

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra konstrukcí pozemních staveb



DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Cihelné zdivo s vnitřní tepelnou izolací**

**Brick masonry with internal thermal insulation**

Studijní obor: Budovy a prostředí

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

Vypracoval: **Bc. Matěj Pokorný**

2018



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Pokorný</u>	Jméno: <u>Matěj</u>	Osobní číslo: <u>399791</u>
Zadávací katedra: <u>k124</u>		
Studijní program: <u>Budovy a prostředí</u>		
Studijní obor: <u>Budovy a prostředí</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Cihelné zdivo s vnitřní tepelnou izolací

Název diplomové práce anglicky: Brick masonry with internal thermal insulation

Pokyny pro vypracování:

- 1) Diplomant zpracuje stručnou rešerši o současném stavu problematiky vnitřního zateplování zdiva.
- 2) Diplomant provede podrobné vyhodnocení měřených údajů z experimentu (dlouhodobý monitoring 4 konstrukčních skladeb cihelné stěny s vnitřním zateplením) probíhající v letech 2015-2017 v ČVUT univerzitním centru energeticky efektivních budov.
- 3) Diplomant provede tepelně vlhkostní simulace skladeb z experimentu a výsledky modelu porovná s měřenými údaji z experimentu.
- 4) Diplomant zpracuje stručnou rešerši o současných a historických recepturách omítkových směsí.
- 5) Diplomant vyrobí vzorky různých venkovních omítkových směsí a provede laboratorní měření jejich jejich vlhkostních vlastností (faktor difuzního odporu, součinitel nasákavosti, a další).
- 6) Diplomant se pokusí ze získaných informací vypracovat analýzu závislosti vlhkostního režimu systémů s vnitřním zateplením na druhu venkovní omítky.

Seznam doporučené literatury:

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

Datum zadání diplomové práce: 23.2.2018 Termín odevzdání diplomové práce: 20. 5. 2018  
*Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku*

\_\_\_\_\_ F \_\_\_\_\_

### 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“.*

23.2.2018

\_\_\_\_\_ Datum převzetí zadání \_\_\_\_\_

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité zdroje.

V Praze dne 20. 5. 2018

.....  
Bc. Matěj Pokorný

## **Poděkování**

Děkuji Ing. Pavlovi Kopeckému, Ph.D. za odborné vedení, vstřícnost a cenné rady při zpracování této diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat vedení Univerzitního centra energeticky efektivních budov za poskytnutí dat o experimentu a možnosti využití laboratorních prostor centra v Buštěhradě. Závěrem bych rád poděkoval především svým rodičům a Barboře Košťálové, kteří mi jsou velkou oporou v průběhu mého studia.



## **Abstrakt**

Diplomová práce se zabývá tepelně vlhkostním režimem vnitřního zateplení cihelného zdiva. Práce se věnuje interpretaci měřených dat z dlouhodobého experimentu probíhajícího na Univerzitním centru energeticky efektivních budov. Součástí experimentu byl monitoring tří systémů vnitřního zateplení stěny vyzděné z plných pálených cihel. V rámci experimentu bylo souvrství zatíženo uměle vytvořeným deštěm. Dlouhodobý experiment byl zopakován počítačovou tepelně vlhkostní simulací. Simulace byly provedeny v softwaru WUFI. Byla vyhodnocena přesnost, s kterou se experiment podařilo nasimulovat, a diskutovány možné důvody vedoucí k rozdílným výsledkům. Práce se dále věnuje vlivu vnějšího omítkového souvrství na tepelně vlhkostní režim vnitřního zateplení cihelného zdiva. Laboratorními měřeními byly zjištěny vlhkostní vlastnosti pěti odlišných omítkových směsí. Naměřené vlastnosti byly využity jako vstupní údaje do počítačových tepelně vlhkostních simulací. Modely byly odvozeny z již vytvořených počítačových modelů, přičemž vnější omítka byla nahrazena omítkami používanými v laboratorních měřeních. Na základě výsledků simulací byl vyhodnocen vliv různých venkovních omítek na vlhkostní režim vnitřního zateplení na cihelném zdivu.

## **Klíčová slova**

Vnitřní zateplení, kondenzace vodní páry, větrem hnaný déšť, difuzní tok, růst plísní, omítka, nasákavost, difuzní propustnost, relativní vlhkost

## **Abstract**

The diploma thesis deals with thermal-humidity regime of internal insulation of brick masonry. The work deals with the interpretation of measured data from a long-term experiment at the University Center of Energy Efficient Buildings. Part of the experiment was the monitoring of three systems of internal insulation of the wall, made of solid bricks. In the experiment, the formation was loaded with artificially created rain. The long-term experiment was repeated by computer thermal humidity simulation. The simulations were performed in the WUFI software. The accuracy with which the experiment was simulated and the possible reasons leading to different results were discussed. The work also deals with the influence of the external plaster formation on the thermal humidity regime of the internal insulation of the brickwork. By laboratory measurements the moisture properties of five different plaster mixtures were determined. Measured properties were used as inputs to computer thermal humidity simulations. Models were derived from already created computer models, with the external plaster being replaced by plasters used in laboratory measurements. Based on the results of the simulations, the influence of various outdoor plasters on the humidity regime of the internal insulation on the brick masonry was evaluated.

## **Key words**

Internal insulation, condensation of water vapor, wind driven rain, diffuse flow, mold growth, plaster, water absorption, water vapor permeability, relative humidity

# Obsah

<b>1. Úvod .....</b>	<b>- 10 -</b>
1.1. Obecně .....	- 10 -
1.1. Problematika vnitřního zateplení .....	- 11 -
1.1.1. Difuzně uzavřené konstrukce .....	- 12 -
1.1.2. Difuzně otevřené konstrukce .....	- 15 -
1.2. Cíle diplomové práce .....	- 16 -
<b>2. Experiment tepelně vlhkostního chování vnitřního zateplení (UCEEB).....</b>	<b>- 17 -</b>
2.1. Obecně .....	- 17 -
2.1.1. Skladba 1 – UdiIN RECO.....	- 18 -
2.1.2. Skladba 2 – Isover.....	- 19 -
2.1.3. Skladba 3 - Va-Q-Tec .....	- 19 -
2.1. Monitoring .....	- 24 -
2.2. Harmonogram experimentu .....	- 25 -
2.3. Experiment – simulace větrem hnaného deště.....	- 26 -
2.4. Okrajové podmínky .....	- 30 -
2.5. Vyhodnocení experimentu - Porovnání jednotlivých skladeb.....	- 32 -
2.6. Vyhodnocení experimentu větrem hnaného deště .....	- 38 -
<b>3. Tepelně vlhkostní simulace experimentu .....</b>	<b>- 43 -</b>
3.1. Obecně o použitém softwaru .....	- 43 -
3.2. Obecné nastavení modelu .....	- 43 -
3.3. Klimatické okrajové podmínky .....	- 43 -
3.4. Materiálové vlastnosti.....	- 45 -
3.5. Porovnání simulace s měřenými údaji .....	- 46 -
3.5.1. Skladba S1a - UdiIN RECO 80 mm .....	- 48 -
3.5.2. Skladba S1b - UdiIN RECO 140 mm .....	- 51 -
3.5.3. Skladba S2 - Isover .....	- 54 -
3.5.4. Skladba 3 - Va-Q-Tec .....	- 58 -
3.6. Vyhodnocení simulace experimentu.....	- 60 -
<b>4. Laboratorní průzkum vlhkostních vlastností omítkových směsí.....</b>	<b>- 61 -</b>
4.1. Obecně .....	- 61 -

4.1.1. Počet vrstev .....	- 61 -
4.1.2. Pojiva .....	- 62 -
4.1.3. Plniva .....	- 63 -
4.1.4. Hydrofobizace omítkových malt.....	- 64 -
4.2. Výroba vzorků omítkový malt.....	- 64 -
4.3. Laboratorní měření .....	- 65 -
4.3.1. Zkouška pro stanovení objemové hmotnosti .....	- 65 -
4.3.2. Zkouška difuzní propustnosti.....	- 66 -
4.3.3. Zkouška nasákavosti .....	- 68 -
4.3.4. Vzorky bez nátěru .....	- 69 -
4.3.5. Vzorky ošetřené hydrofobizačním nátěrem .....	- 71 -
4.3.6. Zkouška vysychání.....	- 76 -
4.3.7. Zkouška pro stanovení sorpčních křivek .....	- 77 -
4.3.8. Zatřídění omítkových malt dle normy DIN 4108-3 a předpisu asociace WTA .....	- 78 -
4.3.9. Shrnutí naměřených hodnot parametrů omítkových malt.....	- 80 -
<b>5. Tepelně vlhkostní simulace experimentu s variantami omítkových malt ...</b>	<b>- 81 -</b>
5.1. Obecné nastavení modelu .....	- 81 -
5.2. Klimatické okrajové podmínky .....	- 81 -
5.3. Materiálové vlastnosti .....	- 84 -
5.4. Porovnání výsledků simulace .....	- 85 -
5.4.1. Skladba S1b - UdiIN RECO 140 mm .....	- 85 -
5.4.2. Skladba 3 - Va-Q-Tec .....	- 87 -
5.4.3. Porovnání orientací fasád a systému vnitřního zateplení.....	- 90 -
5.5. Mrazové porušení zdiva a omítkové vrstvy .....	- 92 -
5.6. Simulace omítkové vrstvy OM1 s prasklinami.....	- 93 -
5.7. Simulace s omítkovými maltami splňující parametry předpisu WTA 6-5 .....	- 95 -
5.8. Vyhodnocení simulací s různými varianty omítkového souvrství.....	- 98 -
<b>6. Závěr .....</b>	<b>- 99 -</b>
<b>Doporučení pro další výzkum.....</b>	<b>- 101 -</b>
<b>Seznam použité literatury a zdrojů .....</b>	<b>- 102 -</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>- 104 -</b>

<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>- 109 -</b>
<b>Seznam příloh.....</b>	<b>- 110 -</b>



## 1. Úvod

### 1.1. Obecně

Jedním z hlavních problémů dnešní společnosti je nadměrná spotřeba energie z neobnovitelných zdrojů, jejichž zásoby jsou omezené a jejich spotřeba má negativní dopad na životní prostředí. Velký prostor pro úsporu energie z neobnovitelných zdrojů můžeme najít v provozu budov. Zhruba třetina celkové spotřeby energie v České republice je spotřebovávána právě na provoz budov [1]. Podíl neobnovitelných zdrojů energie na konečné spotřebě energie v České republice je pak přibližně 85 % [2]. Z těchto důvodů je tedy v dnešní době vytvářen stále větší tlak na snižování energetické náročnosti budov.

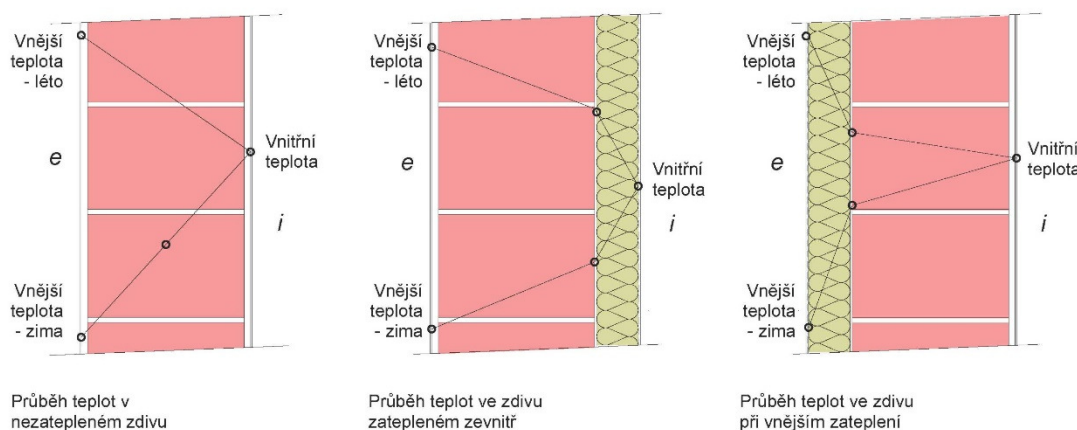
Jedním z nejefektivnějších nástrojů pro snížení energetické náročnosti budov je kladení vyšších nároků na tepelně technické parametry jejich obvodových konstrukcí, a to jak u novostaveb, tak i u staveb stávajících. V případě již stávajících staveb se jedná o dodatečné zateplování, které se elementárně dělí na dvě kategorie, a to vnitřní zateplení a zateplení vnější. V případě dodatečného zateplení konstrukce je varianta s vnitřním zateplením obecně brána jako rizikovější a problematictější řešení. Hlavním důvodem je především riziko výskytu kondenzátu na vnitřním líci zdiva a tím zvýšené riziko výskytu plísní a poškození zdiva mrazem. Jsou zde však další důvody, například tepelné mosty vznikající návazností stropních konstrukcí a přiček na obvodový plášť, zvýšené dilatační pohyby konstrukce, absence hmoty pro akumulaci tepla, omezení využití vnitřních povrchů a vedení instalací, zmenšení vnitřního prostoru a vyšší náročnost na technologickou kázeň při realizaci zateplení. Jsou však případy, kdy vnitřní zateplení je jediným možným řešením, jak zlepšit tepelně technické parametry obvodového pláště. Jedná se například o případy, kdy má budova historicky či esteticky hodnotnou fasádu, je potřeba zateplit jen část budovy, nebo má budova velmi členitou fasádu a provedení vnějšího zateplení bylo neúměrně náročné.

Budovy historicky či esteticky hodnotnou fasádu jsou ve většině případů postavené před rokem 1945. K roku 2011 žilo v České republice v budovách postavených před rokem 1945 republiky 36,2 % obyvatel [3]. Jedná se tedy o nezanedbatelný počet objektů. Většina těchto budov má zděný obvodový plášť z plných pálených cihel a dřevěné trámové stropy. Na Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT (UCEEB) se tedy rozhodli vytvořit dlouhodobý experiment monitorující tepelně vlhkostního chování stěn z plných pálených cihel s vnější jádrovou omítkou opatřených různými typy vnitřních zateplovacích systémů. Vyhodnocení tohoto experimentu se věnuje první část této práce. Druhá část se věnuje závislosti vlhkostního režimu systému s vnitřním zateplením na vlastnostech venkovní omítky.



## 1.1. Problematika vnitřního zateplení

Se zateplením stěny obvodového pláště budovy se mění také průběh teplot napříč konstrukcí. Vlivem vyššího teplotního odporu vrstvy tepelné izolace oproti vrstvě zdiva, se většina teplotního rozdílu odehrává právě v tepelné izolaci. Při vnějším zateplení se tedy teplota zdiva blíží spíše teplotě interiéru a při vnitřním zateplení se teplota zdiva blíží spíše teplotě exteriéru viz obrázek 1. V případě varianty vnitřního zateplení se tedy výrazně snižuje tepelně akumuláční schopnost konstrukce a její tepelná setrvačnost, což může být výhodou v případě, že provoz prostoru je přerušovaný. Jeli ale prostor využíván trvale, tak je akumuláční schopnost konstrukce a její vyšší tepelná setrvačnost spíše žádoucí. V přechodném období je konstrukce schopna do sebe naakumulovat více solárních zisků a v letním je při správném větrání schopna lépe vzdorovat přehřívání místnosti. Dalším negativními důsledky u varianty vnitřního zateplení je jednak zvýšené smršťování a rozpínání konstrukce zdiva vlivem vystavení velkým teplotním rozdílům mezi letníma a zimním obdobím a jednak vystavení zdiva záporným teplotám, které při zvýšené vlhkosti zdiva mohou vést k mrazovému poškození.

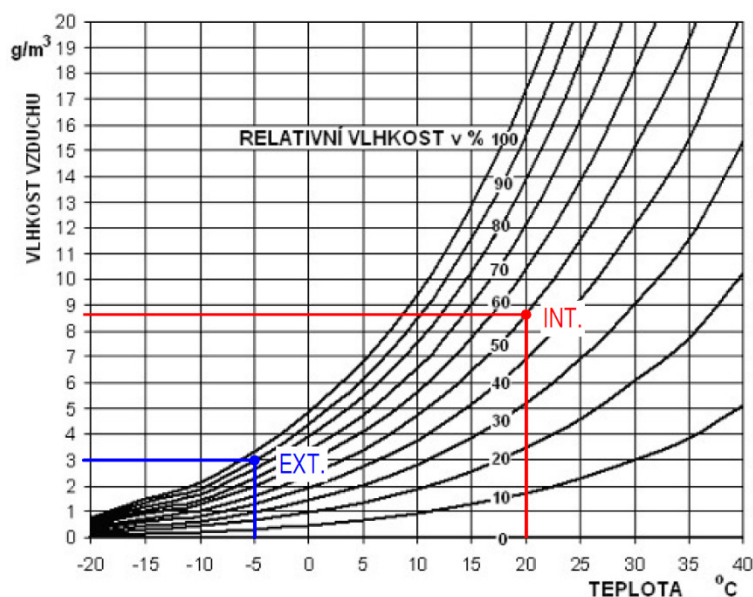


Obrázek 1 - Grafy průběhu teplot různých variant zateplení [4]

Se změnou teplot v konstrukci se ale také mění vlhkostní režim konstrukce. Jak víme, tak vzduch za určité teploty může obsahovat jen určité množství vody. Vzduch s nižší teplotou je schopen pojmout méně vodní páry než vzduch s vyšší teplotou. Představím-li si modelovou zimní situaci, tak v interiéru máme vzduch o teplotě 20 °C a relativní vlhkosti 50 %, v exteriéru pak vzduch o teplotě -5 °C a relativní vlhkosti 90 %. Z obrázku 2 je patrné, že i přes vyšší relativní vlhkost je v exteriérovém vzduchu přibližně o 5,7 g/m<sup>3</sup> nižší koncentrace vodní páry než ve vzduchu interiérovém. Budeme-li uvažovat, šíření vodní páry vzduchem pouze difuzí, tak v zimní období bude docházet k proudění vodní páry z interiéru do exteriéru. Důvodem je snaha o vyrovnání koncentrací vodní páry, tedy molekuly vody proudí z místa vyšší koncentrace do místa nižší koncentrace. Množství vody procházející skrz konstrukci je pak nepřímo úměrné jejímu difuznímu odporu. Tento jev je přítomný ve všech konstrukcích, a to ať se jedná o nezateplenou stěnu, stěnu zateplenou vnějším zateplovacím systémem, nebo zateplenou vnitřním



zateplovacím systémem. Z obrázku 2 je patrné, že rosný bod pro koncentraci vodní páry interiérového vzduchu je přibližně roven 8 °C. V případě zdiva bez zateplení je modelové zimní situaci rosný bod zhruba uprostřed konstrukce. Zde vznikající kondenzát je pak roznášen po celém zdivu a vlhkost na vnitřním líci zdiva, které má interiérovou teplotu a dochází zde tedy k vysokému odparu, je minimální. V případě vnějšího zateplovacího systému je rosný bod, při zvolení vhodné tloušťky zateplení, posunut až do vrstvy vnějšího zateplení. Jeli vrstva vnějšího zateplení paropropustná (např. minerální vata), tak se kondenzační zóna v konstrukci ani nemusí vyskytovat, částečný tlak nasycené vodní páry směrem od interiéru klesá společně s částečným tlakem vodní páry. U vnitřního zateplení je však zóna rosného bodu vnitřního vzduchu přibližně na rozhraní tepelné izolace a zdiva což může při nevhodném návrhu, vést k velkému zvýšení zkondenzovaného množství vodní páry. Tento problém je výrobci vnitřních zateplovacích systémů řešen dvojím způsobem. Jedním z nich je vytvoření parotěsné vrstvy na vnitřním líci zdiva, která zamezí prostupu vodní páry do konstrukce. Tento způsob řešení je nazýván jako difuzně uzavřený systém. Druhý je nazýván jako difuzně otevřený systém, jenž je difuzně otevřený, ale taky kapilárně aktivní. Kondenzát je pak díky kapilárně aktivnímu materiálu odveden k vnitřnímu líci stěny, kde je odpařen. Jednotlivé systémy jsou blíže popsány v podkapitolách 1.1.1. a 1.1.2.



Obrázek 2 - Graf závislosti teploty na vlhkosti vzduchu [5]

### 1.1.1. Difuzně uzavřené konstrukce

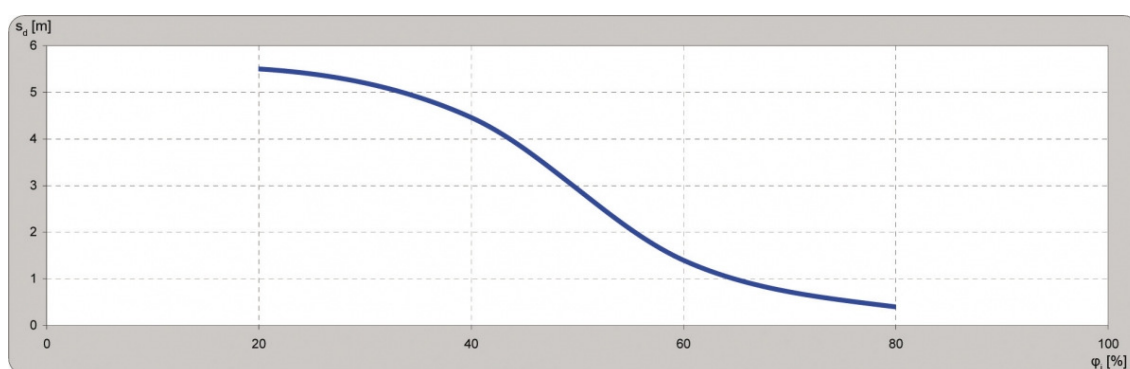
Tento systém vnitřního zateplení funguje na principu vytvoření difuzní bariéry mezi interiérem a rozhraním izolace a zdiva. Cílem je snížení částečného tlaku vodní páry na rozhraní izolace a zdiva na hodnotu nižší, než je hodnoty částečného tlaku nasycené vodní páry na tomto rozhraní. Parotěsná bariéra může být tvořena buďto přímo tepelným izolantem, jako tomu je u zateplení deskami z extrudovaného polystyrenu, vakuovými panely, deskami z polyuretanové pěny, deskami z polyisokyanurátové pěny a deskami z fenolické pěny. Druhou variantou jsou systémy, kde jsou jednotlivé funkce rozděleny





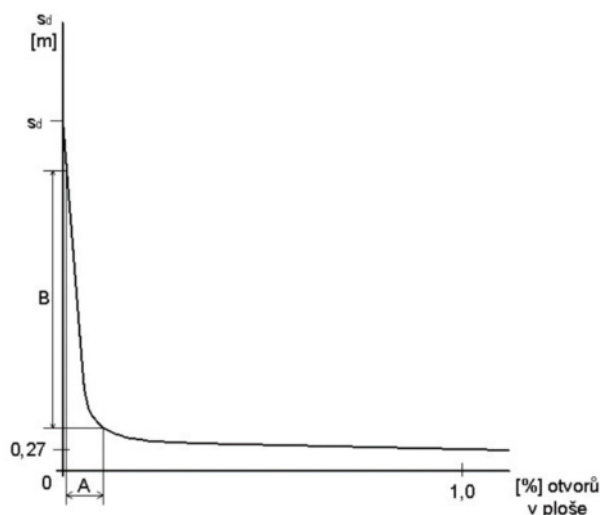
na jednotlivé vrstvy. Jedna z vrstev tedy plní izolační funkci (např. minerální vaty) a druhá vrstva plní funkci parotěsnou (např. polyethylenová folie). Difuzně uzavřený systém tedy v zimním není zatěžován dotací vlhkosti z interiéru, na druhou stranu ale v letním období je umožněno vysychání jen směrem do exteriéru.

Speciální kategorií difuzně uzavřených systémů jsou vnitřní zateplovací systémy s inteligentní parotěsnou fólií. Inteligentní parotěsné fólie se vyznačují proměnlivou ekvivalentní difuzní tloušťkou. V zimním období má fólie vysoký difuzní odpor a plní tak parotěsnou funkci. S příchodem letního období, kdy je koncentrace vlhkosti vodních par v exteriérovém vzduchu vyšší, se zvýší relativní vlhkost mezi fólií a izolantem. S rostoucí relativní vlhkostí na straně k exteriéru klesá ekvivalentní difuzní tloušťka fólie a je tak umožněno vysychání i směrem do interiéru viz obrázek 3.



Obrázek 3 - Graf závislosti ekvivalentní difuzní tloušťky fólie Isover Vario v závislosti na relativní vlhkosti [6]

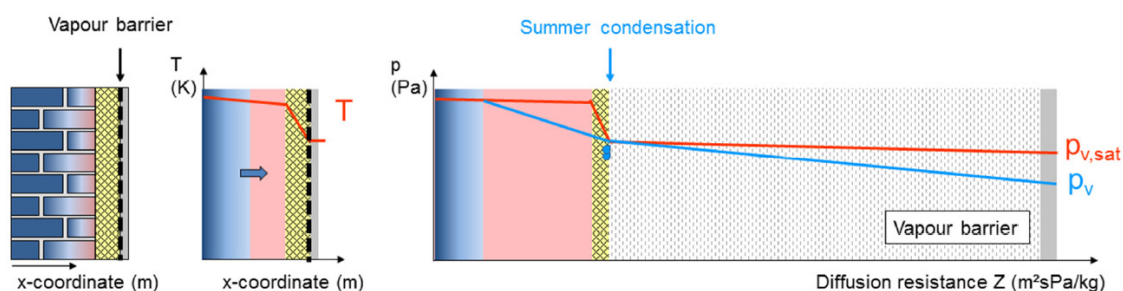
Nevýhodou difuzně uzavřených systému je jejich vysoká náročnost na technologickou kázeň. Účinnost parozábrany je velmi závislá na kvalitě provedení spojů. V případě deskových materiálů je nutné minimalizovat mezery mezi jednotlivými deskami a případné mezery musí být důkladně utěsněny montážní pěnou. U foliových parozábran je pak nutné tyto, aby všechny spoje a prostupy byly důkladně přelepeny parotěsnou páskou. Tato skutečnost se se stále rostoucí cenou práce může promítnout do celkových nákladů na realizaci vnitřního zateplení. I v případě, že se podaří udržet kvalitu spojů na vysoké úrovni, tak stále hrozí riziko, a to především u fóliových parozábran, že dojde k perforaci této vrstvy při montáži doplňkových konstrukcí, realizaci rozvodů, či během provozu budovy. Na obrázku 4 můžeme vidět graf závislosti perforované plochy polyethylenové fólie na její ekvivalentní difuzní tloušťce. V grafu je znázorněno, jak na intervalu A (perforace odpovídající cca 0,1 % plochy) neúměrně klesá ekvivalentní difuzní tloušťka fólie.



Obrázek 4 - Graf závislosti ekvivalentní difuzní tloušťky na ploše perforace PE folie [7]

V případě, že dojde k větší perforaci parotěsné vrstvy, tak zde hrozí riziko kondenzace vodní páry a její následný zatékání do míst dále od perforace, kde je její parotěsná vrstva bez defektu a není tak umožněno její vysychání směrem do interiéru, ale pouze do exteriéru. Kondenzát pak v tomto místě nemusí během doby letního a přechodného období stíhat vyschnout, čímž se zvyšuje riziko výskytu plísní a následné degradace konstrukce.

U systémů, kde je použita fóliová parozábrana bez proměnlivé difuzní tloušťky, hrozí takzvaná letní kondenzace vodní páry viz obrázek 5. Tato situace může nastat v letním období v případě, kdy je v interiéru udržována pokojová teplota a v exteriéru je velmi teplý vzduch s vysokou relativní vlhkostí a zdivo je dostatečně prohřáté. Další pravděpodobně častější varianta je, že na vnější povrch fasády nejdříve zaprší a pak je povrch vystaven silnému slunečnímu záření. V obou případech je difuzními silami vodní pára poháněna směrem do interiéru. Má-li tepelná izolace nízký difuzní odpor (např. minerální vata), tak přes ni pára rychle projde. Na vnitřní straně izolace je však nižší teplota a dostane-li sem dostatečné množství páry, tak v tomto místě může dojít ke kondenzaci.



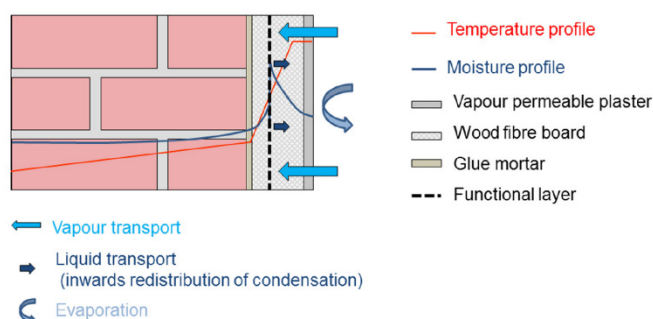
Obrázek 5 - schéma stanovení kondenzace vody v konstrukci v letním období pomocí Glaserovy metody [8]



S nemožností vysychání směrem do interiéru také roste závislost vlhkostního režimu konstrukce na venkovních klimatických podmínkách. Například fasáda vystavená vyšším hodnotám větrem hnaného dešti, je v případě použití vnitřního zateplení s difuzně uzavřeným systémem vystavena většímu riziku vlhkostního poškození než stěna zateplená difuzně otevřeným systémem.

### 1.1.2. Difuzně otevřené konstrukce

Tento systém vnitřního zateplení oproti difuzně uzavřenému systému nebrání prostupu vodních par. U toho systému se tedy předpokládá, že na rozhraní izolace a zdiva může dojít ke kondenzaci vodní páry. K výrobě zateplovacích difuzně otevřených systémů se však používají materiály s vysokou kapilární aktivitou a vlhkostní kapacitou. Kondenzát vznikající na rozhraní izolace a zdiva je izolací absorbován a transportován k povrchu interiéru, kde je opět odpařován do místnosti. K zateplení v difuzně otevřených systémech jsou v dnešní době používány například kalcium-silikátové desky, dřevovláknité desky, desky z polyuretanové pěny, desky na bázi křemičitanu vápenatého a desky z pórobetonu. Podmínkou pro správnou funkci difuzně otevřených systémů, je celoplošný kontakt kapilárně aktivního materiálu se zdivem. V případě že by tomu tak nebylo, tak by vzniklý kondenzát byl k povrchu interiéru dopravován jen difúzí. Z toho důvody začali někteří výrobci do vrstvy izolace vkládat vrstvu s vyšším difuzním odporem (např. systém Pavadentro Pavatex). Díky této vrstvě je částečný tlak vodní páry v izolaci na straně k interiéru vyšší a kondenzační zóna je z rozhraní izolace a zdiva přesunuta do izolace viz obrázek 5 [8].



Obrázek 6 - schéma difuzně uzavřeného systému s vrstvou s vyšším difuzním odporem v oblasti tepelné izolace [8]

K tomu, aby byl systém funkční, je nutné oproti difuzně uzavřeným systémům užití výhradně povrchových úprav, které umožňují vysychání systému. K tomu se také váže další omezení, a to využití prostoru přilehlého ke stěně. Povrch stěny by neměl být ničím zakrytý (nábytek, obrazy a apod.). V opačném případě by vlivem omezení proděnění vzduchu kolem povrchu, mohlo dojít ke zvýšené vlhkosti na povrchu a v kombinaci s vyšší teplotou v místnosti, by mohlo docházet k růstu plísní.



## 1.2. Cíle diplomové práce

- 1) Zpracovat data z dlouhodobého experimentu probíhajícího na Univerzitním centru energeticky efektivních budov, tak aby mohla být grafickým způsobem prezentována. Následně tyto data analyzovat a interpretovat.
- 2) Zopakovat experiment pomocí počítačové tepelně vlhkostní simulace. Definovat přesnost s kterou se experiment podařilo zopakovat, případně se pokusit vysvětlit, důvody vedoucí k rozdílným výsledkům.
- 3) Vytvořit 5 vzorků jádrových omítek s rozdílnými podíly cementu a vápna. Na základě laboratorních měření definovat vybrané fyzikální vlastnosti těchto omítkových malt.
- 4) Ve vybraných počítačových modelech konstrukcí z výše uvedeného experimentu, nahradit vrstvu venkovní omítky, vrstvami omítek 1-5 a zopakovat tepelně vlhkostní simulace. Na základě výsledků simulací definovat závislost vlhkostního režimu systému s vnitřním zateplením na vlastnostech venkovní omítky.

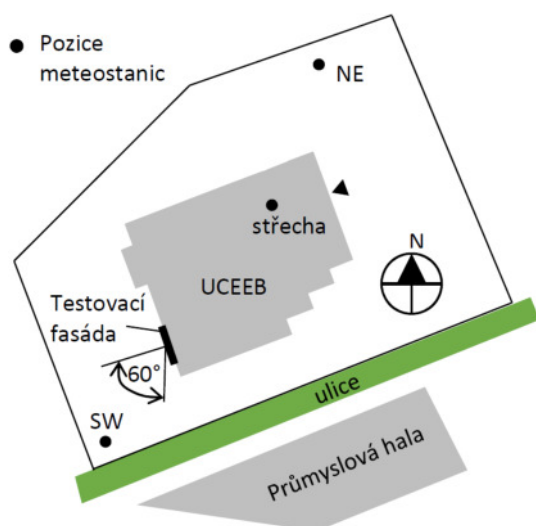


## 2. Experiment tepelně vlhkostního chování vnitřního zateplení (UCEEB)

### 2.1. Obecně

Na Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT (UCEEB) probíhá od dubna roku 2015 dlouhodobý experiment, zkoumající tepelně vlhkostního chování různých systémů vnitřní tepelné izolace cihelné stěny s venkovní omítkou.

Experiment je postavený ve dvou testovacích polích experimentální fasády. Experimentální fasáda je z jedné strany vystavena exteriéru a z druhé řízenému prostředí v klimatické místnosti. Na osazené vzorky tak působí z vnějšku přirozené venkovní prostředí a zevnitř kontrolované interiérové prostředí. Experimentální fasáda je orientována jihozápadním směrem, díky čemuž je také vystavena působení větru a dešti hnaným větrem.



Obrázek 8 - Situace UCEEB, zdroj [9]



Obrázek 7 - Pohled na experimentální fasádu, zdroj [9]

V exteriéru jsou osazena čidla monitorující teplotu vzduchu, relativní vlhkost vzduchu, rychlost a směr větru, sluneční ozáření fasády, dlouhovlnné sálání a dešťové srážky dopadající na horizontální plochu. V Klimatické místnosti jsou pak čidla zaznamenávající relativní vlhkost vzduchu, teplotu vzduchu a tlakový rozdíl mezi interiérem a exteriérem. Samotné konstrukce jsou pak osazeny čidly monitorující teplotu, relativní vlhkost a hustotu tepelného toku.

Jedno testovací pole experimentální fasády má rozměry 3x3,2 m. Do těchto experimentálních polí byla z plných pálených cihel na maltu Knauf PM 205 vyžděna zeď tloušťky 290 mm a z vnější strany omítnuta vápenocementovou jádrovou omítkou. Při zdění zdi byli ve dvou výškových úrovních vytvořeny kapsy, do nichž byly následně uloženy dřevěné trámy imitující stropní konstrukci. Součástí toho experimentu je tedy,





kromě monitorování tepelně vlhkostního chování konstrukce v běžném průřezu stěny, monitorování tepelně vlhkostního chování konstrukce v místě uložení trámových zhlaví. Pro aplikaci vnitřního zateplení byla tato testovací pole ještě vertikálně rozdělena na menší pole o rozměru 1,5x3,2 m. Do těchto 4 polí byly následně instalovány 3 různé systémy vnitřního zateplení, z toho jeden byl instalována dvakrát, ale v rozdílných tloušťkách.

### 2.1.1. Skladba 1 – UdiIN RECO

Na zateplení prvního pole č. 1 byl použit zateplovací systém UdiRECO výrobce Diffutherm. Jedná se o difuzně otevřený a kapilárně aktivní systém skládající se ze sendvičových dřevovláknitých desek a omítkové stěrky UdiMULTIGRUND.

Dřevovláknité desky jsou slepeny ze dvou částí, a to z flexibilní měkké desky s vysokým tepelným odporem a tvrdší desky s lepšími mechanickými vlastnostmi. Desky jsou v kontaktu se zdivem flexibilní částí desky, která dobře celoplošně přilne k podkladu, čímž se minimalizují vzduchové dutiny mezi zdivem a izolací. Naopak tvrdší část desky vytváří rovný a tuhý povrch pro aplikaci omítkové stěrky. Desky jsou rozměru 1300x790 mm a jsou skládána na vazbu systémem pero/drážka a následně kotveny pomocí hmoždinek.

Na desky je následně nanášena minerální omítková stěrka UdiMULTIGRUND, která má dle výrobce regulovat množství páry vstupující do konstrukce.

Na pole 1a (levé strana z pohledu exteriéru) byl aplikován tento systém s deskami tl. 80 mm a na pole 1b (pravá strana z pohledu exteriéru) byl aplikován tento systém s deskami tl. 160 mm.



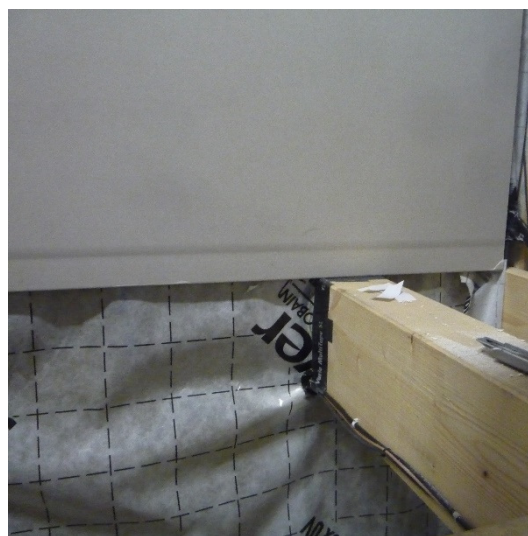
Obrázek 9 - Fotografie z realizace zateplení skladeb S1a a S1b [10]



### 2.1.2. Skladba 2 – Isover

System Isover byl namontován do pole 2a (levá strana z pohledu exteriéru). Jedná se o kombinaci desek z minerálních vláken, parotěsné folie a sádrokartonových desek.

Na zeď je přikotven sádrokartonářský rastr z pozinkovaných ocelových profilů. Přes rastr jsou na zeď uloženy desky z minerálních vláken Isover AKU tl. 90 mm. Minerální vlákna Izolace Isover Aku jsou po celém povrchu hydrofobizována. Na ocelový rastr je pak aplikována parotěsná folie Isover Vario. Fólie je vyrobena na bázi polyamidu a má proměnnou ekvivalentní difuzní tloušťku  $s_d$  [m]. Přes folii jsou pak k rastru přišroubovány sádrokartonové desky Rigibs. Hloubka rastru je cca 120 mm, takže mezi deskami z minerálních vláken a parotěsnou folií vzniká vzduchová mezera tl. cca 30 mm.

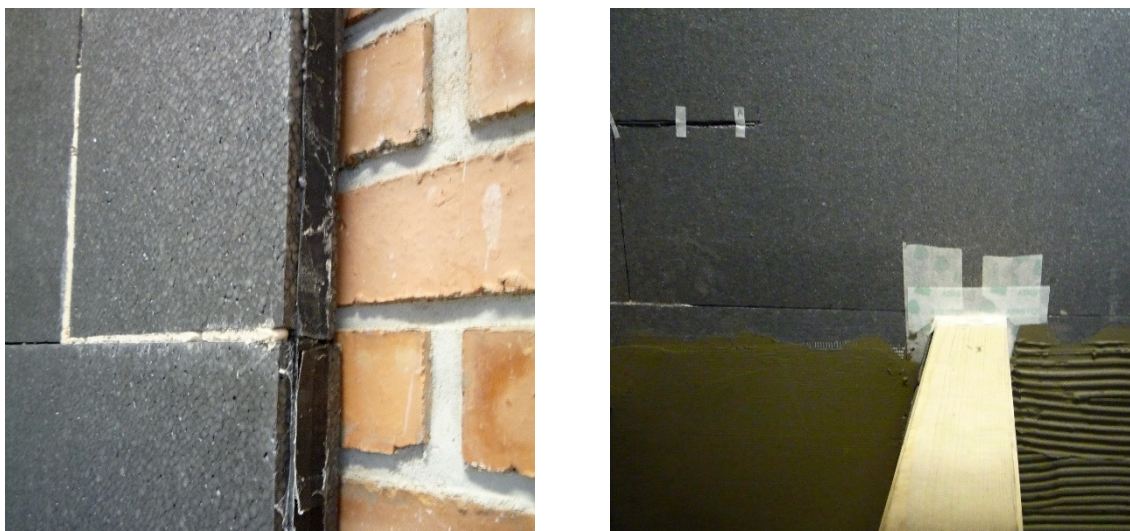


Obrázek 10 - Fotografie z realizace zateplení skladby S2 [10]

### 2.1.3. Skladba 3 - Va-Q-Tec

System Va-Q-Tec je namontován do pole 2b (pravá strana z pohledu exteriéru). Jedná se o difuzně uzavřený systém z izolací z vakuových desek.

Na zeď jsou za pomoci cementového lepidla nalepeny izolační desky VA-Q-VIP F-EPS. VA-Q-VIP F-EPS je 20 mm tlustý vakuový izolační panel z vakuové izolace s jádrem z křemíku oblažený z obou stran 10 mm EPS opláštěný hliníkovou folií. Desky jsou lepeny na vazbu a netěsnosti v jejich spojích jsou propěněny montážní pěnou. Na desky byla následně provedena povrchová úprava z cementové stěrky tl. 5 mm, která byla vyztužena sklo-textilní armovací síťovinou.



Obrázek 11 - Fotografie z realizace zateplení skladby S3 [10]

Stěna je vyzděna plných pálených cihel na vazákovou vazbu, takže jak ložní, tak i styčné spáry zdiva prochází na skrz celou zdi. Stěna je z vnější části omítnuta vápenocementovou jádrovou omítkou NOVIPro. Pro tuto omítku byl v laboratoři naměřen součinitel nasákavosti roven hodnotě 0,2 [kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1/2</sup>] a faktor difuzního odporu roven 19 [-]. Parametry jednotlivých skladeb zateplovacích systémů jsou zobrazeny v tabulce 1.

