



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí pozemních staveb

Analýza účinnosti vzduchoizolačních metod sanace vlhkého zdiva

**Efficiency analysis of air insulation remedial methods for reduction
of moisture in masonry**

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Eva Poláková

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Pozemní stavby

Školitel: doc. Ing. Jiří Pazderka, Ph.D.

Praha, 2018



PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Ing. Eva Poláková

Název disertační práce: Analýza účinnosti vzduchoizolačních metod sanace vlhkého zdiva

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Jiřího Pazderky, Ph.D.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

V průběhu studia došlo ke změně příjmení autorky disertační práce (rodné příjmení Hájková).

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektů:

SGS13/110/OHK1/2T/11 - Průzkum a analýza poruch způsobených pronikáním vlhkosti do spodní stavby z pohledu snahy o efektivní návrh sanačního opatření

SGS15/128/OHK1/2T/11 - Analýza účinnosti moderních metod sanace vlhkých budov

SGS17/117/OHK1/2T/11 - Experimentální ověření spolehlivosti vybraných systémů ochrany spodní stavby proti vodě

V Praze dne 19. 12. 2018

.....
podpis

PODĚKOVÁNÍ:

Ráda bych poděkovala všem, kteří mne po celou dobu tvorby této práce podporovali. Především pak svému školiteli doc. Ing. Jiřímu Pazderkovi, Ph.D. za odbornou a lidskou pomoc, trpělivost, za cenné rady, podnětné připomínky a náměty, které mi poskytl při zpracování disertační práce.

ABSTRAKT

Jedním z aktuálních témat v oblasti rekonstrukcí stávajících staveb je dodatečná ochrana spodní stavby před negativními účinky spojenými se zvýšenou vlhkostí stavebních konstrukcí. Vzduchové izolační metody patří mezi často používané sanační metody určené pro snižování vlhkosti zdiva starších budov, které postrádají funkční hydroizolační obálku spodní stavby. V odborné veřejnosti se objevují velmi rozdílné názory na účinnost a spolehlivost těchto metod sanace vlhkého zdiva. Faktem je, že účinnost vzduchových izolačních metod dosud nebyla přesně stanovena a tyto sanační systémy se převážně navrhují pouze na základě zkušeností. Účinek navrženého opatření na sanovanou konstrukci tak může být nedostatečný.

Disertační práce se zabývá analýzou účinnosti vzduchových izolačních metod. Účinnost těchto metod je třeba analyzovat na zkušebních modelech v laboratorních podmínkách a zároveň i na skutečných budovách, na kterých byla tato sanační metoda aplikována v rámci rekonstrukce za účelem snížení vlhkosti ve zdivu. Výsledky experimentálních měření je následně nutné porovnat s teoretickými závěry, jejichž výsledky vycházejí z modelových simulací s pomocí softwaru.

Cílem disertační práce je na základě výsledků terénních průzkumů, laboratorních experimentů a jejich teoretických rozborů stanovit objektivní závěry pro následný efektivní návrh sanačního opatření.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vzduchová dutina

Účinnost

Proudění vzduchu

Sanace

Vlhkost zdiva

CFD simulace

ABSTRACT

One of the current topics in the area of renovation of existing structures is additional substructure protection from adverse effects of increased moisture of building structures. Air insulating methods belong among frequently used rehabilitation techniques designed for reducing wall moisture in older buildings that lack a functional substructure waterproofing envelope. The professional public has expressed widely differing opinions on the effectiveness and reliability of these methods of moist masonry rehabilitation. The fact is that the effectiveness of air insulating methods has not been established exactly so far, and these rehabilitation systems are mostly designed based on experience only. The effects of designed measures on the rehabilitation structure thus may be insufficient.

The thesis deals with an analysis of effectiveness of air insulating methods. The effectiveness of these methods has to be analysed using test models under laboratory conditions and, at the same time, in real-world buildings to which this rehabilitation technique has been applied as part of their renovation in order to reduce moisture in the masonry. Results of the experimental measurements then have to be compared with theoretical conclusions the results of which are based on model simulations using computer software.

The objective of the thesis is to make objective conclusions for effective design of rehabilitation measures based on results of field surveys and laboratory experiments and their theoretical analyses.

KEYWORDS

Air duct

Efficiency

Air flow

Rehabilitation

Moisture in masonry

CFD simulation

OBSAH

1. ÚVOD.....	8
1.1. Cíle experimentální části disertační práce	9
1.2. Motivace	9
1.3. Postup práce a použité metody	10
2. ÚVOD DO PROBLEMATIKY.....	11
2.1. Voda v konstrukcích, vlhkost	11
2.2. Vliv vlhkosti na fyzikální vlastnosti stavebních konstrukcí.....	12
2.2.1. Pórovitost.....	13
2.2.2. Nasákavost.....	13
2.2.3. Rovnovážný obsah vlhkosti.....	14
2.3. Transport vody a vlhkost zdiva	14
2.3.1. Kapilární vedení vody	15
2.3.2. Difúze vodní páry	16
2.3.3. Kondenzace vodní páry	17
2.4. Soli.....	18
2.5. Metody sanace vlhkého zdiva	19
2.6. Průzkumy staveb pro návrh sanace vlhkého zdiva.....	19
2.6.1. Měření vlhkosti zdiva	20
3. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	24
3.1. Úvod	24
3.2. Vzduchové izolační metody	25
3.2.1. Princip vzduchových izolačních metod.....	25
3.2.2. Konstrukční řešení vzduchových dutin	27
4. EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM.....	31
4.1. Analýza účinnosti vzduchových izolačních metod na reálných historických objektech.....	31
4.1.1. Křídlo historické budovy nemocnice U Apolináře.....	31
4.1.2. Bývalé konírny v Malé pevnosti v Terezíně.....	38
4.1.3. Kostel sv. Jiljí (Milevsko)	46
4.1.4. Další analyzované objekty.....	49
4.1.5. Závěry z terénních průzkumů	51

4.2.	Analýza účinnosti vzduchových metod na laboratorních modelech	52
4.2.1.	Podélná provětrávaná jednostranná vzduchová dutina (exteriérová).....	52
4.2.2.	Podélná provětrávaná oboustranná vzduchová dutina.....	61
4.2.3.	Profilovaná (nopová) fólie.....	68
4.3.	Analýza proudění vzduchu v podlahové dutině	74
5.	ZÁVĚR.....	79
5.1.	Závěry z terénních průzkumů.....	79
5.2.	Závěry z laboratorních zkoušek.....	80
5.2.1.	Podélná provětrávaná jednostranná vzduchová dutina (exteriérová).....	80
5.2.2.	Podélná provětrávaná oboustranná vzduchová dutina.....	80
5.2.3.	Profilovaná (nopová) fólie.....	81
5.3.	Závěry z numerické simulace – analýza proudění vzduchu v podlahové dutině	81
5.4.	Hlavní závěry disertační práce	82
6.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	83
7.	PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA	92
8.	SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A POUŽITÉHO ZNAČENÍ.....	94
8.1.	Seznam obrázků.....	94
8.2.	Seznam tabulek.....	96
8.3.	Seznam použitých zkratk a symbolů	97

1. ÚVOD

Jedním z významných problémů v oblasti rekonstrukcí stávajících staveb je dodatečná ochrana spodní stavby před negativními účinky spojenými se zvýšenou vlhkostí stavebních konstrukcí. Pro správnou volbu sanační metody je nutné znát její účinnost a vliv okrajových podmínek na schopnost snižování vlhkosti konstrukce. I přesto, že mnoho sanačních metod používaných v současnosti jsou sofistikované systémy, jejichž účinnost byla ověřena mnoha praktickými zkušenostmi, zůstává stále mnoho nejasností ohledně jejich skutečného účinku na sanovanou konstrukci. Mezi takové nejasnosti patří například přesné stanovení účinnosti vzduchových izolačních metod z hlediska jejich schopnosti snižovat vlhkost konstrukce v závislosti na různých okrajových podmínkách. Účinnost těchto metod je vhodné analyzovat na konkrétních vzájemně porovnatelných modelech v laboratorních podmínkách a zároveň i na skutečných budovách. Výsledky zkoušek je důležité porovnat s teoretickými výpočtovými modely.

Pro ověření teoretických předpokladů účinnosti a funkčnosti vzduchových izolačních metod bylo provedeno měření vlhkosti na konkrétních objektech, na kterých byla v rámci rekonstrukce realizována provětrávaná vzduchová dutina za účelem snížení vlhkosti ve zdivu. Porovnáním předpokládaného a skutečného účinku sanace lze zhodnotit úspěšnost sanačního zásahu a stanovit míru efektivnosti použité sanační metody na daném objektu. Účinnost vybraných typů vzduchových izolačních metod byla dále analyzována na laboratorních modelech, které simulovaly výřez obvodového historického cihelného zdiva podsklepené budovy. Výsledky získané experimentálním měřením na laboratorních modelech byly porovnány s daty získanými z počítačových simulací.

1.1. Cíle experimentální části disertační práce

Cíle disertační práce jsou zvoleny v návaznosti na současný stav problematiky sanace staveb pomocí vzduchových izolačních metod. Disertační práce se zabývá rozšířením teoretických i praktických znalostí v oblasti rekonstrukcí stávajících staveb se zaměřením na dodatečnou ochranu spodní stavby před negativními účinky spojenými se zvýšenou vlhkostí stavebních konstrukcí.

Hlavním cílem disertační práce je objektivně analyzovat účinnost vzduchových izolačních metod sanace z hlediska jejich schopnosti snižovat vlhkost konstrukce spodní stavby.

Součástí výzkumu je také komparace výsledků experimentálního měření na modelech v laboratorních podmínkách i na skutečných budovách a zároveň jejich konfrontace s teoretickými závěry, jejichž výsledky vycházejí z modelových simulací s pomocí softwaru.

K dosažení plánovaných výsledků práce byly vymezeny následující dílčí cíle:

- a) Analyzovat dosavadní způsob navrhování používaných sanačních systémů pomocí vzduchových dutin v praxi.
- b) Provést experimenty v laboratorních podmínkách, kdy bude zkoumána účinnost vybraných typů vzduchových izolačních metod na laboratorních modelech.
- c) Provést terénní průzkum vybraných staveb, u nichž byla aplikována sanační opatření proti pronikání vody do spodní stavby pomocí vzduchových izolačních metod.
- d) Analyzovat proudění vzduchu modelováním pomocí počítačových programů.
- e) Porovnat výsledky získané experimentálním měřením na konkrétních budovách a laboratorních modelech s daty získanými z počítačových simulací.
- f) Zhodnotit dosažené výsledky a zformulovat závěry.

1.2. Motivace

V odborné veřejnosti se objevují velmi rozdílné názory na účinnost a spolehlivost vzduchových izolačních metod sanace vlhkého zdiva (zastánci vs. odpůrci). Faktem je, že účinnost řady sanačních metod dosud nebyla přesně stanovena. Tyto sanační systémy se převážně navrhují pouze na základě zkušeností a účinek navrženého opatření na sanovanou konstrukci může být nedostatečný. Ve výsledku tak může docházet k návrhu nedostatečně účinného sanačního opatření, které mnohdy vede k nutnosti provedení dalšího zásahu, což znamená další vynakládání finančních prostředků.

Cílem disertační práce je na základě výsledků terénních průzkumů a jejich teoretických rozborů stanovit objektivní závěry, které slouží jako podklad pro následný efektivní návrh sanačního opatření.

1.3. Postup práce a použité metody

Pro splnění cílů bylo využito především Experimentální centrum fakulty stavební na ČVUT v Praze a zároveň reálných objektů, kde proběhla měření vlhkosti konstrukcí.

Při zpracování disertační práce byly zvoleny metody teoretické, experimentální a vědecké. Metodiku zpracování disertační práce lze shrnout do následujících bodů.

- Analýza a shrnutí dosavadních poznatků – rešerše
- Experimentální měření vlhkosti na reálných historických objektech
- Vyhodnocení poznatků z experimentálního měření in-situ
- Zhotovení laboratorních modelů
- Experimentální měření vlhkosti v laboratorních podmínkách
- Provedení numerických simulací
- Analýza a porovnání hodnot získaných laboratorním měřením a pomocí výpočtových simulací

Disertační práce je doplněna fotografiemi a dalšími grafickými podklady. Pokud není uvedeno jinak, je autorka disertační práce autorkou předložených fotografií a grafických podkladů.

2. ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Vzduchové izolační systémy patří mezi nejstarší systémy ochrany stavebních konstrukcí proti vlhkosti, které se současně příznivě projevují na stavu vnitřního prostředí. Jejich podstata je známá již více než 4000 let a až na používané materiály zůstává nezměněna. Ochranu budov proti vztlínající vodě ve zdivu se snažili vyřešit už v antickém Římě. Jednalo se zejména o důsledné provětrávání podzemních prostor přirozenou cirkulací vzduchu. Princip spočíval v oddělení podlahy od podloží amforami, případně podezdívkou, na které byla položena podlaha. Pod podlahou vznikl prázdný prostor, který byl propojen ventilačními otvory s exteriérem a zajišťoval tak odvětrávání budovy. Později se používaly větrací šachty, dvojité stěny s provětrávanou mezerou a v lepších domech se ve stěnách přímo vedlo teplovzdušné topení od centrálního topeniště, které bylo situováno většinou v hlavní místnosti domu, nebo v kuchyni [1].

Provětrávané vzduchové vrstvy ve stěnách a v podlaze můžeme nalézt na mnohých stavbách jako původní opatření proti vlhkosti. Rozbory historických staveb ukazují, že ve většině případů předpoklady účinného provětrávání objektu byly již včleněny do základní koncepce návrhu budovy a již při výstavbě se počítalo se zvýšenou vlhkostí základových konstrukcí buďto na základě podmínek stavby, nebo z pouhé opatrnosti stavitele.

V současnosti je třeba posoudit, jak dalece se tyto podmínky změnily. Pravidlem bývá, že jsou horší než v době výstavby. Vliv blízkých vozovek a neprodyšných chodníků se často kombinuje s vlivem nevhodných stavebních opatření i přímých zásahů do vzduchových systémů jako je například přerušení nebo zasypání větracích kanálů, štol a komínů, nebo dokonce jejich použití jako domnělé kanalizace.

2.1. Voda v konstrukcích, vlhkost

Většina zdících materiálů (zvláště cihly, pískovec, opuka, vápenná i cementová malta) má díky své pórovité struktuře schopnost přijímat a vydávat vodu. Množství vody (v jakémkoli skupenství) obsažené v pórovitém prostředí látky stanovuje vlhkost materiálu. Obsah vody v materiálu je závislý na teplotě, na vlhkosti okolního vzduchu, na pórovitosti látky, na množství hygroskopických solí v zavlhlém zdivu atd. Všechny stavební materiály se v praxi nevyskytují v suchém stavu, vždy obsahují za daných atmosférických podmínek určité množství vlhkosti.

Za ustálených teplotních a vlhkostních poměrů, kdy dochází k rovnováze mezi vlhkostí materiálu a vlhkostí vzduchu, který jej obklopuje, nastává rovnovážná vlhkost.

Vlhkost ve zděných stavebních konstrukcích má vliv na fyzikální vlastnosti materiálů a může způsobit rozsáhlé problémy. Zvýšená vlhkost zdiva se nejčastěji projevuje vznikem zřetelných vlhkostních map na povrchu zdiva, odpadáváním omítky, jejím rozpadem v důsledku soustředění rozpustných solí, napadením mikroorganismy, bakteriemi, plísněmi a řasami [2]. Dochází rovněž ke změně mechanicko-fyzikálních vlastností [3-6], zejména modulu pružnosti a pevnosti, což vede ke snížení únosnosti vlhkého zdiva [7,8].

K degradačním procesům spojeným s vlhkostí patří i zhoršení tepelně technických vlastností následkem vyšší tepelné vodivosti zdiva.

Na povrchu konstrukce dochází ke kondenzaci par a tím se vytváří podmínky vhodné pro růst mikroorganismů a plísní, které nepříznivě působí na zdraví člověka [9].

Vlhkost se vyjadřuje hmotnostním nebo objemovým poměrem vody k pevné fázi suché látky [10].

$$w = \frac{(m_w - m_d)}{m_d} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.1)$$

kde je whmotnostní vlhkost [%],

m_whmotnost vlhkého materiálu [kg],

m_dhmotnost suchého materiálu [kg].

Klasifikační tabulka (*Tab. 1*) uvedená v normě ČSN P 73 0610 [11] předepisuje a kategorizuje přiměřené a zvýšené hodnoty hmotnostní vlhkosti, které jsou směrné. Uvedené stupně vlhkosti se týkají zásadně konstrukcí, které jsou vyžděny z cihel na běžnou maltu.

Vlhkost zdiva w v % vlhkosti	Stupeň vlhkosti
$w < 3 \%$	Vlhkost velmi nízká
$3 \% \leq w < 5 \%$	Vlhkost nízká
$5 \% \leq w < 7,5 \%$	Vlhkost zvýšená
$7,5 \% \leq w < 10 \%$	Vlhkost vysoká
$w > 10 \%$	Vlhkost velmi vysoká

Tab. 1 Klasifikace vlhkosti zdiva dle ČSN P 73 0610 [11]

V odborné literatuře se mohou limitní hodnoty vlhkosti zdiva odlišovat od hodnot uvedených v tabulce výše. V této disertační práci je uvažováno s hodnotami uváděnými českou normou.

2.2. Vliv vlhkosti na fyzikální vlastnosti stavebních konstrukcí

Základní vlhkovní vlastnosti, které ovlivňují materiálové vlastnosti, jsou pórovitost, nasákavost, kapilární kondenzace a rovnovážný obsah vlhkosti. Mezi další fyzikální vlastnosti vody patří např. difúze vodní páry a kapilární vedení vlhkosti v porézních materiálech [12, 13].

2.2.1. Pórovitost

Pórovitost vyjadřuje celkový procentní podíl volného prostoru, který není vyplněn pevnými částicemi. Pro stanovení pórovitosti p slouží následující rovnice:

$$p = \left(\frac{V_v}{V_s} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.2)$$

kde je ppórovitost [%],

V_vobjem volného prostoru [m³],

V_sobjem pevných částic [m³].

Pórovité látky jsou z hlediska transportních procesů klasifikovány podle velikosti pórů. Velikost pórů ovlivňuje jejich zaplňování vodou absorpčními a kapilárními silami. Podle posledních výzkumů jsou póry rozděleny do tří skupin:

- makroskopické póry o účinném poloměru větším než $2 \cdot 10^{-7}$ m,
- kapilární póry o účinném poloměru $2 \cdot 10^{-7}$ - $1,5 \cdot 10^{-9}$ m,
- mikroskopické póry o účinném poloměru menším než $1,5 \cdot 10^{-9}$ m.

Z technického hlediska je důležité brát pórovou strukturu materiálu jako základní informaci při volbě sanačních opatření [14].

2.2.2. Nasákavost

Nasákavost je charakterizována množstvím vody, které pojme vysušená pórovitá látka, ponoří-li se do vody po určitou dobu a za podmínek uvedených v normě. Z nasákavosti můžeme zjistit celkové množství tzv. otevřených pórů a mrazuvzdornost dané stavební látky [15].

Pro stanovení nasákavosti NV z hmotnostního obsahu vody lze použít následující rovnici:

$$NV = \left(\frac{w_w - w_d}{w_d} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.3)$$

Objemová nasákavost se přepočítává z následující rovnice:

$$NV_v = \frac{NV \cdot \rho_d}{\rho_w} \quad [\%] \quad (1.4)$$

kde je w_whmotnost vzorku před vysušením [kg],
 w_dhmotnost vzorku po vysušení [kg],
 ρ_dobjemová hmotnost vysušeného vzorku [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$],
 ρ_wobjemová hmotnost vody [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$].

Nasákavost stavebních materiálů je ovlivněna jejich hydrofobními a hydrofobními a hydrofobními vlastnostmi. Hydrofobizovaný povrch snižuje nasákavost použitého materiálu. Úroveň hydrofobizace udává, kolikrát je snížena nasákavost látky ve srovnání s počátečním stavem. Nasákavost ošetřeného zdiva by měla ve srovnání s neošetřeným poklesnout minimálně o 70 % a propustnost pro vodní páru by se neměla snížit o více než 10 %. (dle WTA [16]).

2.2.3. Rovnovážný obsah vlhkosti

Rovnovážná vlhkost je vlhkost, kterou látka přebírá z okolního vzduchu za ustálených teplotních a vlhkostních podmínek.

V praxi je nejdůležitější absorpční látka vodní pára. Stavební materiály v konstrukci pohlcují vodní páry z ovzduší až do dosažení rovnovážného stavu, případně je-li parciální tlak vodní páry ve zdivu vyšší než parciální tlak vodní páry v okolním prostředí, uvolňují se vodní páry až do vyrovnání v ovzduší. Rovnovážný stav závisí ovšem na teplotě prostředí a parciálním tlaku vodní páry. Tyto jevy se nazývají sorpce a desorpce vodní páry [2].

Pokud je vlhkost ve stabilní rovnováze mezi vlhkostí v konstrukci a vlhkostí v okolním vzduchu, je dosaženo rovnovážného stavu vlhkosti. Rovnovážný obsah vlhkosti je charakterizován jako nulový přírůstek vlhkosti a teploty v čase za daných podmínek.

Rovnovážná vlhkost vzduchu je závislá na teplotě, relativní vlhkosti vzduchu a atmosférickém tlaku. Pokud je atmosférický tlak konstantní, rovnovážný obsah vlhkosti ve vzduchu závisí pouze na teplotě a relativní vlhkosti okolního vzduchu. Rovnovážná vlhkost se zvyšuje s obsahem vodorozpustných solí [17].

2.3. Transport vody a vlhkost zdiva

Transport vody a vodní páry ve zdivu je ovlivňován různými fyzikálními procesy, které lze rozdělit do následujících skupin:

- kapilární vedení vody,
- difúze vodní páry,
- kondenzace vodní páry a kapilární kondenzace vodní páry,
- sorpce.

2.3.1. Kapilární vedení vody

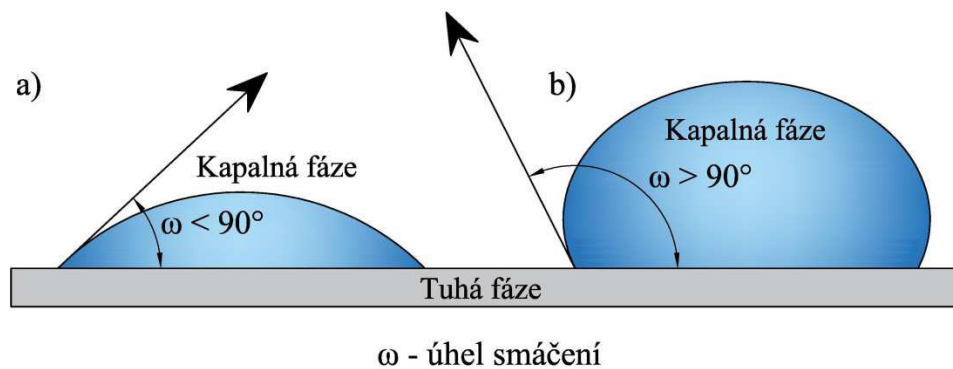
Jedním ze základních transportních mechanismů vody je kapilární vedení. Tento jev je charakteristický zejména pro vodou smáčivé materiály, což je převážná většina stavebních látek. Při kontaktu pórovitého materiálu s vodou dochází k intenzivnímu nasávání vody, přičemž materiály s většími póry nasávají vodu sice rychle, avšak výška vzlinutí je nízká. Naopak jemně pórovité hutné materiály sají vodu pomalu, avšak výška vzlinutí je poměrně vysoká [18].

Mezifázové (povrchové) napětí, povrchová energie

V důsledku kapilarity může voda ve stavební konstrukci vystoupat vysoko nad úroveň ustálené výšky vodní hladiny. Hnací silou je mezifázové napětí. Jedná se o výslednici mezifázových sil na rozhraní prostředí (kapalina, vzduch a pevná látka), které obklopuje stěnu kapiláry.

Mezifázové napětí na povrchu pevné látky ovlivňuje například smáčivost povrchu kapalinou, což je podstatné pro všechny kapilární jevy.

Úhel ω , který svírá okraj malé kapky s pevnou látkou, se nazývá smáčecí úhel (*Obr. 1*). Tento úhel charakterizuje smáčivost povrchu pevné látky kapalinou. Pokud jsou stěny kapilár pokryty látkami, které zabraňují smáčení, změní se i úhel smáčení ω . Je-li úhel smáčení větší než 90° , jedná se o tzv. kapilární depresi (záporná výška vzlinutí) a proces je označován jako hydrofobita [19].



Obr. 1 Smáčecí úhel na styku tuhé a kapalné fáze – a) smáčení, b) nesmáčení (hydrofobní materiál)

Kapilární elevace a deprese

Kapilární jevy lze pozorovat ve velmi úzkých trubicích, tzv. kapilárách, ponořených jedním koncem do nádoby s kapalinou (*Obr. 2*).

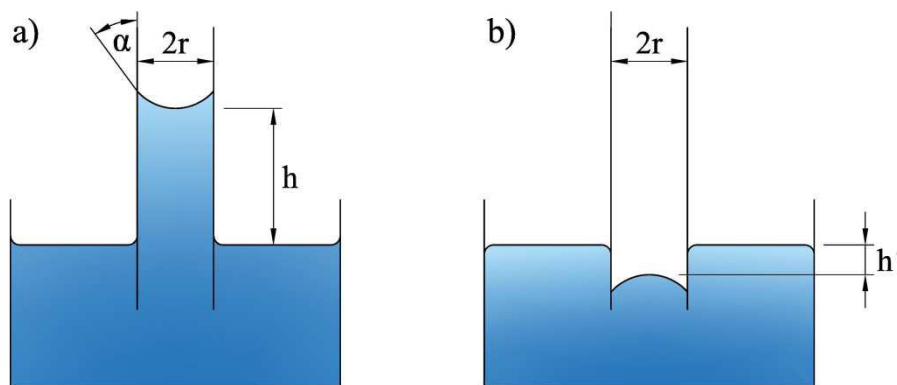
V případě, že kapalina smáčí povrch kapiláry ($\cos \omega > 0$), je kapilární tlak p_k je kladný (orientovaný proti gravitaci) a způsobí zvýšení hladiny v kapiláře (vzlínání) vzhledem k úrovni okolní hladiny o úsek h tak, aby vyrovnal hydrostatický tlak v kapiláře v úrovni okolní hladiny. Tento jev se nazývá kapilární elevace.

Naopak v případě nesmáčivého povrchu kapiláry ($\cos \omega < 0$) dochází ke snížení hladiny v kapiláře vzhledem k úrovni okolní hladiny. Tomuto opačnému jevu se říká kapilární deprese. Výška elevace (deprese) závisí kromě hodnoty adhezní konstanty také na poloměru kapiláry.

Zvýšení (nebo snížení) hladiny v kapiláře lze určit ze vzorce:

$$h = \frac{p_k}{\rho g} = \frac{2\sigma \cos\omega}{r\rho g} \quad [\text{m}] \quad (1.9)$$

kde σ je povrchové napětí, ρ je hustota, ω představuje stykový úhel a r je poloměr kapiláry.



Obr. 2 Kapilární elevace a deprese – a) kapilární elevace, b) kapilární deprese

2.3.2. Difúze vodní páry

Difúze vodní páry nastává v důsledku rozdílů parciálních tlaků vodní páry v zeminách, konstrukcích a ve vzduchu mezi vnějším a vnitřním prostředím budov. Difundující vodní pára se pohybuje z místa s vyšším parciálním tlakem k místu s nižším parciálním tlakem.

Hnacím mechanismem při difúzi vodní páry je gradient tlaku a gradient teploty. Gradient teploty (termoosmóza) přivádí vodu k místům s vyšší teplotou. Působí tedy v opačném směru než difúze (směr toku vodní páry vlivem gradientu tlaku je opačný vzhledem k toku vlivem gradientu teploty). Obě tyto síly se sčítají a výsledný pohyb vlhkosti směřuje buď k vnějšímu, nebo k vnitřnímu líci obalové konstrukce.

Směr difúzního toku je během převážné části roku směrem z vnitřního do vnějšího prostředí budovy. V zimním období je parciální tlak vodních par ve venkovním prostředí výrazně nižší, zatímco ve vnitřním prostředí je parciální tlak vodních par vyšší v důsledku vzniku vodní páry z lidské činnosti (příprava jídel, koupání, dýchání apod.).

V průběhu léta se směr difúzního toku vodní páry na čas obrátí. Tento jev je však bezvýznamný, neboť v této době jsou teplotní poměry mezi vnější a vnitřní stranou obvodového zdiva jen málo rozdílné.

Vodní páry difundují každou látkou, jejíž velikost pórů překračuje $2,78 \cdot 10^{-10}$ m, což je střední volná dráha molekul vody. Z toho vyplývá, že v pórech s menším rozměrem je difúze vodní páry vyloučena. K difúzi dochází jen v těch kapilárách a pórech, které nejsou vyplněny vzduchem a které nejsou zcela zaplněny vodou.

V kapilárně porézních materiálech se u velkých pórů přenos vlhkosti uplatňuje difúzí. V malých propojených kapilárách převážně zaplněných vodou probíhá přenos vlhkosti kapilárními silami transmisí (tzn. vodivostí vlhkosti). Difúze i transmise probíhají současně, ale nemusí být stejného smyslu [2].

Faktor difúzního odporu μ definuje, kolikrát je faktor difuzního odporu konstrukce budovy vyšší než faktor difúzního odporu pro stejnou vrstvu vzduchu (bezrozměrné množství). Difuzní odpor představuje přenos vodní páry skrz povrch a je uveden jako:

$$d_{\mu} = \mu \cdot d \quad [\text{m}] \quad (1.10)$$

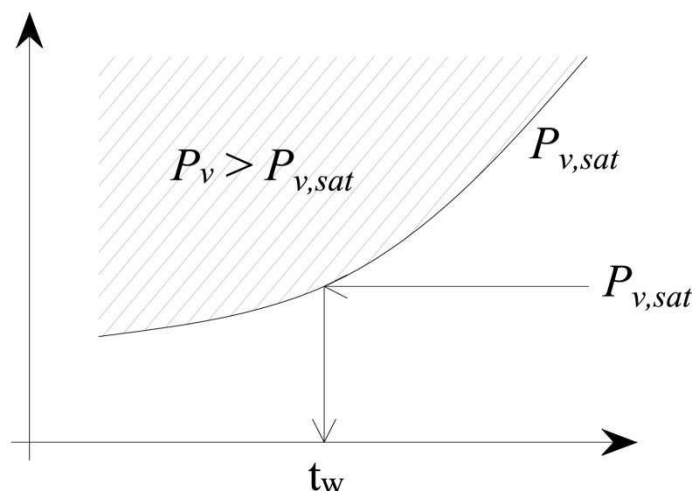
kde je dtloušťka vrstvy (např. omítky nebo barvy) na fasádě [m].

2.3.3. Kondenzace vodní páry

Kondenzace znamená, že vodní pára zkondenzuje buď na povrchu, nebo uvnitř objektu. Vzduch může obsahovat pouze částečné množství vodní páry. Pokud parciální tlak vodní páry dosáhne specifické maximální hodnoty $P_{v,sat}$, dojde k nasycení vzduchu vodní párou. Vzduch dosáhne tzv. rosného bodu. V případě, že se do takto nasyceného vzduchu dostane další vzduch, dochází k tzv. kondenzaci vodní páry. Kondenzace se projevuje jako mlha, kapky vody (rosa) atd. Všechny tyto případy jsou nazývány kondenzace vodní páry na povrchu. Tento účinek je způsoben změnami teploty. Pokud je teplota na povrchu předmětu nižší než rosný bod, dochází ke kondenzaci na povrchu. Podíl parciálního tlaku vodní páry P_v a parciálního tlaku vodní nasycené páry $P_{v, sat}$ se nazývá relativní vlhkost:

$$\varphi = \left(\frac{P_v}{P_{v,sat}} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (1.11)$$

Obsah vody ve vzduchu je vyjádřen buď jako [%] nebo jako absolutní hodnota vlhkosti [$\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$]. Procento nasycení vzduchu vodní párou je funkcí teploty. Relativní vlhkost se tedy liší pro konkrétní hodnotu $P_{v,sat}$ při různé teplotě vzduchu (*Obr. 3*).



