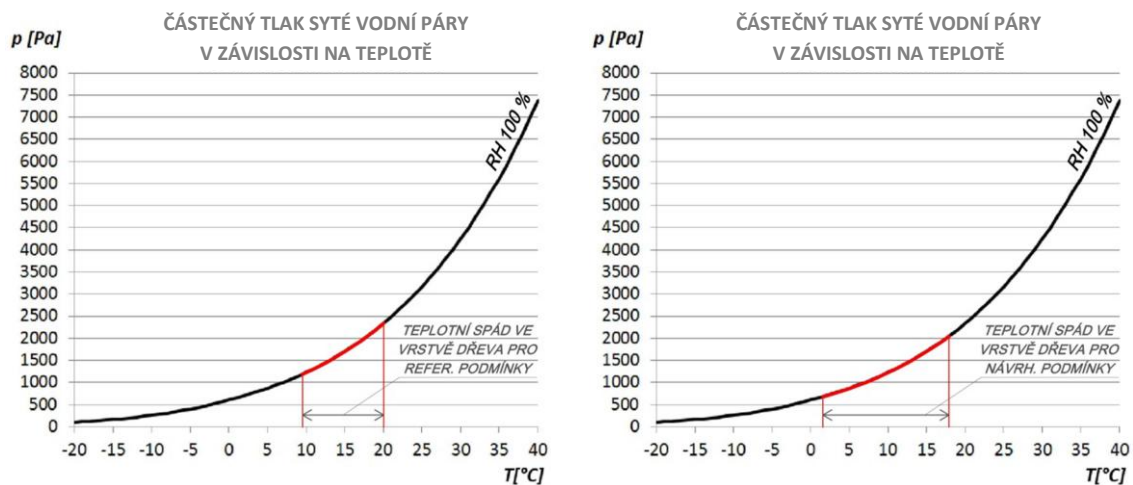


Porovnání průběhu relativní vlhkosti:



obr. 121 - 1D model zhlaví – porovnání průběhu relativní vlhkosti pro referenční a návrhové okrajové podmínky (výstup z programu Teplo 2014 Edu)

tečna představující upravený průběh částečného tlaku vodní páry ve vrstvě dřeva má pro návrhové podmínky mnohem podobnější trend křivce částečného tlaku nasycené vodní páry než je tomu u referenčních podmínek. Tím, že je zároveň pro návrhové podmínky ve vrstvě dřeva dosaženo vyššího teplotního spádu, má křivka částečného tlaku nasycené vodní páry více patrný exponenciální průběh (viz obr. 120). Relativní vlhkost je daná poměrem mezi křivkami částečných tlaků vodní páry a částečných tlaků nasycené vodní páry. Tento poměr ve vrstvě dřeva se pak vlivem vztahu mezi oběma křivkami zhruba do poloviny blíží 1 (neboli relativní vlhkosti 100 %), dále směrem ke vzduchové dutině, ale zase klesá. V tomto místě na rozhraní dřeva a vzduchové dutiny je pak pro návrhové podmínky tento poměr nižší, než je tomu pro mírnější referenční podmínky. To znamená, že je zde paradoxně pro nižší teploty nižší i relativní vlhkost.



obr. 122 – Porovnání průběhu tlaků syté vodní páry ve vrstvě dřeva pro referenční (vlevo) a návrhové okrajové podmínky (vpravo)

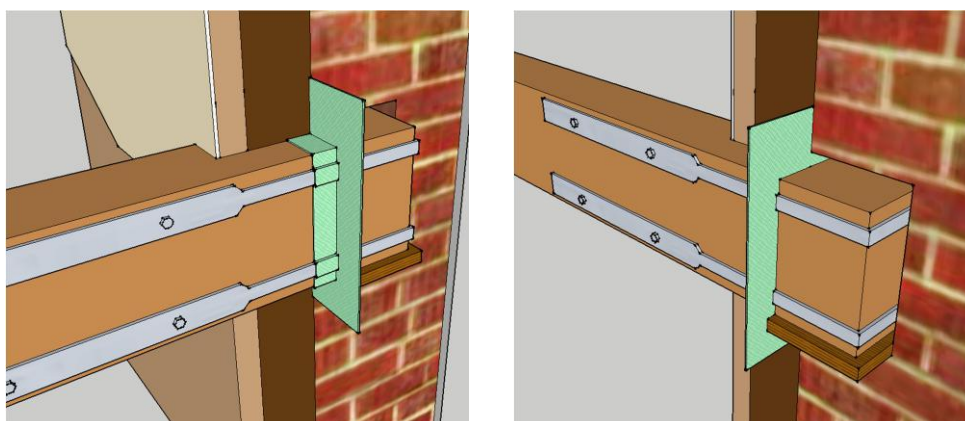


7.2 Varianty opatření

7.2.1 Varianta 1 – hliníkové oprátky

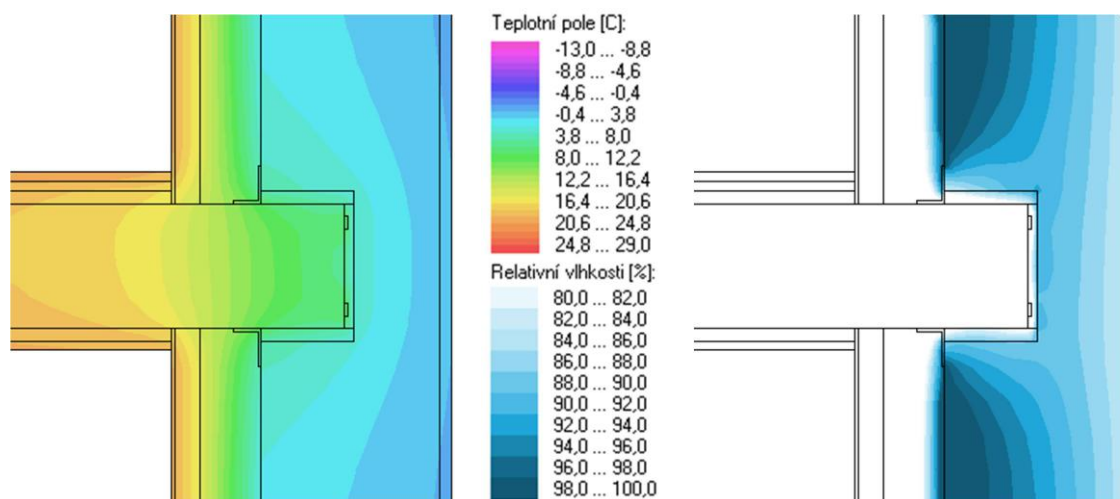
Princip opatření

Na původní zhlaví budou osazeny kovové „oprátky“, čímž má dojít ke zvýšení tepelného toku z interiéru do trámové kapsy. Kapsa tak bude pasivně vytápěna a dojde zde ke snížení relativní vlhkosti. Jako materiál oprátek je zvolen hliník pro svou velkou tepelnou vodivost cca 200 W/(m.K). Aby byl zajištěn účinný přenos tepla je síla použitého profilu 5 mm. Výška profilu v přední části obepínající zhlaví je 20 mm, aby bylo možné oprátku osadit na stávající trám usazený ve vyžděné kapse. Profil oprátky v místě uvažované stropní dutiny je zvýšen na 40 mm a tvoří sběrnici tepla dlouhou přibližně 450 mm. Stejně jako u referenční varianty, zůstává i zde utěsnění kapsy airstop páskou přelepenou na zdivo (+ dotěsnění tmelem airstop). Zateplení dřevovláknitými deskami rovněž probíhá těsně kolem stropních trámů bez přerušení.



obr. 123 – Schéma opatření – hliníkové oprátky

Výstup pro referenční okrajové podmínky

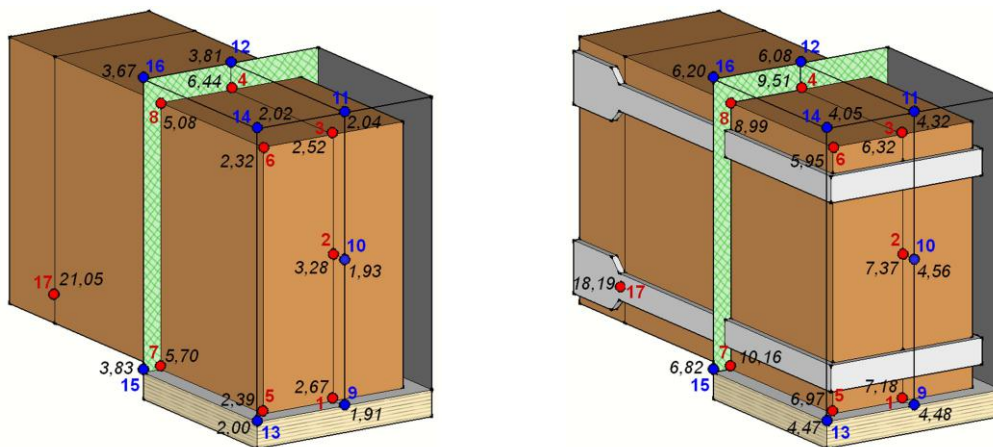


obr. 124 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky

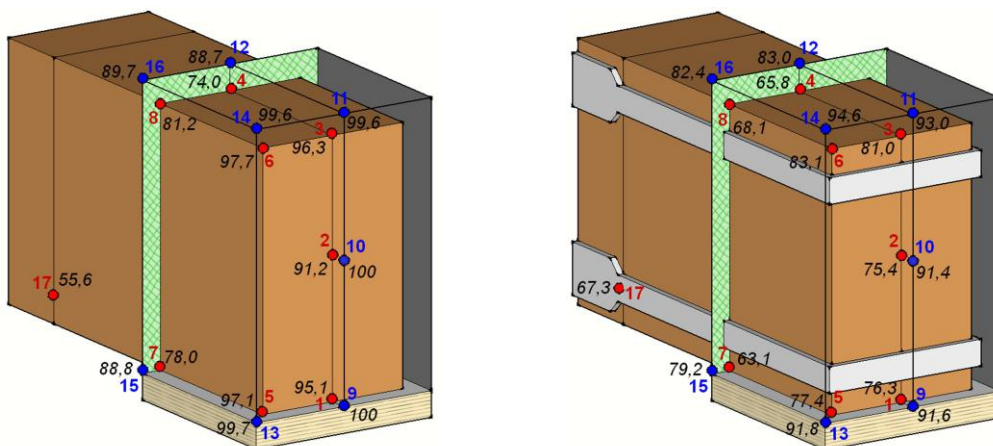


Porovnání s referenčním modelem - referenční okrajové podmínky

Teplota [°C]

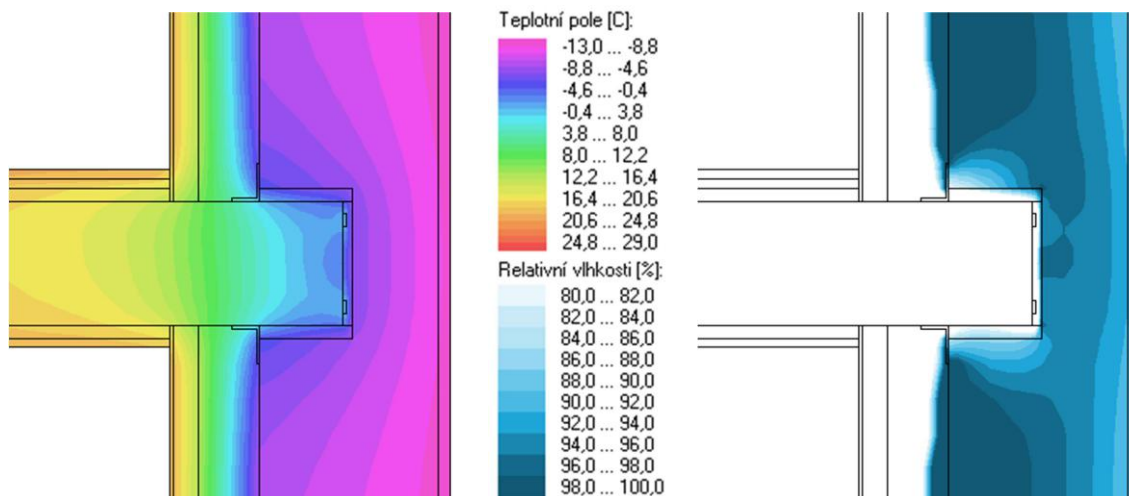


Relativní vlhkost [%]



obr. 125 – Sledované body + porovnání teplot a RH při referenčních okrajových podmínkách

Výstup pro návrhové okrajové podmínky

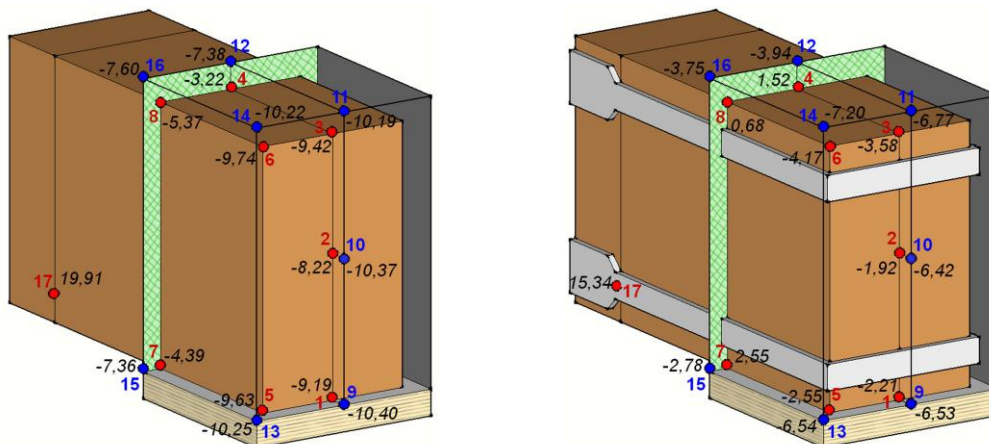


obr. 126 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky

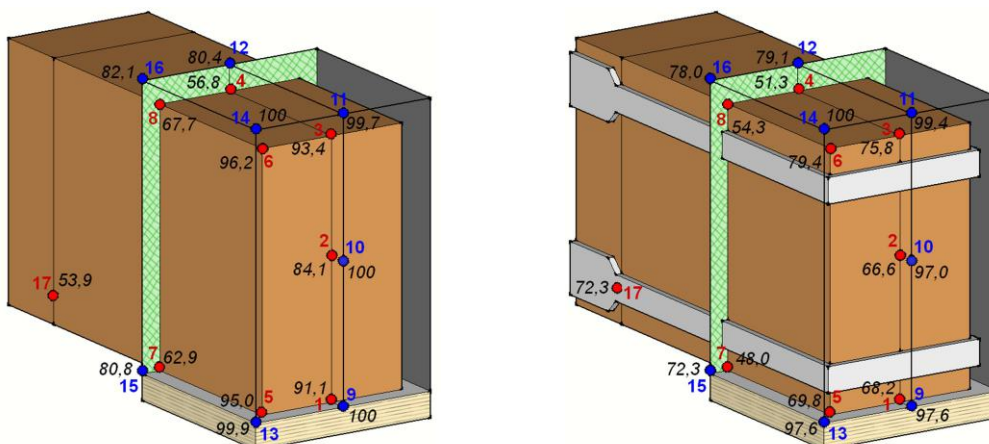


Porovnání s referenčním modelem - návrhové okrajové podmínky

Teplota [°C]

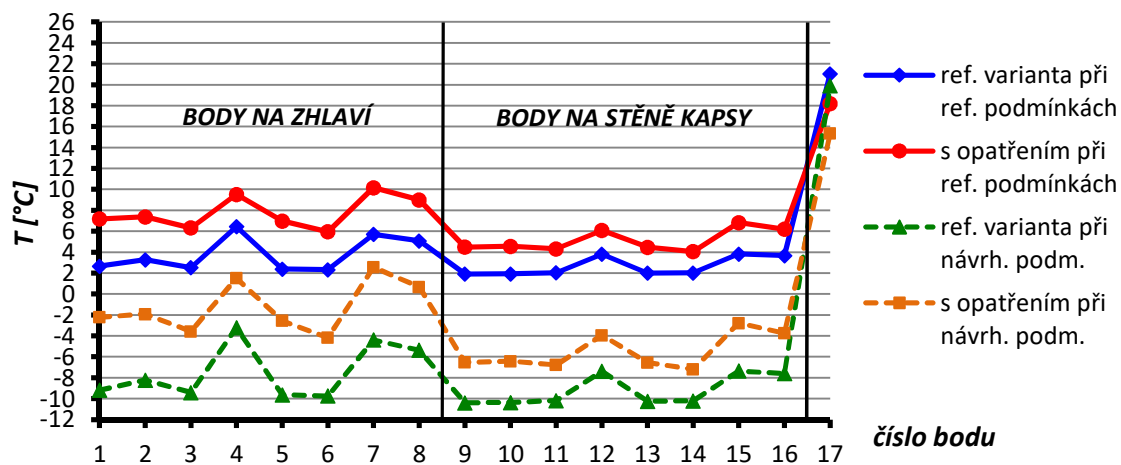


Relativní vlhkost [%]

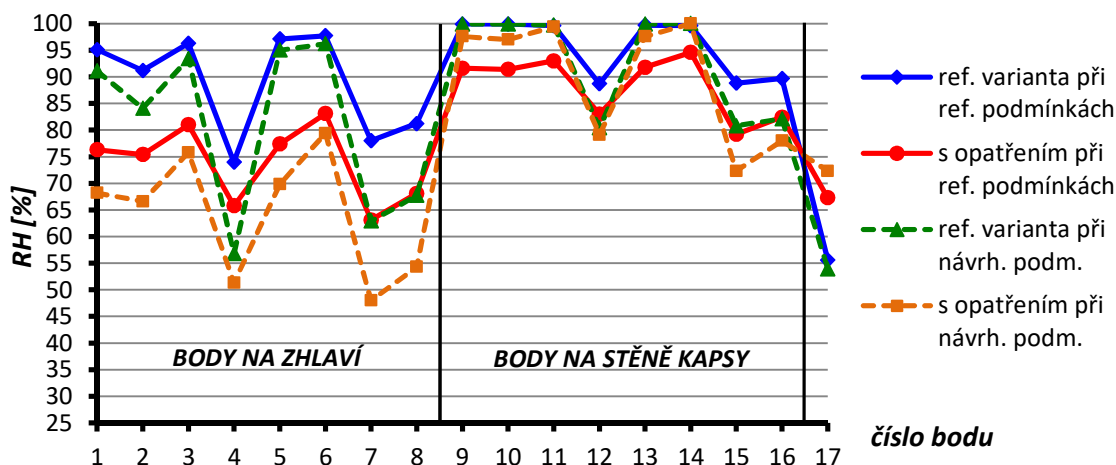


obr. 127 – Sledované body + porovnání teplot a RH při návrhových okrajových podmínkách

Grafické porovnání stavu před a po opatření



obr. 128 – Změna teploty ve sledovaných bodech pro variantu opatření 1 – hliníkové oprátky



obr. 129 – Změna relativní vlhkosti ve sledovaných bodech pro variantu opatření 1 – hliníkové oprátky

Z obr. 128 je patrné, že v bodech na trámovém zhlaví došlo po aplikaci hliníkových oprátek ke zvýšení teplot přibližně o 4 °C pro referenční podmínky a přibližně o 6 °C při návrhových podmínkách. V bodech na stěně kapsy se zvýšení teplot projevilo méně, ale v podobném poměru. To že za chladnějších podmínek došlo k poměrově většímu zvýšení teplot je zřejmě způsobeno zvýšením tepelného toku přes kovové prvky a dřevěné zhlaví při větším rozdílu teplot mezi interiérem a exteriérem.

Z hlediska relativních vlhkostí došlo na povrchu zhlaví k výraznému zlepšení. Jak pro referenční, tak pro návrhové podmínky je po opatření relativní vlhkost pod 85 %. Zároveň se zde opět objevuje jev popsáný na str 152 a 153, kdy při horších podmínkách jsou na povrchu trámu nižší relativní vlhkosti. Na stěnách kapsy se situace zlepšila jen mírně. Relativní vlhkost zůstává téměř ve všech bodech nad 80 % a v čele kapsy stále hrozí kondenzace vodní páry.

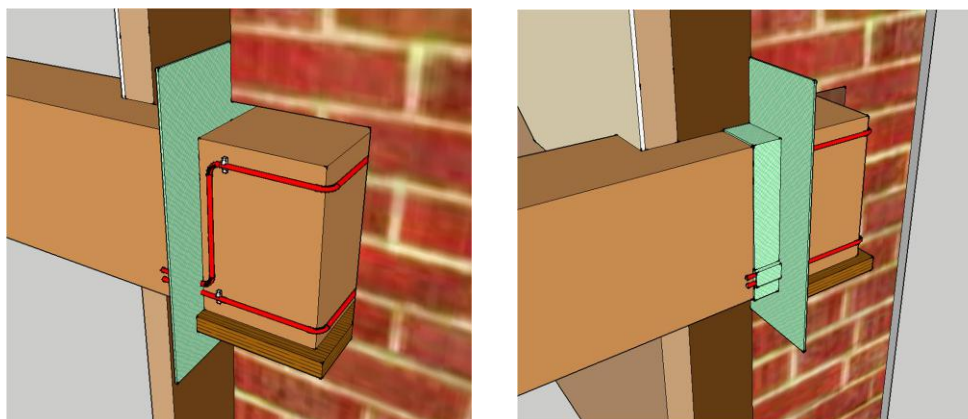
Pro variantu s hliníkovými oprátkami je navíc sledována i situace u vnitřního povrchu zateplovacího systému (bod 17). Hliníkové prvky prostupující do chladné kapsy zde mohou mít nízké teploty a hrozí zde kondenzace vodní páry. Dle výpočtového modelu ale relativní vlhkost v tomto místě po aplikaci oprátek nepřesáhne 75 % ani při přísných návrhových podmínkách.