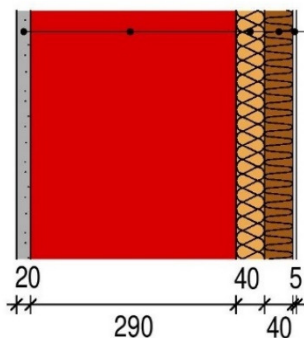
Zateplovací systém	Tepelný odpor	ekvivalentní difuzní tloušťka
	[W/(m <sup>2</sup> K)]	[m]
S1a	2,121	0,54
S1b	3,346	0,6
S2	2,798	5,21 (0,51)
S3	3,49	1 000 000

Tabulka 1 - Parametry zateplovacích systémů (bez vrstvy zdiva a vnější omítky) Pozn.: Pro skladbu S2 je v závorce uvedena hodnota S<sub>d</sub> pro letní období



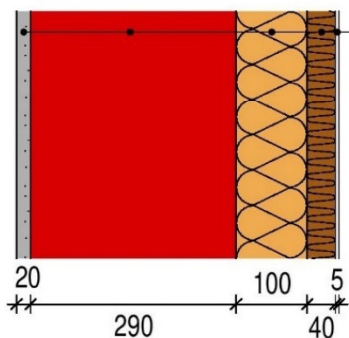


S1a



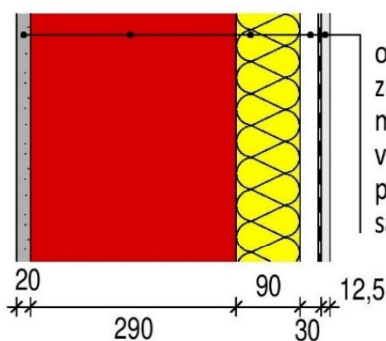
omítka vápenocementová jádrová NOVIPro 20 mm  
 zdivo z CP na maltu vápenocement Knauf CP 205 290 mm  
 dřevovláknitá izolační deska UdiIN RECO flexibilní část 40 mm  
 dřevovláknitá izolační deska UdiIN RECO omítací část 40 mm  
 omítková stěrka UdiMULTIGRUND vyztužená perlínkou 5 mm

S1b



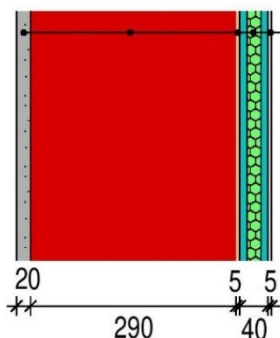
omítka vápenocementová jádrová NOVIPro 20 mm  
 zdivo z CP na maltu vápenocement Knauf CP 205 290 mm  
 dřevovláknitá deska UdiIN RECO flexibilní část 100 mm  
 dřevovláknitá deska UdiIN RECO omítací část 40 mm  
 omítková stěrka UdiMULTIGRUND vyztužená perlínkou 5 mm

S2



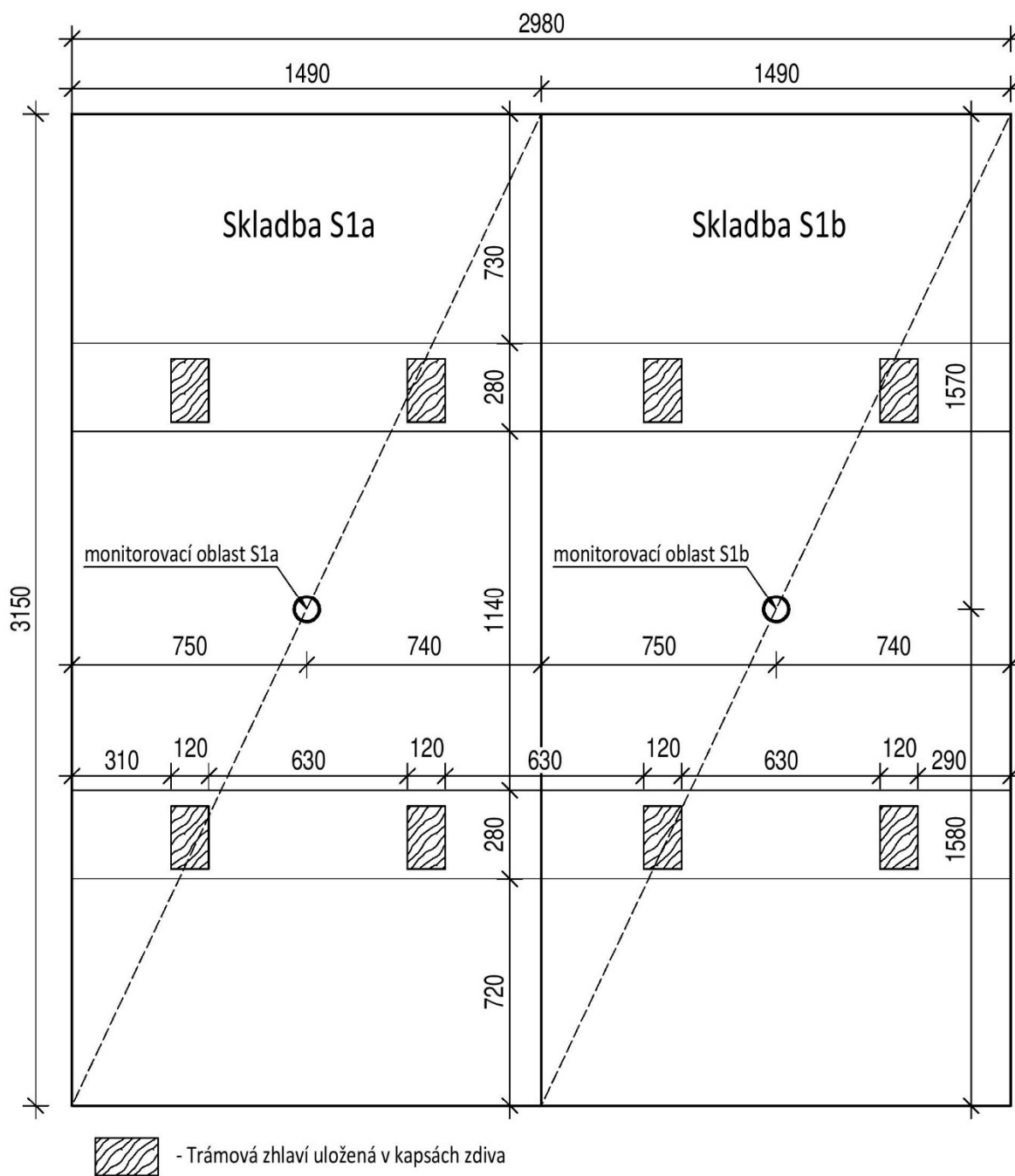
omítka vápenocementová jádrová NOVIPro 20 mm  
 zdivo z CP na maltu vápenocement Knauf CP 205 290 mm  
 minerální vata Isover Aku 90 mm  
 vzduchová mezera/rastr z pozink. oceli 30 mm  
 parotěsná folie Isover Vario KM Duplex 0,2 mm  
 sádrokartonová deska Rigips 12,5 mm

S3

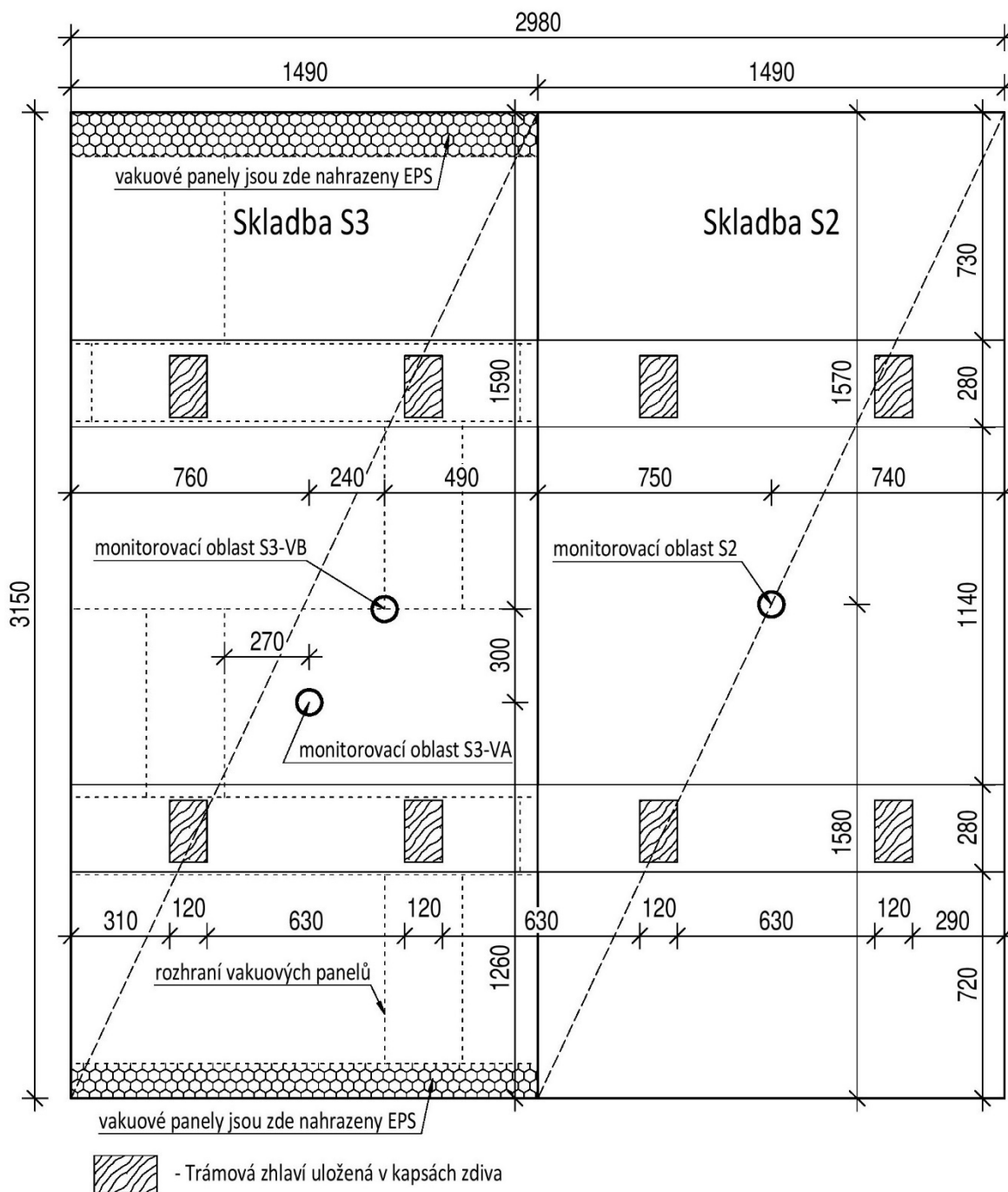


omítka vápenocementová jádrová NOVIPro 20 mm  
 zdivo z CP na maltu vápenocement Knauf CP 205 290 mm  
 cementová lepící stěrka 5 mm  
 vakuový panel Va-Q-VIP F-EPS 40 mm  
 cementová stěrka vyztužená perlínkou 5 mm

Obrázek 12 - Schéma jednotlivých skladeb



Obrázek 13 - Schéma experimentálního pole se skladbami S1a a S1b (pohled z interiéru)



Obrázek 14 - Schéma experimentálního pole se skladbami S2 a S3 (pohled z interiéru)



## 2.1. Monitoring

Jednotlivé konstrukce byly opatřeny čidly pro měření teploty, relativní vlhkosti a hustoty tepelného toku. Každá konstrukce byla v místě měření opatřena čidlem pro měření relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva, čidlem pro měření teploty ve vnější omítce, na rozhraní izolace a zdiva a v místě blízkém vnitřnímu povrchu. Skladba S2 pak byla ještě opatřena dalšími čidly, a to v uvnitř minerální vaty, na povrchu minerální vaty směřujícím do vzduchové dutiny a ve vzduchové dutině. Přesná poloha jednotlivých čidel je zobrazen ve schématech v příloze 1.



Obrázek 15 - Čidlo pro měření teploty a relativní vlhkosti ve vzduchové dutině mezi parotěsnou fólií a minerální vatou ve skladbě S2 [10]



Obrázek 16 - Čidlo pro měření teploty a relativní vlhkosti na rozhraní mezi izolací a zdivem u skladby S3 [10]



Obrázek 17 - Čidlo pro měření hustoty tepelného toku u skladby S1a [10]



Obrázek 18 - Pohled na experimentální fasádu se skladbami S1a a S1b [10]





## 2.2. Harmonogram experimentu

V průběhu experimentu byly měněny parametry vnitřního prostředí (klimatické místnosti), jednak za účelem nasimulování různých provozů, které se mohou v budovách vyskytovat, a jednak vlivem výpadku zařízení pro úpravu vzduchu. Klimatická místnost je vybavena pouze vytápěním a nikoliv chlazením. Stejně tak je vybavena pouze vlhčením vzduchu, a nikoliv odvlhčovačem vzduchu. Požadovaná teplota je tedy v klimatické místnosti udržována minimálně na hodnotách uvedených v tabulce 1, avšak v letním období mohou být tyto hodnoty překročeny. Stejně tak mohli být vlivem vnějších podmínek překročeny požadované hodnoty relativní vlhkosti vzduchu.

Časový interval	Požadovaná teplota	Požadovaná relativní vlhkost
07.03.2015 - 30.02.2015	20 °C	50%
30.02.2015 - 15.08.2015	20 °C	bez vlhčení
15.08.2015 - 01.02.2016	20 °C	50%
01.02.2016 - 01.03.2016	20 °C	bez vlhčení
01.03.2016 - 18.10.2016	20 °C	50%
18.10.2016 - 02.11.2016	20 °C	60%
02.11.2016 - 02.01.2017	24 °C	60%
02.01.2017 - 23.01.2017	18 °C	40%
23.01.2017 - 06.06.2017	24 °C	60%
06.06.2017 - 15.11.2017	21 °C	bez vlhčení
15.10.2017 - 10.12.2017	22 °C	bez vlhčení
10.12.2017 - 25.02.2018	21 °C	60%

*Tabulka 2 - Harmonogram úpravy vzduchu v klimatické místnosti*



### 2.3. Experiment – simulace větrem hnaného deště

V dopoledních hodinách dne 19.7.2017 byl na experimentálních fasádách, v kterých jsou stěny se skladbami S1-S3, proveden experiment simulující větrem hnaný déšť. Cílem tohoto experimentu bylo zjistit, jaký vliv má větrem hnaný déšť na vlhkostní chování konstrukcí s vnitřními zateplovacími systémy S1-S3. Skrápěním fasády se simuloval letní déšť trvající 40 minut a doprovázený silným větrem ve směru kolmém k testovacím polím.

Při výběru termínu realizace tohoto experimentu bylo zohledněna předpověď počasí a poloha slunce na obloze. Byl vybrán den, po kterém mělo po delší dobu nastat slunečné počasí s jasnou oblohou, tak aby byla mokrá fasáda vystavena co nejvíce slunečnímu záření, které mělo za následek zvýšený odparů naakumulované vlhkosti z experimentu a tím vést ke zvýšení parciálního tlaku vodní páry ve vnější části zdi, čímž by byl podpořen transport vodní páry difuzí směrem k interiéru. Jedenáctá hodina dopolední zas proto, aby po dobu kroupení byla fasáda ve stínu a v co nejkratší době po kroupení byla vystavena slunečnímu záření.

Pro skrápění bylo využito zařízení vybavené tryskami s dvěma rozdílnými průřezy (9 trysek pro simulaci deště a 16 trysek vytvářející vodní mlhu) a reflektory pro simulaci slunečního záření viz obrázek 18. Reflektory byly z důvodu zamezení jejich poškození obaleny hydroizolační fólií. Z důvodu, že zařízení bylo původně vyrobené pro simulaci deště a slunečního záření v klimatické dvojkomoře, byla efektivně skrápěná plocha menší, než byla plocha jednoho pole experimentální fasády. Tento nedostatek byl, alespoň částečně vykompenzován zvednutím skrápěcího zařízení vysokozdvížným vozíkem do větší výšky, tak aby středy kroupícího zařízení byl v horní polovině pole a aby díky stékající vodě bylo dosaženo zvětšené efektivně skrápěné plochy viz obrázek 24.



Obrázek 19 - Zařízení pro skrápění fasádních polí



Obrázek 20 - Lopátkový vodoměr s impulzním měřičem



Mezi kohout a hadici kropícího zařízení byl osazen lopatkový vodoměr opatřený impulzním měřičem viz obrázek 20 a pod experimentální pole byl umístěný okapní žlab s vyústěním do plastové přepravky osazené čerpadlem viz obrázek 21. Přepravka byla dále vybavena rýskou. V momentě, kdy dosahovala hladina v přepravce výšky rýsky, tak bylo ručně spuštěno čerpadlo, které bylo po odčerpání 10 litrů vody opět ručně vypnuto. Časy, kdy bylo čerpadlo spínáno, byly ručně zaznamenávány. Pro kontrolu byly také ručně zaznamenávány stavy lopatkového vodoměru. Mezi kropící zařízení a stěnu byly na zem položen kýbl, zachytávající odstříkující vodu. Na základě zachycené vody v tomto kýblu a vizuálního ohledání kolem skrápěné fasády bylo stanoveno množství vodních ztrát na hodnotu 8 % z celkového přítoku.



Obrázek 21 - Vyústěný okapního žlabu do přepravky osazené čerpadlem [11]



Obrázek 22 - Fotografie zachycující skrápění fasády



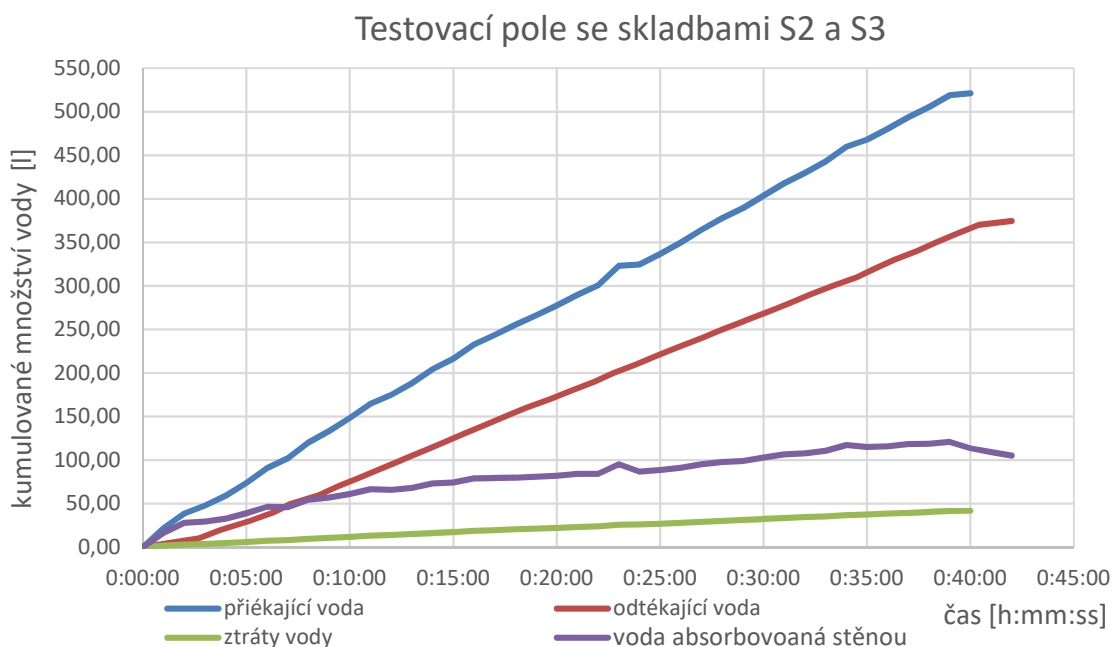
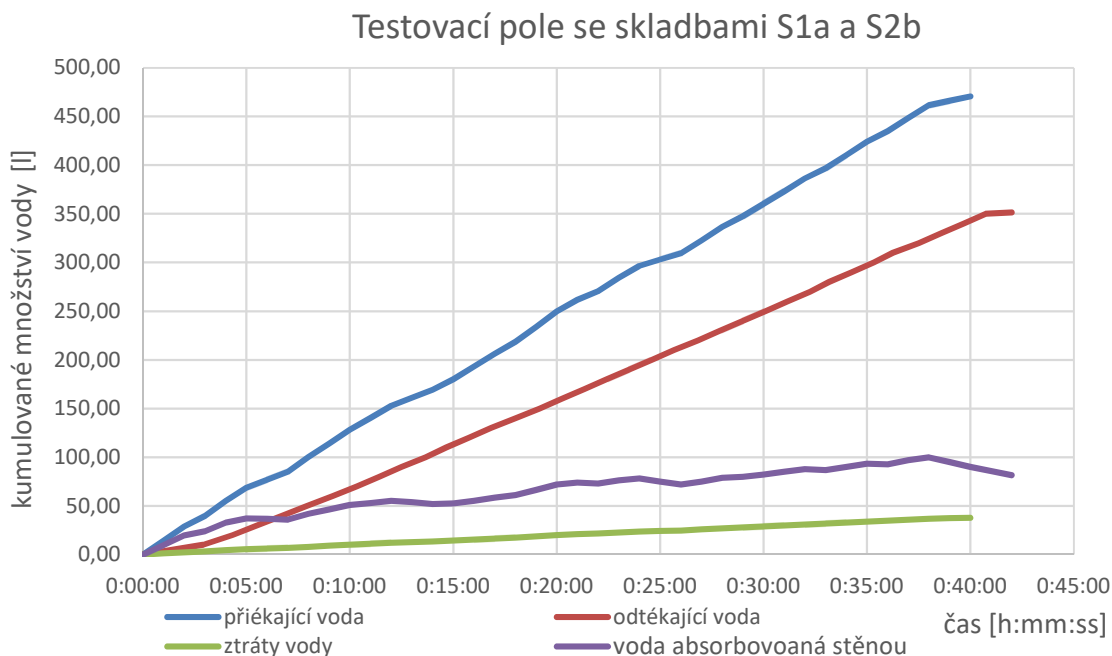
Obrázek 23 - Fotografie zachycující efektivně skrápěnou plochu testovacích polí



Obrázek 24 - Fotografie zachycující skrápění fasády



Grafy na obrázku 25. znázorňují stav vody v průběhu celého experimentu. Hodnoty množství absorbované vody stěnou byly spočítány jako rozdíl mezi přítokem a sumou ztrát a odtoku. Klesající charaktery křivek množství vody absorbované stěnou v lokálních intervalech, tedy nejsou způsobené tím, že by snad zeď absorbovanou vodu zpětně vylučovala, ale jedná se časovou prodlevu odtékající vody oproti vodě přitékající.



Obrázek 25 - Grafy zobrazující stav vody během experimentu simulujícího větrem hnaný déšť





V tabulce 3 jsou uvedeny číselné výstupy z experimentu. Celkové přítoky vody na jednotlivá pole jsou rozdílné, jelikož v průběhu skrápění prvního pole se skladbami S2 a S3 musel být přítok vody mírně snížen, aby se stíhalo zaznamenávat množství odčerpané vody. Pro druhé pole se skladbami S1a a S1b byl rovnou od začátku nastaven o trochu menší přítok. Snížení přítoku mělo ale také za následek snížení efektivně skrápěné plochy viz obrázek 22. Při snížení přítoku byl snížen tlak vody na výstupu z trysek a tím snížen i jejich dostřik. Úhrn vody, který dopadl za 40 minut na 1 m<sup>2</sup>, byl v obou případech mírně pod 70 litrů. Pro představu maximální čtyřicetiminutový úhrn srážek zaznamenaný meteorologickou stanicí umístěnou v jihozápadní části areálu UCEEB byl na horizontální rovinu necelých 15 mm/m<sup>2</sup> za hodinu, tedy necelých 15 litru/m<sup>2</sup>. S ohledem na tehdejší větrné podmínky a využitím výpočtu z kapitoly 3.3. vychází větrem hnaný déšť na zhruba 7 litrů/m<sup>2</sup>. Pravděpodobnost, že by se zde někdy v budoucnu objevil kombinace deště a silného větru, při které by byl hodinový úhrn srážek uvedených necelých 70 litrů na svislou rovinu je tedy málo pravděpodobný. V horských oblastech, kde se běžně objevují srážky (kapalné podobě) s hodinovým úhrnem kolem 100 mm/h na horizontální plochu, by ale tato situace nastat mohla.

Také se zde nabízí otázka, jaké hodnoty větrem hnaného deště jsou pro návrh konstrukce úměrné. Podle návrhového modelu z oboru statiky je charakteristická hodnota klimatického zatížení stanovena tak, že pravděpodobnost jejího překročení v průběhu referenční doby jednoho roku je 0,02. To se u časově proměnné části zatížení rovná průměrné době návratu 50 let. Charakteristická hodnota zatížení je pak ještě vynásobena dílčím součinitelem zatížení, vyjadřujícím možné nepříznivé odchylky hodnot zatížení [12]. Kdyby byl tedy návrhový model inspirován modelem z oboru statiky, tak by se hodnoty zatížení fasády deštěm mohli přibližně blížit těm z experimentu.

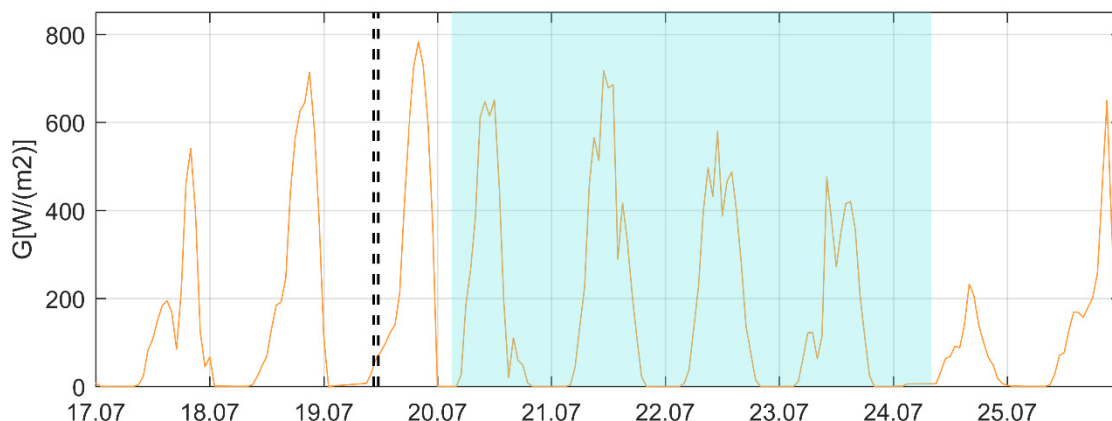
pole	doba kroupení	celkový přítok	celkový odtok	celkové ztráty	množství vody absorbované stěnou	efektivně skrápěná plocha	množství vody dopadající na 1 m <sup>2</sup> stěny	množství vody absorbované 1 m <sup>2</sup> stěny
	[min]	[l]	[l]	[l]	[l]	[m <sup>2</sup> ]	[l/40min]	[l]
S1a, S1b	40,00	470,70	351,50	37,66	81,54	6,20	69,85	13,15
S2, S3	40,00	521,30	37,45	41,70	105,10	7,30	65,70	14,40

Tabulka 3 - Tabulka s daty z experimentu simulujícího přivalový větrem hnaný déšť

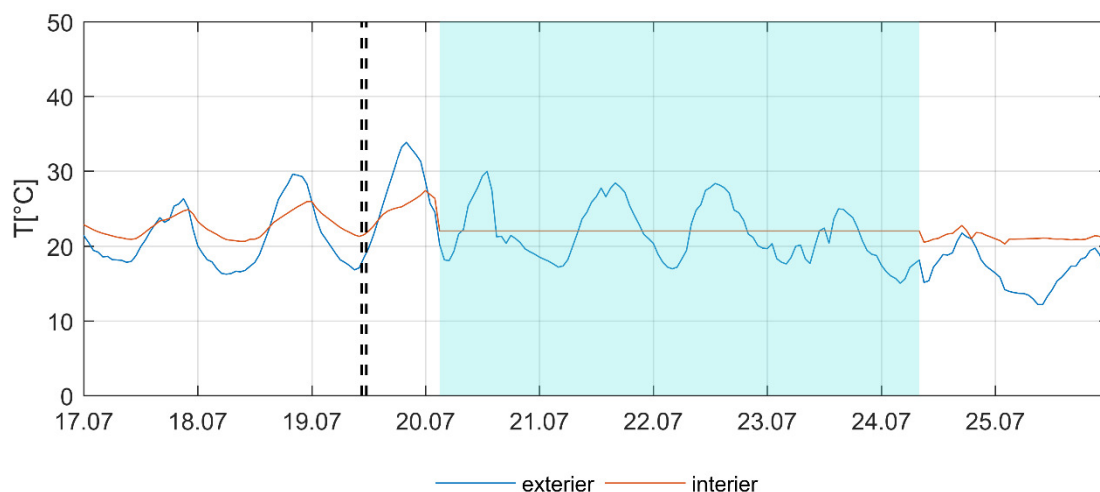
Jak již bylo více uvedeno, tak byl pro zkoušku vybráno slunečné období, za účelem urychlení transportu vlhkosti do vnitřní části zdiva. Bohužel v době od 20.7.2017 03:00 do 24.7.2017 08:00 došlo k výpadku čidel, a tak z této doby nemáme žádná naměřená data. V grafech jsou v tomto období tedy data nahrazena daty z jihozápadní metrologické stanice. V případě dat vnitřní teploty, nezbyvala jiná možnost než tato data pouze interpolovat. Víme však jistě, že v den zkoušky sluneční ozáření fasády dosahovalo hodnot necelých 800 W/m<sup>2</sup> a z dat meteorologické stanice lze usoudit, že sluneční ozáření



fasády pravděpodobně nabývalo v dalších dvou dnech hodnoty přes  $600 \text{ W/m}^2$  viz obrázek 26.



Obrázek 26 – Graf hodinových dat slunečního ozáření fasády, Pozn.: čárkovaná čára značí dobu zahájení skrápění fasády



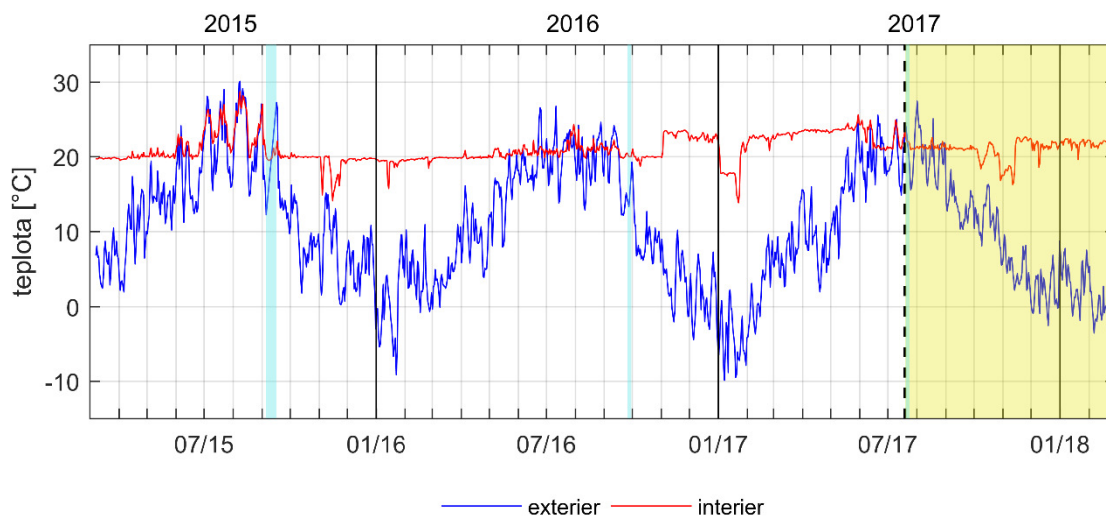
Obrázek 27 - Graf hodinových dat teploty vzduchu v interiéru a exteriéru, Pozn.: čárkovaná čára značí dobu zahájení skrápění fasády

#### 2.4. Okrajové podmínky

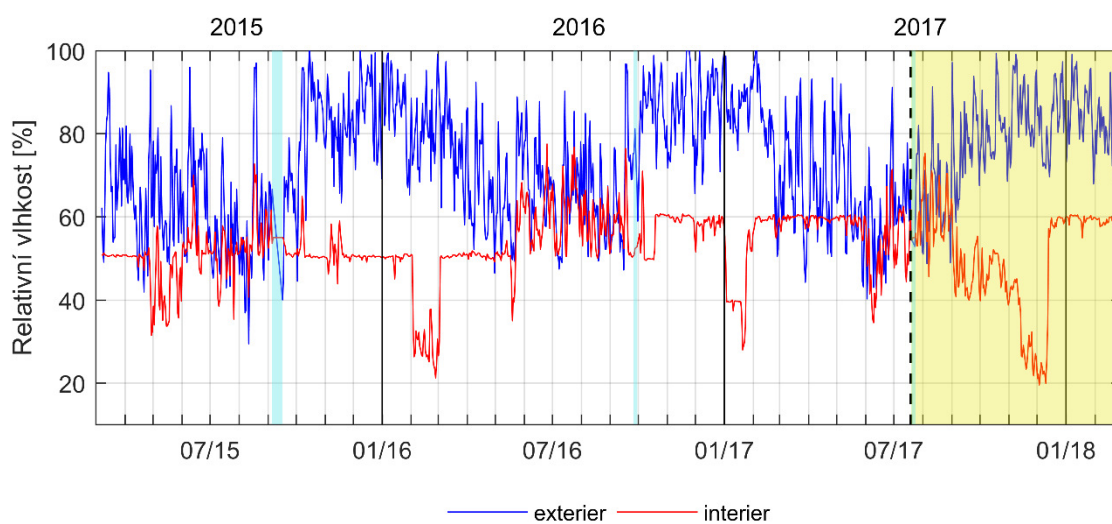
Na obrázcích 28-30 je graficky zobrazen průběh teplot, relativní vlhkosti a množství slunečního záření dopadajícího na experimentální fasádu. Průběh teploty a vlhkosti vzduchu jsou vyjádřeny pomocí denních průměrů přepočítaných z hodinových hodnot. Množství slunečního záření je zas vyjádřeno jako denní úhrn z hodinových hodnot. Svislou černou přerušovanou čarou je znázorněna doba, kdy došlo k průběhu experimentu, který simuloval větrem hnaný déšť. Žlutou plochou je znázorněna doba po tomto experimentu (toto období je detailněji popsáno v samostatné kapitole 4.6.). Modrou plochou je znázorněn výpadek čidel (doba kdy čidla nezaznamenala žádná data, nebo zaznamenala na první pohled nereálné hodnoty) větší jak 48 hodin. Data pro toto období byla buďto nahrazena daty z meteorologické stanice umístěné v blízkosti experimentální fasády, nebo data vznikla interpolací ze známých hodnot na začátku a na konci intervalu. Z grafu je zřetelné, že zima 2016/17 byla o poznání chladnější než zima předchozí. K této



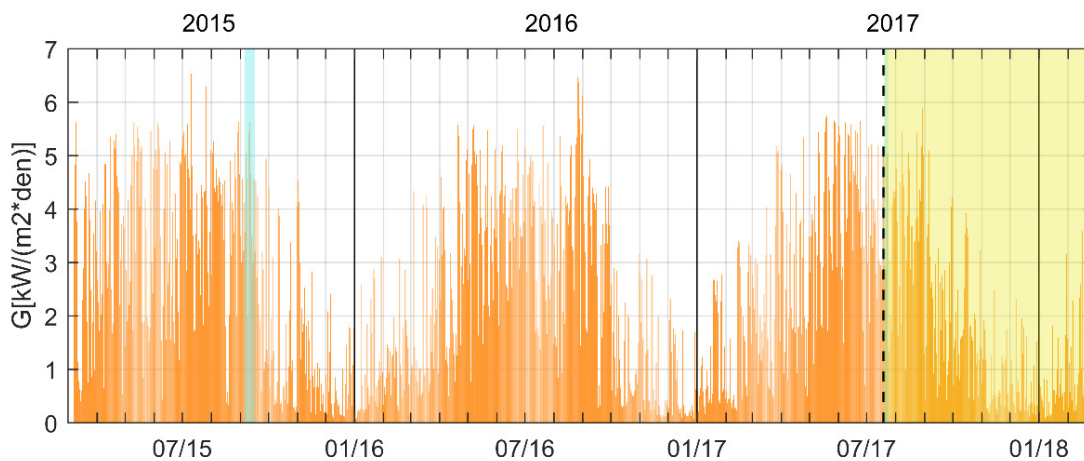
skutečnosti byla navíc po většinu zimy 2016/17 zvýšena požadovaná vnitřní teplota vzduchu na 24 °C a požadovaná relativní vlhkost vzduchu na 60 %.



Obrázek 28 - Teplota vzduchu



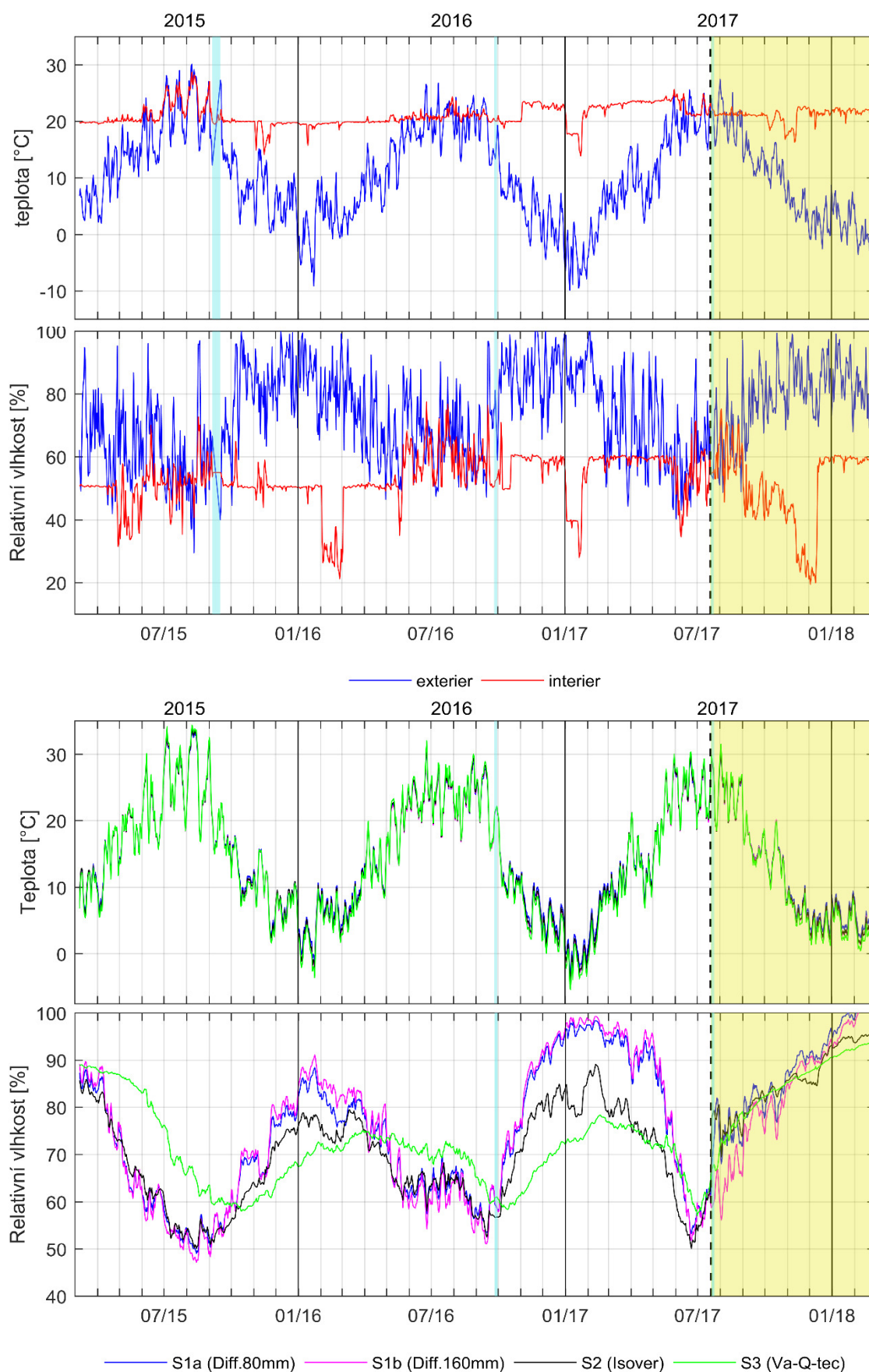
Obrázek 29 - Relativní vlhkost vzduchu



Obrázek 30 - Denní úhrny slunečního ozáření fasády



## 2.5. Vyhodnocení experimentu - Porovnání jednotlivých skladeb



Obrázek 31 – Grafy denních průměrů teploty a relativní vlhkosti vzduchu v klimatické místnosti a exteriéru a Grafy denních průměrů teploty a relativní vlhkosti na rozhraní zateplovacího systému a zdiva



Z obrázku 30 můžeme pozorovat, že rozdíly v průběhu teplot na rozhraní izolace a zdiva se mezi jednotlivými systémy výrazněji liší jen v zimním období, kdy je velký teplotní rozdíl mezi interiérem a exteriérem. Nejnižší teploty byly v těchto bodech naměřeny v lednu 2017 a to 4,2 °C u skladby S2a, 5,2 °C u skladby S2, 5,3 °C u skladby S1b a 6,2 °C u skladby S3. V době, kdy byly v těchto bodech naměřeny nejnižší teploty, byl tedy rozdíl mezi jednotlivými skladbami nejvýše 2 °C. V tomto období se teplota na rozhraní izolace a zdiva ve všech skladbách dostává i na několik dní pod bod mrazu. Při výskytu vody v této oblasti by tedy mohlo docházet k jejímu zmrznutí a následkem toho k poškození stavební konstrukce.

Z grafu průběhu relativní vlhkosti je na první pohled zřejmé, která z konstrukcí je difuzně otevřená a která naopak difuzně uzavřená. Křivky relativních vlhkostí skladeb S1 pružně reagují na okrajové podmínky, v zimním období dosahují vyšších hodnot a v zimě naopak hodnot nižších než křivka relativní vlhkosti skladby S3, která má naopak konstantnější průběh, na změny okrajových podmínek reaguje s větším časovým odstupem a rozdíl mezi letním a zimním obdobím je zhruba poloviční oproti skladbám S1.

Relativní vlhkost skladby S1b je oproti skladbě S1a v zimním období mírně vyšší, a to také vlivem nižších teplot na rozhraní izolace a zdiva. Rozdíl relativní vlhkosti je však velmi malý. Během zimního období se pohybuje jen kolem 1-2 %. I přesto, že v zimě 2016/17 dosahuje relativní vlhkost velmi vysokých hodnot, tak v celém intervalu před experimentem simulujícím větrem hnaný déšť nedochází ke kondenzaci vodní páry.

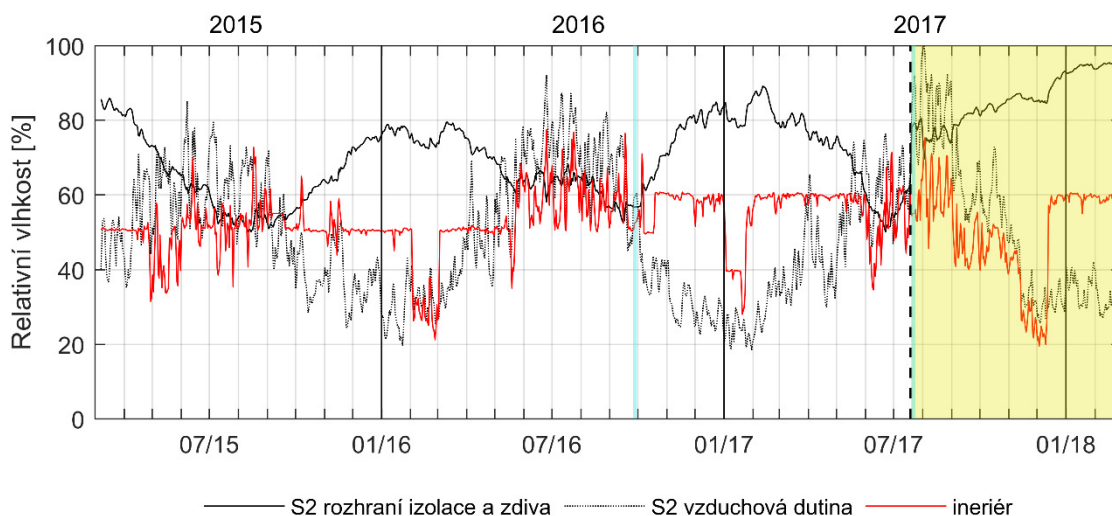
Z grafu je zřejmé, že relativní vlhkost na pomezí izolace a zdiva je u všech skladeb vyšší v zimě 2016/17, než v zimě 2015/16. Tento jev je způsoben jednak faktem, že zima 2016/17 byla o něco chladnější než v roce předchozím, ale také zvýšením relativní vlhkosti v klimatické místnosti z 50 % na 60 % a zvýšením teploty z 20 °C na 24 °C. Vlivem nízkého difuzního odporu a tím vysokého difuzního toku konstrukcí, na zvýšení relativní vlhkosti v interiéru nejvíce reagují difuzně otevřené skladby S1. Nejméně zas reaguje difuzně uzavřená skladba S3. Obdobně tomu je v letním období, kdy skladby S1 vlivem nízkého difuzního odporu vysychá jak do exteriéru, tak do interiéru, kdežto u skladby S3 je vysychání do interiéru vlivem vysokého difuzního odporu nižší a celkově pozvolnější.

Průběh křivky relativní vlhkosti skladby S2 reaguje na změny okrajových podmínek podobně pružně jako difuzně otevřený systém S1a a S1b. V letním období křivka relativní vlhkosti téměř kopíruje průběh křivek difuzně otevřených konstrukcí a v zimním období reaguje sice podobně pružně, jako křivky difuzně otevřených konstrukcí, ale zdaleka nedosahuje tak vysokých hodnot, což je pravděpodobně způsobeno onou proměnlivou difuzní tloušťkou parotěsné folie Isover Vario. V letním období, kdy je vlhkost vzduchu větší se ekvivalentní difuzní tloušťka  $S_d$  snížila (dle výrobce až na hodnotu 0,3 m [6]). Tento systém se tedy jeví jako velmi efektivní. Pro představu je na obrázku 25 zobrazen průběh relativních vlhkostí čidla v interiéru, čidla na rozhraní mezi izolací a zdivem a čidla

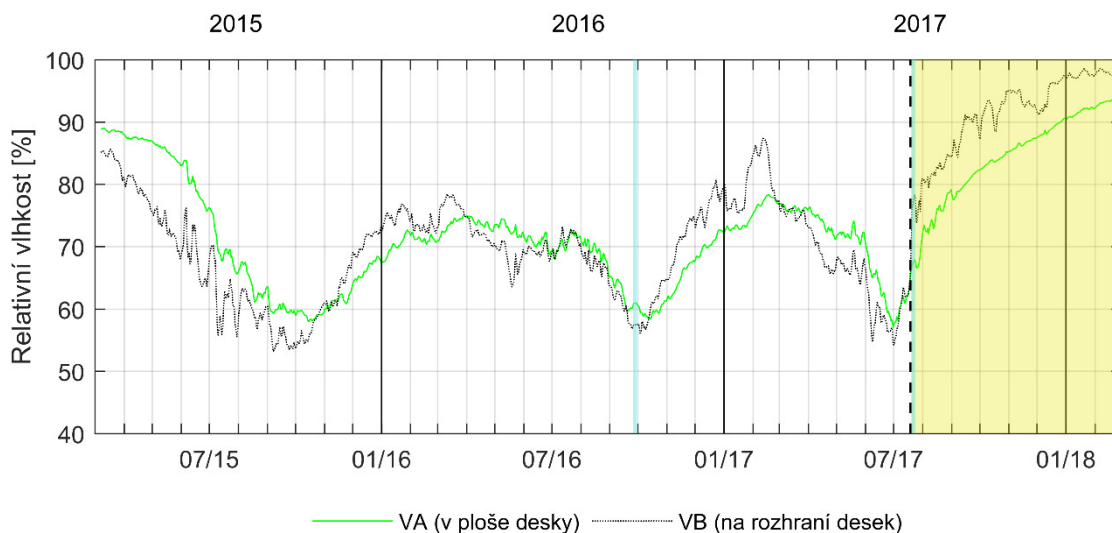




umístěného ve vzduchové dutině, tedy bezprostředně za parotěsnou fólií. Relativní vlhkost posledního jmenovaného čidla by tedy měla udávat difuzní propustnost fólie.



Obrázek 32 - Graf průběhu relativních vlhkostí čidla v interiéru a čidel ve skladbě S2



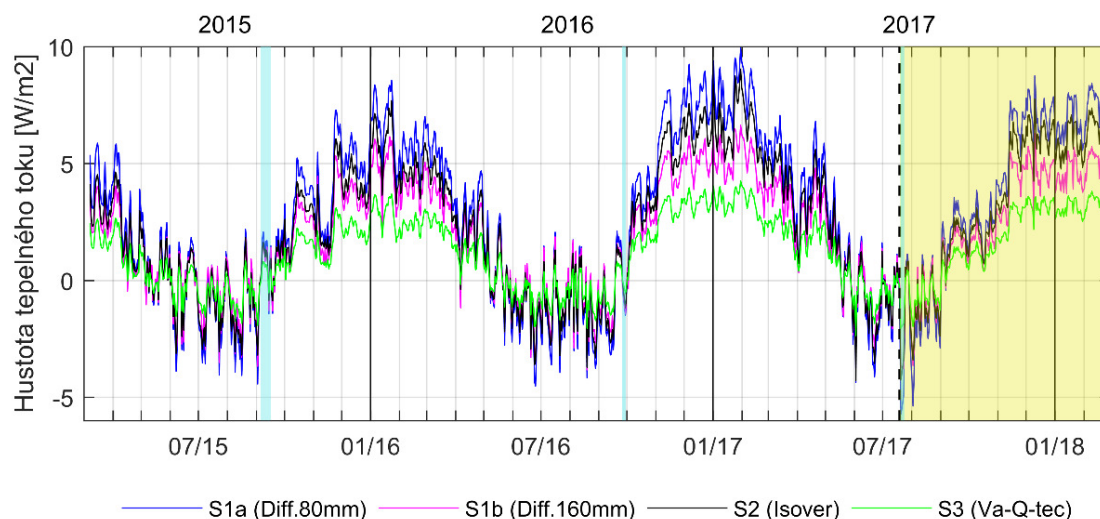
Obrázek 33- Graf denních průměrných hodnot relativních vlhkostí na pomezí zdiva a izolace u skladby S3

Graf na obrázku 33 zobrazuje relativní vlhkosti vzduchu na rozhraní vakuové izolace a zdiva jednak v místě styku vakuových panelů a jednak cca ve středu vakuového panelu viz obrázek 14. Z grafu je evidentní, že styky vakuových panelů jsou nedokonalé a že v těchto místech dochází ke zvýšenému difuznímu toku nežli v běžném místě této konstrukce. V případě dokonalých spojů vakuových panelů by difuzní propustnost skladby S3 měla být téměř nulová a relativní vlhkost na rozhraní izolace a zdiva by neměla být ovlivněna vlhkostí vzduchu v klimatické místnosti. Z obrázku 24 však můžeme vidět, že difuzní mosty vznikající na rozhraní jednotlivých panelů jsou schopny ovlivnit i průběh relativní vlhkosti uprostřed panelu. V období 02.01.2017 - 23.01.2017 byla teplota v klimatické místnosti snížena z 24 °C na 18 °C a relativní vlhkost vzduchu byla snížena z 60 % na 40 %. Teplota a relativní vlhkost vzduchu v exteriéru byla v tomto období na podobných hodnotách. V případě nulové difuzní propustnosti skladby S3 by se vlivem snížení vnitřní teploty měla nepatrně snížit i teplota na rozhraní izolace a zdiva a



relativní vlhkost by se zde měla nepatrně zvýšit. Ve skutečnosti však relativní vlhkost před tímto obdobím rostla. V průběhu tohoto období s drobnými výkyvy stagnovala a po tomto období začala relativní vlhkost opět růst.