Obr. 3 Závislost $P_{v,sat}$ na teplotě vzduchu

Kondenzace v kapilárách se vyskytuje v pórech o průměru větším než $0,5 \cdot 10^{-6}$ mm, neboť průměr molekuly vody je 10^{-7} mm. V pórech s menším průměrem k difuzi vodní páry nedochází. U zakřivených povrchů s průměrem menším než 10^{-4} mm dochází ke kondenzaci vodní páry mnohem rychleji než ke kondenzaci na povrchu [20].

Kapilární kondenzace je důvodem, proč mají jemné porézní kameny a cementová malta vyšší obsah vlhkosti za stejné teploty. Místa spojená cementovou maltou nebo cementovou omítkou ve vlhkých sklepech mají vyšší obsah vlhkosti po celou dobu životnosti konstrukce na rozdíl od stavebních materiálů s většími póry, které zůstávají suché. Obdobný případ je u nového i historického zdiva. Historické zdivo již obsahuje vodorozpustné soli a to má za následek změny kapilární vztlávanosti a proto má zdivo vyšší obsah vody [13, 14, 21].

2.4. Soli

Jen určitá část solí představuje ve stavebnictví reálné nebezpečí, především ty, které jsou vodorozpustné. Nejběžnějšími solemi jsou sírany, chloridy a dusičnany, v menší míře se v objektech objevují uhličitany a dusitany [22]. Soli se dostávají do zdiva s pronikající vlhkostí z půdy nebo jsou obsaženy primárně ve stavebních materiálech. Dále mohou soli vzniknout chemickou korozí nebo pronikat do zdiva z biologických zdrojů. Vlhkostí jsou soli rozpouštěny a vystupují z materiálů na povrch. Soli jsou hygroskopické, což znamená, že přijímají vlhkost z okolního vzduchu. Transport solí ve zdivu je spojen s transportem vlhkosti v porézních materiálech [23]. Na povrchu zdiva soli vlivem odpařování vody krystalizují a způsobují poškození omítek, nátěrů a vlastního zdiva.

Postupně krystalizující a sedimentující rozpuštěné soli na stěnách kapilár způsobují rýhování stěn a zmenšení průměru těchto kapilár. U jemných kapilár voda vystoupí výše než u kapilár hrubých [24].

Problémem solí se předložená disertační práce podrobněji nezabývá.

2.5. Metody sanace vlhkého zdiva

Sanace vlhkého zdiva je soubor opatření, kterým se odstraní příčiny zavlhání a umožní vlhkému zdivu postupně vysychat a snížit tak vlhkost na požadovanou úroveň. Sanace je řešení příčin i důsledků vlhkosti. V rámci disertační práce jde o proces odstranění nepřipustné vlhkosti v konstrukci pronikající z podzákladí.

Sanace dělíme na metody přímé, nepřímé a doplňkové [25, 26]. Velmi podrobné členění je uvedeno v normě ČSN P 73 0610. Rozdělení lze shrnout podle toho, zda metody omezují zdroj vlhkosti, zasahují do konstrukcí, nebo podle umístění hydroizolace.

Metody zasahující do stavebních konstrukcí (metody přímé):

- mechanické metody - dodatečné bariéry ve zdivu,
- metody chemické,
- vzduchové izolační systémy,
- metody elektroosmotické.

Doplňkové přímé metody:

- hydrofobní nástřiky a nátěry,
- sanační omítky,
- další povrchové úpravy.

Metody snižující vlhkost v konstrukcích (metody nepřímé):

- odvodnění okolí stavby pomocí drenáží a terénních úprav,
- přirozené i nucené větrání místností,
- jímání vlhkosti z vnitřního vzduchu pomocí sušících přístrojů,
- úprava vnějšího prostředí – úprava terénu v okolí.

Kombinaci nejvhodnějších metod volíme tak, aby způsob sanace odpovídal příčinám, úrovni vlhkosti a typu zdiva a případně statickému narušení. Důležitý je i způsob využití prostor, tj. zda jsou sanované místnosti určeny pro dlouhodobý pobyt osob nebo uskladnění předmětů citlivých na vlhkost. Důležité je kritérium vzájemného poměru účinnosti a spolehlivosti k ceně metody [27].

Disertační práce se zabývá metodou vzduchových izolačních systémů.

2.6. Průzkumy staveb pro návrh sanace vlhkého zdiva

K základním stavebně technickým průzkumům patří vlhkostní průzkum staveb. Je vhodné, aby byl tento průzkum proveden již v úvodním stupni projektové dokumentace. Realizace sanačních zásahů může výrazně ovlivnit celkové stavební řešení u objektu.

2.6.1. Měření vlhkosti zdiva

Výsledky vlhkostního průzkumu zahrnují posouzení technického stavu vlhkého zdiva z hlediska mechanické odolnosti a stability, chemickou analýzu případné podzemní vody, hodnocení stupně vlhkosti a zasolení zdiva podle ČSN 73 06 10 [11] a zhodnocení vnějších a vnitřních podmínek. Průzkum dále obsahuje souhrn doposud provedených sanačních opatření a stanovení příčin vlhkosti. Na základě provedených průzkumů se následně určí vhodná technologie sanace [28, 29].

Principy měření

Pro posouzení technického stavu sanovaných historických konstrukcí je důležitá informace o rozložení vlhkosti ve zdivu, a to jak z hlediska budovy jako celku, tak i z hlediska konkrétního místa (profilu stěny). Součástí vlhkostního průzkumu by mělo být i sledování časové změny hodnoty vlhkosti v konstrukcích [6]. Tyto údaje lze spolehlivě stanovit pouze měřením. Metody měření vlhkosti lze rozdělit do dvou základních skupin. Pokud je měřenou veličinou množství vody v materiálu, která je oddělena od pevné fáze, jedná se o přímou metodu a vzorek je odebírán destruktivním způsobem (odseknutí, odvrtání). V případě, že je měřena konkrétní fyzikální veličina v závislosti na měnící se vlhkosti materiálu, jde o nepřímou metodu a měření je obvykle nedestruktivní. Často bývá užívána kombinace některé nepřímé metody (měření přístrojem) s ověřením metodou přímou, tj. destruktivní gravimetrickou (odběr vzorků a následný převoz do laboratoře).

Pro stanovení vlhkostního zatížení objektu se vzorky odebírají z míst, která jsou z hlediska vlhkostního namáhání typická nebo kde jsou projevy vlhnutí nejvíce zřetelné (rozrušené a zavlhlé omítky se sníženou přídržností k podkladu apod.) [30]. Vzájemně lze objektivně porovnat pouze údaje zjištěné ze vzorku stejného materiálu, neboť i v případě rovnoměrně vlhkého zdiva bude vždy naměřena různá hodnota vlhkosti cihly/kamene a malty.

Z důvodu objektivnosti je také vhodné provádět měření vlhkosti zdiva ve více časových intervalech, pokud možno v rozdílném období z hlediska vlhkostního režimu (v období častých srážek a v období sucha). Obzvláště za deště se mohou objevit souvislosti a příčiny zvýšené vlhkosti zkoumaného objektu, které by jinak nebyly patrné [28, 29].

Gravimetrie

Gravimetrická metoda je jednou z nejpoužívanějších metod měření vlhkosti zdiva. Metoda je založena na vážení odebraného vzorku zdiva (segmentu kusového staviva, malty nebo omítky), kdy se porovnává hmotnost „vlhkého“ vzorku (po odebrání) s hmotností vysušeného vzorku. Vážení a vysušení vzorků se provádí v laboratoři. Pro menší množství vzorků (2-3 ks) je možné provádět gravimetrické stanovení vlhkosti i přímo na místě měřeného objektu pomocí speciálních přenosných vah se zabudovanou topnou spirálou [31].

Gravimetrická metoda je považována za nejpřesnější metodu pro stanovení vlhkosti zdiva. To je dáno zejména tím, že není závislá na znalosti technických parametrů měřeného materiálu (tyto parametry jsou v případě historických stavebních konstrukcí často obtížně zjistitelné) a není tedy třeba zjištěné hodnoty upravovat pomocí kalibračních vztahů. Gravimetrická metoda navíc není zatížena téměř žádnými rizikovými faktory, typickými pro měření vlhkosti pomocí přístrojů. Díky své přesnosti je gravimetrie často využívána pro kalibraci ostatních nepřímých metod. V současné době je tato metoda jediná soudně uznatelná v případě reklamací a sporů mezi projektantem, zhotovitelem a zákazníkem.

Hlavním problémem gravimetrické metody je destruktivní charakter odběru zkušebních vzorků, který je v řadě případů neproveditelný (historicky cenné povrchy, nepřijatelné estetické znehodnocení vnitřních i vnějších povrchů). Pro odběr vzorků z povrchu zdiva se používá sekáč a kladivo. Odběr vzorků z hloubky je prováděn pomocí odvrtů příklepovou vrtačkou, kdy má odebíraný vzorek práškovitý charakter. Problémem hloubkového odběru vzorků je však skutečnost, že se vrták při odběru vzorků zahřívá a tím dochází ke snížení vlhkosti odvrtaného materiálu, což může vést k výraznému ovlivnění výsledků měření. Proto je nezbytné vzorky s větších hloubek zdiva získávat pomocí vrtáků větších průměrů při nižších otáčkách (to ovšem značně prodlužuje proces vrtání a snižuje tak množství odebraných vzorků v daném čase). V případě vzorků získaných odvrtí je vždy potřeba přičíst k naměřené hodnotě vlhkosti určitou přírážku (2-3%). V době mezi odběrem vzorků in-situ a laboratorním měřením (doprava) může také dojít k částečnému vysušení vzorků a tato prodleva může způsobit nepřesnost naměřených hodnot (záleží na způsobu uchování vzorků během transportu do laboratoře).

Kapacitní přístroje

V případě volby nepřímé metody pro měření vlhkosti zdiva je normou ČSN 730610 [11] doporučeno použití kapacitního přístroje. Kapacitní vlhkoměry pracují na principu dvojice elektrod (zabudovaných uvnitř přístroje), které vytvářejí měřicí kondenzátor, jehož dielektrikem je zkoumaný stavební materiál. Se změnou vlhkosti prostředí se mění i kapacita kondenzátoru. Výsledky měření však neudávají přímo hodnotu hmotnostní vlhkosti, tuto hodnotu je nutné z poskytovaných údajů přepočítat pomocí kalibrační křivky, která je pro jednotlivé stavební materiály odlišná. Moderní kapacitní přístroje, u kterých je možné přednastavit materiálovou charakteristiku, tento přepočet provádí automaticky pomocí zabudovaného softwaru a na displeji zobrazují uživateli již přímo hodnotu vlhkosti měřeného stavebního materiálu.

Hlavní výhodou kapacitních přístrojů je velmi snadné měření (pouhé přiložení přístroje ke stěně), které umožňuje měřit vlhkost na mnoha místech objektu v relativně krátkém časovém úseku. Kapacitním přístrojem je tak možné zjistit vlhkost uvnitř posuzované vrstvy, aniž by bylo nutné mechanicky poškozovat povrch stavební konstrukce. Jedná se tedy o nedestruktivní metodu vhodnou pro použití v historicky cenných interiérech, ale také zároveň všude tam, kde je z estetických nebo jiných důvodů nepřijatelné odebírat vzorky destruktivní metodou. Další výhodou kapacitního měření je skutečnost, že

na výsledky měření má zanedbatelný vliv jak okolní teplota tak i případné sloučeniny solí rozpuštěné ve vodě a obsažené ve zdivu.

Je však třeba zmínit, že kapacitní způsob měření je přesný pouze pro oblasti s nízkou vlhkostí zdiva (cca do 6 %). V případě vyššího obsahu vlhkosti v konstrukci již touto metodou nelze získat výsledky s požadovanou přesností a jejich vypovídací hodnota je pouze orientační. Nezřídka je tak možné v případě vysoké vlhkosti v konstrukci přístrojem zaznamenat velmi rozdílné hodnoty, naměřené v malé vzdálenosti od sebe. Dalším negativem spojeným s kapacitním měřením vlhkosti je poměrně malá hloubka měření, která je obvykle pouze 10 – 25 mm pod povrchem zdiva. Tímto způsobem měření tedy není možné zaznamenat celý vlhkostní profil stěny, neboť nelze provádět měření uvnitř konstrukce. V případě zatížení zdiva vzlínající vlhkostí však bývá nejvyšší hodnota vlhkosti právě uprostřed konstrukce (v povrchových vrstvách dochází ke snížení vlhkosti vlivem difuze vodní páry). Použití kapacitní metody je tak obvykle vhodné pouze ke zjišťování povrchové vlhkosti, tedy ke zjištění hranice vlhkostní mapy. Výsledky naměřené kapacitním přístrojem mohou sloužit pro orientační (předběžné) stanovení vlhkosti stavebních konstrukcí, které je vždy nutné doplnit ještě jinou, přesnější metodou.

Odporové přístroje

Pro měření hmotnostní vlhkosti historického zdiva in-situ je možné využít také odporový vlhkoměr. Měření vlhkosti tímto přístrojem je založeno na principu vedení elektrického proudu pórovitou látkou, přičemž se měří velikost měrného odporu látky, který se velmi výrazně mění v závislosti na vlhkosti. Vlhkost (společně s roztoky solí vyskytujícími se ve zdivu) tvoří z hlediska vedení elektrického proudu vodivý elektrolyt s různou koncentrací, přičemž platí, že elektrická vodivost se zvyšuje se zvyšujícím se obsahem vody ve zdivu. Vlhké zdivo je proto možné považovat za polovodivý nehomogenní materiál. Stejně jako u kapacitních přístrojů, musí být i u odporového měření naměřené hodnoty upraveny pomocí kalibračních vztahů. Současné moderní odporové vlhkoměry obsahují ve svém softwarovém vybavení obvykle rozsáhlý katalog materiálových charakteristik, díky kterému jsou schopny zobrazit uživateli již přímo hodnotu hmotnostní vlhkosti podle [11], vypočítanou přístrojem podle integrované kalibrační křivky daného materiálu. Odporové vlhkoměry jsou v současnosti využívány především pro měření vlhkosti dřeva (pomocí hrotových sond), jejich využití v oblasti průzkumu vlhkého zdiva je spíše výjimečné.

Základní výhodou odporových vlhkoměrů oproti kapacitním přístrojům je možnost měření vlhkosti v téměř libovolné hloubce ve zdivu. Měření probíhá pomocí tzv. kartáčových sond, které jsou aplikovány do 2 předvrtaných otvorů ve zdivu, provedených v předepsané vzdálenosti od sebe. Otvory je možné vyvrtat do libovolné hloubky, limitující je pouze délka sond (vyrábí se obvykle v několika délkách, až do 300 mm). Tímto způsobem je možné sestavit úplný vlhkostní profil stěny. Při uvažování možnosti vrtání sond z obou stran zdiva a při použití sond délky 300mm je tak možné plně analyzovat zdivo až do tloušťky 750 mm. Další významnou výhodou odporového měření je vyšší přesnost získaných hodnot oproti kapacitním přístrojům.

Přesnost měření odporových přístrojů může být v ojedinělých případech ovlivněna přechodovým odporem mezi měřicími elektrodami a zdivem. Tomu však lze předejít aplikací speciální vodivé pasty na konce kartáčových sond (ve většině případů to ale není třeba). Rizikovým faktorem může být také vysoký obsah solí obsažených ve vlhkém zdivu (soli ovlivňují vodivost stavebního materiálu). V takovém případě je možné považovat výsledky za přesné pouze při nižších hodnotách vlhkosti (do 6 %). U nezasoleného zdiva lze ovšem odporovými přístroji dosáhnout výrazně přesnějších výsledků než pomocí kapacitních vlhkoměrů a to zejména při rovnoměrném rozložení vlhkosti ve zdivu. Základní nevýhodou odporového měření oproti kapacitnímu je tak pouze nutnost vrtání otvorů pro aplikaci sond. Díky tomu se jedná o destruktivní metodu, neboť dochází k určitému poškození měřené konstrukce. Protože se však obvykle jedná o otvory menších profilů (6 – 8 mm), nejde o zásadní porušení povrchu zdiva a místa vrtů je možné následně snadno zakrýt [28, 29].

Další přístroje

Mikrovlnné měření

Mikrovlnný proces je typem dielektrické metody, která využívá vlivu vlhkosti historického zdiva na útlum mikrovlnného záření při průchodu prostředím pórovité látky. To znamená, že se zjišťuje poměr mezi dielektrickou konstantou vody a materiálem. Tímto způsobem lze ve zkoumaném materiálu určit i velmi malé množství vody. Mikrovlnný senzor tohoto měřicího přístroje obsahuje zařízení, které umožňuje proniknout nedestruktivním způsobem až do hloubky cca 30 cm. Je tedy vhodný ke zjišťování vlhkosti uvnitř měřeného materiálu. Nicméně je třeba vzít v úvahu, že se maximální hloubka průniku výrazně snižuje, pokud je měřený materiál na povrchu silně provlhlý. Mikrovlnné měření je téměř nezávislé na obsahu solí ve zdivu. Je však třeba zmínit, že naměřené hodnoty je třeba interpretovat jako relativní hodnoty, protože pomocí mikrovlnného měření lze zjistit pouze rozdíl mezi suchými a vlhkými materiály.

Radiometrické měření

Radiometrie umožňuje měření objemové vlhkosti zdiva historických budov bez jeho porušení. Metoda je založena na principu moderace rychlých neutronů, převážně atomy vodíku. Ve vlhkém prostředí dochází k tomu, že rychlé neutrony jsou zpomalovány srážkami s vodíkovými jádry. Ve chvíli kdy mají stejnou tepelnou rovnováhu s jádry prostředí, jsou tyto neutrony registrovány detektory pomalých neutronů, které jsou připojeny na vyhodnocovací jednotku. Platí, že čím je větší vlhkost materiálu, tím je větší odezva detektoru. Měření vlhkosti tímto způsobem může být nepřesné u materiálů obsahujících vázanou vodu, nebo u prvků, které pohlcují pomalé neutrony např. Cl, Cd, K, Br.

3. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

3.1. Úvod

Tématem disertační práce jsou vzduchové izolační metody. Proto je dále podrobněji pojednáno o této problematice.

Vzduchové izolační metody jsou velmi rozsáhlým souborem různých sanačních opatření, jejichž základním funkčním principem je snaha o maximalizaci množství vodní páry difundující ze stavební konstrukce, případně z přilehlého terénu. Základní princip funkce vzduchových dutin používaných při odvlhčování zdiva spočívá zpravidla v oddělení stavební konstrukce (zdiva, podlahy) od zdroje vlhkosti (přilehlé zeminy) pomocí větrané vzduchové dutiny, která má zajištěn trvalý přívod a odvod vzduchu.

Cílem vzduchových izolačních sanačních metod je významně snížit množství vody v konstrukci, která se pomocí kapilárního vztlínání šíří ze spodní stavby do vyšších poloh budovy. Pro účinné snížení vlhkosti sanované konstrukce je nutné zajistit intenzivní výměnu vzduchu v bezprostřední blízkosti konstrukce tak, aby nedošlo k dosažení hodnoty relativní vlhkosti přilehlé vrstvy vzduchu $\varphi = 100 \%$. Proto jsou všechny vzduchové izolační sanační systémy konstruovány tak, aby umožňovaly proudění vzduchu v bezprostřední blízkosti povrchu sanované konstrukce. Zároveň je důležité, aby měl přiváděný vzduch co nejnižší relativní vlhkost φ [%]. Pro správný návrh této sanační metody je tedy nutné porozumět principu proudění vzduchu, transportu vlhkosti, rozložení rychlosti a teploty vzduchu ve vzduchových dutinách. Této oblasti výzkumu se věnuje převážná většina autorů [32-36].

Sanační metody pomocí provětrávaných vzduchových dutin mají omezenou účinnost při zvýšené hladině solí rozpustných ve vodě. Tyto soli mají schopnost vázat na sebe vodu obsaženou v okolním vzduchu a zadržovat ji v kapalně formě, čímž dochází ke zvyšování hodnot rovnovážných vlhkostí materiálů, ve kterých jsou obsaženy.

Vzduchová opatření jsou z hlediska metodiky památkové ochrany velmi vhodná, navazující na systémy historické, pokud však neznamenají příliš zásadní zásahy do zdiva (omezeními bývají např. chráněné podlahy, dlažby, sokly atd.). Byly-li vzduchové úpravy budovány spolu se stavbou, jako její konstrukční součást, znamená to, že podmínky stavby a opatrnost stavitele vyžadovaly tuto úpravu vzhledem k vlastnostem staveniště. Návrhem a realizací těchto metod v terénu se zabývá mnoho autorů, zejména ti, kteří mají zkušenosti ověřené v praxi [37-43].

Mezi nevýhody vzduchových izolačních metod patří obecně riziko jejich nízké účinnosti, dané buď vlivem nevhodného konstrukčního řešení (knappenovy kanálky, předstěny odvětrané do interiéru, nopové fólie – nedostatečná šířka dutiny) nebo vlivem nevhodné instalace (velká tloušťka zdiva, příliš intenzivní dotace vody do konstrukce, neupravený difuzně uzavřený povrch konstrukce). Z důvodu nízké účinnosti se vzduchové izolační systémy navrhují při hmotnostní vlhkosti cihelného zdiva 7 - 8 %. Další významnou nevýhodou je omezená trvanlivost některých současných konstrukčních řešení (zděné konstrukce provětrávaných štol a vnějších podzemních předstěn, skládané sokly s využitím prvků na bázi dřeva).

Ačkoliv byla účinnost vzduchových izolačních sanačních metod ověřena mnoha praktickými zkušenostmi, stále existuje mnoho nejasností ohledně jejich skutečného účinku na sanovanou konstrukci.

Obecně o vzduchových izolačních sanačních metodách, jejich způsobu použití a principu fungování již bylo zveřejněno mnoho publikací [44-48]. Autoři se v nich často zabývají otázkou, zda použití vzduchové dutiny má vliv na snížení vlhkosti spodní stavby či ne, zkoumají výškovou úroveň vysychající fronty ve zdivu při použití vzduchových dutin a bez nich [49-53]. Z velké části jsou publikace zaměřeny na problematiku transportu vody v pórovitých stavebních materiálech, fyzikální procesy probíhající při proudění vzduchu ve vzduchových dutinách a na analýzu problémů spojených s kapilárně vztlínající vlhkostí. Velmi rozsáhlá je pak oblast numerického modelování pomocí CFD výpočtových programů [54-58]. Naopak analýze účinnosti vzduchových izolačních metod se věnuje pouze malé procento autorů [59-61], přestože existuje mnoho nejasností ohledně skutečného účinku těchto metod na sanovanou konstrukci.

3.2. Vzduchové izolační metody

3.2.1. Princip vzduchových izolačních metod

Mezi vzduchové izolační systémy patří provětrávané předstěny provedené na celou výšku podlaží (lze provádět z interiéru i z exteriéru), provětrávané podlahy, větrací kanálky ve zdivu, vnější provětrávané sokly a provětrávané štoly (konstrukce vybudované zcela pod úrovní terénu nebo podlahy).

Základním principem vzduchových izolačních metod je oddělení zdiva, případně podlahy, od zdroje vlhkosti pomocí odvětrávané vzduchové dutiny.

Přirozené (gravitační) proudění vzduchu v dutině

V současnosti je při návrhu sanace pomocí vzduchových izolačních metod uvažováno zejména přirozené proudění vzduchu, při kterém dochází k samotížnému proudění vzduchu (tlakovému spádu) ve vzduchové dutině.

Tlakového spádu je dosaženo v důsledku výškového rozdílu nasávacích a výdechových otvorů (komínový efekt) a dále rozdílem hustot a teploty vzduchu v exteriéru a interiéru dutiny [62].

Relativní vlhkost vzduchu vstupujícího do větraných dutin by měla být pokud možno co nejnižší a teplota vzduchu co nejvyšší. Při pohybu podél vlhké konstrukce musí proudící vzduch přijímat vodu v podobě vodní páry difundující z přilehlé konstrukce. Z tohoto důvodu by proudění vzduchu o jiných parametrech (relativní vlhkost, teplota) nemělo praktický význam. V dutinách by navíc mohlo docházet ke kondenzaci vody z vlhkého vzduchu [63, 64].

Princip vysušování zdiva přirozeným prouděním vzduchu

Ideálním stavem je proudění vzduchu malou rychlostí tak, aby byly minimální ztráty unikajícího tepla z odváděcích otvorů. Pro odvod vlhkosti je dostačující i velmi pomalé proudění vzduchu. Vzduchová mezera tak umožní odvést vodní páru ještě dřív, než stačí zkondenzovat [65]. Pokud vstupuje do vzduchové dutiny nasávacím otvorem chladný vzduch, zahřeje se zde a může tak následně pojmout a odvést větší množství vodní páry, než kdyby byl chladný. Tento jev je dán skutečností, že se zvyšující se teplotou exponenciálně roste tlak nasycené vodní páry. Zvýší-li se v dutině teplota vzduchu z teploty t_{EX} na střední teplotu v dutině t_D pak tento ohřátý vzduch může pojmout a z dutiny odvést množství vodní páry dané vztahem [66]:

$$m_{VP} = \frac{p_s(t_p) - p_{EX}}{R \cdot T_D} \cdot \frac{v \cdot d \cdot 18}{h} \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (1.12)$$

kde je

- Rplynová konstanta $R = 8314 [\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kmol}^{-1}]$,
- p_sčástečný tlak syté páry při teplotě t_D [Pa],
- p_{EX}tlak páry v exteriéru [Pa],
- T_Dtermodynamická teplota v mezeře $T_D = t_D + 273,15$ [K],
- vrychlost proudění [m/s],
- dtloušťka mezery [m],
- hvýška mezi dolním nádechem a horním výdechem [m].

Komínový efekt

Komínový efekt je přirozené proudění vzduchu (pohyb částic), které je vyvoláno teplotním gradientem, tedy rozdílem teplot mezi částicemi vzduchu ve větrané dutině a okolní atmosférou. Se stoupající teplotou nabývá vzduch opouštějící dutinu nižší hustoty a hmotnosti než chladnější vzduch okolního prostředí a začne se pohybovat směrem vzhůru působením vztlaku. Teplý vzduch opouštějící dutinu v ní působí podtlak, který způsobuje nasávání nového vzduchu do dutiny. Předpokládá se, že pokud částice vzduchu stoupá, musí být nahrazena jiným vzduchem, který do jejího místa klesá [67]. Pokud bude při návrhu dodržena podmínka dostatečného převýšení výdechových otvorů nad nasávací, bude pohyb částic zajištěn vlivem kladného přebytku tepla vůči okolnímu vzduchu. V příliš úzkých a dlouhých dutinách je komínový efekt značně omezen.

Nucené (cílené) proudění vzduchu

V případě nefunkčnosti nebo nedostatečné účinnosti proudění vzduchu přirozeným způsobem může být větrání v dutinách zajištěno pomocí ventilátoru (nucené větrání). Systém nuceného větrání je závislý na dodávce elektrické energie. Ve specifických případech (např. vysoušení spodní stavby po povodních) může být pro zajištění maximální účinnosti soustavy využit ohřívač vzduchu.

3.2.2. Konstrukční řešení vzduchových dutin

Výběr konstrukčního řešení vzduchových izolačních systémů na principu přirozeného nebo nuceného větrání je závislý zejména na podmínkách stavby a jejího blízkého okolí, na způsobu využívání objektu po sanačním zásahu a dále také na inženýrskogeologických poměrech daného území. Při vytváření dutin, mezer, kanálků a štol kde je pohyb vzduchu zajištěn přirozeným způsobem jsou nasávací (vstupní) otvory navrhovány přednostně do vnějšího prostředí, výdechové (výstupní) otvory se do exteriéru umisťují vždy [68].

Nasávací otvory se doporučuje situovat na návětrné straně, zatímco výstupní otvory je výhodnější situovat na závětrné straně budov (ve smyslu převažujícího směru proudění vzduchu pro danou oblast). Převýšení mezi nasávacími a výdechovými otvory by mělo být ve vnějším prostředí pokud možno co největší (ideálně alespoň 3 m). Průřezová plocha nasávacích a výdechových otvorů by měla být alespoň 0,01 m². Otvory mohou mít kruhový, čtvercový nebo obdélníkový tvar a měly by být vždy zakryty mřížkou. Každý vzduchový izolační systém se skládá minimálně z jednoho nasávacího a jednoho výdechového otvoru [69].

V případě volného větrání zdiva do otevřených příkopů je jejich dno provedeno pokud možno pod úroveň podlah v přízemí nebo suterénu. Dno příkopu je z důvodu odvedení srážkové vody vyspádováno a napojeno na kanalizaci, nebo je podél příkopu uložena do vrstvy hrubého šterku drenáž ve spádu.

Při úpravě zvlhlého zdiva se postupuje následovně: z povrchu vysoušeného zdiva je otlučena stará omítka (případně i další vrstvy) a ve zdivu jsou proškrábány spáry. Použije-li se nová omítka, musí být dostatečně propustná pro vodní páru.

Hloubku dna otevřeného příkopu ovlivňuje hloubka založení sanovaného objektu, neboť je nutné vzít v úvahu možnost promrzání základové půdy.

Vzduchové dutiny stěnové

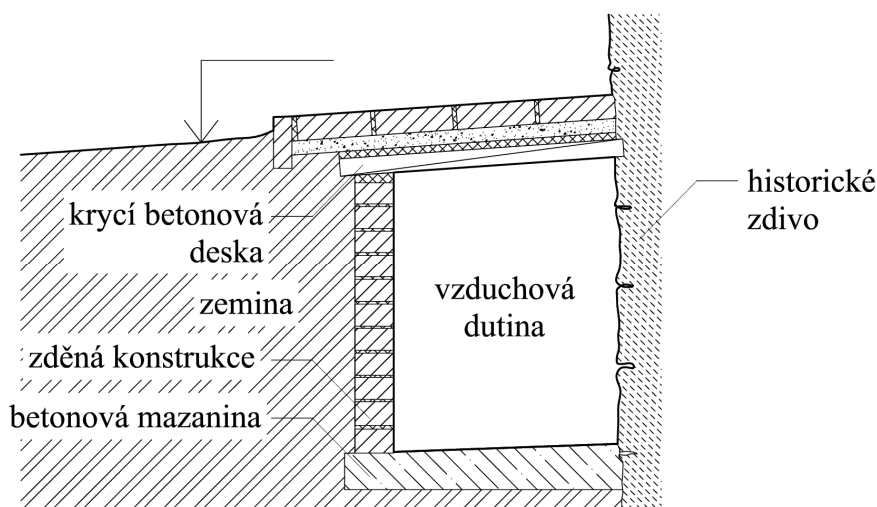
Základní princip funkce vzduchových dutin používaných při odvlhčování zdiva spočívá zpravidla v oddělení stavební konstrukce (zdiva, podlahy) od zdroje vlhkosti (přílehlé zeminy) pomocí větrané vzduchové dutiny, která má zajištěn trvalý přívod a odvod vzduchu.

Vzduchové stěnové dutiny mohou být provedeny na vnější straně obvodových stěn nebo na vnitřní straně obvodových stěn. Pro návrh rozměrů vzduchové dutiny a pro rozhodnutí, zda bude dutina navržena jen z jedné strany (*Obr. 4*) nebo po obou stranách vlhké zdi, je v první řadě směrodatná tloušťka zvlhlého zdiva.

Pokud je to možné, je vhodné v případě větší tloušťky odvlhčovaných zdí, aby vzduchová dutina byla situována z obou stran každé zdi a měla pro každou stranu i samostatné větrání [70].