7.2.2 Varianta 2A – topný kabel 10 W/m

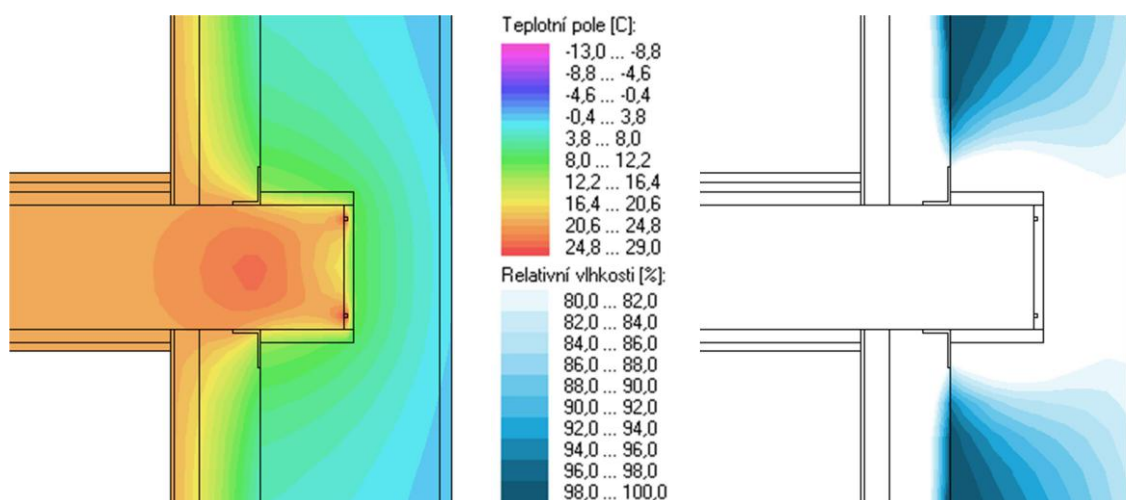
Princip opatření

Na zhlaví stávajícího stropního trámu osazeného ve vyzděné kapse bude umístěn topný kabel o výkonu 10 W/m. Pro úsporu elektrické energie by topnou část mohla tvořit pouze smyčka navlečená na zhlaví. Jednotlivé topné smyčky by pak byly nasvorkovány na elektrický rozvod umístěný v konstrukci stropu. Pro zajištění co nejrovnoměrnějšího vyhřívání prostoru kapsy bude topná smyčka navlečena na zhlaví ve dvou úrovních viz obr. 130. Rozvinutá délka topné smyčky je přibližně 1,3 m. Polohu smyčky proti sesunutí zajistí natloukací držáčky osazené na trám v úrovni líce zdiva. Případně může být smyčka zpevněna například ocelovým drátem. V kapse nejvíce rizikového zhlaví by mohlo být osazeno čidlo relativní vlhkosti vzduchu. Vhodným spínacím impulsem vytápění, by pak bylo například překročení zde naměřené relativní vlhkosti nad 75 %.



obr. 130 – Schéma opatření – topný kabel

Výstup pro referenční okrajové podmínky

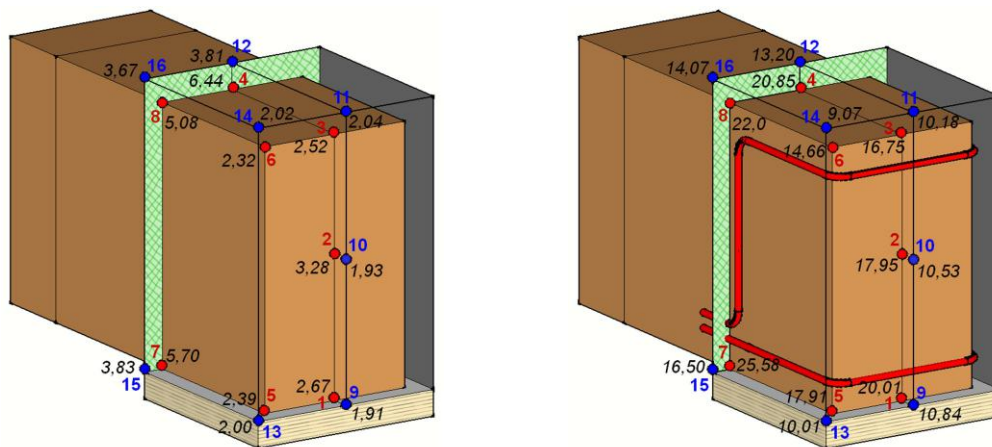


obr. 131 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky

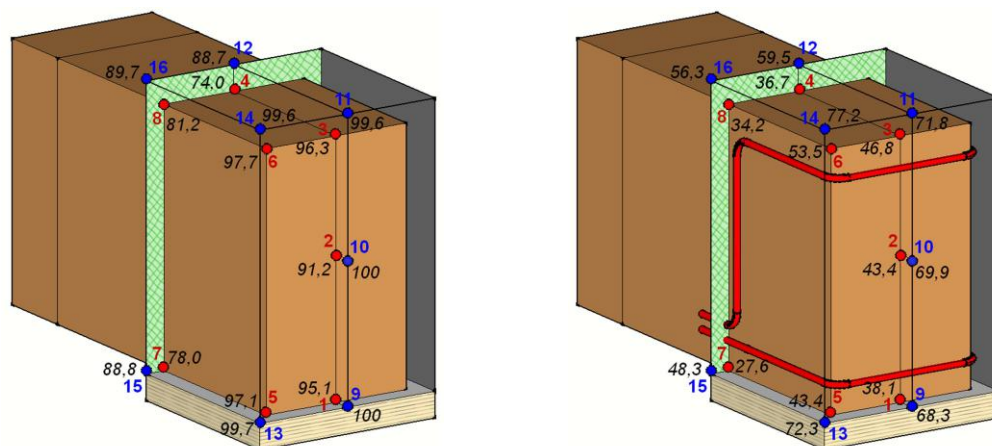


Porovnání s referenčním modelem - referenční okrajové podmínky

Teplota [°C]

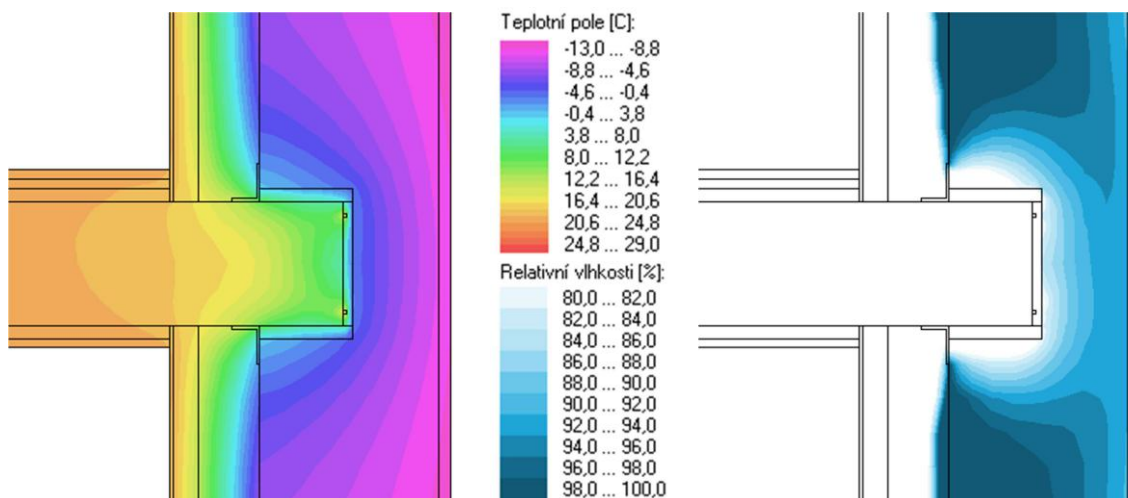


Relativní vlhkost [%]



obr. 132 – Sledované body + porovnání teplot a RH při referenčních okrajových podmínkách

Výstup pro návrhové okrajové podmínky

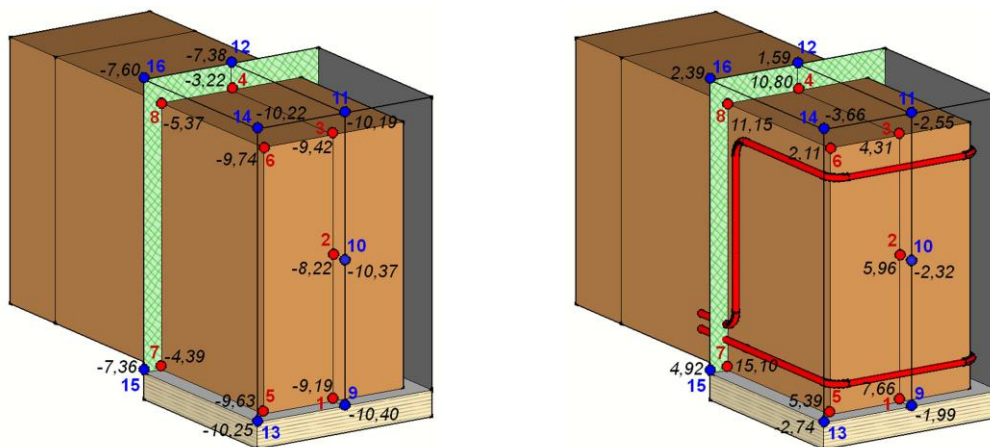


obr. 133 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky

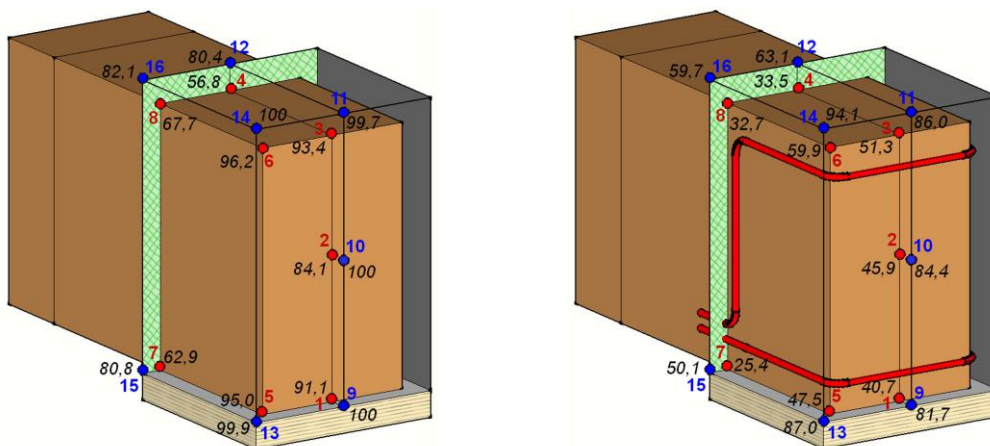


Porovnání s referenčním modelem - návrhové okrajové podmínky

Teplota [°C]

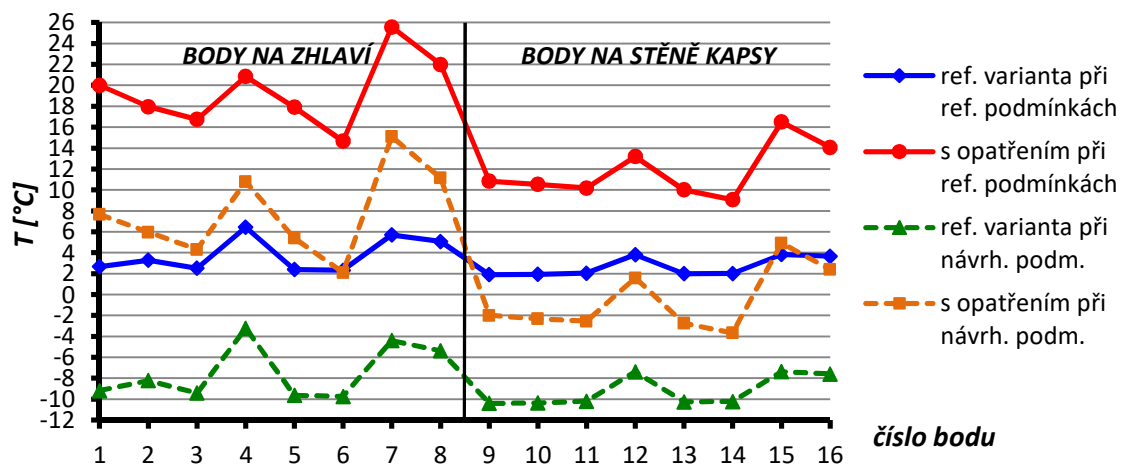


Relativní vlhkost [%]

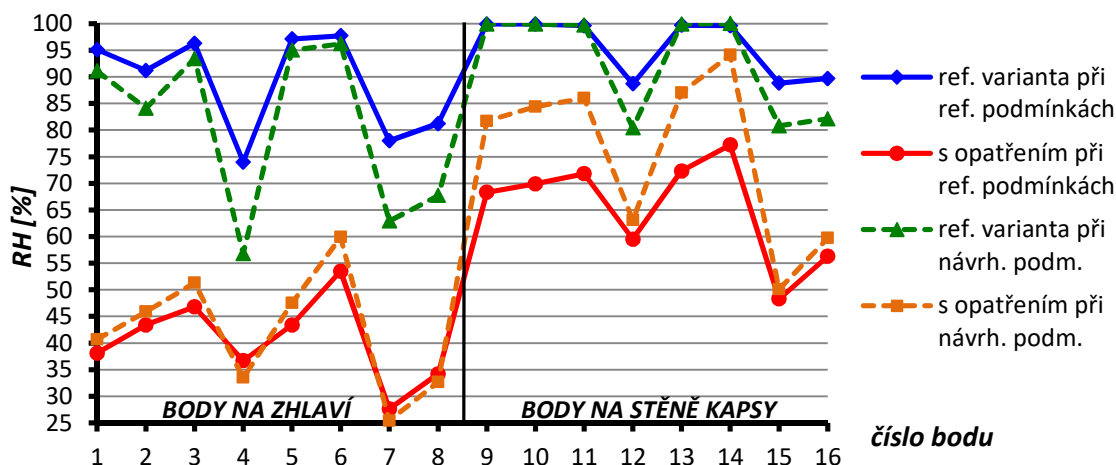


obr. 134 – Sledované body + porovnání teplot a RH při návrhových okrajových podmínkách

Grafické porovnání stavu před a po opatření



obr. 135 – Změna teploty ve sledovaných bodech pro variantu opatření 2A – topný kabel 10 W/m



obr. 136 – Změna relativní vlhkosti ve sledovaných bodech pro variantu opatření 2A – topný kabel 10 W/m

Dle obr. 135 zajistí topný kabel již při výkonu 10 W/m výrazné zvýšení teplot v oblasti trámového zhlaví. Na povrchu trámu se teploty zvýšily přibližně o 14 až 20 °C pro referenční i návrhové podmínky. V bodech na povrchu kapsy došlo k navýšení teplot o 8 až 12 °C.

Vlivem velkého zvýšení teplot došlo v oblasti trámové kapsy k výraznému snížení relativní vlhkosti. Na povrchu zhlaví je po aplikaci topného kabelu maximální relativní vlhkost 60 %. Na stěnách kapsy je pro referenční okrajové podmínky dokonce relativní vlhkost pod 80 %. Při návrhových podmínkách je na čele kapsy zabráněno kondenzaci a maximální relativní vlhkost dosahuje 95 %.

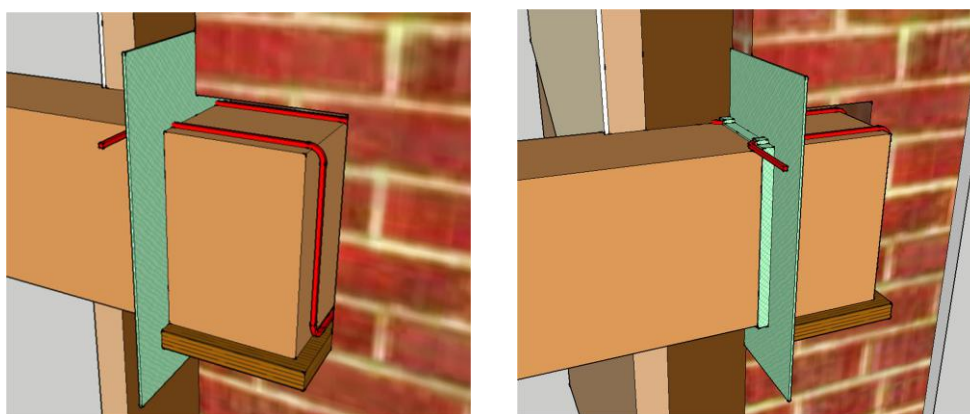
Celkově se varianta s takto umístěným topným kabelem do trámové kapsy jeví jako velice efektivní a to již při poměrně malém výkonu 10 W/m. Dostatečnou funkci by tak možná zajistilo i jednodušší provedení s průběžným topným kabelem vedeným na rozhraní tepelné izolace a zdiva. Do jednotlivých kapes by pak byla jednoduše umístěna pouze jedna smyčka (viz varianta opatření 2B).



7.2.3 Varianta 2A – topný kabel 10 W/m – průběžné zapojení

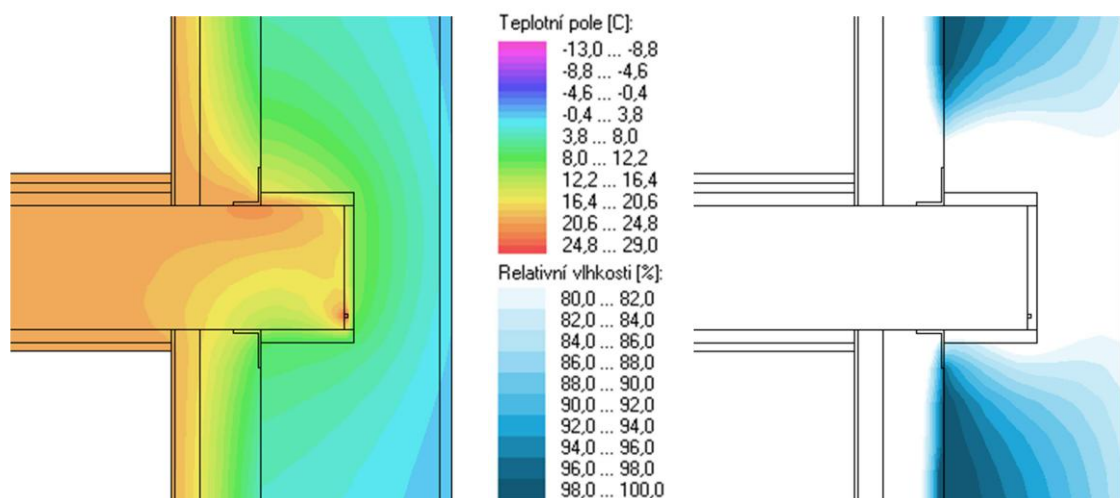
Princip opatření

Oproti předchozí variantě 2A je zde uvažováno s průběžným vedením topného kabelu v úrovni rozhraní tepelné izolace a zdiva. Do každé kapsy je pak jednoduše vložena smyčka z topného kabelu, který následně pokračuje k další kapse (viz obr. 137). Hlavní výhodou tedy je odstranění komplikovanějšího zapojení po jednotlivých kapsách. Dále je i umístění smyčky z topného kabelu pojata jednodušeji. Průběžně vedený kabel mezi stropními trámy navíc zajistí zlepšení podmínek na rozhraní v celé délce stropní konstrukce. Nevýhodou je větší délka kabelu, a tudíž i vyšší spotřeba elektrické energie.



obr. 137 – Schéma opatření – topný kabel vedený průběžně

Výstup pro referenční okrajové podmínky

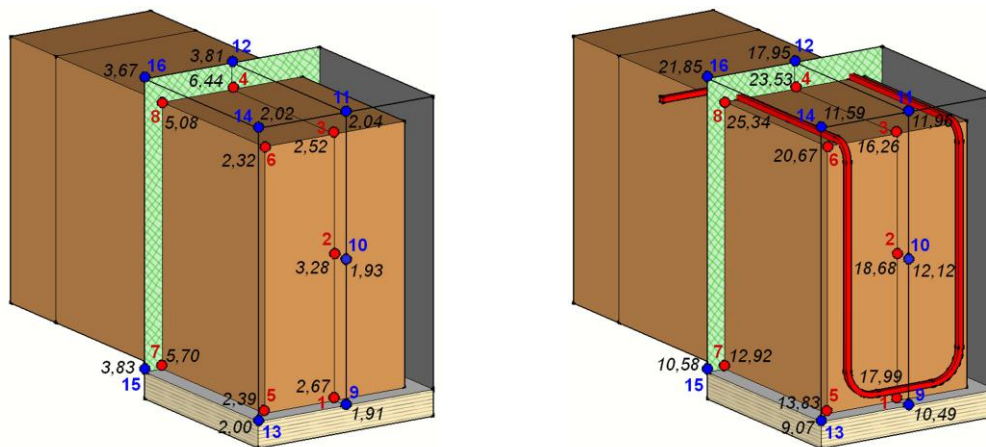


obr. 138 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky

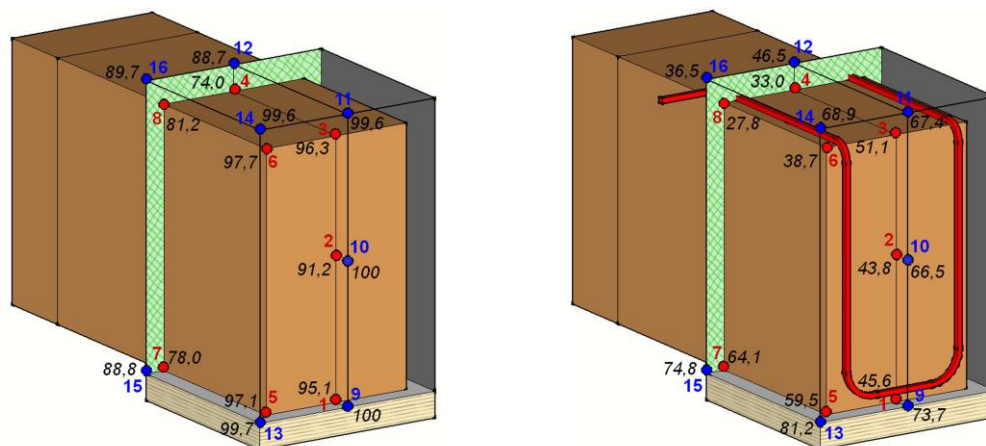


Porovnání s referenčním modelem - referenční okrajové podmínky

Teplota [°C]

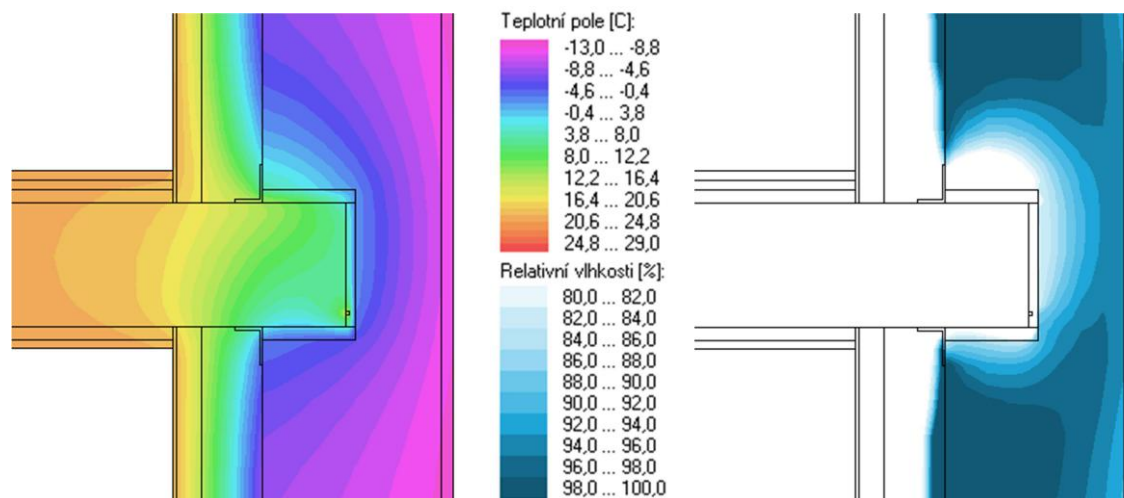


Relativní vlhkost [%]



obr. 139 - Sledované body + porovnání teplot a RH při referenčních okrajových podmínkách