V tomto období je také patrné, že na snížení vlhkosti v interiéru reaguje křivka relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva skladby S2 agresivněji než difuzně otevřené skladby S1. Tento jev pravděpodobně způsoben dvěma faktory. Jednak změnou difuzní propustnosti parotěsné folie ve skladbě S2 a jednak větší vlhkovou kapacitou dřevovláknité izolace oproti izolaci z minerálních vláken.



Obrázek 34 - Graf hustot tepelného toku

Z obrázku 34 lze pozorovat, že dle předpokladu nejnižší hodnoty hustoty tepelného toku vykazuje skladba S3 s vakuovou izolací, druhé nejnižší hodnoty pak skladba S1b s dřevovláknitou izolací tl. 160 mm, třetí nejnižší hodnoty skladba S2 s izolací z minerálních vláken, a naopak nejvyšší hodnoty vykazuje skladba S1a s dřevovláknitou izolací tl. 80 mm. Skladba s vakuovou izolací je opět mírně zkreslená vlivem liniových tepelných mostů vyskytujících se na styku dvou panelů. Pro představu byly spočítány náklady na vyrovnání tepelných ztrát na 1 m<sup>2</sup> za měřené období. Pro výpočet byla uvažována cena za energii 4Kč/kWh.

Skladba	typ izolantu	tepelné ztráty za měřené období	cena za vyrovnání tepelných ztrát za měřené období
[-]	[-]	[Kwh/m <sup>2</sup> ]	[Kč/m <sup>2</sup> ]
S1a	dřevovláknitá (tl. 80 mm)	68,56	274
S1b	dřevovláknitá (tl. 160 mm)	49,77	199
S2	minerální vlákna	56,78	227
S3	vakuová izolace + EPS	29,50	118

Tabulka 4 - Tepelné ztráty skladeb S1-S3

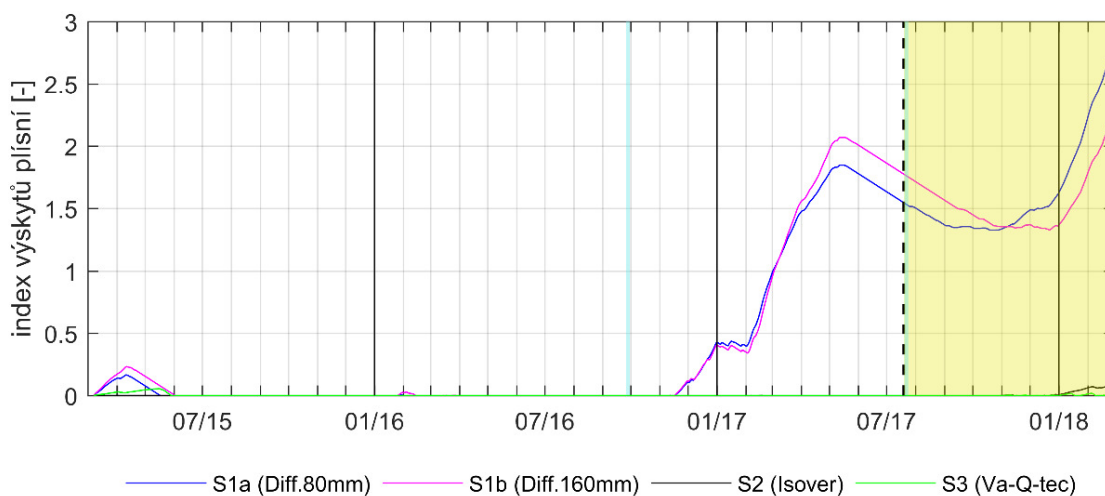


Když se porovnáme poměry o kolik jsou hustoty tepelných toků z druhé poloviny zimy 2016/17 vyšší než v druhé polovině zimy 2015/16, tak zjistíme, že poměrný nárůst hustoty tepelného toku je u skladeb S1a a S1b vyšší než u skladeb S2 a S3. Jelikož hustota tepelného toku je veličina závislá pouze na tepelném odporu konstrukce a rozdílu teplot mezi exteriérem a interiérem, který byl však pro všechny skladby stejný, lze se domnívat, že nárůst vlhkosti v konstrukcích s dřevovláknitou izolací má větší vliv na součinitel tepelné vodivosti než u ostatních skladeb.

Jedním z nepříznivých jevů způsobených zvýšenou vlhkostí v konstrukci je růst plísní. Tento jev, však není závislý pouze na vlhkosti v konstrukci, ale také na teplotě a vlastnostech materiálu, na kterém plíseň roste, a proto byl pro zobrazení rizika výskytu plísní využit matematicko-empirický výpočetní model Mold VTT, který tyto okrajové podmínky zohledňuje. Model byl vyvinutý v technickém výzkumném středisku ve Finsku a pro vyjádření rizika výskytu plísní používá stupnici MI, jenž může nabývat hodnot 0 až 6. Stupnice je blíže popsána v tabulce 5. Výpočetní model je napsán v programovacím jazyce MATLAB. Do výpočetního modelu byly zadány následující parametry: Hodinová data relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva, hodinová data teploty na rozhraní izolace a zdiva, index zohledňující úpravu materiálu (pro S1=1, pro S2 a S3=0) a index zohledňující materiál (pro S1=1, pro S2 a S3=4).

MI	Popis hodnoty indexu
0	Žádný růst
1	Malé množství plísně na povrchu (sledovatelné mikroskopem), počáteční fáze místního růstu
2	Několik místních kolonií růstu plísní na povrchu (sledovatelné mikroskopem)
3	Vizuální nálezy formy na povrchu, <10% pokrytí nebo <50% pokrytí sledovatelné mikroskopem
4	Vizuální nálezy formy na povrchu, 10 - 50% pokrytí nebo > 50% pokrytí sledovatelné mikroskopem
5	Spousta růstu na povrchu, > 50% pokrytí sledovatelné okem
6	Silný růst, pokrytí 100%

Tabulka 5 - Stupnice vyjadřující riziko výskytu plísní podle modelu Mold VTT



Obrázek 35 - Index rizika výskytu plísní na rozhraní izolace a zdiva





Z Grafu na obrázku 35 vidíme, že skladby S1 s izolací ze dřevěných smrkových vláken vykazují oproti ostatním skladbám mnohem vyšší riziko výskytu plísní. Dřevo je jako organický materiál mnohem náchylnější k růstu plísní než anorganické materiály, jako jsou čedičová vlna a polystyren. Až do roku 2017 byly hodnoty indexu růstu plísní skladeb S1 téměř nulové, jen s výjimkou počátku dubna 2015, kdy se se relativní vlhkost na rozhraní izolace a zdiva pohybovala mezi 80-90 % a s příchodem jara začala vzrůstat teplota, kdy se na krátkou dobu dostal index na hodnotu 0,25 [-], jenž ještě stále představuje zanedbatelné riziko. V prosinci 2018, kdy se hodnoty relativní vlhkosti dostávají přes 90 %, začíná index opět růst, a to navzdory velmi nízkým teplotám. V lednu 2017 hodnota indexu rizika růstu plísní stagnuje a v únoru společně se vzrůstající teplotou začíná index opět růst. Společně s květnovým intenzivním vysycháním konstrukce se index zastaví, a to na hodnotě 2,05 [-] u skladby S1b a 1,8 [-] u skladby S1a. Poté začíná index zas klesat. Je však patrné, že klesající trend je mnohem pozvolnější než trend vzrůstající. Lze se tedy domnívat, že i kdyby nedošlo 19.7.2017 ke skrácení fasády vodou, tak by se index rizika výskytu plísní u těchto skladeb nestihl do dalšího jara dostat na nulové hodnoty a riziko výskytu plísní by se tak mohlo s dalšími roky zvyšovat. Tomu také nasvědčuje vzájemná porovnání křivek S1a a S1b. Skladba s tl. izolace 80 mm měla na počátku roku 2017 mírně vyšší hodnoty, což bylo způsobené vyšší teplotou na rozhraní izolace a zdiva. Poté co teploty na jaře stoupli, tak se projevila mírně vyšší relativní vlhkost na rozhraní izolace a zdiva u skladby s tl. izolace 160 mm a hodnoty MI začali růst rychleji než u skladby S1a. Na přelomu května a června dochází k vyrovnání rozdílů teploty i relativní vlhkost na rozhraní izolace a zdiva mezi skladbami S1a a S1b. Rozdíl mezi indexy rizika výskytu plísní však zůstává stejně vysoký, jako tomu bylo v polovině května, kdy byla naměřena maxima v tomto roce. S přihlédnutím na množství ušetřené energie skladby S1a oproti skladbě S2b, rozdíl ušetřené energie neodpovídá rozdílu rizika výskytu plísní.

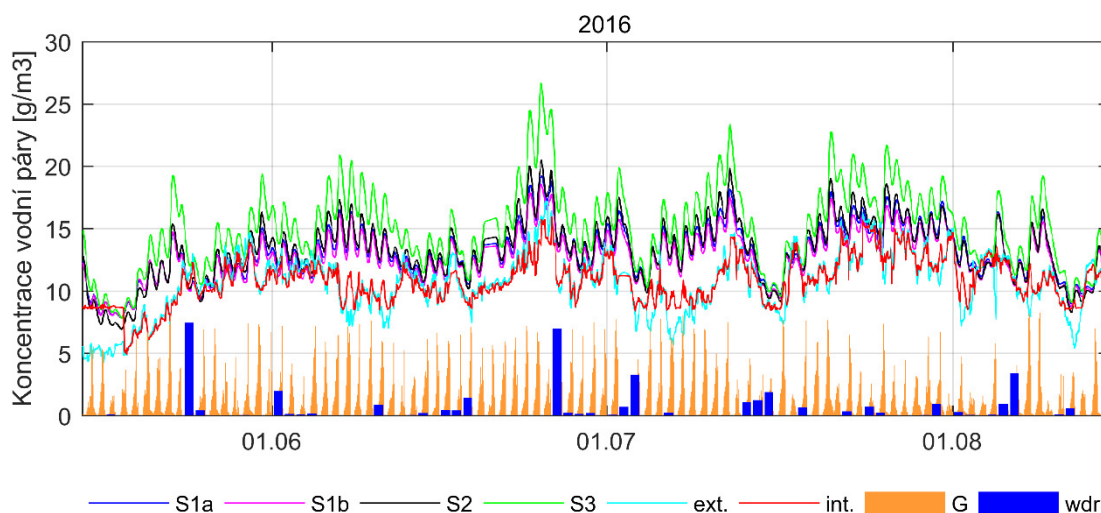
System S3 díky nízkým hodnotám relativní vlhkosti v průběhu celého roku a faktu, že se jedná o materiál odolávající růstu plísní lépe než dřevo, vykazuje po celou dobu experimentu hodnotu MI rovnu 0 [-]. Výjimkou je pouze jaro 2015, kdy je pravděpodobně v systému ještě zvýšená vlhkost vlivem mokrého procesu při výstavbě (lepení vakuových desek pomocí lepidla na zeď) a teploty se zde pohybují mezi 10-20 °C.

System S2 i přes vyšší relativní vlhkosti v průběhu zimního období vykazuje v intervalu před kropicím experimentem pro MI hodnotu 0 [-].

Je obecně známo, že vlhkost se šíří z místa vyšší koncentrace do místa nižší koncentrace. V případě, kdy je v interiéru i exteriéru nižší koncentrace vodní páry, než je v konstrukci, mělo by docházet k difuznímu toku směrem z konstrukce, dokud nedojde k vyrovnání jejich koncentrací. Při pohledu na obrázek 36, ale vidíme, že většinu léta je koncentrace vodní páry na rozhraní izolace a zdiva vyšší, než jsou hodnoty koncentrace vodní páry vzduchu v interiéru a exteriéru. I přesto, že se tyto hodnoty během léta několikrát vyrovnají, tak stejně po tomto období následuje zvýšení koncentrace vodní páry na rozhraní izolace a zdiva oproti vzduchu v exteriéru a interiéru. Musí zde tedy být další zdroj vlhkosti než jen vzdušná vlhkost. Pravděpodobně se jedná o vlhkost z větrem



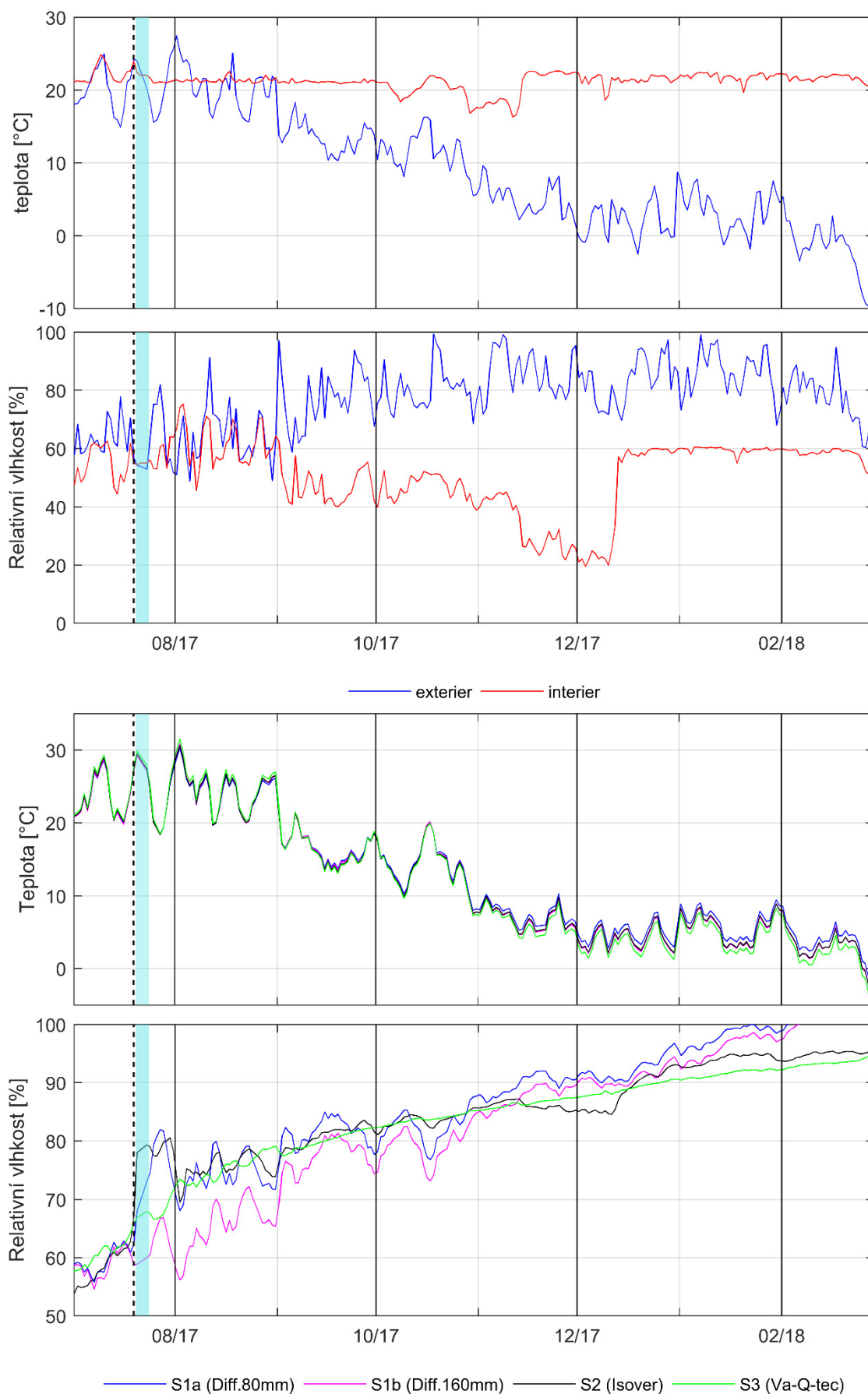
hnaného deště dopadajícího na fasádu. Z obrázku 36 je patrné, že průběhy koncentrace vodní páry korelují s množstvím slunečního ozáření fasády. Jedním z možných vysvětlení je, že ve vnější části zdiva je následkem větrem hnaného deště zvýšená vlhkost a když se vlivem solárního ozáření tato část zdiva ohřeje, tak zde dochází k vyššímu odparu a vlhkost je difuzí hnána směrem do interiéru. V noci se tato část zdiva zas ochladí a difuzní tok se obrátí. Tomuto vysvětlení nasvědčuje i fakt, že hodnoty průběhu koncentrací vodní páry na rozhraní izolace a zdiva pro difuzně uzavřený systém s vakuovými panely S3 nabývají vyšších hodnot než u ostatních systémů. Vodní pára poháněná slunečním zářením na rozhraní izolace a zdiva zde narazí na parotěsnou bariéru, kdežto v případě ostatních systémů se část této vlhkosti pokračuje dál do interiéru. Nebyl však vyzorována závislost výše hodnot na koncentraci vodní páry na úhrnu větrem hnaného deště. Důvodem pravděpodobně bude, že reakce přicházejí s větším časovým odstupem.



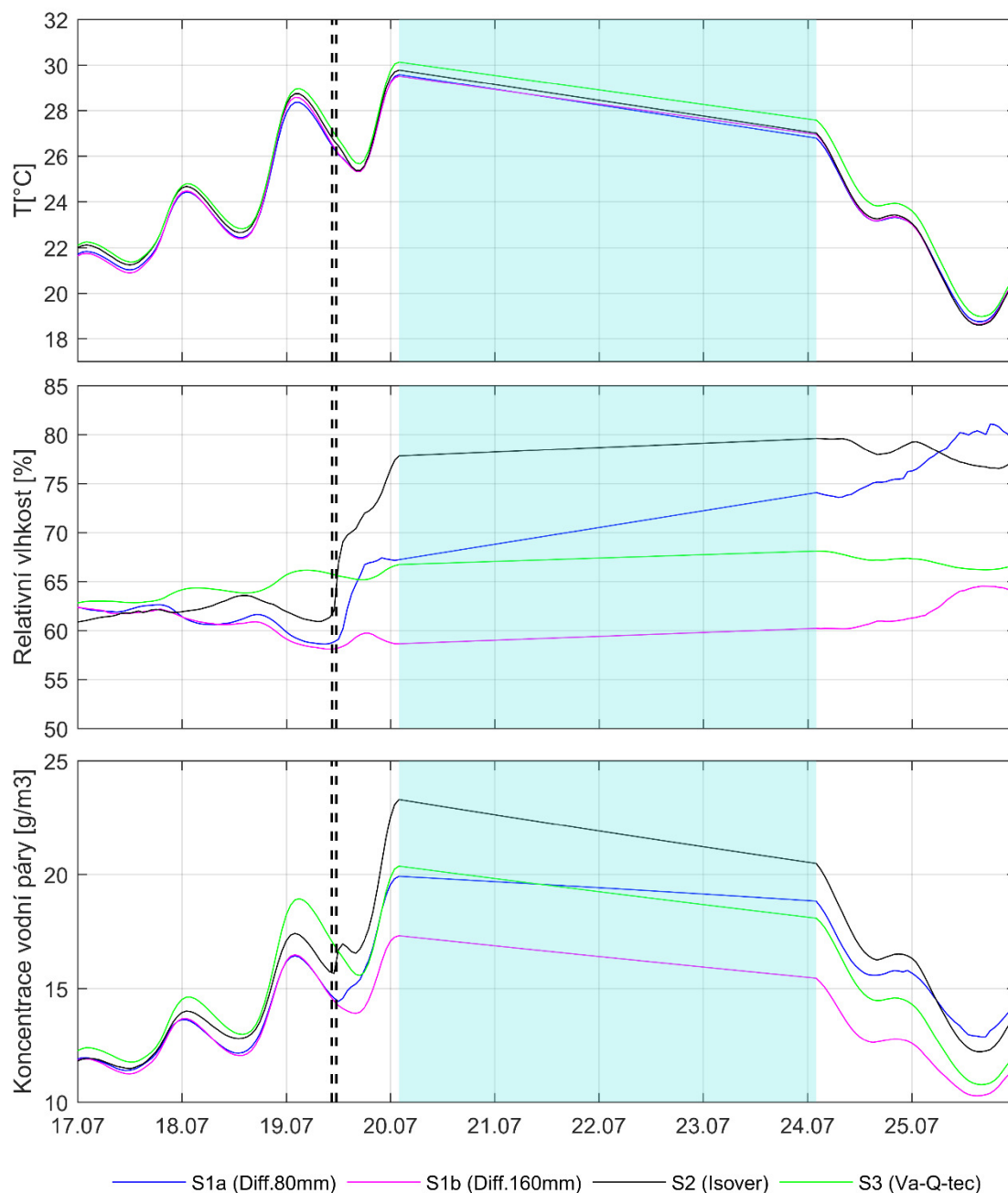
Obrázek 36 - Graf průběhu horninových hodnot koncentrací vodní páry na rozhraní izolace a zdiva, resp. vzduchu v interiéru a exteriéru. Pozn.: hodnoty G a wdr jsou bezrozměrné veličiny (G jsou hodinové úhrny slunečního ozáření fasády a wdr větrem hnaný déšť dopadající na fasádu)

## 2.6. Vyhodnocení experimentu větrem hnaného deště

Průběh teploty a vlhkosti vzduchu jsou vyjádřeny pomocí denních průměrů přepočítaných z hodinových hodnot. Množství slunečního záření je zas vyjádřeno jako denní úhrn z hodinových hodnot. Svislou černou přerušovanou čarou je znázorněna doba, kdy došlo k průběhu experimentu, který simuloval větrem hnaný déšť. Modrou plochou je znázorněn výpadek čidel (doba kdy čidla nezaznamenala žádná data, nebo zaznamenala na první pohled nereálné hodnoty) větší jak 48 hodin. Data pro toto období byla buďto nahrazena daty z meteorologické stanice umístěné v blízkosti experimentální fasády, nebo data vznikla interpolací ze známých hodnot na začátku a na konci intervalu.



Obrázek 37 - Grafy denních průměrů teploty a relativní vlhkosti vzduchu v klimatické místnosti a exteriéru a Grafy denních průměrů teploty a relativní vlhkosti na rozhraní zateplovacího systému a zdiva



Obrázek 38 - Grafy hodinových hodnoty teploty, relativní vlhkosti a koncentrace vodní páry na rozhraní zateplovacího systému a zdiva

Bohužel v době od 20.7.2017 do 24.7.2017 došlo k výpadku čidel, a tak z této doby nemáme žádná naměřená data.

Na základě grafu relativní vlhkosti vzduchu na rozhraní izolace a zdiva, můžeme konstatovat, že nejpružněji na skropení fasády reagovala skladba S2 s parotěsnou fólií s proměnlivou difúzní tloušťkou. Relativní vlhkost zde vrostla z 62 % na 78 % ještě před výpadkem čidel, tedy během prvních 12ti hodin po provedení experimentu. Reakci na kropící experiment můžeme patrně sledovat i v grafu zobrazující průběh teplot. Druhou nejpružněji reagující skladbou byla skladba S1a, která měla v momentě začátku experimentu na rozhraní izolace a zdiva relativní vlhkost rovnu 59 % a před výpadkem



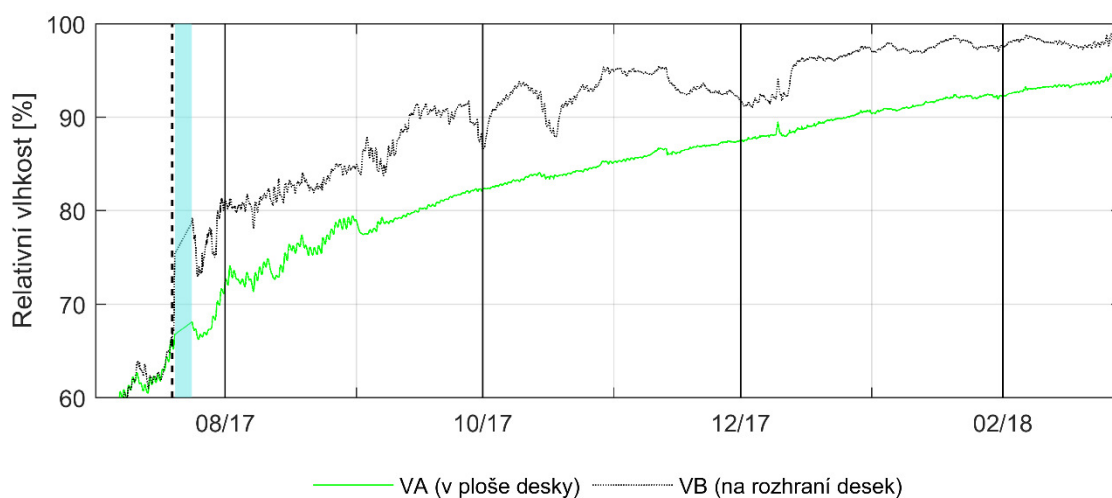
čidel konstrukce 67,5 %. Ve zbylých dvou skladbách se před výpadkem čidel experiment nějak výrazněji neprojevil. Při srovnání dat před výpadkem a po výpadku čidel, můžeme pozorovat, že si skladby S1b a S2 zachovaly oproti skladbám S1a S3 zvýšené hodnoty relativní vlhkosti. Lze se tedy domnívat, že se experiment u těchto čidel takto výrazně neprojevil ani v době výpadku.

Fakt, že se experiment v krátkodobém pohledu nejvíce projevil na skladbě S2 a S1a mnohem více, než na difuzně uzavřené skladbě S3 a že se experiment v krátkodobém pohledu projevil zcela odlišně na skladbě S1a a S1b, které se liší pouze v tloušťce dřevovláknité desky, je zcela odlišný od toho, co se od experimentu očekávalo. To to nepředpokládané chování lze pravděpodobně vysvětlit pouze nehomogenitou zdiva.

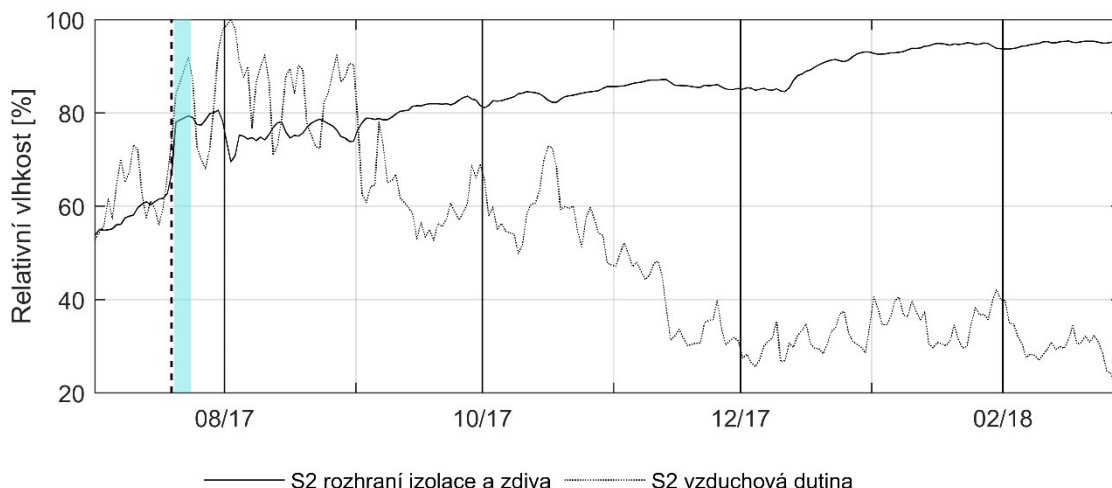
Vliv experimentu na vlhkostních chování jednotlivých konstrukcí v dlouhodobém měřítku není jednoduché posoudit. Na obrázku 37 sice vidíme, že relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva mají po experimentu dlouhodobě rostoucí charakter, který je ale také do jisté míry ovlivněn klesající teplotou v exteriéru, a to především od začátku zří. Na druhou stranu při srovnání s relativních vlhkostí v předchozích letech a přihlédnutí k tomu, že od začátku června do necelé půlky prosince v klimatické místnosti bylo vypnuté vlhčení, se lze domnívat, že na rostoucí vlhkost má také velký podíl experiment simulující větrem hnaný déšť.

Relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva u všech skladeb postupně v období od konce listopadu do konce prosince překračují hodnoty 90 %. U difuzně otevřených skladeb S1a a S1b na začátku února dosahují hodnoty rosného bodu a dochází zde ke kondenzaci.

Na obrázku 39, kde je graf porovnávající čidlo umístěné na rozhraní desek z vakuové izolace a čidlo, které je umístěno uprostřed desky, můžeme vidět další neočekávané chování skladby S3. Navzdory tomu, že čidlo VB umístěné na rozhraní desek je v místě s vyšší difuzní propustností směrem do interiéru oproti čidlu VA umístěném uprostřed desky, čidlo VB reaguje na skrápění fasády mnohem agresivně než čidlo VA. Toto chování je taktéž připisováno nehomogenitě zdiva.

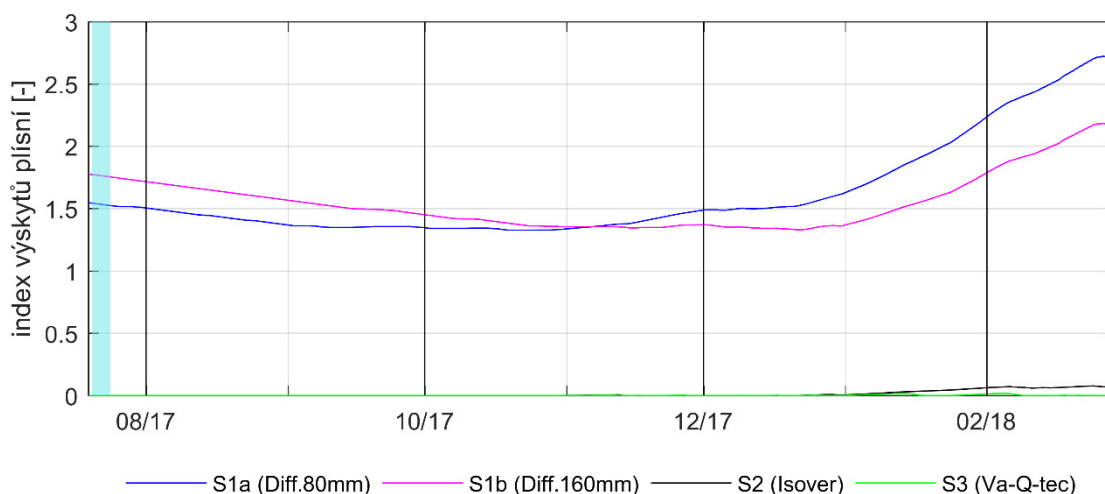


Obrázek 39 - Graf hodinových průměrných hodnot relativních vlhkostí na pomezí zdiva a izolace u sklady S3



Obrázek 40 – Graf průběhu relativních vlhkostí ve skladbě S2

Na obrázku 40 můžeme pozorovat, že na přelomu července srpna, tedy skoro dva týdny po experimentu, ve skladbě S2 dochází ve vzduchové dutině ke kondenzaci vody. Vlhkost už je v této době více rozdělována v širším profilu zdiva a přichází několik dní s vysokým úhrnem slunečního ozáření. Zdivo se více prohřeje dochází k výparu a tím k zvýšení parciálního tlaku vodní páry ve vnější části zdi a tím je podpořen transport vodní páry difuzí směrem k interiéru. Poté co vodní pára projde minerální vatou, za kterou je nižší teplota, než je teplota rosného bodu pro vzduch s takovou koncentrací vodní páry, a nastává kondenzace. Na křivce průběhu relativní vlhkosti se to projeví jako pokles, jednak z důvodu vyšší teploty, a jednak z důvodu snížení množství vodní páry obsažené ve vzduchu vlivem její kondenzace.



Obrázek 41 - Index rizika výskytu plísní na rozhraní izolace a zdiva

Z obrázku 41 je není patrné, že z pohledu indexu rizika růstu plísní se experiment projevil na konstrukci S2 a S3, které se lednu dostávají nad nulové hodnoty.





### 3. Tepelně vlhkostní simulace experimentu

Díky výpočetním softwarům pro dynamické modelování šíření tepla, vlhkosti a energie v dnešní době není nutné pro získání informací o šíření tepla a vlhkosti ve stavebních konstrukcích vytvářet skutečný model konstrukce osazený velkým množstvím čidel. Jednak je tento způsob cenově velmi nákladný, ale v případě potřeby získat informací z delšího období, také časově náročný.

Pro získání informací o tom, jak by se dané skladby chovali v jiných meteorologických podmínkách nebo s jinými materiálovými vlastnostmi zdiva či omítkového souvrství, můžeme využít výpočetního softwaru. V případě využití výpočetního softwaru zas ale narážíme na problém s nepřesností získaných informací a nevědomostí o tom s jakou nepřesností jsme dané informace získaly. Hlavním důvodem nepřesnosti výsledků výpočetního softwaru většinou není nepřesnost výpočtu, ale nepřesnost vstupních údajů zadávaných do softwaru. Z těchto důvodů byl nejdříve vytvořen počítačový model konstrukcí S1-S3 a simulace tepelně vlhkostního chování těchto konstrukcí v době od 07.03.2015 do 30.09.2017. Simulace byly vytvořeny pouze do data 30.09.2017, protože v době, kdy byly vytvářeny, tak ještě nebyly k dispozici novější data z čidel reálného experimentu a nebylo tedy možné vytvořit okrajové podmínky pro simulace. Data ze simulace pak byla následně porovnána s daty z reálného modelu a byla stanovena nepřesnost s kterou se experiment podařilo zopakovat.

#### 3.1. Obecně o použitém softwaru

Pro výpočet byl využit výpočetní software WUFI Pro vyvinutý ve Fraunhofer-Institutu für Bauphysik (IBP) v Německu. Software umožňuje velmi přesně modelovat dynamické jednorozměrné šíření tepla, vlhkosti a energie ve stavebních konstrukcích a materiálech [13].

#### 3.2. Obecné nastavení modelu

Vzhledem k opakovaným simulacím za účelem úprav vstupních údajů, byl zvolen hodinový krok výpočtu. Výpočetní interval byl od 07.03.2015 00:00 do 30.09.2017 00:00. Způsob výpočtu byl nastaven na zohlednění transportu tepla a vlhkosti. Pro tepelnou vodivost bylo nastavena závislost na teplotě a vlhkosti. Numerické parametry byly nastaveny na vyšší přesnost a adaptivní konvergenci. Součinitele přestupů tepla byly nastaveny na hodnotu 0,0588 m<sup>2</sup>K/W pro vnější povrch a 0,125 m<sup>2</sup>K/W pro vnitřní povrch. Hloubky monitorovacích pozic byly odhadnuty na základě fotodokumentace z realizace experimentu.

#### 3.3. Klimatické okrajové podmínky

Do softwaru byly v hodinových hodnotách zadány následující okrajové podmínky: Relativní vlhkost interiéru [%], Teplota interiéru [°C], Relativní vlhkost exteriéru [%], Teplota exteriéru [°C], Intenzitu slunečního záření [W/m<sup>2</sup>] a Množství větrem hnaného deště [mm/m<sup>2</sup>]. S výjimkou větrem hnaného deště se jednalo o data měřená přímo



v probíhajícím experimentu. V případě exteriérových dat byla pro obě testovací pole použita data z čidla číslo 3. V případě interiérových dat byla použita zvlášť data pro pole se skladbami S1a-S1b a zvlášť pro pole se skladbami S2-S3. Klimatická místnost je osazena dvěma čidly pro měření relativní vlhkosti vzduchu a teploty vzduchu. Jedna dvojice čidel je instalována na jižní straně klimatické místnosti a druhá na severní. Pro pole se skladbami S2-S3 byla použita data z jižní dvojice čidel a pro pole se skladbami S1a-S1b, které se nachází v prostředku mezi těmito čidly, byly použity průměrné hodnoty vytvořené z dat čidel jižních a čidel severních. V intervalech, kde došlo k výpadku dat menších jak 48 hodin, byly hodnoty interpolovány. V datech z interiéru byly hodnoty interpolovány i v případě výpadku delším jak 48 hodin. V intervalech s výpadky exteriérových dat delších jak 48 hodin, byla data nahrazena daty z blízké meteorologické stanice.

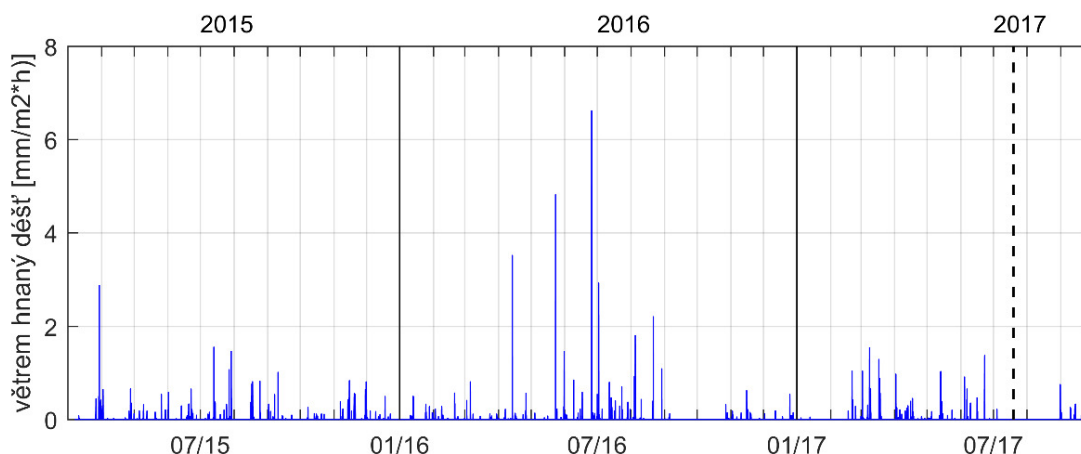
Množství větrem hnaného deště dopadajícího na experimentální fasádu nebylo během experimentu přímo měřeno. Na základě hodnot rychlosti větru [m/s], relativního směru větru vůči severu [°] a úhrn srážek [mm/m<sup>2</sup>] zaznamenaných jihozápadní meteorologickou stanicí a na základě znalosti hodnoty natočení experimentální fasády vůči severu byl proveden výpočet, kterým byl stanoven hrubý odhad množství větrem hnaného deště dopadající na experimentální fasádu. V datech úhrnu srážek z meteorologické stanice byly započítány i sněhové srážky, které bylo nutné před výpočtem vyselektovat. Vyřazení sněhových srážek proběhlo zjednodušeným způsobem a to tak, že všechna srážková data odpovídající exteriérové teplotě vzduchu menší než 1 °C byla vyřazena.

Výpočetní vztahy použité pro výpočet větrem hnaného deště na experimentální fasádu:

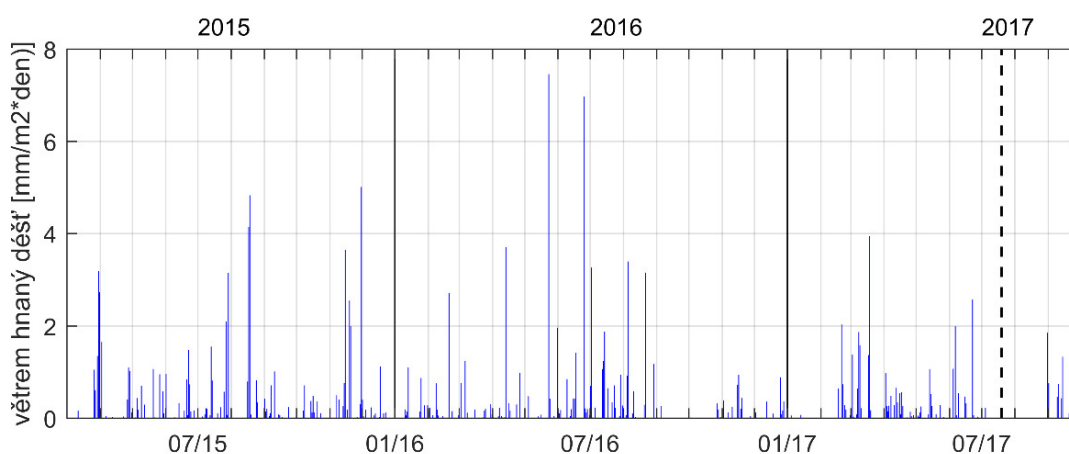
$$wdr = cr \cdot \left(\frac{1}{V_t}\right) \cdot \cos(\theta) \cdot w_s \cdot r \quad [mm/(m^2 \cdot h)]$$

$$V_t = -0,16603 + (4,91884 \cdot \Phi) - (0,888016 \cdot \Phi^2) + (0,054888 \cdot \Phi^3) \quad [m/s]$$

Kde  $wdr$  [mm/m<sup>2</sup>h] je intenzita větrem hnaného deště,  $cr$  [-] součinitel vlivu geometrie budovy (uvažována hodnota 0,5),  $V_t$  [m/s] je koncová rychlost vodní kapky v bezvětrí,  $\Phi$  [mm] je ekvivalentní průměr dešťové kapky (uvažováno  $\Phi=r^{0,232}$ ),  $\theta$  [rad] úhel odklonu směru větru od fasády,  $w_s$  [m/s] je průměrná rychlost větru a  $r$  [mm/m<sup>2</sup>h] je intenzita deště na horizontální rovinu [14].



Obrázek 42 - Graf vypočtených hodnot větrek hnaného deště na experimentální fasády (hodinové úhrny)



Obrázek 43 - Graf vypočtených hodnot větrek hnaného deště na experimentální fasády (denní úhrny)

Z grafů je patrné, že fasády jsou poměrně často vystaveny větrek hnanému dešti, avšak většinou se jedná o dešť menší jak  $1 \text{ mm/m}^2 \cdot \text{den}$ . Dále můžeme vidět, že v grafech v době, kdy byl proveden experiment simulující větrek hnaný dešť není definován žádná hodnota zatížení větrek hnaným deštěm. Je tomu tak úmyslně a to proto, abychom z rozdílu dat skutečného experimentu a dat ze simulace získali bližší představu o tom, jaký měl kropící experiment vliv na tepelně vlhkostní stav jednotlivých konstrukcí.

### 3.4. Materiálové vlastnosti

Materiálové charakteristiky byly nejprve stanoveny na základě dat z technických listů výrobců materiálů. V Případě, že výrobce danou materiálovou charakteristiku v technických listech výrobku neudával, nebo nebyl znám přesný výrobce daného materiálu, tak byla použita data materiálu z knihovny WUFI. Materiálové charakteristiky byly po porovnání výsledků počítačové simulace s daty z reálného modelu postupně drobně upravovány, tak aby se data z čidel co nejvíce shodovala. Před úpravou materiálové charakteristiky v modelu, bylo vždy nejdříve pečlivě zváženo, zda může daná materiálová charakteristika reálně nabývat těchto hodnot. Počáteční teplota na počátku



simulace byla nastavena konstantní v celém průřezu a to hodnoty 7 °C. Výsledné materiálové charakteristiky jsou zobrazeny v příloze tabulkách v příloze 1.

Všechny použité hodnoty materiálových charakteristik, jsou hodnoty pro dané materiály obvyklé, s výjimkou vakuových desek. Obvyklá hodnota faktoru difuzního odporu vakuových panelů je hodnota blíží se nekonečnu. Tato hodnota však platí pro materiál v běžném průřezu a nezahrnuje vliv spár. V případě použití pro charakteristiku plochy větší než, je jeden panel, je nutné vliv těchto spár započítat. Ekvivalentní faktor difuzního odporu byl tedy pro vrstvy vakuového panelu vypočítán pomocí níže uvedeného výpočetního vztahu.

$$\mu_{ekv} = \frac{A_1 + A_2}{\frac{A_1}{\mu_1} + \frac{A_2}{\mu_2}} \quad [-]$$

Kde  $\mu_{ekv}$  [-] je ekvivalentní faktor difuzního odporu charakteristického 1 m<sup>2</sup> vrstvy zohledňují spáry nehomogenitu materiálu,  $A$  [m<sup>2</sup>] je plocha zabírající materiál v charakteristickém 1 m<sup>2</sup> vrstvy a  $\mu$  [-] je faktor difuzního odporu daného materiálu. Pro vakuovou izolace byla uvažována hodnota  $\mu = 1\,000\,000$  [-], pro EPS  $\mu = 50$  [-] a pro spáru  $\mu = 1$  [-]. Plocha spáry v charakteristickém 1 m<sup>2</sup> byla na základě fotodokumentace z realizace uvažována 0,004 m<sup>2</sup>, tedy 4 m dlouhá spára šířky 1 mm. Vypočtená hodnota ekvivalentního faktoru difuzního odporu charakteristického 1 m<sup>2</sup> pro vakuovou desku byla rovna 250 [-] a pro EPS 43 [-].

### 3.5. Porovnání simulace s měřenými údaji

V následujících grafech jsou porovnány průběhy naměřených data z jednotlivých čidel, které jsou reprezentovány modrou čarou, s průběhy dat získaných ze simulací, které jsou reprezentovány hnědou čarou. Růžovou čarou je grafech zobrazena nepřesnost, s kterou se podařilo průběh napodobit. Přesněji se jedná o rozdíl mezi reálnými daty a simulací, který vznikl odečtením dat ze simulace od reálných dat z experimentu. Dále je stejně jako v předchozích grafech svislou černou přerušovanou čarou znázorněna doba, kdy došlo k průběhu experimentu, který simuloval větrem hnaný déšť. Modrou plochou je znázorněn výpadek čidel (doba kdy čidla nezaznamenala žádná data, nebo zaznamenala na první pohled nereálné hodnoty) větší jak 48 hodin. Data z reálné konstrukce v tomto intervalu jsou získána interpolací ze známých hodnot na začátku a na konci intervalu. Data z tohoto intervalu jsou získána výpočtem softwaru na základě okrajových podmínek získaných na nahrazení dat z meteorologické stanice umístěné v blízkosti experimentální fasády, nebo dat vzniklý interpolací. V každém případě se jedná o intervaly, kde je výpočet založen na více, či méně nepřesných okrajových podmínkách. Hodnoty v grafech jsou vyjádřeny pomocí denních průměru přepočítaných z hodinových hodnot.