Z hlediska přívodu a odvodu vzduchu mohou být zakryté vzduchové dutiny umístěné na vnějších stranách obvodových stěn řešeny:

- s nasávacími a výdechovými otvory napojenými na venkovní ovzduší
- s nasávacími otvory napojenými na vnitřní ovzduší a s výdechovými otvory napojenými na venkovní ovzduší

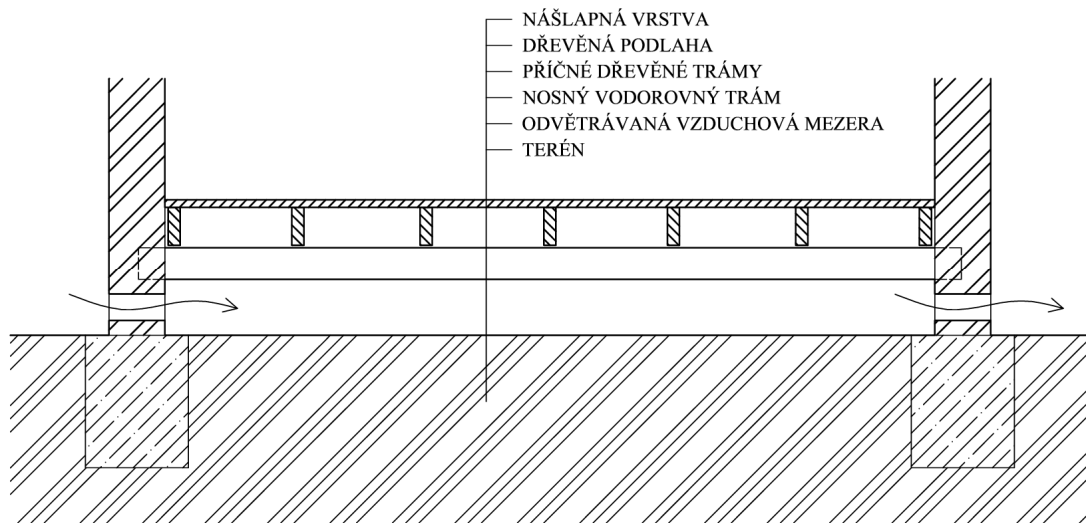


Obr. 4 Uzavřená vzduchová dutina

Podlahové vzduchové dutiny

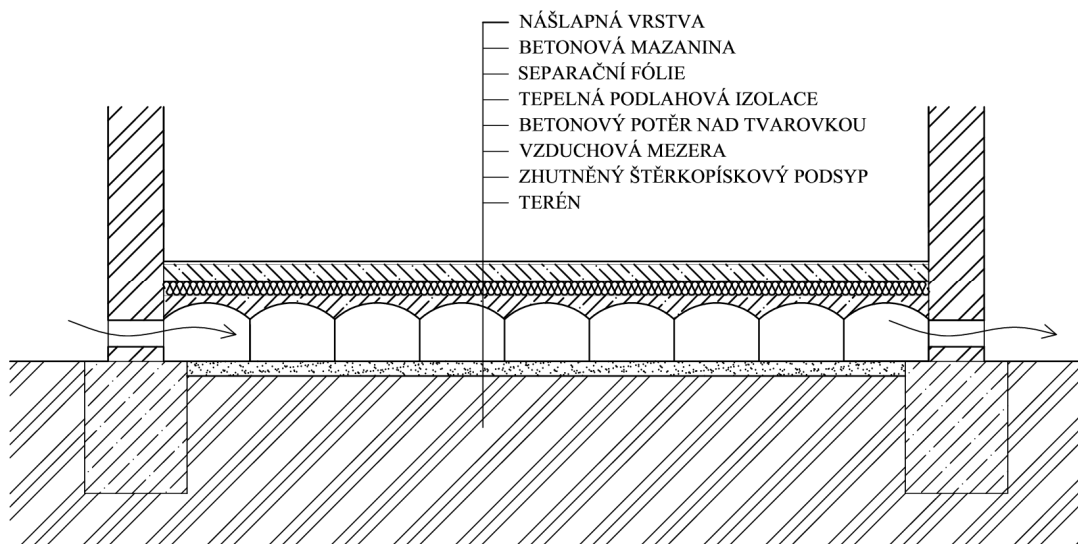
Z konstrukčního hlediska lze vytvořit vzduchovou dutinu pod podlahou úplným zastropením, či pomocí novodobých tvarovek pro odvětrání.

Varianta s úplným zastropením dutiny je dosud nejpoužívanější a neznámější konstrukční metodou u nás i ve světě. Pro rodinné domy je častým stavebním prvkem dřevo, případně v kombinaci s cihelným zdivem. Normy žádnou minimální hodnotu výšky vzduchové dutiny (jak je tomu např. pro odvětrání dvouplášťových střech) pro podlahy neuvádí. Úplné zastropení dutiny je tvořeno nosnou vodorovnou konstrukcí. Ta může být tvořena např. dřevěnými a železnými trámkami, železobetonovou stropní deskou, prolamovanými ocelovými profily apod. (Obr. 5) [10, 54, 71].



Obr. 5 Podlahová vzduchová dutina vytvořená zastropením

V posledních letech se pro vytvoření vzduchových dutin začíná hojněji využívat různé tvarovaných plastových elementů (Obr. 6). Pro nižší výšky vzduchových dutin (do 120 cm) se používají desky s nopy, jež se mezi sebou dále svařují, či prošívají. Pro vyšší vzduchové dutiny lze využít skládaných prvků, jež se do sebe vzájemně zasouvají drážkami. Takto vyskládané prvky pak slouží jako ztracené bednění, jež po zalití betonem působí jako nosná konstrukce pro další již běžné vrstvy podlahy [54, 71].



Obr. 6 Podlahová vzduchová dutina vytvořená pomocí tvarovek

Profilované fólie

Vzduchová provětrávaná mezera je vytvořena použitím profilované fólie z plastických hmot. Jedná-li se o vzduchovou mezeru na vnější straně, pak pro zamezení vzlínání vlhkosti bývají ve vodorovné rovině uvedené fólie zpravidla kombinovány s některou z mechanických nebo chemických metod.

Zajištění proudění vzduchu v případě velké výšky odvlhčované konstrukce (tedy velké délky fólie) a malé výšky nopů (tedy malé tloušťky dutiny) bude zřejmě problematické. Nutnou podmínkou pro zajištění proudění vzduchu je existence nasávacích a výdechových otvorů. V případě umístění profilované fólie z venkovní strany odvlhčované zdi pod úroveň terénu nebude docházet k proudění vzduchu. Vlhkost bude odcházet pouze v důsledku expanze, obdobně jako u mikroventilačních vrstev v plochých střeších.

Další typy vzduchových systémů

- provětrávané drenážní systémy
- Knappenovy kanálky
- kanálky v líci zdiva

4. EXPERIMENTÁLNÍ VÝZKUM

Struktura experimentálního výzkumu vychází ze stanovených cílů disertační práce.

4.1. Analýza účinnosti vzduchových izolačních metod na reálných historických objektech

Jedním z hlavních úskalí disertační práce bylo to, že především v in situ se nachází mnoho druhů stavebních materiálů a jejich kombinací a různé okrajové podmínky pro měření, tudíž bylo obtížné nalézt vhodný objekt pro získání referenčních hodnot měření.

Experimentálním měřením byly ověřeny teoretické předpoklady účinnosti a funkčnosti sanační metody na reálných historických objektech.

4.1.1. Křídlo historické budovy nemocnice U Apolináře

Pro účel komparace předpokládané a skutečné účinnosti sanace vlhkého zdiva pomocí vzduchových izolačních metod bylo vybráno křídlo historické budovy nemocnice z 19. století v Praze, ve kterém v roce 2010 proběhla rekonstrukce (*Obr. 7*). Porovnáním předpokládaného účinku sanace vlhkosti během rekonstrukce a pět let po jejím ukončení lze posoudit vhodnost a efektivnost navržené sanace pomocí podélné vzduchové dutiny.



Obr. 7 Křídlo G historické budovy nemocnice U Apolináře

Objekt je založen na základových pasech z lomového kamene. Nosné stěny, jejichž tloušťka je proměnná v rozsahu 650 až 1000 mm, jsou v úrovni suterénu a 1. NP převážně ze smíšeného (cihlo-kamenného) zdiva. Fasády jsou členité, v celém rozsahu tvořené keramickými obkladovými prvky, které jsou výrazně ovlivňovány vlhkostí. Na mnoha místech se obkladové cihelné prvky rozpadají, často až do hloubky 40 mm.

Řešená část budovy je částečně podsklepena a zahrnuje historický dutinový systém, který dříve sloužil k provětrávání spodní stavby.

Bohužel v minulých letech byl tento dutinový systém zničen, protože kvůli obavám z rostoucího provozu a tím i zvyšování zatížení na stropní konstrukci došlo ke zpevnění stropu a to tak, že zcela funkční původní dutiny, které spolehlivě sloužily k odvětrávání spodní stavby, byly zabetonovány. Důsledkem tohoto radikálního zásahu jsou značné problémy se vztlínající vlhkostí [72, 73].

Realizované sanační opatření pomocí podélné vzduchové dutiny

V roce 2010 byla na přání investora zhotovena projektová dokumentace na sanaci vlhkého zdiva metodou vzduchových dutin křídla G4 budovy porodnice (*Obr. 8*). Úkolem návrhu bylo určit způsob snížení vlhkosti obvodového zdiva tak, aby nebylo stavebními pracemi zasahováno do architektonického vzhledu fasády. Při výběru sanační metody tak bylo nezbytné přihlédnout ke skutečnosti, že objekt je památkově chráněn. Z tohoto důvodu byly vyloučeny veškeré destruktivní a invazivní sanační metody (jako je např. sanační metoda uvedená v [74]). Sanace zdiva byla provedena vybudováním podélné dutiny.



Obr. 8 Pohled na severní fasádu křídla G4 se vzduchovým kanálem a sklepním okénkem

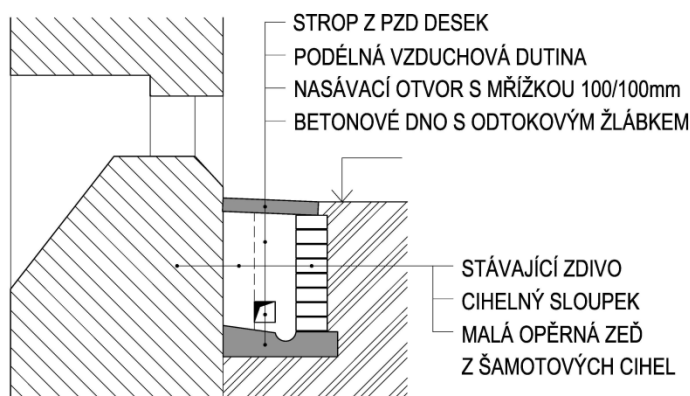
Podélná dutina byla zhotovena ve výkopové rýze při severní a jižní fasádě křídla G4 (*Obr. 9*). Její konstrukce je tvořena malou opěrnou zdí ze šamotových cihel, betonovým dnem a stropem z PZD desek. PZD desky jsou uloženy na opěrné zdi a na cihelných sloupcích. Dutina má šířku 350 mm a hloubku max. 750 mm. Dno je vyspádováno do odtokového žlábků ve spádu 5 % (příčný profil) a dále k dešťovým svodům ve spádu 1 - 2 % (podélný profil). Připojení k dešťovým svodům je řešeno novodurovou trubicí průměru 125 mm. Rub obnaženého zdiva je opatřen vápenným povlakem. Uvažováno bylo přirozené proudění vzduchu, které dle předpokladu mělo být zajištěno tepelnými vlastnostmi proudícího vzduchu, tj. rozdílem hustot vzduchu v exteriéru a interiéru dutiny a dále výškovými rozdíly nasávacích a výdechových otvorů, tj. modifikovaným komínovým efektem.



Obr. 9 Schéma provětrávané dutiny s nasávacími a výdechovými otvory

Nasávací otvory 100/100 mm „N2 – N4“ byly řešeny vyseknutím drážky do stěn anglických mini-dvorků ve výšce cca 250 mm nad úrovní dna dutiny (Obr. 10). Povrch těchto otvorů byl vyhlazen vápennou maltou. Zvláštní nasávací otvor „N1“ se nachází v místě schodiště na jižní straně křídla G4 na podstupnici prvního stupně, ve výšce cca 550 mm ode dna dutiny (Obr. 11).

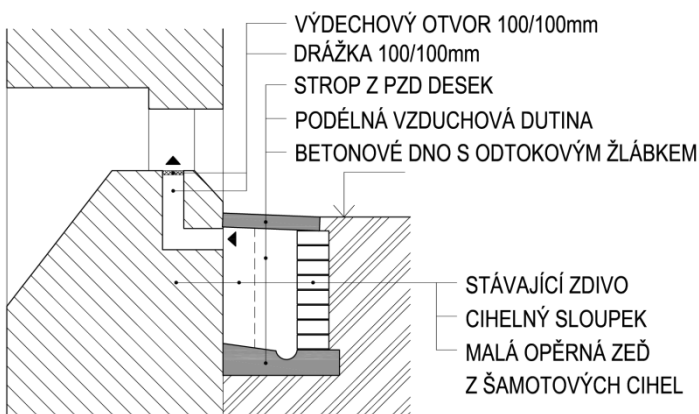
Výdechové otvory „V1 – V4“ byly provedeny do parapetů sklepních okének (slepých i funkčních) (Obr. 12). Otvory jsou cca 640 mm nad úrovní dna dutiny, v místě parapetu jsou zakryty mřížkou proti hmyzu (Obr. 13).



Obr. 10 Detail vzduchového pasivně provětrávaného kanálu s nasávacím otvorem „N2 – N4“



Obr. 11 Schodiště s nasávacím otvorem „N1“



Obr. 12 Detail vzduchového pasivně provětrávaného kanálu s výdechovým otvorem „V1 – V4“



Obr. 13 Výdechový otvor kanálu v parapetu okna

Předpokládané účinky vzduchové dutiny

Za předpokladu plně funkční použité sanační metody by mělo dojít k částečnému snížení množství vody ve zdivu, která se pomocí kapilárního vztlínání šíří ze spodní stavby do vyšších poloh budovy [75, 76]. Základním funkčním principem je snaha o maximalizaci množství vodní páry difundující ze stavební konstrukce. Pro účinné snížení vlhkosti sanované konstrukce je nutné zajistit intenzivní výměnu venkovního vzduchu v bezprostřední blízkosti konstrukce tak, aby nedošlo k dosažení hodnoty relativní vlhkosti přilehlé vrstvy vzduchu $\varphi = 100 \%$. Zároveň je důležité, aby měl přiváděný venkovní vzduch co nejnižší relativní vlhkost φ [%]. Účinnost vysoušení je také dána úpravou povrchu vysušované části konstrukce. Za účelem dosažení co nejlepší funkce bylo nutno při realizaci po provedení výkopu obnažené zdivo řádně očistit, osekát omítku a spáry vyškrábat do hloubky minimálně 20 mm, aby byla na stěně vytvořena co největší odpařovací plocha.

Je třeba zmínit, že vzduchové izolační metody se obvykle navrhují při hmotnostní vlhkosti cihelného zdiva 7 - 8 %, protože jejich účinnost je poměrně nízká [10].

Skutečné účinky vzduchové dutiny, výsledky měření

Pět let po rekonstrukci byl na objektu proveden autory článku nový průzkum zaměřený na vlhkost [77]. Křídlo nemocnice působí zachovale díky keramickému obkladu, který úspěšně maskuje vlhkostní mapy. Keramické obkladové prvky jsou však výrazně ovlivňovány vlhkostí. V mnohých oblastech se glazované cihelné prvky rozpadají (Obr. 14). V některých částech objektu (zejména v interiéru) je pouhým okem velice snadno rozeznatelná přítomnost zvýšené vlhkosti ve zdivu, která se projevuje tmavými, viditelně vlhkými skvrnami (Obr. 15). Jednou z hlavních příčin vlhkostních poruch zdiva je působení srážkové vody, která se kumuluje v nejbližším okolí budovy (v okolních terénech a pod chodníkem) a do zdiva vztlíná druhotně. Dalším činitelem, jehož důsledkem je vysoké zavlhčení, je voda vztlínající do zdiva z podzákladí [72, 73].



Obr. 14 Degradace keramického obkladu



Obr. 15 Viditelná vlhkost v interiéru

Výše popsaná podélná provětrávaná dutina byla realizována pouze při fasádě na severní a jižní straně křídla G4. V západní (čelní) části křídla G4 vzduchová dutina zhotovena nebyla. To znamená, že v tomto místě stavba není chráněna proti zemní vlhkosti žádnou sanační metodou a hrozí tedy pronikání vlhkosti do objektu.

Na jižní straně křídla G4 je přívod vzduchu do vzduchového kanálu zajištěn pouze jedním nasávacím otvorem 100 x 100 mm v místě schodiště „N1“. Vzdálenost mezi tímto nasávacím otvorem a prvním (a jediným na této straně) výdechovým otvorem „V1“ je přibližně 30 m. Vzhledem ke značně dlouhé vzdálenosti mezi přívodem a odtahem vzduchu je funkčnost celého odvlhčovacího kanálu omezena. Systém není opatřen žádným doplňkovým zařízením nuceného větrání umožňujícím efektivní pohyb vzduchu v dutině. Rozdíl výšky mezi nasávacím a výdechovým otvorem je zhruba 0,8 m. Rozdíl atmosférického tlaku v místě přívodu vzduchu a odtahu je téměř nulový a tzv. komínový efekt se zde téměř vůbec neuplatní. Výdechové otvory vzduchového kanálu jsou nedostatečně udržované, jsou zde pavučiny apod. Tím je zcela znemožněna funkčnost celého odvlhčovacího systému.

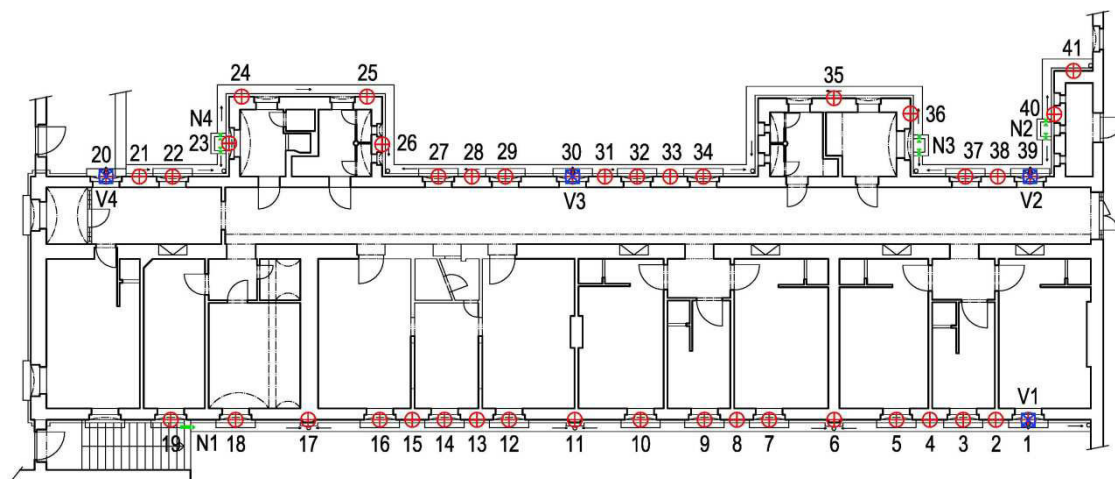
Stavebně vlhkostní průzkum objektu

V rámci stavebně vlhkostního průzkumu bylo provedeno měření vlhkosti zdiva na venkovní fasádě, uvnitř vzduchové dutiny a v nasávacím a výdechovém otvoru (výsledky měření viz *Tab. 2*). Průzkum byl prováděn pomocí kapacitního vlhkoměru Greisinger GMK 100 (princip měření vlhkosti kapacitním vlhkoměrem je uveden v [78]). Měření přístrojem (nepřímá metoda) by mělo být ještě ověřeno metodou přímou, tj. gravimetrií (odběr vzorků a následná analýza v laboratoři), neboť gravimetrická metoda není zatížena téměř žádnými rizikovými faktory, typickými pro měření vlhkosti pomocí přístrojů. Protože se však jedná o destruktivní metodu měření, z hlediska památkové ochrany objektu nebylo možné tuto metodu použít. Dále bylo provedeno měření teploty a vlhkosti ve výdechovém otvoru, pomocí digitálního teploměru a vlhkoměru Greisinger GFTH 95. Na základě naměřených hodnot došlo ke zhodnocení efektivnosti a účinnosti již použité sanační metody, v závislosti na velikosti snížení vlhkosti obvodového zdiva.

Zjištěné hodnoty vlhkosti (*Tab. 2*) byly vesměs v oblasti kategorie vysoké a velmi vysoké, průměrně ve výšce 0,6 m kolem 9,5 %. Naměřené hodnoty relativní vlhkosti vzduchu naměřené v nasávacích a výdechových otvorech se pohybovaly od 81,9 do 88,9 %.

Výsledky kapacitního měření

Na objektu bylo autory článku provedeno měření celkem na 41 místech, ve dvou výškových úrovních. Místa měření jsou vyznačena na zjednodušeném schématu (*Obr. 16*). Nasávací otvory jsou označeny písmenem „N“, výdechové otvory jsou označeny jako „V“. Vyhodnocení měření vlhkosti bylo provedeno dle normy [11], která předepisuje a kategorizuje přiměřené a zvýšené hodnoty hmotnostní vlhkosti zdiva, které jsou směrné (*Tab. 1*). Naměřené hodnoty jsou znázorněny v tabulce (*Tab. 2*). Výška měřících bodů je udána od úrovně upraveného terénu, tzn. od horní hrany krycích PZD desek [72, 73].



Obr. 16 Půdorysné schéma objektu s vyznačenými místy měření kapacitním vlhkoměrem Greisinger GMK 100

Profil	Výška [m]	Výsledná vlhkost [%]	Hodnocení vlhkosti dle [8]	Profil	Výška [m]	Výsledná vlhkost [%]	Hodnocení vlhkosti dle [8]
1	0,005	9,7	Vysoká	15	0,005	8,1	Vysoká
	0,6	8,0	Vysoká		0,6	5,2	Zvýšená
2	0,005	7,1	Zvýšená	18	0,005	8,1	Vysoká
	0,6	6,4	Zvýšená		0,6	5,1	Zvýšená
5	0,005	9,1	Vysoká	19	0,005	8,3	Vysoká
	0,6	5,4	Zvýšená		0,6	5,5	Zvýšená
6	0,005	10,9	Velmi vysoká	22	0,005	8,7	Vysoká
	0,6	9,3	Vysoká		0,6	7,0	Zvýšená
9	0,005	8,6	Vysoká	27	0,005	10,2	Velmi vysoká
	0,6	7,2	Zvýšená		0,6	7,2	Zvýšená
10	0,005	9,5	Vysoká	34	0,005	7,9	Vysoká
	0,6	7,1	Zvýšená		0,6	7,6	Vysoká
11	0,005	11,3	Velmi vysoká	39	0,005	9,6	Vysoká
	0,6	8,4	Vysoká		0,6	9,0	Vysoká

Tab. 2 Naměřené hodnoty vlhkosti kapacitním vlhkoměrem Greisinger GMK 100

Závěr

S přihlédnutím ke skutečnosti, že se jedná o památkově chráněný objekt, byla při výběru sanační metody vyloučena veškerá opatření invazivního a destruktivního charakteru.

Vzduchoizolační metody jsou vhodnou volbou pro snížení vlhkosti zdiva u historických staveb, neboť svým provedením respektují požadovanou míru ochrany původních stavebních materiálů a konstrukcí. Snižování vlhkosti zdiva pomocí vzduchových dutin je poměrně zdlouhavý proces, přičemž hmotnostní vlhkost ve zdivu bývá zpravidla snížena maximálně o 4 až 5 %. Měření vlhkosti pomocí kapacitního přístroje potvrdilo přítomnost vztlínající vody ve zdivu.

Výsledky průzkumu a měření provedeného autory článku ukázaly, že navržený způsob snížení vlhkosti zdiva byl principiálně správný, avšak jeho konkrétní provedení v daném případě nevedlo k účinnému provětrávání vzduchové dutiny. Značně dlouhé vzdálenosti mezi přívodem a odtahem vzduchu omezovaly funkčnost odvlhčovacího kanálu a celý princip přirozeného proudění vzduchu. Příčinou nízké účinnosti byla také absence nepřímých sanačních opatření, v tomto případě údržby výdechových otvorů vzduchové dutiny.

Pokud má být provedená sanace vlhkého zdiva daného objektu účinná a spolehlivá, bude potřeba zajistit údržbu výdechových otvorů vzduchového kanálu a rovněž bude nutné zřídit další odvětrávací otvory. Nejefektivnějším řešením by byla obnova historického dutinového systému, který původně sloužil k provětrávání spodní stavby a který se jevil v minulosti jako velmi účinný. Tato úprava již byla provedena na jiném křídle této budovy a účinnost zásahu je hodnocena jako velmi efektivní a systém je plně funkční. Toto řešení je do budoucna uvažováno i na křídle G4 v souvislosti s eventuální obnovou suterénů. Zákrok je však finančně velmi náročný, zejména kvůli manuální náročnosti a v současné době nejsou na tuto úpravu finanční prostředky [72, 73].

4.1.2. Bývalé konírny v Malé pevnosti v Terezíně

Objekt konírny byl vystavěn současně se stavbou Malé pevnosti Terezín v 80. letech 18. století. Jedná se o rozlehlý přízemní dům, který směrem od východu uzavírá ústřední prostranství pevnosti. Budova má obdélníkový půdorys o rozměrech 160 x 12 m. Zastřešení je tvořeno sedlovou střechou s trojúhelníkovými štíty. Jednotlivé části objektu jsou rozděleny požárními štítovými stěnami (*Obr. 17*). Objekt je památkově chráněný.



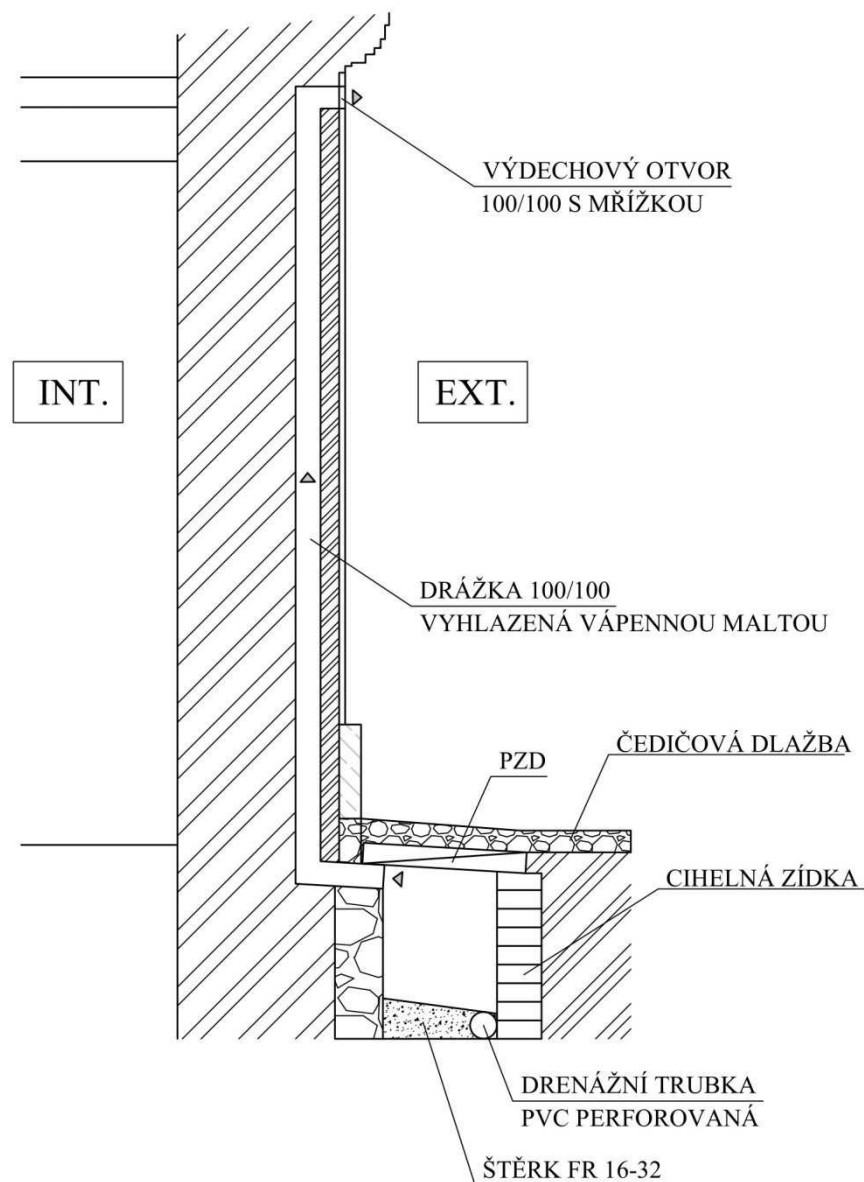
Obr. 17 Bývalé konírny v Malé pevnosti Terezín

Realizované sanační opatření pomocí podélné vzduchové dutiny

V roce 2008 byla provedena celková rekonstrukce objektu včetně provedení pasivně provětrávaného vzduchového kanálu podél obvodového zdiva.

Vzduchový kanál je tvořen ohraničením pracovního výkopu samostatně založenou cihelnou zídkou. Profil vzduchového kanálu je široký 400 mm a vysoký minimálně 500 mm. Dno kanálu plní zároveň funkci drenáže. Na dno kanálu bylo po celé délce položeno drenážní potrubí. Odvlhčovací kanál je zastropen pomocí betonových PZD panelů, na které byla následně položena čedičová dlažba.

U vzduchového kanálu je uvažováno přirozené pasivní provětrávání. Nasávací otvor o rozměru 100 x 100 mm je umístěn přímo v úrovni okapového chodníku podél východní fasády. Výdechové otvory s větrací mřížkou o rozměru 100 x 100 mm jsou situovány pod římsou a s nasávacími otvory jsou propojeny svislými drážkami vedenými pod povrchem zdiva (*Obr. 18*).



Obr. 18 Schéma provedení vzduchového kanálu

Stavebně technický průzkum

Objekt bývalých koníren zaujímá značnou půdorysnou plochu a tvoří tak podstatnou část tzv. Malé pevnosti v Terezíně. Na první pohled působí tato budova poměrně zachovalým dojmem, nicméně při bližším prozkoumání jsou patrné projevy poruch spojené zejména s účinky vztlínající vody. Ačkoliv poslední rozsáhlá rekonstrukce v roce 2008 byla považována za mimořádně zdařilou, během následujících šesti let došlo k opětovnému rozvoji degradačních procesů. To se ovšem dalo předpokládat, neboť na základě návrhu projektanta bylo doporučeno provést tzv. chemické clony v určených omezených úsecích, zvláště trvale zvlhčených vodou do zdiva vztlínající z podzákladí. Chemické clony však nebyly ze strany zástupců památkové péče přijaty a tak byla zvolena šetrnější, ovšem méně účinná varianta provětrávaného venkovního vzduchového kanálu.

Nicméně je však třeba zohlednit i fakt, že Malá pevnost i celé město Terezín bylo vystavěno na bažinatém podloží, v těsném sousedství řeky Ohře. Pro stabilizaci podloží a zpevnění základů staveb byly použity rošty vytvořené z dubových kůlů, kamenů a zeminy prosypané vápnem. Z toho vyplývá, základové konstrukce i samotné zdivo posuzovaného objektu je trvale dotováno vztlínající vodou, což přispívá k poměrně rychlému rozvoji degradačním procesům.

Na fasádě lze snadno pozorovat odlupování povrchových vrstev omítky (*Obr. 19*). Na některých místech došlo i k závažnějším poruchám jako například k odpadávání velkých ploch omítek a následně k úplnému obnažení cihelného zdiva (*Obr. 20*). Výjimkou není ani tvorba povrchových krust a výkvětů, které se vyskytují na některých místech fasády objektu. Dalšími biologickými agresivními činiteli, které svými účinky způsobují degradaci a narušování povrchové vrstvy, jsou mechy a lišejníky. V některých částech objektu je pouhým okem velice snadno rozeznatelná přítomnost vztlínající vlhkosti ve zdivu, která se projevuje podstatně tmavším odstínem fasády a pískovcového soklu oproti suchým místům. Stejně jako na fasádě jsou i na pískovcovém soklu jasně patrné poruchy v důsledku zvýšené vlhkosti a povětrnostních vlivů, dochází zde k odpadávání povrchových vrstev soklu. Některé okapové svody neplní svojí funkci, nejsou správně udržovány a v některých případech okapový svod není správně napojen na lapač střešních splavenin.



Obr. 19 Fasáda – odlupování povrchových vrstev omítky



Obr. 20 Fasáda – obnažení cihelného zdiva

Vzduchový kanál

Terénní průzkum bývalých koníren v Terezíně byl zaměřen především na zkoumání poruch způsobených pronikáním vody a vlhkosti do konstrukce spodní stavby. Z provedených průzkumu je zcela zřejmé, že celý objekt je narušen vztlínající vodou.

Pro sanaci zavlhělého zdiva, byl projektovou dokumentací z roku 2008 navržen a realizován vzduchový kanál podél celého obvodu objektu. Na základě terénního průzkumu lze sanační zásah hodnotit jako velmi zdařilý, vzduchový kanál byl proveden shodně s projektovou dokumentací.