Výstup pro návrhové okrajové podmínky

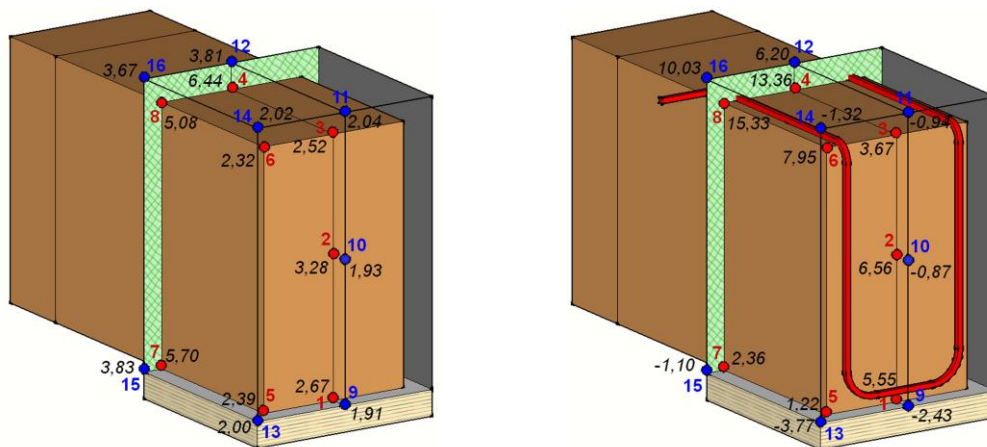


obr. 140 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky

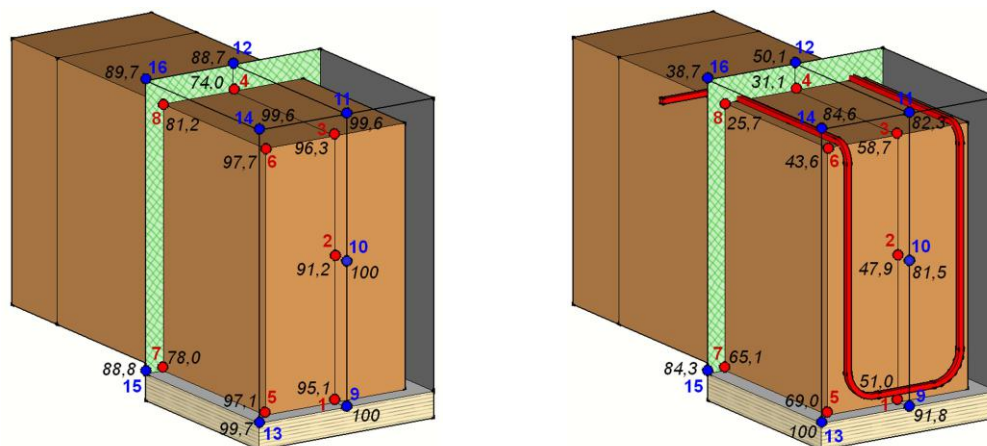


Porovnání s referenčním modelem – návrhové okrajové podmínky

Teplota [°C]

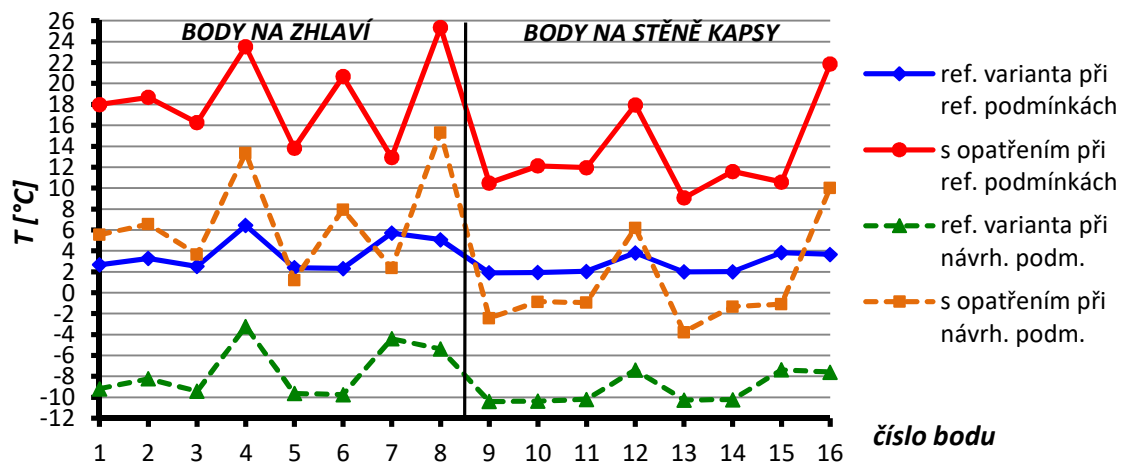


Relativní vlhkost [%]

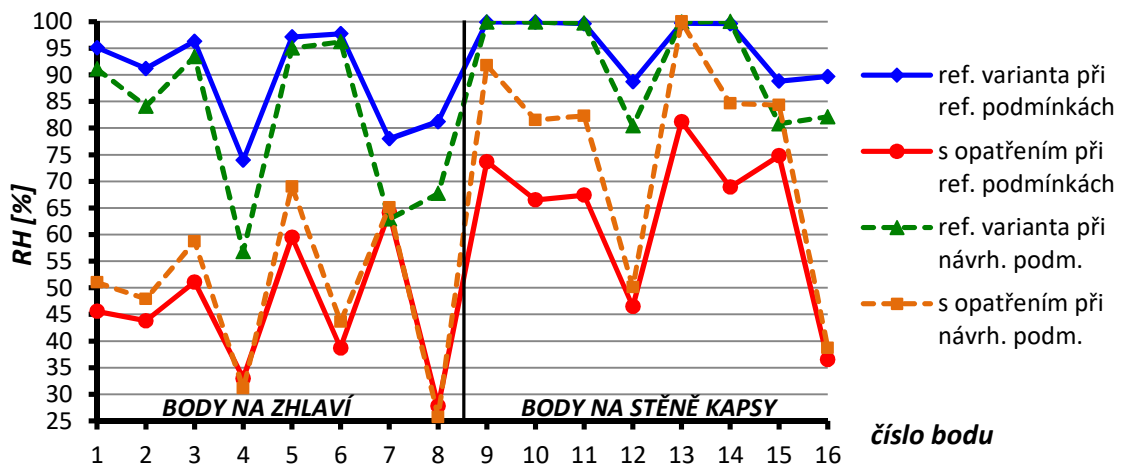


obr. 141 - Sledované body + porovnání teplot a RH při návrhových okrajových podmínkách

Grafické porovnání stavu před a po opatření



obr. 142 – Změna teploty ve sledovaných bodech pro variantu opatření 2B – topný kabel 10 W/m průběžný



obr. 143 – Změna relativní vlhkosti ve sledovaných bodech pro variantu opatření 2B – topný kabel 10 W/m průběžný

Z obr. 142 je patrné, že i tato varianta umístění topného kabelu vede k účinnému prohřátí trámové kapsy.

Relativní vlhkost na povrchu zhlaví nepřesahuje 70 % jak pro referenční, tak pro návrhové okrajové podmínky. Na stěnách kapsy je 80% relativní vlhkost překročena jen pro návrhové podmínky.

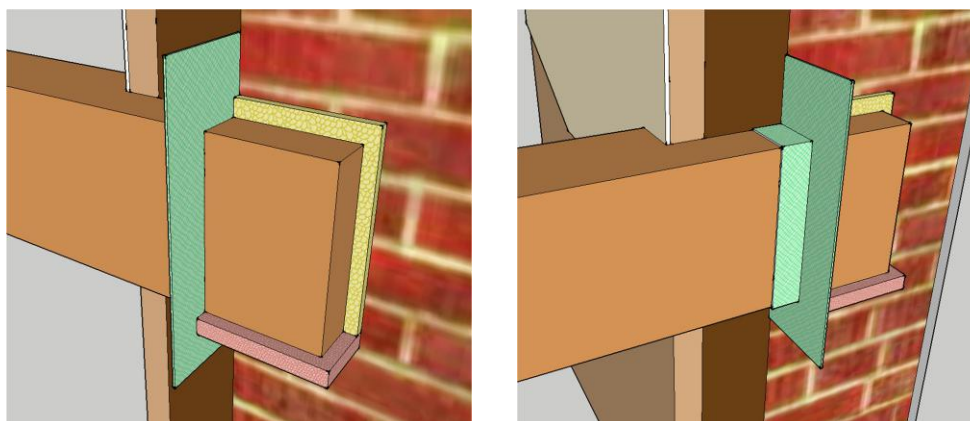
Obě varianty s topným kabelem tedy zajišťují velmi účinné zlepšení tepelně vlhkostních podmínek v oblasti trámového zhlaví.



7.2.4 Varianta 3A – PUR pěna s otevřenou strukturou

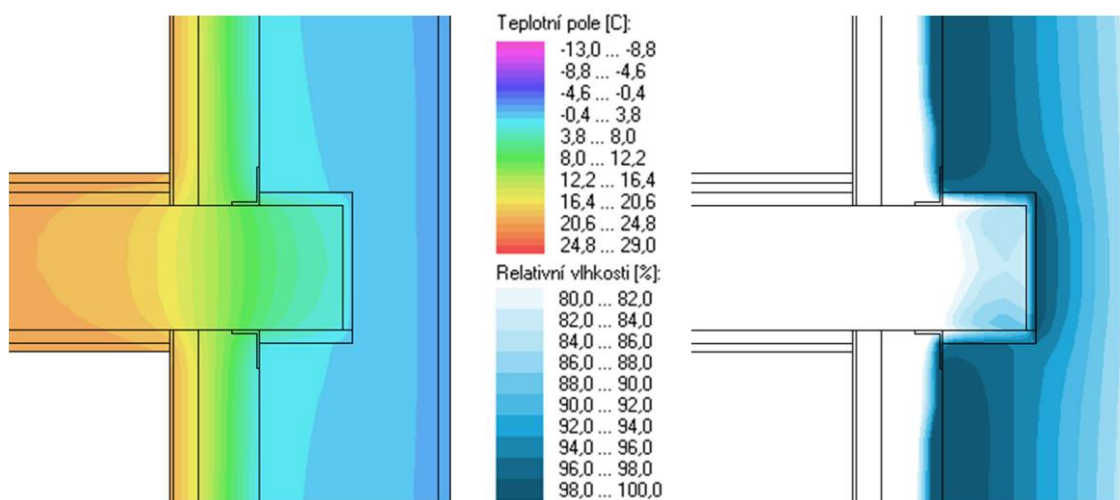
Princip opatření

Principem této varianty je vytvoření slabé, ale nepřerušené tepelně izolační obálky okolo trámového zhlaví. Stávající stropní trám bude podepřen a mírně nadzdvihnut. Původní dřevěná podložka bude nahrazena únosnou tepelně izolační podložkou například z pěnového skla nebo compactfoamu ($\lambda = \text{cca } 0,066 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$). Po spuštění trámu na podložku může být kapsa kompletně vyplněna měkkou stříkanou PUR pěnou s otevřenou strukturou buněk ($\lambda = 0,034 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; $\mu = 2,5$). Aby bylo co nejvíce omezeno množství vodní páry prostupující PUR pěnou do kapsy, bude spára okolo trámu opět utěsněna například airstop páskou přelepenou na zdivo.



obr. 144 – Schéma opatření – podložka z compactfoamu + vypěnění PUR s otevřenou strukturou

Výstup pro referenční okrajové podmínky

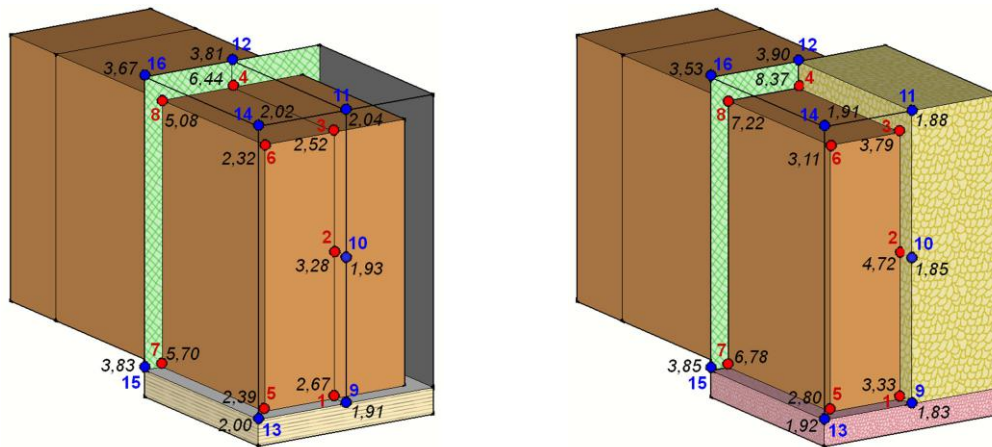


obr. 145 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky

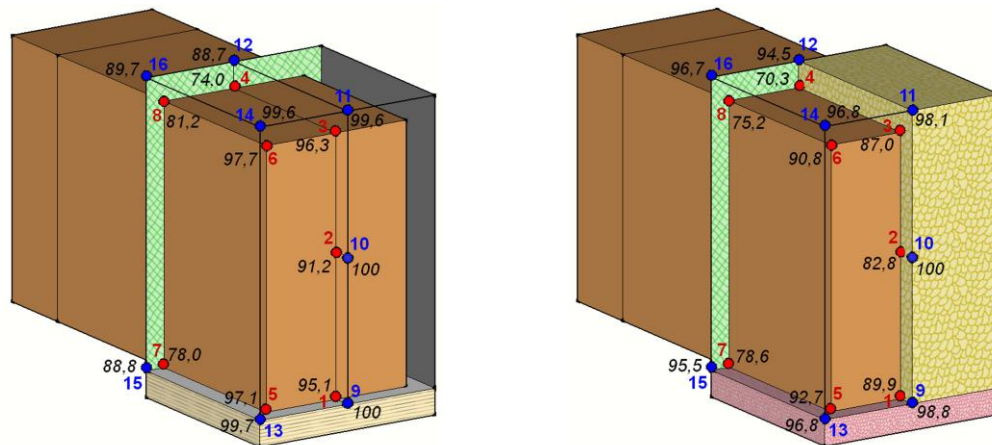


Porovnání s referenčním modelem - referenční okrajové podmínky

Teplota [°C]

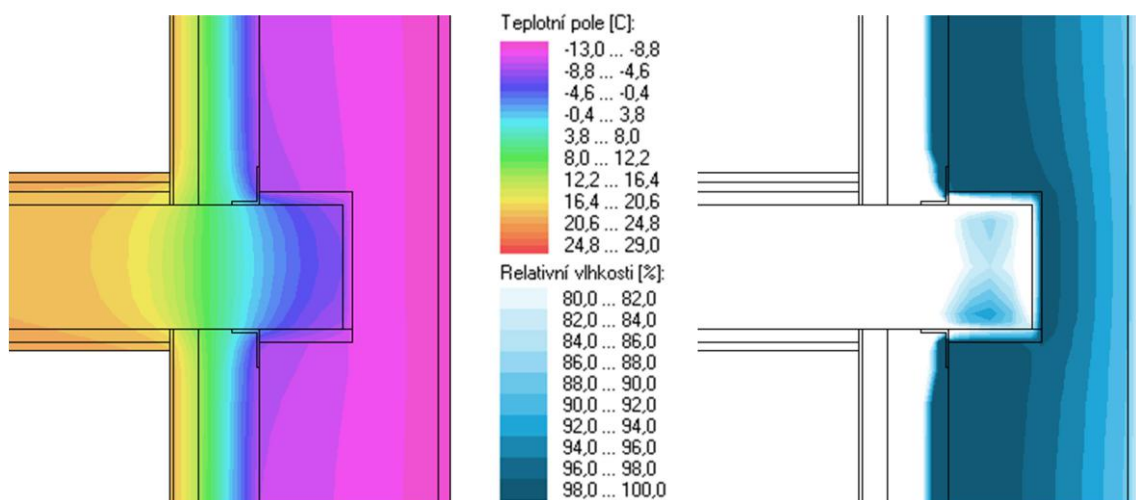


Relativní vlhkost [%]



obr. 146 - Sledované body + porovnání teplot a RH při referenčních okrajových podmínkách

Výstup pro návrhové okrajové podmínky

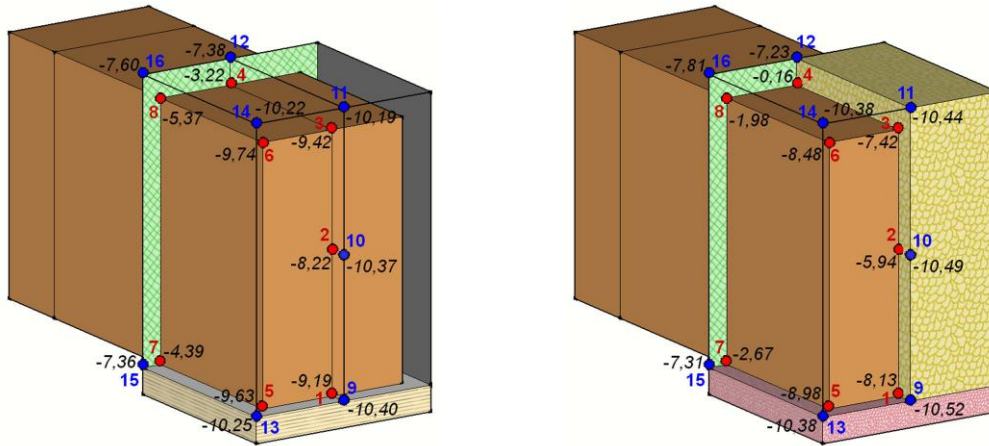


obr. 147 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky

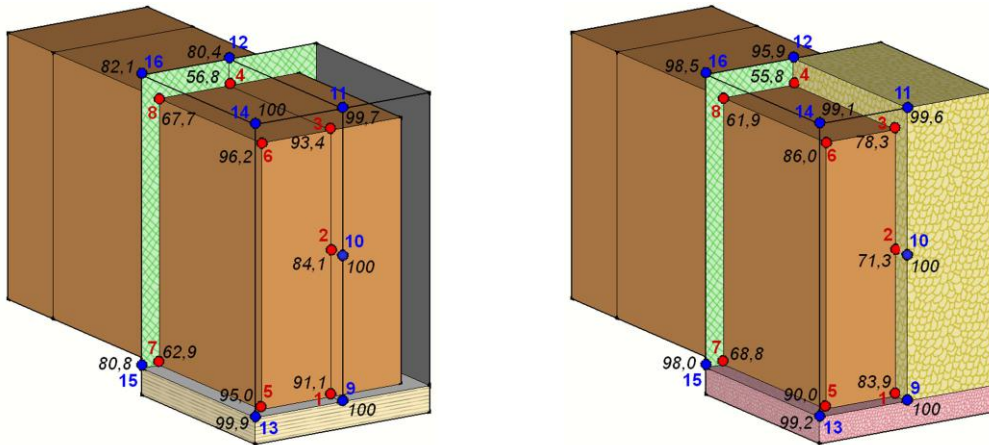


Porovnání s referenčním modelem - návrhové okrajové podmínky

Teplota [°C]

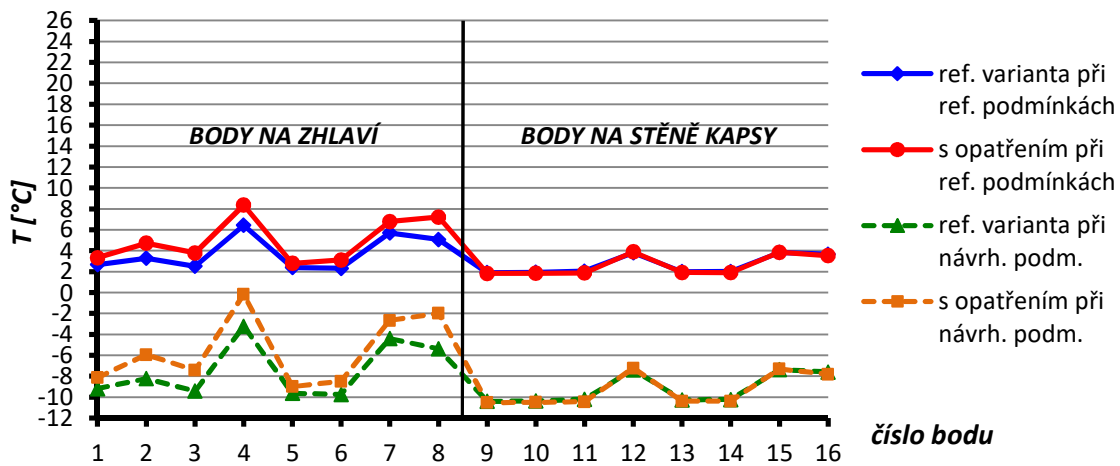


Relativní vlhkost [%]

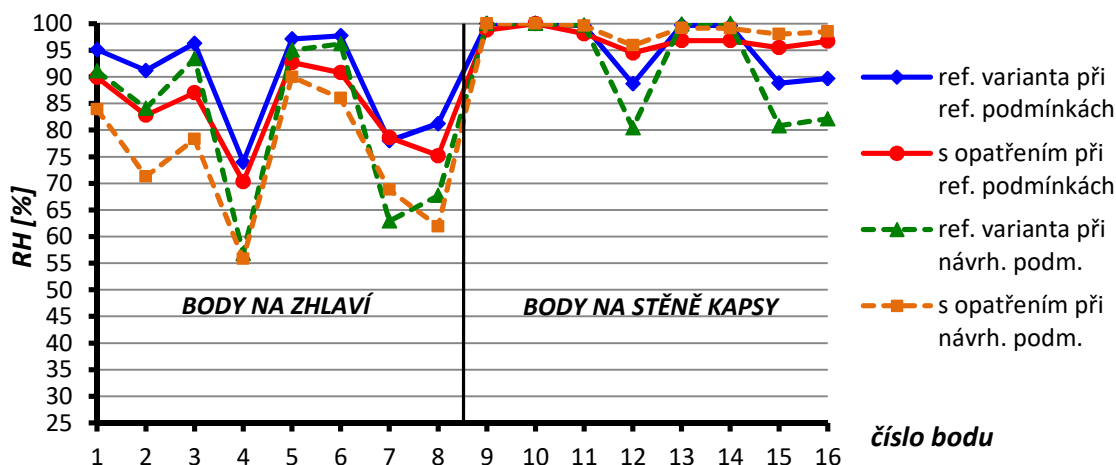


obr. 148 - Sledované body + porovnání teplot a RH při návrhových okrajových podmínkách

Grafické porovnání stavu před a po opatření



obr. 149 – Změna teploty ve sledovaných bodech pro variantu opatření 3A – PUR s otevřenou strukturou



obr. 150 – Změna relativní vlhkosti ve sledovaných bodech pro variantu opatření 3A – PUR s otevřenou strukturou

Z obr. 149 je patrné, že vyplnění kapsy PUR pěnou a nahrazením dřevěné podložky například podkladkem z pěnového skla, nezajistíme výrazně vyšší teploty na povrchu zhlaví – alespoň ne v případech, kdy má vzduchová mezera kolem trámu tloušťku okolo 2 cm. V bodech na povrchu trámu došlo k navýšení teplot přibližně jen o 2 °C při referenčních i návrhových okrajových podmínkách. Teploty na stěnách kapsy se logicky nezvýšily, naopak je vidět jejich mírný pokles vlivem odizolování.

I přes nepatrné zvýšení teplot nastalo ve sledovaných bodech na povrchu trámu výraznější snížení relativní vlhkosti. Zároveň zde stále nastává jev vysvětlený na str. 152 a 153, tedy že pro návrhové podmínky nastávají na povrchu zhlaví paradoxně nižší relativní vlhkosti než pro mírnější podmínky, nicméně uvnitř zhlaví se situace zhorší. Relativní vlhkost v bodech na čele trámu a uvnitř zhlaví je ale i po opatření nad 80 %. Zároveň došlo ke zhoršení vlhkostních podmínek v místě rozhraní airstop pásky a PUR pěny (body 7, 12, 15, 16).