Pod grafickým vyjádřením každé skladby je také tabulka s numerickým vyjádřením, s jakou přesností se experiment podařilo zopakovat. Jedná se průměrnou hodinovou odchylku vypočtenou pomocí následujícího vztahu:

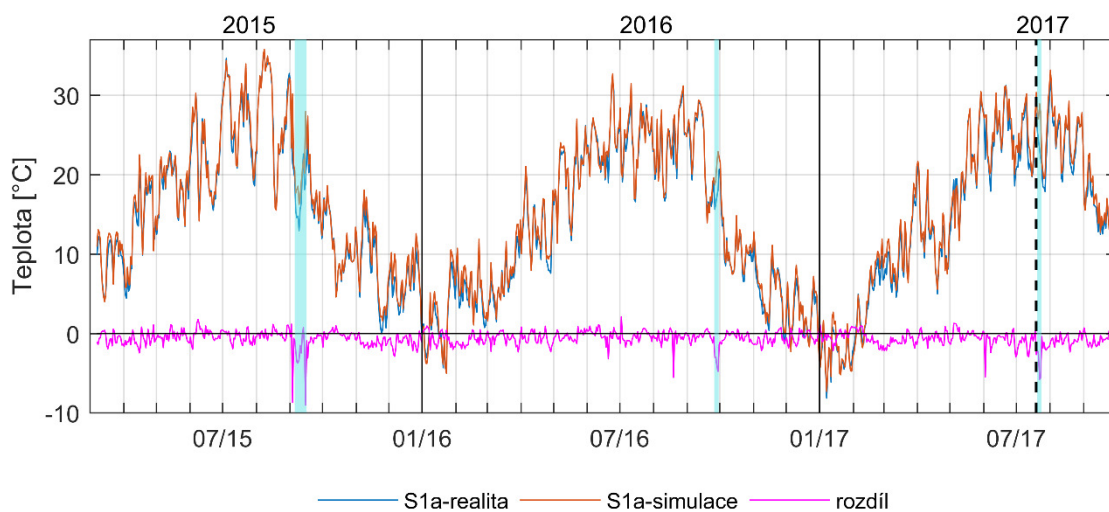
$$D_{diff} = \frac{\sum^n |D_r - D_s|}{n} \quad [-]$$

Kde  $D_{diff}$  je průměrná hodinová nepřesnost, s kterou se podařilo experiment zopakovat,  $D_r$  jsou hodinová data z reálného experimentu,  $D_s$  jsou hodinová data ze simulace a  $n$  je počet hodin experimentu (22 512).

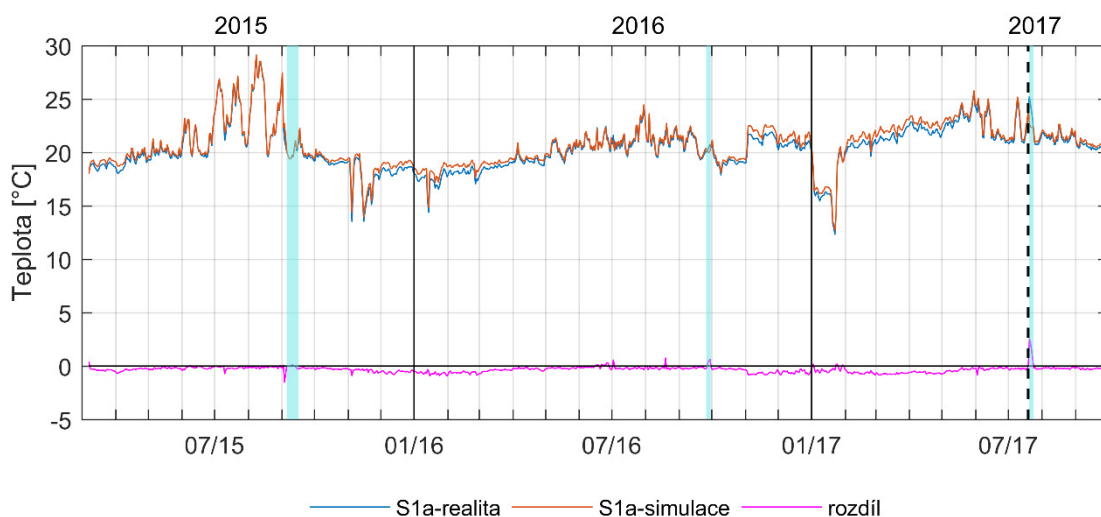
Do numerického vyjádření nepřesnosti nejsou započítána data z intervalu výpadku čidel delších jak 48 hodin a data po experimentu simulujícím větrem hnaný déšť.



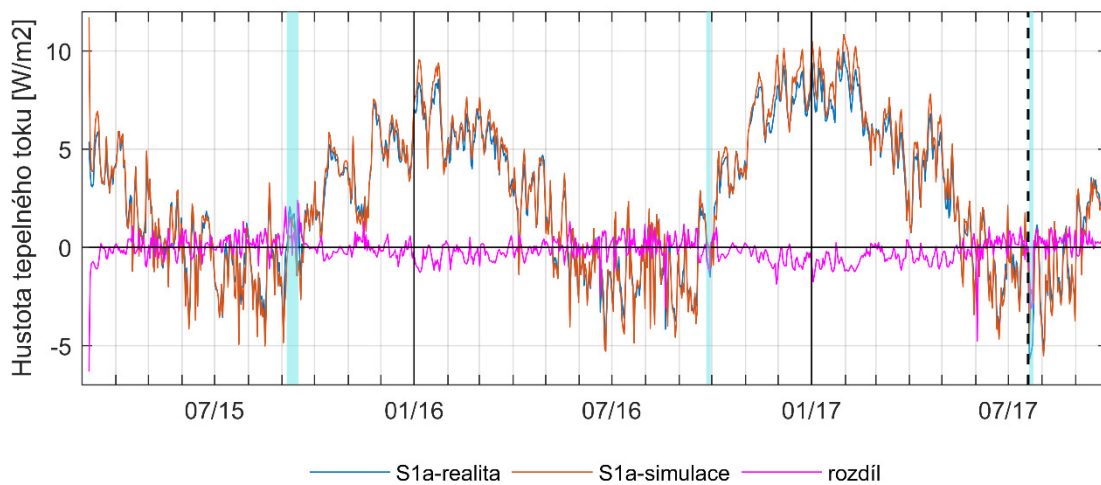
### 3.5.1. Skladba S1a - UdiIN RECO 80 mm



Obrázek 44 – Graf průběhu teplot S1a.Tpe - čidlo v exteriérové omítce

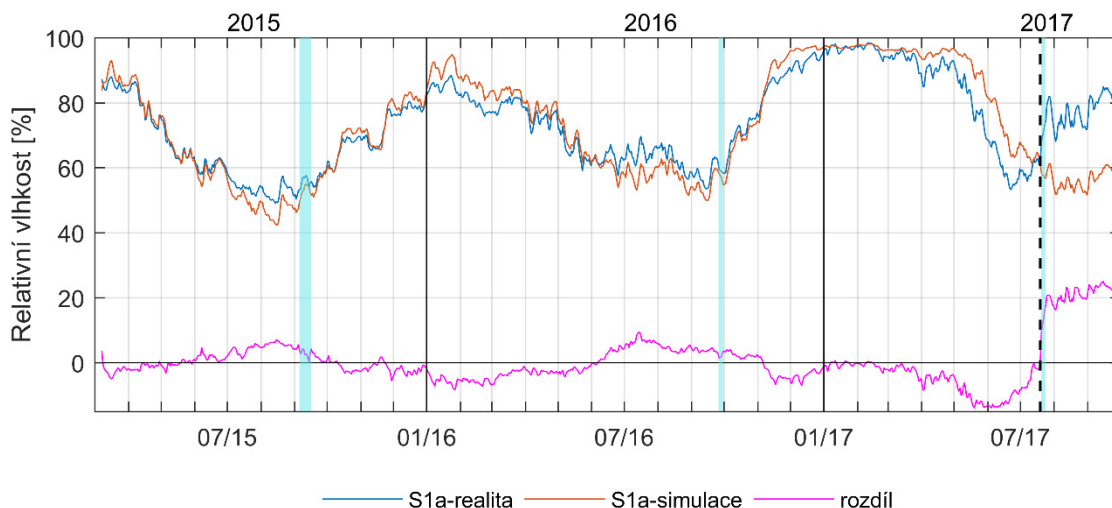


Obrázek 45 – Graf průběhu teplot S1a.Tpi - čidlo v interiérové omítce

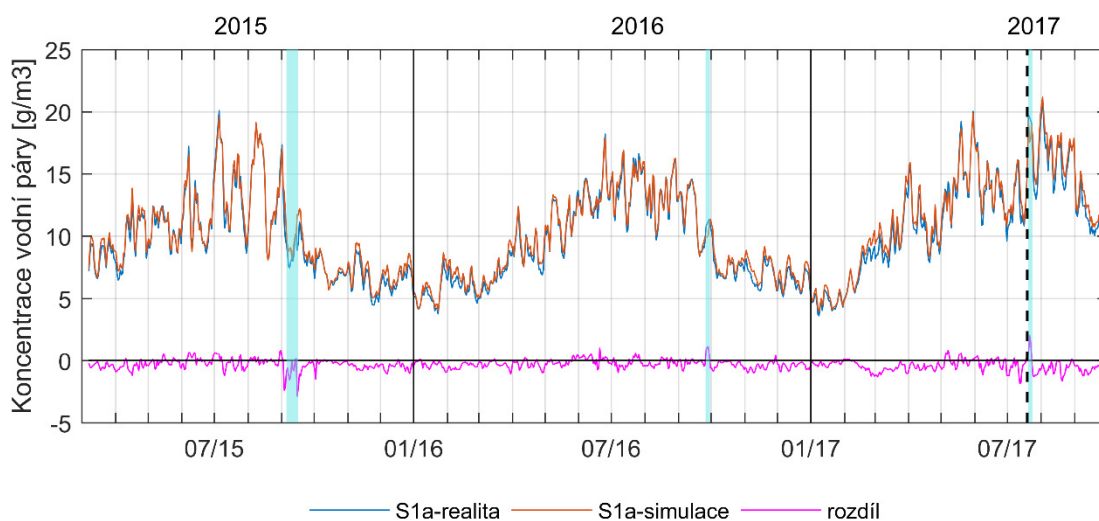


Obrázek 46 – Graf průběhu hustoty tepelného toku S1a.q – celá konstrukce

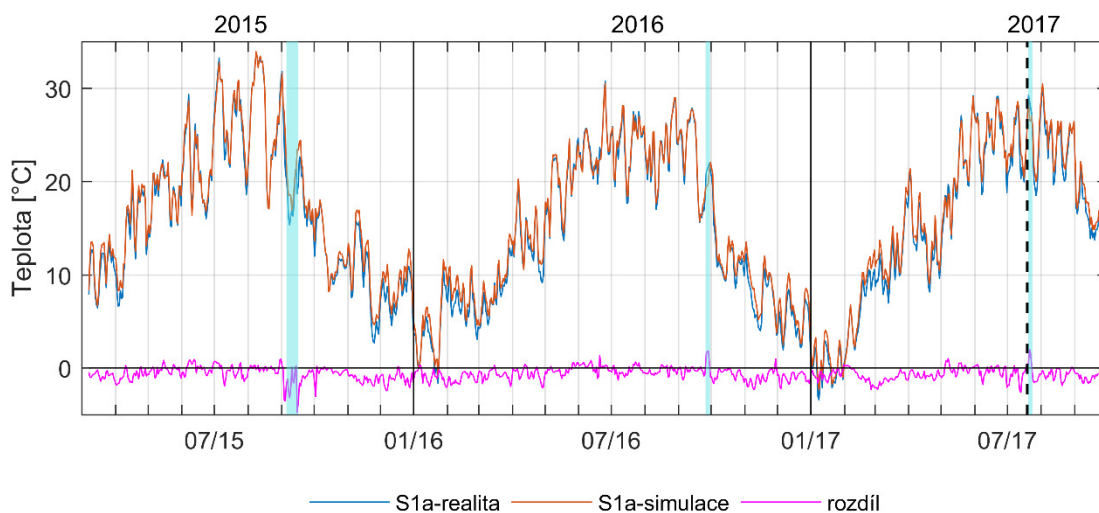




Obrázek 47 – Graf průběhu relativní vlhkosti S1a.RH1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva



Obrázek 48 – Graf průběhu koncentrace vodní páry S1a.v1 – čidlo na rozhraní izolace a zdiva



Obrázek 49 – Graf průběhu teplot S1a.T1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva



S1a.Tpe	S1a.Tpi	S1a.q	S1a.RH	S1a.v	S1a.T
[°C]	[°C]	[W/m <sup>2</sup> ]	[%]	[g/m <sup>3</sup> ]	[°C]
0,81	0,37	0,45	3,67	0,41	0,74

*Tabulka 6 - Průměrné odchylky čidel skladby S1a vypočtené z hodinových dat (bez dat z intervalu následujícím po experimentu simulujícím větrem hnaný déšť)*

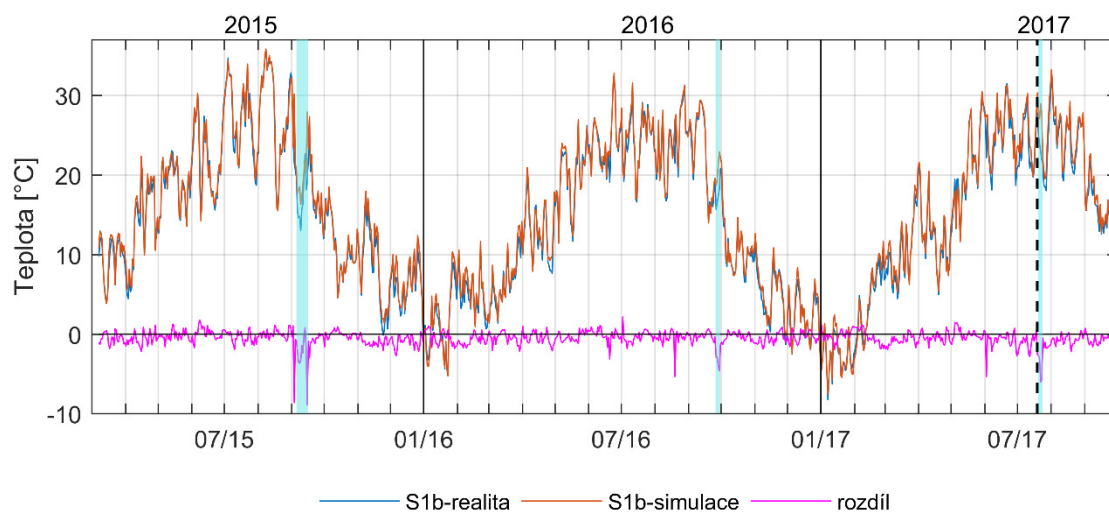
Z grafu průběhu teplot na čidle umístěném ve vnitřním omítkovém souvrství můžeme v zimním období sledovat zvýšený rozdíl mezi daty ze simulace a daty z reálného experimentu. Data ze simulace zde nabývají vyšších hodnot, a to zhruba o 1 °C. Tento jev je patrně způsoben nerovnoměrnou distribucí teplého vzduchu v klimatické místnosti. V každé experimentální fasádě je vytvořena dvojice stropů, za účelem sledování tepelně vlhkostní situace v oblasti trámových zhlaví stropů. Stropy jsou umístěny ve výšce cca 1 m a cca 2,5 m nad spodní hranou stěn. Stropní konstrukce jsou pak cca 1 m hluboké a vytváří tak jednak bariéru pro teplý vzduch přiváděný do místnosti a zároveň podporují tepelnou stratifikaci vzduchu. Námi sledovaná čidla v konstrukci jsou umístěna zhruba ve středu polovin spodních experimentálních polí, takže z pohledu výšky celé klimatické místnosti jsou v její spodní části. Oproti tomu čidla monitorující teplotu vzduchu v klimatické místnosti, na jejichž základě byly definovány okrajové podmínky pro počítačovou simulaci experimentu, jsou umístěny u stropu klimatické místnosti.

Z grafu průběhu teplot na čidle umístěném ve vnějším omítkovém souvrství je patrné, že data ze simulace zde v celém roce dosahují vyšších hodnot než v konstrukci reálné. Vzhledem k tomu, že teplotní rozdíl mezi daty je zde patrný v celém roce, a nejen v zimním nebo letním období, tak rozdíl nebyl přisuzován špatně nastaveným hodnotám součinitelů tepelné vodivosti konstrukce. Příčinou tohoto rozdílu by ale mohla být absence dlouhovlnného záření v okrajových podmínkách pro počítačovou simulaci. Tuto variantu podpořilo zjištění, že v grafech s hodinovými daty je nejvyšší rozdíl mezi hodnoty tohoto čidla v simulaci a z reálnou experimentu především v nočních hodinách, a to především v období, kdy v průběhu dne byly naměřené vysoké hodnoty slunečního ozáření. Teplotní rozdíly v noci mezi reálnou a simulovanou konstrukcí zde dosahují až 4,5 °C.

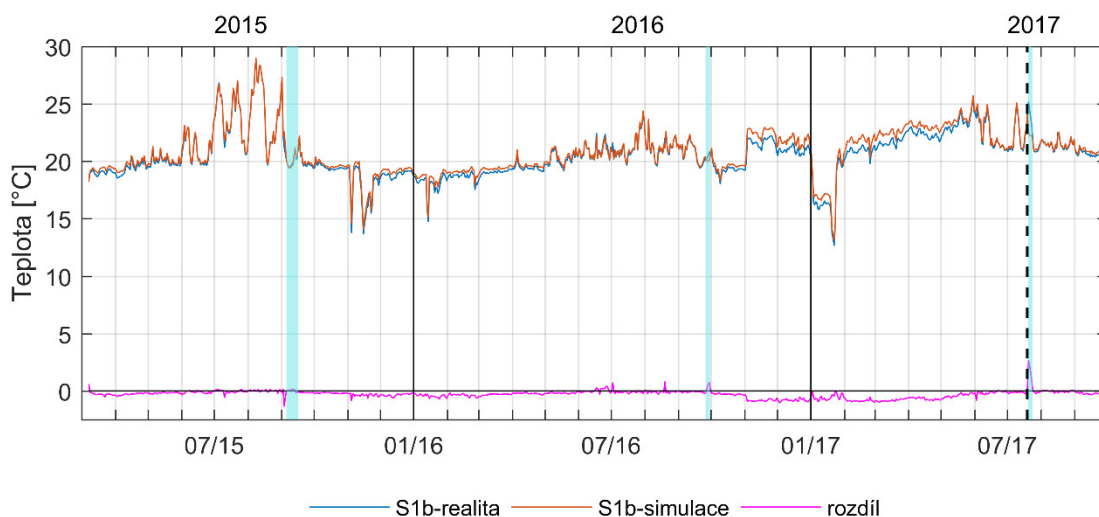
Hodnoty průběhu relativních vlhkostí vzduchu simulace na rozhraní izolace a zdiva oproti realitě v zimním období nabývají lehce vyšších hodnot a v letním období a zas hodnot nižších. Na první pohled se tedy jedná o rozdíl, který se dá ještě eliminovat nastavením parametrů materiálů. Při zachování stejných parametrů pro shodné materiálů v různých modelech, se však při pokusu eliminovat rozdíl v průběhu relativních vlhkostí u skladby S1a zvýšil rozdíl relativních vlhkostí u skladby S2b. Experiment větrem hnaného deště vychází bohužel na dobu, kdy dochází ke křížení křivek relativní vlhkosti simulace a reálných dat, lze tedy očekávat, že kdyby k experimentu nedošlo, tak by v tomto intervalu nabývala reálná data vyšších hodnot než data ze simulace. S přihlédnutím na hodnoty nepřesnosti napodobení experimentu v intervalu před experimentem se lze ale domnívat, že hlavním zdrojem nepřesnosti zde bude experiment s větrem hnaným deštěm.



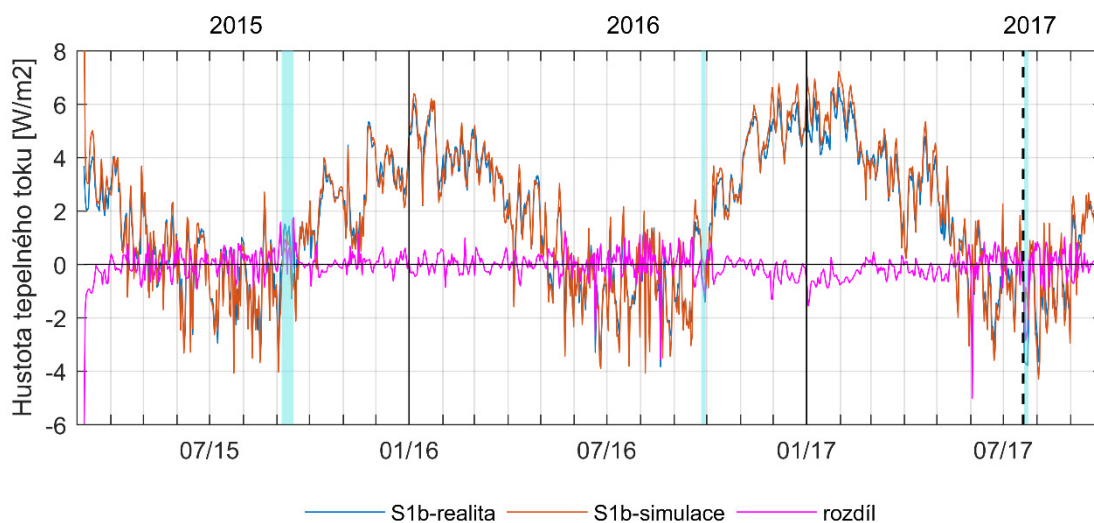
### 3.5.2. Skladba S1b - UdiIN RECO 140 mm



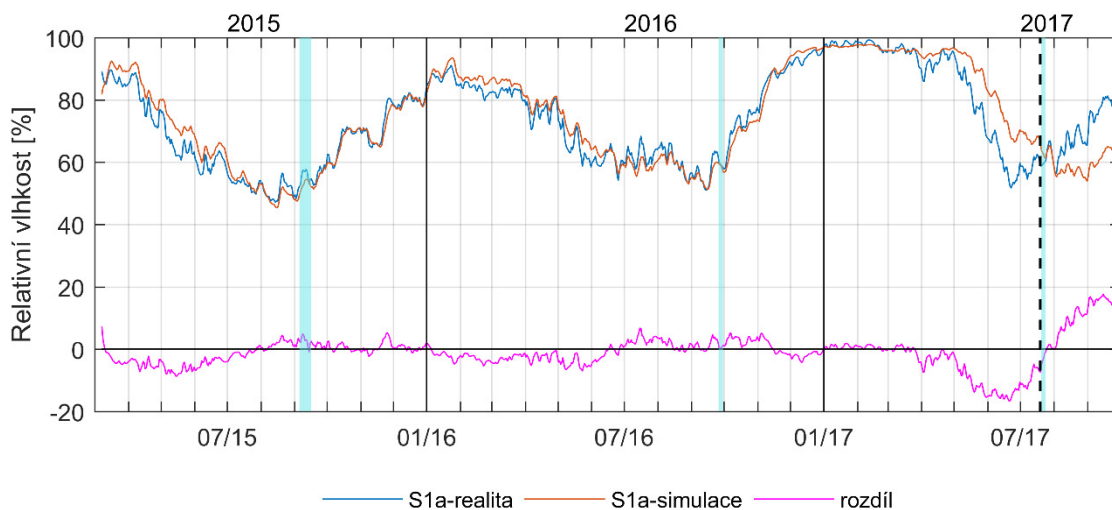
Obrázek 50 - Graf průběhu teplot S1b.Tpe - čidlo v exteriérové omítce



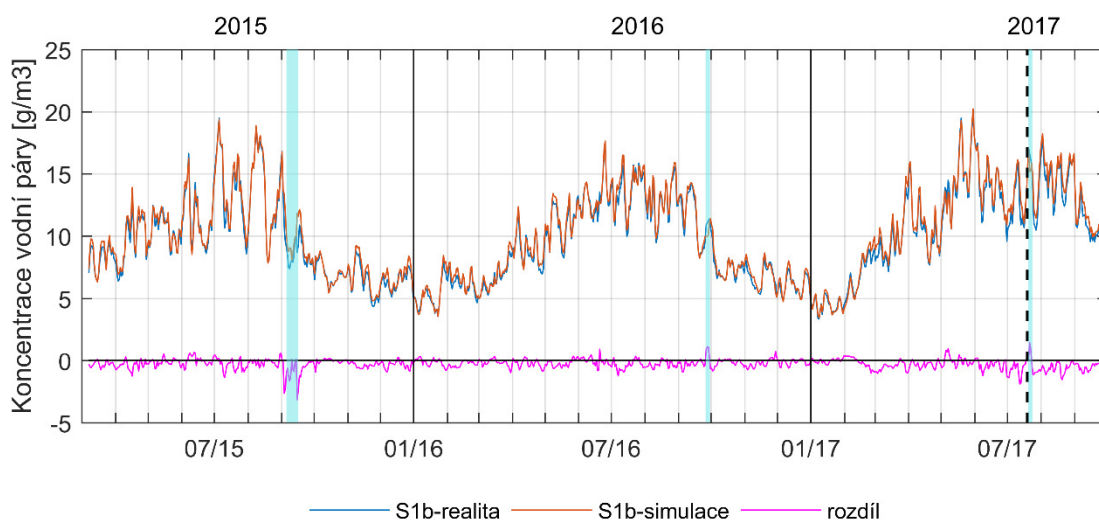
Obrázek 51 - Graf průběhu teplot S1b.Tpi - čidlo v interiérové omítce



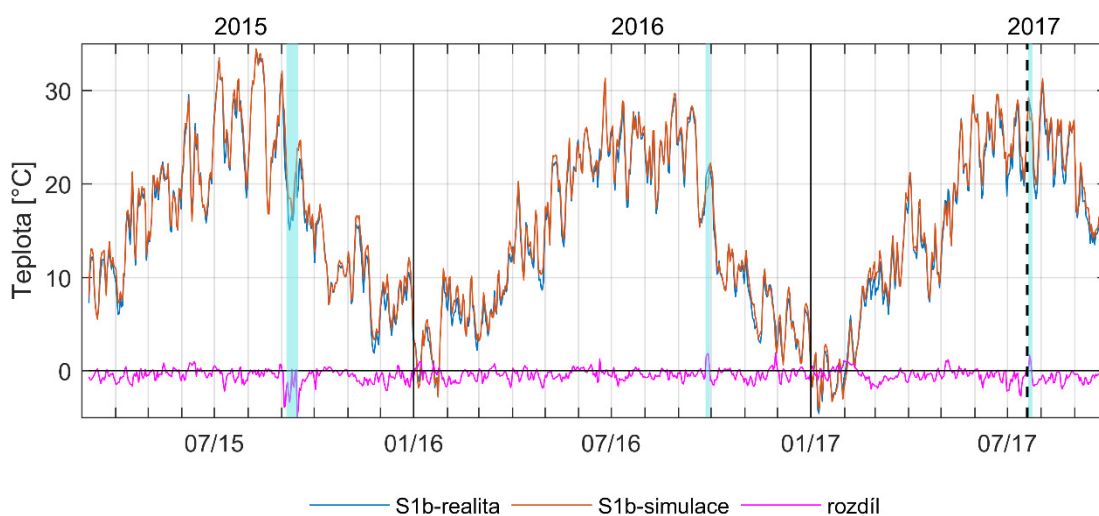
Obrázek 52 - Graf průběhu hustoty tepelného toku S1b.q – celá konstrukce



Obrázek 53 – Graf průběhu relativní vlhkosti S1b.RH1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva



Obrázek 54 – Graf průběhu koncentrace vodní páry S1b.v1 – čidlo na rozhraní izolace a zdiva



Obrázek 55 – Graf průběhu teplot S1b.T1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva



S1b.Tpe	S1b.Tpi	S1b.q	S1b.RH	S1b.v	S1b.T
[°C]	[°C]	[W/m <sup>2</sup> ]	[%]	[g/m <sup>3</sup> ]	[°C]
0,74	0,33	0,32	3,22	0,35	0,62

Tabulka 7 - Průměrné odchylky čidel skladby S1b vypočtené z hodinových dat (bez dat z intervalu následujícím po experimentu simulujícím větrem hnaným deštěm)

U skladby S1b se opět objevuje trend s vyšší simulovanou teplotou v zimním období na čidle umístěním ve vnitřním omítkovém souvrství a s vyšší simulovanou teplotou v celém roce na čidle umístěním ve vnějším omítkovém souvrství vysvětlením již u skladby S1a.

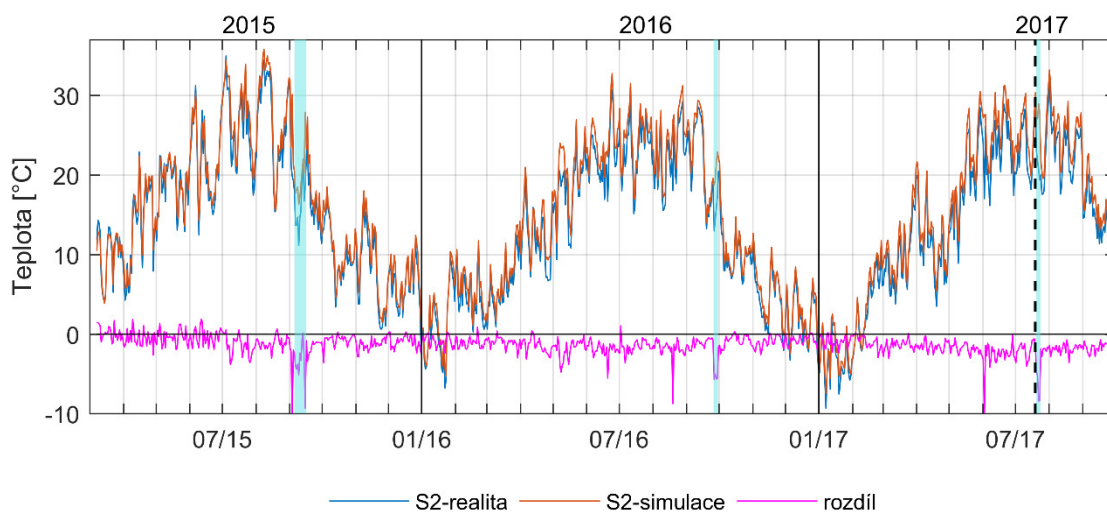
Průběhy simulovaných relativních vlhkostí na rozhraní izolace a zdiva oproti modelu S1a odpovídají více realitě. Po zimě 2017/2018 však dochází opět k zvýšení nepřesnosti simulace. Jelikož se v této zimě relativní vlhkost na rozhraní izolace a zdiva pohybovala ve velmi vysokých hodnotách, tak by nepřesnost mohla být způsobena chybně nastavenou sorpční křivkou materiálů v počítačovém modelu. I přes snahu nadefinovat pro tyto materiály jiného hodnoty sorpčních křivek se nepodařilo model lépe zkalibrovat. Stejně jako u předchozí skladby vychází tedy křížení křivek do stejného období jako experiment s větrem hnaným deštěm. Jak však bylo uvedené v kapitole 3.7, tak skladba S1b oproti skladbě S1a nereagovala na experiment s větrem hnaným deštěm ještě před výpadkem čidel. Nebylo tedy moc dobře možné vyhodnotit, kdy a jak moc čidla na rozhraní izolace a zdiva na tento experiment reagovala. Díky porovnání se simulací vidíme, že v období těsně po experimentu se křivky srovnají a do konce července jsou na velmi podobných hodnotách. Začátkem srpna však křivka reálných hodnot relativní vlhkosti začne mít stoupající charakter oproti křivce simulované relativní vlhkosti, která celý srpen spíše stagnuje.

Z porovnání se simulací lze tedy konstatovat, že i přesto že jsme dříve po období výpadku čidel nezaznamenali razantnější reakci na experiment jako v případě skladby S1a a S3, tak reakci v tomto období pravděpodobně došlo, a to tím způsobem že nedocházelo ke snižování vlhkosti jako v případě dat simulovaných.

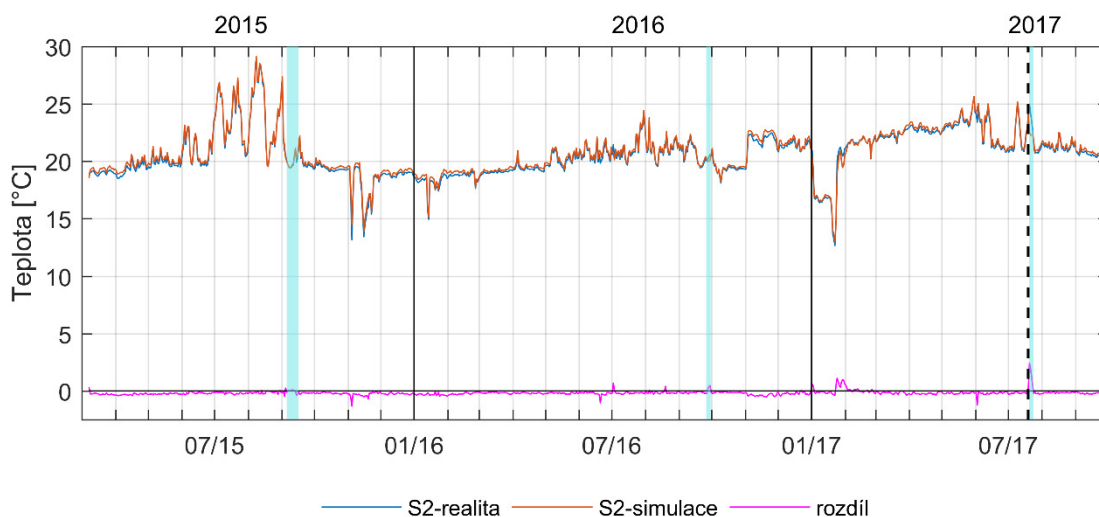




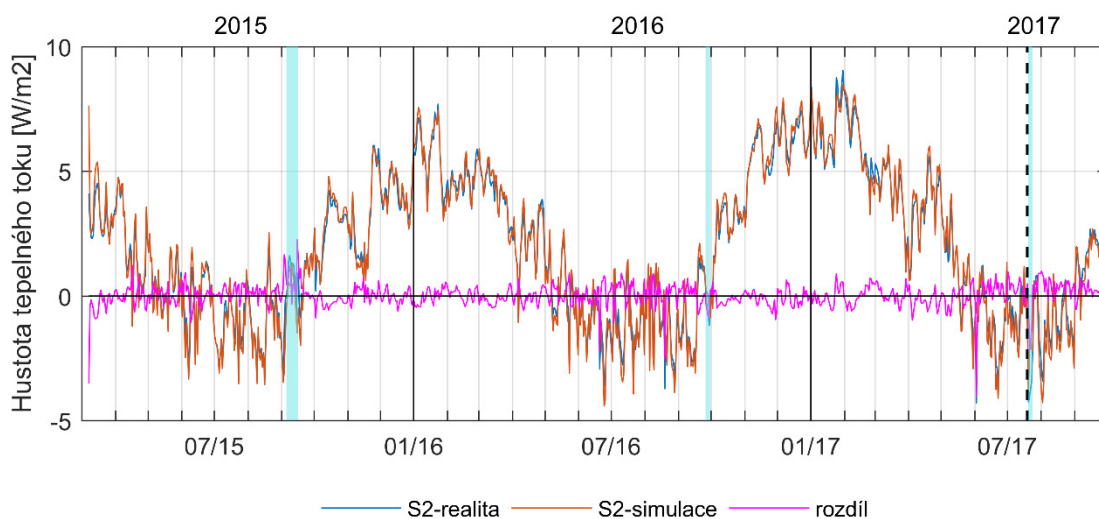
### 3.5.3. Skladba S2 - Isover



Obrázek 56 - Graf průběhu teplot  $S2.T_{pe}$  - čidlo v exteriérové omítce

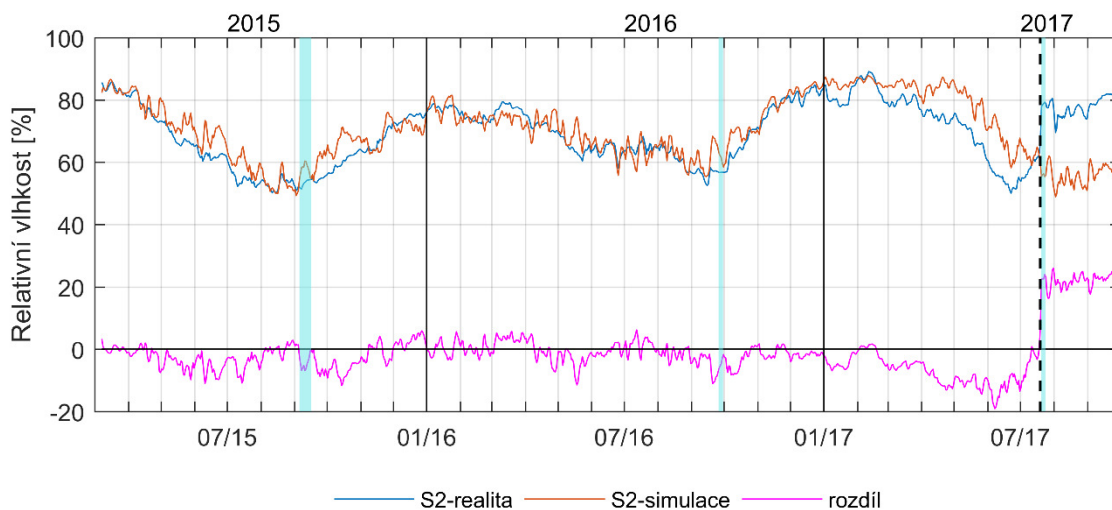


Obrázek 57 - Graf průběhu teplot  $S2.T_{pi}$  - čidlo v interiérové omítce

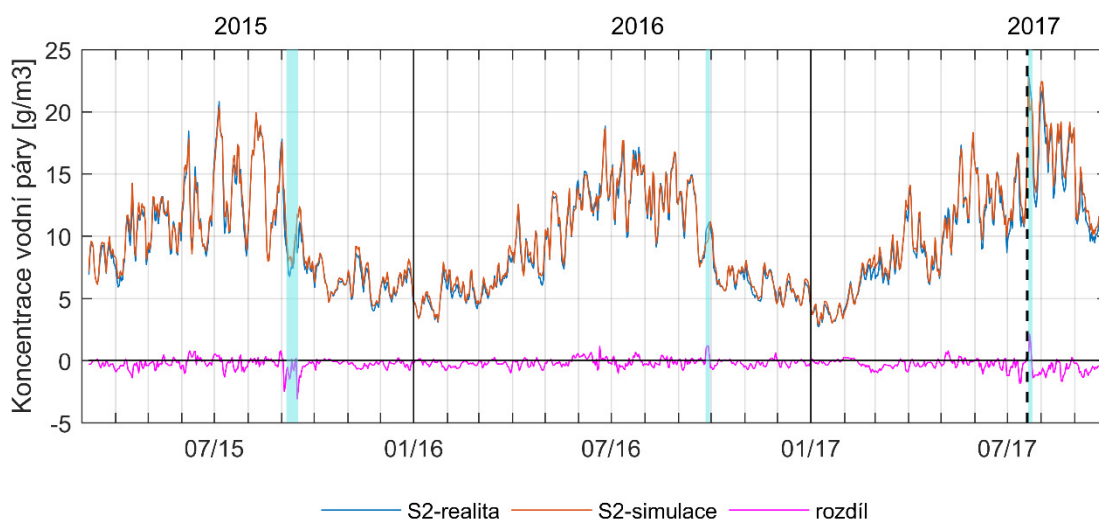


Obrázek 58 - Graf průběhu hustoty tepelného toku  $S2.q$  - celá konstrukce

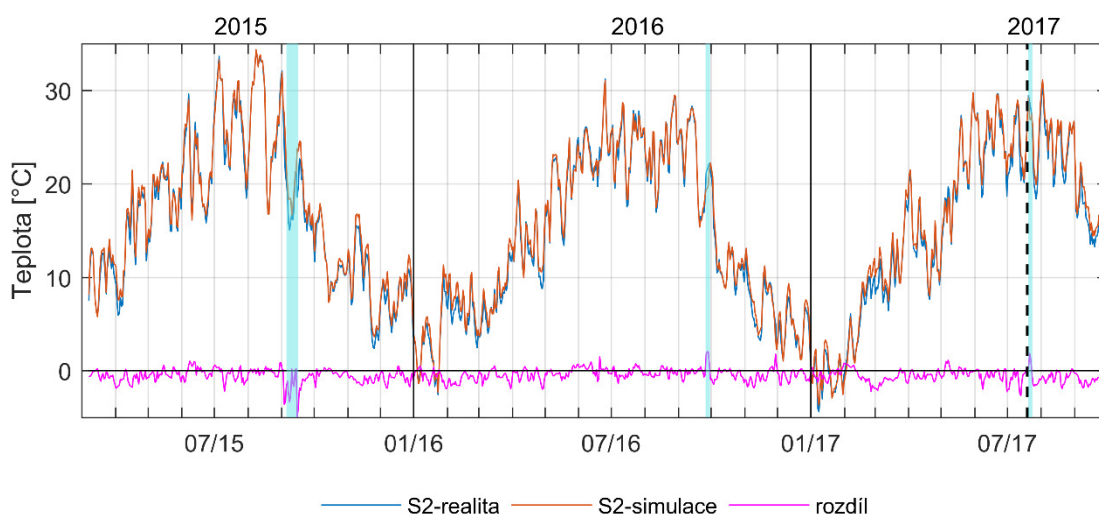




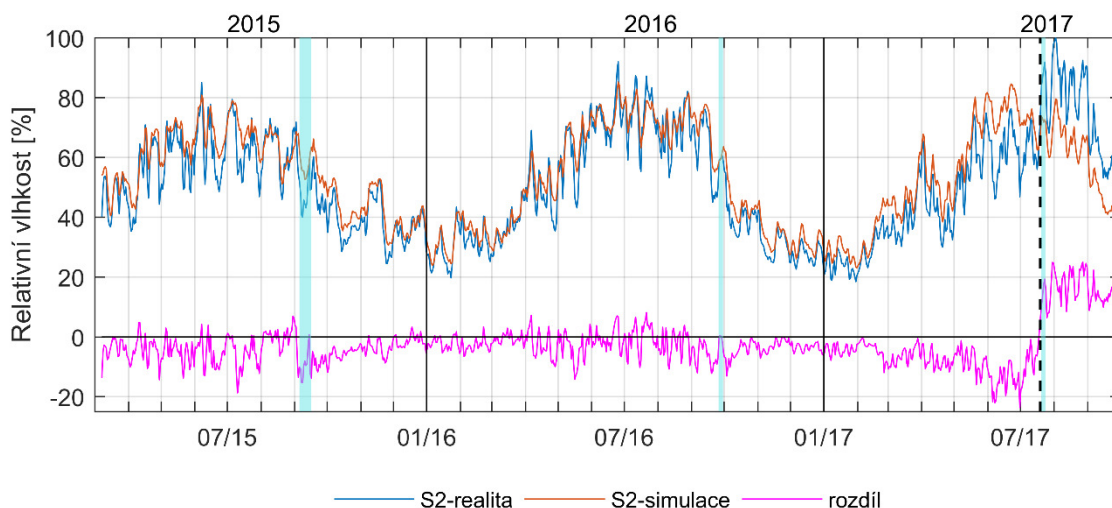
Obrázek 59 – Graf průběhu relativní vlhkosti S2.RH1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva



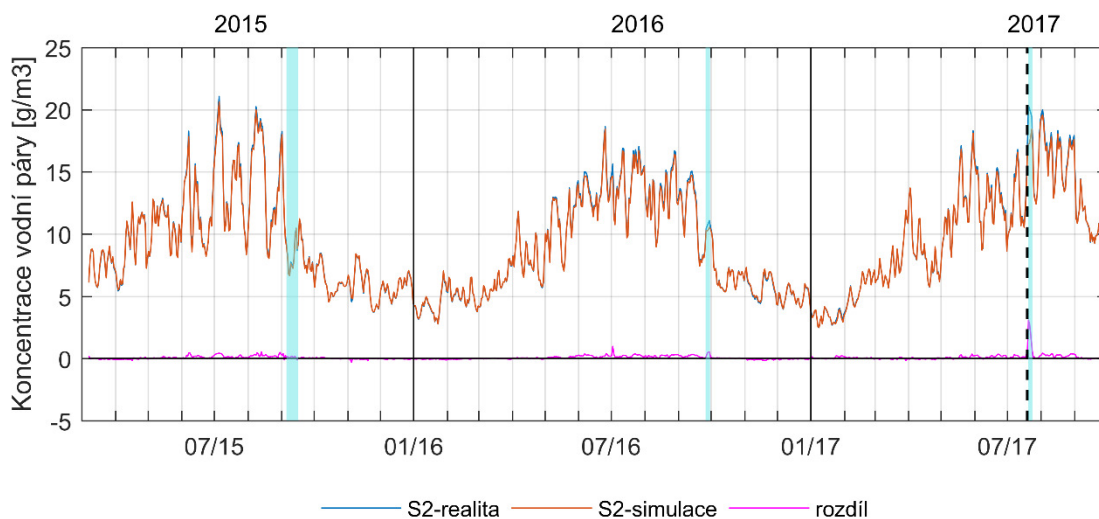
Obrázek 60 – Graf průběhu koncentrace vodní páry S2.v1 – čidlo na rozhraní izolace a zdiva