Problémem je špatná údržba objektu, zejména okapových svodů a výdechových otvorů vzduchového kanálu. Objekt je sice dostatečně opatřen svodným systémem dešťových vod, ale v některých případech okapový svod není správně napojen na lapač střešních splavenin, takže srážkové vody dopadají přímo na okapový chodník. Jelikož kamenný sokl na fasádě je na mnoha místech porušený, v některých místech je dokonce obnažené cihelné zdivo, dochází k odstříkování srážkové vody od terénu na fasádu. Čedičová dlažba okapového chodníku je na několika místech propadlá, takže dochází k zatékání srážkové vody do podzákladí.

Dále bylo zjištěno, že přívod vzduchu do vzduchového kanálu zajišťuje pouze jeden nasávací otvor 100 x 100 mm, který je zhotoven přímo v úrovni okapového chodníku podél východní fasády. Vzhledem ke značně dlouhé vzdálenosti vzduchového kanálu je funkčnost celého odvlhčovacího kanálu omezena. Výdechové otvory vzduchového kanálu (*Obr. 21*) jsou špatně udržované, jsou zde pavučiny apod. (*Obr. 22, 23, 24*), tím je zcela znemožněna funkčnost celého odvlhčovacího kanálu, neboť tzv. komínový efekt, který má zajistit odtahová trouba, neumožňuje dostatečnou cirkulaci vzduchu v systému. Na výdechových otvorech zcela chybí krycí mřížka, může tak docházet ke hromadění nečistot zejména trusu ptáků apod. Systém není opatřen žádným doplňkovým nuceným zařízením umožňující pohyb vzduchu v kanálu. Skutečnost, že se v objektu vyskytuje voda vzlínající z podzákladí, podporuje absence hydroizolační vrstvy v odvlhčovacím kanálu. Při přívalových deštích může docházet k průsaku vody nejen do odvlhčovacího kanálu ale i do obvodového zdiva.



Obr. 21 Umístění výdechových otvorů



Obr. 22 Výdechový otvor



Obr. 23 Pohled na stěnu výdechového otvoru, povrch vyhlazen maltou



Obr. 24 Pohled shora do výdechového otvoru

Stavebně vlhkostní průzkum

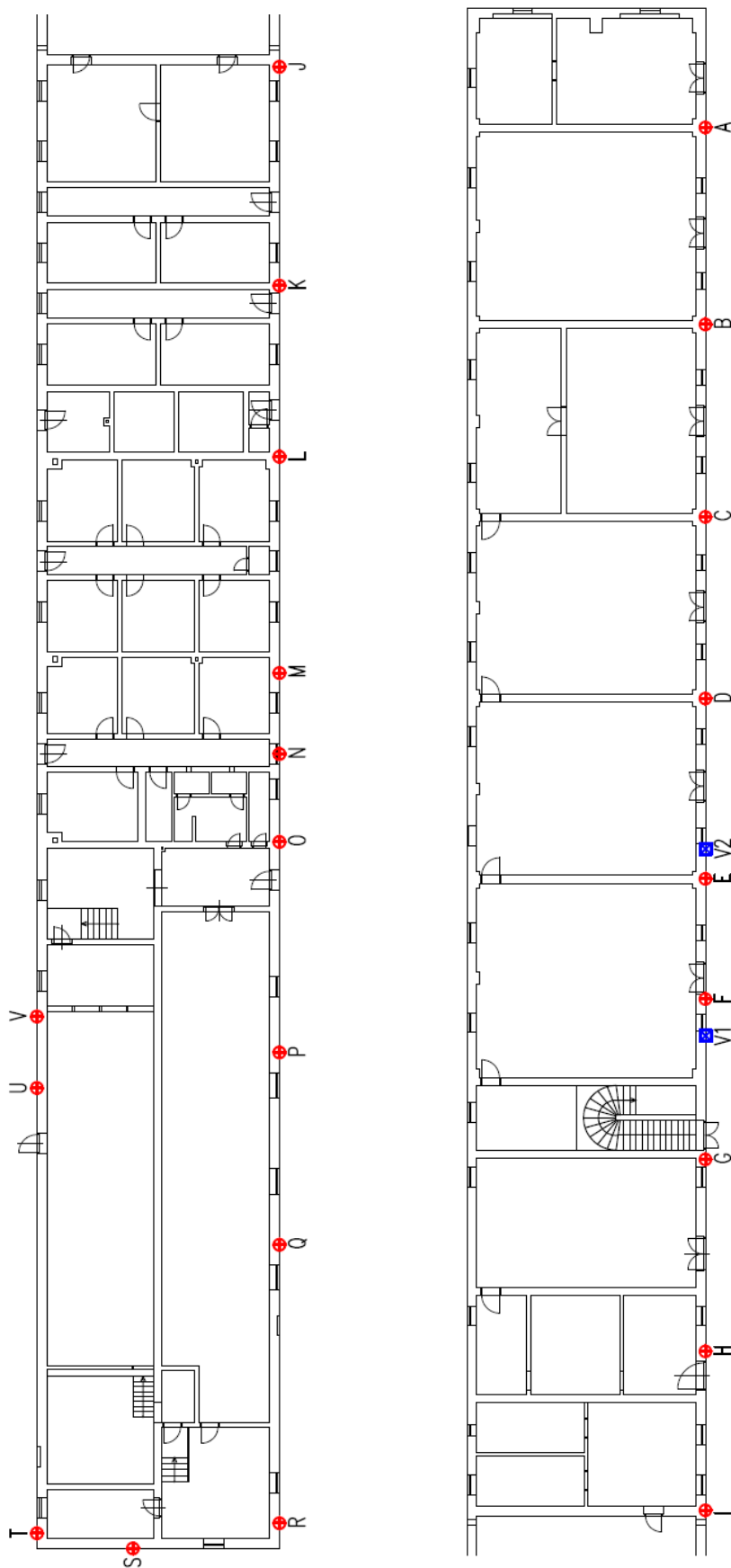
Stanovení vlhkosti stavebních konstrukcí

Zdivo objektu se po vizuální prohlídce jeví jako značně vlhké. Bylo provedeno měření vlhkosti v místě kamenného soklu a fasády. S přihlédnutím k tomu, že se jedná o památkově chráněný objekt a budova je opatřena novou fasádou (z roku 2008), bylo přistoupeno k nedestruktivnímu způsobu měření. K měření byl použit kapacitní vlhkoměr Greisinger electronic GMK 100. Jelikož fasáda nemá rovný povrch a podmínkou pro měření je rovinný podklad, byla vlhkost měřena v různých výškových úrovních, tedy tam, kde bylo možné měření provést. Většinou bylo měření provedeno těsně nad terémem ve výšce 0,25 m v místě kamenného soklu. Dále bylo provedeno měření teploty a vlhkosti ve výdechovém otvoru, pomocí přístroje Greisinger GFTH 95. Tyto údaje vypovídají o funkčnosti vzduchového kanálu. Naměřené hodnoty byly porovnány s hodnotami, které byly na objektu naměřené před sanační úpravou v roce 2008. Z těchto údajů lze určit, zda je použitá sanační metoda účinná či nikoliv.

Výsledky kapacitního měření

Na objektu bylo měření provedeno celkem na 22 místech. Místa měření jsou vyznačena na zjednodušeném schématu (Obr. 25). Výsledky měření jsou znázorněny v příslušné tabulce (Tab. 3).

Vyhodnocení měření vlhkosti bylo provedeno dle ČSN 73 0610: Sanace vlhkého zdiva – základní ustanovení (Tab. 1).



Obr. 25 Zjednodušené schéma s vyznačenými místy měření, červeně jsou vyznačena místa, která jsou dále zpracována v příslušných tabulkách

Profil	Naměřené hodnoty po sanaci			Naměřené hodnoty před sanací		
	Výška [m]	Výsledná vlhkost [%]	Hodnocení vlhkosti dle [8]	Výška [m]	Výsledná vlhkost [%]	Hodnocení vlhkosti dle [8]
A	1,3	6,6	Zvýšená	0,9	15,9	Velmi vysoká
B	1,3	6,1	Zvýšená	0,9	12,5	Velmi vysoká
C	0,005	3,6	Nízká	0,9	10,2	Velmi vysoká
	1,3	6,3	Zvýšená			
D	0,005	6,8	Zvýšená	0,9	9,9	Vysoká
	1,3	4,4	Nízká			
E	0,005	5,3	Zvýšená	0,9	8,0	Vysoká
	0,25	9,5	Vysoká			
	1,3	4,8	Nízká			
F	0,005	4,4	Nízká	0,9	9,1	Vysoká
	0,25	3,3	Nízká			
	1,3	7,4	Zvýšená			
G	0,005	4,9	Nízká	0,9	7,2	Zvýšená
	0,25	8,0	Vysoká			
	1,3	5,3	Zvýšená			
H	0,005	9,0	Vysoká	0,9	14,0	Velmi vysoká
	0,25	6,2	Zvýšená			
I	0,005	7,8	Vysoká	0,9	13,7	Velmi vysoká
	0,25	8,7	Vysoká			
	2,2	6,6	Zvýšená			
J	0,005	7,3	Zvýšená	0,9	5,0	Nízká
	0,25	9,1	Vysoká			
K	0,005	5,5	Zvýšená	0,9	3,7	Nízká
	0,25	6,9	Zvýšená			
L	0,005	7,6	Vysoká	0,9	6,6	Zvýšená
	0,25	9,3	Vysoká			
M	0,005	5,2	Zvýšená	0,9	8,8	Vysoká
	0,25	7,4	Zvýšená			
N	1,28	7,3	Zvýšená			
O	0,005	6,6	Zvýšená	0,9	6,8	Zvýšená
	0,25	5,6	Zvýšená			
P	0,005	8,2	Vysoká	0,9	17,7	Velmi vysoká
	0,25	7,0	Zvýšená			
Q	0,005	8,2	Vysoká	0,9	13,2	Velmi vysoká
	0,25	5,3	Zvýšená			
	1,3	4,2	Nízká			

R	0,005	10,0	Vysoká	0,9	7,5	Zvýšená
	0,25	6,5	Zvýšená			
S	0,005	4,2	Nízká	0,9	7,9	Vysoká
	0,25	5,2	Zvýšená			
T	0,005	3,5	Nízká	0,9	8,4	Vysoká
	0,25	3,5	Nízká			
U	0,005	2,5	Velmi nízká	0,9	6,5	Zvýšená
	0,25	7,9	Vysoká			
V	0,25	6,8	Zvýšená			

	cihla
	kamenný sokl

Tab. 3 Výsledky měření kapacitním vlhkoměrem

Závěr

Sanační opatření provedená v roce 2008 (provedení vzduchového kanálu po celém obvodu stavby) sice viditelně snížila množství vlhkosti ve spodní stavbě, nicméně naměřené hodnoty jsou stále vysoké.

Z porovnání naměřených hodnot vlhkosti v současnosti s hodnotami naměřenými před sanací v roce 2008 je patrné, že navržené sanační opatření v podobě vzduchového kanálu je účinné. Vlhkost po sanačním zásahu klesla průměrně o 2,5 %. I přesto, že účinnější sanační opatření - chemické clony nebyly ze strany zástupců památkové péče přijaty a bylo tedy třeba počítat s budoucími lokálními poruchami vlivem vlhkosti, výsledky měření potvrzují funkčnost sanačního zásahu.

Jednou z příčin zvlhnutí zdiva je i špatná údržba okapových svodů a výdechových otvorů. Objekt dále není opatřen hydroizolační vrstvou, čímž dochází k degradaci zdiva.

4.1.3. Kostel sv. Jiljí (Milevsko)

Kostel sv. Jiljí pochází z 12. století. Kostel je jednolodní stavba s pětibokým chórem a věží na západě (Obr. 26). V 11. - 12. století byl v areálu kláštera vytvořen systém hlubinných studní různé velikosti a hloubky.



Obr. 26 Kostel sv. Jiljí

Realizované sanační opatření z roku 2010

V roce 2010 byla zhotovena projektová dokumentace na rekonstrukci kostela včetně provedení odvětrávaného vzduchového kanálu podél obvodového zdiva. Součástí rekonstrukce byla obnova odvodňovacího systému a úprava terénu v okolí kostela a návrh sanace pomocí odvětrávaných vzduchových kanálů při vnějším a vnitřním líci obvodového zdiva (Obr. 27).

Stavebně technický průzkum, zhodnocení současného stavu

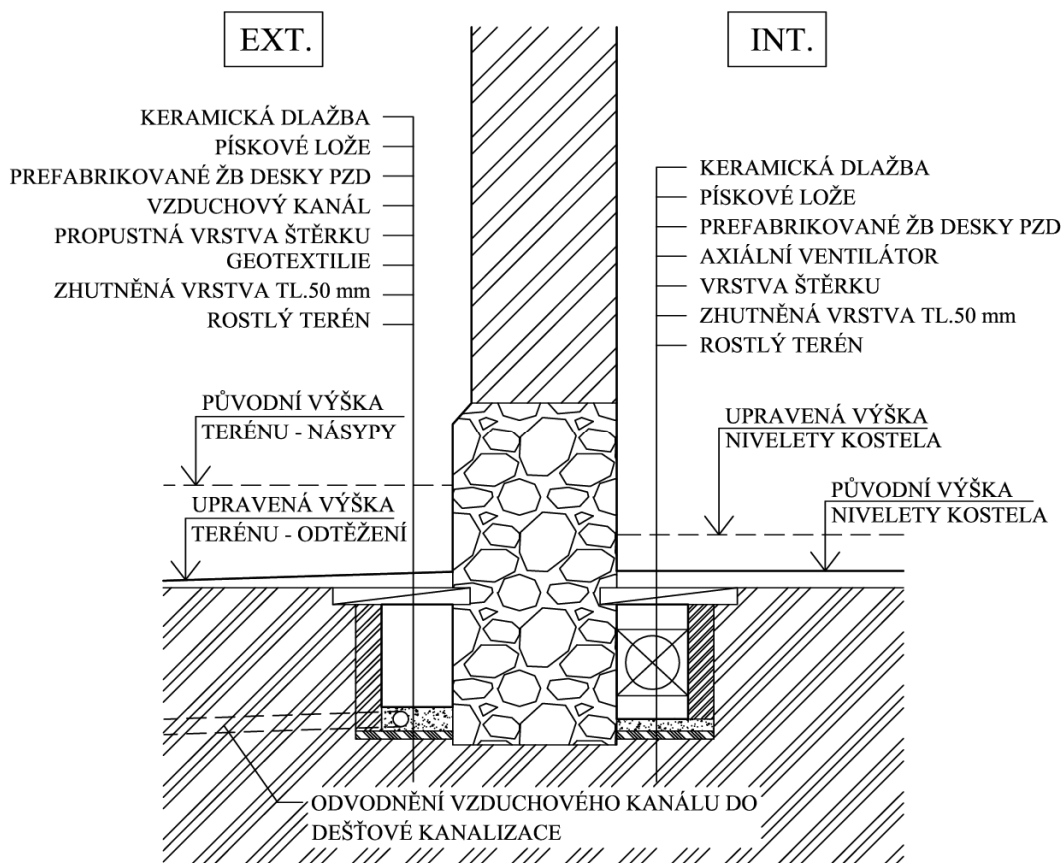
Vzhledem k nedávné rekonstrukci působí kostel na první pohled velmi zachovalým dojmem. Lze říci, že zvolená opatření pro záchranu této historické památky byly řešeny optimálním a šetrným způsobem. Ve vzduchové dutině v interiéru byl použit ventilátor pro nucené proudění vzduchu, což se jeví jako velmi účinné opatření.

Fasáda objektu vykazuje v některých místech mírné zavlhčení, a to zejména v místě kamenného soklu (Obr. 28, 29).

Stavebně vlhkostní průzkum

Vzhledem k nedávnému sanačnímu zásahu (v roce 2010), během kterého došlo k provedení podélné pasivně provětrávané dutiny, byl vlhkostní průzkum zaměřen především na zjištění účinnosti této sanační úpravy za účelem snížení vlhkosti obvodového zdiva.

Bylo provedeno namátkové měření vlhkosti zdiva na venkovní fasádě. Průzkum byl prováděn kapacitní metodou měření vlhkosti, neboť kvůli zrekonstruované fasádě nebylo možné použít destruktivní metody měření.



Obr. 27 Schéma provedení vzduchových izolačních kanálů



Obr. 28 Detail soklové části



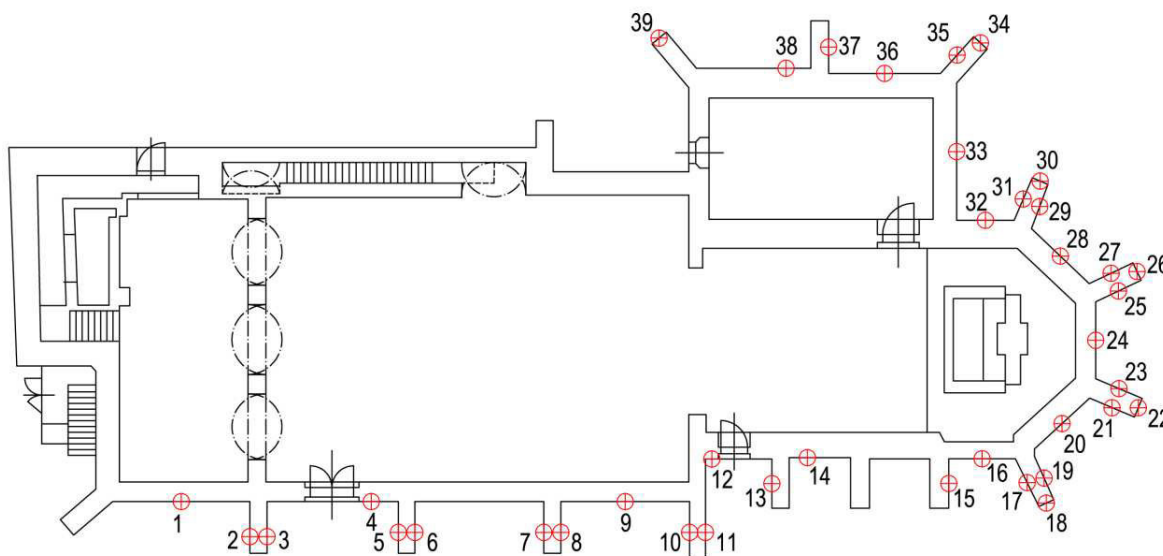
Obr. 29 Kamenný sokl narušen vlhkostí

Stavebně vlhkostní průzkum

Výsledky měření kapacitním přístrojem

Na objektu bylo měření provedeno celkem na 39 místech. Místa měření jsou vyznačena na zjednodušeném schématu (Obr. 30). Vybrané hodnoty měření jsou znázorněny v příslušné tabulce (Tab. 4).

Vyhodnocení měření vlhkosti bylo provedeno dle ČSN 73 0610: Sanace vlhkého zdiva – základní ustanovení (Tab. 1).



Obr. 30 Schéma měření vlhkosti zdiva

Profil	Výška [m]	Výsledná vlhkost [%]	Hodnocení vlhkosti dle [8]	Profil	Výška [m]	Výsledná vlhkost [%]	Hodnocení vlhkosti dle [8]
2	0,6	3,4	Nízká	16	0,6	3,9	Nízká
5	0,6	7,2	Zvýšená	18	0,6	5,2	Zvýšená
6	0,6	6,9	Zvýšená	24	0,6	6,9	Zvýšená
9	0,6	8,1	Vysoká	30	0,6	6,5	Zvýšená
11	0,6	6,3	Zvýšená	35	0,6	4,2	Nízká
14	0,6	5,4	Zvýšená	39	0,6	6,0	Zvýšená

Tab. 4 Výsledky měření kapacitním přístrojem

Závěr

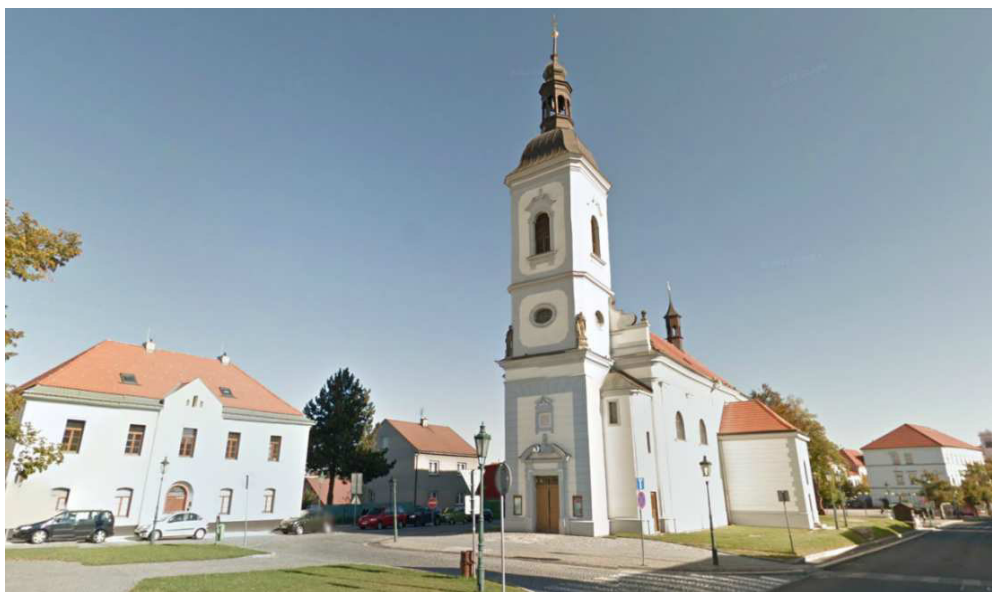
Z terénního a stavebně vlhkostního průzkumu, který byl zaměřen především na zkoumání poruch způsobených pronikáním vody a vlhkosti do konstrukce spodní stavby je zřejmé, že objekt kostela sv. Jiljí v Milevsku je degradován vlivem vztlínající vody. V roce 2010 byla na objektu provedena sanace vlhkosti pomocí provětrávaného vzduchového kanálu. Tato sanace byla poměrně úspěšná, naměřené hodnoty vlhkosti jsou výrazně nižší než před celkovou rekonstrukcí.

Hlavními příčinami vlhkostních poruch zdiva je vysoká hladina podzemní vody. Objekt je tzv. utopen v nezहतněných násypech. Pokud má být navržena sanace vlhkého zdiva objektu účinná a spolehlivá, je potřeba zahrnout do jeho návrhu aplikaci několika nepřímých opatření. Jedná se především o spolehlivé odvedení dešťových vod ze střechy.

4.1.4. Další analyzované objekty

Kostel sv. Petra a Pavla v Říčanech

Kostel sv. Petra a Pavla je původně gotický kostel, který byl v roce 1719 přestavěn v barokním slohu (*Obr. 31*).



Obr. 31 Kostel sv. Petra a Pavla v Říčanech

V roce 1999 byla provedena celková rekonstrukce kostela, kdy se značná část stavebních prací týkala odvlhčení zdiva, které spočívalo ve zhotovení nového odvětrávacího kanálu po celém obvodu kostela.

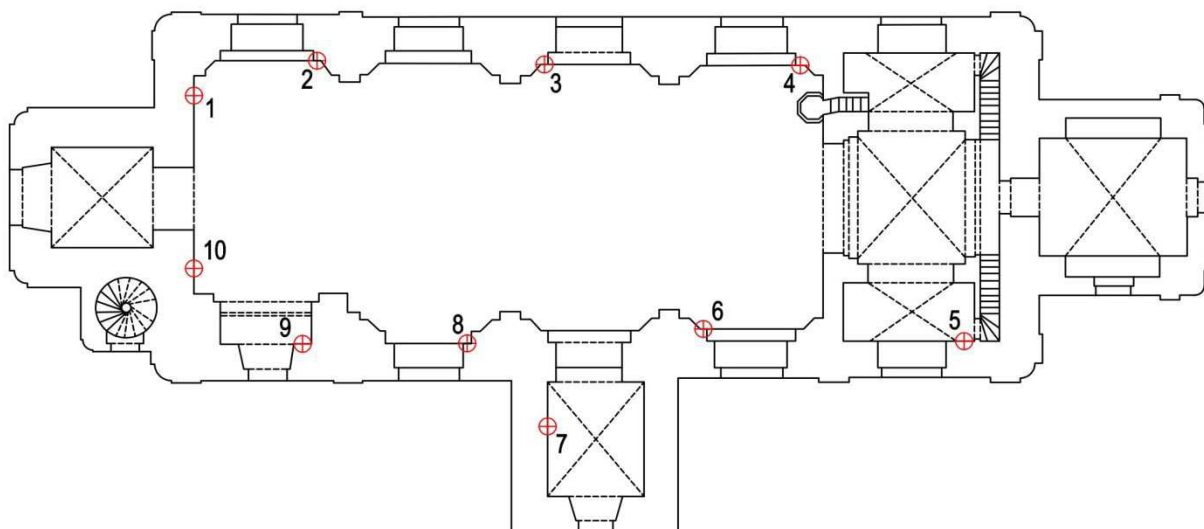
Odvětrávací kanál byl navržen šířky 600 – 700 mm a výšky minimálně 800 mm. Vnější stěna kanálu je vyzděna z cihel plných pálených na cementovou maltu.

Kanál je zastropen prefabrikovanými stropními plnými deskami. Přívod vzduchu je zajištěn na dvou místech otvorem 600 x 600 mm z boku kanálu (v násypu), který je opatřen větrací mříží. Odtah vzduchu zajišťují dvě kruhové litinové odtahové trouby o průměru 200 mm, které jsou přisazeny ke stávajícímu okapovému žlabu.

Terénní průzkum odhalil celou řadu chyb a nedodělků systému odvlhčovacího kanálu. Na základě obdržené projektové dokumentace skutečného stavu a ze samotného terénního průzkumu bylo zjištěno, že odvlhčovací kanál nebyl proveden dle návrhu po celém obvodu kostela. Po obvodu celé části západní hlavní věže kanál zhotoven nebyl a v této části je vztlínající vodě umožněno její šíření do ostatních částí objektu.

Skutečnost, že je objekt zasažen vztlínající vodou, podporuje také absence hydroizolační vrstvy v odvlhčovacím kanálu. Při přívalových deštích tak může docházet k průsaku vody nejen do samotného kanálu, ale i do obvodového zdiva.

Na základě terénního průzkumu se uvnitř kostela vytipovalo 10 míst, vykazujících přítomnost vlhkosti ve zdivu (Obr. 32). V těchto profilech se ve výškách 0,1 m, 0,5 m a 0,8 m nad úroveň podlahy vyvrtaly otvory pro kartáčové sondy. Měření vlhkosti probíhalo pomocí odporového vlhkoměru.



Obr.32 Schéma měření vlhkosti zdiva

Profil	Výška [m]	Výsledná vlhkost [%]	Hodnocení vlhkosti dle ČSN 73 0610	Profil	Výška [m]	Výsledná vlhkost [%]	Hodnocení vlhkosti dle ČSN 73 0610
1	0,1	13,6	Velmi vysoká	6	0,1	15,1	Velmi vysoká
	0,5	7,1	Zvýšená		0,5	1,8	Velmi nízká
	0,8	6,8	Zvýšená		0,8	1,9	Velmi nízká
2	0,1	11,7	Velmi vysoká	7	–	–	–
	0,5	11,9	Velmi vysoká		0,5	7,4	Zvýšená
	0,8	7,4	Zvýšená		–	–	–
3	0,1	Err1	–	8	0,1	18,0	Velmi vysoká
	0,5	16,0	Velmi vysoká		0,5	13,6	Velmi vysoká
	0,8	14,3	Velmi vysoká		0,8	13,0	Velmi vysoká
4	0,1	12,4	Velmi vysoká	9	0,1	15,3	Velmi vysoká
	0,5	12,1	Velmi vysoká		0,5	11,5	Velmi vysoká
	0,8	8,0	Vysoká		0,8	3,0	Nízká
5	0,1	5,5	Zvýšená	10	0,1	14,2	Velmi vysoká
	0,5	3,4	Nízká		0,5	8,2	Vysoká
	0,8	1,5	Velmi nízká		0,8	2,0	Nízká

Tab. 5 Výsledky měření odporovým přístrojem GMH 3810

Z naměřených výsledků je zřejmé, že je kostel degradován vlivem vztlínající vody ve zdivu. Téměř ve všech vlhkostních profilech byla v úrovni 0,1 m nad úrovní podlahy naměřena velmi vysoká hodnota vlhkosti (Tab. 5). Trend postupu vztlínající vody po výšce zdiva klesá.

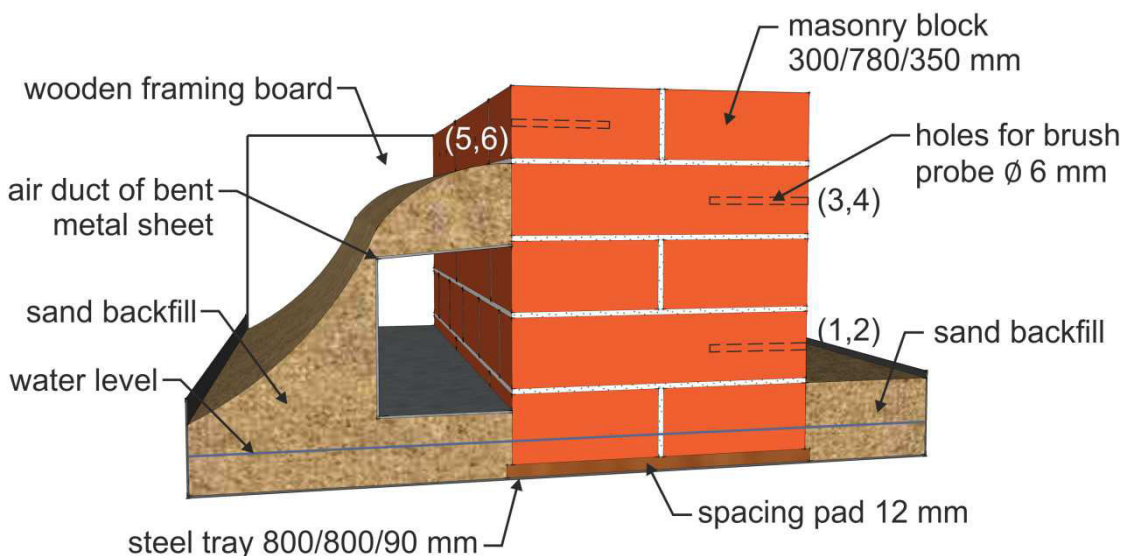
4.1.5. Závěry z terénních průzkumů

Během terénních průzkumů vybraných staveb, kde byly použity vzduchové izolační metody jako sanace za účelem snížení vlhkosti v konstrukci, bylo zjištěno mnoho zajímavých faktů, týkajících se poruch a závad těchto systémů. Vzduchová dutina je často nevhodně navržena, zejména co se týká jejího tvaru a velikosti, počtu a umístění nasávacích a výdechových otvorů, mnohdy jsou mezi těmito otvory příliš dlouhé vzdálenosti apod. Tyto nedostatky jsou většinou důsledkem návrhu na základě empirie a zkušeností a dalo by se jim předejít použitím numerických simulací [79]. Špatná údržba výdechových otvorů vzduchové dutiny má také často zásluhu na nefunkčnosti celého systému.

4.2. Analýza účinnosti vzduchových metod na laboratorních modelech

4.2.1. Podélná provětrávaná jednostranná vzduchová dutina (exteriérová)

Cílem laboratorního experimentu byla analýza účinnosti podélné provětrávané jednostranné vzduchové dutiny z hlediska snížení vlhkosti cihelného zdiva. Pro objektivní zhodnocení účinnosti této metody byl v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze zhotoven laboratorní model v měřítku 1 : 2 (Obr. 33). Tento model simuloval výřez obvodového historického cihelného zdiva podsklepené budovy s provětrávanou vzduchovou dutinou jako ochranou před vodou vztlínající do zdiva z podzákladí.



Obr. 33 Schéma uspořádání laboratorního modelu v měřítku 1:2

Laboratorní model

Prvním krokem experimentu bylo samotné zhotovení laboratorního modelu. Byly vyzděny dva zkušební zděné bloky z historických cihel plných pálených, formátu 290 x 140 x 65 mm. Zděné bloky simulovaly historické cihelné zdivo tloušťky 600 mm. Počet svislých spár cihelného zdiva (laboratorní model vs. realita) byl v tomto případě zanedbán. Jako pojivo byla použita historická vápenná malta. V tabulce 6 jsou uvedeny vlastnosti příslušných materiálů (CPP a vápenná malta). Veškeré materiálové vlastnosti byly experimentálně stanoveny v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze v souladu s příslušnou evropskou normou [80-83].