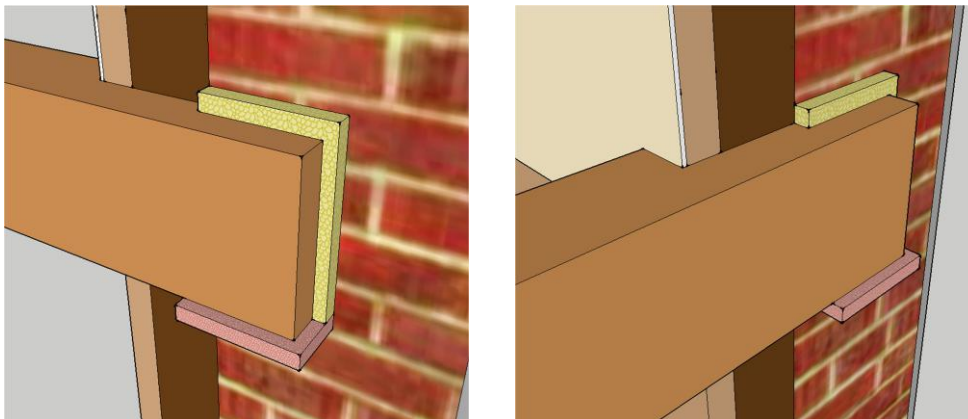
Varianta s vyplněním kapsy PUR pěnou s otevřenou strukturou buněk tedy dle výstupů z výpočtového modelu zajistí mírné zlepšení na čele zhlaví. Riziko kondenzace vodní páry na povrchu kapsy se ale tímto opatřením neomezí. Jelikož může být tento typ pěny více nasákavý, hrozí následné zavlčení vlhkosti zpět k dřevěnému zhlaví. Vhodnost této varianty je tedy sporná a pravděpodobně nepovede k výraznému zlepšení tepelně vlhkostních podmínek v kapse.



7.2.5 Varianta 3B – PUR pěna s uzavřenou strukturou

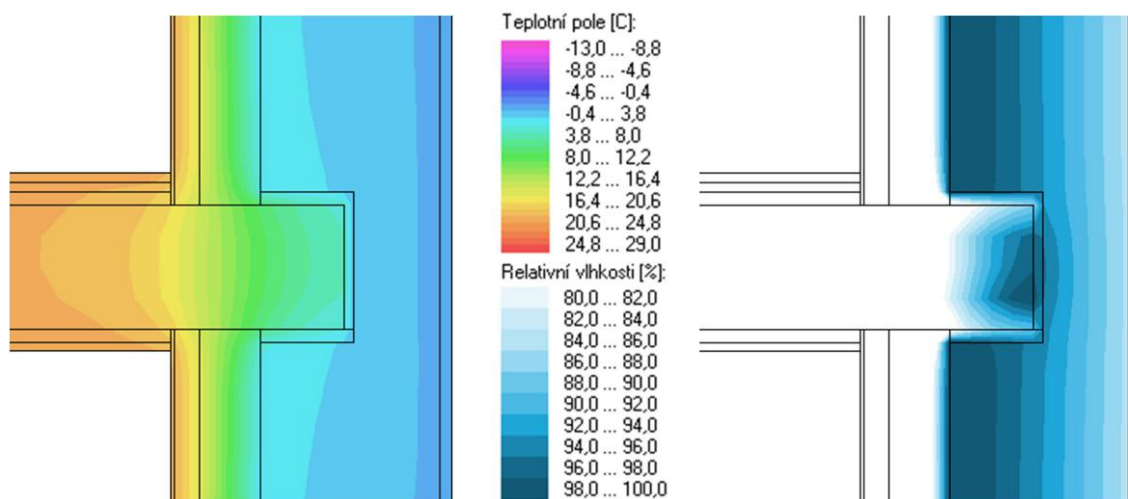
Princip opatření

Tato varianta je totožná s předchozí variantou pouze s tím rozdílem, že je použita PUR pěna s uzavřenou strukturou buněk. Výhodou je menší tepelná vodivost ($\lambda = 0,023 \text{ W/(m.K)}$). Zhlaví tedy bude lépe izolováno. Další vlastností PUR pěn s uzavřenou strukturou je vysoký faktor difuzního odporu ($\mu = \text{cca } 100$). Pro omezení prostupu vodní páry do oblasti trámové kapsy tedy není nutné další opatření. Zároveň má tento druh pěny velmi nízkou nasákavost.



obr. 151 -- Schéma opatření – podložka z compactfoamu + vypění PUR s uzavřenou strukturou

Výstup pro referenční okrajové podmínky

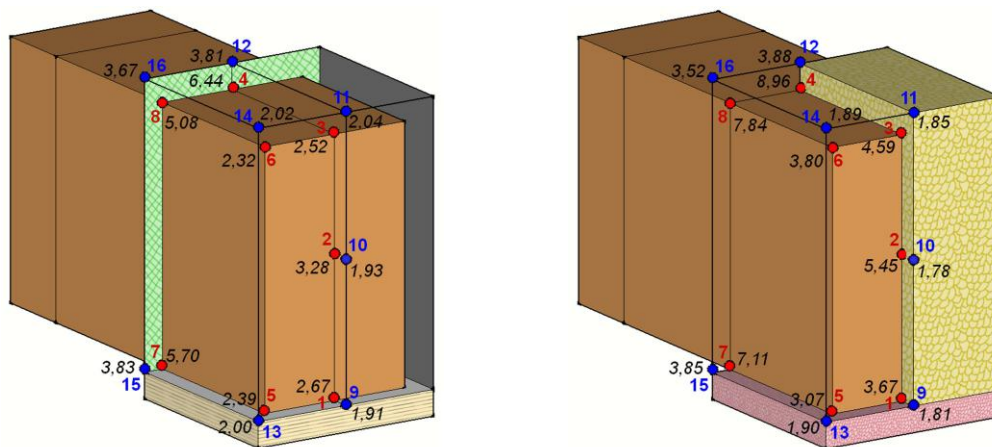


obr. 152 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky

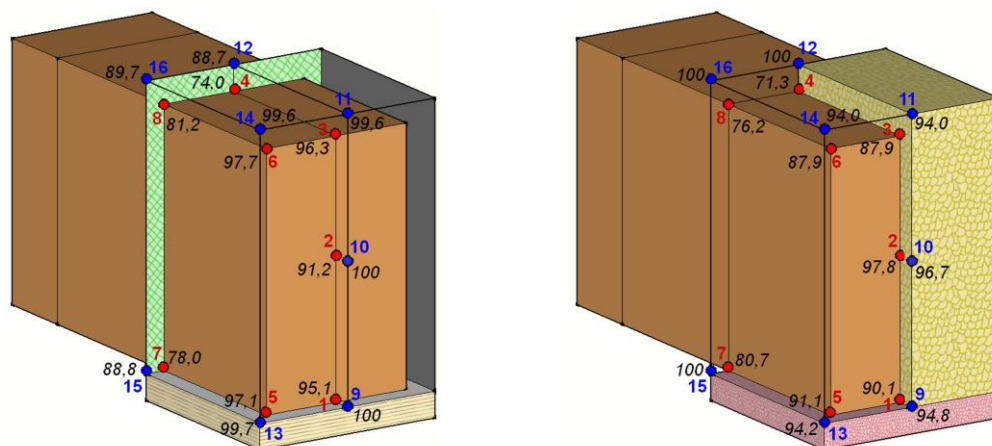


Porovnání s referenčním modelem - referenční okrajové podmínky

Teplota [°C]

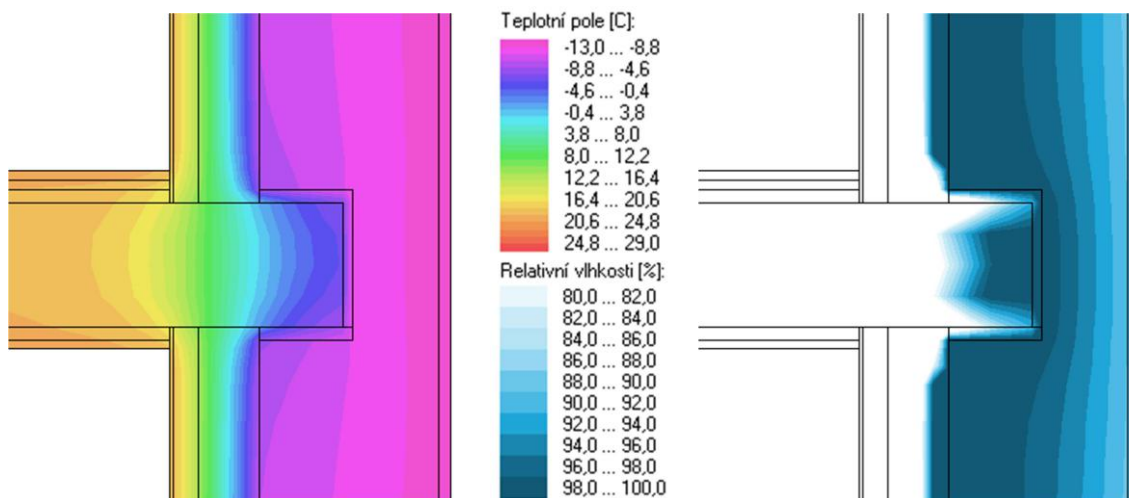


Relativní vlhkost [%]



obr. 153 - Sledované body + porovnání teplot a RH při referenčních okrajových podmínkách

Výstup pro návrhové okrajové podmínky

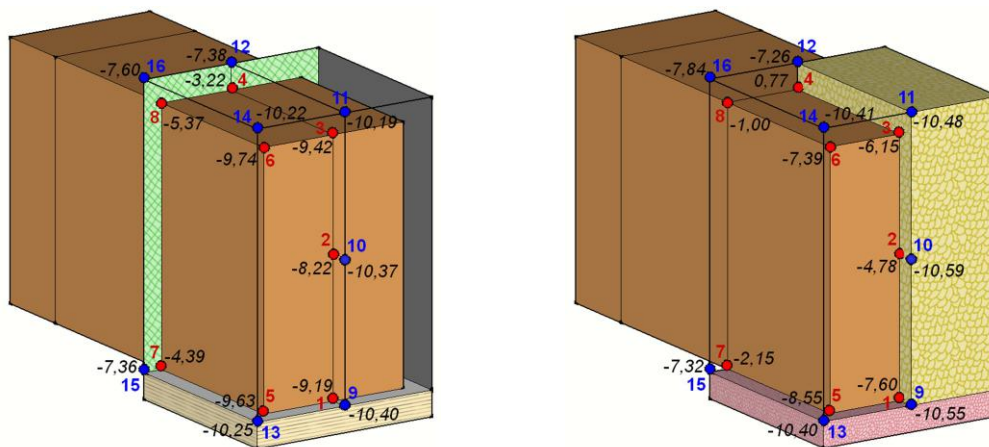


obr. 154 - Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky

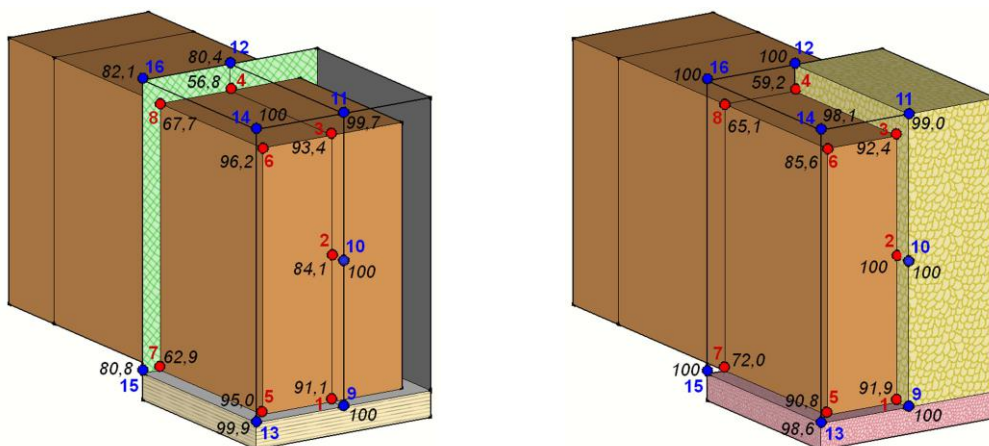


Porovnání s referenčním modelem - návrhové okrajové podmínky

Teplota [°C]

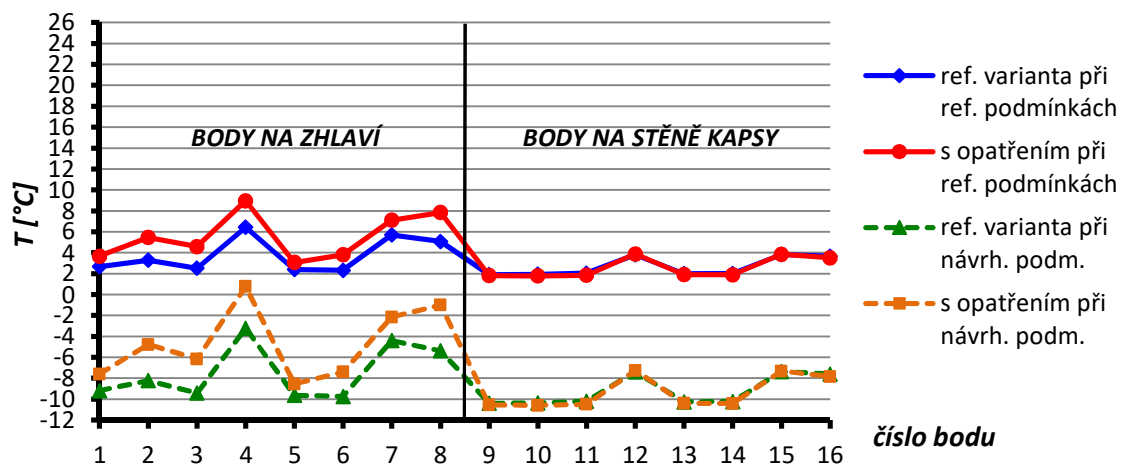


Relativní vlhkost [%]

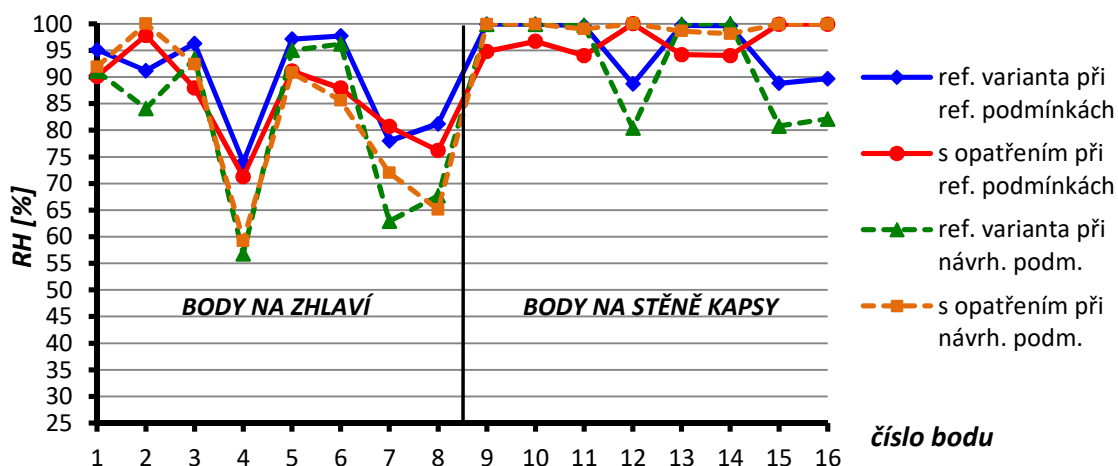


obr. 155 - Sledované body + porovnání teplot a RH při návrhových okrajových podmínkách

Grafické porovnání stavu před a po opatření



obr. 156 – Změna teploty ve sledovaných bodech pro variantu opatření 3B – PUR s uzavřenou strukturou



obr. 157 – Změna relativní vlhkosti ve sledovaných bodech pro variantu opatření 3B – PUR s uzavřenou strukturou

Z obr. 156 je patrné, že i přes lepší tepelně izolační vlastnosti PUR pěny s uzavřenou strukturou buněk je ovlivnění teplot v oblasti zhlaví podobně nevýrazné jako u předchozí varianty s pěnou s otevřenou strukturou. To je zřejmě způsobeno příliš malou tloušťkou vzduchové mezery okolo zhlaví, a tudíž i malou tloušťkou izolantu.

Zásadní problém, ale představuje zvýšená relativní vlhkost v oblasti konce zhlaví, jak je dobře patrné z obr. 152 a 154. Vlivem uzavřené struktury PUR pěny sice proniká vodní pára okolo zhlaví minimálně, ale samotnou strukturou dřeva rovnoběžně s vlákny, připomínající svazek trubiček, může vodní pára snadno prostupovat. Difúzně uzavřená pěna před čelem trámu pak vytváří bariéru, kde hrozí kondenzace vodní páry.

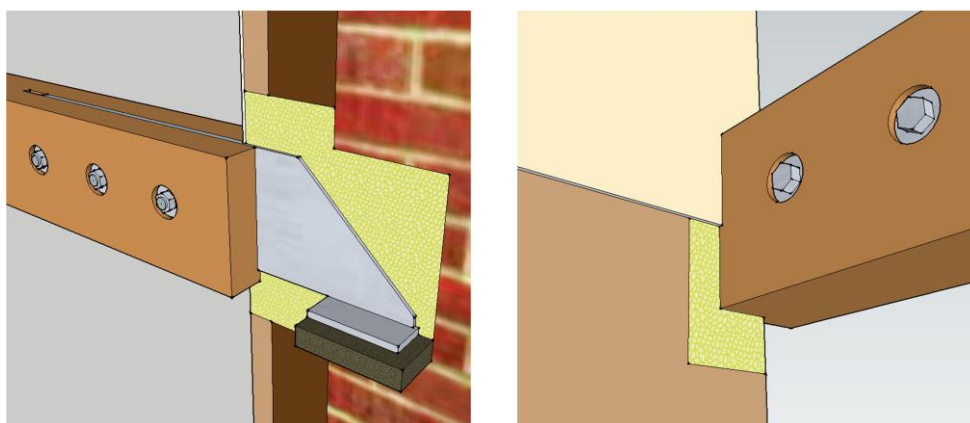
Varinata s vyplněním kapsy PUR pěnou s uzavřenou strukturou buněk je tedy dle výstupu výpočetního modelu velmi nevhodným opatřením.



7.2.6 Varianta 4 – ocelová protéza

Princip opatření

Opatření spočívá v odstranění dřevěného trámového zhlaví z problémové oblasti trámové kapsy a jeho nahrazení ocelovou protézou (ocelový plech tl. 10 mm, $\lambda = \text{cca } 40 \text{ W}/(\text{m.K})$). Aby bylo zabráněno kondenzaci vodní páry na ocelovém prvku a tepelné ztráty detailem byly minimalizovány, bude protéza uložena na únosnou tepelně izolační podložku z pěnového skla nebo compactfoamu tloušťky 3 cm ($\lambda = \text{cca } 0,066 \text{ W}/(\text{m.K})$) a okolní prostor bude vypěněn PUR pěnou s uzavřenou strukturou buněk ($\lambda = \text{cca } 0,023 \text{ W}/(\text{m.K})$; $\mu = \text{cca } 100$). Tepelně izolační obálka tak zůstane nepřerušena. Díky uzavřené struktuře PUR pěny bude zajištěna i vzduchotěsnost celého detailu. Jedná se o nejvíce invazivní opatření z uvažovaných variant, které má ale efektivně obejít problém s dřevěnými prvky prostupujícími rovinou vnitřního zateplení. Pro názornost je popsán i uvažovaný postup provádění.



obr. 158 – Schéma opatření – ocelová protéza

Postup provádění

Na obr. 159 je zobrazen postup provádění uvažující zdravé stávající stropní trámy. Není tedy nutné odstraňovat velkou část trámů a protéza může být subtilnější a jednodušší.

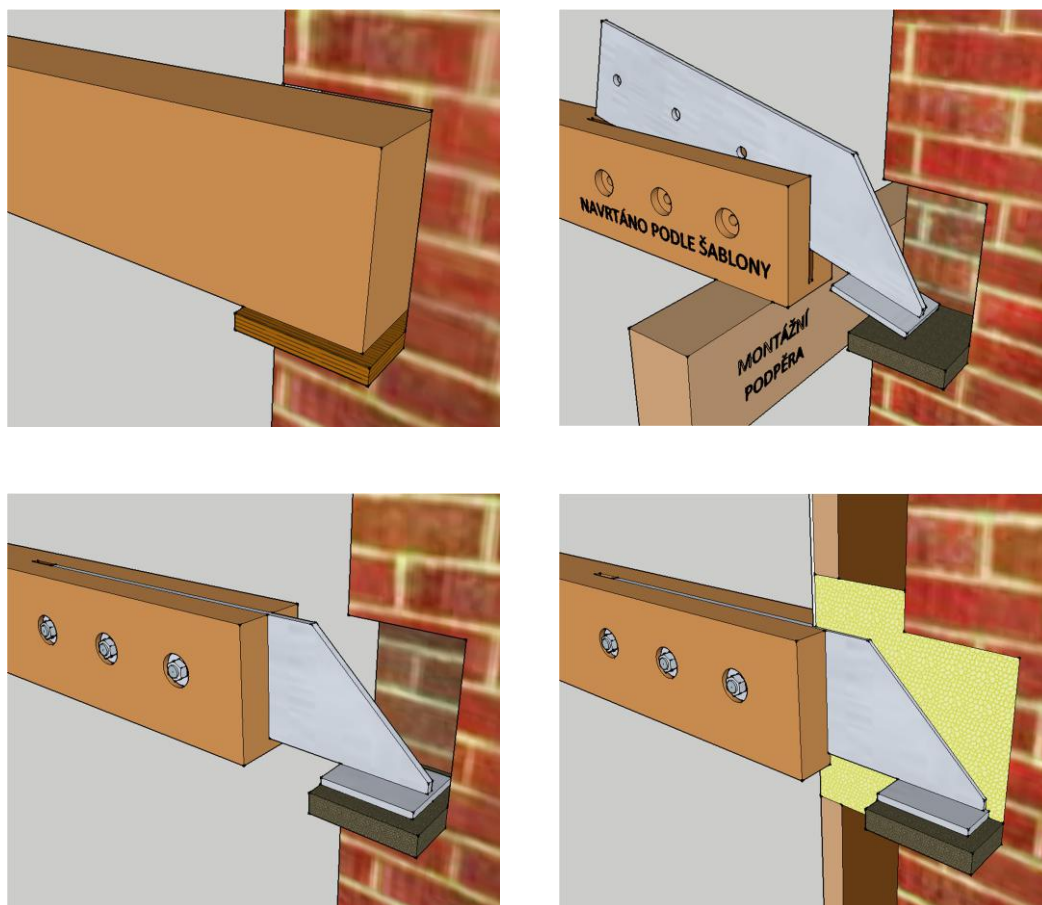
1. Proběhne alespoň částečná demontáž podlahy v pruhu širokém přibližně 1 m od stávající stěny s uloženými stropními trámy. Podhled postačí demontovat v pruhu širokém cca 0,5 m od této stěny.
2. Stávající stropní trámy budou podepřeny a zhlaví budou uříznuta tak, aby nový konec stropního trámu přesahoval přibližně 2 cm za budoucí povrchovou úpravu (kvůli začištění). Konce trámů budou vyjmuty z kapes (případně vyřezány) a dřevěné podložky budou nahrazeny podložkou z pěnového skla nebo compactfoamu. Horní frézku bude vyhloubena drážka pro uložení ocelové protézy. Drážka neproběhne celou výškou trámu, přibližně 2 cm zůstanou neproříznuté, čímž budou moci trámy zůstat pohledové a bude zvýšena i ochrana ocelové protézy před účinky požáru. Podle šablony budou do trámu navrtány otvory pro svorníky a následně bude do drážky osazena protéza z ocelového plechu. Zkosené čelo protézy zajistí



bezproblémové osazení na místo. Tímto tvarem je omezen zároveň tepelný most. Při případném prohoření a pádu stropní konstrukce pak tento tvar zabrání odpáčení stěny nad trámovými kapsami.

3. Do předvrtaných otvorů budou osazeny ocelové svorníky. Poté mohou být odstraněny podpěry. Při dostatečné šířce stropního trámu může být podložka s matkou zapuštěna a následně zaslepena dřevěnou krytkou. I při pohledovém řešení stropních trámů by celé opatření zůstalo skryté.