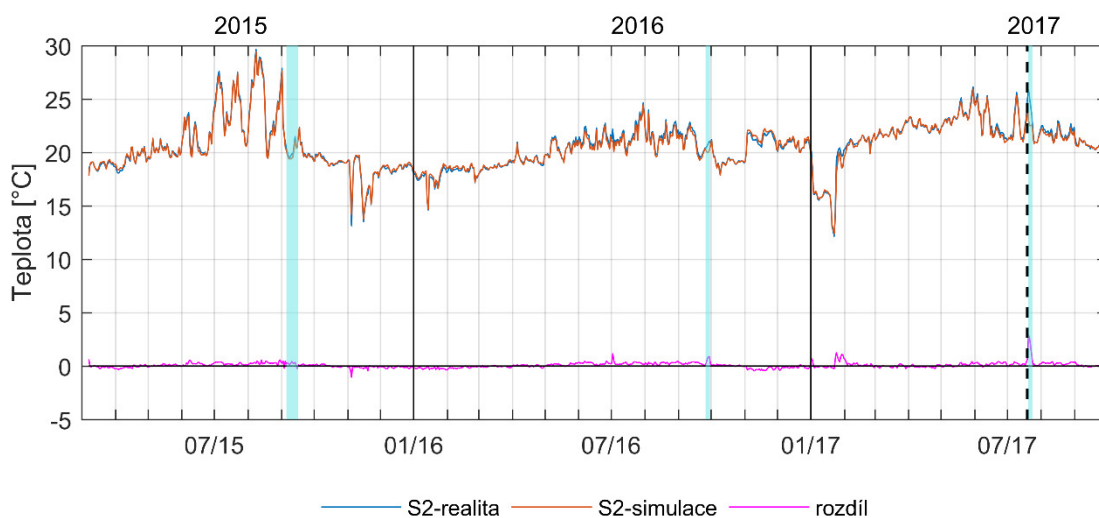
Obrázek 61 – Graf průběhu teplot S2.T1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva



Obrázek 62 – Graf průběhu relativní vlhkosti S2.RH4 - čidlo ve vzduchové mezeře mezi minerální vatou a parotěsnou fólií



Obrázek 63 – Graf průběhu koncentrace vodní páry S2.v4 – čidlo ve vzduchové mezeře mezi minerální vatou a parotěsnou fólií



Obrázek 64 – Graf průběhu teplot S2.T4 - čidlo ve vzduchové mezeře mezi minerální vatou a parotěsnou fólií



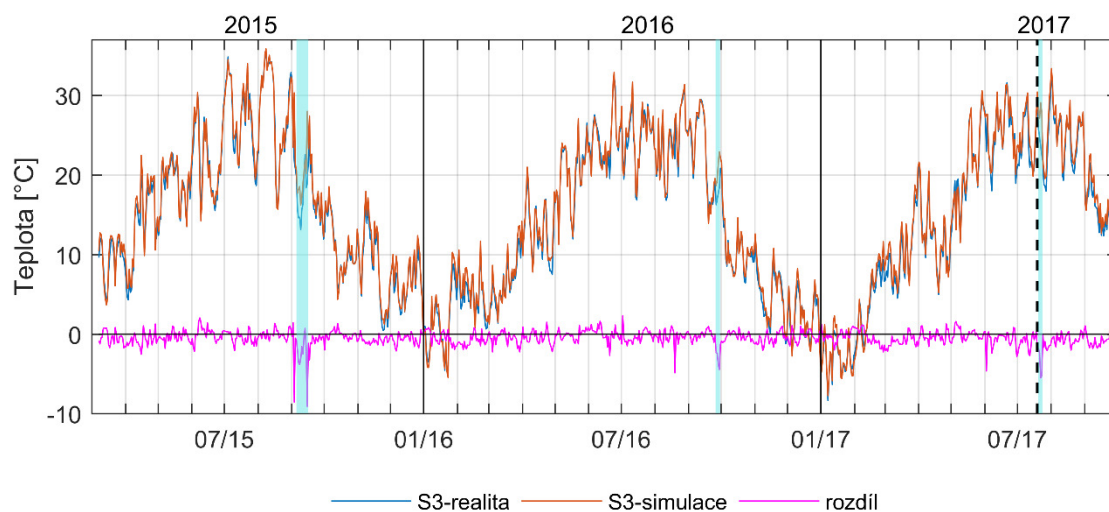
S2.Tpe	S2.Tpi	S2.q	S2.RH1	S2.v1	S2.T1	S2.RH4	S2.v4	S2.T4
[°C]	[°C]	[W/m <sup>2</sup> ]	[%]	[g/m <sup>3</sup> ]	[°C]	[%]	[g/m <sup>3</sup> ]	[°C]
1,37	0,22	0,31	4,06	0,34	0,64	5,17	0,09	0,17

*Tabulka 8 - Průměrné odchylky čidel skladby S2 vypočtené z hodinových dat (bez dat z intervalu následujícím po experimentu simulujícím větrem hnaný dešť)*

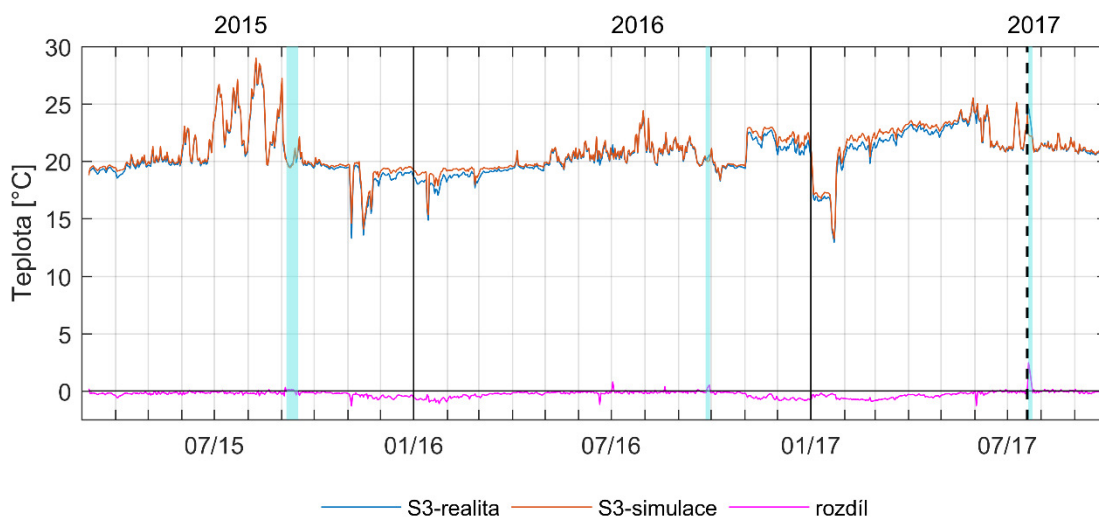
U skladby S3 bylo díky většímu počtu osazených čidel v konstrukci snadnější definovat, které materiálové charakteristiky je potřeba změnit. I přesto se podařilo k reálnému modelu opět jen přiblížit. Stejně jako v předchozích modelech se po zimě 2017/2018 zvyšuje nepřesnost ve relativní vlhkosti, jak na rozhraní izolace a zdiva, tak ve vzduchové dutině. I přes to, je zde evidentně pozorovaný vliv experimentu s větrem hnaným deštěm. Hodnoty reálné relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva oproti těm simulovaným vzrostou ihned po experimentu zhruba od 20 % a tento rozdíl si drží i v dalších měsících. Situace ve vzduchové dutině je podobná jen s tím rozdílem, že se zde vlivem změn vnitřní teploty vzduchu mění i relativní vlhkost. Hodnoty rozdílů hodnot simulovaných a reálných však oscilují někde lehce pod 20 %.



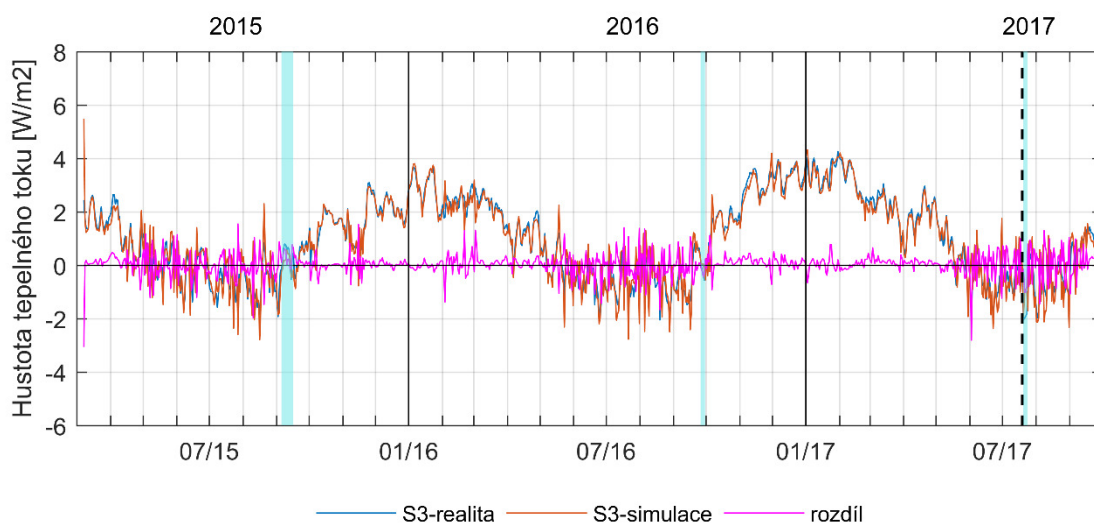
### 3.5.4. Skladba 3 - Va-Q-Tec



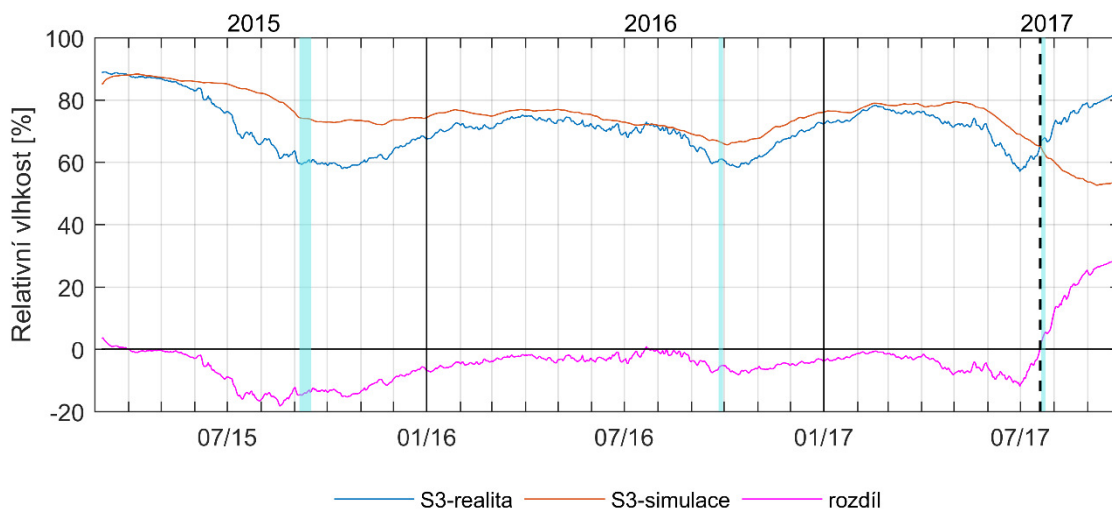
Obrázek 65 - Graf průběhu teplot S3.Tpe - čidlo v exteriérové omítce



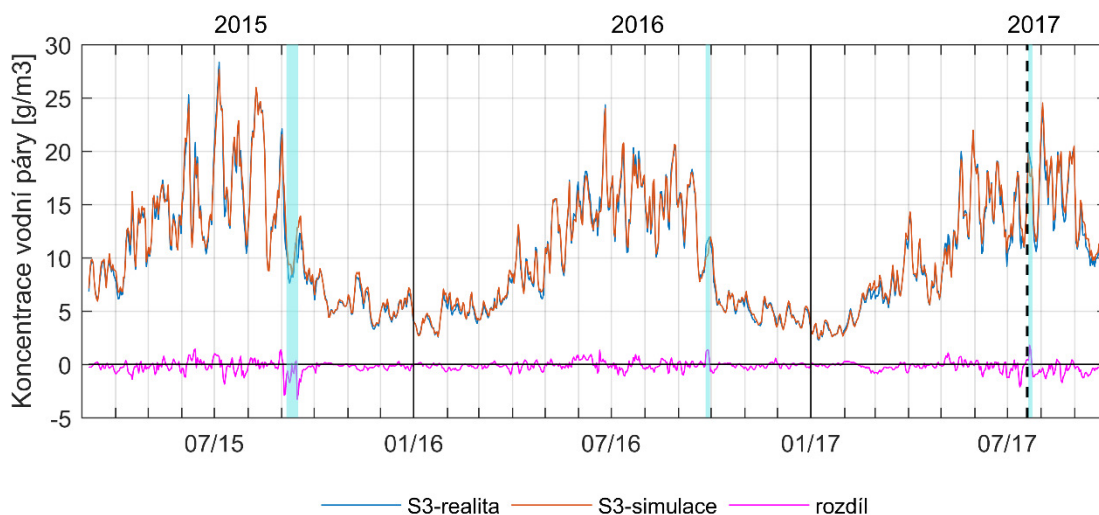
Obrázek 66 - Graf průběhu teplot S3.Tpi - čidlo v interiérové omítce



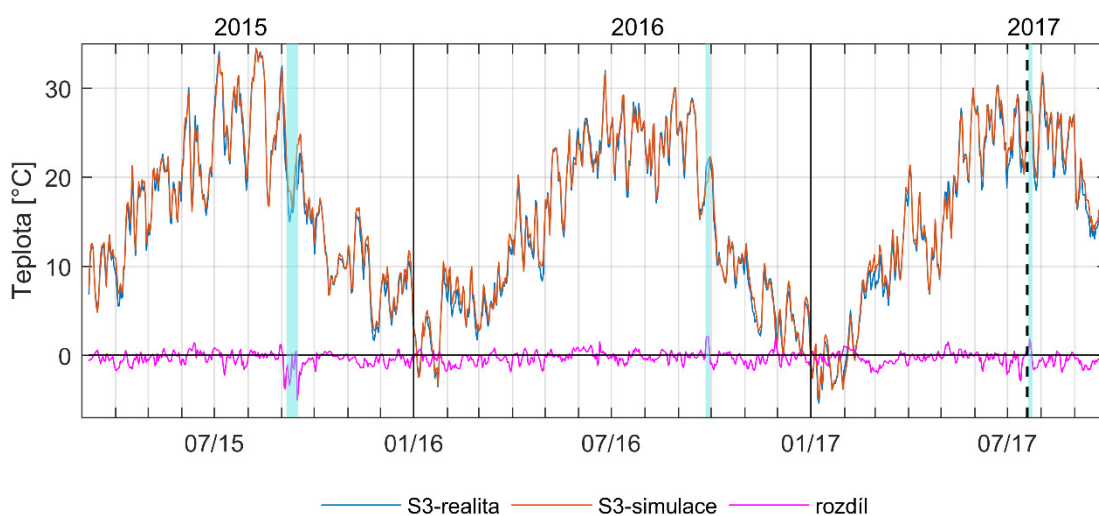
Obrázek 67 - Graf průběhu hustoty tepelného toku S3.q – celá konstrukce



Obrázek 68 – Graf průběhu relativní vlhkosti S3.RH1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva



Obrázek 69 – Graf průběhu koncentrace vodní páry S3.v1 – čidlo na rozhraní izolace a zdiva



Obrázek 70 – Graf průběhu teplot S3.T1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva



S3.Tpe	S3.Tpi	S3.q	S3.RH	S3.v	S3.T
[°C]	[°C]	[W/m <sup>2</sup> ]	[%]	[g/m <sup>3</sup> ]	[°C]
0,76	0,31	0,27	5,73	0,34	0,60

Tabulka 9 – Průměrné odchylky čidel skladby S3 vypočtené z hodinových dat (bez dat z intervalu následujícím po experimentu simulujícím větrem hnaný déšť)

Křivka relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva u difuzně uzavřené skladby S3 byla v prvním modelu téměř konstantní a na intervalech mezi letním a zimním obdobím měla téměř lineární průběh. Velkým přiblížením k reálným hodnotám bylo nahrazení tabulkové difuzního odporu vakuové izolace na difuzní odpor zahrnující vliv spár. V případě vakuové izolace, která má velký tepelný odpor a je tedy v místě rozhraní izolace a zdiva náchylnější na teplotní změny v exteriéru, by mohla být relativní vlhkost významněji ovlivněna již zmiňovanou absencí dlouhovlnného záření.

Vliv experimentu s větrem hnaným deštěm je zde však evidentní. Křivka rozdílu reálných hodnot relativní vlhkosti na rozhraní izolace zdiva a hodnot ze simulace má sice už 17 dní před začátkem rostoucí charakter, stejně jako je tomu u předchozích skladeb, avšak ani jednou do začátku experimentu nedosáhne kladných hodnot. Výjimkou je jen první měsíc, který je ovlivněn počátečními podmínkami. Stejně jako u skladby S2b, u které z hodnot před výpadkem a ani z rozdílu hodnot před a po výpadku čidel nebyl zaznamenána evidentní reakce na kropící experiment, je ze srovnání s daty ze simulace zřejmý významný růst relativní vlhkosti již během výpadku. Růst rozdílu relativních vlhkostí pokračuje i po výpadku, a to až do začátku září kde se vysychání simulovaného modelu zastaví.

### 3.6. Vyhodnocení simulace experimentu

Díky vytvoření počítačových tepelně vlhkostní simulací, simulujících dlouhodobý experiment bez zatížení uměle vytvořeným deštěm a jejich následným porovnáním s reálnými daty z experimentu, bylo zjištěno, že experiment simulující větrem hnaný déšť výrazně zvýšil vlhkost na rozhraní izolace a zdiva, a to i u skladeb, u který to nebylo na první pohled zřejmé.

Při vytváření počítačových modelů a jejich postupné úpravě, byl pozorován měnící se význam parametrů vnějšího omítkové souvrství s měnícím se faktorem redukce deštěm hnaným větrem na fasádu.





## 4. Laboratorní průzkum vlhkostních vlastností omítkových směsí

### 4.1. Obecně

Omítka je nejčastějším povrchovou úpravou zděných staveb a také jednou z nejstarších. Jsou používány jednak za účelem plnění ochranné funkce zdiva před povětrnostními vlivy a jednak za účelem estetickým. Omítkové malty jsou směsí pojiva, plniva, přísad a vody. Můžeme je dělit na základě mnoha kritérií. Obecně udávané základní kategorie jsou tyto [15]:

- podle použití – interiérové a exteriérové
- podle druhu pojiva – hliněné, sádrové, sádrovápenné, hořečnaté, vápenné ze vzdušného vápna, vápenné z hydraulického vápna, vápenopucolánové, vápenocementové, cementové
- podle plniva – jemnozrnné, hrubozrnné, s vláknitou výztuží, s organickým plnivem
- podle technologie aplikace – ručně nanášené (hlazené, utahované, s nerovným povrchem), strukturovaným povrchem, za použití speciálních technik (sgrafito, umělý mramor), strojně nanášené
- místa přípravy – „in situ“, průmyslově vyráběné směsi
- podle funkce, kterou plní – estetickou, tepelně izolační, sanační, obětované omítky používané při odsolování zdiva
- podle postavení vrstvy – vyrovnávací, jádrová, štuková
- podle počtu vrstev – jednovrstvé, vícevrstvé
- podle barevnosti – probarvené, neprobarvené.

S ohledem na naši problematiku se dále budeme zabývat pouze maltami exteriérovými běžné funkce, tedy estetické a ochranné, a jejich dělení dle druhu pojiva a počtu vrstev a možností jejich hydrofobizace.

#### 4.1.1. Počet vrstev

Vícevrstvý systém se skládá většinou ze 3 vrstev, a to adhezí vrstvy na podkladní zdivo, jejímž účelem je vytvoření větší přilnavosti omítkového souvrství ke zdivu a snížení nasákavosti povrchu zdiva, čímž je prodloužen zádrž vody v omítce. Tuto funkci většinou plní cementový postřík. Další vrstvou je jádrová omítka. Tato vrstva má plnit funkci vyrovnání pokladu. Poslední vrstvou je pak omítka štuková. Štuky splňují funkci pohledovou a oproti jádrové omítce se nanáší jen ve velmi malé tloušťce. Směrem do exteriéru by měla klesat pevnost omítky a její difuzní odpor.

Jednovrstvé systémy mají jen jednu vrstvu omítky, u které může být před jejím aplikací podklad opatřen penetrací.

Jednovrstvé omítky se začali vyrábět s příchodem zdících systémů s velmi rovným povrchem. Kdy nebylo potřeba využívat tlustší vrstvy omítek, a tudíž se vyšší cena



jednovrstvé omítky společně s nižší spotřebou materiálu na výsledné ceně promítla méně, než prostředky ušetřené za čas a práci nanášení několika vrstev.

#### **4.1.2. Pojiva**

##### **4.1.2.1. Vápno**

Z hlediska chemického složení, způsobu aktivace a následných materiálových vlastností se vápno dělí do dvou kategorií, a to vzdušné vápno a vápno hydraulické.

###### **4.1.2.1.1. Vápno vzdušné**

Vzdušné vápno se vyrábí tepelným rozkladem vápence. Po výpalu (pod mez slinutí) jeho složení odpovídá téměř čistému oxidu vápenatému  $\text{CaO}$ . Takovýto produkt se nazývá pálené nehašené vápno. Po výpalu může být vápno dále upravováno takzvaným hašením, kdy se pálené vápno (oxid vápenatý  $\text{CaO}$ ) převádí na hydroxid vápenatý  $\text{Ca(OH)}_2$ . Hašení pak může probíhat dvěma způsoby, takzvané mokré hašení a suché hašení. Mokré hašení probíhá většinou na stavbě a jedná se o proces, kdy je do vápna přimícháno větší množství vody. Výsledným produktem je vápenná kaše. Takto hašené vápno se musí nechat před použitím delší dobu odležet. Proces suchého hašení probíhá průmyslově při menším množství. Při hydrataci se přebytečná voda účinkem tepla odpaří a výsledným produktem tedy není kaše, ale suchý produkt. Teplota výpalu vápna, a rychlost hašení pak udávají výsledné vlastnosti vápenného hydrátu. Pro přípravu omítkových směsí se používají tzv. měkce pálená vápna (prudčeji hašené vápno). Důvodem je, že tento druh vápna vykazuje lepší objemovou stálost.

Tuhnutí vápenné malty probíhá jako sesychání koloidního gelu vápenného pojiva. Tuhnutí je vyvoláno odpařováním přítomné vody a z tohoto důvodu malta vyrobená ze vzdušného vápna pod vodou vůbec netuhne [16].

###### **4.1.2.1.2. Vápno hydraulické**

Vápno hydraulické na obsahuje kromě oxidu vápenatého také hydraulické oxidy. Podle způsobu získání hydraulických oxidů se hydraulické vápno rozlišuje na přírodní a umělé. Přírodní hydraulické vápno vzniká výpalem vápnitých slínů. Umělá hydraulická vápna jsou vyráběna semletím vápna vzdušného s vhodnými přísadami [17]. K oběma druhům hydraulického vápna je pak přidáváno určité množství sádrovce za účelem regulace tuhnutí.

Hydraulické vápno na rozdíl od vápna vzdušného může tvrdnout za nepřítomnosti vzduchu tedy i pod vodou. Oproti vzdušnému vápnu se také vyznačuje větší pevností a odolností vůči povětrnostním vlivům, a tedy i vyšší životností. Vápenné omítky jsou velmi prodyšné, ale také nasákové a porézní. Oproti cementovým omítkám rychleji nasáknou, ale také velmi rychle vyschnou a nezadržují kapilární vlhkost.



#### 4.1.2.2. Cement

Cement vzniká výpalem anorganických surovin alespoň na mez slinutí, tedy cca nad 1450 °C, čímž vznikne tzv. slínek. Ten se po ochlazení a odležení rozemele s přísadami a příměsemi (sádrovcem, struskou, popílkem) na jemnou moučku, čímž vznikne cement. Podle druhu anorganické suroviny můžeme cement dělit na Portlandský cement, který je vyráběn z vápenců se zvýšeným obsahem hydraulických oxidů, a hlinitanový cement, který je vyráběn směsí bauxitu a vápence. Hlinitanový cement se však běžně do omítkových směsí nepoužívá, a to z důvodu jeho vysoké ceny.

Cementové malty se vyznačují vysokou pevností, nízkou nasákavostí, ale vysokým difuzním odporem.

#### 4.1.2.3. Vodní sklo

Jedná se o křemičitan sodný, nebo draselný. Vyrábí se tavením sklářského písku se sodou, nebo potašem za teplot cca 1300-1400 °C. Omítky z tohoto materiálu vykazují vysokou pevnost, ale zároveň nízké hodnoty difuzního odporu. Také se jedná o velmi zásaditý materiál, takže případný produkt vyrobený z tohoto materiálu je přirozeně odolný proti růstu plísní.

#### 4.1.2.4. Akrylát

Akrylátová pojiva jsou řazena do skupiny vodných polymerních disperzí a jedná převážně o umělé pryskyřice. Akrylátová pojiva mají velmi dobrou přídržnost k podkladu, jsou nenásávkavé, dobře odolávají mrazu, kyselinám a solím, ale mají velký difuzní odpor.

#### 4.1.2.5. Silikon

Pro použití v omítkových maltách se toto pojivo používá stejně jako Akrylát ve formě vodných polymerních disperzí. Vlivem účinku vzdušného oxidu uhličitého je polymer přeměněn na polysiloxan tedy ve vodě nerozpustnou pryskyřici.

Silikonová pojiva mají pro využití v omítkových maltách výborné vlastnosti. Mají dobrou přídržnost k podkladu, lze je dobře probarvovat, jsou vodoodpudivá, ale zároveň difuzně propustné. Tyto příznivé vlastnosti jsou ale vykoupeny vysokou cenou materiálu.

#### 4.1.3. Plniva

Nejčastěji používaným plnivem je písek. Písek lze dělit dle způsobu jeho získání, a to na těžný, kopaný, říční a písky uměle získané drcením a mletím hornin a jiných materiálů. Dále je můžeme dělit dle zrnitosti. Těžné písky jsou tzv. ostré a nejčastěji se používají na postřík. Písky těžné se díky vyššímu obsahu jemných jílových odplavitelných částic používají na štukovou vrstvu. Do jádrové omítky se pak používá kombinace obou druhů. Čím více jemných jílovitých částic směs obsahuje tím více je pak potřeba závěsové vody a tím je vyšší riziko vzniku smršťovacích trhlin .

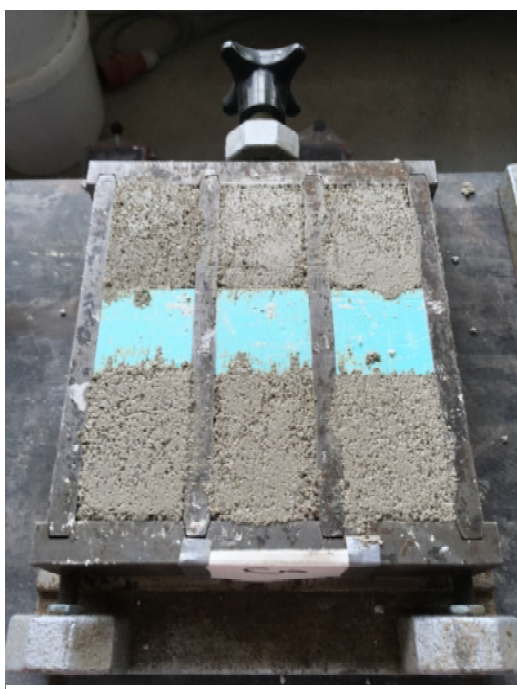


#### 4.1.4. Hydrofobizace omítkových malt

Hydrofobní přípravky snižují kontaktní úhel materiálu a tím redukuje jeho nasákavost, bez toho, aniž by tím ovlivnili jeho difuzní propustnost. Většinou se jedná o přípravky na bázi různých druhů silanů. Hydrofobní přípravky může být do maltových směsí přidávány buď formou přísady do suché směsi, nebo může být hydrofobizován pouze povrch vyztřelé omítkové vrstvy formou postřiků, či nátěrů [18].

#### 4.2. Výroba vzorků omítkový malt

Vzhledem k tomu, že omítkové směsi mají být v příštím kroku použity na výrobu jednovrstvé omítky pro aplikaci na stěnu z plných pálených cihel, tak byly pro pojivo vybrány tradiční materiály. Z cementu, hašeného vápna, písku frakce 0-4 a vody bylo vytvořeno 5 druhů omítkových směsí, jež se lišily pouze podílem cementu a vápna viz tabulka 10. Zastoupení jednotlivých složek bylo odměřeno na základě objemu pomocí odměrných válců. Jednotlivé složky byly pomocí odměrných válců odměřeny do jedné nádoby, která byla posléze vložena do plně automatického směšovače malta, v kterém byli jednotlivé složky důkladně promíseny. Následně byly mokrou směsí naplněny předem připravené formy dvou tvarových variant, a to terčíky výšky 20 mm a průměru 115 mm a trámečky 40 x 40 x 60 mm. Pomocí zednické špachtle byla mokrá směs ve formách důkladně prohnětena, tak aby bylo zamezeno tvorbě kaveren ve vzorcích. Jednotlivé vzorky byli po měsíci z forem vyndány, avšak u některých došlo při vyndávání z forem k jejich poškození.



Obrázek 71 - forma pro vzorky tvaru trámečků



Obrázek 72 - forma pro vzorky tvaru terčků



název	zkratka	Podíl jednotlivých složek [-]			frakce písku	poměr vody [-]
		cement	vápno	písek		
Cementová omítka	OM1	1	0	3	0-4	0.15
Vápenocementová omítka	OM2	1	1	6	0-4	0.15
Vápenocementová omítka	OM3	1	2	9	0-4	0.15
Vápenocementová omítka	OM4	1	5	18	0-4	0.15
Vápenná omítka	OM5	0	1	3	0-4	0.15

Tabulka 10- Zastoupení jednotlivých složek ve vzorcích omítkových malt

### 4.3. Laboratorní měření

Pro vytvoření modelů těchto omítkových malt ve výpočetním softwaru pro dynamické modelování šíření tepla, vlhkosti a energie bylo nutné definovat pomocí následujících laboratorních měření jejich skutečné materiálové vlastnosti.

#### 4.3.1. Zkouška pro stanovení objemové hmotnosti

Objemové hmotnosti vzorků omítky byly stanoveny na základě naměření rozměrů a hmotnosti vysušených vzorků.

Pro zkoušku byly použity vzorky tvaru kvádrů a rozměrech cca 40x40x60 mm. Vzorky byly umístěny do předem zvážených hliníkových mistichek, v nichž pak byly umístěny do pece předehřáté na 105 °C. Vzorky byly s periodou 1-2 dnů převažovány a poté, co byly naměřena změny ve dvou po sobě jdoucích vážení menší jak 0,1 %, byly vzorky prohlášeny za ustálené. Poté byly pomocí posuvného digitálního měřidla s přesností na jednu setinu milimetru naměřeny rozměry vzorků, a to vždy ve třech různých místech v každé rovině prvku. Naměřené hodnoty každé strany prvku byly zprůměrovány a na jejich základě byly stanoveny objemy jednotlivých vzorků.

Pomocí jednoduchého vztahu  $\rho = \frac{m}{V}$  [kg/m<sup>3</sup>], byly vypočítány objemové hmotnosti jednotlivých vzorků.

označení	$\rho_{dry}$
	[kg/m <sup>3</sup> ]
Cementová omítka 1	1877
Vápenocementová omítka 2	1803
Vápenocementová omítka 3	1799
Vápenocementová omítka 4	1775
Vápenná omítka 5	1736

Tabulka 11- Objemové hmotnosti omítkových malt



#### 4.3.2. Zkouška difuzní propustnosti

Difuzní propustnost materiálu byla stanovena za použití metod suché a mokré misky.

Podstatou zkoušky je, že materiálová vzorek těsně uzavírá prostor zkušební misky obsahující buď vysoušedlo - suchá miska (dry-cup) nebo nasycený roztok soli s vysokou relativní vlhkostí - mokrá miska (wet-cup). Miska je následně umístěna v exsikátoru s určitou teplotou relativní vlhkostí vzduchu. Z důvodu rozdílných částečných tlaků vodní páry začíná vodní pára proudit přes vzorky a pravidelným vážením se stanoví hmotností úbytek, resp. přírůstek v čase v ustáleném stavu.

Pro zkoušky byly použity vzorky tvaru terče o průměru 115 mm a výšce 20 mm. U všech vzorků byla pomocí posuvného měřítka změřena jejich výška na 4 místech. Z naměřených hodnot byla následně vypočítány průměrné výšky jednotlivých vzorků. Terčíky byly po obvodu opevněny hliníkovou páskou, aby v těchto místech nedocházelo k prostupu vodní páry. Pro zkoušky byli použity misky, s dvojnásobným průměrem. Ve spodní části s průměrem 113 mm a v horní části s průměrem 125 mm viz obrázek 73. Díky tomu vzniká v místě změny průměru misky obrubníček, na který mohly být osazeny vzorky omítky. Před osazením vzorku omítky byl tento obrubníček opatřen vrstvou stavbařského butylenového tmelu. Stavbařským butylenovým tmelem byla následně ošetřena i horní obvodová část terčíků, tak aby tmel překryl hliníkovou pásku, ale zároveň nezasahoval do vnitřního průměru spodní části misky.

Pro každý typ omítkové malty byly tímto způsobem vytvořeny 3 kusy vzorků. Zkouška probíhala současně vždy na všech 3 vzorcích, aby v případě v případě rozdílných výstupů, mohl být vadný vzorek identifikován a vyřazen z měření. Výjimkou byl vzorek pro vápennou omítku OM5, který byl pro tuto zkoušku vyhotoven jen v jednom kuse, a to z důvodu poškození zbylých dvou terčíků při vyndávání z forem.

Z kapacitních důvodů bylo nutné použít stejné vzorky pro metodu dry-cup i wet-cup, a proto byl do misek umístěn nasyceným roztok soli NaBr, který vytvořil uvnitř misek prostředí s relativní vlhkostí 60 %. Pro zkoušku dry-cup, byly vzorky umístěny do exsikátorů společně s nasyceným roztokem soli K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, který vytvořil v exsikátoru prostředí s relativní vlhkostí vzduchu 97 %. Vzorky byly pravidelně váženy v intervalu 3-4 dnů po dobu zhruba 7 týdnů. Poté co byl difuzní tok mezi miskou a prostředím exsikátoru ustálený, tak došlo k výměně nasyceného roztoku soli K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> za roztok nasycený roztok LiCl, který vytvořil v exsikátoru prostředí s relativní vlhkostí vzduchu 11 %. Vzorky byly pravidelně váženy v intervalu 3-4 dnů po dobu zhruba 7 týdnů. Společně se vzorky a nasyceným roztokem soli bylo do exsikátoru vloženo také zařízení měřící teplotu a relativní vlhkost vzduchu, díky čemuž bylo kontrolováno, zdali je nasycený roztok soli schopen udržet v exsikátoru požadovanou relativní vlhkost.

V případě zkoušky wet-cup, bylo na základě hodnot odečtených z měřicímu zařízení zjištěno, že relativní vlhkost v exsikátoru roste, a že roztok soli již není nasyceným. Roztok byl tedy opětovně obohacen o další dávku LiCl. Po uvedení roztoku do nasyceného stavu se stále držela relativní vlhkost vzduchu nad 11 %, avšak po dobu více





jak jednoho týdne byla naměřena konstantní relativní vlhkost 15 %. Výpočet difuzní propustnosti byl tedy proveden pro vlhkostní spád 15 %/60 %.



Obrázek 73 - vzorek pro zkoušky dry-cup a wet-cup



Obrázek 74 - exsikátor s vzorky pro dry-cup zkoušku



Obrázek 75 - miska s nasyceným roztokem soli

Za použití níže uvedených výpočetních vztahů byly stanoveny difuzní propustnosti jednotlivých omítek.

$$\delta = \frac{\Delta m d}{S \tau \Delta p_d} \quad [kg \ s^{-1} \ m^{-1} \ Pa^{-1}] = [s]$$

Kde  $\delta$  [s] je propustnost vodní páry,  $\Delta m$  [kg] je hmotnost vodní páry, která pronikla skrz vzorek v daném časovém kroku,  $d$  [m] je výška vzorku (terčíku),  $S$  [m<sup>2</sup>] je plocha vzorku přes kterou je umožněn přestup vodních par,  $\tau$  [s] je časový krok a  $\Delta p_d$  [Pa] je rozdíl mezi parciálními tlaky.

$$D = \frac{\delta R T}{M} \quad [m \ s^{-1}]$$

Kde  $D$  [m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>] je koeficient difuze vodní páry,  $\delta$  [s] je propustnost vodní páry,  $R$  [J mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>] je univerzální konstanta pro plyn,  $T$  [°C] je teplota a  $M$  [kg mol<sup>-1</sup>] je molární hmotnost vody.

$$\mu = \frac{D_a}{D} \quad [-]$$

Kde  $\mu$  [-] je faktor difuzního odporu,  $D_a = 2,3 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$  je koeficient vodní páry ve vzduchu a  $D$  [m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>] je koeficient difuze vodní páry v látce.



označení	$\mu_{60\%-97\%}$	$\mu_{60\%-15\%}$
	[-]	[-]
Cementová omítka 1	51	48
Vápenocementová omítka 2	29	31
Vápenocementová omítka 3	21	23
Vápenocementová omítka 4	12	15
Vápenná omítka 5	8	-

Tabulka 12- Faktory difuzních odporů omítkových malt

V závěru zkoušky dry-cup se hmotnostní hodinový přírůstek vzorku OM5 začal snižovat, toto chování bylo zprvu přičítáno možnému výkvětu soli v misce, který začal pokrývat spodní část terčíku. U toho to vzorku byl tedy proražen terčík z omítkové malty, tak aby bylo možné do misky nahlédnout a potvrdit hypotézu se solnými výkvěty. Žádné solné výkvěty však v misce nalezeny nebyli a později se ukázalo, že šlo chybné nadefinování buněk v tabulkovém procesoru. Vzorek již byl však poničen a nebylo možné ho tedy použít pro další zkoušky. Z toho důvodu tedy chybí hodnoty  $\mu_{60\%-15\%}$  pro vzorek OM5. Ostatní vzorky byly po ukončení zkoušky rozebrány a zkontrolovány spodní plochy terčků, zdali na nich nebyly během zkoušky vytvořeny výkvěty soli, které by mohli ovlivnit difuzní propustnost vzorku.



Obrázek 76 - Kontrola čistoty spodní hrany terčíku vzorku OM5



Obrázek 77 - Kontrola čistoty spodní hrany terčíku vzorku OM1-A

### 4.3.3. Zkouška nasákavosti

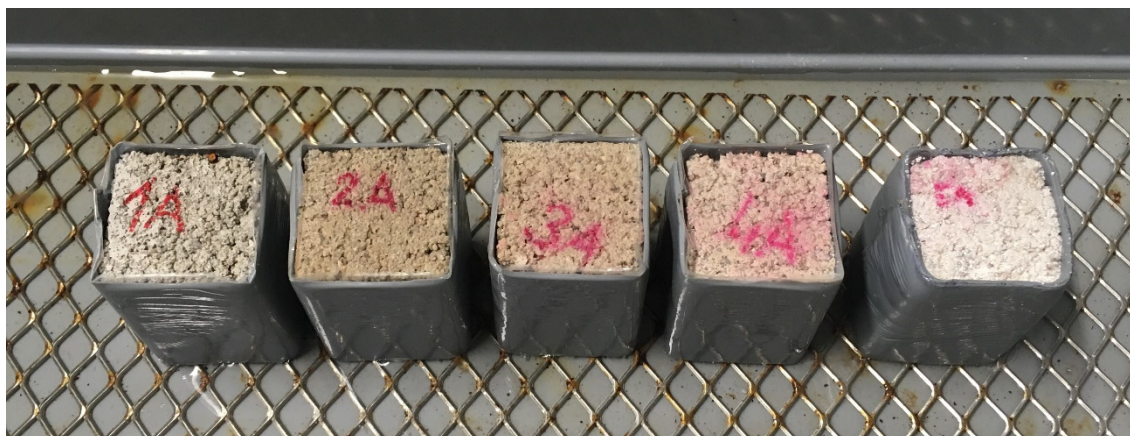
Zkouška vertikální nasákavosti byla provedena na dvou typech vzorků. Jednak na běžných vzorcích bez dalšího ošetření a jednak na vzorcích ošetřených hydrofobizačním nátěrem. Zkouška byla provedena za účel získání hodnot absorpčních koeficientů vody  $A_w$  [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1/2}$ ] a hodnot kapilárních obsahů nasycené vlhkosti  $w_{cap}$  [ $\text{kg m}^{-3}$ ].



#### 4.3.4. Vzorky bez nátěru

Pro zkoušku nasákavosti byly použity vzorky tvaru kvádrů a rozměrech 40x40x60 mm. Vzorky byly cca 3 týdny odleženy v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu 20-40 % a teplotou cca 22 °C. Vzorky byli po výšce dokola oblepeny bitumenovou páskou, tak aby nedocházel bočními stranami k vysychání vzorku. Takto upravené vzorky byli následně umístěny do nádoby s vodou. Na dno nádoby byla před započítáním experimentu umístěna ocelová mřížka a nádoba byla naplněna vodou, tak aby hladina vody byla cca 2 mm na úrovni ocelové mřížky. Mřížka byla do nádoby umístěna proto, aby nedošlo k přilepení bitumenové pásky přesahující hranu omítky ke dnu nádoby a tím k omezení přísunu vody k obnažené ploše vzorky.

Po umístění upravených vzorků do nádoby byli vzorky v postupně prodlužujících se intervalech váženy. Vážení probíhalo tak, že byl vzorek vyjmut z nádoby a odloženo na dobu 5 vteřin na molitanovou kuchyňskou utěrku s vysokým sacím efektem, poté byl vzorek zvážen s přesností na 0,001 gramu a umístěn zpět do nádoby. Po dobu vážení byla časomíra odpočítávající dobu máčení přerušena.



Obrázek 78 - Průběh zkoušky nasákavosti

Z naměřených hodnot byly spočítány podíly hmotnostních přírůstků vody ku smáčené ploše vzorků ( $m_w/A$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ]), jenž byly vyneseny do grafů v závislosti na druhé odmocnině času ( $t^{1/2}$  [ $\text{s}^{1/2}$ ]). V grafech byly vytvořeny přímky spojující body s lineárním charakterem a z rovnic těchto přímek, byly odečteny hodnoty absorpčních koeficientů vody  $A_w$  [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1/2}$ ]. Hodnoty kapilárních obsahů nasycené vlhkosti  $w_{cap}$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ] u vzorků, které během zkoušky dosáhly stavu kapilárního nasycení, byly dopočítány pomocí vztahu:

$$w_{cap} = \frac{m_{cap} - m_0}{V} \quad [\text{kg}/\text{m}^3]$$

Kde  $m_{cap}$  [kg] je hmotnost vzorku při stavu kapilárního nasycení,  $m_0$  [kg] je hmotnost vzorku v suchém stavu a  $V$  [ $\text{m}^3$ ] je objem vzorku.

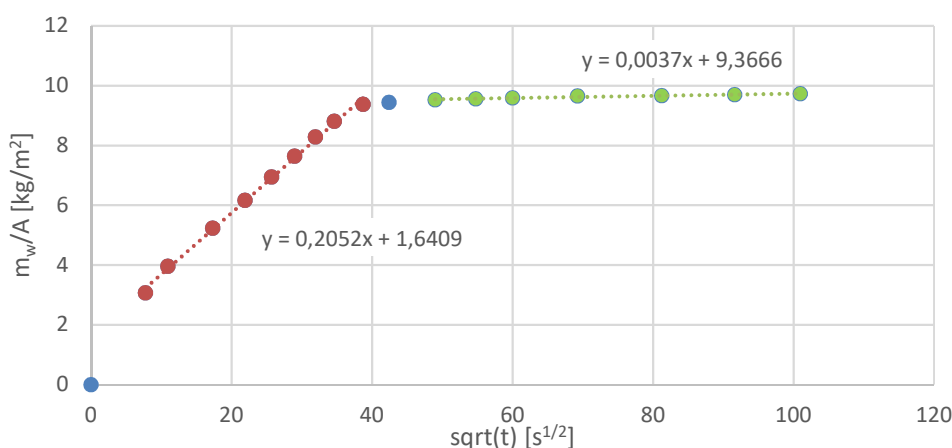


Hodnoty kapilárních obsahů nasycené vlhkosti  $w_{cap}$  [kg/m<sup>3</sup>] u vzorků (OM1 a OM2), které během zkoušky nedosáhly stavu kapilárního nasycení, byly dopočítány pomocí vztahu:

$$w_{cap} = \phi \left( \frac{w_{cap}}{w_{sat}} \right) \quad [kg / m^3]$$

Kde  $\phi$  [-] je porosita vzorku  $w_{cap}$  [kg/m<sup>3</sup>] je hodnota kapilárního obsahu nasycené vlhkosti vzorku a  $w_{sat}$  [kg/m<sup>3</sup>] je hodnota saturovaného obsahu vlhkosti vzorku.

Pro výpočet porosity vzorků byla pro hmotnost pevné fáze vzorků uvažována hodnota 2 500 kg/m<sup>3</sup>. Výpočet hodnot kapilárních obsahů nasycené vlhkosti vzorků OM1 a OM2, byl tedy založen na předpokladu, že všechny vzorky mají velmi podobný poměr hodnot kapilárních obsahů nasycené vlhkosti a hodnot saturovaného obsahu vlhkosti.

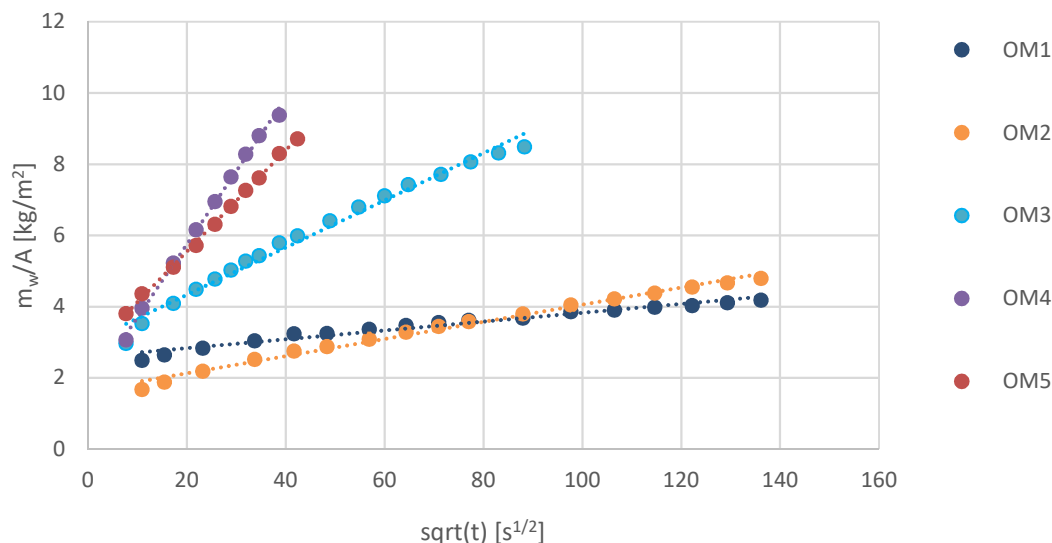


Obrázek 79 - Graf průběhu zkoušky nasákavosti vzorku OM4

Z grafu na obrázku 79 je patrné, že body průběhu zkoušky nasákavosti vytvářejí dvě přímky. Jednak přímku spojující body v kapilárně aktivní oblasti a body za kapilárně aktivní oblastí. Z průniku těchto přímek získáme hodnotu kapilárního obsahu nasycené vlhkosti  $w_{cap}$  [kg/m<sup>3</sup>].