Materiálové vlastnosti	Cihla	Vápenná malta
Objemová hmotnost - ρ	1670 kg/m ³	1650 kg/m ³
Pórovitost - ϵ	37.5 %	37.7 %
Faktor difúzního odporu - μ	dry cup 19.5	dry cup 8.9
	wet cup 14.7	wet cup 4.3
Absorpční koeficient vody - A	0.19 ± 0.002 kg/(m ² √s)	0.22 ± 0.006 kg/(m ² √s)

Tab. 6 Materiálové charakteristiky

Zděné bloky o rozměrech 300 x 780 x 350 mm byly vyzděny do ocelových van o rozměrech 800 x 800 x 90 mm. Ve vanách byla udržována stálá hladina vody do výšky 50 mm ode dna vany. Tímto způsobem byl zajištěn trvalý přístup vody do cihelného zdiva zkušebních bloků. Aby došlo k efektivnímu nasycení struktury zdiva vodou, byly zděné bloky vyzděny na distanční podložky o výšce 12 mm.

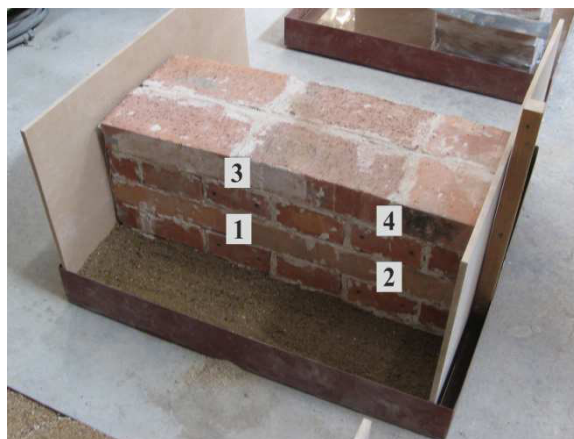
Na jeden zkušební blok byla aplikována exteriérová vzduchová dutina odpovídající svými rozměry a tvarem technickému řešení (prefabrikované dílce) z užitného vzoru CZ25990 (U1) [84] ve zmenšeném měřítku.

V tomto experimentu byla posuzována pouze účinnost vzduchové dutiny z hlediska vysoušení zdiva, nikoliv odolnost samotné konstrukce vzduchové dutiny proti vlhkosti. Z tohoto důvodu byla dutina pro zjednodušení vytvořena pomocí ohýbaného plechu. Okolní terén byl simulován zásypaním z písku. Druhý, referenční zkušební blok, byl ponechán bez provětrávané dutiny (*Obr. 34*).

Měření vlhkosti bylo prováděno pomocí odporového vlhkoměru. Z tohoto důvodu bylo nutné do vzorků vyvrtat otvory pro kartáčové elektrody přístroje o průměru 6 mm. V každém zděném bloku bylo celkem 6 měřících bodů. Každý měřící bod je tvořen dvěma otvory pro sondy, celkem tedy bylo vyvrtáno 12 otvorů. Na vnější straně byly celkem 4 měřící body. Body 1 a 2 ve druhé řadě cihel ve výšce 110 mm a body 3 a 4 ve čtvrté řadě cihel ve výšce 260 mm nad spodní hranou bloku (*Obr. 35*). Další dva měřící body (5 a 6) byly ze strany zeminy v poslední řadě cihel ve výšce 330 mm nad spodní hranou bloku (*Obr. 36*).



*Obr. 34 Laboratorní model bez dutiny
a s dutinou*



*Obr. 35 Laboratorní model s označením
měřících bodů – vnější strana*



*Obr. 36 Laboratorní model s označením
měřících bodů – ze strany zeminy*



Obr. 37 Finální laboratorní modely

Na základě předpokladu, že největších hodnot vlhkosti způsobené kapilárním vztlínáním je dosaženo uprostřed zdiva [33], byly pro měření použity kartáčové sondy do hloubky 100 mm, které byly v tomto případě dostačující. Osová vzdálenost otvorů pro sondy byla 90 mm a odpovídá tak rozteči doporučené výrobcem.

Aby bylo možné uvažovat model segmentu zdiva jako 2D úlohu, byly cihelné bloky z bočních stran obaleny vodonepropustnou fólií (simulace pokračování stěny). Bočních hrany byly dále zakryty dřevěnými deskami. Desky sloužily jako bednění pro násyp z písku, který simuluje okolní zeminu přilehlou ke zdivu. Takto připravené modely byly ponechány v laboratoři po dobu 3 měsíců, během kterých byla ve vanách udržována stálá hladina vody, aby došlo k dostatečnému nasycení zdiva vodou (Obr. 37) [85].

Měřicí přístroje

K měření vlhkosti byl použit odporový měřicí přístroj Greisinger GMH 3810. Pro měření tvrdých materiálů se k přístroji připojují kartáčové elektrody. Na displeji přístroje je během měření přímo zobrazena hmotnostní vlhkost stavebního materiálu, neboť přístroj umožňuje nastavení materiálových charakteristik. Princip měření vlhkosti pomocí odporového vlhkoměru je popsán v kapitole 2.6.1.

Po skončení experimentu bylo provedeno pomocí gravimetrické metody ověření výsledků naměřených odporovým přístrojem. Pro hmotnostní analýzu byly odebrány kontrolní vzorky zdiva z těch cihel, ve kterých byly vyvrtané otvory pro měřicí sondy. Vzorek byl odebrán v místě, kde byl během měření konec kartáčové elektrody.

Během experimentu byla měřena rychlost proudění vzduchu v dutině pomocí anemometru. Dále bylo prováděno měření teploty a vlhkosti v laboratoři a uvnitř vzduchové dutiny.

Průběh laboratorních zkoušek

V první fázi experimentu docházelo po dobu 3 měsíců k nasycení cihelných bloků vztlínající vodou. Během toho byla vzduchová dutina záměrně ponechána jako neprovětrávaná, aby došlo k maximálnímu provlhčení struktury zdiva.

Pro nastartování účinnosti vzduchové dutiny bylo ve druhé fázi experimentu (po 3 měsících) zajištěno proudění vzduchu v dutině pomocí ventilátoru (*Obr. 38*). Nasávací otvor byl zakryt prodyšnou tkaninou, díky které byla rychlost proudění vzduchu v dutině 0,05 m/s. Tato hodnota byla stanovena na základě výsledků výpočtového modelu, který simuloval přirozené proudění vzduchu ve vnější vzduchové dutině aplikované na reálné historické budově [57]. V případě, že požadovaná rychlost proudění vzduchu není po dokončení celého systému na reálném objektu naměřena, může být požadovaný průtok vzduchu dodatečně zajištěn pomocí ventilátoru. Výměna vzduchu v dutině zajišťuje, aby v bezprostřední blízkosti konstrukce nedošlo k dosažení hodnoty relativní vlhkosti přilehlé vrstvy vzduchu $\varphi = 100 \%$. Zároveň je důležité, aby měl přiváděný vzduch co nejnižší relativní vlhkost φ [%]. Vliv solí rozpustných ve vodě nebyl v tomto případě uvažován, ačkoliv může být pro výsledky velmi důležitý. Soli mohou negativně ovlivnit strukturu povrchu zdiva v průběhu odpařování vody obsahující soli. Nicméně krystalizace soli na sanované budově probíhá před samotnou sanací v místech nad zemí. Po sanaci se oblast krystalizace soli posune dolů do oblasti odvětrávané dutiny, což je také z hlediska estetiky výhodnější.

Provětrávání vzduchové dutiny pomocí ventilátoru bylo zajištěno po dobu 15ti měsíců. Během prvního měsíce bylo prováděno pouze orientační měření vlhkosti. Výsledky tohoto měření nejsou zahrnuty do závěrečného hodnocení, neboť účinky proudícího vzduchu se na snížení vlhkosti zdiva za tak krátkou dobu téměř neprojeví. Během následujících 14ti měsíců, kdy byl do vzduchové dutiny osazen ventilátor, bylo provedeno měření vlhkosti odporovým vlhkoměrem v každém měřicím bodě (*Obr. 39*).

Měření probíhalo v intervalu nejprve deseti dnů během prvním dvou měsíců, kdy byl pokles vlhkosti největší, pak už docházelo k postupnému ustálení a vlhkost byla měřena jen jednou měsíčně. Tyto výsledky byly zahrnuty do závěrečné analýzy [85].



Obr. 38 Ventilátor zajišťující proudění vzduchu v dutině (přes tkaninu a se sníženým výkonem ventilátoru)



Obr. 39 Měření vlhkosti odporovým vlhkoměrem Greisinger GMH 3810

Výsledky a zhodnocení

Na základě naměřených hodnot vlhkosti byla stanovena účinnost daného technického řešení vzduchové dutiny.

Hlavním přínosem měření byla možnost přesného srovnání stejných laboratorních modelů (za stejných podmínek) s ventilátorem a bez něj. Účinnost dutiny byla vypočtena z rozdílů naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých bodech u obou vzorků a je vyjádřena procentním poklesem hmotnostní vlhkosti v cihelném bloku se vzduchovou dutinou oproti referenčnímu vzorku.

V tabulce 7 jsou uvedeny konečné hodnoty naměřených vlhkostí w [% hm.] v jednotlivých měřicích bodech. Hodnoty v prvním sloupci odpovídají referenčnímu vzorku, na kterém nebyla aplikována vzduchová dutina. Druhý sloupec uvádí konečné hodnoty vlhkosti, kterých bylo dosaženo v cihelném bloku se vzduchovou dutinou při zajištění proudění vzduchu. Rychlost proudícího vzduchu v dutině byla 0,05 m/s. Z naměřených hodnot je patrné, že v porovnání s referenčním vzorkem došlo k výraznému snížení vlhkosti zdiva u modelu s větranou dutinou a to průměrně o 51 % (poměrově). Tato hodnota odpovídá podle stupnice ČSN 73 0610 snížení hmotnostní vlhkosti o 5,9 %.

Měřicí body	Hodnoty hmotnostní vlhkosti w [%]		Snížení vlhkosti (poměrově)
	Referenční model	Model se vzduchovou dutinou	
1	21,3	19,7	7,51 %
2	20,9	18,1	13,40 %
3	15,4	6,5	57,79 %
4	10,3	4,7	54,37 %
5	10,3	1,6	84,47 %
6	9,0	1,3	85,56 %

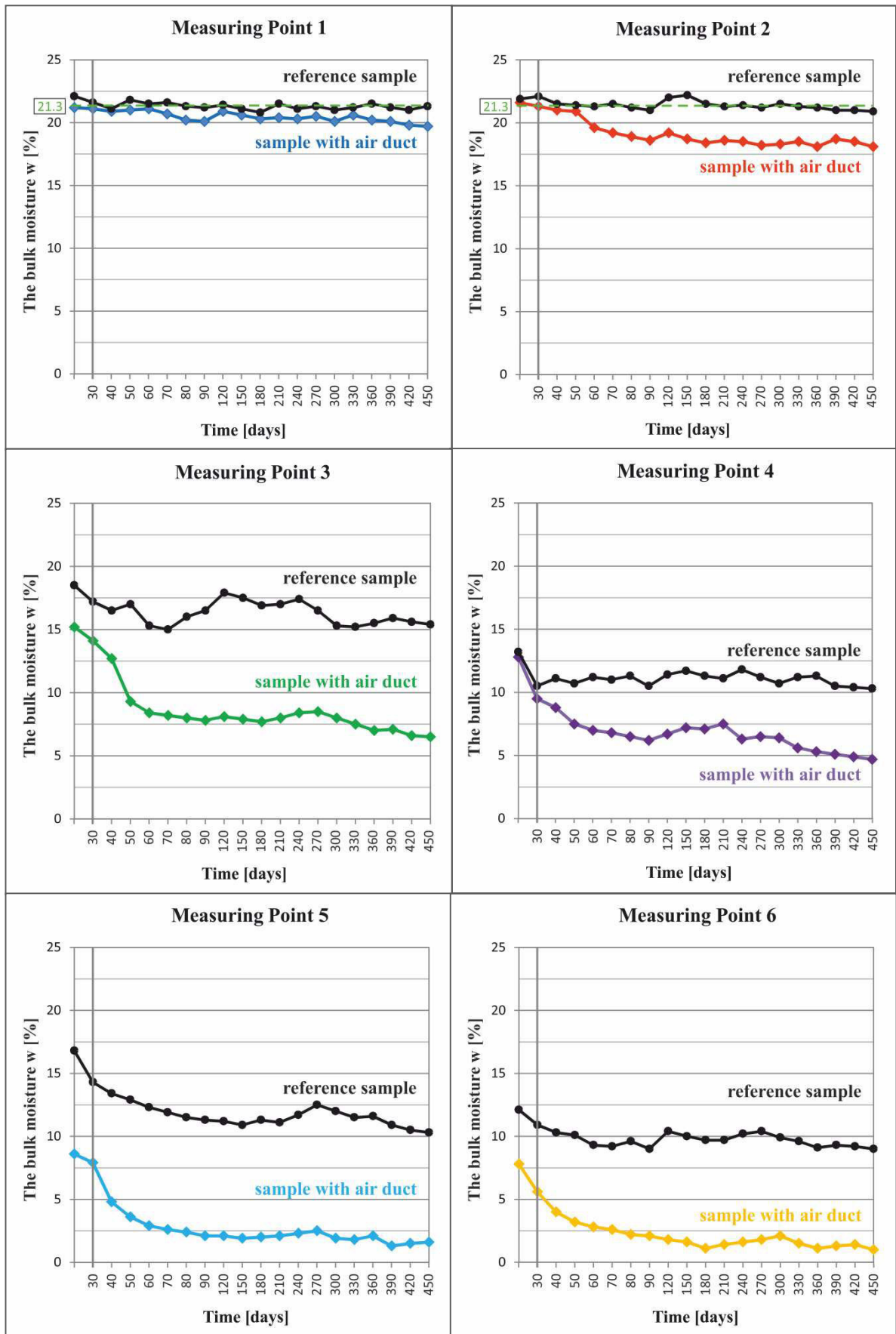
Tab. 7 Konečné hodnoty naměřených vlhkostí w [% hm], po 15ti měsících větrání pomocí ventilátoru při rychlosti proudění vzduchu 0,05 m/s.

Grafy (Obr. 40) znázorňují pokles vlhkosti zdiva v jednotlivých měřících bodech. V čase 0 jsou znázorněny hodnoty počáteční vlhkosti cihelných bloků po dostatečném nasycení struktury zdiva vodou, které probíhalo po dobu 3 měsíců (bez použití ventilátoru, nedocházelo k proudění vzduchu). V čase 30 – 450 dní jsou zobrazeny hodnoty z měření vlhkosti během následujících 14ti měsíců, kdy byl zapojen ventilátor. V grafech pro měřicí body 1 a 2 je označena hodnota objemové vlhkosti 21,3 %, což znázorňuje nejvyšší nasákavost cihel (v hmotnostních procentech) stanovenou gravimetricky. Je zřejmé, že obsah vlhkosti v bodech 1 a 2 v referenčním vzorku dosáhl svého maxima. Hodnoty vlhkosti jsou v těchto dvou bodech téměř stejné pro referenční vzorek a pro vzorek se vzduchovou mezerou. Tyto měřicí body jsou jen 60 mm nad hladinou vody, a tudíž se zde účinek dutiny neprojeví. Účinek vzduchové dutiny je patrný v měřících místech nad vzduchovou mezerou.

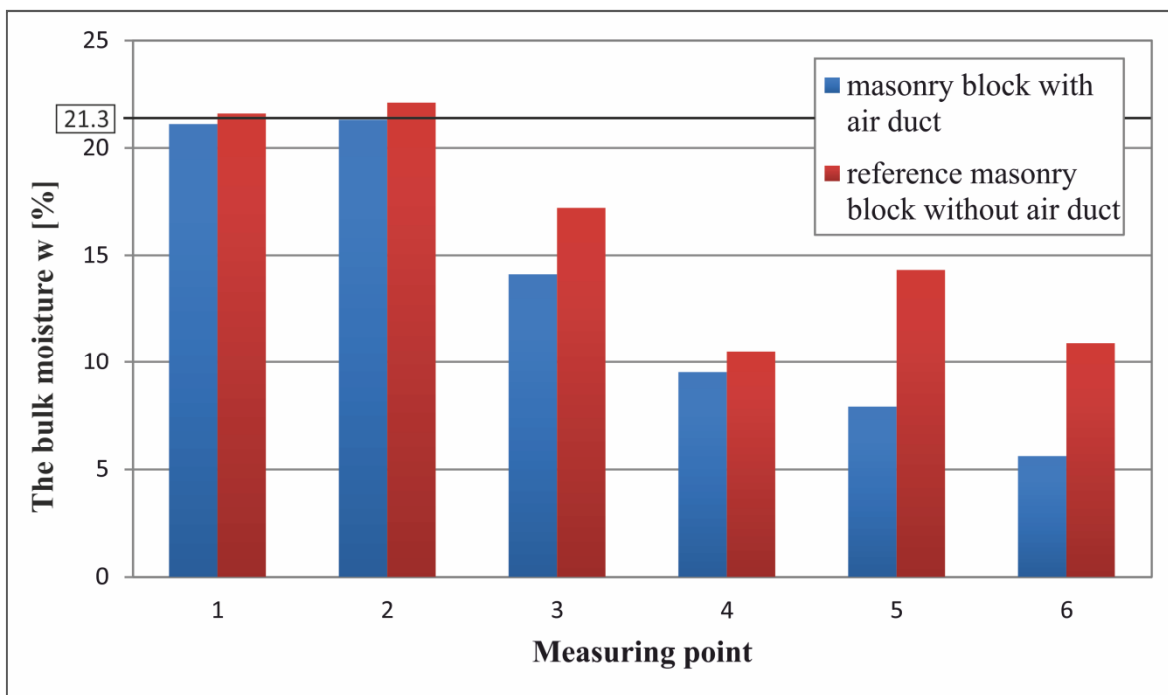
Ve sloupcových grafech jsou shrnuty počáteční hodnoty vlhkosti na začátku měření po 30ti dnech od zapojení ventilátoru (Obr. 41) a konečné hodnoty vlhkosti po 15ti měsících od zapojení ventilátoru (Obr. 42) měřené v jednotlivých bodech pro referenční vzorek a pro vzorek se vzduchovou dutinou [85].

Diskuze výsledků

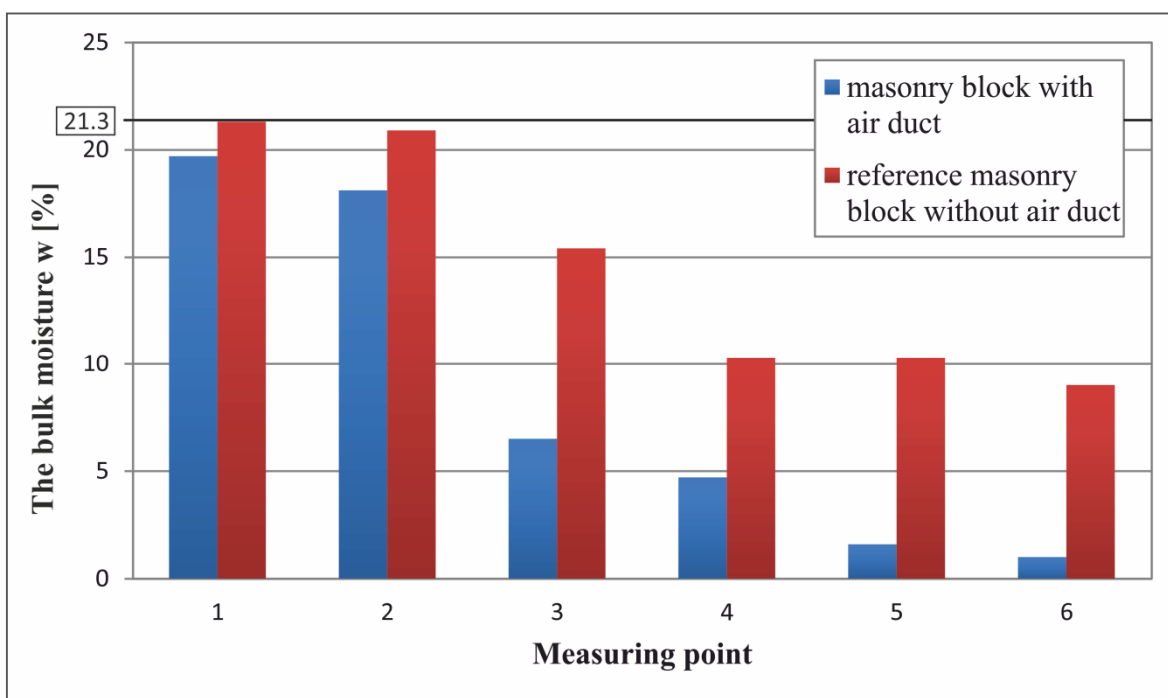
Výsledky experimentální analýzy prokázaly, že výše popsaná vzduchová dutina je účinná z hlediska snížení vlhkosti ve zdivu za předpokladu, že je v dutině zajištěno proudění vzduchu (přirozené nebo zajištěné pomocí ventilátoru).



Obr. 40 Naměřené hodnoty vlhkosti v jednotlivých měřících bodech



Obr. 41 Přehled naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých měřících bodech na začátku měření po 30ti dnech od zapojení ventilátoru



Obr. 42 Přehled naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých měřících bodech po 15ti měsících od zapojení ventilátoru

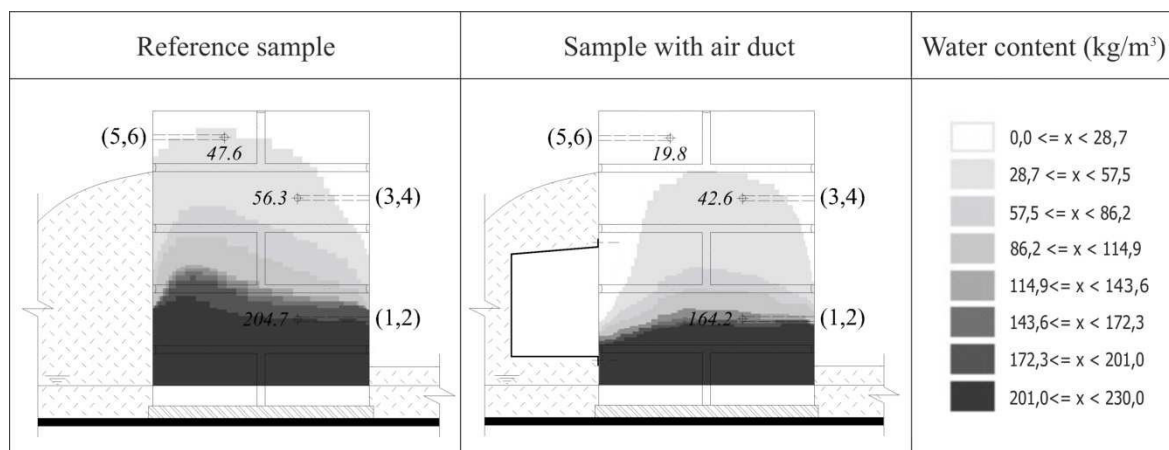
Ověření výsledků laboratorního měření – numerická simulace

Použitý výpočetní program

Experimentální studie byla numericky ověřena výpočetními simulacemi prováděnými v programu WUFI 2D. Tento software, který byl vyvinut Fraunhoferovým institutem pro stavební fyziku v Německu, umožňuje posouzení změn obsahu vody a teploty uvnitř konstrukcí v závislosti na vnějších a vnitřních klimatických podmínkách [86-88]. Použití tohoto softwaru vyžaduje znalost okrajových podmínek a tepelných a vlhkostních vlastností použitých materiálů [89, 90]. V tomto případě byly použity tepelné a vlhkostní vlastnosti materiálu stanovené experimentálně v laboratorní studii. Dále byly zadány okrajové podmínky, relativní vlhkost vzduchu a teplota vzduchu v laboratoři v průběhu experimentu. Všechny tyto hodnoty byly shodné jako při laboratorním experimentu popsaném výše. Numerická simulace byla provedena pro referenční model i pro model se vzduchovou dutinou [85].

Výsledky numerické simulace

Výsledky numerické simulace prokázaly, že stejně jako v laboratorním experimentu, i zde došlo k poklesu celkového obsahu vody v cihelném bloku se vzduchovou dutinou. Jak je patrné z výsledného obsahu vody a z celkového vlhkostního trendu na modelech, v místě vzduchové dutiny je zdivo vysoušeno v důsledku zvýšeného odpařování vody z povrchu a díky proudění vzduchu (Obr. 43). V porovnání s referenčním vzorkem byla úroveň vlhkosti ve vzorku se vzduchovou dutinou nižší. Můžeme proto konstatovat, že simulace chování laboratorních modelů pomocí výpočetního software byla identická s chováním laboratorních modelů v experimentální studii.



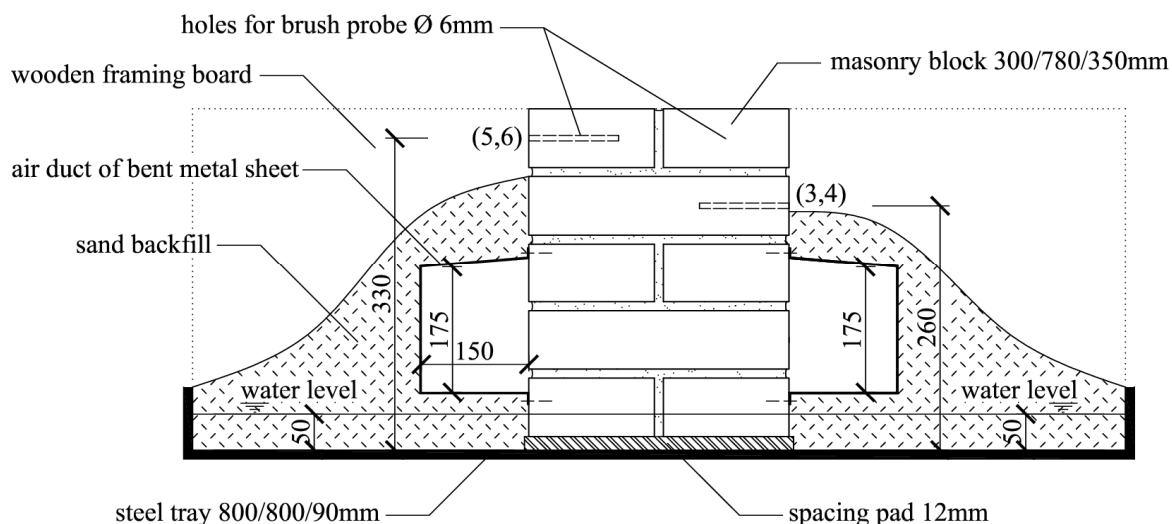
Obr. 43 Výsledky numerické simulace – obsah vody v referenčním modelu a v modelu se vzduchovou dutinou (vytvořeno v programu WUFI 2D)

Celkový závěr experimentální analýzy

Výsledky experimentálního měření na laboratorních modelech (ověřené softwarovou simulací) potvrdily, že výše popsaná vzduchová dutina má velký potenciál v oblasti sanace vlhkých staveb. Výsledky laboratorního experimentu prokázaly účinnost vzduchové dutiny. Vlhkost zdiva byla snížena průměrně o 51 % (poměrově) v porovnání s referenčním vzorkem bez vzduchové dutiny při rychlosti proudění vzduchu v dutině 0,05 m/s, což podle stupnice ČSN 73 0610 znamená snížení hmotnostní vlhkosti o 4,9 %. Simulace chování laboratorních modelů pomocí výpočetního softwaru byla identická s chováním zkušebních cihelných bloků v laboratoři [85].

4.2.2. Podélná provětrávaná oboustranná vzduchová dutina

Cílem experimentální studie bylo stanovení účinnosti oboustranné provětrávané vzduchové dutiny z hlediska snížení obsahu vody v cihelném zdivu. Pro tyto účely byl zhotoven laboratorní model (bez dutin) a model s oboustrannou vzduchovou dutinou v měřítku 1 : 2 (Obr. 44). Tento model simuloval výřez obvodového historického cihelného zdiva se vzduchovou dutinou umístěnou z obou stran odvlhčovaného zdiva a samostatným provětráváním obou dutin. V praxi je toto řešení (pokud je to možné) vhodné zejména v případě větší tloušťky odvlhčovaných zdí. Z důvodu umožnění vzájemné komparace výsledků účinnosti jednostranné a oboustranné vzduchové dutiny, byly zkušební cihelné pilíře stejných rozměrů a uspořádání jako v případě laboratorního experimentu s jednostrannou vzduchovou dutinou.



Obr. 44 Schéma uspořádání laboratorního modelu v měřítku 1:2

Laboratorní model

Pro účely tohoto experimentu byly zhotoveny dva identické zkušební zděné bloky z historických cihel plných pálených jako v případě předchozí laboratorní zkoušky s jednostrannou provětrávanou vzduchovou dutinou. Vlastnosti použitých materiálů (cihly a vápenná malta) byly uvažovány totožné jako v předchozím případě (*Tab. 1*), neboť byly u obou laboratorních experimentů použity stejné výrobky (stejná šarže). Zkušební bloky byly opět vyzděny na distanční podložky do ocelové vany, kde byla udržována stálá hladina vody do výšky 50 mm ode dna vany, aby byla zajištěna stálá dotace vody do cihelného zdiva.

Na jeden zkušební blok byly z obou stran aplikovány vzduchové dutiny z ohýbaného plechu, které byly svými rozměry a tvarem shodné s technickým řešením užitného vzoru CZ25990 (U1) [84] ve zmenšeném měřítku (vzduchové dutiny byly shodné jako v případě modelu s jednostrannou vzduchovou dutinou (*Obr. 45*). Druhý, referenční zkušební blok, byl opět ponechán bez jakékoliv sanační úpravy (*Obr. 46*). Zásypem z písku byl simulován okolní terén.

Měření vlhkosti bylo prováděno pomocí odporového vlhkoměru. V každém zděném bloku byly celkem 4 měřící body, tvořené dvěma otvory pro kartáčové sondy. Označení měřících bodů zůstalo vzhledem k možnosti vzájemné komparace shodné, jako v předchozím případě (laboratorní model s jednostrannou vzduchovou dutinou). Z důvodu oboustranného zásypu (a také dutin) nebylo možné provádět měření na pozicích bodů 1 a 2, které se v předchozím experimentu nacházely ve druhé řadě cihel. Měření bylo prováděno pouze v bodech 3 a 4 ve čtvrté řadě cihel ve výšce 260 mm nad spodní hranou bloku a v bodech 5 a 6 v poslední řadě cihel ve výšce 330 mm nad spodní hranou bloku.

Takto připravené modely byly ponechány v laboratoři opět po dobu 3 měsíců, během kterých byla ve vanách udržována stálá hladina vody (*Obr. 47*).



Obr. 45 Laboratorní model s dutinami



Obr. 46 Laboratorní model s dutinami a bez dutin

Průběh laboratorních zkoušek

Průběh laboratorních zkoušek byl obdobný jako v případě experimentu s jednostrannou provětrávanou vzduchovou dutinou.

V první fázi experimentu docházelo po dobu 3 měsíců k nasycení cihelných bloků vztlínající vodou. Druhá fáze experimentu (po 3 měsících) spočívala v zajištění proudění vzduchu v dutinách pomocí ventilátorů a tím i k počátku účinnosti vzduchové dutiny (*Obr. 48*). Nasávací otvory byly zakryty prodyšnou tkaninou (*Obr. 49*), díky které byla rychlost proudění vzduchu v dutinách 0,05 m/s, což odpovídá rychlosti přirozeného proudění vzduchu v dutině v případě reálného historického objektu [57]. Ani v tomto případě nebyl uvažován vliv solí rozpustných ve vodě.



Obr. 47 Finální laboratorní modely



Obr. 48 Ventilátory zajišťující proudění vzduchu v dutinách

Provětrávání vzduchové dutiny pomocí ventilátoru bylo zajištěno po dobu 10ti měsíců. Během prvního měsíce bylo prováděno pouze orientační měření vlhkosti. Výsledky tohoto měření nejsou zahrnuty do závěrečného hodnocení. Během následujících 9ti měsíců, kdy byly do vzduchových dutin osazeny ventilátory, bylo provedeno měření vlhkosti odporovým vlhkoměrem v každém měřicím bodě (*Obr. 50*). Měření probíhalo v intervalu nejprve deseti dnů během prvním dvou měsíců, kdy byl pokles vlhkosti největší, pak už docházelo k postupnému ustálení a vlhkost byla měřena jen jednou měsíčně. Tyto výsledky byly zahrnuty do závěrečné analýzy.