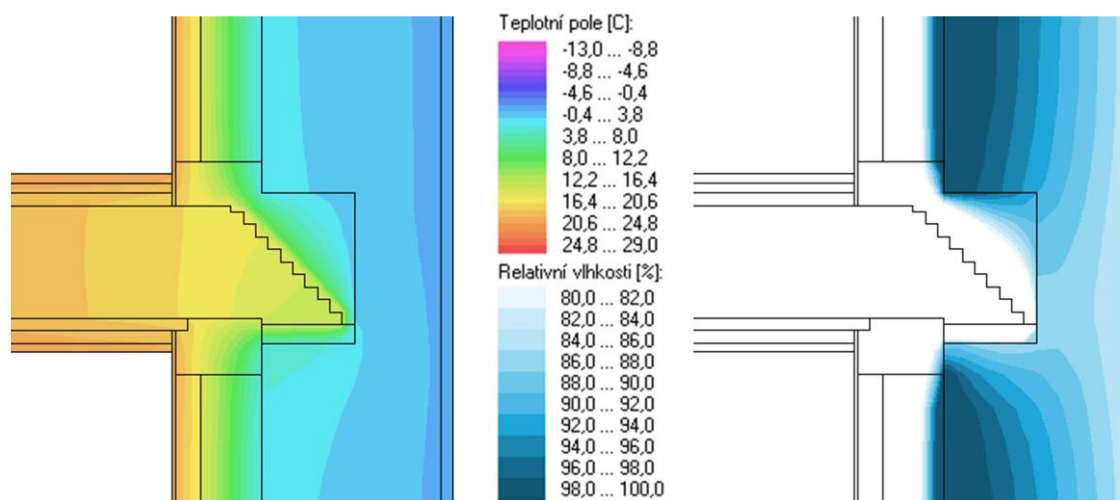
4. Proběhne aplikace vnitřního zateplení například dřevovláknitými deskami. Izolace bude vynechána pouze v okolí trámové kapsy (přibližně 5 cm kolem obvodu kapsy). Následně budou kapsy až po líc zateplení zcela vyplněny stříkanou PUR pěnou s uzavřenou strukturou buněk. Po vytvrdnutí bude přebývající pěna zaříznuta do roviny izolačních desek. Důležitým předpokladem pro správnou funkci je ovšem těsné přilnutí PUR pěny k ocelovému prvku, aby nemohlo docházet k šíření vodní páry podél protězy – případně je tento styk nutné utěsnit. Na stěně pak může být celoplošně provedena stěrka vyztužená armovací síťovinou. Následně může být zaklopena podlaha a případně podhled.



obr. 159 – Postup montáže ocelové protězy

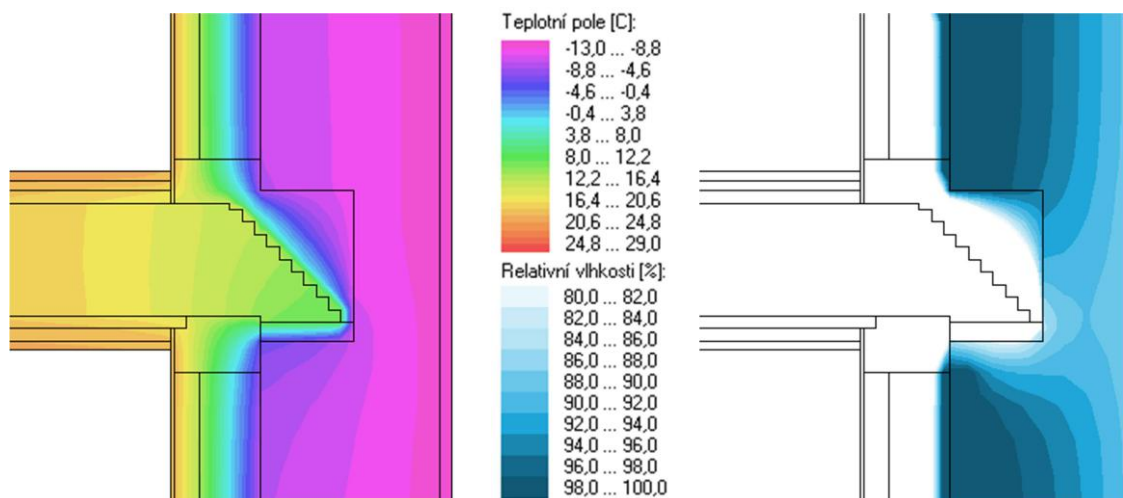


Výstup pro referenční okrajové podmínky



obr. 160 - Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky

Výstup pro návrhové okrajové podmínky



obr. 161 - Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky

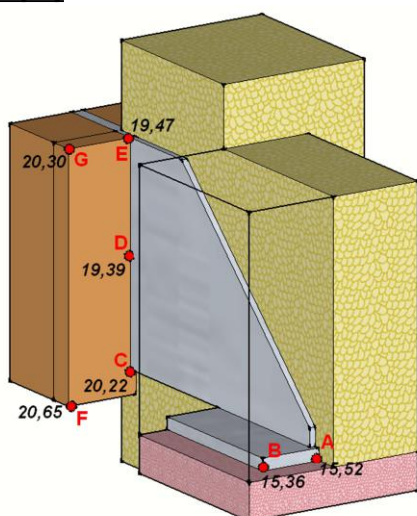
Varianta s ocelovou protézou je koncepčně zcela odlišná a na rozdíl od předešlých variant ji tedy nelze jednoduše porovnat s referenčním modelem zhlaví. Ovšem již z obr. 160 a 161 je zřejmé, že se takto upravené zhlaví chová bezpečně.

Pro další vyhodnocení jsou sledovány body A až G (viz obr 162 a 163) na povrchu ocelové protézy a stropního trámu, ve kterých lze očekávat zvýšené relativní vlhkosti.

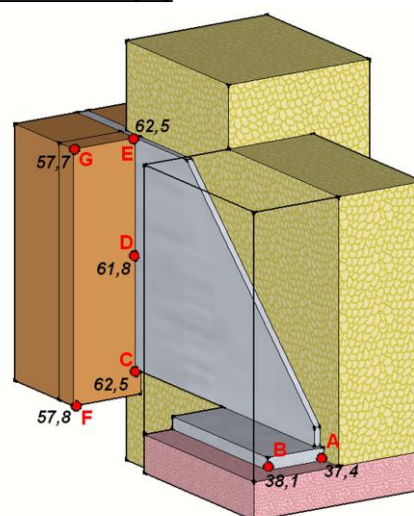


Vypočtené teploty a relativní vlhkosti pro referenční okrajové podmínky

Teplota [°C]



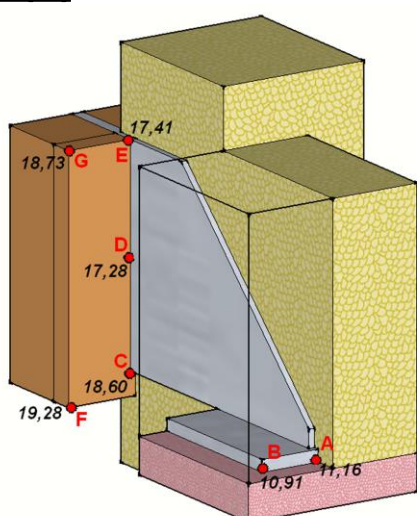
Relativní vlhkost [%]



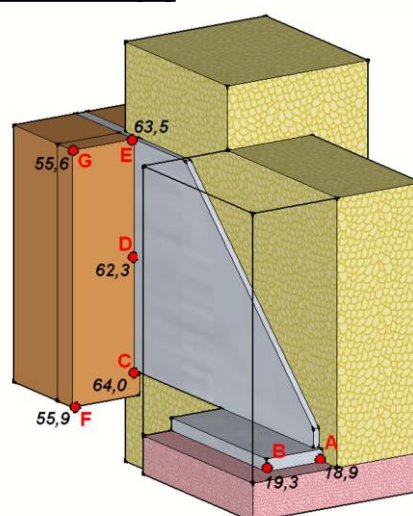
obr. 162 – Sledované body s vyznačením teplot (vlevo) a relativní vlhkosti (vpravo)

Vypočtené teploty a relativní vlhkosti pro návrhové okrajové podmínky

Teplota [°C]



Relativní vlhkost [%]



obr. 163 – Sledované body s vyznačením teplot (vlevo) a relativní vlhkosti (vpravo)

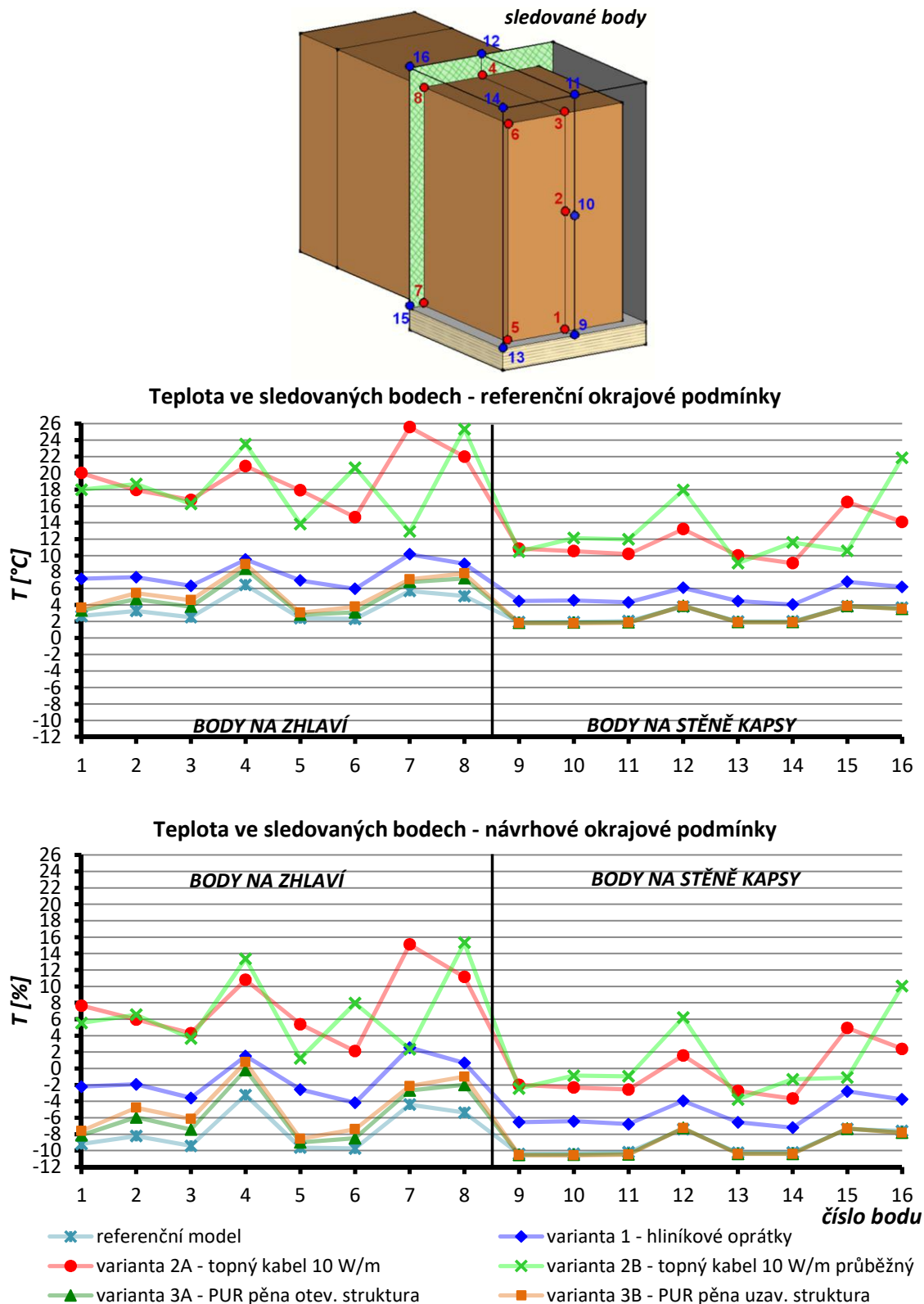
Z obr. 162 a 163 je patrné, že i ve sledovaných bodech je situace bezpečná. V koncové části ocelové protězy jsou i pro návrhové okrajové podmínky teploty okolo 11 °C a relativní vlhkost pod 20 %. U líce zateplovacího systému se pak teplota pohybuje okolo 18 °C a relativní vlhkost nepřekročí 65 %. Navíc PUR s uzavřenou strukturou buněk a i podkladek z pěnového skla jsou nenasákové materiály. Ani případná kondenzace na povrchu zdiva by tak neměla ohrozit ocelovou protězu korozí.

Varianta s ocelovou protězou je sice poměrně komplikovaná, ale dle výstupů z výpočtového modelu je i velmi bezpečná.

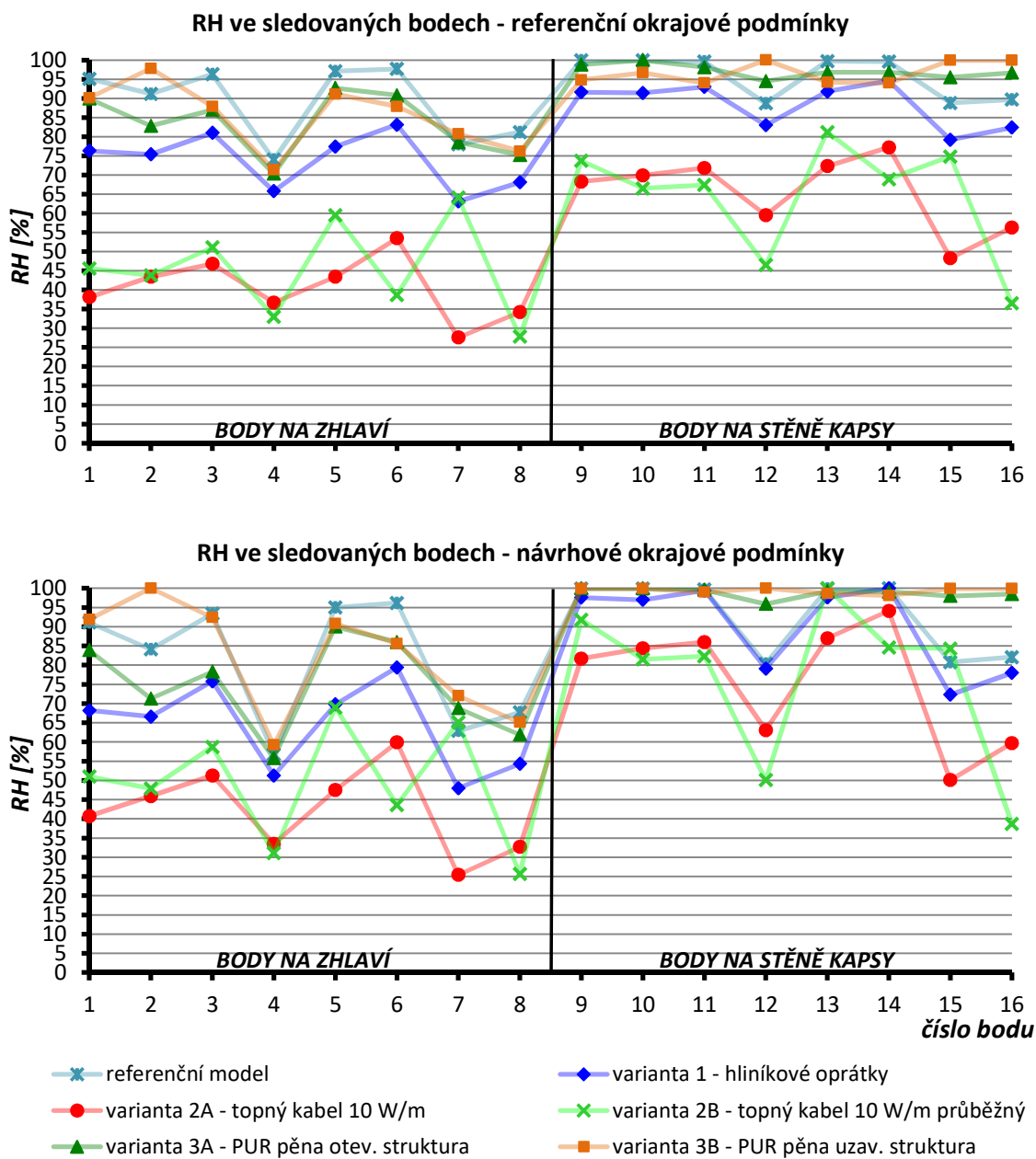


7.3 Vyhodnocení variant opatření

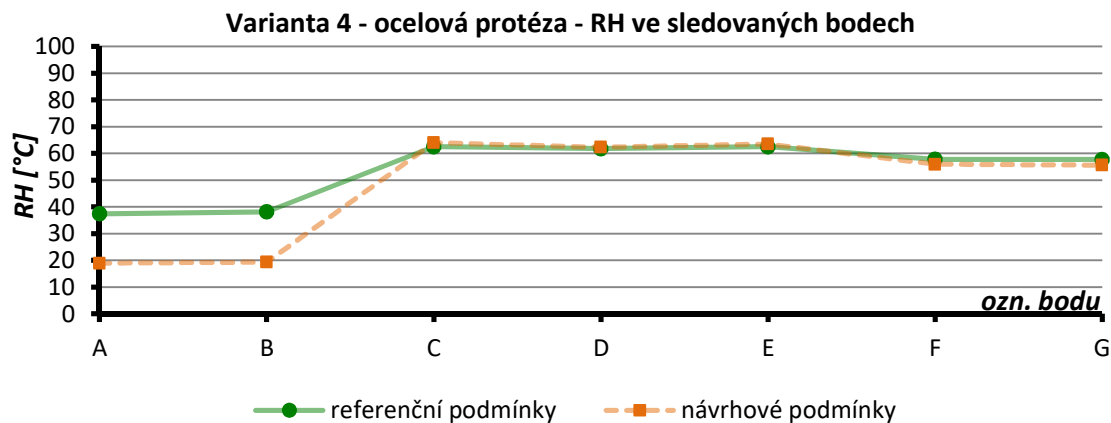
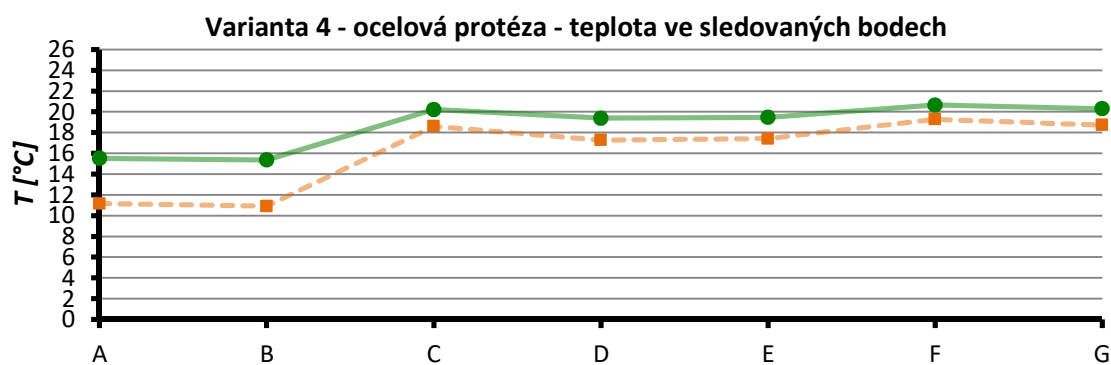
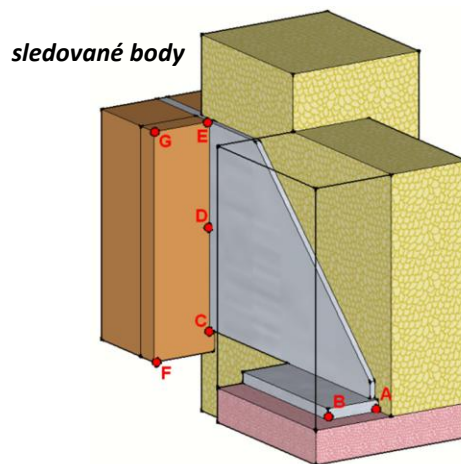
Pro větší názornost je na obr. 164 a 165 zobrazen vliv jednotlivých opatření na změnu teploty a relativní vlhkosti v oblasti trémového zhlaví. Varianta s ocelovou protézou je pak zobrazena samostatně na obr. 166.



obr. 164 – Porovnání variant opatření z hlediska změny teplot v trémové kapse



obr. 165 – Porovnání variant opatření z hlediska změny relativní vlhkosti v trámové kapse



obr. 166 – Teplota a relativní vlhkost ve sledovaných bodech pro variantu s ocelovou protézou

Z porovnání jednotlivých variant je patrné, že největšího zlepšení tepelně vlhkostních podmínek v trámové kapse lze jednoznačně docílit pomocí topných kabelů, a to již při poměrně malém výkonu 10 W/m. Velice dobré výsledky dle výpočtového modelu má přitom i snadněji proveditelná varianta s kabelem průběžně vedeným po rozhraní (zateplovací systém / zdivo) a následným uložení jednoduché smyčky z kabelu před čelo zhlaví. U obou variant je pro referenční okrajové podmínky udržována ve všech bodech relativní vlhkost pod 80 %. Při velmi přísných okrajových podmínkách je pak 80% hranice RH překročena pouze v bodech na stěnách kapsy, kde jsou ale současně velmi nízké teploty pod 0 °C. Celkově vhodnější je tedy



varianta 2B s jedním průběžným topným kabelem, a to právě pro snazší proveditelnost. Dalším typem pro zjednodušení může být přemístění těsnění kolem zhlaví kvnitřnímu líci zateplovacího systému. V tomto místě by navíc navazovalo přímo na rovinu zajišťující vzduchotěsnost celého systému zateplení.

Dalším v pořadí nejvhodnějším opatřením se jeví varianta 4 s ocelovou protézou. Uložení na podkladek z pěnového skla (případně compactfoamu, purenitru...) a vyplnění kapsy PUR pěnou s uzavřenou strukturou buněk, zajistilo ve všech sledovaných bodech dostatečně vysoké teploty 11 až 20 °C. Relativní vlhkost ani při návrhových okrajových podmínkách nestoupla v blízkosti ocelové protézy ani dřevěného trámu nad 70 %. Zároveň při důkladném provedení je celý detail vzduchotěsný a relativně uzavřený difuzi vodní páry. U difuzně otevřeného systému zateplení tak zřejmě nevyžaduje další utěsnění a v případě systémů s fóliovými parozábranami by mělo být utěsnění kolem ocelové protézy méně komplikované než kolem původního dřevěného prvku. Varianta 4 se tedy nejen na základě výstupu z výpočtového modelu, ale i z hlediska adaptability, jeví jako velmi efektivní. Oproti opatření v podobě aktivního vytápění topnými kabely navíc nevyžaduje další provozní energie. Ze všech uvedených variant se ale jedná o nejvíce invazivní a komplikovaný přístup, který by se využil spíše v ojedinělých případech již zdegradovaných zhlaví, které je nutné nahradit. Proto je subjektivně vyhodnocena až jako třetí nejvhodnější.

Varianta 1 s hliníkovými oprátkami se ukázala jako nejvíce sporná. Zajišťuje sice zvýšení teplot a znatelný pokles RH na povrchu zhlaví, ale i přesto zůstávají hodnoty relativní vlhkosti v některých bodech na trámu a především na povrchu kapsy nad hranicí 80 %. Celkově tak v prostředí kapsy mohou vzniknout paradoxně příznivější podmínky pro vznik plísní než při předchozích chladnějších teplotách. Vlhkostní situace je ve výpočetním modelu pravděpodobně silně nadhodnocena, jak již bylo uvedeno ve vyhodnocení referenčního modelu, nicméně by tuto variantu opatření bylo vhodné sledovat pomocí dynamického výpočetního modelu. Další nevýhodou této varianty může také být komplikované zajištění utěsnění kolem zhlaví. Navíc by oprátky musely být předem vyrobeny přímo pro konkrétní šířku stropního trámu nebo by musely být naohýbány až podle situace na stavbě. Dva hliníkové prvky ve tvaru písmene L umístěné proti sobě by tedy byly rozhodně praktičtější a účinek by se pravděpodobně nezměnil.