Z grafu také můžeme vypořadovat, že přímka spojující body v kapilárně aktivní oblasti protíná osu y v bodě 1,64 a ne v nule, jak by se očekávalo. Tento jev byl pozorován u všech omítkových vzorků a je patrně způsobený nerovností smáčivého povrch. Vlivem nerovnosti povrchu je v počátku smáčivá plocha výrazně větší, než je průřez vzorku.





Obrázek 80 - Graf křivek nasákavosti vzorků neošetřených hydrofobizačním přípravkem

Z obrázku 80 je patrné, že vzorky s větším obsahem cementu mají nižší hodnoty absorpčního koeficientu vody  $A_w$  [kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1/2</sup>]. Výjimku tvoří jen vzorek OM5, který neobsahuje vůbec žádný cement, a přesto jeho hodnota absorpčního koeficientu o trochu nižší, než u vzorku OM4, jehož poměr cementu a vápna je 1:5.

vzorek	$W_{cap}$	$A_w$
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> ]
OM1	140	0,011
OM2	156	0,024
OM3	157	0,062
OM4	159	0,205
OM5	177	0,142

Tabulka 13- Hodnoty absorpčních koeficientů

#### 4.3.5. Vzorky ošetřené hydrofobizačním nátěrem

Pro hydrofobizaci omítkových vzorků byl po konzultaci vhodnosti přípravku s technikem firmy Lučební závody Kolín vybrán hydrofobizační přípravek Lukofob 39.

Z technického listu výrobce: *Lukofob 39 je silikonový hydrofobizační přípravek určený k finální povrchové vodoodpudivé impregnaci savých stavebních materiálů. Přípravek obsahuje účinnou složku alkylsilikonát ve vodném roztoku. Další použití jako injektážní přípravek do zdiva proti vzlínající vlhkosti [18].*

Vzorky omítkových malt byli před hydrofobizací po výšce dokola oblepeny bitumenovou páskou stejně, jako vzorky pro zkoušku nasákavosti.



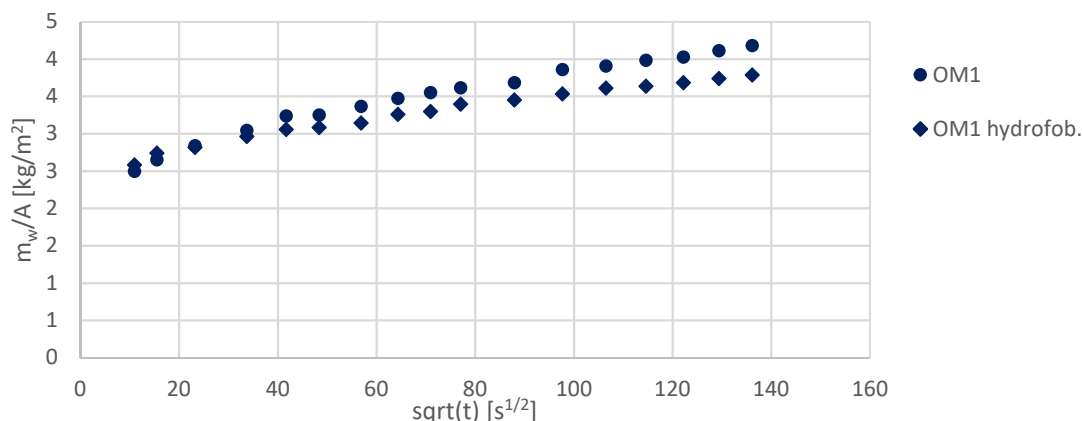
Přípravek byl na vzorky omítek nanášen formou máčení. Roztok pro máčení byl vytvořen dle technického listu výrobce nařazením přípravku Lukofob 39 s vodou, a to v poměru 1:40. Roztok byl nalit do nádoby s nerezovou ocelovou mřížkou, tak aby hladina roztoku byl cca 2mm nad úrovní ocelové mřížky. Poté byli na dobu 3 minut do nádoby vloženy vzorky omítkových malt. Vzorky byli před máčením i po máčení zváženy, aby bylo možné dopočítat, kolik roztoku do sebe jednotlivé vzorky nasákly. Mezi máčením a zkouškou nasákavosti byli vzorky ponechány 3 dny v pokojové teplotě.

omítka	Hmotnostní přírůstek po máčení v Lukofol 39
	[g]
Cementová omítka 1	5,631
Vápenocementová omítka 2	5,899
Vápenocementová omítka 3	8,763
Vápenocementová omítka 4	8,776
Vápenná omítka 5	10,58

Tabulka 14- Množství hydrofobizačního přípravku absorbovaného vzorky

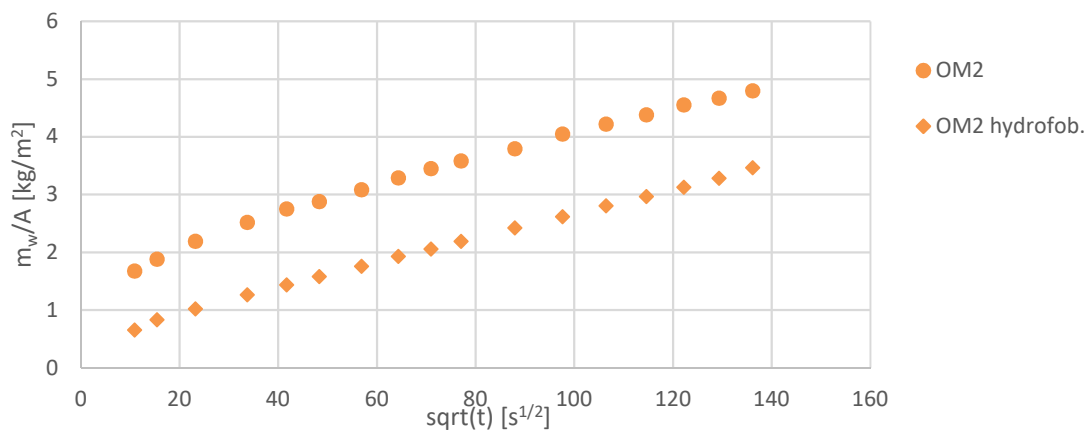
Výrobce v technickém listě přípravku Lukofol 39 udává, že optimální spotřeba pro v případě máčení je 0,25 - 1,5l/m<sup>2</sup>. Přepočteno pro náš případ by měl mít jeden vzorek být ihned po máčení hmotnostní přírůstek přibližně 0,4 – 2,4 g. Z tabulky je patrné, že všechny vzorky s výjimkou vzorku OM4, doporučenou horní hranici dokonce překročili. Vzorek OM4 nasákl jen o 0,4 g méně, než je doporučená horní hranice výrobcem. Lze tedy předpokládat, že vzorky byly pro správnou funkci přípravku napuštěny dostatečným množstvím roztoku. Z tabulky je také patrné, že čím méně cementu vzorek obsahuje tím do sebe nasál méně roztoku. Vzorky však byli máčeny jen tři minuty, a tudíž lze předpokládat, že množství roztoku, které byly vzorky schopny absorbovat bylo značně ovlivněno nerovností povrchu vzorků.

Samotná zkouška vertikální nasákavosti dále probíhala shodně jako v případě vzorků neošetřených hydrofobizačním nátěrem. Výsledků zkoušky nasákavosti jsou graficky zobrazeny na obrázcích 81-86.

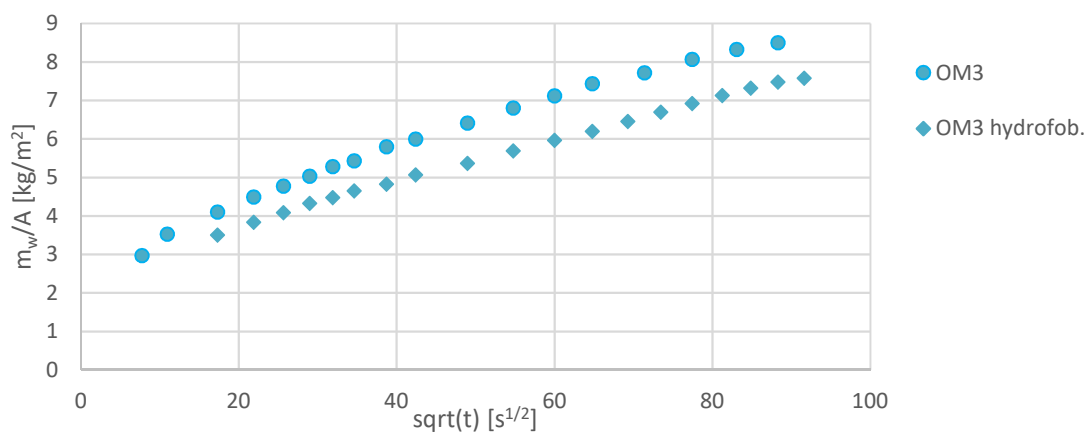


Obrázek 81 - Graf porovnání křivek nasákavosti vzorků OM1 ošetřených a neošetřených hydrofobizačním přípravkem

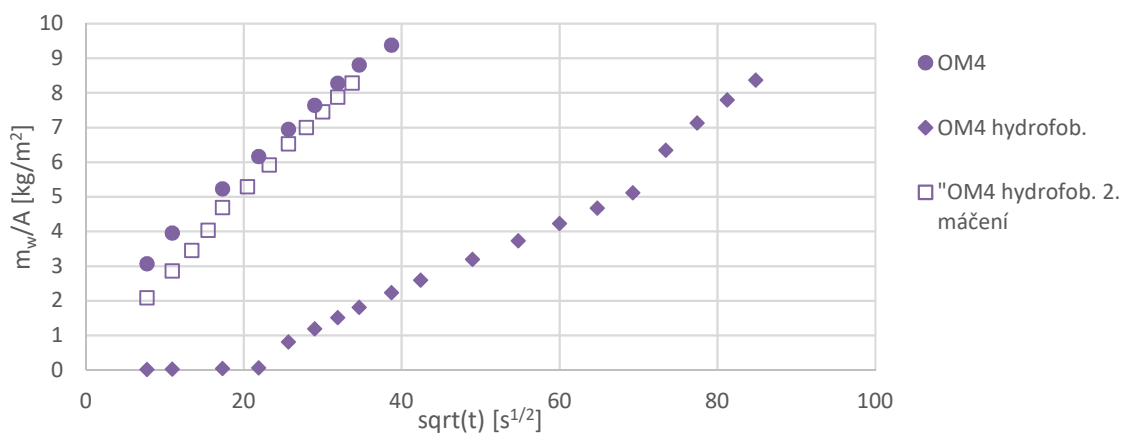




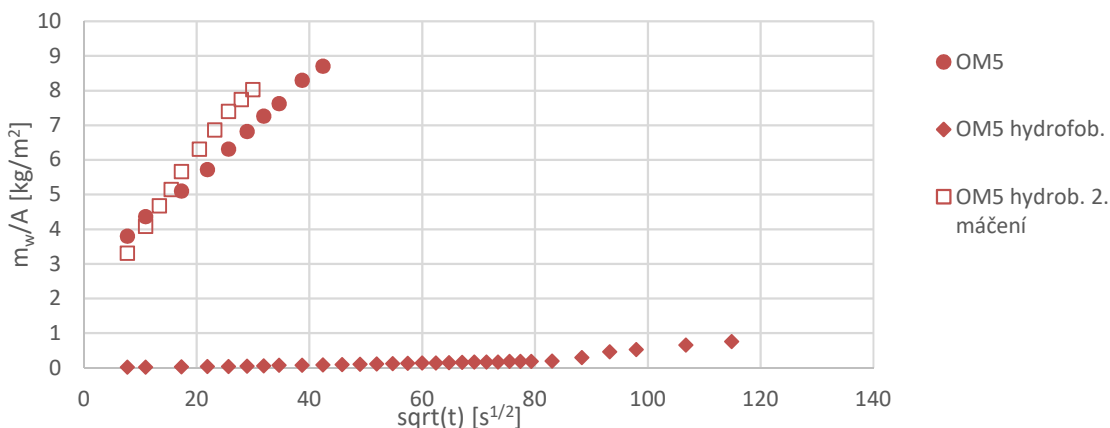
Obrázek 82 - Graf porovnání křivek nasákavosti vzorků OM2 ošetřených a neošetřených hydrofobizačním přípravkem



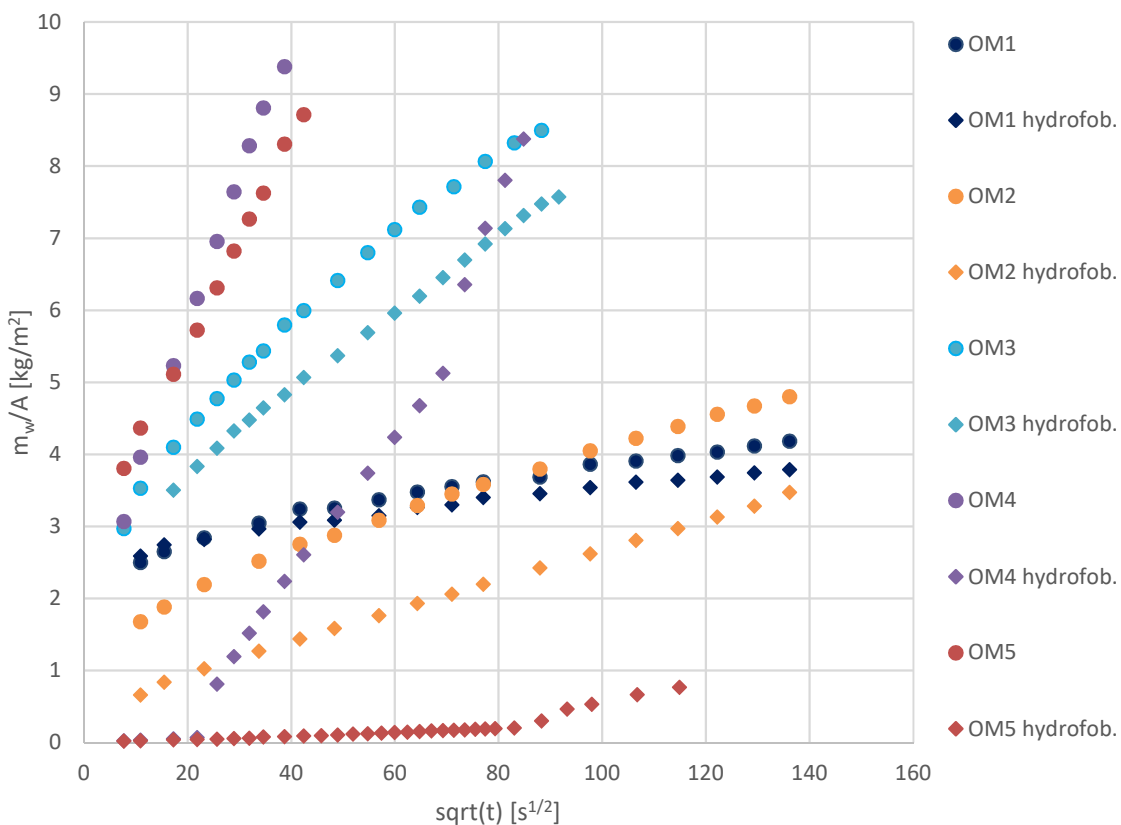
Obrázek 83 - Graf porovnání křivek nasákavosti vzorků OM3 ošetřených a neošetřených hydrofobizačním přípravkem



Obrázek 84 - Graf porovnání křivek nasákavosti vzorků OM4 ošetřených a neošetřených hydrofobizačním přípravkem



Obrázek 85 - Graf porovnání křivek nasákavosti vzorků OM5 ošetřených a neošetřených hydrofobizačním přípravkem



Obrázek 86 - Graf porovnání křivek nasákavosti všech vzorků neošetřených hydrofob. přípravkem a všech vzorků ošetřených

Z grafu je patrné, že hydrofobizace se více projevila na vzorkách s vyšším obsahem vápna. U vzorků OM1 a OM2 byly naměřeny nižší hodnoty absorpčního koeficientu vody  $A_w$  a to o  $0,02 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$  než u vzorků neošetřených hydrofobizačním nátěrem. Výškový rozdíl bodů u neošetřené a ošetřené omítky OM2 je opět způsoben rozdílnou nerovností povrchů vzorků. U vzorku OM3, kde je podíl vápna vyšší je rozdíl už  $0,08 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ , avšak v druhé odmocnině času vykazuje hmotností přírůstek stále lineární charakter.



Jinak tomu je však u vzorků OM4 a OM5. Vzorek OM4 v prvních cca 10 minutách vykazuje minimální hmotnostní přírůstek součinitel  $A_w$  stanovený pro tento interval by měl hodnotu rovnu  $0,002 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ . Po cca 10 minutách přestává hydrofobizační bariéra fungovat a dochází k prudšímu nárůstu hmotnosti. Součinitel  $A_w$  stanovený pro interval po 10 deseti minutách máčení má hodnotu rovnu  $0,121 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ , což je o  $0,084 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$  nižší hodnotu než u vzorku neošetřeném hydrofobizačním nátěrem. Podobný průběh můžeme sledovat i u vzorku OM5. Interval, pro který vykazuje vzorek hodnotu součinitele  $A_w$  rovnu  $0,002 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ , je však dokonce cca 115 minut. Po této době dochází k prudšímu nárůstu hmotnosti a sklon křivky začíná odpovídat hodnotě  $0,02 \text{ kg/m}^2\text{s}^{1/2}$  pro součinitel  $A_w$ . Pro druhou část intervalu je tedy součinitel  $A_w$  o řád nižší než v případě vzorku neošetřeného hydrofobizačním nátěrem.

vzorek	$w_{\text{cap}}$	$A_w$	$A_w$ (hydrofob.)
	[ $\text{kg/m}^3$ ]	[ $\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ ]	[ $\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2}$ ]
OM1	140	0,011	0,009
OM2	156	0,024	0,022
OM3	157	0,062	0,054
OM4	159	0,205	0,002-0,121
OM5	177	0,142	0,002-0,02

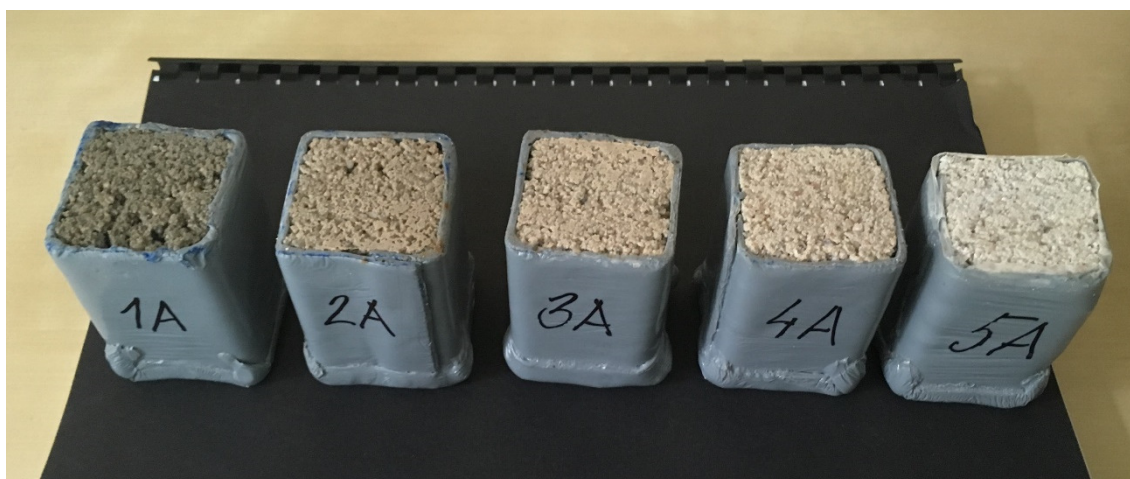
Tabulka 15- Porovnání absorpčních koeficientů vody

Po analýze průběhu zkoušky nasákavosti omítkových malt OM 4 a OM5 ostřených hydrofobizačním přípravkem, jejichž křivky nasákavosti vykazovali v různých intervalech různé sklony, se nabízel otázka, zdali by při opakování toho experimentu byly průběhy stejné. Zdali by se po vysušení vzorků hydrofobní bariéra opět obnovila, nebo zdali by měla křivka průběhu nasákavosti hned od počátku experimentu sklon shodný s druhým intervalem jako v prvním máčení. Zkouška nasákavosti byla u těchto dvou vzorků tedy po několika týdnech opakována. Výsledné průběh z opakovaných zkoušek jsou zaznamenány v grafech na obrázcích 84 a 85. V obou variantách měli křivky průběhů hmotnostních přírůstků s druhou odmocninou času jednotný sklon. Oba vzorky dokonce vykazovali vyšší hodnoty absorpčního koeficientu vody než vzorky neošetřené hydrofobizačním přípravkem. Tato skutečnost byla pravděpodobně způsobena tím, že vzorky nestihly vyschnout do stejného stavu, v jakém byly při první zkoušce nasákavosti. Vzorek OM4 měl při druhém máčení vyšší hmotnost oproti prvnímu máčení o cca 0,4 g, což je cca o  $4 \text{ kg/m}^3$ , a vzorek OM5 měl při druhém máčení vyšší hmotnost oproti prvnímu máčení o cca 0,6 g, což je cca o  $6 \text{ kg/m}^3$ . Touto skutečností bylo tedy výsledky z druhého máčení velmi zkreslené. Lze se však domnívat, že po překonání hydrofobizační bariéry, představující první interval v první zkoušce nasákavosti, tato bariéra ztrácí účinek a účinnost hydrofobizace tím rapidně klesá.



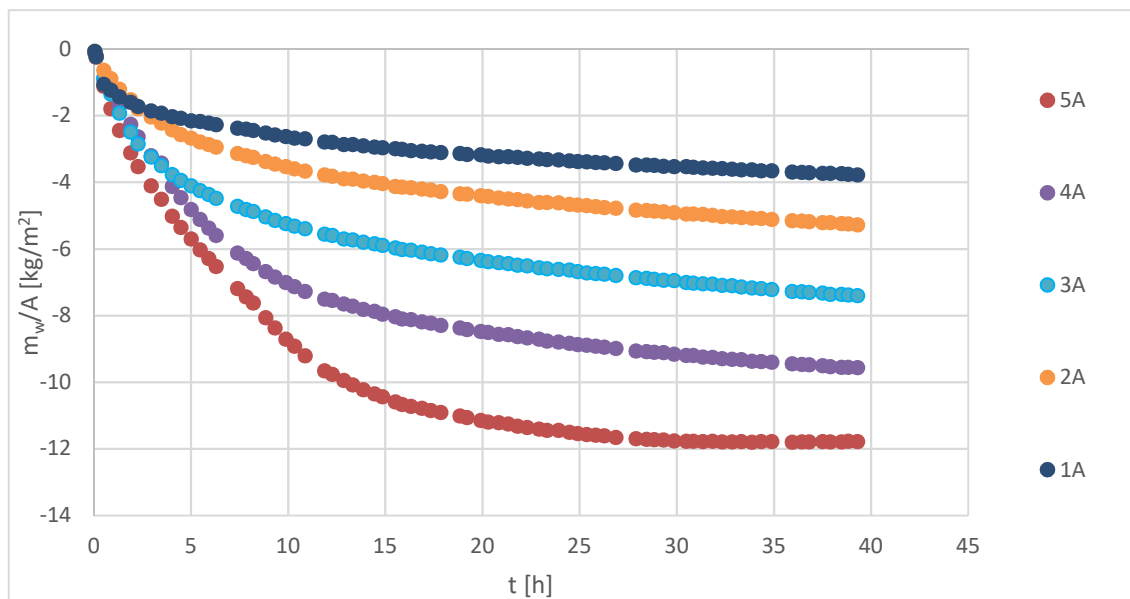
#### 4.3.6. Zkouška vysychání

Pro zkoušku vysychání byly použity vzorky ze zkoušky nasákavosti (vzorky N E ošetřené hydrofobizačním přípravkem). Vzorky byly před zkouškou vysychání po dobu jednoho měsíce ponořeny v cca 10 mm vody. Těsně před vyjmutím vzorků z vody byla horní část vzorku přelepena bitumenovou páskou, tak aby docházel k přestupu vodních par mezi vzorkem a okolním prostředím pouze spodní neoblepenou stranou viz obrázek 87. Po vyjmutí z vody byla plochy vzorků, které byli v kontaktu s vodou, osušeny molitanovou kuchyňskou utěrkou. Poté byly vzorky otočeny vzhůru nohama zanechány za pokojové teploty a relativní vlhkosti vzduchu 30-60 % ponechány procesu vysychání.



Obrázek 87 - Vzorky upravené pro zkoušku vysychání

Vysychání vzorků bylo monitorováno 40 dní od započetí experimentu. V tomto období byly vzorky po cca dvanácti hodinách váženy. Hmotnostní úbytek vzorků v čase je zaznamenán v grafu na obrázku 88. Vysychání vzorků z dlouhodobého pohledu probíhalo zcela dle předpokladu. Vzorky s menším podílem cementu vysychaly rychleji, než vzorky s vyšším podílem cementu. Tento trend byl narušen jen v prvních dvou dnech, kdy například vzorek 1A vysychal rychleji, než vzorek 2A i přesto, že má v sobě vyšší podíl cementu. Tento jev byl opět přisouzen nerovnosti strany vzorku vystavené vzduchu. Vzorek 1A má dle vizuálního ohledání více nerovností a tedy větší plochu pro výpar. Po dvou dnech, kdy se vypaří větší množství vody z povrchové vrstvy vzorku a vzorek se musí zbavit vody uložené v hlubších vrstvách, se zde začíná více projevovat vliv součinitel transportu kapalné vlhkosti a difuzní propustnost vzorku a křivky vysychání se začínají chovat dle předpokladu. Z grafu je patrné, že rovnovážného stavu za dobu monitorování dosáhl pouze vzorek OM5.

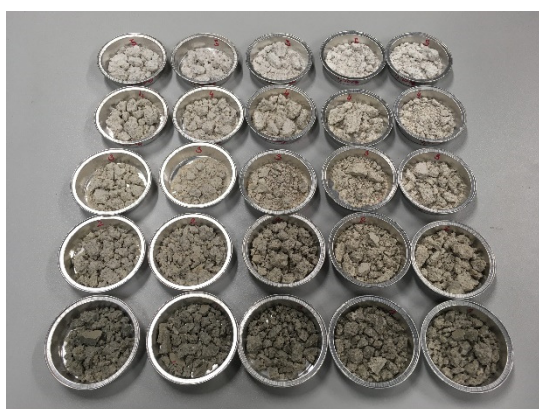


Obrázek 88 - Graf porovnávající průběhy vysychání

#### 4.3.7. Zkouška pro stanovení sorpčních křivek

Sorpční křivka charakterizuje rovnovážný stav mezi relativní vlhkostí vzduchu a vlhkostí materiálu. Pro stanovení sorpčních křivek omítkových malt byla využita exsikátorová metoda.

Sorpční křivka byla stanovena v 5 bodech a to 23 %, 43 %, 60 %, 85 % a 97 % relativní vlhkosti vzduchu. Pro urychlení průběhu zkoušky byl od každého druhu omítky vytvořen zvláštní vzorek pro každou relativní vlhkost. Vzorky byly vytvořeny hrubým nadrcením kvádrů. Drť pak byla rozdělena do předem zvážených hliníkových misek, tak aby se v každé misce nacházel vzorek o minimální hmotnosti 10 gramů.



Obrázek 89 - Vzorky omítkových malt pro zkoušku stanovení sorpčních křivek



Obrázek 90 - Vzorek omítkové malty OM1 pro zkoušku stanovení sorpčních křivek

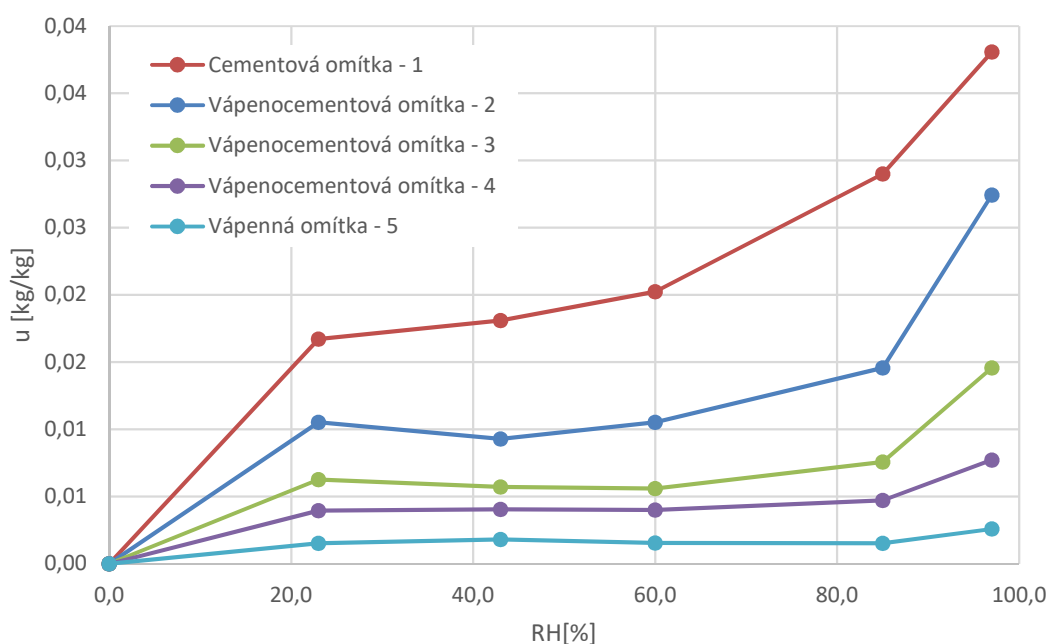


Vzorky byly následně umístěny do exsikátorů společně s nasycenými roztoky soli. Společně se vzorky a nasycenými roztoky soli byly do exsikátorů vloženy také zařízení měřící teplotu a relativní vlhkost vzduchu, díky čemuž bylo kontrolováno, zdali je nasycený roztok soli schopen udržet v exsikátoru požadovanou relativní vlhkost.

Požadovaná RH	nasycený roztok soli
23%	CH <sub>3</sub> COOK
43%	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>
60%	NaBr
85%	KCl
97%	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>

Tabulka 16- Soli použité pro udržení požadované RH

Vzorky byly následně po 3-4 dnech váženy a jejich váha zaznamenávána. Poté co se váhy jednotlivých vzorků 2 měření po sobě nelišila víc jak o 1 %, tak byly vzorky prohlášeny za ustálené a byli přesunuty do sušičky, kde byly sušeny při teplotě 105 °C. Vzorky byli následně průběžně váženy a poté co se váhy jednotlivých vzorků 2 měření po sobě nelišila víc jak o 1 %, tak byly vzorky prohlášeny za ustálené.



Obrázek 91- Graf sorpčních křivek omítkových malt

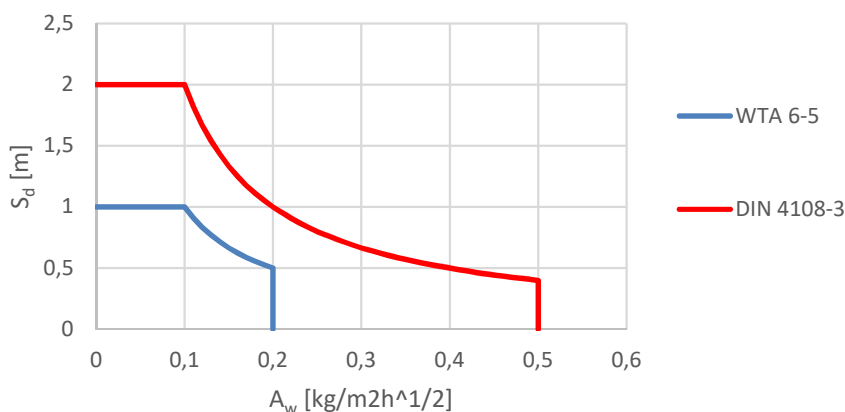
#### 4.3.8. Zatřídění omítkových malt dle normy DIN 4108-3 a předpisu asociace WTA

Na vnější omítkové souvrství zděných stěn, na kterých je instalován systém vnitřního zateplení, jsou německou normou DIN 4108-3 a předpisem 6-5 vědeckotechnické společnosti pro sanace staveb a péči o památky (WTA) kladeny zvláštní nároky na jejich absorpční koeficientu vody  $A_w$  [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1/2}$ ] a ekvivalentní difuzní tloušťku  $S_d$  [m] [20]. Přesněji jde o stanovení maximálních hodnot ekvivalentní difuzní tloušťky, které může





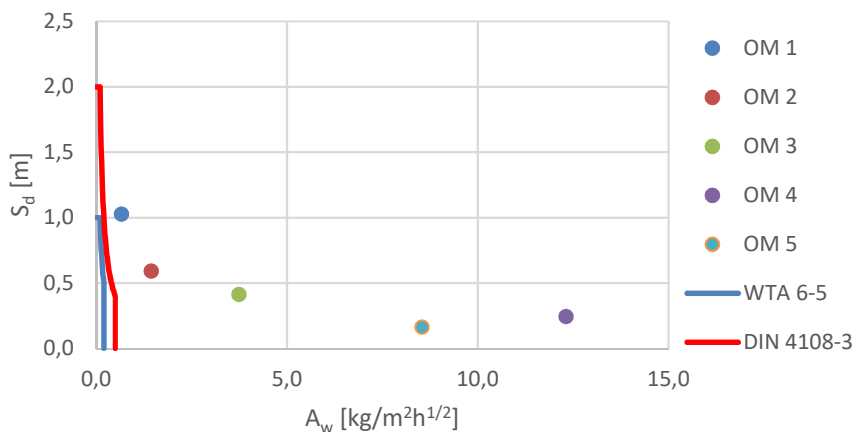
venkovní omítkové souvrství nabývat v závislosti na jeho absorpčním koeficientu vody. Německá norma DIN 4108-3 pro vnější omítkovou vrstvu stanovuje následné omezení:  $A_w < 0,5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ,  $S_d < 2,0 \text{ m}$  a  $A_w \cdot S_d < 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ . Předpis WTA 6-5 klade na vnější omítkové souvrství ještě vyšší nároky:  $A_w < 0,2 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$ ,  $S_d < 1,0 \text{ m}$  a  $A_w \cdot S_d < 0,1 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{1/2}$  [21]. V grafu na obrázku 71 jsou graficky znázorněny maximální hodnoty, který může absorpční koeficientu vody a ekvivalentní difuzní tloušťka vnějšího omítkového souvrství pro dané předpisy nabývat.



Obrázek 92 - Graf závislosti  $S_d$  na  $A_w$

Jelikož parametr zohledňující faktor difuzní propustnosti vnější omítkové vrstvy je ekvivalentní difuzní tloušťka, a nikoliv faktor difuzního odporu materiálu, tak je výhodnější pro splnění požadavků používání slabších vrstev vnějšího omítkového souvrství.

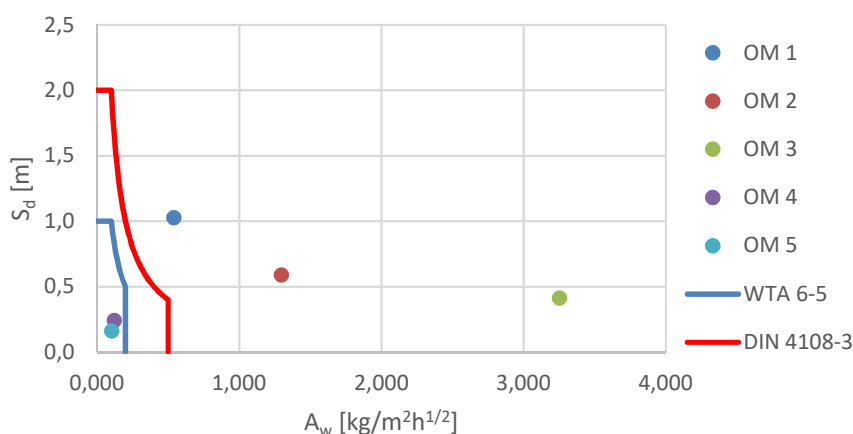
V grafu na obrázku 93 jsou vyneseny hodnoty pro omítkové malty OM1-OM5 neošetřené hydrofobizačním nátěrem. Hodnoty  $S_d$  jsou stanoveny pro vrstvu tloušťky 20 mm. Z grafu je evidentní, že ani jedna z omítkových malt nesplňuje ani mírnější požadavky německé normy DIN 4108-3. Dále je z grafu zřetelné, že hlavním důvodem, proč omítky nesplňují požadované parametry, není difuzní odpor omítkových vrstev, ale jejich vysoké hodnoty nasákavosti.



Obrázek 93 - Graf závislosti  $S_d$  na  $A_w$  omítkových malt NEOšetřených hydrofobizačního přípravkem



V případě vzorků, které byly ošetřeny hydrofobizačním přípravkem Lukofol 39, se všechny vzorky přiblížily požadovaným hodnotám viz obrázek 94. U omítek OM4 a OM5 byly použity absorpční koeficienty vody z druhého intervalu. Omítky OM4 a OM5 pro hydrofobizaci dokonce plní přísnější předpis WTA 6-5. Pro plnění parametrů požadovaných předpisem WTA 6-5 u běžných receptur omítkových malt je tedy jedna z možností jejich hydrofobizace. Stále se ale k diskusi nabízí, jaká je skutečná životnost hydrofobizace materiálu, případně jak se vlastnosti hydrofobizované omítkové malty s časem a zatížením mění.



Obrázek 94 – Graf závislosti  $S_d$  na  $A_w$  omítkových malt ošetřených hydrofobizačního přípravkem

#### 4.3.9. Shrnutí naměřených hodnot parametrů omítkových malt

vzorek	Podíl jednotlivých složek			$\rho_{dry}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\emptyset$ [-]	$w_{sat}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$w_{cap}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu_{60\%-97\%}$ [-]	$\mu_{60\%-15\%}$ [-]	$A_w$ [kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> ]	$A_w$ (hydrofob.) [kg/m <sup>2</sup> s <sup>1/2</sup> ]
	cement	vápno	písek								
OM1	1	0	3	1877	0,249	249	140	51	48	0,011	0,009
OM2	1	1	6	1803	0,279	279	156	29	31	0,024	0,022
OM3	1	2	9	1799	0,280	280	157	21	23	0,062	0,054
OM4	1	5	18	1775	0,290	290	159	12	15	0,205	0,002-0,121
OM5	0	1	3	1736	0,306	306	177	8	-	0,142	0,002-0,01

Tabulka 17- Souhrn vlastností omítkových malt



## 5. Tepelně vlhkostní simulace experimentu s variantami omítkových malt

Za účele získání bližších informací o závislosti vlhkostního režimu systému s vnitřním zateplením na vlastnostech venkovní omítky, byly ve výpočetním softwaru WUFI Pro na základě laboratorních měření popsanych v předchozí kapitole vytvořeny materiálové modely omítkových malt OM1-OM5. Těmito modely omítek pak bylo nahrazena omítková vrstva ve vybraných modelech skladeb vytvořených dle experimentu probíhajícího na UCEEBu. Konstrukce pro tyto simulace byly vybrány 2. Jako zástupce difuzně uzavřených skladeb byla vybrána skladba S1b s dřevovláknitou izolací tloušťky 140 mm a jako difuzně uzavřených skladeb byla vybrána konstrukce S3 s izolací z vakuových panelů.

Pro získání informací o stěně se silným zatížením větrem hnaným deště a zároveň s minimálním zatížením, byly zadány okrajové podmínky pro oblast Holzkirchen v Bavorsku a následně byly vytvořeny simulace pro fasádu orientovanou na jihozápad a fasádu orientovanou na severovýchod.

Data ze simulací byla následně pomocí grafických výstupů mezi sebou porovnána.

### 5.1. Obecné nastavení modelu

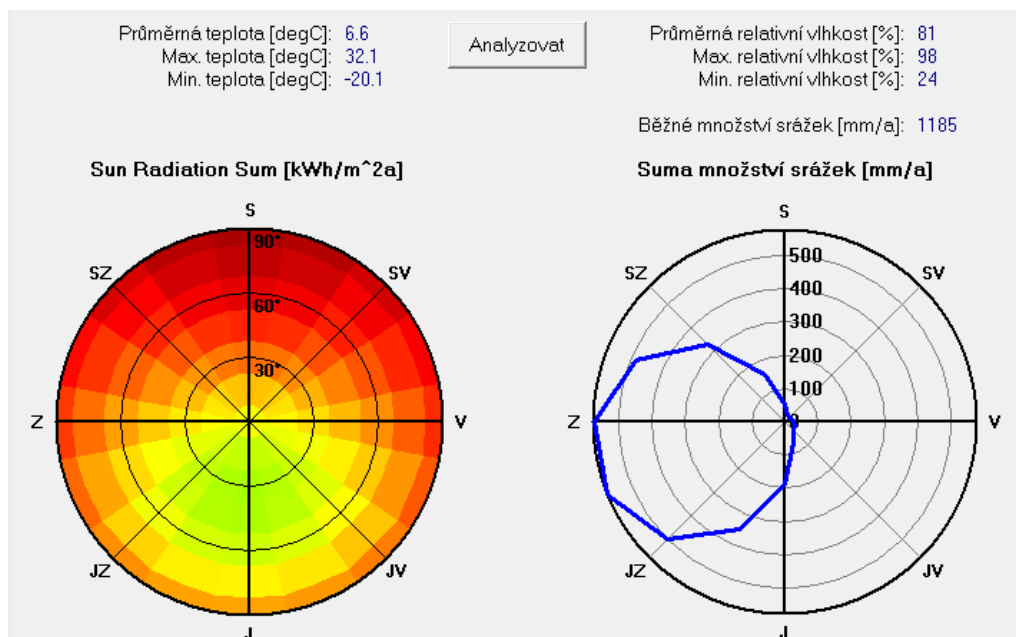
Výpočetní interval byl pro jednodušší porovnání okrajových podmínek v oblasti Holzkirchen s okrajovými podmínky na UCEEBu stanoven shodný jako v kapitole 3 a to od 07.03.2015 00:00 do 30.09.2017 00:00. Ostatní obecné nastavení bylo nastaveno shodně jako v simulacích z kapitoly 3. Byl tedy zvolen hodinový krok výpočtu. Způsob výpočtu byl nastaven na zohlednění transportu tepla a vlhkosti. Pro tepelnou vodivost byla nastavena závislost na teplotě a vlhkosti. Numerické parametry byly nastaveny na vyšší přesnost a adaptivní konvergenci. Součinitele přestupů tepla byly nastaveny na hodnotu 0,0588 m<sup>2</sup>K/W pro vnější povrch a 0,125 m<sup>2</sup>K/W pro vnitřní povrch.

### 5.2. Klimatické okrajové podmínky

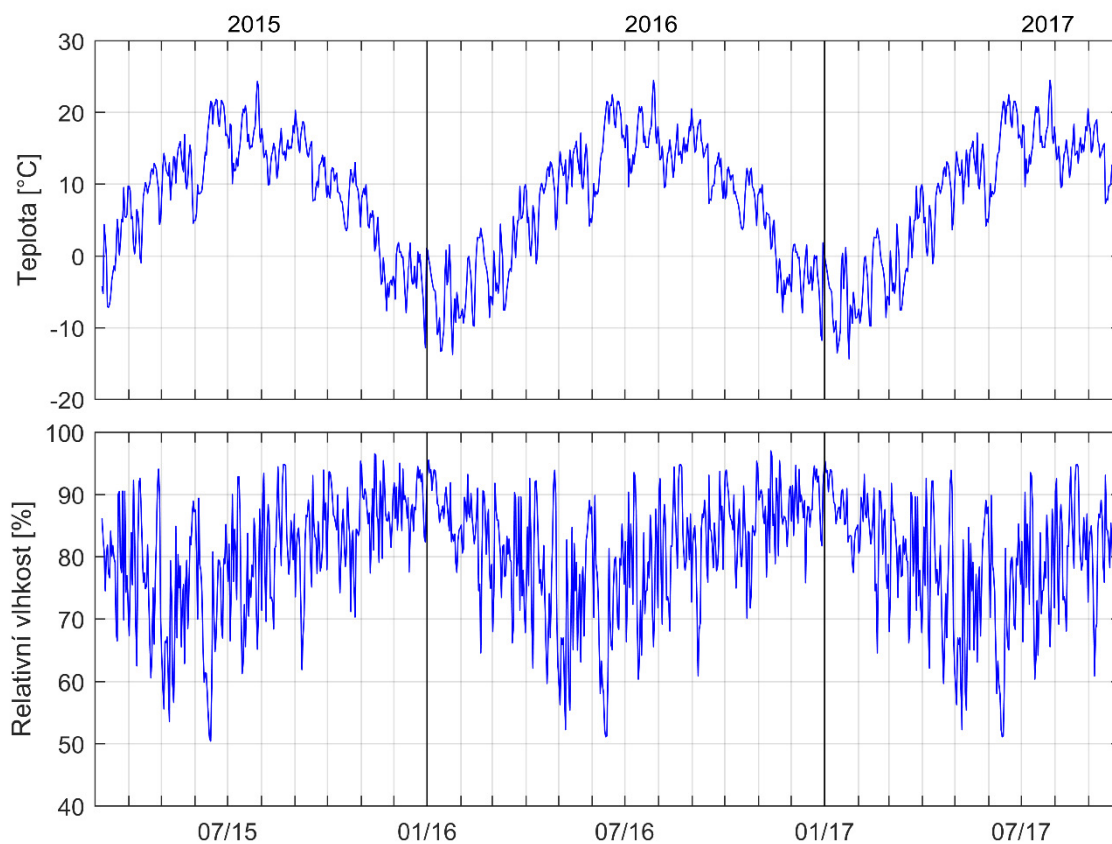
Pro tyto simulace byly použity klimatické okrajové podmínky naměřené v obci Holzkirchen, která se nachází v hornobavorském kraji Miesbach ve spolkové zemi Bavorsko. Holzkirchen se nachází nadmořské výšce 691 m. Průměrná roční teplota je zde cca o 4 °C nižší než v Praze a roční úhrn srážek je zde cca dvojnásobně vyšší než v Praze. Celoročně zde převládá západní až jihozápadní vítr viz obrázek 95. Větre hnaný déšť na fasády byl spočítán za pomoci softwaru WUFI a jeho hodnoty jsou zobrazeny na obrázcích 97 a 98. Úhrn srážek za sledovaný experiment dopadající na jihozápadní fasádu je roven 699 mm/m<sup>2</sup>. Na fasádu severovýchodní je to pak necelých 24 mm/m<sup>2</sup>. Okrajové podmínky pro tento výpočet byly zadány následující: parametr R<sub>1</sub> zohledňující naklonění fasády vůči svislé rovině byl zadán roven 0 [-], parametr R<sub>2</sub> zohledňující výšku monitorujícího bodu na fasádě vůči terénu byl zadán roven 0,1 [m/s] (hodnota 0,1 [m/s] přibližně odpovídá výšce 10-20 m).