Obr. 49 Zapojení ventilátorů



Obr. 50 Měření vlhkosti odporovým vlhkoměrem

Výsledky a zhodnocení

Na základě naměřených hodnot vlhkosti byla stanovena účinnost daného technického řešení oboustranné vzduchové dutiny. Účinnost dutiny byla vypočtena z rozdílů naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých bodech u obou modelů a je vyjádřena procentním poklesem hmotnostní vlhkosti v cihelném bloku se vzduchovou dutinou oproti referenčnímu modelu.

V tabulce 8 jsou uvedeny konečné hodnoty naměřených vlhkostí w [% hm.] v jednotlivých měřicích bodech pro referenční model a pro model s oboustrannou provětrávanou vzduchovou dutinou při zajištění rychlosti proudění vzduchu 0,05 m/s.

Vlhkost zdiva u laboratorního modelu s oboustrannou vzduchovou dutinou se po 10 měsících, během kterých probíhalo měření, snížila průměrně o 74 % (poměrově) v komparaci s referenčním modelem. Tato hodnota odpovídá podle stupnice ČSN 73 0610 snížení hmotnostní vlhkosti o 9,1 %.

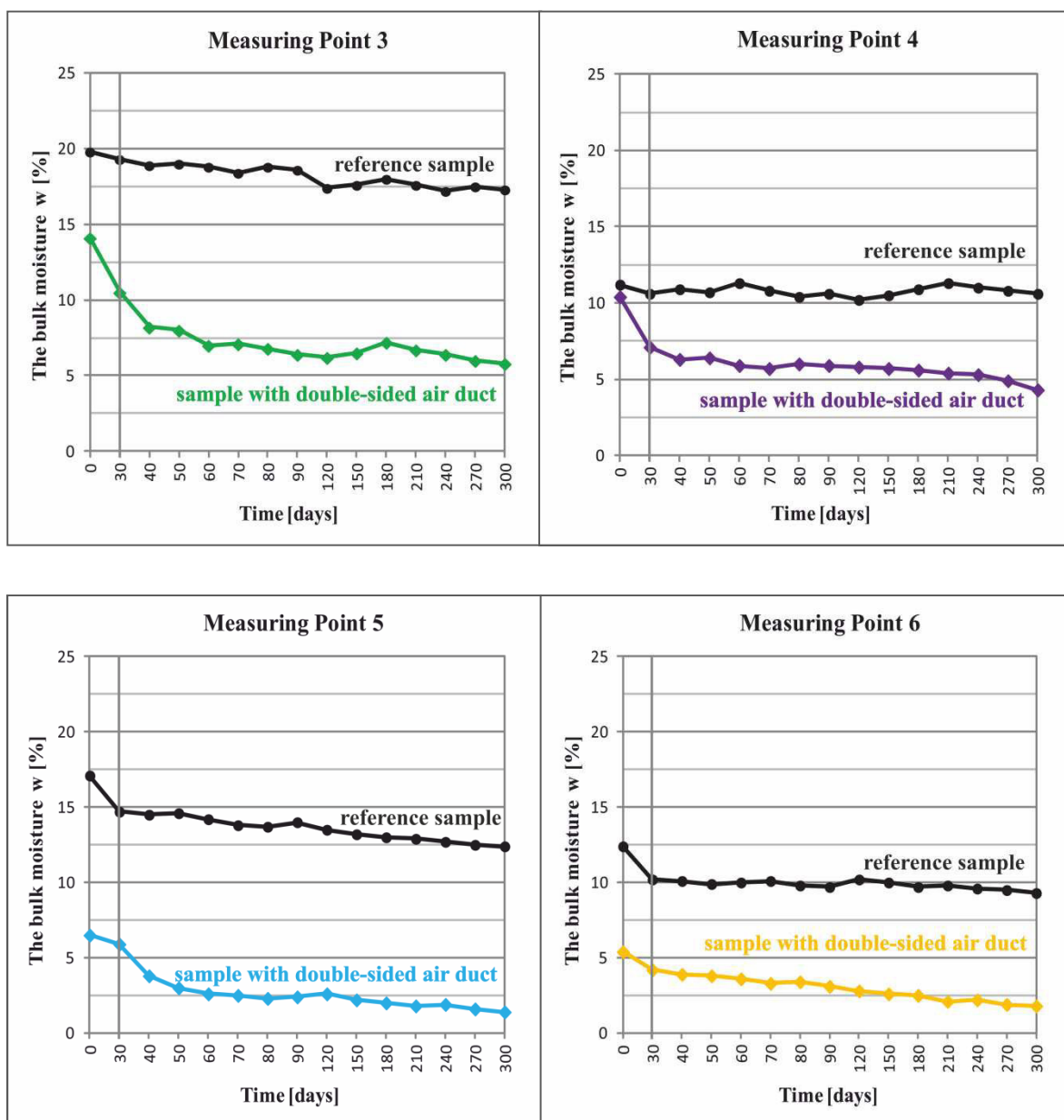
Měřicí body	Hodnoty hmotnostní vlhkosti w [%]		Snížení vlhkosti (poměrově)
	Referenční model	Model s oboustrannou vzduchovou dutinou	
3	17,3	5,8	66,47 %
4	10,6	4,3	59,43 %
5	12,4	1,4	88,71 %
6	9,3	1,8	80,65 %

Tab. 8 Konečné hodnoty naměřených vlhkostí w [% hm], po 10ti měsících větrání pomocí ventilátorů při rychlosti proudění vzduchu 0,05 m/s.

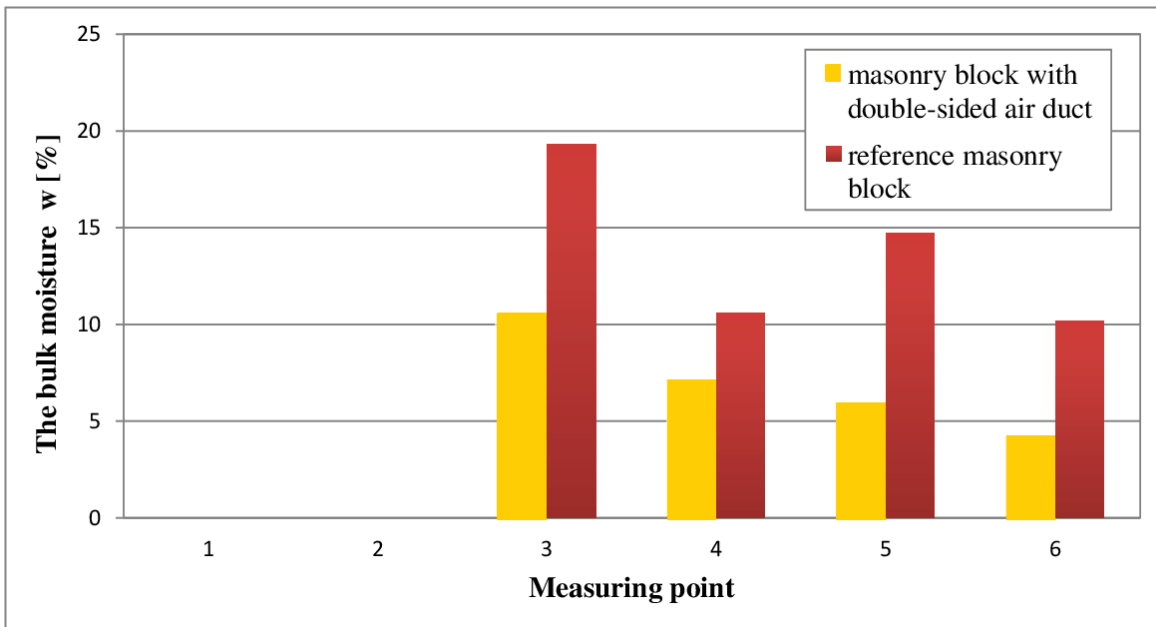
V grafech (Obr. 51) je zobrazen pokles vlhkosti v měřících bodech č. 3 – 5. V čase 0 jsou uvedeny hodnoty počáteční vlhkosti zkušebních bloků po jejich nasycení vodou (po 3 měsících). V čase 30 – 300 dní jsou zobrazeny hodnoty z měření vlhkosti během následujících 9ti měsíců, kdy byly zapojeny ventilátory.

Ve sloupcových grafech jsou shrnuty počáteční hodnoty vlhkosti v jednotlivých měřících bodech na začátku měření po 30ti dnech od nastartování vysoušení cihelného bloku pomocí ventilátorů (Obr. 52) a na konci měření po 10ti měsících (Obr. 53).

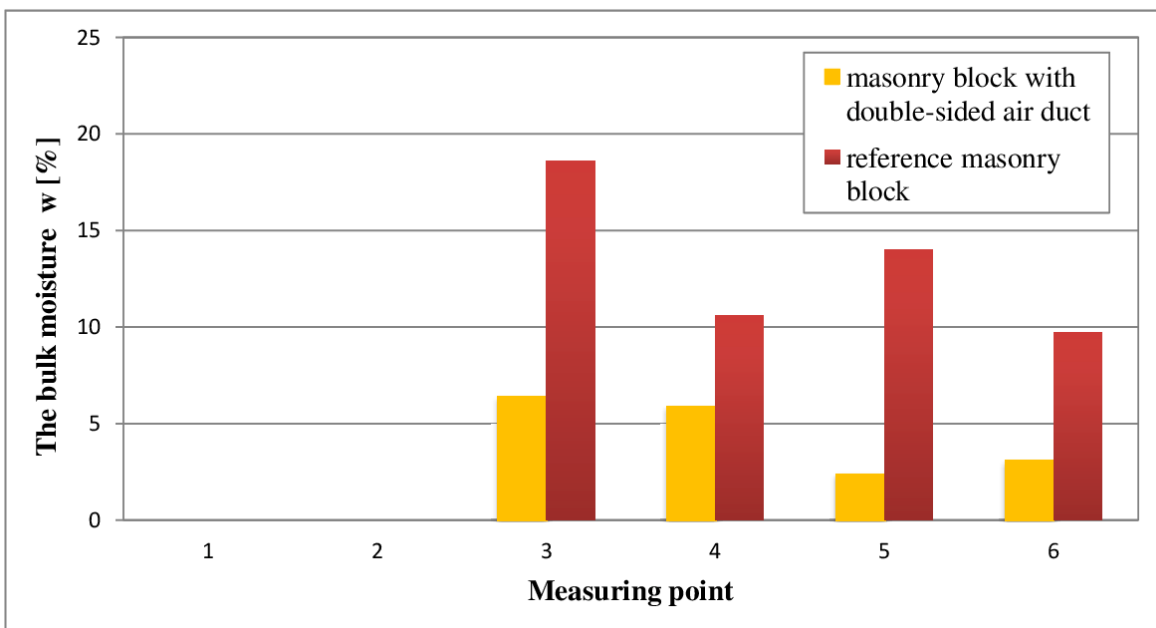
Jak je patrné z výsledků experimentální analýzy, oboustranná provětrávaná vzduchová dutina je při zajištění proudění vzduchu účinná z hlediska snížení vlhkosti ve zdivu.



Obr. 51 Naměřené hodnoty vlhkosti v jednotlivých měřících bodech



Obr. 52 Přehled naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých měřících bodech na začátku měření po 30ti dnech od zapojení ventilátoru

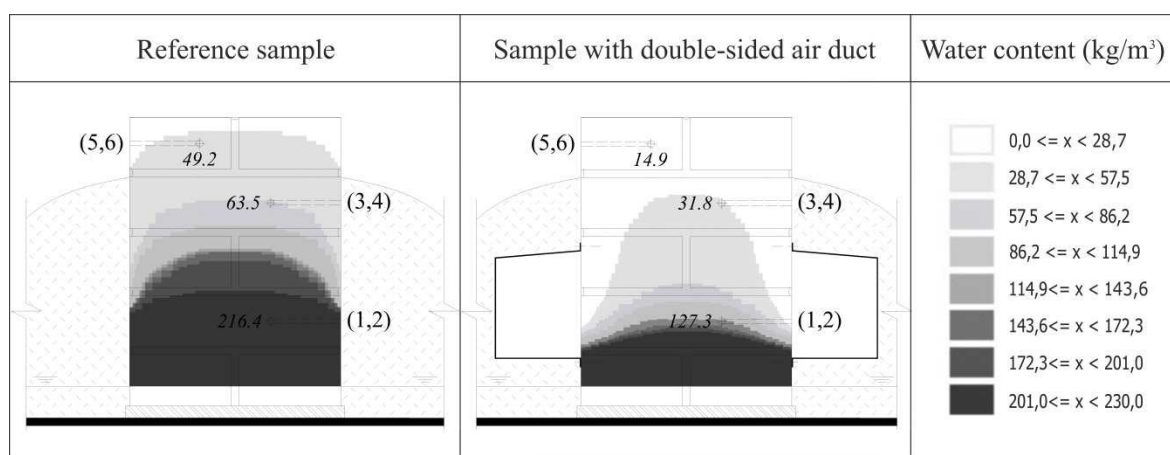


Obr. 53 Přehled naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých měřících bodech po 10ti měsících od zapojení ventilátoru

Ověření výsledků laboratorního měření – numerická simulace

Výsledky numerické simulace

Výpočetní simulace pro ověření experimentální studie byla vytvořena v programu WUFI 2D. Výsledky numerické simulace potvrdili chování zkušebních modelů při laboratorním experimentu. V laboratorním modelu s oboustrannou vzduchovou dutinou došlo v případě numerické simulace k poklesu celkového obsahu vody, stejně jako v případě experimentu v laboratorních podmínkách. U modelu s oboustrannou vzduchovou dutinou se projevil stejný vliv vzduchových dutin jako v předchozím experimentu. V místech dutin dochází k vysoušení zdiva v důsledku zvýšeného odpařování vody z povrchu a díky proudění vzduchu (Obr. 54).



Obr. 54 Výsledky numerické simulace – obsah vody v referenčním modelu a v modelu s oboustrannou vzduchovou dutinou (vytvořeno v programu WUFI 2D)

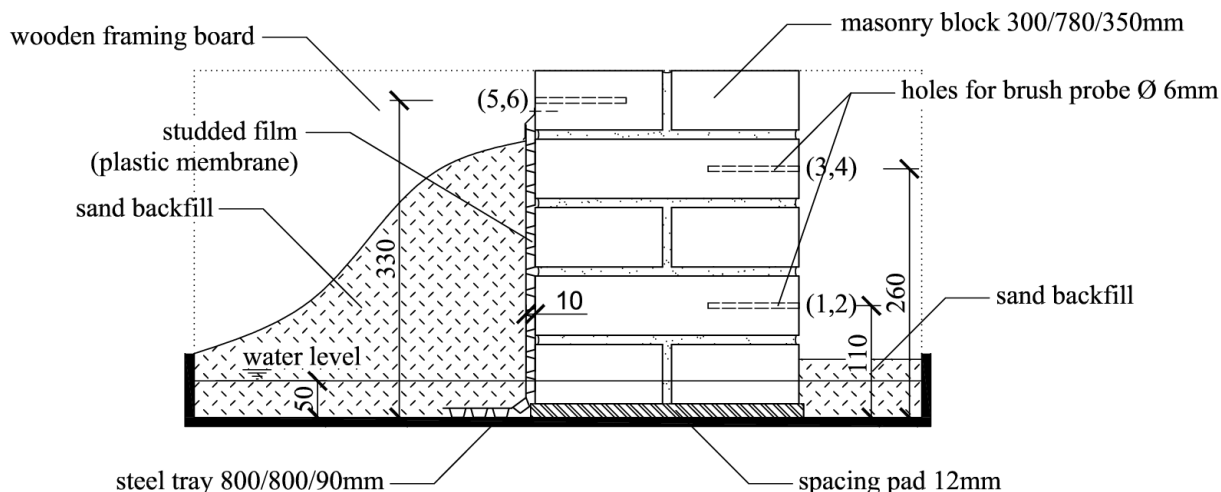
Závěr experimentální analýzy

Výsledky laboratorního experimentu prokázaly účinnost oboustranné vzduchové dutiny. Vlhkost zdiva u laboratorního modelu s oboustrannou vzduchovou dutinou se po 10 měsících, během kterých probíhalo měření, snížila průměrně o 74 % (poměrově) v komparaci s referenčním modelem, při rychlosti proudění vzduchu v dutinách 0,05 m/s. Podle stupnice ČSN 73 0610 tato hodnota snížení hmotnostní vlhkosti o 9,1 %.

Z výsledků numerické simulace je zřejmé, že výsledky jsou ovlivněny délkou měřících sond. Pokud by pro měření vlhkosti byly použity delší kartáčové sondy, tak by pravděpodobně uprostřed cihelného pilíře byly naměřeny vyšší hodnoty vlhkosti než v tomto případě, kdy hloubka kartáčové sondy dosahovala přibližně do 1/3 šířky zdiva, kde již vlivem vzduchové dutiny docházelo k vysoušení zdiva.

4.2.3. Profilovaná (nopová) fólie

Cílem laboratorní zkoušky bylo stanovení účinnosti dalšího typu vzduchových izolačních metod - profilované (nopové) fólie z hlediska snížení vlhkosti cihelného zdiva. Pro tento účel byl zhotoven laboratorní model v měřítku 1 : 2 se vzduchovou mezerou tvořenou profilovanou nopovou fólií (Obr. 55). Tento model simuloval klasický případ, kdy je nopová fólie umístěna z venkovní strany odvlhčované zdi pod úrovní terénu.



Obr. 55 Schéma uspořádání laboratorního modelu v měřítku 1:2

Laboratorní model

Laboratorní experiment plynule navazuje na předchozí experimenty (s provětrávanými podélnými dutinami). Byl vyzděn další zkušební zděný blok z cihel plných pálených, formátu 290 x 140 x 65 mm. Pojivo i cihly byly použity stejné jako v předchozím případě (stejně materiálové vlastnosti), aby mohlo dojít k objektivní vzájemné komparaci výsledků měření.

Uspořádání modelu bylo stejné jako u laboratorních modelů s provětrávanými dutinami. Na nově zhotovený zkušební blok byla aplikována profilovaná (nopová) fólie (Obr. 56). Pro porovnání výsledků vlhkosti a stanovení účinnosti dané nopové fólie byl vyzděn referenční zkušební blok (bez sanační úpravy).

Měření vlhkosti bylo prováděno pomocí odporového vlhkoměru. Uspořádání jednotlivých měřících bodů (otvory pro kartáčové sondy) bylo z důvodu přesnější komparace výsledků a vzájemného porovnání účinnosti jednotlivých typů vzduchových izolačních metod totožné jako u předchozích experimentů s podélnými vzduchovými dutinami. Na vnější straně tedy byly celkem 4 měřící body (1 – 4), další dva měřící body (5 a 6) byly ze strany země v poslední řadě cihel [91].

Takto připravený model byl spolu s referenčním modelem ponechán v laboratoři po dobu 3 měsíců, během kterých byla ve vanách udržována stálá hladina vody (Obr. 57).



Obr. 56 Aplikace profilované nopové fólie Obr. 57 Finální laboratorní model

Měřicí přístroje

Stejně jako v předchozích případech i pro tento laboratorní experiment byl k měření vlhkosti použit odporový měřicí přístroj Greisinger GMH 3810. Díky tomu lze přímo porovnávat výsledky měření vlhkosti pro jednotlivé typy vzduchových izolačních metod bez možnosti odchylky z důvodu použití různých typů měřicích přístrojů.

Průběh laboratorních zkoušek

Laboratorní modely byly v první fázi experimentu po dobu 3 měsíců ponechány volně, bez měření vlhkosti. Během tohoto období došlo k maximálnímu nasycení struktury zdiva vztlínající vodou. V následujících 10ti měsících bylo provedeno měření vlhkosti zdiva v každém měřicím bodě. Interval měření byl 1 měsíc. Oba modely byly vystaveny stejným podmínkám a nacházely se ve stejném prostředí. Ani v tomto experimentu nebyl uvažován vliv solí rozpustných ve vodě, které mohou mít negativní vliv na povrchovou strukturu zdiva během odpařování vody soli obsahující [91].

Výsledky a zhodnocení

Na základě naměřených hodnot vlhkosti byla stanovena účinnost daného typu nopové fólie. Účinnost byla vypočtena z rozdílů naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých bodech u obou modelů a je vyjádřena procentním poklesem hmotnostní vlhkosti v cihelném bloku s nopovou fólií oproti referenčnímu modelu.

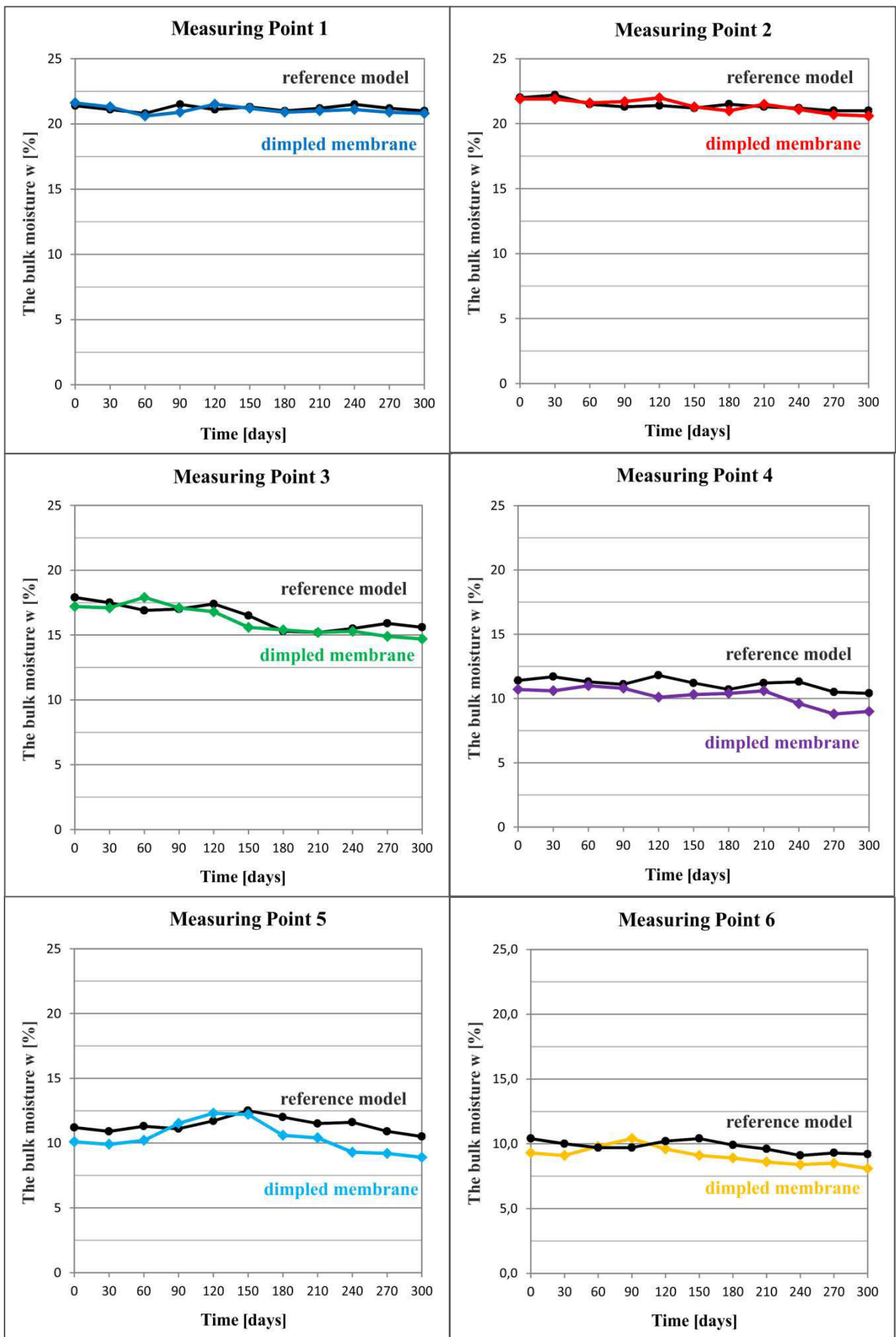
V tabulce 9 jsou uvedeny konečné hodnoty naměřených vlhkostí w [% hm.] v jednotlivých měřicích bodech pro referenční model a pro model s nopovou fólií.

Měřicí body	Hodnoty hmotnostní vlhkosti w [%]		Snížení vlhkosti (poměrově)
	Referenční model	Model nopovou fólií	
1	21,0	20,8	0,95 %
2	21,0	20,6	1,90 %
3	15,6	14,7	5,77 %
4	10,4	9,0	13,46 %
5	10,5	8,9	15,24 %
6	9,2	8,1	11,96 %

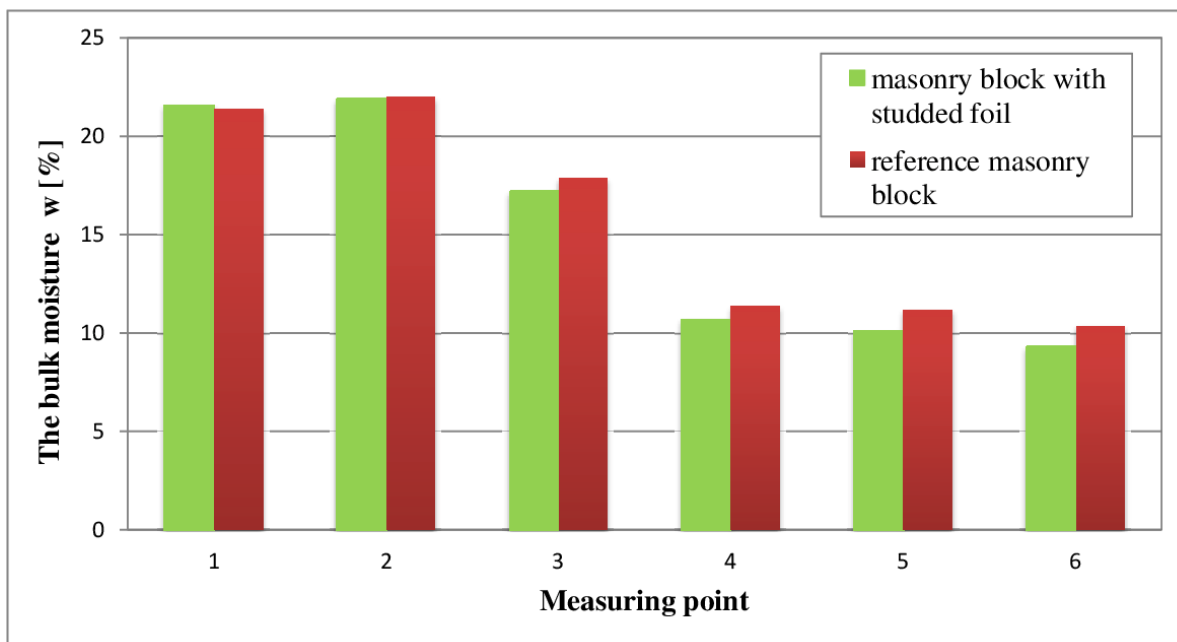
Tab. 9 Konečné hodnoty naměřených vlhkostí w [% hm], po 10ti měsících od začátku měření.

V grafech jsou uvedeny hodnoty naměřených vlhkostí w [% hm.] v jednotlivých měřících bodech během časového období 10 měsíců. Grafy vyjadřují pokles vlhkosti zdiva v jednotlivých bodech (Obr. 58). Z výsledků měření vlhkosti je patrné, že účinnost nopové fólie je značně omezená. Hodnoty vlhkosti jsou téměř totožné pro model s nopovou fólií a pro referenční model. Laboratorní experiment byl prováděn ve velké halové laboratoři s teplotou proměnnou v závislosti na ročním období. Jsou zde patrné drobné výkyvy hodnot v důsledku ročního období (nárůst v letních měsících), ale jinak vlhkost v cihelných blocích výrazně neklesá.

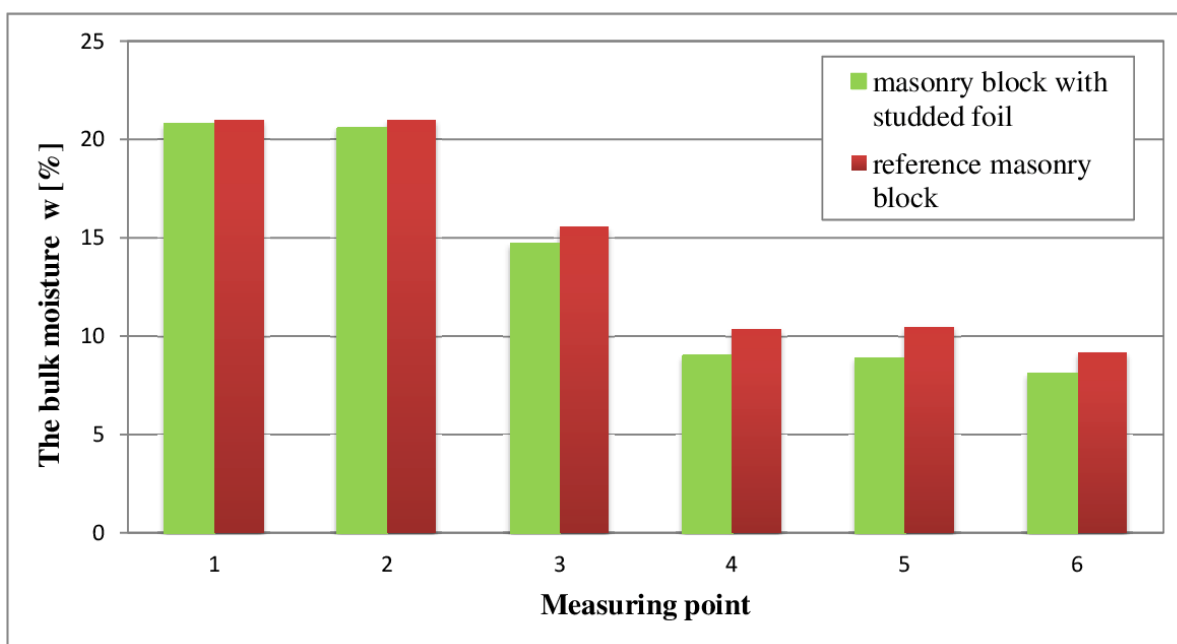
V závěrečných sloupcových grafech jsou shrnuty průměrné hodnoty naměřených vlhkostí w [% hm.] v jednotlivých bodech pro referenční model a pro model s nopovou fólií. První sloupcový graf ukazuje počáteční hodnoty vlhkosti, které byly naměřeny po 3 měsících od dostatečného prosycení cihelných bloků vodou (Obr. 59). Ve druhém grafu jsou uvedeny konečné hodnoty vlhkosti po 10ti měsících od začátku měření (Obr. 60). Z naměřených hodnot je patrný pokles vlhkosti v důsledku odpařování vody u obou modelů. V porovnání s referenčním modelem však došlo ke snížení vlhkosti v cihelném bloku opatřeném nopovou fólií komparativně v průměru o 8 % (poměrově), což podle stupnice ČSN 73 0610 znamená snížení o pouhých 0,9 % hmotnostní vlhkosti [91].