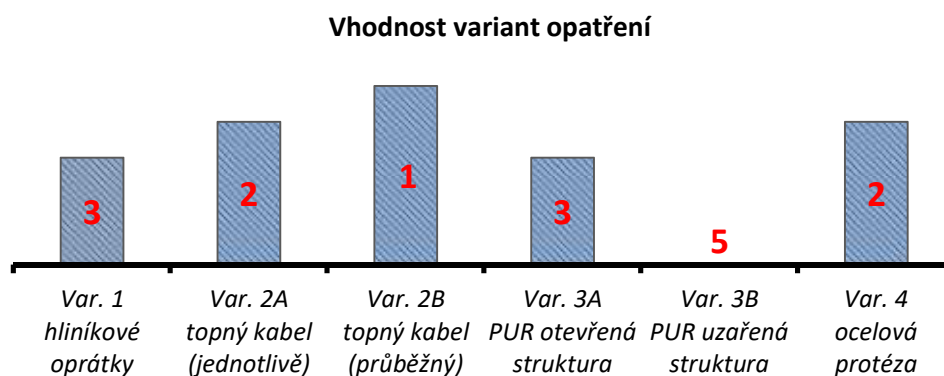
Ještě mírnější vliv na zlepšení tepelně vlhkostních podmínek v oblasti zhlaví měla varianta 3A s vyplněním kapsy PUR pěnou s otevřenou strukturou buněk a současně náhradou podkladku zhlaví destičkou z pěnového skla nebo compactfoamu. Vlivem úzké vzduchové mezery kolem zhlaví, zde bylo pouze 15 až 20 mm pěny, což zajistilo pouze minimální zvýšení teplot na povrchu zhlaví oproti referenčnímu stavu. Relativní vlhkost zde tedy sice poklesla, ale v několika sledovaných bodech na zhlaví zůstala RH i nad 90 %. Nicméně při větších rozměrech vzduchové dutiny kolem zhlaví by i tato varianta mohla být efektivní.

Totožná varianta 3B, která se od předchozí varianty 3A liší pouze použitím PUR pěny s uzavřenou strukturou buněk se ukázala jako zcela nevhodná již v samostatném zhodnocení. Předpokladem totiž bylo, že lepší tepelně izolační vlastnosti této pěny zajistí dostatečné udržení vyšších teplot na povrchu zhlaví. Dle porovnání na obr. 164 je ale zřejmé, že vlivem malé vrstvy pěny se neprojevil téměř žádný rozdíl teplot oproti variantě s pěnou s otevřenou



strukturou. Zásadním problémem varianty 3B ale je, že difuzně uzavřená struktura použité pěny vytvořila bariéru nepropustnou pro vodní páru před čelem dřevěného zhlaví. Dle výpočtového modelu zde pak docházelo ke kondenzaci vodní páry, a to již při referenčních okrajových podmínkách. Varianta 3B tedy jako jediná z uvažovaných způsobila výrazné zhoršení podmínek v oblasti dřevěného zhlaví. Otázkou je, zda by větší vrstva pěny zajistila dostatečně vysoké teploty ve zhlaví, a zabránila tak vysokým relativním vlhkostem. Nicméně použití difuzně uzavřených materiálů před čelem zhlaví lze označit obecně jako rizikové.

Na obr. 167 je pro přehlednost graficky vyjádřena vhodnost jednotlivých variant, tak jak byla subjektivně vyhodnocena na str. 180 a 181 nejen s ohledem na zlepšení tepelně vlhkostních podmínek, ale i s přihlédnutím na celkovou proveditelnost. Přiřazená čísla představují známku jako ve škole

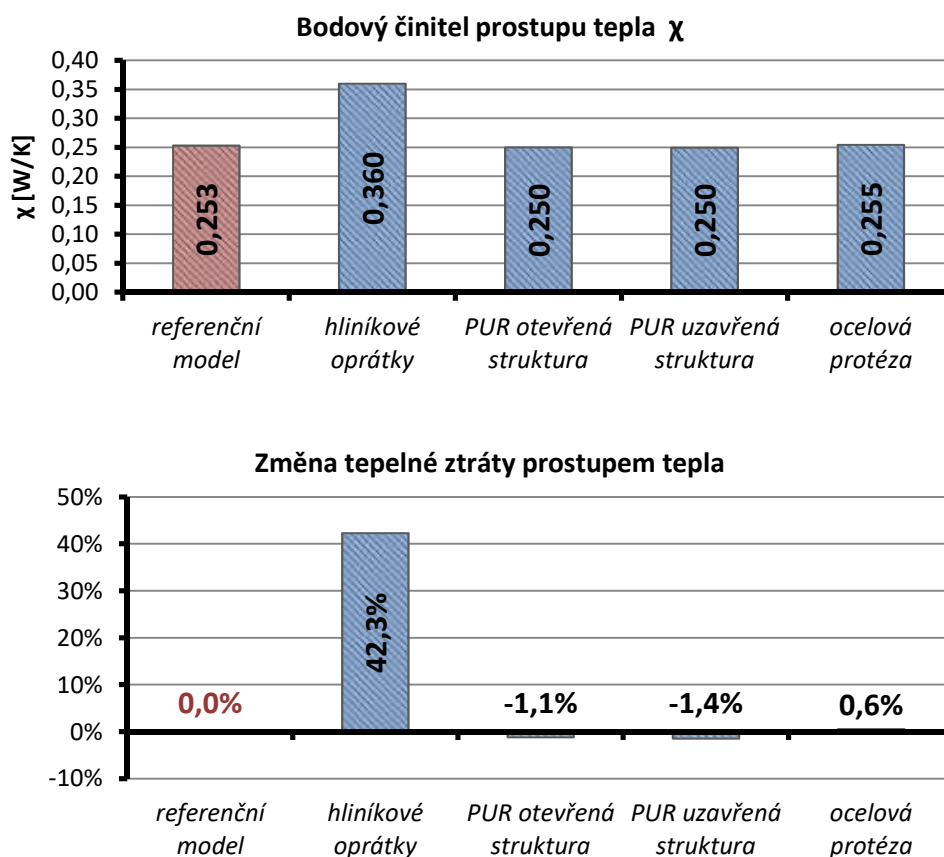


obr. 167 – Subjektivní vyhodnocení variant opatření z hlediska zlepšení tepelně vlhkostních podmínek s přihlédnutím na proveditelnost (známkování jako ve škole 1 nejvhodnější; 5 nevhodné)



7.3.1 Vyhodnocení variant opatření z energetického hlediska

Dalším kritériem pro volbu varianty opatření může také být energetické hledisko. Důvodem k aplikaci vnitřního zateplení je většinou právě snaha o snížení spotřeby energií. Na obr. 168 jsou tedy jednotlivé varianty (bez aktivního zdroje tepla) porovnány podle hodnot bodového činitele prostupu tepla pro charakteristický výsek konstrukce v okolí trámového zhlaví. Následně je zde pro jednotlivé varianty opatření zobrazena i příslušná procentuální změna tepelné ztráty prostupem tepla.



obr. 168 – Porovnání variant opatření z hlediska bodového činitele prostupu tepla a odpovídající změny tepelných ztrát prostupem tepla

Z obr. 168 je patrné, že oproti referenční variantě má výrazně vyšší hodnotu bodového činitele prostupu tepla pouze varianta s hliníkovými oprátkami, což se dalo vzhledem k vysoké tepelné vodivosti hliníku předem odhadovat. Tepelná ztráta prostupem se tedy při aplikaci hliníkových oprátek zvýší přibližně o 42 % proti referenčnímu modelu se samotným stropním trámem.

Ve variantách s vyplněním vzduchové dutiny PUR pěnou došlo pouze k zanedbatelnému snížení bodového činitele prostupu tepla oproti stavu s prázdnou dutinou. Situace by zde pravděpodobně byla lepší, pokud by vzduchová mezera okolo zhlaví měla větší rozměry. Pro zde uvažovanou dutinu o tloušťce 15-20 mm, ale nemá z energetického hlediska vyplnění PUR pěnou žádný význam.



U varianty s ocelovou protézou zajistilo ale uložení na tepelně izolační podložku z pěnového skla a vyplnění kapsy PUR pěnou s uzavřenou strukturou buněk, hodnotu bodového činitele prostupu tepla velmi podobnou referenčnímu stavu. I přes nahrazení dřevěného zhlaví masivním ocelovým prvkem, lze tedy udržet tepelnou ztrátu tímto detailem na původní hodnotě.

Varianty s topným kabelem takto jednoduše porovnat nelze. Pro představu je ale možné zjednodušeně stanovit alespoň náklady na roční provoz varianty s topným kabelem.

Pokud budeme uvažovat variantu 2B s topným kabelem průběžně vedeným na rozhraní izolantu a zdiva, připadá na jedno zhlaví (při osových vzdálenostech trámů 750 mm) přibližně **1,4 m** topného kabelu o výkonu **10 W/m**. Na jednu kapsu tak při vytápění připadá výkon **14 W**.

Jako požadovanou bezpečnou hodnotu RH v kapse lze například uvažovat 75 %. Z porovnání průběhu RH v kapse C_8 (která byla použita jako podklad pro referenční model) a průběhu teplot venkovního vzduchu lze pozorovat, že v kapse vzroste relativní vlhkost nad 75 % až po častějším výskytu průměrných denních teplot venkovního vzduchu pod 5 °C. Tato situace je pro kapsu C_8 podobná jak pro chladné období 2015 / 2016, tak 2016 / 2017. Pokud bychom tedy na straně bezpečné uvažovali, že například v období od října do května bude vytápění topným kabelem spouštěno vždy v ty hodiny, kdy bude v exteriéru naměřena teplota pod 5 °C (hodinově), tak dostaneme průměrně **2 412 hodin** provozu za chladné období roku.

Meziročně tak lze uvažovat s následující potřebou energie na vytápění jedné trémové kapsy:

$$2\,412 \times 14 = 33\,768 \text{ Wh} = \mathbf{33,8 \text{ kWh}}$$

Cena za kWh elektrické energie ze sítě se pohybuje okolo **4 Kč/kWh**. Meziroční náklady na vytápění jedné trémové kapsy tak orientačně činí:

$$33,8 \times 4 = \mathbf{135,2 \text{ Kč}}$$

Pokud bychom pro představu uvažovali dvoupodlažní dům s délkou traktu 10 m (odpovídá zhruba 11ti trémovým zhlavím na každé straně), se dvěma dřevěnými stropními konstrukcemi, budou náklady pro vytápění celkem 44 zhlaví:

$$135,2 \times 44 = \mathbf{5\,948,8 \text{ Kč}}$$

I z velice konzervativního zjednodušeného výpočtu tedy vyplývají poměrně nízké náklady na meziroční provoz vytápění trémových zhlaví topnými kabely. Dle výpočtového modelu přitom zajistí velmi bezpečné tepelně vlhkostní podmínky v oblasti trémových kapes. Zároveň v době aktivního vytápění bude částečně potlačována tepelná ztráta prostupem v oblasti stropní konstrukce, čímž se mohou snížit náklady na vytápění objektu.

Důležité je ale upozornit, že skutečný naměřený průběh RH v utěsněné kapse C_8 přesáhá za celé období experimentu kritickou hodnotu 80 % pouze minimálně, a to v ojedinělých případech v řádu dnů. Vytápění topnými kabely se zde tedy jeví jako neopodstatněné. Nicméně jak se prokázalo v předchozí kapitole, může například intenzivní větrem hnaný déšť způsobit výrazné zhoršení situace v trémových kapsách. V následujícím chladném období by pak



přítomnost topného systému mohla zabránit případným vyšším relativním vlhkostem v kapsách, než které zde byly doposud obvyklé.

Zároveň lze předpokládat, že vyčíslené náklady by zajistily bezpečnou vlhkostní situaci i v otevřených trémových kapsách ve stropní konstrukci bez zásahu, ve kterých bylo dosahováno i 100% relativní vlhkosti. Počet hodin provozu vytápění stanovený na základě hodinové venkovní teploty nižší než 5 °C, lze totiž považovat za velmi konzervativní.

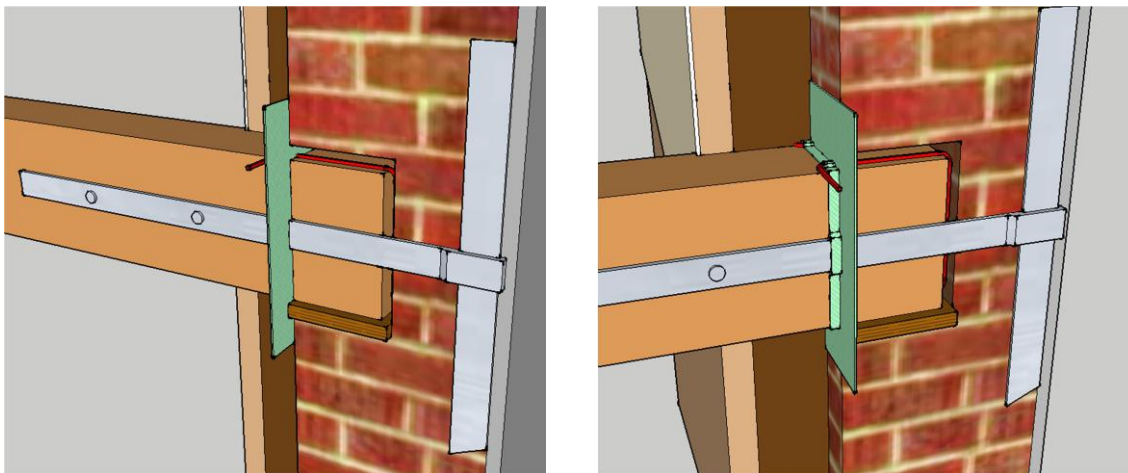
Na základě předchozích vyhodnocení lze tvrdit, že aktivní vytápění trémových kapes je tedy pravděpodobně nejrozumnějším z posuzovaných opatření. Zároveň náklady na vytápění kapes, alespoň dle zjednodušeného výpočtu, nemusejí být vysoké. Aplikace topných kabelů do trémových kapes tak lze doporučit vždy, alespoň jako pojistné opatření.



7.3.2 Vyhodnocení situace u trémové klešti

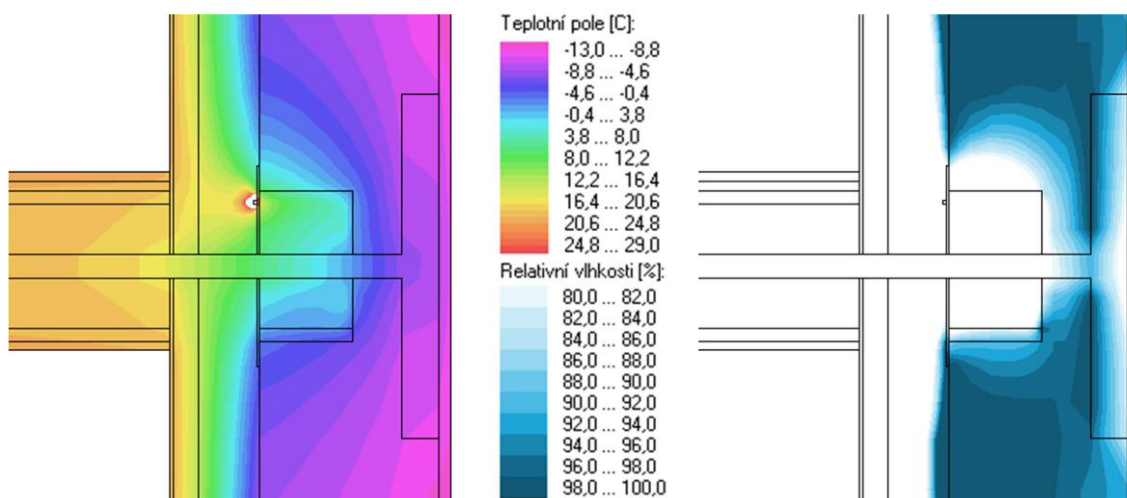
Varianta s topnými kabely byla v předchozích částech práce i přes zvýšené náklady na vytápění kapes vyhodnocena jako nejvhodnější řešení pro zlepšení tepelně vlhkostního stavu v trémových kapsách. Nicméně je otázkou, zda toto opatření dokáže zajistit dostatečně nízké relativní vlhkosti i v kapsách s ocelovou trémovou kleští, která je často nedílnou součástí dřevěných stropních konstrukcí.

Pro komplexnější vyhodnocení varianty opatření s topným kabelem byla tedy modelována i situace trémového zhlaví s osazenou ocelovou kleští (viz obr. 169), Jako materiál byla uvažována uhlíková ocel ($\lambda = 50 \text{ W/(m.K)}$) tlouštky 7 mm. Výkon topného kabelu je i v tomto případě uvažován 10 W/m. Vyhodnocení je pro zjednodušení uvažováno pouze pro přísnější návrhové okrajové podmínky.



obr. 169 – Schéma varianty opatření s průběžným topným kabelem pro trémové zhlaví s ocelovou kleští

Výstup pro návrhové okrajové podmínky



obr. 170 – Varianta opatření s topným kabelem v kapse s trémovou kleští – řez kleští - teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky

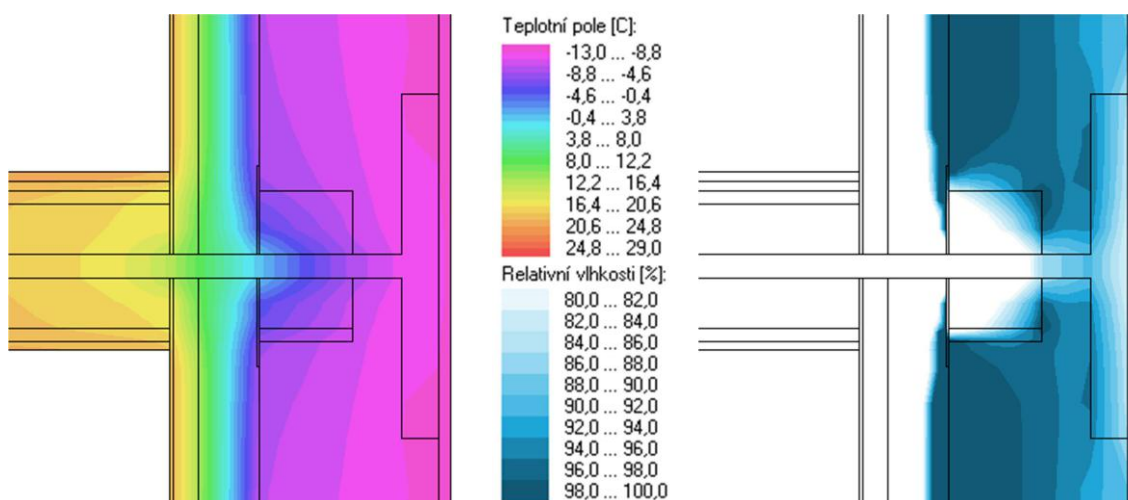


Z obr. 170 je patrné, že i v kapse s ocelovou trámovou kleští zajistí varianta opatření s průběžným topným kabelem o výkonu 10 W/m bezpečné tepelně vlhkostní podmínky a to i při návrhových okrajových podmínkách. Lze zde pozorovat, že v celé oblasti zhlaví nepřekračuje RH 80 %. V kritické oblasti ve stropní dutině při povrchu zateplovacího systému byla na ocelové klešti naměřena překvapivě nízká hodnota relativní vlhkosti 65,3 %.

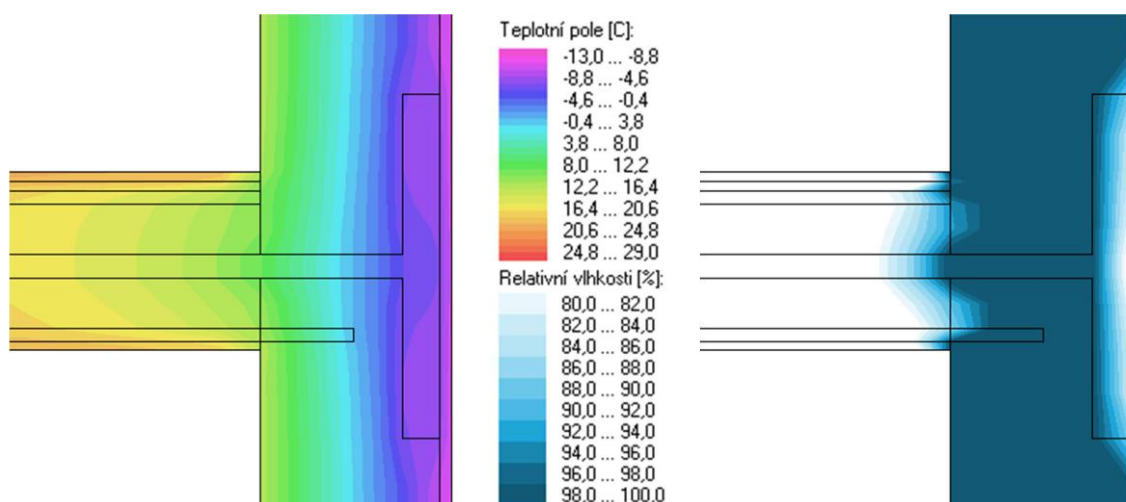
Následně byla pro porovnání sledována i situace zhlaví s trámovou kleští bez topného kabelu. Přitom bylo dle výpočtového modelu zjištěno, že i bez opatření nedochází ve stropní dutině v okolí kleštiny k přesáhnutí RH 80 % (viz obr. 171). Naopak i v oblasti kapsy, zde došlo ke zlepšení podmínek oproti referenčnímu modelu bez kleští. Jedná se o velmi překvapivé zjištění při uvážení, že ocelový prvek prostupuje až k úrovni vnější omítky.

Na obr. 172 je dále zobrazen výstup pro totožnou situaci, ale bez aplikovaného systému vnitřního zateplení (pro zjednodušení je zde zanedbána vzduchová kapsa a zhlaví je obklopeno pouze zdivem). V tomto případě lze oproti variantě s vnitřním zateplením pozorovat výrazné zhoršení v oblasti stropní dutiny v okolí ocelové kleští. Při přísných návrhových okrajových podmínkách zde dle výpočtového modelu dochází dokonce ke kondenzaci vodní páry. Situace je zde ale riziková i v případě referenčních okrajových podmínek (viz obr. 173). Teploty jsou v tomto problémovém místě přitom velmi příznivé pro vznik plísní, to ale odpovídá i reálné situaci, kdy právě tato zhlaví jsou často vlivem ocelové kleští zcela zdegradována.