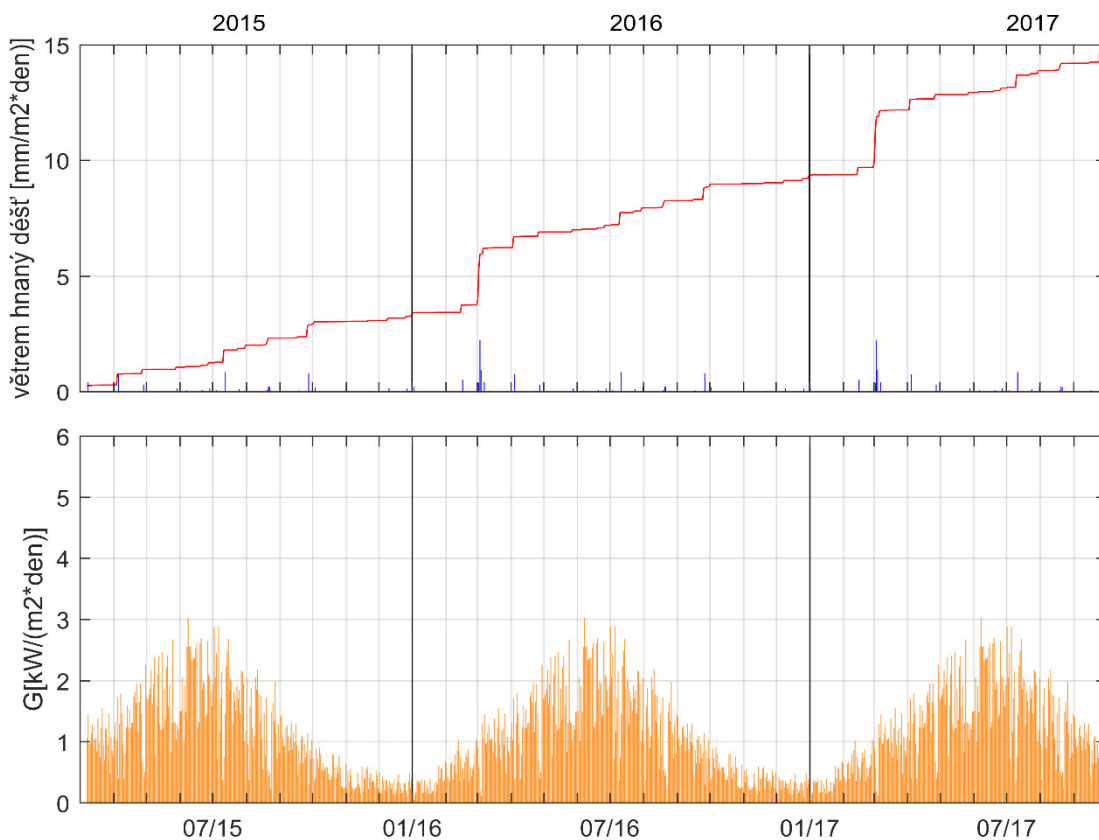
Klimatické okrajové podmínky vnitřního prostředí byly nastaveny po celou dobu simulace na konstantní hodnoty. Teplota interiérového vzduchu byla nastavena na hodnotu 21 °C a relativní vlhkost interiérového vzduchu byla nastavena na hodnotu 50 %.



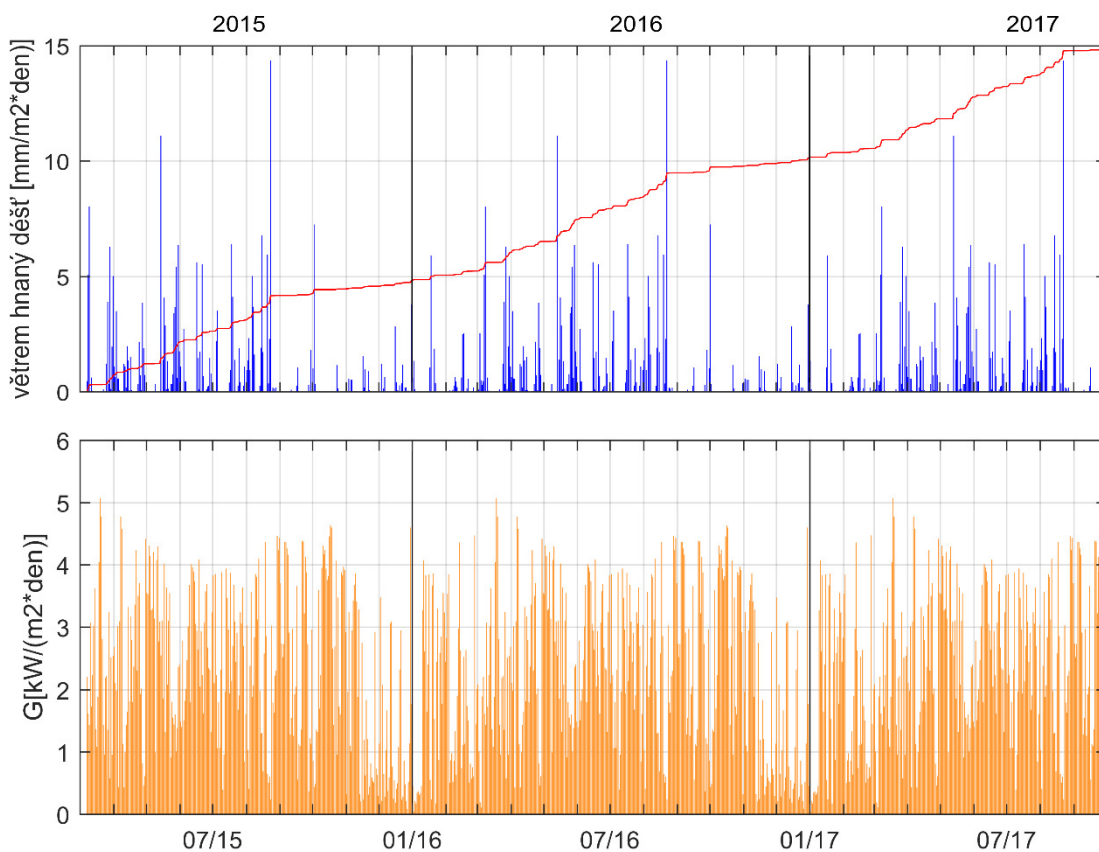
Obrázek 95 – Schéma klimatických okrajových podmínek oblasti Holzkirchen



Obrázek 96 – Grafy průběhu teploty a relativní vlhkosti vzduchu v exteriéru



Obrázek 97 – Grafy denních úhrnů větrem hnaného deště a slunečního ozáření dopadajícího na severovýchodně orientovanou fasádu, Pozn: červená křivka zobrazuje bezrozměrný přírůstek větrem hnaného deště



Obrázek 98 – Grafy denních úhrnů větrem hnaného deště a slunečního ozáření dopadajícího na jihozápadně orientovanou fasádu, Pozn: červená křivka zobrazuje bezrozměrný přírůstek větrem hnaného deště



### 5.3. Materiálové vlastnosti

Materiálové charakteristiky omítkových malt byly zadány dle laboratorních měření omítkových vzorků. Součinitele tepelné vodivosti materiálu byli u všech omítek nastaveny shodné jako u omítky původní omítky NOVIPRO. Materiálové charakteristiky ostatních materiálů byly ponechány stejné jako v modelech z kapitoly 3. Součinitele transportu kapalné vlhkosti sání  $D_{ws}$  [ $m^2/s$ ] byl spočítán pro jednotlivé omítkové vzorky dle výpočetního vztahu:

$$D_{ws} = 3,8 \cdot \left( \frac{A_w}{w_{cap}} \right)^2 \cdot 1000 \cdot \left( \frac{w}{w_{cap}} - 1 \right) \quad [m^2/s]$$

Kde  $D_{ws}$  [ $m^2/s$ ] je součinitel transportu kapalné vlhkosti sáním,  $A_w$  [ $kg/m^2s^{1/2}$ ] součinitel absorpce vody,  $w_{cap}$  [ $kg/m^3$ ] je vlhkost kapilárně nasyceného vzorku a  $w$  [ $kg/m^3$ ] je množství vlhkosti obsaženém ve vzorku v ustáleném stavu při relativní vlhkosti, pro kterou je součinitel  $D_{ws}$  počítán.

Hodnota  $D_{ws}$  byla vždy spočítána pro  $w$  odpovídající relativní vlhkosti 80 % a pro  $w$  rovno  $w_{cap}$ . Průběh mezi těmito dvěma hodnotami byla uvažován lineární. Hodnoty součinitele transportu kapalné vlhkosti přerozdělení  $D_{ww}$  [ $m^2/s$ ] byl pro  $w$  odpovídající relativní vlhkosti 80 % uvažovány shodné s hodnotou součinitele  $D_{ws}$  a pro  $w$  rovno  $w_{cap}$  uvažovány jako 1/10 hodnoty součinitele  $D_{ws}$ . Průběh mezi těmito dvěma hodnotami byla uvažován opět lineární.

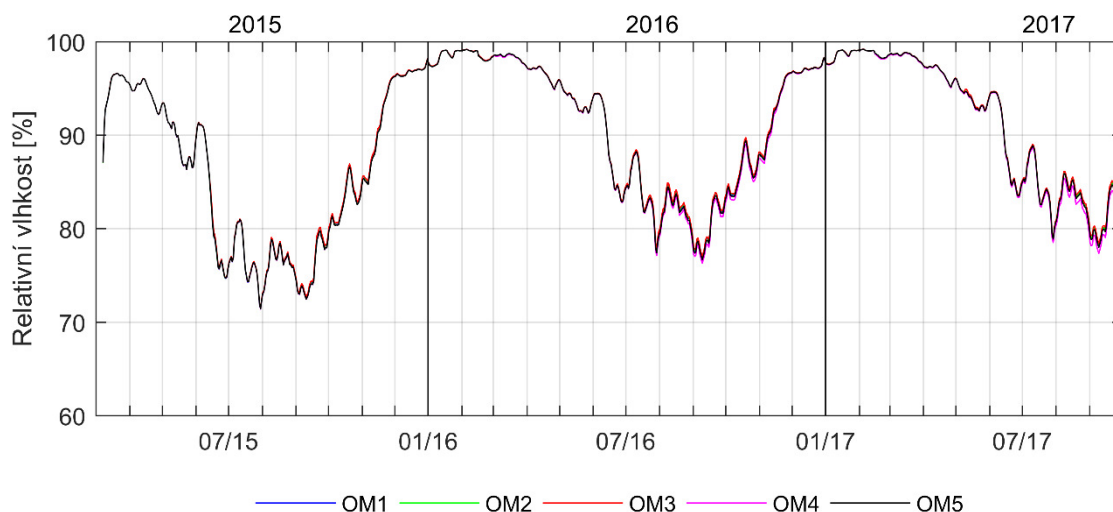
Počáteční teplota na počátku simulace byla nastavena konstantní v celém průřezu a to hodnoty 20 °C. Veškeré materiálové charakteristiky všech materiálů jsou zobrazeny pomocí tabulek v příloze 2.



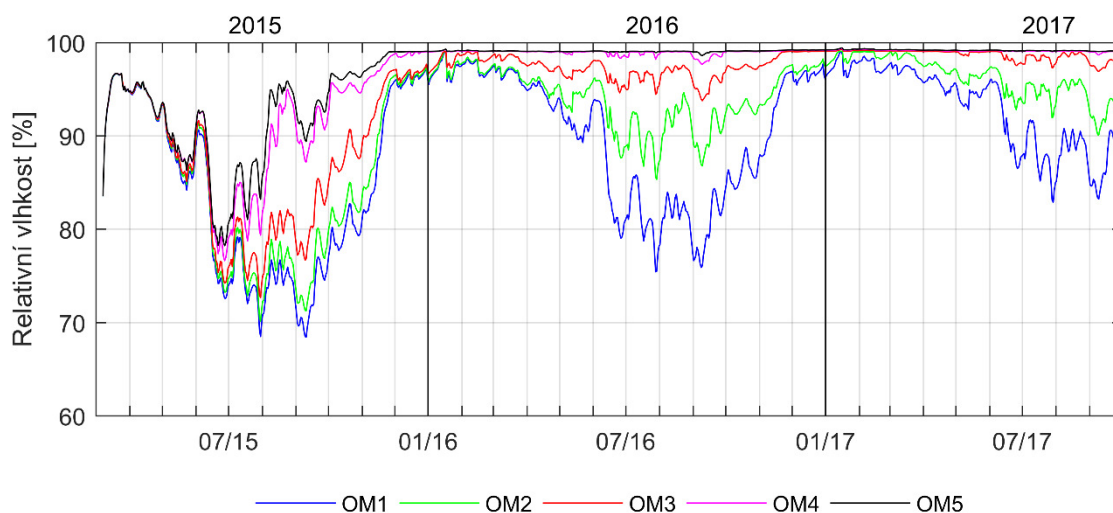


## 5.4. Porovnání výsledků simulace

### 5.4.1. Skladba S1b - UdiIN RECO 140 mm



Obrázek 99 – Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na severovýchod



Obrázek 100 – Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad

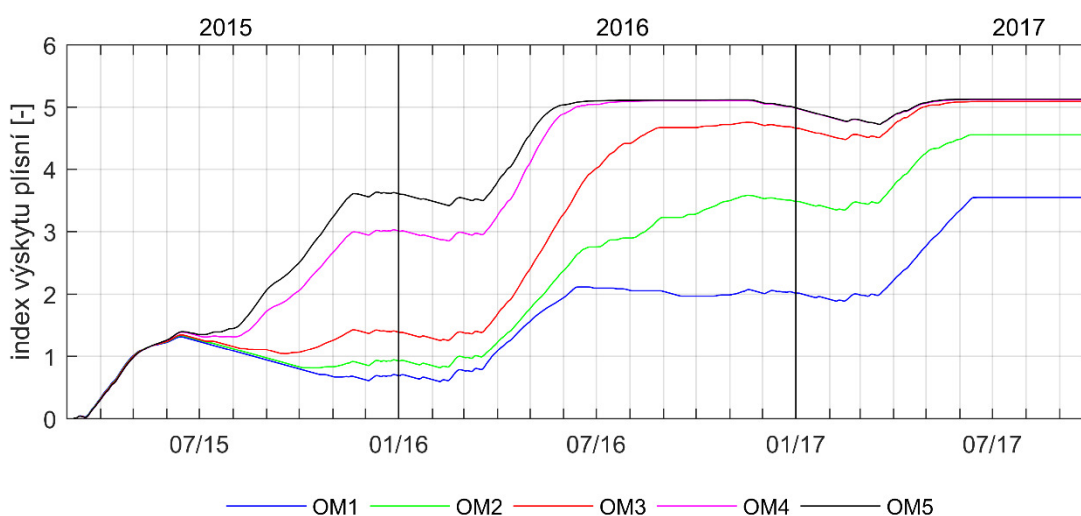
Z grafu na obrázku 99 je patrné, že vliv vlastností exteriérové omítky na vlhkostní režimu systému orientovaný severovýchodním směrem je minimální. Drobné rozdíly jsou pozorovatelné pouze v letním období. Během necelých 3 let, pro které byly simulovány každý rok shodné okrajové podmínky, je patrné, že s každým rokem relativní vlhkost na rozhraní izolace a zdiva roste a v dlouhodobějším horizontu by konstrukce mohla mít vlhkostní problém i v případě orientace severovýchodním směrem.

Průběhy relativních vlhkostí na rozhraní izolace a zdiva u fasády orientované jihozápadním směrem oproti severovýchodnímu vykazují velké rozdíly viz obrázek 100. Průběhy relativních vlhkostí se až do půlky června drží na velmi podobných hodnotách. V půli června však dochází k prudkému oteplení a tím k vyrovnání koncentrací vodní páry venkovního a vnitřního vzduchu. Dotace vlhkosti z interiérového vzduchu do konstrukce stěny přestává být dominantním zdrojem a začíná se více projevovat vlhkost



z větrem hnaného deště. V tomto období se tedy křivky relativní vlhkosti začínají rozcházet a nabývat různých hodnot. Pořadí křivek však dle očekávání odpovídá množství cementu obsažené v omítkových maltách jednotlivých skladeb. Omítky s vyšším obsahem cementu, a tedy nižším součinitelem nasákavosti během deště do sebe nasají méně vody než omítky s nižším obsahem cementu. Z rozdílu křivek OM4 a OM5 se lze domnívat, že nasákavost omítky však nebude jediným dominantním parametrem, který rozhoduje o množství vlhkosti, které omítka do zdiva propustí. Z kapitoly 4.3.4. víme, že u omítky OM5 byl i přes nižší obsah cementu naměřen lehce vyšší součinitel absorpce vody než u omítky OM4. Přesto po půli června křivka relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva u skladby s omítkovou vrstvou OM5 nabývá vyšších hodnot než u skladby s omítkovou vrstvou OM4. Lze tedy usuzovat, že vliv na množství vodní páry, které se dostalo přes omítkovou vrstvu do zdiva, má také hodnota poměru vlhkosti kapilárního nasycení omítky ku součiniteli absorpce vody omítky.

Vlivem snížení venkovní teploty v listopadu se rozdíly průběhu relativní vlhkosti jednotlivých skladeb minimalizují. Což je způsobeno jednak tím, že dominantním zdrojem vlhkosti se stává opět interiérový vzduch, ale také tím, že křivky skladeb s omítkami OM4 a OM5 se zastavili na hodnotách kolem 99 % a to z toho důvodu, že sorpční křivka dřevovláknité izolace v tomto bodě prudce roste, a tedy i přes měnící se koncentraci vodní páry se relativní vlhkost mění jen minimálně.

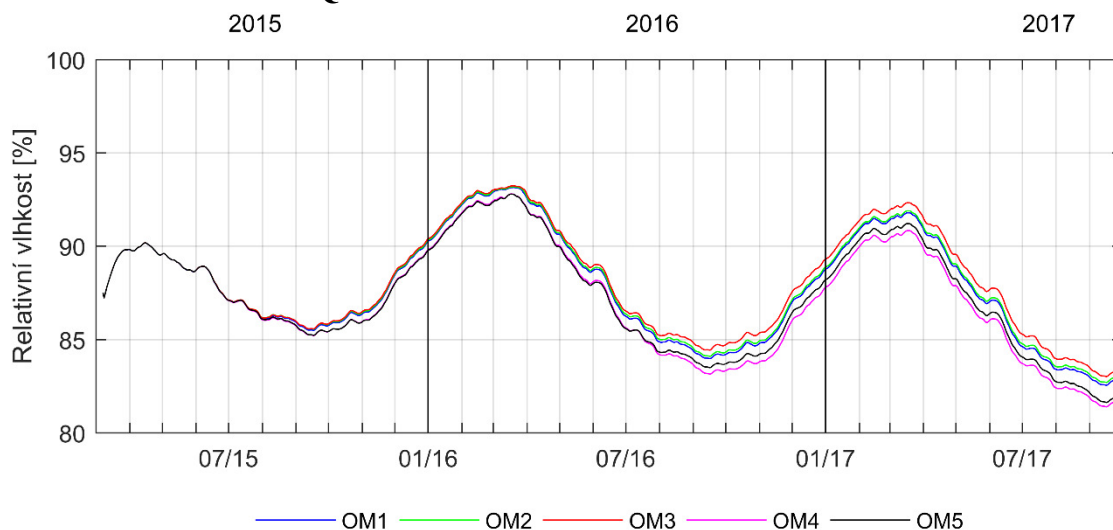


Obrázek 101 – Graf indexu rizika růstu plísní na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad

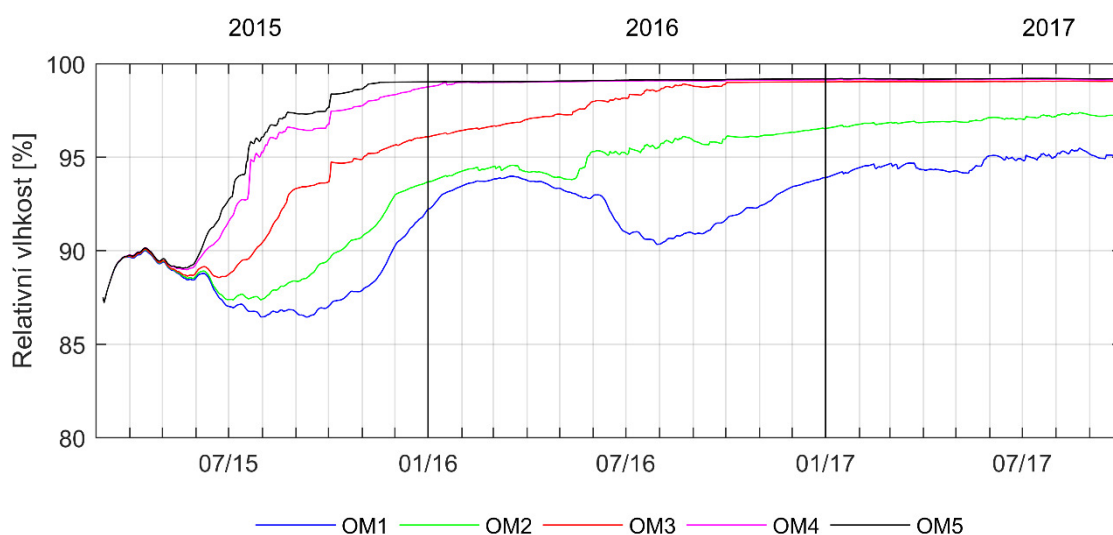
Z grafu průběhu indexů rizika růstu plísní na rozhraní izolace a zdiva zobrazeným na obrázku 76 je patrné, že všechny skladby se v dlouhodobém pohledu potýkají s vysokým rizikem výskytu plísně. Skladby s omítkami OM5 a OM4 se již po roce a čtvrt dostávají nad hodnotu 5, která je definována 50 % pokrytím plochy plísněmi sledovatelnými pouhým okem. Po dalším roce se nad tuto hodnotu dostává i skladba s omítkou OM3 a vzhledem k průběhu indexu v předchozích letech se dá usuzovat, že by se v dalších dvou letech nad tuto hodnotu mohli dostat i skladby s omítkami OM2 a OM1.



### 5.4.2. Skladba 3 - Va-Q-Tec



Obrázek 102 – Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na severovýchod



Obrázek 103 – Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad

Z obrázku 102 je patrné, že na vlhkostní režim konstrukce zateplené vakuovými panely má druh omítkové malty vyšší vliv než na konstrukci zateplenou dřevovláknitou izolací. Následkem vysokého difuzního odporu mezi zdivem a interiérem je rozhraní izolace a zdiva difuzně uzavřeného systému více ovlivňováno podmínkami v exteriéru. Před simulací bylo očekáváno, že na vlhkostní režim konstrukce orientované na severozápad, kde je zatížení větrem hnaného deště na fasádu přibližně třicetkrát menší než na fasádu jihozápadní, bude mít z parametrů omítkových malt největší vliv difuzní propustnost materiálu. Z obrázku 102 však můžeme vyvodit, že se tato úvaha nepotvrdila. Na konci experimentu byla relativní vlhkost na rozhraní izolace a zdiva u konstrukce s omítkovou maltou OM4 a naopak nejvyšší u konstrukce s omítkou maltou OM3. Lze se tedy domnívat, že i při takto malém zatížení větrem hnaným deštěm není rozhodujícím parametrem pouze difuzní propustnost, ale kombinace faktoru difuzní propustnosti a součinitel nasákavosti omítkové malty.



U difuzně otevřené konstrukce fasády orientované jihozápadním směrem jsme odůvodnily vyšší hodnoty křivky OM5 oproti křivce OM4 vyšší hodnotou kapilárního obsahu nasycené vlhkosti. V případně fasády orientované severovýchodní směrem to již neplatí, protože během slabých dešťů se omítka nedostane do stavu kapilárního nasycení, a tak je zde zas rozhodujícím parametrem součinitel nasákavosti.

V případě difuzně otevřeného systému s fasádou orientovanou na severozápad jsme sledovali meziroční přírůst relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva. U difuzně uzavřeného systému je tomu naopak. S přihlédnutím na fakt, že se navíc jedná o anorganický materiál, se v případě severovýchodní fasády jeví difuzně uzavřená skladba S3 ve všech variantách omítkových malt jako bezpečnější systém.

V případě fasády orientované jihozápadním směrem je pořadí křivek relativních vlhkostí na rozhraní izolace a zdiva shodné jako u difuzně otevřeného systému. Tedy v pořadí závislém na obsahu cementové složky v omítkové maltě. Na rozdíl od systému s dřevovláknitou izolací během letních období není patrný výraznější pokles relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva. Výjimkou je jen léto 2016 u skladby s omítkou maltou OM1.

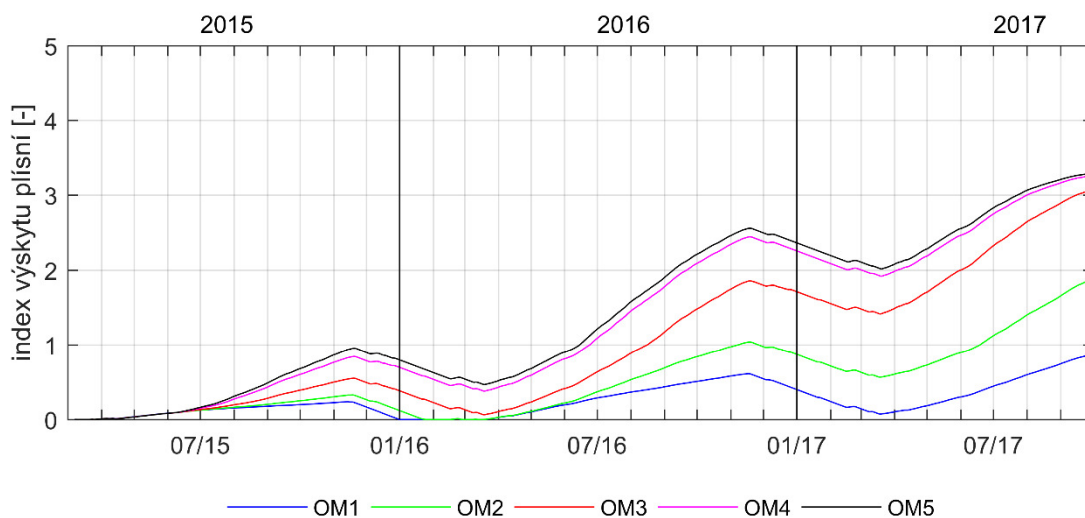
Zajímavé je sledovat, jak se stejné zatížení deštěm v různých letech projevuje na průběhu relativních vlhkostí na rozhraní izolace a zdiva. Sledujeme-li například rekce křivek relativních vlhkostí OM1 a OM2 na deštivé období v druhé půli května v roce 2015, tak nevidíme výraznějších rozdílů. V roce 2016 však křivka skladby s omítkovou maltou OM2 reaguje oproti skladbě s omítkou OM1 mnohem agresivněji. Lze se domnívat, že důvodem je fakt, že oproti roku 2015 je ve zdivu akumulované větší množství vody a součinitel transportu kapalné vlhkosti roste s vlhkostí materiálu.

Dalším zajímavým intervalem je období mezi červnem a zářím. V případě, že se křivky relativních vlhkostí pohybují pod cca 94 %, tak na toto období reagují monotónním způsobem (průběh křivky je zaoblený) s velkými globálními extrémy. Když jsou křivky ve vyšší hodnotách relativní vlhkosti, tak v tomto období reagují velmi pružně s lokálními extrémy (průběh křivky je zubatý), ale s menšími globálními extrémy. Tento jev je pravděpodobně také způsoben tím, že vlivem vyšší vlhkosti ve zdivu je rychlejší transport vlhkosti zdivem a lokální extrémy na křivce relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva jsou tak reakcemi na větrem hnaný déšť a oslunění fasády. Dostane-li se však křivka k cca 99 % relativní vlhkosti, kde sorpční křivka zdiva začíná prudce růst, tak přísun vlhkosti z větrem hnaného deště s průběhem křivky relativní vlhkosti pohne jen zanedbatelně.

Z grafu průběhu indexů rizika růstu plísní na rozhraní izolace a zdiva zobrazeným na obrázku 104 můžeme konstatovat, že i přes vyšší průběhy relativních vlhkostí na rozhraní izolace a zdiva je konstrukce s vakuovými panely oproti konstrukci s dřevovláknitou izolací méně ohrožena růstem plísní. Jak již bylo řečeno, tak hlavním důvodem je, že se nejedná o organický materiál. V průběhu necelých tří let, se konstrukce s omítkovými maltami OM5, OM4 a OM3 dostaly na hranici indexu 3, která je definována vizuálními nálezy na povrchu, menšími jak 10% pokrytí, nebo nálezy sledovatelné mikroskopem pokrývající plochu menší jak 50%. Z průběhu křivek OM4 a OM5 v září roku 2017 a



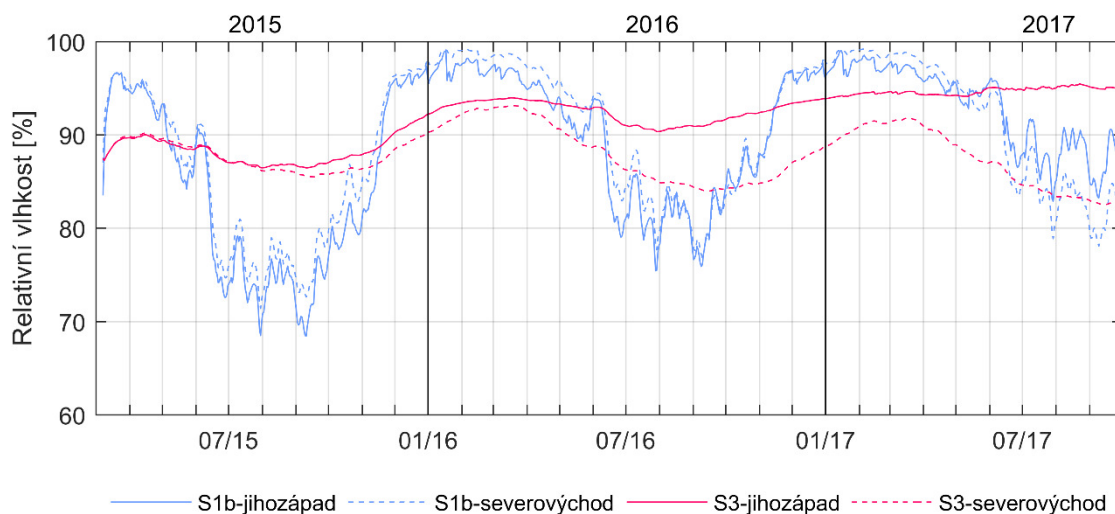
s přihlédnutím na průběh křivek v roce 2016, kdy se růst zastavil až v listopadu, lze se domnívat, že se riziko index ustálí na hodnotě cca 3,5.



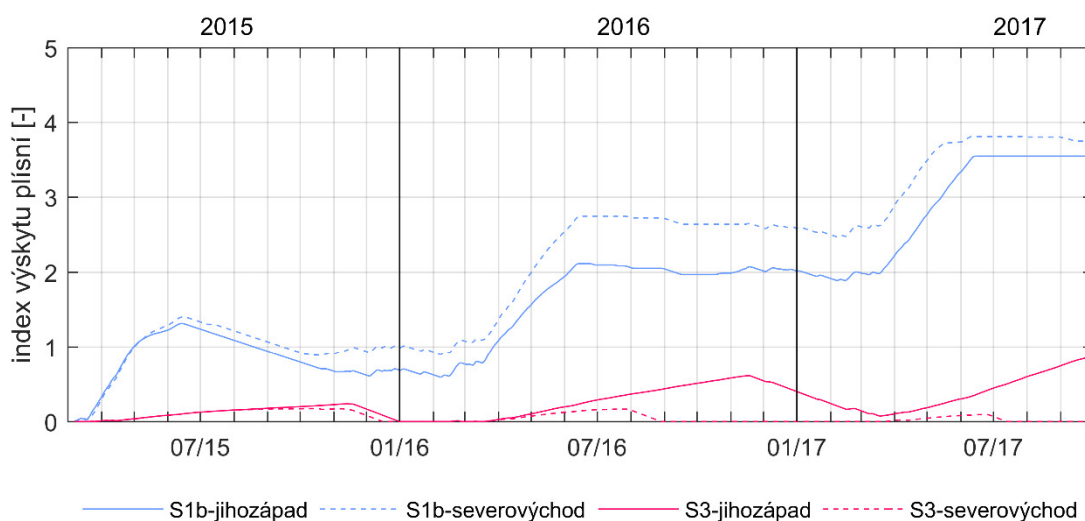
Obrázek 104 – Graf indexu rizika růstu plísní na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad



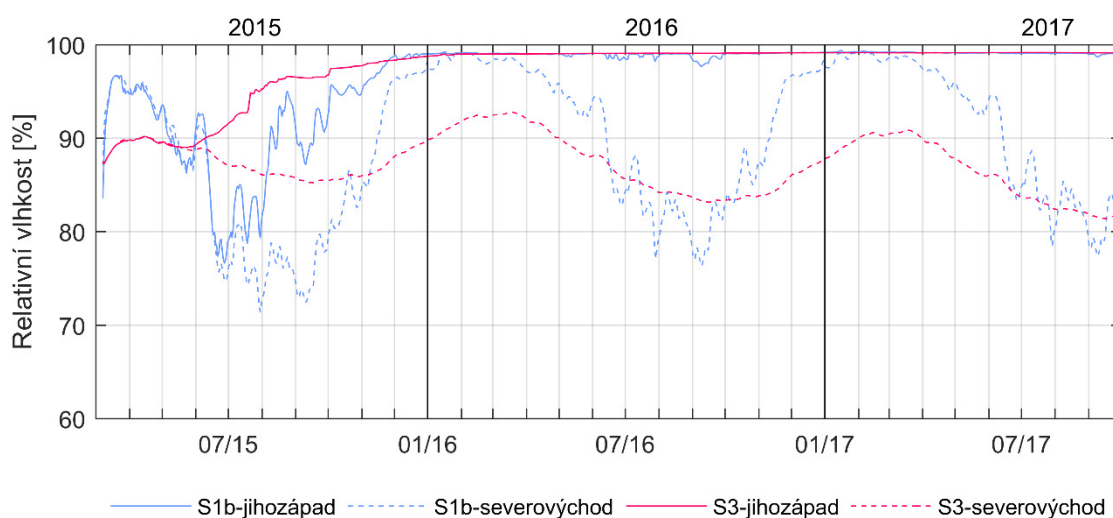
### 5.4.3. Porovnání orientací fasád a systému vnitřního zateplení



Obrázek 105 – Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva fasády s exteriérovou omítkou OMI

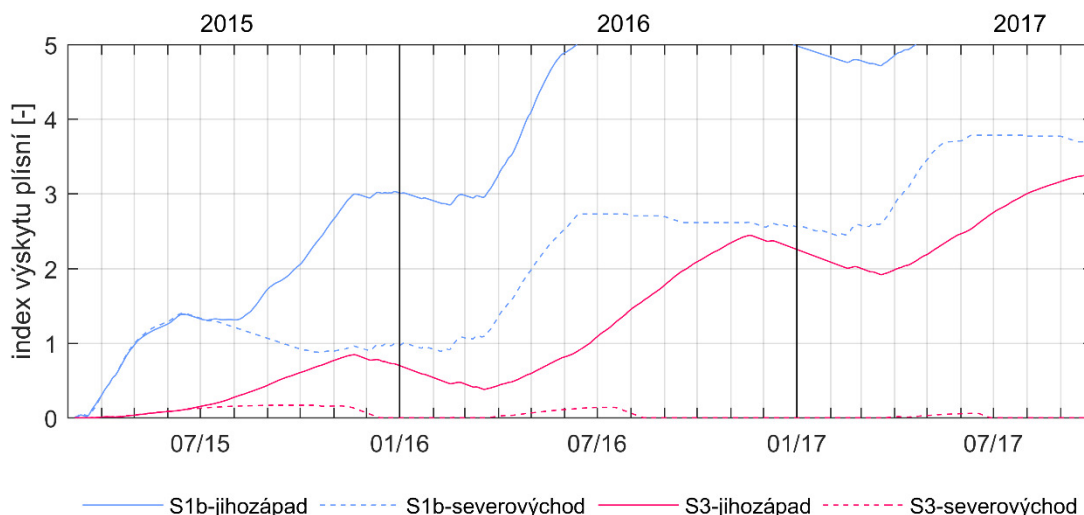


Obrázek 106 - Graf průběhu indexu výskytu plísní na rozhraní izolace a zdiva fasády s exteriérovou omítkou OMI



Obrázek 107 - Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva fasády s exteriérovou omítkou OM4





Obrázek 108 - Graf průběhu indexu výskytu plísní na rozhraní izolace a zdiva fasády s exteriérovou omítkou OM4

Na obrázcích 105-106 jsou zobrazeny grafy průběhů relativních vlhkostí a indexů rizika výskytu plísní na rozhraní izolace a zdiva pro variantu s omítkovou maltou OM1, která vykazovala nejnižší průběhy relativní vlhkosti pro jihozápadní fasádu. Na obrázcích 107-108 pak stejné průběhy, ale pro variantu s omítkovou maltou OM4, která vykazovala nejnižší průběhy relativní vlhkosti pro severovýchodní fasádu. Modře jsou v grafech zobrazeny průběhy v difuzně otevřeném systému s dřevovláknitou izolací a červeně průběhy v difuzně uzavřeném systému s vakuovými panely. Plnou čarou pak fasády orientované Jihozápadním směrem a tečkovanou čarou fasády orientované severovýchodním směrem.

V případě varianty s omítkovou maltou OM1 je průběh u difuzně otevřené konstrukce na obou fasádách velmi podobný. V prvním roce dokonce vykazuje severozápadní fasáda vyšší relativní vlhkost než fasáda jihozápadní. Z průběhu indexu růstu plísní se dokonce jihozápadní fasáda jeví jako bezpečnější. S přihlédnutím na průběhy relativní vlhkosti se lze domnívat, že v dalších letech už by tomu tak být nemuselo. V případě Difuzně uzavřeného systému jsou průběhy relativní vlhkostí na jednotlivých fasádách odlišnější. V případě indexů růstů plísní je dokonce rozdíl takový, že křivka jihozápadní fasády má z dlouhodobého pohledu rostoucí charakter a křivka severovýchodní fasády charakter klesající. Z toho lze usuzovat, že difuzně uzavřený systém je tedy náchylnější na orientaci fasády.

V případě varianty s omítkovou maltou OM4 zas vidíme velké rozdíly mezi severovýchodní a jihozápadní fasádou u obou systému. Je evidentní, že rozdíl, o který je bezpečnější použití omítkové malty OM4 na severovýchodní fasádě než omítky OM1, se ani zdaleka nevyrovná tomu, o kolik je nebezpečnější její použití oproti omítky OM1 na fasádě jihozápadní.



## 5.5. Mrazové porušení zdiva a omítkové vrstvy

S vnitřním zateplením roste také riziko poškození mrazem, a to omítkové vrstvy i stěny samotné. K tomu, aby k takovému poškození došlo, je potřeba splnit dvě podmínky. Jednak musí být v materiálu dostatečně nízká teplota, aby došlo ke změně skupenství vody obsažené v materiálu, a jednak musí být materiál dostatečně nasycen vodní parou, tak aby dosáhl kritického stupně nasycení  $S_{crit}$  [-], tedy aby v materiálu bylo takové množství vodní páry, při kterém dojde za dostatečně nízké teploty ke změně skupenství [22].

$$S_{crit} = \frac{w}{w_{cap}}$$

Kde  $S_{crit}$  [-] je kritický stupeň nasycení,  $w_{cap}$  [kg/m<sup>3</sup>] je vlhkost kapilárně nasyceného vzorku a  $w$  [kg/m<sup>3</sup>] je množství vlhkosti obsaženém v materiálu [22].

Materiál	$S_{crit}$
	[-]
cihla plná pálená	0,7
omítková malta OM1	0,9
omítková malta OM2	0,8
omítková malta OM3	0,75
omítková malta OM4	0,7
omítková malta OM5	0,6

Tabulka 18 - Tabulka uvažovaných hodnot kritického stupně nasycení pro výpočet rizika poškození mrazem

Kritická teplota ve výpočtu byla uvažována -4 °C. Nejdříve bylo zkoumáno riziko poškození zdiva. Jelikož z výpočetního softwaru WUFI Pro lze vyexportovat průběh vlhkosti materiálu pouze pro celou vrstvu, tak byla v modelech vrstva zdiva rozdělena na dvě části, a to na vrstvu tloušťky 0,295 m, která byla umístěna ke straně interiéru a na vrstvu tloušťky 0,005 m, která byla umístěna za vrstvu vnější omítky. Pro druhou jmenovanou pak byla ze softwaru exportovány průběhy teplot a vlhkosti. Z průběhu dat však bylo zjištěno, že ani jeden z modelů neplní v průběhu experimentu současně obě podmínky. Stejný postup byl aplikován na vrstvy omítkových malt OM1-OM5, ale se stejným výsledkem. Omítky s velkým podílem vápna se sice často dostávají nad kritický stupeň nasycení, ale zároveň se také rychle vlhkosti zbavují, takže než teploty klesnou k požadovaným hodnotám tak je v omítce již moc nízký stupeň nasycení. V případě omítky s vysokým podílem cementu, která schne déle než omítka s vysokým podílem vápna, se zas v zimním období ke kritickému stupni nasycení ani nepřiblíží.

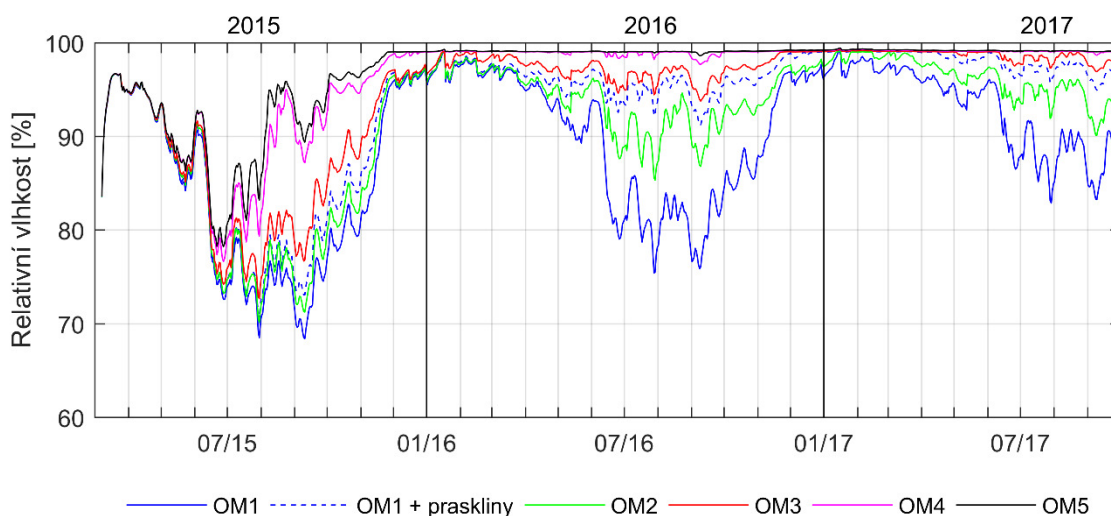


## 5.6. Simulace omítkové vrstvy OM1 s prasklinami

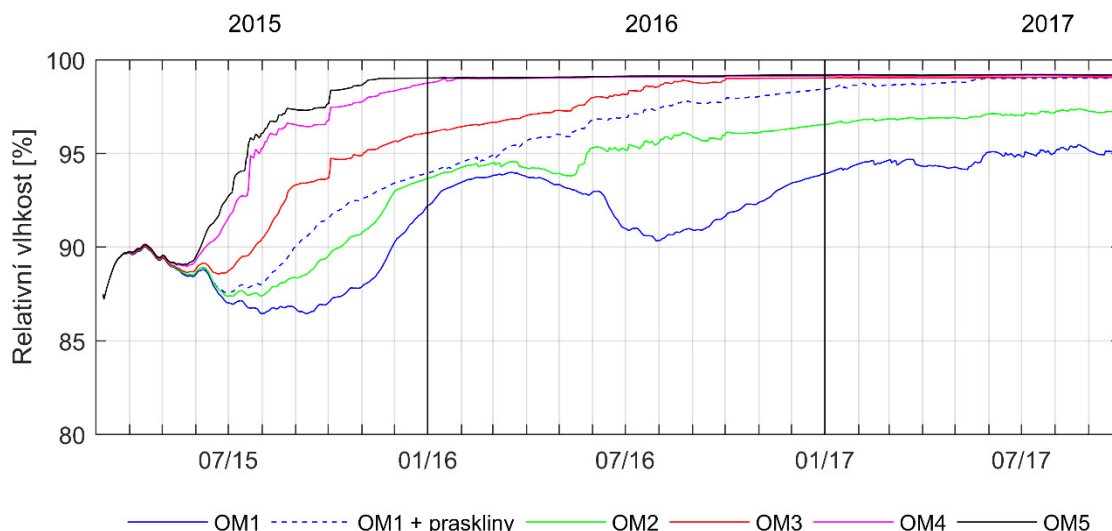
V předchozí kapitole byla posuzována vhodnost použití různých druhů omítkových malt pro vnější omítkovou vrstvu obvodové stěny budovy, která je situovaná v místě s velkým výskytem větrem hnaného deště a jejíž obvodové stěny jsou opatřeny systémem vnitřního zateplení. Jako nejvhodnější varianta byla vyhodnocena cementová omítková malta OM1. Tedy omítková malta s velkým difuzním odporem, ale s malým součinitelem nasákavosti.