Obr. 58 Naměřené hodnoty vlhkosti v jednotlivých měřících bodech



Obr. 59 Přehled naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých měřících bodech na začátku měření

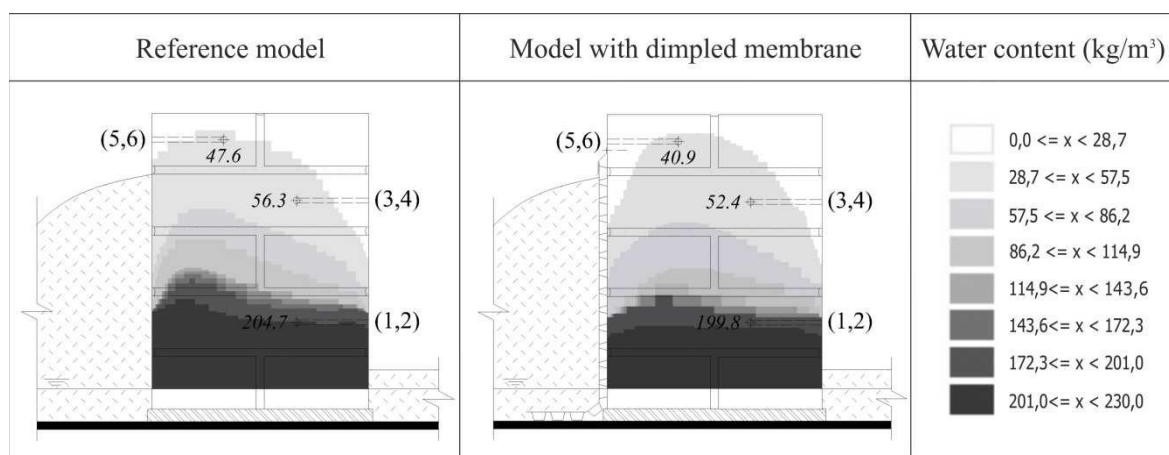


Obr. 60 Přehled naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých měřících bodech po 10ti měsících od začátku měření

Ověření výsledků laboratorního měření – numerická simulace

Výsledky numerické simulace

Výsledky numerické simulace prováděné v programu WUFI 2D potvrdily výsledky získané laboratorním měřením. Na výstupu z programu je vidět výsledný obsah vody na konci simulace v cihelném bloku s nopovou fólií a v referenčním bloku (Obr. 61). Je zřejmé, že celkový obsah vody v cihelném bloku s nopovou fólií je nepatrně nižší než u referenčního modelu. Lze tedy konstatovat, že numerická simulace potvrdila chování zkušebních bloků stanovené experimentálním měřením.



Obr. 61 Výsledky numerické simulace – obsah vody v referenčním modelu a v modelu s nopovou fólií (vytvořeno v programu WUFI 2D)

Závěr experimentální analýzy

Na základě výsledků laboratorní zkoušky lze tvrdit, že účinnost výše uvedeného sanačního opatření je značně omezená. Podle údajů z technických listů výrobců je nopová fólie „vhodná k odstranění vlhkosti ze stěn objektu a umožňuje i cirkulaci vzduchu“ [92]. Laboratorní experiment ale prokázal, že vlhkost zdiva s nopovou fólií se snížila komparativně v průměru o 8 % (poměrově) oproti referenčnímu vzorku, což podle stupnice ČSN 73 0610 znamená snížení o pouhých 0,9 % hmotnostní vlhkosti. Bez zajištění přívodu a odtahu zde k cirkulaci vzduchu samozřejmě nedochází. Vzhledem k velmi úzké dutině vytvořené mezi nopy a přilehlým zdivem (max. 10 – 20 mm) nemohou zajistit efektivní proudění vzduchu v dutině a neumožňují tak dostatečně intenzivní odpar vody z konstrukce. Jejich přínos tak spočívá především v separaci vlhkého zemního prostředí od stavební konstrukce.

Jak je vidět z výsledků, proti vodě vzlínající do zdiva z podzákladí dostatečně účinná sama o sobě není, musí být doplněna dalším sanačním opatřením. Výsledky numerické simulace prokázaly shodu s daty získanými laboratorním měřením, stejně jako u laboratorního experimentu, i zde je celkový obsah vody v cihelném bloku s nopovou fólií nižší [91].

4.3. Analýza proudění vzduchu v podlahové dutině

Dalším typem vzduchových izolačních metod jsou podlahové dutiny.

Na softwarovém modelu byla analyzována účinnost technického řešení provětrávané podlahy, které vychází z užitného vzoru [93].

Pro správnou funkci vzduchové dutiny musí být zajištěno dostatečné proudění vzduchu s vyloučením kondenzace vodní páry uvnitř dutiny. Přibližná účinnost technického řešení byla analyzována na zjednodušeném softwarovém modelu zpracovaném v programu COMSOL Multiphysics (Švédsko). Pro účely analýzy byl vytvořen model spodní stavby s instalovanou provětrávanou podlahou (skladba dle užitného vzoru). Výsledky simulace jsou prezentovány prostřednictvím teplotních polí a grafickým znázorněním rychlosti proudění vzduchu. Vypočtená intenzita proudění vzduchu v dutině je závislá na rychlosti větru, povrchové teplotě okolního prostředí a na dalších okrajových podmínkách. Vzhledem k tomu, že v reálných podmínkách je během přibližně čtvrtiny roku bezvětrí, musí být hodnoceny případy s vlivem větru i bez vlivu větru. Dostatečná rychlost proudění vzduchu uvnitř dutiny musí zajistit efektivní odvod vodní páry, aby bylo zabráněno možné kondenzaci v prostoru dutiny.

Celkem bylo provedeno 5 variant numerických simulací, které se vzájemně lišily zadanou rychlostí proudění větru. V případě uvažovaného přirozeného proudění vzduchu byl hodnocen stav za bezvětrí, s malou rychlostí větru, s průměrnou rychlostí větru (odpovídá naměřeným hodnotám průměrné rychlosti větru v ČR) a s vyšší rychlostí větru. Dále byla posouzena varianta s nuceným větráním, kde proudění vzduchu bylo zajištěno ventilátorem [94].

Ve výpočtech byly použity následující okrajové podmínky dle normy ČSN 73 0540-3 [95]:

- Venkovní teplota vzduchu $T_e = -15 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Vnitřní teplota vzduchu $T_{ai} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Teplota půdy (v hloubce 3 m) $T_{gr} = 5 \text{ }^\circ\text{C}$,
- Rychlost proudění větru kolmo na fasádu $v = 0; 0,6; 3,0; 6,0 \text{ m/s}$.

Výška provětrávané vzduchové mezery byla zvolena 250 mm, což je tloušťka dutiny vzorového řešení [93]. Technické řešení totiž umožňuje značnou variabilitu tloušťky vzduchové dutiny. Délka podlahové dutiny v tomto modelovém případě je 7,0 m (příčný řez). Nasávací a výdechové otvory o rozměrech 100 x 100 mm se nachází uprostřed výšky vzduchové dutiny a jsou vyústěny na fasádu dvakrát zalomenou drážkou. Obvodové stěny a podlahová konstrukce splňují požadavky kladené normou ČSN 730540-2 [96] na tyto konstrukce.

V první fázi bylo v simulaci uvažováno přirozené proudění vzduchu v provětrávané podlaze. Nasávací a výdechové otvory nejsou vzájemně převýšeny a k proudění dochází pouze působením větru. Toto řešení je vhodné zejména pro objekty, které jsou umístěny ve směru převládajících větrů. Nasávací otvory se pak osadí na stranu návětrnou,

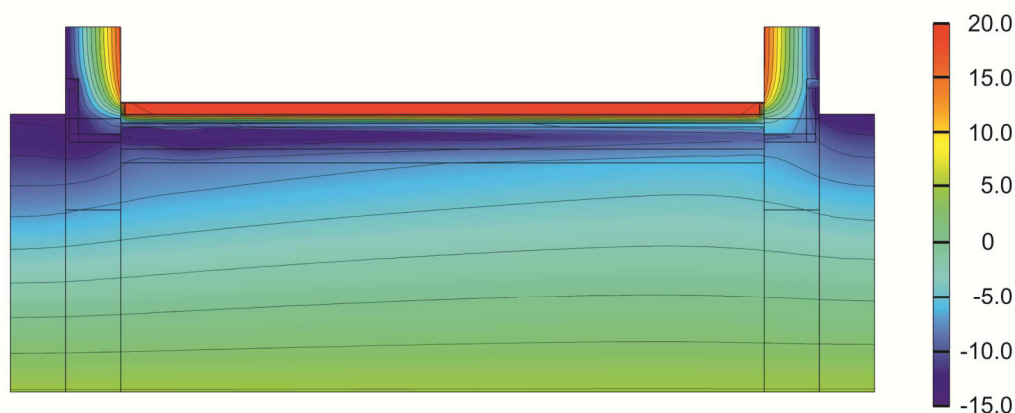
kde proudění větru vstupující skrze otvory do konstrukce podlahy umocňuje tah v dutině. Lze si tedy představit, že je objekt obtékán větrem, který na jedné straně dutiny způsobuje tlak a na druhé sání. Ve druhé fázi bylo proudění vzduchu uvažováno jako nucené, zajištěné ventilátorem.

Pro každou variantu rychlosti větru byla uvnitř dutiny stanovena intenzita a obraz proudění vzduchu. V místě nasávacích otvorů byla zavedena taková rychlost vzduchu, která představuje polovinu rychlosti větru kolmo na fasádu (dle publikace [54]). Rychlost proudění vzduchu na vstupu je tedy např. 3,0 m/s, což odpovídá 6,0 m/s rychlosti větru kolmo na fasádu. V místě výdechových otvorů byla zavedena rychlost odpovídající sání větru, které je zhruba třetinové oproti hodnotě rychlosti na vstupu [54]. Jedná se o úlohu časově nezávislou, tedy ustálené proudění. Na níže uvedených výstupech byla návětrná strana orientovaná vždy směrem zleva.

Výsledky CFD simulace

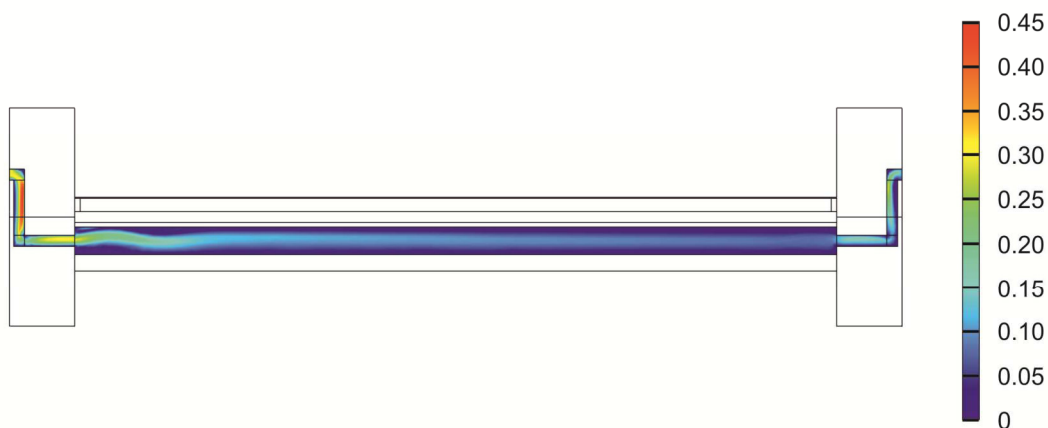
Varianta 1 – minimální rychlost větru ($v = 0,6 \text{ m/s}$)

V prvním případě byla hodnocena varianta, kde maximální rychlost proudění vzduchu na vstupu je 0,3 m/s, což odpovídá 0,6 m/s rychlosti větru kolmo na fasádu. Z výsledků rozložení teplot (*Obr. 62*) v mezeře odvětrávané podlahy je patrné, že bezprostředně za nasávacím otvorem je proudící vzduch ohříván v důsledku kontaktu s okolními plochami (tepelné ztráty z interiéru a částečně i teplo ze zeminy) a promícháním přiváděného studeného vzduchu s původním teplejším vzduchem. V tomto případě dojde k dohřátí přiváděného vzduchu (na střední teplotu dutiny) ještě před nasátím vzduchu odváděcím otvorem. Okolní teplota v dutině se zvyšuje směrem k výdechovému otvoru. Vstupní teplota vzduchu je $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ a výstupní teplota je asi $-8 \text{ }^\circ\text{C}$. Přiváděný studený vzduch bude v zimních měsících ochlazovat vzduch v dutině. V návaznosti tak budou nerovnoměrně ochlazovány i okolní konstrukce v blízkosti proudů vzduchu. Součinitel přestupu tepla na povrchu uvnitř dutiny je vyšší a přenos tepla je intenzivnější, než v případě podlahové konstrukce bez větrané dutiny [94].



Obr. 62 Výsledný průběh teplot v dutině [$^\circ\text{C}$] pro rychlost proudění na vstupu 0,3 m/s (vytvořeno v programu COMSOL Multiphysics)

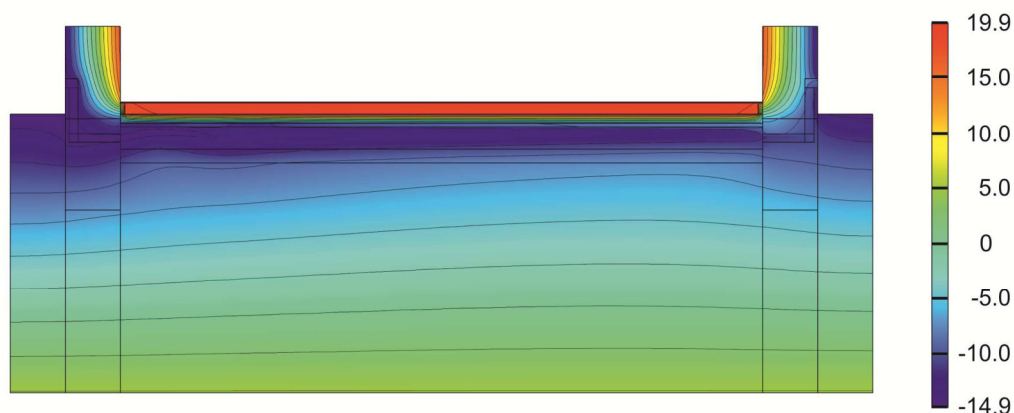
Z numerické simulace zobrazené prostřednictvím 2D rychlostního pole vzduchu je patrné, že při rychlosti proudění vzduchu na vstupu 0,3 m/s se v místě nasávacího otvoru proud vzduchu ochladí, poklesne a zpomalí (Obr. 63). Vzduch je většinou rozptýlen do celého objemu dutiny, v těsné blízkosti nasávacích otvorů dochází k zavírání. V místě výdechového otvoru rychlost proudění vzduchu v důsledku sání opět značně stoupá.



Obr. 63 Výsledný průběh rychlosti proudění vzduchu v dutině [m/s] pro rychlost proudění na vstupu 0,3 m/s (vytvořeno v programu COMSOL Multiphysics)

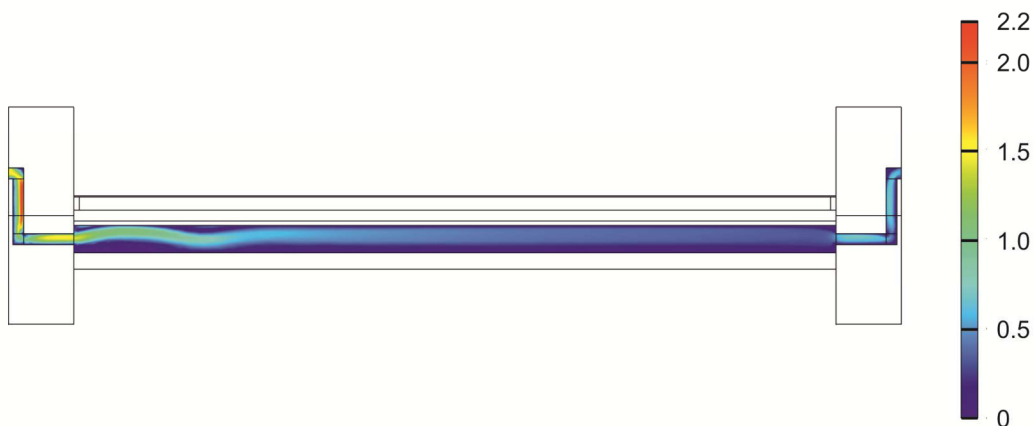
Varianta 2 – průměrná rychlost větru ($v = 3,0$ m/s)

Ve druhém případě byla hodnocena varianta, kde maximální rychlost proudění vzduchu na vstupu je 1,5 m/s, což odpovídá 3,0 m/s rychlosti větru kolmo na fasádu. Tato hodnota přibližně odpovídá průměrné rychlosti větru v ČR. Při této rychlosti větru dochází k výrazné změně obrazu proudění vzduchu a pole teplot. Z výsledků rozložení teplot v dutině (Obr. 64) je patrné, že na rozdíl od předchozí varianty nedochází k dohřátí vzduchu na střední teplotu dutiny před nasátím vzduchu výdechovým otvorem. Sezvyšující se rychlostí proudění vzduchu dochází ke snížení okolních povrchových teplot v koutu podlahy a obvodového zdiva.



Obr. 64 Výsledný průběh teplot v dutině [°C] pro rychlost proudění na vstupu 1,5 m/s (vytvořeno v programu COMSOL Multiphysics)

Z výsledného průběhu rychlosti proudění vzduchu (*Obr. 65*) je zřejmé, že v podlahové vzduchové dutině na straně přívodních otvorů nejsou viditelné kontury rychlosti. V těchto místech dochází ke zpomalení proudu vzduchu pod rychlost 0,001 m/s a mohla by zde hrozit kumulace kondenzátu a jeho namrzání. Z výsledků tedy vyplývá, že dutina je tak navzdory vyšší rychlosti v ploše hůře provětrávána, než v předchozím případě [94].



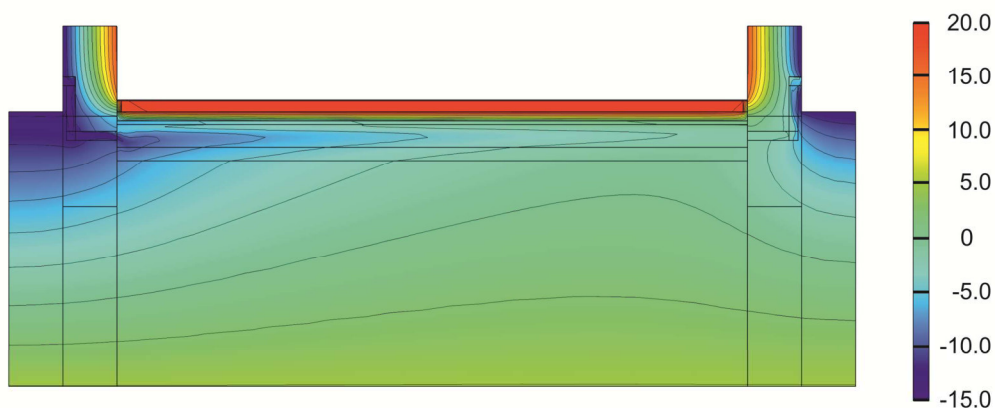
Obr. 65 Výsledný průběh rychlosti proudění vzduchu v dutině [m/s] pro rychlost proudění na vstupu 1,5 m/s (vytvořeno v programu COMSOL Multiphysics)

Varianta 3 – vyšší rychlost větru ($v = 6,0$ m/s)

Pro rychlosti proudění vzduchu na vstupu 3,0 m/s (odpovídá 6,0 m/s rychlosti větru kolmo na fasádu) je obraz teplotních polí a polí rychlosti obdobný jako u předchozích variant a proto již není nutné prezentovat výsledky graficky. Proud vzduchu sice dosahuje vyšších hodnot rychlostí, ale obraz proudění vzduchu se nemění. V případě teplotních polí dochází ke snížení teploty ve vzduchové dutině a tím i k většímu ochlazování okolních konstrukcí.

Varianta 4 – bezvětrí ($v = 0$ m/s)

Výsledky analýzy simulující bezvětrí ukazují, že rychlost proudění v dutině se zvětšuje s klesající teplotou, přičemž nejvyšší rychlosti bude proudění dosahovat v extrémně chladných zimních dnech. Co se týče výsledného průběhu teplot (*Obr. 66*), vzduch v dutině je výrazně teplejší než v předchozích případech, kdy byl uvažován vliv větru. Zde je však třeba uvést, že z hlediska snížení vlhkosti sanovaných konstrukcí (obvodových stěn), které je cílem sanačního opatření, je tato varianta ($v = 0$ m/s) pouze minimálně účinná (lze předpokládat velmi vysokou relativní vlhkost vzduchu v dutině vlivem jeho pomalého proudění).



Obr. 66 Výsledný průběh teplot v dutině [°C] za bezvětrí (vytvořeno v programu COMSOL Multiphysics)

Varianta 5 – nucené větrání (ventilátor)

Pro zajištění dostatečně intenzivního provětrávání dutiny v celé její ploše je doporučena instalace nuceného větrání. Díky tomuto opatření je zajištěno nepřetržité proudění vzduchu i během období, kdy je bezvětrí. Ventilátor může být zapojen nepřetržitě, kdy rychlost proudění vzduchu je konstantní (uvažováno v této numerické simulaci), nebo je možné regulovat rychlost proudění v závislosti na klimatických podmínkách. Ventilátor je možné opatřit snímačem teploty s nastavitelným rozsahem teplot, který bude měřit teplotu vzduchu (a ideálně i relativní vlhkost) v dutině a aktivuje ventilátor, jakmile teplota (vlhkost) překročí nastavenou hodnotu.

Výhodou použití ventilátoru je rychlejší proudění vzduchu v dutině a tím i vyšší účinnost, dochází však (zejména v zimě) ke značnému ochlazení okolních konstrukcí. Z tohoto důvodu musí být věnována zvýšená pozornost dodržení tepelně technických požadavků na podlahové konstrukce [96].

Závěr analýzy proudění vzduchu v podlahové dutině

Výsledky analýzy prokázaly, že je nutné při návrhu vždy provést numerickou analýzu a stanovit tak optimální rychlost proudění vzduchu v dutině, která bude zajištěna buď přirozeným prouděním vzduchu, nebo pomocí ventilátoru (celoročně). Na základě numerických simulací lze tvrdit, že ideálním stavem je pak proudění vzduchu malou konstantní rychlostí, tak aby byly minimální ztráty unikajícího tepla z odváděcích otvorů. Z toho vyplývá, že lze jednoznačně doporučit nucené větrání. Pro odvod vlhkosti je dostačující i velmi pomalé proudění vzduchu. Vzduchová mezera tak umožní odvést vodní páru ještě dřív, než stačí zkondenzovat [94].

5. ZÁVĚR

Cílem předložené disertační práce bylo podrobněji analyzovat účinnost vzduchových izolačních metod z hlediska jejich schopnosti snižovat vlhkost konstrukce spodní stavby v závislosti na různých okrajových podmínkách (např. teplota vzduchu – zimní / letní období, rychlost proudění vzduchu, geometrie konstrukčních opatření a další).

Experimentální výzkum byl rozdělen do tří částí, které spolu velmi úzce souvisí a bez jejichž provedení by nebylo možné stanovit objektivní závěry z provedené analýzy:

- 1) Terénní průzkumy vybraných staveb, u nichž byla aplikována sanační opatření proti pronikání vzdušné vody do spodní stavby pomocí vzduchových izolačních metod.
- 2) Experimenty v laboratorních podmínkách, na kterých byla zkoumána schopnost snižování vlhkosti konstrukce při použití různých typů vzduchových izolačních metod.
- 3) Počítačové simulace - získaná data byla porovnána s výsledky experimentálního měření na laboratorních modelech.

5.1. Závěry z terénních průzkumů

Při průzkumech vybraných staveb, kde byly v rámci rekonstrukce za účelem snížení vlhkosti v konstrukci použity vzduchové izolační sanační metody, bylo zjištěno mnoho zajímavých faktů, týkajících se vad a poruch těchto systémů. Tyto poznatky by měly přispět jak k odstranění nedostatků v úrovni návrhu sanace pomocí vzduchových izolačních metod, tak i v úrovni provádění, neboť čím více bude známo o podstatě a příčinách poruch, tím účinněji jim bude možné zabránit vhodnými konstrukčními opatřeními. Základní poznatky z terénních průzkumů jsou shrnuty v následujících bodech:

- U většiny zkoumaných staveb dosahovaly naměřené hodnoty vlhkosti vysokých hodnot, které nesplňují požadavky z hlediska ČSN P 73 0610, tzn. účinnost instalovaných sanačních opatření nebyla dostatečná.
- Vzduchová dutina je často nevhodně navržená, zejména co se týká jejího tvaru a velikosti, počtu a umístění nasávacích a výdechových otvorů, kdy jsou často mezi těmito otvory příliš dlouhé vzdálenosti. Důsledkem je nedostatečná rychlost proudění vzduchu v dutinách a tím i omezená účinnost celého systému. Tyto nedostatky jsou většinou důsledkem návrhu na základě empirie a zkušeností a ve většině případů by se jim dalo předejít použitím numerických simulací.
- Špatná údržba výdechových otvorů vzduchové dutiny je rovněž častou příčinou nefunkčnosti celého systému.

5.2. Závěry z laboratorních zkoušek

Jedním z hlavních cílů práce bylo provedení a vyhodnocení experimentů v laboratorních podmínkách a ověření závěrů z těchto experimentů pomocí numerických simulací provedených v programu WUFI 2D. Vliv vodorozpustných solí nebyl v této analýze zahrnut. V následujících bodech jsou shrnuty závěry z jednotlivých laboratorních zkoušek.

5.2.1. Podélná provětrávaná jednostranná vzduchová dutina (exteriérová)

Cílem laboratorního experimentu byla analýza účinnosti podélné provětrávané vzduchové dutiny z hlediska snížení vlhkosti cihelného zdiva. Pro objektivní zhodnocení účinnosti byly zhotoveny dva laboratorní modely (referenční model bez sanačního opatření a totožný model s aplikovanou exteriérovou vzduchovou dutinou), které byly vystaveny stejným okrajovým podmínkám.

Z výsledků laboratorních zkoušek vyplývá, že vlhkost zdiva u modelu s větranou dutinou se snížila průměrně o 51 % (poměrově) v porovnání s referenčním modelem při rychlosti proudění vzduchu v dutině 0,05 m/s, což podle stupnice ČSN 73 0610 znamená snížení hmotnostní vlhkosti o 4,9 %. Při zajištění proudění vzduchu je dané technické řešení vzduchové dutiny účinné, což potvrdily i výsledky numerické simulace (WUFI 2D).

5.2.2. Podélná provětrávaná oboustranná vzduchová dutina

V této experimentální studii byla analyzována účinnost oboustranné provětrávané vzduchové dutiny z hlediska snížení obsahu vody v cihelném zdivu. Pro vzájemnou komparaci byl zhotoven referenční laboratorní model (bez dutin) a model s oboustrannou vzduchovou dutinou. Simulaci přirozeného proudění vzduchu zajišťoval upravený ventilátor s výrazně sníženým výkonem.

Vlhkost zdiva u laboratorního modelu s oboustrannou vzduchovou dutinou se po 10ti měsících, během kterých probíhalo měření, snížila průměrně o 58 % (poměrově) v komparaci s referenčním modelem, při rychlosti proudění vzduchu v dutinách 0,05 m/s. Podle stupnice ČSN 73 0610 tato hodnota snížení hmotnostní vlhkosti o 5,6 %.

Výsledky numerické simulace (WUFI 2D) prokázaly shodu z daty získanými laboratorním měřením.

Zhodnocení účinnosti exteriérové a oboustranné provětrávané vzduchové dutiny

Naměřené hodnoty vlhkosti se sice v případě oboustranné dutiny oproti variantě s exteriérovou vzduchovou dutinou snížily. Z výsledků numerické simulace je ale zřejmé, pokud by byly pro vyhodnocení laboratorního experimentu použity delší měřicí sondy, zasahující hlouběji do modelu konstrukce, tak by uprostřed experimentálního zdiva byly pravděpodobně naměřeny vyšší hodnoty vlhkosti než v tomto případě, kdy hloubka kartáčové sondy dosahovala přibližně do 1/3 šířky zdiva, kde již vlivem vzduchové dutiny docházelo k vysoušení zdiva.

Z porovnání účinnosti exteriérové a oboustranné provětrávané vzduchové dutiny z hlediska snížení vlhkosti zdiva vyplývá, že v tomto případě při dané tloušťce odvlhčovaného zdiva byla míra poklesu vlhkosti uprostřed struktury zdiva téměř totožná. U modelu s oboustrannou vzduchovou dutinou došlo uprostřed pilíře k nepatrnému snížení obsahu vody oproti modelu s jednostrannou exteriérovou dutinou.

5.2.3. Profilovaná (nopová) fólie

V experimentální studii byla prověřována účinnost profilované (nopové) fólie z hlediska jejího vlivu na snížení vlhkosti cihelného zdiva. Jde o častý případ sanace, kdy je nopová fólie umístěna z venkovní strany odvlhčované stěny pod úroveň terénu. Pro objektivní zhodnocení účinnosti byly zhotoveny dva laboratorní modely (referenční model bez sanačního opatření a totožný model s aplikovanou nopovou fólií), které byly vystaveny shodným okrajovým podmínkám.

Na základě výsledků laboratorní zkoušky lze konstatovat, že účinnost tohoto sanačního opatření je z hlediska jeho vlivu na snížení množství vody vztlínající svislým směrem od základové spáry značně omezená. Z naměřených hodnot hmotnostní vlhkosti zdiva je patrný podobný pokles vlhkosti v důsledku odpařování vody ze zdiva u obou modelů. V porovnání s referenčním modelem však došlo ke snížení vlhkosti v cihelném bloku opatřeném nopovou fólií komparativně v průměru o 8 % (poměrově), což podle stupnice ČSN 73 0610 znamená snížení o pouhých 0,9 % hmotnostní vlhkosti.

Laboratorní model svým konstrukčním řešením kopíroval fyzikální model použitý pro výpočtový model. Výsledky měření v laboratoři i výsledky teoretického výpočtu (WUFI 2D) byly v podstatě shodné. Výsledky získané pomocí numerické simulace tak potvrdily závěry z experimentálního měření.

Podle údajů z technických listů výrobců je nopová fólie údajně vhodná „k odstranění vlhkosti ze stěn objektu a umožňuje i cirkulaci vzduchu“. Výsledky provedené analýzy ale ukázaly, že vlhkost zdiva s nopovou fólií se snížila jen nepatrně oproti referenčnímu vzorku. Bez zajištění přívodu a odtahu vzduchu a zejména potom s přihlédnutím ke skutečnosti, že dutina vytvořená nopovou fólií je příliš úzká vzhledem k její výšce, zde k cirkulaci vzduchu prakticky nedochází. Výsledky tak potvrdily logický předpoklad diskutabilní účinnosti nopové fólie, vycházející z výše uvedených faktů. Nopová fólie je vhodná pouze jako ochrana proti vodě vnikající do zdiva z boků, nikoliv však proti vodě vztlínající svisle z nižších poloh.

5.3. Závěry z numerické simulace – analýza proudění vzduchu v podlahové dutině

Na softwarovém modelu zpracovaném v programu COMSOL Multiphysics byla analyzována účinnost technického řešení provětrávané podlahy jako dalšího typu vzduchové izolační sanační metody proti vodě vztlínající z podzákladí.

Výsledky analýzy prokázaly, že je nutné při návrhu vždy provést numerickou analýzu účinnosti konkrétní instalace a stanovit tak optimální rychlost proudění vzduchu v dutině, která bude zajištěna buď přirozeným prouděním vzduchu, nebo pomocí ventilátoru.

Na základě výsledků numerických simulací lze konstatovat závěr, že ideálním stavem je konstantní proudění vzduchu malou rychlostí tak, aby byly minimální ztráty unikajícího tepla z odváděcích otvorů, protože pro dostatečně intenzivní odvod vlhkého vzduchu je dostačující i velmi pomalé proudění. Základním principem je, aby vzduchová mezera umožnila odvést vodní páru dříve, než stačí zkondenzovat, ale současně tak, aby byly minimalizovány tepelné ztráty.

5.4. Hlavní závěry disertační práce

Na základě poznatků vyplývajících z provedené analýzy vzduchových izolačních metod lze říci, že účinnost přirozeně větraných vzduchových dutin je poměrně nízká. V současnosti jsou vzduchové dutiny většinou navrhovány pouze na základě zkušeností, bez podrobné analýzy s využitím komplexních moderních softwarových nástrojů. Proudění vzduchu v provětrávaných vzduchových dutinách je ve většině případů navrhováno pouze přirozeným způsobem. Výsledky z terénních průzkumů na reálných objektech i softwarové modely však prokázaly, že v naprosté většině analyzovaných případů proudění vzduchu zajištěné přirozeným způsobem nebylo dostatečně efektivní, a tím nedocházelo k požadovanému sanačnímu účinku na vlhké konstrukce.

Vzduchové dutiny jsou vlivem nevhodného návrhu a případně i dalších výše zmíněných problémů často nefunkční. Proto by měl být návrh každého sanačního opatření vždy doplněn kvalitním softwarovým modelem, ze kterého lze zjistit podmínky pro zajištění správné funkce navrženého opatření a dopředu odhalit případná slabá místa v návrhu.