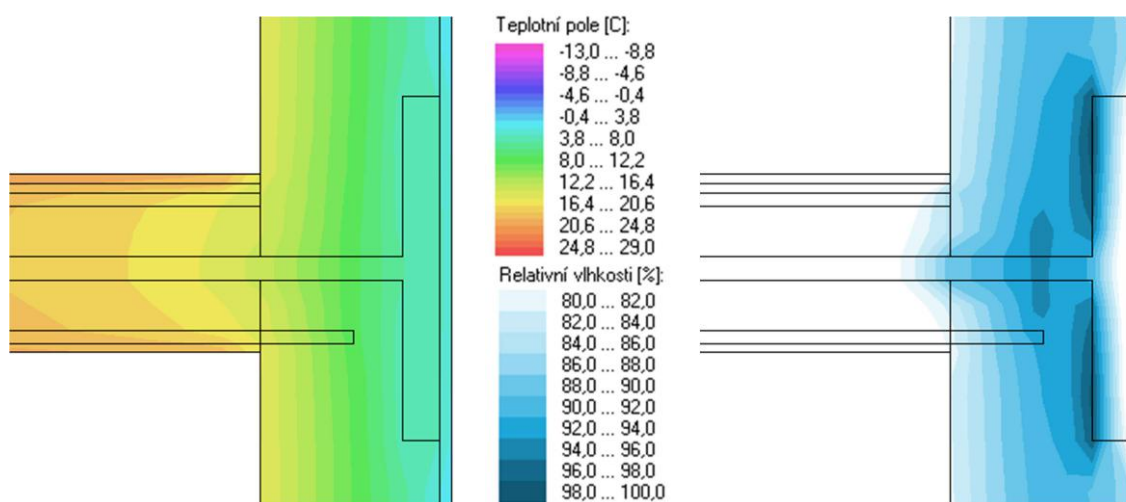
Pozorovaný zásadní rozdíl v chování před a po aplikaci vnitřního zateplení lze ale pravděpodobně jednoduše vysvětlit. Tím že dojde k zateplení u vnitřního povrchu stěny, stává se ocelový prvek mnohem výraznějším tepelným mostem v porovnání s okolní plochou. Oproti variantě bez zateplení, kde byl tepelný tok relativně rovnoměrně rozdělen přes plochu stěny, je zde po zateplení mnohem více soustředěn ocelovou kleští – to je patrné i z porovnání průběhu teplot na obr. 171 a 172 (podobná situace nastává i v případě samotného dřevěného zhlaví, které má také vyšší tepelnou vodivost než izolant – viz kapitola 2 obr. 4. Je zde tedy vyšší teplota a prostor kapsy je v podstatě vytápěn i přes skutečnost, že ocelový prvek zasahuje až vnějšímu chladnému líci konstrukce.



obr. 171 - Situace u zhlaví s trámovou kleští po aplikaci vnitřního zateplení - řez kleští - teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky



obr. 172 – Situace u zhlaví s trámovou kleští před aplikaci vnitřního zateplení - řez kleští - teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky



obr. 173 – Situace u zhlaví s trámovou kleští před aplikaci vnitřního zateplení - řez kleští - teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky

Ocelová trámová kleština tedy dle výpočtového modelu může po aplikaci vnitřního zateplení do jisté míry představovat jakousi variantu opatření zlepšující podmínky v trámové kapse. V souvislosti s vnitřním zateplením tak zřejmě nemusí představovat zásadně rizikové místo. Problémem je, že většina trámových zhlaví s ocelovou kleští je již zdegradována nebo napadena plísněmi již před aplikací zateplení. Navíc samotná klešť může být značně zasažena korozí. Nicméně i v případě neporušených zhlaví s kleští nebo po jejich zdárné sanaci lze na základě předchozího posouzení doporučit aktivní vytápění kapes topným kabelem.



7.4 Shrnutí výsledků

Jak již bylo uvedeno ve vyhodnocení referenčního modelu, jsou zde použité výstupy z výpočetních modelů vytvořených v softwaru CUBE 3D velmi konzervativní, a to především z hlediska šíření vlhkosti. Oproti reálným podmínkám v oblasti trámových kapes je zde pro ustálený stav za nízkých teplot relativní vlhkost silně nadhodnocena – v oblasti trámového zhlaví až o 20 %. To je zřejmě způsobeno tím, že reálná konstrukce zhlaví C_8 ve zděné stěně z plných cihel by vyžadovala mnohem delší období s neměnnými okrajovými podmínkami, aby dospěla do ustáleného stavu i z hlediska šíření vlhkosti, jak představuje stacionární výpočetní model. Takový stav, ale v reálném venkovním prostředí nenastává. Pro získání přesnějších výsledků by tedy musely být použity dynamické metody výpočtu zohledňující proměnné okrajové podmínky a podrobnější charakteristiky použitých materiálů. Nicméně pro základní představu o možnostech jak zlepšit tepelně vlhkostní podmínky v trámových kapsách se vytvořený stacionární výpočetní model ukázal jako dostačující.

Z jednotlivých variant opatření se dle očekávání jako nejvhodnější jeví varianty s aktivním vytápěním trámové kapsy pomocí topného kabelu. Jako dostačující pro udržení RH v oblasti zhlaví pod 80 % se ukázal již výkon topných kabelů 10 W/m. Pro zajištění dobrých tepelně vlhkostních podmínek v oblasti zhlaví přitom není nutné dbát na komplikované rovnoměrné rozmístění topného kabelu. Výpočetní model ukázal, že postačí jediná smyčka topného kabelu volně vložená před čelo trámu. Meziroční náklady na dostatečné vytápění jedné kapsy byly orientačně stanoveny na 135 Kč/kapsa.

Jako bezpečná varianta se ukázalo i nahrazení konce trámového zhlaví ocelovou protézou. Ta při uložení na podložku z pěnového skla a prostorem kapsy vyplněným PUR pěnou s uzavřenou strukturou buněk, zajistila velmi příznivé tepelně vlhkostní podmínky v oblasti celé trámové kapsy. V žádné části ocelového prvku a navazujícího dřevěného trámu nebyla překročena relativní vlhkost 70 % ani při velmi nepříznivých podmínkách v exteriéru (-13 °C). Tepelná propustnost celého detailu navíc zůstala téměř totožná jako v referenčním modelu s dřevěným zhlavím bez úpravy. Jedná se ale o nejvíce invazivní úpravu z uvažovaných variant opatření a je tak spíše vhodná pro případy, kdy je konec zhlaví nutné vyměnit.

U varianty s hliníkovými oprátkami navlečenými na trámové zhlaví došlo také ke zlepšení tepelně vlhkostních podmínek. Ve všech sledovaných bodech na povrchu zhlaví klesly relativní vlhkosti pod 85 % jak pro mírnější referenční, tak i pro přísné návrhové okrajové podmínky. V místě stropní dutiny při povrchu zateplovacího systému nepřesáhla relativní vlhkost na hliníkových oprátkách hodnotu 73 %. Z energetického hlediska se ovšem jedná o variantu, která vede k největšímu navýšení tepelných ztrát prostupem – přibližně o 42 % oproti referenčnímu modelu. Dále by u varianty s hliníkovými oprátkami mohlo být více komplikované zajištění vzduchotěsného utěsnění trámové kapsy. Zároveň u této úpravy vyvstává otázka, zda nemůže celkově podmínky u zhlaví zhoršit. Hliníkové oprátky totiž v kapse zajistí zvýšení teplot, ale relativní vlhkost i přes pokles zůstává na kritické úrovni okolo 80 %. Zatímco předtím zde byly v kombinaci s vyššími relativními vlhkostmi teploty nepříznivé pro vznik plísní, tak po aplikaci oprátek se může stav paradoxně zhoršit. Situace je sice vlivem nadhodnocení relativních vlhkostí ve stacionárním výpočtovém modelu zřejmě zkreslena, ale tuto variantu opatření by bylo přesto zajímavé sledovat pomocí dynamických výpočtových



metod a přesvědčit se, zda nedochází například k prodloužení období se současně vyššími relativními vlhkostmi nad 80 % a příznivými teplotami pro vznik plísní.

Varianty s vyplněním kapes PUR pěnou se ukázaly jako nevýznamné - alespoň pro uvažovanou malou tloušťku vzduchové mezery okolo zhlaví v rozsahu 15 – 20 mm. Ovšem zatímco použití pěny s otevřenou strukturou buněk znamenalo mírné zlepšení situace, tak v případě difuzně uzavřené pěny s uzavřenou strukturou buněk nastala kondenzace vodní páry v čele zhlaví. Uzavřená pěna zde totiž vytvořila nepropustnou bariéru pro vodní páru šířící se dřevěným trémem. Úprava dřevěného zhlaví formou vyplnění kapsy PUR pěnou s uzavřenou strukturou buněk nebo jiným difuzně uzavřeným materiálem je tedy krajně nevhodná.

Na konci kapitoly byla sledována i situace zhlaví s ocelovou trémovou kleští. Na základě výpočetního modelu bylo překvapivě zjištěno, že po aplikaci vnitřního zateplení ocelová klešť situaci v trémové kapse zlepšuje a ani v prostou stropní dutiny nevznikají vysoké relativní vlhkosti. Vysvětlením je zřejmě výrazně zvýšená míra tepelného toku skrze ocelový prvek. Nicméně i zde lze doporučit aktivní vytápění kapsy topným kabelem, které dle výpočtového modelu zajistí zcela bezpečné podmínky v celé oblasti zhlaví s kleští.



8 Závěr

Stanovených cílů práce bylo dosaženo v uspokojivé míře.

Podrobnější přehled poznatků a výsledků z jednotlivých částí práce je pro přehlednost vždy uveden na konci jednotlivých kapitol.

Na základě naměřených údajů v oblasti trámových kapes bylo zjištěno, že otevřené kapsy ve stropní konstrukci bez zásahu reagují oproti utěsněným mnohem výrazněji na změnu klimatických podmínek. V chladných obdobích pak v otevřených kapsách nastávají vyšší hodnoty RH a i při běžných podmínkách v interiéru (T 20 °C; RH 50 %) zde dochází k dlouhodobějšímu překročení 80 % relativní vlhkosti (přibližně na 4 měsíce). Nicméně hmotnostní vlhkost ve zhlavích přesáhne 18 % až následkem simulace vlhčího vnitřního provozu (T 24 °C; RH 60 %) v chladném období 2016/2017, kdy zde zároveň dochází ke kondenzaci vodní páry. Na jaře 2017 pak pouze v otevřených kapsách vzniká podezření na mikroskopický růst plísní.

Z porovnání jednotlivých úprav kapes ve sledovaném období (před umělým kropením fasády) se jako nejbezpečnější jeví všechny kapsy dodatečně utěsněné Airstop páskou (C_5, C_6, C_7, C_8, V_1, V_2). Průběh relativní vlhkosti v těchto kapsách překračuje 80 % hranici RH pouze minimálně v chladném období 2016/2017 s vlhčím vnitřním prostředím. Hmotnostní vlhkost se ale drží pod 18 %. U utěsněných kapes C_5 až C_8 v difuzně otevřeném systému S1a a S1b není pozorován vliv rozdílné tloušťky izolantu na změnu vlhkostních podmínek. Jednoznačně se neprojevil ani rozdíl mezi pouze přelepenými kapsami C_6 a C_8 a kapsami C_5 a C_7 vyplněnými navíc hygroskopickým materiálem.

U zbývajících úprav kapes dochází v zimním období k mírně vyšším relativním vlhkostem než oproti dodatečně utěsněným Airstop páskou. Podezření na vznik plísní zde ale nenastává.

Ze zatížení testovací fasády větrem hnaným deštěm vyčísleného zjednodušenou metodou dle J. F. Straubeho [19] byl výraznější vliv na změnu vlhkostních podmínek v kapsách pozorován pouze v případě dvou nejintenzivnějších událostí hnaného deště ze dne 23. 5. a 25. 6. 2016. Při první události dopadal hnaný déšť na povrch testovacího pole s průměrnou intenzitou 0,15 mm/min po dobu 40 minut. U druhé pak s průměrnou intenzitou 0,09 mm/min po dobu 80 minut. Zatímco u otevřených kapes se zvýšení relativní vlhkosti spíše neprojevilo, tak uzavřené kapsy reagovaly dle očekávání výrazněji. K nejvyššímu skoku v průběhu RH (přibližně o 15 %) ale došlo paradoxně u kapsy V_3, která je pouze zaklopena zateplovacím systémem z vakuových panelů bez dodatečného utěsnění kolem zhlaví. Bylo také konstatováno, že horní kapsy byly větrem hnanému dešti pravděpodobně více vystavené než spodní. Celkově vyšší výchozí úroveň relativní vlhkosti v oblasti všech trámových kapes na počátku léta 2016, byla ale dle pozorování zřejmě způsobena i mírnějšími venkovními teplotami a vyšší relativní vlhkostí v exteriéru i interiéru oproti létům 2015 a 2017. Každopádně vlivem zmíněných nejintenzivnějších událostí větrem hnaného deště nedošlo ke zvýšení relativní vlhkosti v kapsách nad úroveň 80 %. Během druhé poloviny léta 2016 pak navíc došlo k výraznému poklesu RH v kapsách na hodnotu cca 55 %.



Dále bylo zjištěno, že během sledovaného období zřejmě nenastalo dlouhodobější vystavení testovací fasády větrem hnanému dešti. Klouzavá suma denních úhrnů hnaného deště s týdenním intervalem totiž v maximu přesahovala nejvyšší hodinový úhrn jen o přibližně 3 mm srážek.

Umělé skrápění testovacích polí ze dne 19. 7. 2017 přesahovalo svou průměrnou intenzitou 1,7 l/(m².min) zhruba 11 krát intenzitu nejvýznamnějšího zaznamenaného hnaného deště z 23. 5. 2016. Nicméně teoretická hodnota větrem hnaného deště stanovená zjednodušeně na základě maximálního úhrnu deště na horizontální rovinu (15,9 mm/min ze dne 4. 7. 2017) byla vyčíslena na 1,88 l/(m².min). Nemusí se tak jednat o nereálné podmínky i pro lokalitu experimentu na UCEEBu. Skrápění probíhalo na každém z testovacích polí 40 minut a za tu dobu se do stěny vsáкло průměrně 13,4 l/m². Bohužel vzhledem k nedostatečným rozměrům kropicí stěny nedošlo k celoplošnému skropení testovacího pole. Zároveň byly kropicí trysky vůči poloze trámových kapes v testovacím poli nerovnoměrně rozmístěny. Vlivem toho byly jednotlivé kapsy skrápěny s rozdílnou intenzitou a krajní kapsy byly zasaženy výrazně méně. Nebylo tedy možné objektivně posoudit chování všech různých úprav kapes. Nicméně kapsy situované u středu testovacích polí byly vystaveny kropení o podobné intenzitě. Z těchto kapes nejvíce zareagovala kapsa I_3 ze systému s „inteligentní“ parozábranou a kapsa V_4 ze systému s vakuovými panely, která je pouze vyplněná PU pěnou. Přibližně týden po skrápění zde již vzrostly RH nad 80 % a drží si stoupající charakter až do konce sledovaného období 1. října 2017, kde dosahují hodnoty okolo 95 %. To v případě kapsy I_3 naznačuje, že ani parozábrana s proměnným difuzním odporem pravděpodobně nezajistí dostatečnou míru vysychání do interiéru. Na konci září 2017 je vlivem kropicího experimentu u obou zhlaví I_3 a V_4 již podezření na mikroskopický výskyt plísní. Zajímavým zjištěním bylo, že u podobně skrápěných utěsněných kapes C_7 a C_8 nedošlo k žádnému skokovému navýšení průběhu RH po kropení. Zřejmě zde vodní pára může obcházet utěsnění v úrovni zdiva boční difuzí a šířit se následně difuzně otevřeným systémem zateplení dál do interiéru. Nicméně i u těchto kapes má RH rostoucí charakter a na konci sledovaného období se pohybuje okolo 80 %. Největším překvapením ale bylo velmi výrazné navýšení průběhu RH u otevřených kapes C_2 a C_3 ve stropní konstrukci bez zásahu. Relativní vlhkost zde krátce po kropení vystoupila na hodnotu okolo 90 % a i přes kolísavý charakter ovlivněný teplotami si udržuje vysoké RH až do konce sledovaného období. Toto nepředpokládané chování otevřených kapes bylo nakonec přisouzeno příliš utěsněné a krátké konstrukci stropu navazující přímo na tyto kapsy. Ty se pak pravděpodobně chovají jako větší utěsněné kapsy, kde se zdržuje vyšší koncentrace vodní páry.

Relativní vlhkost se ve všech dostatečně skrápěných kapsách u středu testovacích polí pohybuje na konci sledovaného období 1. října 2017 minimálně kolem 80 %. Jelikož lze v následujícím období očekávat další pokles teplot, je zde důvodné podezření na zhoršení vlhkostní situace. Další sledování situace je tedy určitě namístě. Už nyní lze ale tvrdit, že kropicí experiment měl zásadní vliv na změnu vlhkostních podmínek v trámových kapsách.



Výpočetní stacionární model trémového zhlaví vytvořený v softwaru CUBE 3D se ukázal jako velmi konzervativní především z hlediska šíření vlhkosti. Oproti reálným podmínkám v oblasti trémového zhlaví zde dochází k nadhodnocení relativní vlhkosti až o 20 %. Pro základní představu o možnostech jak zlepšit tepelně vlhkostní podmínky v trémových kapsách se ale výpočetní model ukázal jako dostačující. Jako jednoznačně nejbezpečnější byla vyhodnocena varianta opatření v podobě aktivního vytápění kapsy topným kabelem. Pro udržení relativní vlhkosti v kapse pod 80 % (v rámci modelu) přitom postačuje výkon 10 W/m. Navíc bylo zjištěno, že stačí jediná smyčka kabelu vložená před rovinu čela zhlaví. Meziroční náklady na vytápění jednoho zhlaví byly orientačně stanoveny na 135 Kč/kapsa. Velmi efektivní se jeví i varianta s ocelovou protézou uloženou v kapse na tepelně izolační podložku z pěnového skla a následným vyplněním prostoru kapsy PUR pěnou s uzavřenou strukturou buněk. Jedná se ale o nejvíce invazivní přístup z uvažovaných variant a je vhodná spíše v případech, kdy je nutné zhlaví vyměnit. Opatření v podobě hliníkových oprátek navlečených na zhlaví sice zajistí znatelné zvýšení teplot v kapse, ale relativní vlhkost zůstává v některých bodech v oblasti kapsy nad 80 %. Otázkou tak je, zda dodáním tepla do kapsy nedojde naopak ke zlepšení podmínek pro vznik plísní. Pravděpodobně je ale vlhkostní situace stále nadhodnocena výpočetním modelem. Vyplnění kapsy PUR pěnou s otevřenou strukturou buněk se ukázalo jako málo efektivní - alespoň pro malé tloušťky vzduchové mezery do 20 mm. Jako krajně nevhodná se ukázala varianta s vyplněním kapsy PUR pěnou s uzavřenou strukturou buněk. Jako jediná totiž zhoršila vlhkostní situaci na konci zhlaví vytvořením difuzně uzavřené bariéry před čelem trámu. Zajímavým zjištěním bylo, že ocelová trémová klešť dle výpočtového modelu po aplikaci vnitřního zateplení nepředstavuje rizikovou situaci. Naopak prostor zhlaví je skrze ni vytápěn i přesto, že klešť zasahuje až k úrovni chladného vnějšího líce stěny.

Je nutné zdůraznit, že byla hodnocena pouze malá část možných úprav, a to pouze v rámci možností konzervativního stacionárního výpočtového modelu. Zde publikované výsledky a závěry tak slouží spíše jako vodítko pro další podrobnější výzkum pomocí dynamických výpočtových metod nebo případně pro uplatnění podobných úprav v dalších experimentech ve skutečném měřítku.



DOPORUČENÍ PRO DALŠÍ VÝZKUM

- rozhodně sledovat dál situaci po 1. říjnu 2017, kdy jsou v kapsách před chladným obdobím velmi vysoké relativní vlhkosti
- při případném opakování kropicího experimentu zajistit celoplošné a rovnoměrné skrápění testovacích polí pro možnost lepšího porovnání úprav kapes
- u otevřených kapes je pravděpodobně vliv kropicího experimentu a možná i vliv skutečného větrem hnaného deště zkreslen krátkou a příliš dobře utěsněnou stropní konstrukcí – pokusit se lépe napodobit situaci v reálné stropní konstrukci
- začlenit v případném příštím dlouhodobém experimentu i referenční zhlaví ve stěně bez aplikovaného systému vnitřního zateplení
- podrobnější vyhodnocení zde navrhovaných variant opatření pro zlepšení tepelně vlhkostních podmínek v oblasti zhlaví pomocí dynamických výpočtových metod se zohledněním proměnných okrajových podmínek a vlastností materiálů
- začlenit v případném příštím dlouhodobém experimentu i variantu zhlaví s ocelovou trémovou kleští

poznámka:

Pro rychlou a snazší orientaci v situaci testovacích polí TP2 a TP3 byla v rámci této práce zpracována příloha (viz PŘÍLOHA 1) s podrobnými výkresy monitorovaných oblastí včetně popisu a rozmístění jednotlivých senzorů.



Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] Dřevěné trámové stropy [online]. ELUC
Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2201>
- [2] Tzb-Info [online]. Topinfo s.r.o., [2006]
Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3345-zvlhcovaci-system-merlin>
- [3] Přednáška [online], Kopecký, P., Mtib_t4_Šíření vlhkosti – difuze vodní páry, kapilarita a proudění vlhkého vzduchu, [online], ČVUT Praha, [2017].
Dostupné z: <https://kps.fsv.cvut.cz/index.php?lmut=cz&part=vyuka&sub=predmety&type=all&kod=124MTIB>
- [4] Luxwood [online], Luxwood s.r.o., [2013]
Dostupné z: <http://www.luxwood.eu/products/shingles>
- [5] ČSN 730540-4, Tepelná ochrana budov - Část 4: Výpočtové metody, Praha: Český normalizační institut, červen 2005
- [6] ČSN 730540-2, Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky, Praha: ÚNMZ, změna vyd. duben 2012
- [7] ČSN EN ISO 13788, Tepelně-vlhkostní chování stavebních dílců a stavebních prvků – Vnitřní povrchová teplota pro vyloučení kritické povrchové vlhkosti a kondenzace uvnitř konstrukce - Výpočtové metody, Praha: ÚNMZ, srpen 2013
- [8] Stavebnictví 3000.cz [online], Vega s.r.o., [vydáno 2012]
<http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/vnitri-zatepleni-s-izolacnimi-deskami-ytong-multipor/>
- [9] ASB -portal.cz, [online], Jaga Group s.r.o.
Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/tepelne-izolace/zateplovani-budov-zevnitr>
- [10] ČSN EN 15026, Hodnocení šíření vlhkosti stavebními dílci pomocí numerické simulace, 1. vyd., Praha: Český normalizační institut, duben 2007
- [11] Ruisinger, U., Long-term measurements and simulations of five internal insulation systems and their impact on wooden beam heads. Graz University of Technology, Institute of Building Construction, Graz, Austria, 2013
Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Ulrich_Ruisinger/publication/282292628_Long-term_measurements_and_simulations_of_five_internal_insulation_systems_and_their_impact_on_wooden_beam_heads/links/560abc7d08ae1396914cdb48.pdf
- [12] Ueno, K., Analysis of Joist Masonry Moisture Content Monitoring. Westford, 2015
Dostupné z: https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/building_america/masonry-moisture-content-monitoring.pdf



- [13] Dumont, R., L. Snodgrass, J. Kokko, and C. Schumacher. Field Measurement of Wood Moisture Contents in Wood Joists Embedded in Masonry Exterior Walls. Proceedings of the 10th Annual Conference on Building Science and Technology. Ottawa, 2005
- [14] Ueno, K., Masonry Wall Interior Insulation Retrofit Embedded Beam Simulations. Building Science Corporation, 30 Forest Street, Somerville, MA 02143, 2012
Dostupné z: http://buildingscienceconsulting.com/sites/default/files/migrate/pdf/CP-1201_Masonry_Wall_Interior_Insulation_Retrofit_Embedded_Beam_Simulations.pdf
- [15] Bureš, M., Popis realizace měření v experimentální fasádě TP3 a TP2, ČVUT, 2014
- [16] ČSN 730540-2, Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky, Praha: ÚNMZ, změna vyd. duben 2012
- [17] Viitanen, J., Ojanen, T. Improved model to predict mold growth in building materials. In: Proceeding of thermal performance of the exterior envelopes of whole buildings X. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2007.
- [18] Mapy.cz [online], 2017
Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=14.1658135&y=50.1552301&z=17&source=firm&id=13059501&q=uceeb>
- [19] Straube, J.F., Burnett, E.F.P., Simplified Prediction of Driving Rain on Buildings. University of Waterloo, september 2000
Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/247524319_Simplified_prediction_of_driving_rain_deposition
- [20] Základní fyzikální vlastnosti stavebních materiálů ve vazbě na izolační vlastnosti přednáška IZMA [online], ČVUT Praha
Dostupné z: http://tpm.fsv.cvut.cz/student/documents/files/IZMA/prednaskall_IZMA.pdf
- [21] ČSN EN ISO 6946, Stavební prvky a stavební konstrukce - Tepelný odpor a součinitel prostupu tepla - Výpočtová metoda, Praha: Český normalizační institut, 2008
- [22] ČSN EN ISO 10077, Tepelné chování oken, dveří a okenic - Výpočet součinitele prostupu tepla - Část 1: Všeobecně, Praha: Český normalizační institut, květen 2007
- [23] Svoboda, Z., Tepelně technické vlastnosti stavebních materiálů, /původní text ze skript Stavební fyzika 31, z r. 2004, částečná akt.. 2014/, FSV ČVUT Praha, 2014
Dostupné z: kps.fsv.cvut.cz/file_download.php?fid=4275
- [24] ČSN 730540-3, Tepelná ochrana budov - Část 3: Návrhové hodnoty veličin, Praha: Český normalizační institut, 2005
- [25] ČSN 730540-1, Tepelná ochrana budov - Část 1: Terminologie, Praha: Český normalizační institut, červen 2005



Seznam obrázků

obr. 1 – Schéma zhlaví stropního trámu; zdroj [1].....	17
obr. 2 – Schéma trámového zhlaví opatřeného ocelovou trámovou kleští, zdroj [1]	18
obr. 3 – Porovnání průběhu teplot a tlaků vodní páry pro stěnu nezateplenou, zateplenou z exteriéru a zateplenou z interiéru (výpočet programem Teplo 2014 Edu)	19
obr. 4 – Porovnání polí teplot a relativních vlhkostí nad 80 % před a po aplikaci vnitřního zateplení v místě trámového zhlaví (zjednodušený 2D model vytvořený v programu AREA 2014 Edu).....	20
obr. 5 – Porovnání koncentrací vodní páry pro interiérový a exteriérový vzduch během zimního období (diagram převzat z [2]).....	22
obr. 6 – Schéma šíření vodní páry difuzí a prouděním vzduchu	23
obr. 7 – Schéma netěsnosti	23
obr. 8 – Výsušné trhliny ve dřevěných hranolech, zdroj [4].....	25
obr. 9 – Porovnání tlaků vodní páry pro zateplení bez a se vzduchotěsnou povrchovou úpravou + uvedení kondenzujícího množství vodní páry (výpočet v programu Teplo 2014 Edu – šíření vodní páry pouze difuzí!).....	25
obr. 10 – Schéma funkce kapilárně aktivních materiálů, zdroj [8].....	28
obr. 11 – Schéma působení větrem hnaného deště	30
obr. 12 – Princip kapilárního vztlínání.....	32
obr. 13 – pohled na monitorovanou stěnu, situace a rozmístění senzorů v oblasti zhlaví, zdroj [11].....	33
obr. 14 – Denní průměry - teplota v exteriéru a interiéru + relativní vlhkost v interiéru (nahore), relativní vlhkost v čele trámových kapes (uprostřed), hmotnostní vlhkost u konce zhlaví (dole), zdroj [11]	34
obr. 15 – Poloha monitorovaných trámových zhlaví na úrovni suterénu, zdroj [12].....	35
obr. 16 – Situace u trámových zhlaví v suterénu [12].....	36
obr. 17 – Vlhkostní situace u zhlaví v severní stěně suterénu – relativní vlhkost na čele zhlaví a hmotnostní vlhkost v konci trámu, zdroj [12]	36
obr. 18 - Vlhkostní situace u zhlaví v jižní stěně suterénu – relativní vlhkost na čele zhlaví a hmotnostní vlhkost v konci trámu, zdroj [12]	37
obr. 19 – Odříznuté konce trámových zhlaví – hmotnostní vlhkost ve zhlaví z jihovýchodní části objektu (vlevo) a z jihozápadní části (vpravo), zdroj [12]	37
obr. 20 – 3D teplotní pole - nezateplená stěna (vlevo), stěna s vnitřním zateplením (vpravo), zdroj [14].....	39
obr. 21 – 3D teplotní pole - zateplená stěna + obalení zhlaví pěnovou izolací tl. 25 mm (vlevo), zateplená stěna + přiložení Alu destiček tl. 3 mm k bokům zhlaví (vpravo), zdroj [14]	39
obr. 22 – 3D teplotní pole - nezateplená stěna (vlevo), stěna s vnitřním zateplením (uprostřed), zdroj [14].....	40
obr. 23 – 3D teplotní pole – opatření v podobě vynechání pruhu izolace v úrovni stropní konstrukce, zdroj [14].....	40
obr. 24 - Poloha experimentální fasády UCEEB, vyznačení dvou testovacích polí vyhrazených pro experiment, zdroj [15].....	41
obr. 25 – Systém zateplení dřevovláknitými deskami UdiIN RECO (skladba S1), zdroj [15].....	42
obr. 26 - Systém zateplení deskami z minerální vlny Isover AKU + „inteligentní“ fóliová parozábrana (skladba S2), zdroj [15]	43
obr. 27 – Systém zateplení vakuovými deskami Va-Q-VIP F-EPS (skladba S3), zdroj [15].....	43
obr. 28 – Rozdělení testovacích polí s označením skladeb zateplovacích systémů, zdroj [15]	43



obr. 29 – Vyznačení charakteristických parametrů konstrukce s vnitřním zateplením	45
obr. 30 – Schéma rozmístění trémových zhlaví v rámci testovacího pole č. 2 včetně popisu úprav jednotlivých kapes.....	46
obr. 31 - Schéma rozmístění trémových zhlaví v rámci testovacího pole č. 3 včetně popisu úprav jednotlivých kapes.....	47
obr. 32 – Schematický řez trémovou kapsou s vyznačením polohy snímačů (nahore vlevo), osazení čidel v trémové kapse (nahore vpravo), osazení čidel na trémovém zhlaví (dole), zdroj fotografií [15]	48
obr. 33 – Přehled okrajových podmínek – denní průměry teplot a rel. vlhkostí vzduchu + denní úhrny slunečního ozáření fasády (výpadky měření nad 48 hodin označeny modrou oblastí), období po kropení (červená oblast)	50
obr. 34 – Denní průměrné hodnoty teplot a relativních vlhkostí v oblasti trémových kapes a hmotnostní vlhkost ve zhlavích – systém S1a Ciur 80 mm	52
obr. 35 – Porovnání denních průměrných hodnot teplot a relativních vlhkostí v oblasti trémových kapes a na rozhraní izolace/zdivo – systém S1a Ciur 80 mm.....	54
obr. 36 – Index růstu plísní stanovený dle [17] pro jednotlivé úpravy kapes a rozhraní izolace/zdivo, systém S1a Ciur 80 mm	55
obr. 37 – Denní průměrné hodnoty teplot a relativních vlhkostí v oblasti trémových kapes a hmotnostní vlhkost ve zhlavích – systém S1b Ciur 140 mm	57
obr. 38 – Porovnání denních průměrných hodnot teplot a relativních vlhkostí v oblasti trémových kapes a na rozhraní izolace/zdivo – systém S1b Ciur 140 mm	59
obr. 39 – Detail hodinového průběhu teplot na rozhraní izolace/zdivo pro systém S1a a S1b.....	59
obr. 40 – Index růstu plísní stanovený dle [17] pro jednotlivé úpravy kapes a rozhraní izolace/zdivo, systém S1b Ciur 140 mm	60
obr. 41 – Denní průměrné hodnoty teplot a relativních vlhkostí v oblasti trémových kapes a hmotnostní vlhkost ve zhlavích – systém S2 Isover + Rigips.....	62
obr. 42 – Porovnání denních průměrných hodnot teplot a relativních vlhkostí v oblasti trémových kapes, na rozhraní izolace/zdivo a před parozábranou – systém S2 Isover + Rigips	64
obr. 43 – Dopočítané denní průměrné hodnoty koncentrace vodní páry v kapse, na rozhraní izolace/zdivo a před parozábranou + detail hodinového průběhu koncentrací.....	65
obr. 44 – Index růstu plísní stanovený dle [17] pro jednotlivé úpravy kapes, rozhraní izolace/zdivo a dutinu mezi izolací a parozábranou - systém S2 Isover + Rigips.....	66
obr. 45 – Denní průměrné hodnoty teplot a relativních vlhkostí v oblasti trémových kapes a hmotnostní vlhkost ve zhlavích – systém S3 VA-Q-TEC.....	67
obr. 46 – Porovnání denních průměrných hodnot teplot a relativních vlhkostí v oblasti trémových kapes a na rozhraní izolace/zdivo – systém S3 VA-Q-TEC	69
obr. 47 - Index růstu plísní stanovený dle [17] pro jednotlivé úpravy kapes a rozhraní izolace/zdivo, systém S3 VA-Q-TEC.....	70
obr. 48 – Vzájemné porovnání naměřených průběhů RH v kapsách a hmotnostní vlhkosti ve zhlavích jednotlivých systémů vnitřního zateplení + vypočtené průběhy indexu růstu plísní dle [17]	71
obr. 49 – Vzájemné porovnání naměřených průběhů RH na rozhraní zateplovacích systémů a zdiva + vypočtené průběhy indexu růstu plísní dle [17]	73
obr. 50 – Situace – Univerzitní centrum energeticky efektivních budov – Buštěhrad (zdroj [18]).....	77
obr. 51 – Rozdělení větru podle směru působení a rychlosti	78
obr. 52 – Vyznačení uvažovaného odklonu směru větru θ od normály testovací fasády	79
obr. 53 – Vypočtené denní úhrny větrem hnaného deště + porovnání s úhrny deště na horizontální rovinu.....	80



obr. 54 – Rozdělení větrem hnaného deště podle jeho intenzity v [mm/h] a směru větru	80
obr. 55 – Přehled okrajových podmínek pro vyhodnocení vlivu větrem hnaného deště	82
obr. 56 – Schéma test. pole č. 2 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S1a	83
obr. 57 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém CIUR 80 mm.....	83
obr. 58 – Větre hnaný déšť - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S1a) na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu	84
obr. 59 – Schéma test. pole č. 2 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S1b	85
obr. 60 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém CIUR 140 mm.....	85
obr. 61 – Větre hnaný déšť - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S1b) na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu	86
obr. 62 – Schéma test. pole č. 3 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S2.....	87
obr. 63 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém Isover + Rigips.....	87
obr. 64 – Větre hnaný déšť - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S2) na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu	88
obr. 65 – Schéma test. pole č. 3 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S3.....	89
obr. 66 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém VA-Q-TEC.....	89
obr. 67 – Větre hnaný déšť - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S3) na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu	90
obr. 68 – Denní průměrné hodnoty RH v kapsách a denní průměrné hodnoty teploty venkovního vzduchu s vyznačením sledovaného období z hlediska vlivu větrem hnaného deště (zelená oblast).....	91
obr. 69 – Denní průměrné hodnoty RH vnitřního a venkovního vzduchu + denní úhrny slunečního ozáření a denní úhrny deště s vyznačením sledovaného období z hlediska vlivu větrem hnaného deště (zelená oblast).....	92
obr. 70 – Klouzavé týdenní úhrny větrem hnaného deště + odpovídající průběh RH v kapsách I_4 a V_3	94
obr. 71 – Závislost denní průměrné RH v kapsách na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu s barevným rozlišením dle příslušných klouzavých týdenních úhrnů větrem hnaného deště	96
obr. 72 – Kropící zařízení	98
obr. 73 – Umístění kropícího zařízení a poloha trysek vůči testovacímu poli	99
obr. 74 – Osazení vodoměru s impulzním výstupem na přívodu vody (vlevo), opatření pro zachycení odtékající vody z testovacího pole (vpravo)	99
obr. 75 – Účinně skropená plocha testovacího pole.....	100
obr. 76 – Naměřená data z průběhu kropení testovacích polí.....	101
obr. 77 – Zamokřená část stěny po skončení kropení	102
obr. 78 – Okrajové podmínky působící na skropená testovací pole (hodinová data)	103
obr. 79 – Přehled okrajových podmínek v krátkém období před a po kropícím experimentu	104
obr. 80 – Schéma test. pole č. 2 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S1a (vlevo), fasáda pole po kropení (vpravo)	105
obr. 81 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém CIUR 80 mm.....	105
obr. 82 – Kropící experiment - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S1a) na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu	106
obr. 83 – Schéma test. pole č. 2 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S1b (vlevo), fasáda pole po kropení (vpravo)	108



obr. 84 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém CIUR 140 mm	108
obr. 85 - Kropící experiment - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S1b) na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu	109
obr. 86 - Schéma test. pole č. 3 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S2 (vlevo), fasáda pole po kropení (vpravo).....	111
obr. 87 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém Isover + Rigips	111
obr. 88 - Kropící experiment - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S2) na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu	112
obr. 89 - Schéma test. pole č. 3 - barevné rozlišení sledovaných míst v systému S3 (vlevo), fasáda pole po kropení (vpravo).....	114
obr. 90 – Kropící experiment - denní průměrné hodnoty RH v kapsách - systém VA-Q-TEC	114
obr. 91 - Kropící experiment - závislost denní průměrné RH v kapsách (systém S3) na průměrné denní teplotě venkovního vzduchu	115
obr. 92 – Kropící experiment – denní průměrné RH v kapsách a na rozhraní zateplovacích systémů	117
obr. 93 – Pohled do prázdné trámové kapsy (vlevo) a na neomítnuté zdivo testovacího pole ze strany exteriéru (vpravo), zdroj [15]	119
obr. 94 – Utěsnění stropní konstrukce v rámci experimentu na UCEEBu, zdroj [15]	119
obr. 95 – Kropící experiment – denní průměrné RH a koncentrace vodní páry ve stropních dutinách	120
obr. 96 – Kropící experiment – denní průměrné RH na rozhraní zateplovacích systémů	121
obr. 97 – Strop bez zásahu – situace u trámových kapes (vlevo), aplikace zateplovacího systému Ciur 80 mm (vpravo), zdroj [15]	122
obr. 98 – Kropící experiment – denní průměrné RH na rozhraní zateplovacího systému S3 (vakuové panely)	123
obr. 99 – Kropící experiment – průměrné denní RH a koncentrace vodní páry pro systém S2 v místě typické skladby (I_A)	124
obr. 100 – Kropící experiment – hmotnostní vlhkost trámových zhlaví + pohled na skropená testovací pole	126
obr. 101 – Kropící experiment – Index růstu plísní v oblasti trámových zhlaví	127
obr. 102 - Denní průměrné hodnoty RH v kapsách a hmotnostní vlhkosti ve zhlavích + denní průměrné teploty vnitřního a venkovního vzduchu s vyznačením dne umělého skrápění (červená čára)	129
obr. 103 – Svislý řez zhlavím C_8	134
obr. 104 – Schéma geometrie výpočtového modelu s barevným označením materiálů	135
obr. 105 – Skutečná geometrie vzduchové dutiny kolem trámového zhlaví	137
obr. 106 – Vzduchové vrstvy dle ČSN EN ISO 6946	137
obr. 107 – Schéma rozložení vzduchové kapsy s vyznačením uvažovaného směru tepelného toku	139
obr. 108 – Schéma rozdělení vzduchové dutiny a přiřazené hodnoty λ_g ve výpočtním modelu	139
obr. 109 - Schéma rozložení vzduchové kapsy s vyznačením průřezů dutin pro výpočet λ_g ve směru x, y, z	141
obr. 110 - Schéma rozdělení vzduchové dutiny a přiřazené hodnoty λ_g ve výpočtním modelu	142
obr. 111 – Schéma stropní vzduchové dutiny s vyznačením průřezu dutiny pro výpočet λ_g ve směru x, z	143
obr. 112 – Hodnoty μ vzduchových vrstev dle [4] přiřazené oběma variantám modelů	144
obr. 113 - Hodnoty μ stropní vzduchové dutiny dle [7]	144
obr. 114 – Přehled okrajových podmínek pro krátké období připomínající ustálený stav	146
obr. 115 – Schéma přiřazení okrajových podmínek pro výpočtový model	147



obr. 116 – Svislý řez osou trámového zhlaví (vlevo) a osou mezi hranoly (vpravo) s vyznačením porovnávaných bodů	149
obr. 117 – Rozdíl teplot mezi měřenými a vypočtenými hodnotami	150
obr. 118 – Rozdíl v relativní vlhkosti mezi měřenými a vypočtenými hodnotami	150
obr. 119 - Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční a návrhové okrajové podmínky	151
obr. 120 – 1D model zhlaví – porovnání průběhu teplot a tlaků vodní páry pro referenční a návrhové okrajové podmínky (výstup z programu Teplo 2014 Edu).....	152
obr. 121 - 1D model zhlaví – porovnání průběhu relativní vlhkosti pro referenční a návrhové okrajové podmínky (výstup z programu Teplo 2014 Edu).....	153
obr. 122 – Porovnání průběhu tlaků syté vodní páry ve vrstvě dřeva pro referenční (vlevo) a návrhové okrajové podmínky (vpravo)	153
obr. 123 – Schéma opatření – hliníkové oprátky	154
obr. 124 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky	154
obr. 125 – Sledované body + porovnání teplot a RH při referenčních okrajových podmínkách.....	155
obr. 126 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky.....	155
obr. 127 – Sledované body + porovnání teplot a RH při návrhových okrajových podmínkách	156
obr. 128 – Změna teploty ve sledovaných bodech pro variantu opatření 1 – hliníkové oprátky.....	156
obr. 129 – Změna relativní vlhkosti ve sledovaných bodech pro variantu opatření 1 – hliníkové oprátky.....	157
obr. 130 – Schéma opatření – topný kabel	158
obr. 131 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky	158
obr. 132 – Sledované body + porovnání teplot a RH při referenčních okrajových podmínkách.....	159
obr. 133 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky.....	159
obr. 134 – Sledované body + porovnání teplot a RH při návrhových okrajových podmínkách	160
obr. 135 – Změna teploty ve sledovaných bodech pro variantu opatření 2A – topný kabel 10 W/m	160
obr. 136 – Změna relativní vlhkosti ve sledovaných bodech pro variantu opatření 2A – topný kabel 10 W/m	161
obr. 137 – Schéma opatření – topný kabel vedený průběžně	162
obr. 138 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky	162
obr. 139 - Sledované body + porovnání teplot a RH při referenčních okrajových podmínkách	163
obr. 140 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky.....	163
obr. 141 - Sledované body + porovnání teplot a RH při návrhových okrajových podmínkách	164
obr. 142 – Změna teploty ve sledovaných bodech pro variantu opatření 2B – topný kabel 10 W/m průběžný	164
obr. 143 – Změna relativní vlhkosti ve sledovaných bodech pro variantu opatření 2B – topný kabel 10 W/m průběžný.....	165
obr. 144 – Schéma opatření – podložka z compactfoamu + vypěnění PUR s otevřenou strukturou.....	166
obr. 145 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky	166
obr. 146 - Sledované body + porovnání teplot a RH při referenčních okrajových podmínkách	167
obr. 147 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky.....	167
obr. 148 - Sledované body + porovnání teplot a RH při návrhových okrajových podmínkách	168
obr. 149 – Změna teploty ve sledovaných bodech pro variantu opatření 3A – PUR s otevřenou strukturou	168



obr. 150 – Změna relativní vlhkosti ve sledovaných bodech pro variantu opatření 3A – PUR s otevřenou strukturou	169
obr. 151 – Schéma opatření – podložka z compactfoamu + vypěnění PUR s uzavřenou strukturou	170
obr. 152 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky	170
obr. 153 – Sledované body + porovnání teplot a RH při referenčních okrajových podmínkách	171
obr. 154 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky	171
obr. 155 – Sledované body + porovnání teplot a RH při návrhových okrajových podmínkách	172
obr. 156 – Změna teploty ve sledovaných bodech pro variantu opatření 3B – PUR s uzavřenou strukturou	172
obr. 157 – Změna relativní vlhkosti ve sledovaných bodech pro variantu opatření 3B – PUR s uzavřenou strukturou	173
obr. 158 – Schéma opatření – ocelová protěza	174
obr. 159 – Postup montáže ocelové protězy	175
obr. 160 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky	176
obr. 161 – Teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky	176
obr. 162 – Sledované body s vyznačením teplot (vlevo) a relativní vlhkosti (vpravo)	177
obr. 163 – Sledované body s vyznačením teplot (vlevo) a relativní vlhkosti (vpravo)	177
obr. 164 – Porovnání variant opatření z hlediska změny teplot v trémové kapse	178
obr. 165 – Porovnání variant opatření z hlediska změny relativní vlhkosti v trémové kapse	179
obr. 166 – Teplota a relativní vlhkost ve sledovaných bodech pro variantu s ocelovou protézou	180
obr. 167 – Subjektivní vyhodnocení variant opatření z hlediska zlepšení tepelně vlhkostních podmínek s přihlédnutím na proveditelnost (známkování jako ve škole 1 nejvhodnější; 5 nevhodné)	182
obr. 168 – Porovnání variant opatření z hlediska bodového činitele prostupu tepla a odpovídající změny tepelných ztrát prostupem tepla	183
obr. 169 – Schéma varianty opatření s průběžným topným kabelem pro trémové zhlaví s ocelovou kleští	186
obr. 170 – Varianta opatření s topným kabelem v kapse s trémovou kleští – řez kleští - teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky	186
obr. 171 – Situace u zhlaví s trémovou kleští po aplikaci vnitřního zateplení - řez kleští - teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky	187
obr. 172 – Situace u zhlaví s trémovou kleští před aplikaci vnitřního zateplení - řez kleští - teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro návrhové okrajové podmínky	188
obr. 173 – Situace u zhlaví s trémovou kleští před aplikaci vnitřního zateplení - řez kleští - teplotní pole (vlevo) a pole RH nad 80 % (vpravo) pro referenční okrajové podmínky	188



Seznam tabulek

Tabulka 1 – Skladby použitých systémů vnitřního zateplení	44
Tabulka 2 – Přehled parametrů systémů vnitřního zateplení.....	45
Tabulka 3 – Harmonogram řízených změn vnitřního klima	49
Tabulka 4 – Základní údaje a výstupy kropícího experimentu	100
Tabulka 5 – Odhad množství vody zachycené v omítce.....	102
Tabulka 6 – Odhad tloušťky zamokřené části cihelného zdiva	102
Tabulka 7 – Vlastnosti materiálů	136
Tabulka 8 – Stanovení ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti λ_g dle [21]	139
Tabulka 9 – Stanovení ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti λ_g dle [22].....	141
Tabulka 10 – Stanovení ekvivalentního součinitele tepelné vodivosti λ_g ve stropní dutině dle [22]	143
Tabulka 11 – Parametry vzduchových vrstev pro jednotlivé referenční modely	145
Tabulka 12 – Průměrné hodnoty klimatických údajů ze sledovaného období	147
Tabulka 13 – Referenční okrajové podmínky odvozené z měřených údajů.....	148
Tabulka 14 – Návrhové okrajové podmínky	148
Tabulka 15 – Porovnání naměřených hodnot s hodnotami pro jednotlivé ref. modely	149



Seznam příloh

PŘÍLOHA 1

Experimentální fasáda UCEEB

**Přehled čidel a výkresová dokumentace monitorovaných oblastí
v rámci testovacích polí TP2 a TP3 se systémy vnitřního zateplení**

PŘÍLOHA 2

**CD Diplomová práce „Dřevěná trémová zhlaví v cihelném zdivu
s vnitřní tepelnou izolací“**