Na tomto druhu omítkové malty byly při laboratorních měření sledovány drobné vlasové trhliny, které sice neprocházel celý vzorek, ale s přihlédnutím k tomu, v jakých podmínkách omítkové vzorky pro laboratorní měření zrály a v jakých podmínkách by mohly zrát při reálném použití na stavbě, tak se lze domnívat, že by tyto trhliny při použití omítky na reálné stěně mohly nabývat větších rozměrů. Omítkové vzorky zrály v laboratorním prostředí při stále teplotě 21-23 °C a vlhkosti 40-60 % z jedné strany přikryté polystyrenovou deskou a z druhé strany překryté potravinářskou fólií. V případě zrání omítkové malty na stavbě může být omítková vrstva vystavena slunečnímu záření, které může významně urychlit její vysychání. V případě nanesení na nedostatečně navlhčený podklad, může být její vysychání ovlivněno také sáním stěny, na které je omítka nanášena. A také bude omítka při reálném použití nanášena v mnohem větší ploše, než je plocha omítkových vzorků pro laboratorní měření, což také nepříznivě ovlivní vznik trhlin.

Z těchto důvodů byla tedy snaha vytvořit počítačový model, který by zohlednil výskyt těchto trhlin. Vzhledem k tomu, že trhliny, které byla snaha nasimulovat, jsou jen hypotetické, a i kdybychom znali jejich četnost a rozměry, tak by bylo velmi složité jejich vliv v parametrech omítkové vrstvy zohlednit, tak bylo rozhodnuto vlastnosti omítkové vrstvy zachovat a vliv trhlin nasimulovat jen zjednodušeně, a to jako zdroj vody na rozhraní zdiva a omítkové malty rovný 1/10 větrem hnaného deště.



Obrázek 109 - Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní dřevovláknité izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad



Obrázek 110 - Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace vakuových panelů a zdiva fasády orientované na jihozápad

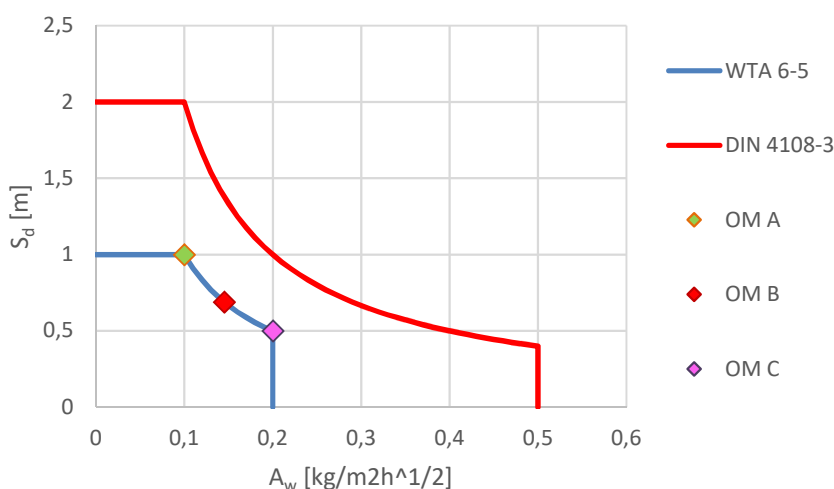
Z Grafů na obrázcích 91 a 92 vidíme, že by se relativní vlhkost na rozhraní izolace a zdiva při uvažování trhlin v omítkové vrstvě z omítkové malty OM1 zvedla, a to přibližně na hodnoty odpovídající průběhu stěny s omítkovou maltou materiálových charakteristik odpovídající zařazením mezi omítkové malty OM2 a OM3.

Budeme-li uvažovat, že přesnost, s kterou se podařilo nasimulovat vliv trhlin ve vrstvě omítkové malty, je přijatelná, tak je vliv trhlin v omítkové maltě na vlhkostní režim zdiva nezanedbatelný. Lze sice ve velké míře vznik trhlin omezit dobrou technologickou kázní (dostatečné vlhčení podkladu, dle potřeby vlhčení omítkové vrstvy při jejím zrání, výběrem vhodné doby pro její realizaci), či v extrémním případě použitím armovací tkaniny v omítkové vrstvě, nebo použitím plastifikátorů, ale je otázkou, jestli by nestačilo do omítkové směsi přidat jen malé množství vápna, které by jen minimálně ovlivnilo vlastnosti omítky a zabránilo by vzniku trhlin.



## 5.7. Simulace s omítkovými maltami splňující parametry předpisu WTA 6-5

V kapitole 4.3.8 byly namíchané omítkové malty OM1-OM5 porovnány s požadavky německé normy DIN 4108-3 a předpisem 6-5 vědeckotechnické společnosti pro sanace staveb a péči o památky (WTA), které udávají maximální hodnoty absorpčního koeficientu vody  $A_w$  [ $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1/2}$ ], které mohou omítkové malty v závislosti na ekvivalentní difuzní tloušťce  $S_d$  [m] nabývat [21]. Z důvodů definování náročnosti klimatických okrajových podmínek oblasti Holzkirchen, byly v počítačové simulaci vytvořeny modely omítkových malt OM-A, OM-B a OM-C odpovídající krajním mezním hodnotám požadující směrnici WTA 6-5. Vlastnosti těchto omítkových malt jsou jednak graficky zobrazeny v grafu na obrázku 111 a jednak numericky v tabulce v příloze č. 2.



Obrázek 111 - Graf průběhu závislosti  $S_d$  na  $A_w$

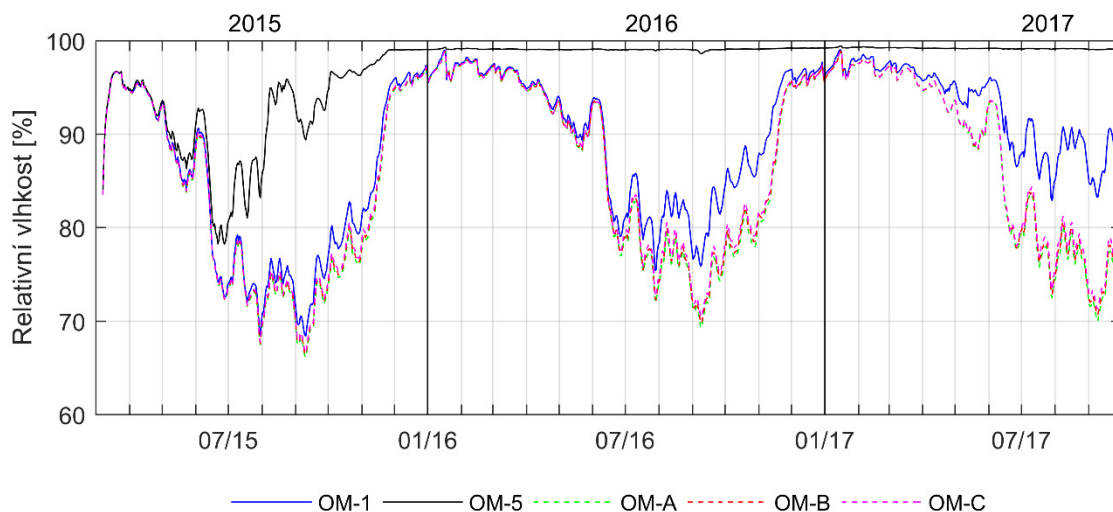
Vzhledem k tomu, že z našich vlastních vzorků se daným požadavkům nejvíce blížil hydrofobizovaný vzorek omítkové malty OM4, tak byl tento vzorek vybrán pro základ vytvoření modelu omítkových malt OM-A, OM-B a OM-C. Kromě faktorů difusních odporů vodních par, které byly upraveny, taky aby odpovídali hodnotám ekvivalentní difusních tloušťek uvedených v grafu na obrázku 111, a hodnotám absorpčních koeficientů vody, ostatní parametry omítkových malt OM-A, OM-B a OM-C odpovídají parametrům omítkové malty OM4.

Vzhledem k tomu, že z předchozích modelů vyplynulo, že vlastnosti omítkové malty na severovýchodní fasádě mají oproti té jihozápadní minimální vliv na vlhkostní stav v konstrukci, tak byla pro tento experiment modelována jen fasáda jihozápadní.

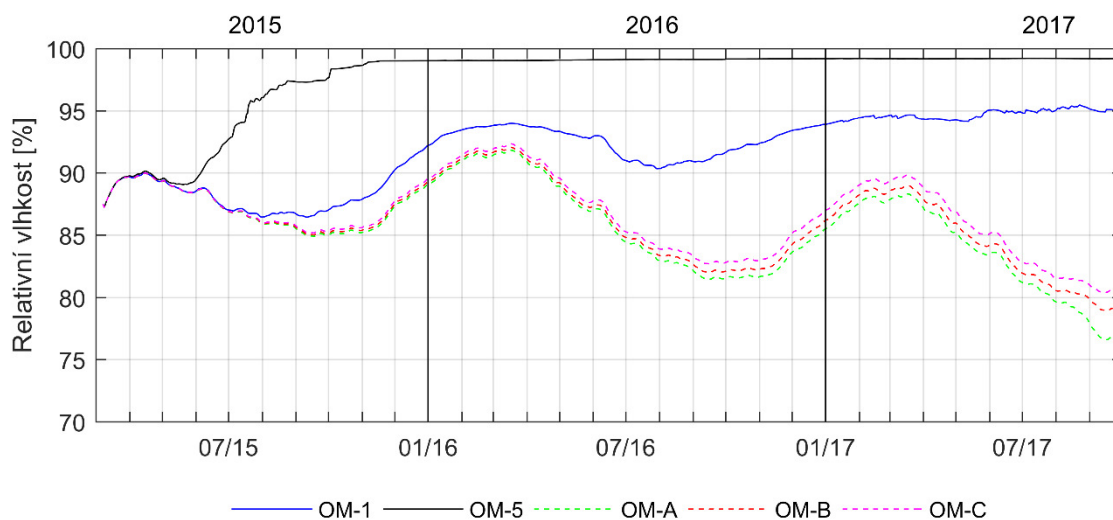
V grafech průběhů relativních vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva na obrázcích 112 a 113 můžeme sledovat, že v případě skladby s dřevovláknitou izolací jsou rozdíly mezi skladbami s omítkami splňující parametry WTA 6-5 a skladbou s omítkou OM1 v zimním období minimální a větší rozdíly jsou již jen v letním období. Rozdíly v průběhách relativních vlhkostí skladeb s omítkami OM-A, OM-B a OM-C jsou pak vlivem difuzní otevřenosti systému minimální. Při pohledu na meziroční minima můžeme sledovat drobný meziroční přírůst relativní vlhkosti v letním období.



V případě difuzně uzavřené konstrukce s vakuovými panely můžeme sledovat již od konce července prvního roku výrazněji rozdílné průběhy mezi skladbami s omítkami splňující parametry WTA 6-5 a skladbou s omítkou OM1. V zimním období je se sice rozdíl oproti letnímu mezi skladbami s omítkami splňující parametry WTA 6-5 a skladbou s omítkou OM1 období také menší, ale oproti difuzně otevřenému systému výrazně méně. Lze zde také oproti difuzně otevřenému systému pozorovat podstatně větší rozdíly v průběhách relativních vlhkostí skladeb s omítkami OM-A, OM-B a OM-C. Dle očekávání vykazuje nejnižší hodnoty křivka reprezentující skladbu s omítkou OM-A, jenž má nejnižší součinitel nasákavosti, a naopak nejvyšší hodnoty křivka reprezentující skladbu s omítkou OM-C, jenž má z omítek OM-A, OM-B a OM-C nejvyšší hodnotu součinitele nasákavosti. Důležitým zjištěním je ale fakt, že všechny křivky relativních vlhkostí na rozhraní izolace a zdiva s omítkovými maltami OM-A, OM-B a OM-C mají meziročně klesající charakter.

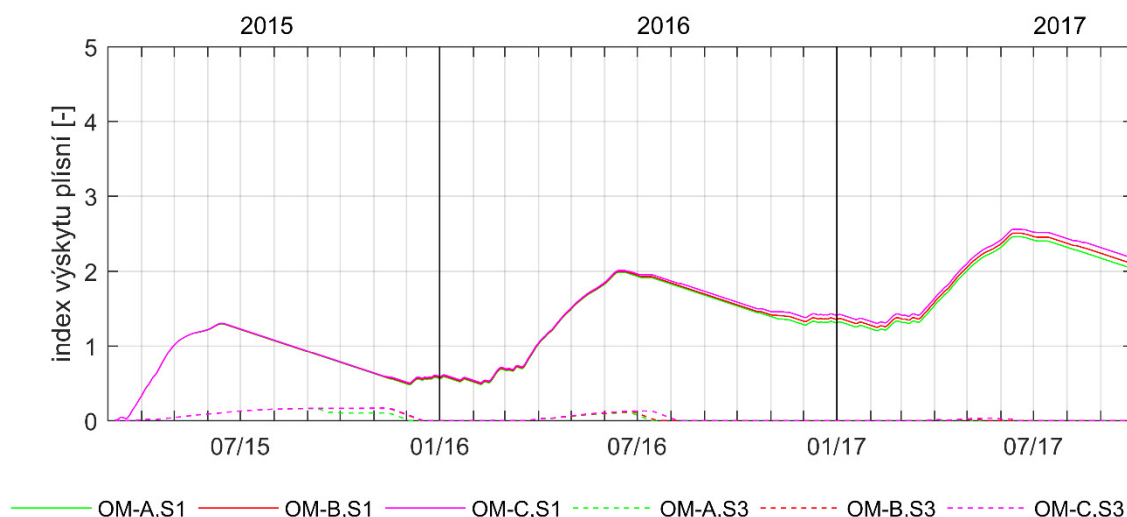


Obrázek 112 - Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní dřevovláknité izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad



Obrázek 113 - Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace z vakuových panelů a zdiva fasády orientované na jihozápad





Obrázek 114 - Graf průběhu indexu výskytu plísní na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad

V grafu průběhu indexu růstu plísní na obrázku 114 vidíme, že v případě difuzně otevřeného systému s dřevovláknitou izolací ani použití omítkových malt splňující parametry WTA 6-5 nezaručuje z pohledu rizika výskytu plísní spolehlivou konstrukci. Po necelých 3 letech je ve všech případech index nad hodnotou 3, která je definována vizuálními nálezy na povrchu, menšími jak 10 % pokrytí, nebo nálezy sledovatelné mikroskopem a pokrývající plochu menší jak 50 %. Křivka má navíc meziročně rostoucí charakter a lze se tedy domnívat, že v dalších letech bude index ještě růst. Použitím omítkové malty splňující parametry WTA 6-5 oproti omítkové maltě OM1 snížila hodnota indexu výskytu plísní na konci září 2017 pouze o cca 0,5 [-].

Průběh indexu růstu plísní u konstrukce s difuzně uzavřeným systémem s vakuovými panely má na rozdíl od difuzně otevřeného systému meziročně klesající charakter a v roce 2017 se už ani jedna z křivek nedostává přes hodnotu 0,05 [-]. Když uvážíme, že hodnota indexu růstu plísní difuzně uzavřeného systému s omítkovou maltou OM1 měla meziročně rostoucí charakter, tak lze konstatovat, že použití omítkové malty splňující parametry WTA 6-5 dělá z difuzně uzavřeného systému S3 i v tvrdých klimatických podmínkách oblasti Holzkirchen vlhkostně bezpečný systém.



## 5.8. Vyhodnocení simulací s různými varianty omítkového souvrství

Z tepelně vlhkostních simulací různých omítkových malt na stěně s vnitřním zateplením bylo prokázáno, že na vlhkostní režim difuzně uzavřené konstrukce zateplené vakuovými panely má druh omítkové malty a velikost zatížení větrem hnaným deštěm vyšší vliv než na difuzně otevřenou konstrukci zateplenou dřevovláknitou izolací. Dále bylo zjištěno, že na severovýchodní fasádě, která je minimálně zatížena větrem hnaným deštěm, za použití shodné omítkové vrstvy u obou systémů, difuzně otevřený systém vykazuje oproti difuzně uzavřenému výrazně větší riziko růstu plísní, a to jednak z důvodu, že se jedná o organický materiál, ale také z důvodu, že difuzně otevřený systém vykazuje při zatížení klimatickými okrajovými podmínkami Holzkirchenu vyšší mezi roční nárůst vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva než systém difuzně uzavřený. Bylo tím tedy potvrzeno, že s rostoucím difuzním tokem z interiéru do exteriéru vlivem nižších teplot v zimním období, se riziko výskytu plísní použitím difuzně otevřeného systému zvyšuje.

Díky simulacím na jihozápadní a severovýchodní straně budovy, bylo také prokázáno, že v případě vystavení části budovy vysokým hodnotám větrem hnaného deště, je bezpečnější použití exteriérové omítky s nižším koeficientem absorpce vody a nižší hodnotou poměru vlhkosti kapilárního nasycení omítky ku součiniteli absorpce vody omítky i přes její vysoký difuzní odpor. Navzdory očekávání bylo také u simulací konstrukcí s vnějšími omítkovými maltami OM1-OM5 zjištěno, že i přes velmi malé zatížení větrem hnaného deště (roční úhrn srážek roven hodnotě 23.6 mm/m<sup>2</sup> stěny) deštěm není rozhodujícím parametrem pouze difuzní propustnost, ale kombinace faktoru difuzní propustnosti a součinitel nasákavosti omítkové malty.

Z důvodu toho, že simulace byly vytvořeny softwarem pro dynamické modelování šíření tepla, vlhkosti a energie, bylo demonstrováno, jak může být Glaserova metoda, která bere v úvahu transport vlhkosti pouze ve stavu páry, nepřesná. V žádném z modelů se na rozhraní izolace a zdiva nedošlo ke kondenzaci vody, i přesto, že se u určitých skladeb držela relativní vlhkost na rozhraní izolace a zdiva přes dva roky na hodnotě 99 %.

I přes vysoké průběhy relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva se u žádného modelu neprokázalo riziko mrazového poškození zdiva a omítkové vrstvy.



## 6. Závěr

Na základě analýzy dat získaných z experimentu tepelně vlhkostního chování vnitřního zateplení probíhající v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT bylo zjištěno, že i přesto, že na rozhraní izolace a zdiva v případě difuzně otevřených systémů S1 nedochází před skrácením fasády ke kondenzaci vody, tak dle výpočetního modelu Mold Index VTT vykazuje tato konstrukce zvýšené riziko výskytu plísní.

Také bylo zjištěno, že u skladby S3 s panely z vakuové izolace je vliv spár mezi panely na vlhkostní režim konstrukce nezanedbatelný. Pro přiblížení k reálným výsledkům je tak nutné ve výpočtech uvažovat difuzní odpor vakuové izolace o několik řádů nižší. Z naměřených dat bylo také potvrzeno, že vlivem omezené možnosti vysychání směrem do interiéru, skladba s difuzně uzavřeným systémem s vakuovými panely reaguje na větrem hnaný déšť v průběhu experimentu vyššími hodnotami koncentrace vodní páry na rozhraní izolace a zdiva než ostatní systémy. Dále bylo zjištěno, že v případě skladby S2 s parotěsnou fólií, došlo po dvou týdnech od experimentu simulující větrem hnaný déšť k tzv. letní kondenzaci i přesto, že se jedná o fólii s proměnlivou difuzní tloušťkou. V případě, že by se nejednalo o běžný typ parotěsné fólie, tak by pravděpodobně bylo množství zkondenzované vody vyšší a mohlo by způsobit vlhkostní komplikace v konstrukci.

Díky vytvoření počítačových tepelně vlhkostních simulací, simulujících dlouhodobý experiment bez zatížení uměle vytvořeným deštěm a jejich následným porovnáním s reálnými daty z experimentu, bylo zjištěno, že experiment simulující větrem hnaný déšť výrazně zvýšil relativní vlhkost na rozhraní izolace a zdiva, a to i skladeb u který to nebylo na první pohled zřejmé.

Laboratorní měření pro stanovení součinitel absorpce vody omítkových malt, bylo provedeno i na vzorcích opatřených hydrofobizačním nátěrem. Z měření pak bylo zjištěno, že vliv hydrofobizačního nátěru na součinitel nasákavosti byl výrazně vyšší u omítek s vyšším podílem vápna. Dále bylo zjištěno, že při opakovaném máčení se vliv hydrofobizačního nátěru na součinitel absorpce vody materiálu výrazně snižuje.

Z tepelně vlhkostních simulací různých omítkových malt na stěně s vnitřním zateplením bylo prokázáno, že na vlhkostní režim difuzně uzavřené konstrukce zateplené vakuovými panely má druh omítkové malty a velikost zatížení větrem hnaným deštěm vyšší vliv než na difuzně otevřenou konstrukci zateplenou dřevovláknitou izolací. Dále bylo zjištěno, že na severovýchodní fasádě, která je minimálně zatížena větrem hnaným deštěm, za použití shodné omítkové vrstvy u obou systémů, difuzně otevřený systém vykazuje oproti difuzně uzavřenému výrazně větší riziko růstu plísní, a to jednak z důvodu, že se jedná o organický materiál, ale také z důvodu, že difuzně otevřený systém vykazuje při zatížení klimatickými okrajovými podmínkami Holzkirchenu vyšší mezi roční nárůst vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva než systém difuzně uzavřený. Bylo tím tedy potvrzeno, že s rostoucím difuzním tokem z interiéru do exteriéru vlivem nižších teplot v zimním období, se riziko výskytu plísní použitím difuzně otevřeného systému zvyšuje.



Díky simulacím na jihozápadní a severovýchodní straně budovy, bylo také prokázáno, že v případě vystavení části budovy vysokým hodnotám větrem hnaného deště, je bezpečnější použití exteriérové omítky s nižším koeficientem absorpce vody a nižší hodnotou poměru vlhkosti kapilárního nasycení omítky ku součiniteli absorpce vody omítky i přes její vysoký difuzní odpor. Navzdory očekávání bylo také u simulací konstrukcí s vnějšími omítkovými maltami OM1-OM5 zjištěno, že i přes velmi malé zatížení větrem hnaného deště (roční úhrn srážek roven hodnotě 23.6 mm/m<sup>2</sup> stěny) deštěm není rozhodujícím parametrem pouze difuzní propustnost, ale kombinace faktoru difuzní propustnosti a součinitel nasákavosti omítkové malty.

Z důvodu toho, že simulace byly vytvořeny softwarem pro dynamické modelování šíření tepla, vlhkosti a energie, bylo demonstrováno, jak může být Glaserova metoda, která bere v úvahu transport vlhkosti pouze ve stavu páry, nepřesná. V žádném z modelů se na rozhraní izolace a zdiva nedošlo ke kondenzaci vody, i přesto, že se u určitých skladeb držela relativní vlhkost na rozhraní izolace a zdiva přes dva roky na hodnotě 99 %.

I přes vysoké průběhy relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva se u žádného modelu neprokázalo riziko mrazového poškození zdiva a omítkové vrstvy.



## Doporučení pro další výzkum

- Na základě laboratorního měření přesně stanovit vlastnosti jednotlivých materiálů použitých ve skladbách S1-S3 (včetně zdiva). Poté se pokusit simulace s přesně změřenými vlastnostmi jednotlivých materiálů opět zopakovat. Zjistit v jaké míře byly nepřesností modelů ovlivněny závěry z poslední kapitoly.
- Vzorčky omítkových malt opatřit vrstvou štukové malty a opakovat laboratorní měření. Následně stanovit v jaké míře štuková vrstva změnila vlastnosti omítkového souvrství.
- Vliv kontaktu mezi omítkovou vrstvou a cihelnou stěnou na transport vody. Jedná se o dokonalý kontakt, nebo má rozhraní výrazný vliv na tok vody mezi zdivem a omítkovou vrstvou.
- V materiálových databázích softwaru WUFI je mnoho dat různých druhů plných pálených cihel. Reálné zdivo se však skládá z cihly a malty. Případně další simulace by mohlo více přiblížit skutečným výsledkům, kdyby byl vytvořen model reprezentující celé zdivo a nejen cihlu.
- Laboratorní měření ukázala, že hydrofobizace je jedním z možností, jak splnit požadavky WTA 6-5. Je zde ale potřeba získat více informací. Například jaká je účinnost a životnost jednotlivých přípravků, rozdíly mezi máčením a nátěrem, vliv zatížení vlhkostního zatížení na účinnost a životnost?
- Po ukončení experimentu se systémy vnitřního zateplení probíhající v Univerzitním centru energeticky efektivních budov ČVUT, by mohl být systém rozebrán a otestován na přítomnost plísní, a to hlavně v případě systému s dřevovláknitou izolací. Následně pak stanovit, jak se realita liší od výpočtu pomocí Mold Index VTT.
- Zopakovat laboratorní měření a následně i simulace s jinými druhy omítkových malt. Především pak s využitím pojiv na bázi vodných polymerních disperzí.
- Zjistit podrobnější informace o vzniku trhlin v omítkové vrstvě. Vytvořit více variant omítkové směsi s minimálním podílem vápna (odpovídající rozhraní směsí OM1-OM2) a z těchto směsí následně vytvořit vzorky přímo na stěně a pozorovat vznik a velikost trhlin. Následně se pak pokusit stanovit ideální poměr vápna a cementu.



## Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] EHRLICH, CENIA, česká informační agentura životního prostředí. Vítejte na Zemi: multimediální ročenka životního prostředí [online]. [cit. 2018-05-19]. Dostupné z:  
[http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=spotreba\\_energie\\_v\\_domacnostech&site=energie](http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=spotreba_energie_v_domacnostech&site=energie)
- [2] Portál TZB-info | TZB-INFO [online]. Copyright © [cit. 15.05.2018]. [online]. Dostupné z: <http://www.oze.tzb-info.cz/16618-obnovitelne-zdroje-v-cr-v-roce-2016>
- [3] Český statistický úřad | ČSÚ [online]. Copyright © [cit. 15.05.2018]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/20551777/17021614a02.pdf/341b9f96-0a79-4e5b-9b41-83a7116fb20f?version=1.0>
- [4] Rodinné domy-průběh teplot zateplené a nezateplené konstrukce. Projekty rodinných domů-individuální a typové projekty-PROZI projekt [online]. Copyright © [cit. 16.05.2018]. Dostupné z: <http://www.prozi.cz/cs/43-rodinne-domy-prubeh-teplot-zateplene-a-nezateplene-konstrukce.html>
- [5] Tzb-Info [online]. Topinfo s.r.o., [2006] Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3345-zvlhcovaci-system-merlin>
- [6] Chytré parobrzdy od společnosti Isover. ISOVER: tepelné izolace, zvukové izolace a protipožární izolace [online]. Copyright © 2018 [cit. 19.05.2018]. Dostupné z: <https://www.isover.cz/aktuality/chytre-parobrzdy-od-spolecnosti-isover>
- [7] Petr Slanina [online]. Copyright © [cit. 19.05.2018]. Dostupné z:  
[http://www.slanina.cz/publikace/files/05\\_slanina\\_parazabrany\\_v\\_plochych\\_strech.pdf](http://www.slanina.cz/publikace/files/05_slanina_parazabrany_v_plochych_strech.pdf)
- [8] VERECKEN, Evy. *HYGROTHERMAL ANALYSIS OF INTERIOR INSULATION FOR RENOVATION PROJECTS*. 2013. KU Leuven, Groep Wetenschap & Technologie Arenberg Doctoraatschool. Vedoucí práce Prof. dr. ir. arch. S. Roels.
- [9] KOPECKÝ, Pavel. Zadání diplomové práce: Cihelné zdivo s vnitřní tepelnou izolací: ČVUT Fsv. Praha, 2017.
- [10] BUREŠ, Michal. Popis realizace měření v experimentální fasádě: UCEEB. Buštěhrad, 2014.
- [11] DRAGOUN, Mirek. Dřevěná trámová zhlaví v cihelném zdivu s vnitřní tepelnou izolací. Praha, 2017. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Pavel Kopecký.





- [12] ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí - Část 1-1. 2004.
- [13] WUFI.cz | WUFI Software. WUFI.cz | WUFI Software [online]. Copyright © [cit. 19.05.2018]. Dostupné z: <http://www.wufi.cz/>
- [14] Straube, John & F. P. Burnett, E. (2000). Simplified prediction of driving rain deposition. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/247524319\\_Simplified\\_prediction\\_of\\_driving\\_rain\\_deposition](https://www.researchgate.net/publication/247524319_Simplified_prediction_of_driving_rain_deposition)
- [15] KOLOUCHOVÁ, Eliška. Materiály pro obnovu omítek historických staveb [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební, 2013 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/28574>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Ústav chemie. Vedoucí práce Pavla Rovnaníková.
- [16] JIRÁSEK, Jakub. ANORGANICKÁ POJIVA. *Geologie-Vysoká škola báňská* [online]. [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: [online]. Dostupné z: [http://www.geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka\\_pojiva.html#hydvapno](http://www.geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html#hydvapno)
- [17] FRIDRICHOVÁ, Marcela, Karel DVOŘÁK a Rudolf FRIDRICH. *Omítky*. Brno: ERA group, 2004. Stavíme. ISBN isbn:80-7366-004-0.
- [18] Veřejné služby Informačního systému [online]. Copyright © V [cit. 17.05.2018]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/150674/prif\\_m/Diplomova\\_prace\\_Kriz.pdf](https://is.muni.cz/th/150674/prif_m/Diplomova_prace_Kriz.pdf)
- [19] Lukofob 39. Silikonové tmely, stavební a průmyslová chemie / Lučební závody Kolín [online]. Copyright © CLEVER Soft s.r.o. [cit. 19.05.2018]. Dostupné z: <https://www.lucebni.cz/Produkty/Lukofob%2039>
- [20] Startseite - WTA [online]. Copyright © [cit. 15.05.2018]. Dostupné z: <http://wta-international.org/fileadmin/Gesch%C3%A4ftsstelle/Schriften/Kurzfassungen/6-4-16.pdf>
- [21] Pavel Kopecký-MTIB [online]. P 10, Ochrana obálky proti vodě. Větrm hnaný déšť. Copyright © [cit. 15.05.2018]. [online]. Dostupné z: <https://kps.fsv.cvut.cz/index.php?lmut=cz&part=vyuka&sub=predmety&type=all&kod=124MTIB>
- [22] BSI-047: Thick as a Brick | Building Science Corporation. Building Science Corporation | Consulting & Architecture [online]. Dostupné z: <https://buildingscience.com/documents/insights/bsi-047-thick-as-brick>



## Seznam obrázků

Obrázek 1 - Grafy průběhu teplot různých variant zateplení [4] .....	11 -
Obrázek 2 - Graf závislosti teploty na vlhkosti vzduchu [5] .....	12 -
Obrázek 3 - Graf závislosti ekvivalentní difuzní tloušťky fólie Isover Vario v závislosti na relativní vlhkosti [6] .....	13 -
Obrázek 4 - Graf závislosti ekvivalentní difuzní tloušťky na ploše perforace PE folie [7] .....	14 -
Obrázek 5 - schéma stanovení kondenzace vody v konstrukci v letním období pomocí Glaserovy metody [8] .....	14 -
Obrázek 6 - schéma difuzně uzavřeného systému s vrstvou s vyšším difuzním odporem v oblasti tepelné izolace [8] .....	15 -
Obrázek 7 - Pohled na experimentální fasádu, zdroj [9] .....	17 -
Obrázek 8 - Situace UCEEB, zdroj [9] .....	17 -
Obrázek 9 - Fotografie z realizace zateplení skladeb S1a a S1b [10] .....	18 -
Obrázek 10 - Fotografie z realizace zateplení skladby S2 [10] .....	19 -
Obrázek 11 - Fotografie z realizace zateplení skladby S3 [10] .....	20 -
Obrázek 12 - Schéma jednotlivých skladeb .....	21 -
Obrázek 13 - Schéma experimentálního pole se skladbami S1a a S1b (pohled z interiéru) .....	22 -
Obrázek 14 - Schéma experimentálního pole se skladbami S2 a S3 (pohled z interiéru) ..	23 -
Obrázek 15 - Čidlo pro měření teploty a relativní vlhkosti ve vzduchové dutině mezi parotěsnou fólií a minerální vatou ve skladbě S2 [10] .....	24 -
Obrázek 16 - Čidlo pro měření teploty a relativní vlhkosti na rozhraní mezi izolací a zdivem u skladby S3 [10] .....	24 -
Obrázek 17 - Čidlo pro měření hustoty tepelného toku u skladby S1a [10] .....	24 -
Obrázek 18 - Pohled na experimentální fasádu se skladbami S1a a S1b [10] .....	24 -
Obrázek 19 - Zařízení pro skrápění fasádních polí .....	26 -
Obrázek 20 - Lopátkový vodoměr s impulzním měřičem .....	26 -
Obrázek 21 - Vyústěný okapního žlabu do přepravky osazené čerpadlem [11] .....	27 -
Obrázek 22 - Fotografie zachycující skrápění fasády .....	27 -
Obrázek 23 - Fotografie zachycující efektivně skrápěnou plochu testovacích polí ...	27 -
Obrázek 24 - Fotografie zachycující skrápění fasády .....	27 -
Obrázek 25 - Grafy zobrazující stav vody během experimentu simulujícího větrem hnaný déšť .....	28 -
Obrázek 26 - Graf hodinových dat slunečního ozáření fasády, Pozn.: čárkovaná čára značí dobu zahájení skrápění fasády .....	30 -
Obrázek 27 - Graf hodinových dat teploty vzduchu v interiéru a exteriéru, Pozn.: čárkovaná čára značí dobu zahájení skrápění fasády .....	30 -
Obrázek 28 - Teplota vzduchu .....	31 -
Obrázek 29 - Relativní vlhkost vzduchu .....	31 -
Obrázek 30 - Denní úhrny slunečního ozáření fasády .....	31 -



Obrázek 31 – Grafy denních průměrů teploty a relativní vlhkosti vzduchu v klimatické místnosti a exteriéru a Grafy denních průměrů teploty a relativní vlhkosti na rozhraní zateplovacího systému a zdiva.....	32 -
Obrázek 32 - Graf průběhu relativních vlhkostí čidla v interiéru a čidel ve skladbě S2....	34 -
Obrázek 33- Graf denních průměrných hodnot relativních vlhkostí na pomezí zdiva a izolace u sklady S3 .....	34 -
Obrázek 34 - Graf hustot tepelného toku.....	35 -
Obrázek 35 - Index rizika výskytu plísní na rozhraní izolace a zdiva.....	36 -
Obrázek 36 - Graf průběhu horninových hodnot koncentrací vodní páry na rozhraní izolace a zdiva, resp. vzduchu v interiéru a exteriéru. Pozn.: hodnoty G a wdr jsou bezrozměrné veličiny (G jsou hodinové úhrny slunečního ozáření fasády a wdr větrem hnaný déšť dopadající na fasádu) .....	38 -
Obrázek 37 - Grafy denních průměrů teploty a relativní vlhkosti vzduchu v klimatické místnosti a exteriéru a Grafy denních průměrů teploty a relativní vlhkosti na rozhraní zateplovacího systému a zdiva.....	39 -
Obrázek 38 - Grafy hodinových hodnoty teploty, relativní vlhkosti a koncentrace vodní páry na rozhraní zateplovacího systému a zdiva .....	40 -
Obrázek 39 - Graf hodinových průměrných hodnot relativních vlhkostí na pomezí zdiva a izolace u sklady S3.....	41 -
Obrázek 40 – Graf průběhu relativních vlhkostí ve skladbě S2 .....	42 -
Obrázek 41 - Index rizika výskytu plísní na rozhraní izolace a zdiva.....	42 -
Obrázek 42 - Graf vypočtených hodnot větrem hnaného deště na experimentální fasády (hodinové úhrny).....	45 -
Obrázek 43 - Graf vypočtených hodnot větrem hnaného deště na experimentální fasády (denní úhrny).....	45 -
Obrázek 44 – Graf průběhu teplot S1a.Tpe - čidlo v exteriérové omítce.....	48 -
Obrázek 45 – Graf průběhu teplot S1a.Tpi - čidlo v interiérové omítce .....	48 -
Obrázek 46 – Graf průběhu hustoty tepelného toku S1a.q – celá konstrukce .....	48 -
Obrázek 47 – Graf průběhu relativní vlhkosti S1a.RH1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva .....	49 -
Obrázek 48 – Graf průběhu koncentrace vodní páry S1a.v1 – čidlo na rozhraní izolace a zdiva.....	49 -
Obrázek 49 – Graf průběhu teplot S1a.T1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva.....	49 -
Obrázek 50 - Graf průběhu teplot S1b.Tpe - čidlo v exteriérové omítce .....	51 -
Obrázek 51 - Graf průběhu teplot S1b.Tpi - čidlo v interiérové omítce.....	51 -
Obrázek 52 - Graf průběhu hustoty tepelného toku S1b.q – celá konstrukce .....	51 -
Obrázek 53 – Graf průběhu relativní vlhkosti S1b.RH1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva .....	52 -
Obrázek 54 – Graf průběhu koncentrace vodní páry S1b.v1 – čidlo na rozhraní izolace a zdiva.....	52 -
Obrázek 55 – Graf průběhu teplot S1b.T1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva .....	52 -
Obrázek 56 - Graf průběhu teplot S2.Tpe - čidlo v exteriérové omítce .....	54 -
Obrázek 57 - Graf průběhu teplot S2.Tpi - čidlo v interiérové omítce.....	54 -



Obrázek 58 - Graf průběhu hustoty tepelného toku S2.q – celá konstrukce .....	54 -
Obrázek 59 – Graf průběhu relativní vlhkosti S2.RH1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva .....	55 -
Obrázek 60 – Graf průběhu koncentrace vodní páry S2.v1 – čidlo na rozhraní izolace a zdiva.....	55 -
Obrázek 61 – Graf průběhu teplot S2.T1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva .....	55 -
Obrázek 62 – Graf průběhu relativní vlhkosti S2.RH4 - čidlo ve vzduchové mezeře mezi minerální vatou a parotěsnou fólií .....	56 -
Obrázek 63 – Graf průběhu koncentrace vodní páry S2.v4 – čidlo ve vzduchové mezeře mezi minerální vatou a parotěsnou fólií .....	56 -
Obrázek 64 – Graf průběhu teplot S2.T4 - čidlo ve vzduchové mezeře mezi minerální vatou a parotěsnou fólií.....	56 -
Obrázek 65 - Graf průběhu teplot S3.Tpe - čidlo v exteriérové omítce .....	58 -
Obrázek 66 - Graf průběhu teplot S3.Tpi - čidlo v interiérové omítce.....	58 -
Obrázek 67 - Graf průběhu hustoty tepelného toku S3.q – celá konstrukce .....	58 -
Obrázek 68 – Graf průběhu relativní vlhkosti S3.RH1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva .....	59 -
Obrázek 69 – Graf průběhu koncentrace vodní páry S3.v1 – čidlo na rozhraní izolace a zdiva.....	59 -
Obrázek 70 – Graf průběhu teplot S3.T1 - čidlo na rozhraní izolace a zdiva .....	59 -
Obrázek 71 - forma pro vzorky tvaru trámečků .....	64 -
Obrázek 72 - forma pro vzorky tvaru terčíku .....	64 -
Obrázek 73 - vzorek pro zkoušky dry-cup a wet-cup .....	67 -
Obrázek 74 - exsikátor s vzorky pro dry-cup zkoušku .....	67 -
Obrázek 75 - miska s nasyceným roztokem soli.....	67 -
Obrázek 76 - Kontrola čistoty spodní hrany terčíku vzorku OM5 .....	68 -
Obrázek 77 - Kontrola čistoty spodní hrany terčíku vzorku OM1-A .....	68 -
Obrázek 78 - Průběh zkoušky nasákavosti .....	69 -
Obrázek 79 - Graf průběhu zkoušky nasákavosti vzorku OM4.....	70 -
Obrázek 80 - Graf křivek nasákavosti vzorků neošetřených hydrofobizačním přípravkem .....	71 -
Obrázek 81 - Graf porovnání křivek nasákavosti vzorků OM1 ošetřených a neošetřených hydrofobizačním přípravkem.....	72 -
Obrázek 82 - - Graf porovnání křivek nasákavosti vzorků OM2 ošetřených a neošetřených hydrofobizačním přípravkem.....	73 -
Obrázek 83 - Graf porovnání křivek nasákavosti vzorků OM3 ošetřených a neošetřených hydrofobizačním přípravkem.....	73 -
Obrázek 84 - Graf porovnání křivek nasákavosti vzorků OM4 ošetřených a neošetřených hydrofobizačním přípravkem.....	73 -
Obrázek 85 - Graf porovnání křivek nasákavosti vzorků OM5 ošetřených a neošetřených hydrofobizačním přípravkem.....	74 -
Obrázek 86 - Graf porovnání křivek nasákavosti všech vzorků neošetřených hydrofob. přípravkem a všech vzorků ošetřených.....	74 -
Obrázek 87 - Vzorky upravené pro zkoušku vysychání .....	76 -



Obrázek 88 - Graf porovnávající průběhy vysychání.....	- 77 -
Obrázek 89 - Vzorky omítkových malt pro zkoušku stanovení sorpčních křivek.....	- 77 -
Obrázek 90 - Vzorek omítkové malty OM1 pro zkoušku stanovení sorpčních křivek-	77
-	
Obrázek 91- Graf sorpčních křivek omítkových malt .....	- 78 -
Obrázek 92 - Graf závislosti $S_d$ na $A_w$ .....	- 79 -
Obrázek 93 - Graf závislosti $S_d$ na $A_w$ omítkových malt NEOšetřených hydrofobizačního přípravkem .....	- 79 -
Obrázek 94 – Graf závislosti $S_d$ na $A_w$ omítkových malt ošetřených hydrofobizačního přípravkem .....	- 80 -
Obrázek 95 – Schéma klimatických okrajových podmínek oblasti Holzkirchen.....	- 82 -
Obrázek 96 – Grafy průběhu teploty a relativní vlhkosti vzduchu v exteriéru.....	- 82 -
Obrázek 97 – Grafy denních úhrnů větrem hnaného deště a slunečního ozáření dopadajícího na severovýchodně orientovanou fasádu, Pozn: červená křivka zobrazuje bezrozměrný přírůstek větrem hnaného deště .....	- 83 -
Obrázek 98 – Grafy denních úhrnů větrem hnaného deště a slunečního ozáření dopadajícího na jihozápadně orientovanou fasádu, Pozn: červená křivka zobrazuje bezrozměrný přírůstek větrem hnaného deště .....	- 83 -
Obrázek 99 – Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na severovýchod.....	- 85 -
Obrázek 100 – Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad .....	- 85 -
Obrázek 101 – Graf indexu rizika růstu plísní na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad .....	- 86 -
Obrázek 102 – Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na severovýchod.....	- 87 -
Obrázek 103 – Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad .....	- 87 -
Obrázek 104 – Graf indexu rizika růstu plísní na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad .....	- 89 -
Obrázek 105 – Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva fasády s exteriérovou omítkou OM1 .....	- 90 -
Obrázek 106 - Graf průběhu indexu výskytu plísní na rozhraní izolace a zdiva fasády s exteriérovou omítkou OM1 .....	- 90 -
Obrázek 107 - Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace a zdiva fasády s exteriérovou omítkou OM4 .....	- 90 -
Obrázek 108 - Graf průběhu indexu výskytu plísní na rozhraní izolace a zdiva fasády s exteriérovou omítkou OM4 .....	- 91 -
Obrázek 109 - Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní dřevovláknité izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad.....	- 93 -
Obrázek 110 - Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace vakuových panelů a zdiva fasády orientované na jihozápad .....	- 94 -
Obrázek 111 - Graf průběhu závislosti $S_d$ na $A_w$ .....	- 95 -



- Obrázek 112 - Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní dřevovláknité izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad .....- 96 -  
Obrázek 113 - Graf průběhu relativní vlhkosti na rozhraní izolace z vakuových panelů a zdiva fasády orientované na jihozápad .....- 96 -  
Obrázek 114 - Graf průběhu indexu výskytu plísní na rozhraní izolace a zdiva fasády orientované na jihozápad .....- 97 -





## Seznam tabulek

Tabulka 1 - Parametry zateplovacích systémů (bez vrstvy zdiva a vnější omítky) Pozn.: Pro skladbu S2 je v závorce uvedena hodnota $S_d$ pro letní období.....	20 -
Tabulka 2 - Harmonogram úpravy vzduchu v klimatické místnosti .....	25 -
Tabulka 3 - Tabulka s daty z experimentu simulujícího přívalový větrem hnaný déšť' .....	29 -
Tabulka 4 - Tepelné ztráty skladeb S1-S3 .....	35 -
Tabulka 5 - Stupnice vyjadřující riziko výskytu plísní podle modelu Mold VVT .....	36 -
Tabulka 6 - Průměrné odchylky čidel skladby S1a vypočtené z hodinových dat (bez dat z intervalu následujícím po experimentu simulujícím větrem hnaný déšť').....	50 -
Tabulka 7 - Průměrné odchylky čidel skladby S1b vypočtené z hodinových dat (bez dat z intervalu následujícím po experimentu simulujícím větrem hnaný déšť').....	53 -
Tabulka 8 - Průměrné odchylky čidel skladby S2 vypočtené z hodinových dat (bez dat z intervalu následujícím po experimentu simulujícím větrem hnaný déšť').....	57 -
Tabulka 9 - Průměrné odchylky čidel skladby S3 vypočtené z hodinových dat (bez dat z intervalu následujícím po experimentu simulujícím větrem hnaný déšť').....	60 -
Tabulka 10- Zastoupení jednotlivých složek ve vzorcích omítkových malt .....	65 -
Tabulka 11- Objemové hmotnosti omítkových malt .....	65 -
Tabulka 12- Faktory difuzních odporů omítkových malt.....	68 -
Tabulka 13- Hodnoty absorpčních koeficientů.....	71 -
Tabulka 14- Množství hydrofobizačního přípravku absorbovaného vzorky.....	72 -
Tabulka 15- Porovnání absorpčních koeficientů vody .....	75 -
Tabulka 16- Soli použité pro udržení požadované RH.....	78 -
Tabulka 17- Souhrn vlastností omítkových malt.....	80 -
Tabulka 18 - Tabulka uvažovaných hodnot kritického stupně nasycení pro výpočet rizika poškození mrazem .....	92 -



## **Seznam příloh**

- 1) *Schématické řezy v místě monitorovacích pozic*
- 2) *Tabulky s nastavením materiálových charakteristik pro WUFI*