Na základě výsledků analýz provedených v rámci disertační práce je možné jednoznačně stanovit obecný závěr, že pro naprostou většinu instalací vzduchových izolačních metod je vhodné použití nuceného větrání pro zajištění proudění vzduchu v dutinách. Instalací nuceného větrání výrazně klesá riziko nedostatečné účinnosti sanačního opatření v porovnání se spoléháním se na přirozené proudění vzduchu. Propojením instalovaného ventilátoru s řídicí jednotkou je rovněž možné dosáhnout autonomní regulace proudění vzduchu v dutině v závislosti na měnících se klimatických podmínkách tak, aby byla zajištěna maximální účinnost systému jako celku. Zároveň jsou tím významně snížena rizika kondenzace uvnitř dutiny v zimním období, kdy může být proudění studeného vzduchu v dutině kontraproduktivní. Použití ventilátoru také umožňuje větší variabilitu umístění nasávacích otvorů. Vhodné umístění nasávacích a výdechových otvorů a geometrické uspořádání vzduchové dutiny by mělo vždy vyplývat z výsledků předem provedené softwarové simulace. Ventilátor lze za účelem zvýšení efektivnosti již stávajícího sanačního opatření umístit i dodatečně do stávajících vzduchových dutin

Řešená problematika je značně rozsáhlá a předložená disertační práce ji zdaleka nevyčerpává. Autorka předložené disertační práce si je vědoma širě zkoumané problematiky, a proto je tato práce částečně koncipována i jako výchozí podklad pro další předpokládaný výzkum v této oblasti.

6. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] BALÍK, Michael a Jaroslav SOLAŘ. *100 tradičních stavebních detailů: ochrana proti vodě*. 1. vyd. Praha: Grada. 2011, 219 s. Stavitel. ISBN 978-80-247-3656-3.
- [2] KÜNZEL, Hartwig M. *Simultaneous heat and moisture transport in building components: one- and two-dimensional calculation using simple parameters*. Stuttgart: IRB Verlag. 1995, 102 p. ISBN 38-167-4103-7.
- [3] SÝKORA, Jan, Tomáš KREJČÍ, Jaroslav KRUIS a Michal ŠEJNOHA. Computational homogenization of non-stationary transport processes in masonry structures. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 2012, 236(18), 4745-4755. DOI: 10.1016/j.cam.2012.02.031. ISSN 03770427.
- [4] LARSEN, Poul Klens. Determination of Water Content in Brick Masonry Walls using a Dielectric Probe. *Journal of Architectural Conservation*. 2012, 18(1), 47-62. DOI: 10.1080/13556207.2012.10785103. ISSN 1355-6207.
- [5] HETTMANN, Dietmar. Zur Beeinflussung des Feuchte und Salzgehaltes in Mauerwerk. *Bautenschutz und Bausanierung*. 1993, 16(5), p. 72-75.
- [6] D'AGOSTINO, Delia, Tomáš KREJČÍ, Jaroslav KRUIS a Michal ŠEJNOHA. Moisture dynamics in an historical masonry structure: The Cathedral of Lecce (South Italy). *Building and Environment*. 2013, 63(18), 122-133. DOI: 10.1016/j.buildenv.2013.02.008. ISSN 03601323.
- [7] WITZANY, Jiří a Radek ZIGLER. Failure mechanism of compressed reinforced and non-reinforced stone columns. *Materials and Structures*. 2015, 48(5), 1603-1613. DOI: 10.1617/s11527-014-0257-z. ISSN 1359-5997.
- [8] HAN, Bing a Tao WANG. Influence of water content on brick masonry's shear strength. *Journal of Beijing Jiaotong University*. 2011, 35(1), 1-5.
- [9] WASSERBAUER, Richard. Bakterie a plísně v pórovém systému vlhkých stavebních materiálů. *Stavební obzor*. 2010, 1, s. 9-12.
- [10] BALÍK, Michael a kolektiv. *Odvhlčování staveb*. Praha: Vydavatelství Grada Publishing, a.s. 2008, 312 s. ISBN 978-80-247-2693-9.
- [11] ČSN P 73 0610. *Hydroizolace staveb: Sanace vlhkého zdiva - Základní ustanovení*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [12] ŠUHAJDA, Karel. *Sanace vlhkého zdiva staveb - Využití tyčové antény při mikrovlnném vysoušení zdiva*. PhD thesis, VUT Brno, 2006.

- [13] MRLÍK, František. *Vlhkostné problémy stavebných materiálů a konstrukcí*. Bratislava: Alfa, 1985. Edícia stavebníckej literatúry (Alfa).
- [14] BENEŠ, Petr. *Sanace a adaptace budov*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2007.
- [15] BALÍK, Michael. *Vysušování zdiva*. Vyd. 1. Praha: Grada. 1997, 113 s., 12 s. barevných obrazových příloh. Profi. ISBN 80-716-9440-1.
- [16] WTA – vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky. *Směrnice*. Praha : ÚIV – divize nakladatelství TAURIS. 2005. ISBN 80-02-01741-2.
- [17] VLČEK, Milan. *Poruchy a rekonstrukce staveb*. 3. vyd. Brno: ERA, 2006, 222 s. Technická knihovna (ERA). ISBN 80-736-6073-3.
- [18] ZHANG, Zhongyi. *A Review of Rising Damp in Masonry Buildings: Advanced Polymer and Composites (APC) Research Group*. Portsmouth, Hampshire, UK. PhD Thesis. University of Portsmouth.
- [19] HEJHÁLEK, J. Stavebnictví 3000, 2001-2013.
Dostupné na: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/principy-vzlinani-kapalin/>.
- [20] SUN, H., G. LAURIAT a X. NICOLAS. Natural convection and wall condensation or evaporation in humid air-filled cavities subjected to wall temperature variations. *International Journal of Thermal Sciences*. 2011, 50(5), 663-679. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2010.12.010. ISSN 12900729.
- [21] ČUPROVÁ, Danuše. *Tepelná technika budov*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Teoretické základy stavební tepelné techniky.
- [22] SOLAŘ, Jaroslav. *Odstraňování vlhkosti*. Praha: Vydavatelství Grada Publishing, a.s.. 2013. 101s. ISBN 978-80-247-4708-8.
- [23] LOPEZ-ARCE, P., E. DOEHNE, J. GREENSHIELDS, D. BENAVENTE a D. YOUNG. Treatment of rising damp and salt decay: the historic masonry buildings of Adelaide, South Australia. *Materials and Structures*. 2009, 42(6), 827-848. DOI: 10.1617/s11527-008-9427-1. ISSN 1359-5997.
- [24] DAVID YOUNG, Frank a [DRAWINGS BY DONALD ELLSMORE]. *Salt attack and rising damp: a guide to salt damp in historic and older buildings*. [2nd ed.]. Australia: Heritage Council of NSW, Heritage Victoria, South Australian Department for Environment and Heritage, Adelaide City Council. 2008, 277 s. ISBN 978-098-0512-649.
- [25] THOMAS, A.R. *Treatment of damp in old buildings*. Technical Pamphlet 8. London: Society for the protection of ancient buildings, 1992.

- [26] TROTMAN, Peter. BRE Digest 245 (Building Research Establishment). *Rising damp in walls: diagnosis and treatment*. Watford: IHS BRE Press. 2007. 12s.
- [27] FÁRA, Pavel. *Sanace vlhkého zdiva*. Praha : Společnost pro technologie ochrany památek. 2003.82s. ISBN 80-86657-02-7.
- [28] PAZDERKA, Jiří a Eva HÁJKOVÁ. Analysis of moisture in masonry. *Building Engineer*. 2014, 89(9), 20-24. ISSN 0969-8213. Scopus 2-s2.0-84916933495.
- [29] PAZDERKA, Jiří a Eva HÁJKOVÁ. Použití odporové metody ke stanovení vlhkosti zdiva historických budov. *Stavební obzor*. 2014, 23 (5-6), 89-94. ISSN 1805-2576.
- [30] KLEČKA, Tomáš. *Metody pruzkumu vlhkých staveb*, WTA CZ, Prague, 2007.
- [31] BOMBERG, Mark a Heinz R. TRECHSEL. *Moisture Control in Buildings: The Key Factor in Mold Prevention*. 2nd Edition. Baltimore,U.S.A.: ASTM International, 2009. 2nd. ISBN 978-0-8031-7004-9.
- [32] TORRES, M.I.M. a V.P. DE FREITAS. *Rising damp in historical buildings, Research in building physics: proceedings of the 2nd International Conference on Building Physics, Leuven, 14-18 September 2003, Antwerpen, Belgium*. Exton, PA: A.A. Balkema Publishers, 2003, s. 369–375. ISBN 9058095657.
- [33] DE FREITAS, V.P., V. ABRANTES a P. CRAUSSE. Moisture Migration in Building Walls - Analysis of the Interface Phenomena. *Building and Environment*. Great Britain: Pergamon. 1996, 31(2), 99-108. ISSN 0360-1323(95)00027-5.
- [34] DOS SANTOS, E.D., G.L. PICCOLI, F.H.R. FRANÇA a A.P. PETRY. Analysis of mixed convection in transient laminar and turbulent flows in driven cavities: measurements of airflow inside air gaps of walls. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2011, 54(21-22), 4585-4595.
DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.06.019. ISSN 00179310.
- [35] ARCE, J., J. XAMÁN a G. ÁLVAREZ. Numerical study of mixed convection and conduction in a 2-D square ventilated cavity with an inlet at the vertical glazing wall and outlet at the top surface. *Heat and Mass Transfer*. 2011, 47(2), 223-236.
DOI: 10.1007/s00231-010-0706-3. ISSN 0947-7411.
- [36] SERRANO-ARELLANO, J., M. GIJÓN-RIVERA, J.M. RIESCO-ÁVILA, J. XAMÁN a G. ÁLVAREZ. Numerical investigation of transient heat and mass transfer by natural convection in a ventilated cavity: Outlet air gap located close to heat source. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014, 76, 268-278.
DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.04.055. ISSN 00179310.

- [37] ANA SOFIA GUIMARÃES TEIXEIRA, J. M. P. Q. DELGADO a VASCO PEIXOTO DE FREITAS. *Wall Base Ventilation Systems Design to the Treatment of Rising Damp in Historical Buildings*. Neue Ausg. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing. 2012. ISBN 978-365-9158-834.
- [38] BURGETOVÁ, Eva a Robert MATĚJČEK. Návrh sanácie vlhkého muriva kostola sv. Jiljí v Milevsku. *ASB.sk: odborný stavebný portál*. 2008. Dostupné z: <http://www.asb.sk/stavebnictvo/rekonstrukcia/navrh-sanacie-vlhkeho-muriva-kostola-sv.-jilji-vmilevsku>.
- [39] DOHNAL, Miloslav a Jiří JURKA. Měření proudění vzduchu v podlahové dutině. In: *STRUCTURA: Stavební trendy 2013*. Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA Fakulta stavební. 2013, s. 39-42. ISBN 978-80-248-3235-7.
- [40] RENČKO, Tomáš a Anna SEDLÁKOVÁ. Rozmiestnenie vetracích otvorov pre realizáciu podpodlahových vzduchových dutín vytvorených pomocou špeciálnych tvaroviek. In: *STRUCTURA: Stavební trendy 2013*. Ostrava: VŠB-TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA Fakulta stavební. 2013, s. 183-188. ISBN 978-80-248-3235-7.
- [41] BURGETOVÁ, Eva. Sanace historického zdiva pivovaru. *Realizace staveb*. 2007, 3(6), 38-39. ISSN 1802-0631.
- [42] GUIMARÃES, Ana Sofia a Vasco Peixoto DE FREITAS. Wall base ventilation system as a new technique to treat rising damp in existent buildings. *Journal of Building Appraisal*. 2009, 5(2), 187-195. DOI: 10.1057/jba.2009.29. ISSN 1742-8262.
- [43] BALÍK, Michael. Vysušování zdiva vzduchovými systémy: sanace obvodových zdí a obnova fasád. *Stavebnictví*. Brno: EXPO DATA spol. s.r.o., 2009, 3(10), 37-43. ISSN 1802-2030.
- [44] FRÖSSEL, Frank. *Masonry drying and cellar rehabilitation*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. 2007, 277 s. ISBN 978-3-8167-6269-0.
- [45] GUIMARÃES, A.S. a J.M.P.Q. DELGADO. Building Pathology and Rehabilitation Techniques – A Rising Damp Treatment Catalogue: The influence of the size of the channels. In: *Defect and Diffusion Forum*. 2015, 365(2), s. 291-296. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.365.291. ISSN 1662-9507.
- [46] KLEČKA, Tomáš. *Diagnostika vlhkých staveb*. Vyd. 2. Praha: Česká stavební společnost. 2003, 123 s. ISBN 80-020-1537-1.
- [47] VLČEK, M. a J. MOHELNÍKOVÁ. Pravidla sanace vlhkosti vzduchovými dutinami. In: *Sanace Budov 2006*. 1. Hradec Králové: Stavokonsult. 2006, s. 25-30.

- [48] FRANZONI, Elisa. State-of-the-art on methods for reducing rising damp in masonry. *Journal of Cultural Heritage*. 2018, 31, p. S3-S9. DOI: 10.1016/j.culher.2018.04.001.
- [49] GUIMARÃES, A.S., J.M.P.Q. DELGADO a V.P. DE FREITAS. Numerical Simulation of Rising Damp Phenomenon: The influence of the size of the channels. In: *Defect and Diffusion Forum*. 2012, 326-328(2), s. 48-53. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.326-328.48. ISSN 1662-9507.
- [50] GUIMARÃES, A.S., J. M. P. Q. DELGADO a V.P. DE FREITAS. *Hygrothermal behavior, building pathology and durability: Degradation Control of Historical Walls with Rising Damp Problems*. 1. Berlin: Springer. 2013, s. 113-140. Building pathology and rehabilitation, v.1. ISBN 3642311571.
- [51] GUIMARÃES, A.S., J.M.P.Q. DELGADO a V.P. DE FREITAS. Degradation Control of Walls with Rising Damp Problems: Optimization of the Wall Base Ventilation System. In: *Defect and Diffusion Forum*. 2013, 334-335(2), s. 31-36. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.334-335.31. ISSN 1662-9507.
- [52] GUIMARAES, A. S., J. M. DELGADO a V. P. DE FREITAS. Rising damp in walls: Evaluation of the level achieved by the damp front. *Journal of Building Physics*. 2013, 37(1), 6-27. DOI: 10.1177/1744259112453822. ISSN 1744-2591.
- [53] GUIMARÃES, A.S., J.M.P.Q. DELGADO a V.P. DE FREITAS. Rising Damp: Optimization of the Wall Base Ventilation System. In: *Defect and Diffusion Forum*. 2014, 353(2), s. 311-316. DOI: 10.4028/www.scientific.net/DDF.353.311. ISSN 1662-9507.
- [54] KALOUSEK, Miloš a Ondřej ŠIKULA. CFD simulation of ventilated air cavity. *Conference: Building Simulation and Environmental Engineering 2008*. University of Technology , Brno. 2008. DOI: 10.13140/2.1.2087.8408.
- [55] GNOTH, Steffen, Frank HANSEL, Peter HÄUPL a Heiko FECHNER. Aero-hygrothermisches Verhalten von Umfassungskonstruktionen mit Hohlräumen. *Bauphysik*. 2008, 30(6), 380-388. DOI: 10.1002/bapi.200810049. ISSN 01715445.
- [56] BALOCCO, Carla a Giuseppe GRAZZINI. Numerical simulation of ancient natural ventilation systems of historical buildings. A case study in Palermo: the origin, evolution, and impact of doi moi. In: *Journal of Cultural Heritage*. 2009, 10(2), s. 313-318. DOI: 10.1016/j.culher.2008.03.008. ISSN 12962074.
- [57] TAZKY, Ladislav, Anna SEDLAKOVA a G. ÁLVAREZ. Design of the Ventilated Air Channel to Resolve Moisture Problems in the Historical Church. *Energy Procedia*. 2015, 78(11), 1323-1328. DOI: 10.1016/j.egypro.2015.11.148. ISSN 18766102.

- [58] RENČKO, Tomáš a Anna SEDLÁKOVÁ. Assessment of underfloor ventilation of historic buildings using ANSYS CFX. *Budownictwo o zoptymalizowanym potencjale energetycznym*. Krakow. 2011,1(11), 98-106. ISSN 2299-8535.
- [59] GUIMARÃES, A.S., J.M.P.Q. DELGADO a V.P. DE FREITAS. Mathematical analysis of the evaporative process of a new technological treatment of rising damp in historic buildings. In: *Building and Environment*. 2010, 45(11), s. 2414-2420. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.05.007. ISSN 03601323.
- [60] TORRES, Isabel a Vasco Peixoto de FREITAS. The influence of the thickness of the walls and their properties on the treatment of rising damp in historic buildings. In: *Construction and Building Materials*. 2010, 24(8), s. 1331-1339. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.01.004. ISSN 09500618.
- [61] TORRES, Isabel M. Wall base ventilation system to treat rising damp: The influence of the size of the channels. In: *Journal of Cultural Heritage*. 2014, 15(2), s. 121-127. DOI: 10.1016/j.culher.2013.03.005. ISSN 12962074.
- [62] YIN, S.H., T.Y. WUNG a K. CHEN. Natural convection in an air layer enclosed within rectangular cavities. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1978, 21(3), 307-315. DOI: 10.1016/0017-9310(78)90123-0. ISSN 00179310.
- [63] MCBAIN, G.D. Natural convection with unsaturated humid air in vertical cavities. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1997, 40(13), 3005-3012. DOI: 10.1016/S0017-9310(96)00371-7. ISSN 00179310.
- [64] LIU, Di, Fu-Yun ZHAO a Han-Qing WANG. Passive heat and moisture removal from a natural vented enclosure with a massive wall: measurements of airflow inside air gaps of walls. *Energy*. 2011, 36(5), 2867-2882. DOI: 10.1016/j.energy.2011.02.029. ISSN 03605442.
- [65] RAITHBY, G. D. a H. H. WONG. HEAT TRANSFER BY NATURAL CONVECTION ACROSS VERTICAL AIR LAYERS. *Numerical Heat Transfer*. 2007, 4(4), 447-457. DOI: 10.1080/01495728108961803. ISSN 0149-5720.
- [66] ODEWOLE, Gboyega Akindeji. *Airflow Patterns in Ventilated Wall Cavities*. Manchester, UK: The University of Manchester. 2011. PhD Thesis. The University of Manchester. Vedoucí práce Rodger Edwards.
- [67] JURÁKOVÁ, T. a M. VLČEK. Proudění vzduchu ve svíslé otevřené vzduchové mezeře používané při sanacích staveb. In: *Sanace a rekonstrukce staveb 2001*. 1. Praha: Česká stavební společnost, WTA CZ. 2001, s. 165-170. ISBN 80-02-01433-2.
- [68] WITZANY, Jiří. *PDR - poruchy, degradace a rekonstrukce*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické. 2010, 458 s. ISBN 978-80-01-04488-9.

- [69] VLČEK, Milan. *Sanace vlhkého zdiva*. Vyd. 1. Praha: Česká stavební společnost. 2000, 107 s. ISBN 80-020-1367-0.
- [70] KUPILÍK, Václav. Optimální volba sanační metody u objektů zasažených vlhkostí
Zdroj: <http://stavba.tzb-info.cz/regenerace-domu/10672-optimalni-volba-sanacni-metody-u-objektu-zasazenych-vlhkosti-2-cast>. In: *Tzb-info* [online]. 2013. Dostupné z: <http://stavba.tzb-info.cz/regenerace-domu/10672-optimalni-volba-sanacni-metody-u-objektu-zasazenych-vlhkosti-2-cast>.
- [71] BCA – Volume 2. *Building Code of Australia: Volume Two*. 2. vyd. Canberra: Commonwealth and States and Territories of Australia, 1996.
- [72] HÁJKOVÁ, Eva a Jiří PAZDERKA. Efficiency of air ducts in historical buildings. *Building Engineer*. 2015, 90 (9), 22-25. ISSN 0969-8213. Scopus 2-s2.0-84955616862.
- [73] HÁJKOVÁ, Eva a Jiří PAZDERKA. Vyhodnocení účinnosti provětrávaných dutin realizovaných u historické budovy porodnice U Apolináře. *Vytápění, větrání, instalace*. 2016, 25 (1), 30-34. ISSN 1210-1389. Scopus 2-s2.0-84957705191.
- [74] PAZDERKA, Jiří a Radek ZIGLER. The improvement of the “metal sheets” waterproofing method as a contribution to sustainable building. *Building engineer*. 2014, 89(1), 20-23. ISSN 0969-8213.
- [75] PIAIA, Julio Cesar Zanchet, Malik CHERIAF, Janaíde Cavalcante ROCHA a Niubis Luperont MUSTELIER. Measurements of water penetration and leakage in masonry wall: Experimental results and numerical simulation. *Building and Environment*. 2013, 61(8), 18-26. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.11.017. ISSN 03601323.
- [76] JANSSEN, H., H. DERLUYN a J. CARMELIET. Moisture transfer through mortar joints: A sharp-front analysis. *Cement and Concrete Research*. 2012, 42(8), 1105-1112. DOI: 10.1016/j.cemconres.2012.05.004. ISSN 00088846.
- [77] PAZDERKA, Jiří a Eva HÁJKOVÁ. Support from the research project registration number SGS13/110/OHK1/2T/11, CTU in Prague, 2014.
- [78] PAZDERKA, Jiří a Eva HÁJKOVÁ. Analysis of moisture in masonry. *Building engineer*. 2014, 89(9), 20-24. ISSN 0969-8213. Scopus 2-s2.0-84916933495.
- [79] BELMILOUD, Mohamed Amine, Nord-eddine Sad CHEMLOUL a G. ÁLVAREZ. Effect of baffle number on mixed convection within a ventilated cavity. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015, 29(11), 4719-4727. DOI: 10.1007/s12206-015-1019-8. ISSN 1738-494x.

- [80] EN ISO 10456. *Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values*. European Committee for Standardization, Brussels, 2007.
- [81] EN ISO 12571. *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of hygroscopic sorption properties*. European Committee for Standardization, Brussels, 2013.
- [82] EN ISO 12572. *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties*. European Committee for Standardization, Brussels, 2001.
- [83] EN ISO 15148. *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water absorption coefficient by partial immersion*. European Committee for Standardization, Brussels, 2002.
- [84] PAZDERKA, Jiří. *Provětrávaná štola pro sanaci budov zatížených vzlínající vlhkostí*. 2013. CZ25990 (U1) Uděleno 30.10.2013. Zapsáno 21.10.2013.
- [85] PAZDERKA, Jiří, Eva HÁJKOVÁ a Martin JIRÁNEK. Underground air duct to control rising moisture in historic buildings: Improved design and its drying efficiency. *Acta Polytechnica*. 2017, 57(5), 331-339. ISSN 1210-2709. WoS 000418522700004.
- [86] DE VRIES, D.A. The theory of heat and moisture transfer in porous media revisited. *Journal of Heat and Mass Transfer*. 1987, 30(7), 1343-50. DOI: 10.1016/0017-9310(87)90166-9.
- [87] BOMBERG, A. *Moisture flow through porous building materials*. Dissertation, University of Lund, Sweden, 1974.
- [88] LUIKOV, A.V. Systems of differential equations of heat and mass transfer in capillary – porous bodies. *Journal of Heat and Mass Transfer*. 1975, 18(1-A), 1-14. DOI:10.1016/0017-9310(75)90002-2.
- [89] HOLM, A a KÜNZEL, Hartwig M. Two-dimensional transient heat and moisture simulations of rising damp with WUFI-2D. *Proceedings of 2nd International Conference on Building Physics*, Leuven, Belgium: 2003. p.363–367.
- [90] KRUS, M. *Moisture transport and storage coefficients of porous mineral building materials. Theoretical principles and new test methods*. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, Germany, 1996.

- [91] HÁJKOVÁ, Eva. *Experimental Analysis of Efficiency of Profiled Dimpled Membranes in Terms of Wall Moisture Reduction*. *Experimental Stress Analysis* 2017. Košice: Technical University of Kosice, 2017. p. 322-328. ISBN 978-80-553-3167-6.
- [92] GUTTA [online]. 2018 [cit. 2018-12-10]. Dostupné z WWW: <https://www.guttashop.cz/spodni-stavba/nopove-folie/>
- [93] PAZDERKA, Jiří. *Provětrávaná podlaha*. 2014. 27462 Užitiný vzor. Zapsáno 10. 11. 2014.
- [94] PAZDERKA, Jiří, Eva HÁJKOVÁ. Protection against rising moisture by means of double floors from concrete elements. *Building Engineer*. 2016, 91(11), 20-24. ISSN 0969-8213. Scopus 2-s2.0-85009957541.
- [95] ČSN 73 0540 - 3. *Tepelná ochrana budov – Část 3: Návrhové hodnoty veličin*. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [96] ČSN 73 0540 – 2. *Tepelná ochrana budov - Část 2: Požadavky*. Praha: Český normalizační institut, 2011.

7. PUBLIKAČNÍ ČINNOST AUTORA

PAZDERKA, J., HÁJKOVÁ, E., JIRÁNEK, M.: Underground air duct to control rising moisture in historic buildings: Improved design and its drying efficiency. *Acta Polytechnica*. 2017, **57**(5), 331-339. ISSN 1210-2709. Scopus: 2-s2.0-85033404592, WoS: 000418522700004.

HÁJKOVÁ, E.: Experimental Analysis of Efficiency of Profiled Dimpled Membranes in Terms of Wall Moisture Reduction. *In: Sborník anotací - Experimental Stress Analysis 2017. Košice: Technical University of Kosice, 2017. pp. 322-328. ISBN 978-80-553-3167-6. Scopus: 2-s2.0-85026295844.*

HÁJKOVÁ, E.: Nové technické řešení provětrávané vzduchové dutiny a jeho účinnost. *In: Juniorstav 2017, 19. odborná konference doktorského studia. Sborník abstraktů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2017. pp. 30. ISBN 978-80-214-5462-0.*

PAZDERKA, J., HÁJKOVÁ, E.: The speed of the crystalline admixture's waterproofing effect in concrete. *In: Special Concrete and Composites 2016. Curich: Trans Tech Publications, 2017. pp. 108-112. Key Engineering Materials. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-0357-1079-3. Scopus: 2-s2.0-85009742442.*

PAZDERKA, J., HÁJKOVÁ, E.: Protection against rising moisture by means of double floors from concrete elements. *Building Engineer*. 2016, 91(11), 20-24. ISSN 0969-8213. Scopus: 2-s2.0-85009957541.

PAZDERKA, J., HÁJKOVÁ, E.: Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete. *Acta Polytechnica*. 2016, 56(4), 291-300. ISSN 1210-2709. Scopus: 2-s2.0-84986199941, WoS: 000411580000006.

PAZDERKA, J., HÁJKOVÁ, E.: Ventilated underground tunnel as a contribution for sustainable refurbishment of buildings affected by rising moisture. *In: Central Europe towards Sustainable Building 2016 - Innovations for Sustainable Future. Praha: GRADA PUBLISHING, 2016. pp. 253-260. 1st edition, Prague, June 2016, Complete edition - printed version + Flash disk with full paper version. ISBN 978-80-271-0248-8. Scopus: 2-s2.0-84986914868.*

HÁJKOVÁ, E., PAZDERKA, J.: Air ducts as an additional protection of buildings against moisture - is it sustainable solution? *In: Central Europe towards Sustainable Building 2016 - Innovations for Sustainable Future. Praha: GRADA PUBLISHING, 2016. pp. 110-117. 1st edition, Prague, June 2016, Complete edition - printed version + Flash disk with full paper version. ISBN 978-80-271-0248-8. Scopus: 2-s2.0-84986882891.*

HÁJKOVÁ, E., PAZDERKA, J.: Vyhodnocení účinnosti provětrávaných dutin realizovaných u historické budovy porodnice U Apolináře. *Vytápění, větrání, instalace*. 2016, 25(1), 30-34. ISSN 1210-1389. Scopus: 2-s2.0-84957705191.

HÁJKOVÁ, E., PAZDERKA, J.: Efficiency of air ducts in historical buildings. *Building Engineer*. 2015, 90(9), 22-25. ISSN 0969-8213. Scopus: 2-s2.0-84955616862.

PAZDERKA, J., HÁJKOVÁ, E.: Analysis of moisture in masonry. *Building Engineer*. 2014, 89(9), 20-24. ISSN 0969-8213. Scopus: 2-s2.0-84916933495.

PAZDERKA, J., HÁJKOVÁ, E.: Použití odporové metody ke stanovení vlhkosti zdiva historických budov. *Stavební obzor*. 2014, 23(5-6), 89-94. ISSN 1805-2576.

8. SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A POUŽITÉHO ZNAČENÍ

8.1. Seznam obrázků

<i>Obr. 1 Smáčecí úhel na styku tuhé a kapalné fáze – a) smáčení, b) nesmáčení (hydrofobní materiál)</i>	<i>15</i>
<i>Obr. 2 Kapilární elevace a deprese – a) kapilární elevace, b) kapilární deprese.....</i>	<i>11</i>
<i>Obr. 3 Závislost $P_{v, sat}$ na teplotě vzduchu</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4 Uzavřená vzduchová dutina</i>	<i>28</i>
<i>Obr. 5 Podlahová vzduchová dutina vytvořená zastropením</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 6 Podlahová vzduchová dutina vytvořená pomocí tvarovek</i>	<i>29</i>
<i>Obr. 7 Křídlo G historické budovy nemocnice U Apolináře</i>	<i>31</i>
<i>Obr. 8 Pohled na severní fasádu křídla G4 se vzduchovým kanálem a sklepním okénkem</i>	<i>32</i>
<i>Obr. 9 Schéma provětrávané dutiny s nasávacími a výdechovými otvory.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 10 Detail vzduchového pasivně provětrávaného kanálu s nasávacím otvorem „N2 – N4“</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 11 Schodiště s nasávacím otvorem „N1“</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 12 Detail vzduchového pasivně provětrávaného s výdechovým otvorem „V1 – V4“</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 13 Výdechový otvor kanálu v parapetu okna.....</i>	<i>33</i>
<i>Obr. 14 Degradace keramického obkladu</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 15 Viditelná vlhkost v interiéru.....</i>	<i>34</i>
<i>Obr. 16 Půdorysné schéma objektu s vyznačenými místy měření kapacitním vlhkoměrem Greisinger GMK 100.....</i>	<i>36</i>
<i>Obr. 17 Bývalé konírny v Malé pevnosti Terežín.....</i>	<i>38</i>
<i>Obr. 18 Schéma provedení vzduchového kanálu</i>	<i>39</i>
<i>Obr. 19 Fasáda – odlupování povrchových vrstev omítky</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 20 Fasáda – obnažení cihelného zdiva.....</i>	<i>40</i>
<i>Obr. 21 Umístění výdechových otvorů.....</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 22 Výdechový otvor</i>	<i>41</i>
<i>Obr. 23 Pohled na stěnu výdechového otvoru, povrch vyhlazen maltou.....</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 24 Pohled shora do výdechového otvoru</i>	<i>42</i>
<i>Obr. 25 Zjednodušené schéma s vyznačenými místy měření, červeně jsou vyznačena místa, která jsou dále zpracována v příslušných tabulkách.....</i>	<i>43</i>

<i>Obr. 26 Kostel sv. Jiljí</i>	46
<i>Obr. 27 Schéma provedení vzduchových izolačních kanálů</i>	47
<i>Obr. 28 Detail soklové části</i>	47
<i>Obr. 29 Kamenný sokl narušen vlhkostí</i>	47
<i>Obr. 30 Schéma měření vlhkosti zdiva</i>	48
<i>Obr. 31 Kostel sv. Petra a Pavla v Říčanech</i>	49
<i>Obr. 32 Schéma měření vlhkosti zdiva</i>	50
<i>Obr. 33 Schéma uspořádání laboratorního modelu v měřítku 1:2</i>	52
<i>Obr. 34 Laboratorní model bez dutiny a s dutinou</i>	54
<i>Obr. 35 Laboratorní model s označením měřících bodů – vnější strana</i>	54
<i>Obr. 36 Laboratorní model s označením měřících bodů – ze strany zeminy</i>	54
<i>Obr. 37 Finální laboratorní modely</i>	54
<i>Obr. 38 Ventilátor zajišťující proudění vzduchu v dutině (přes textilní tkaninu a se sníženým výkonem ventilátoru)</i>	56
<i>Obr. 39 Měření vlhkosti odporovým vlhkoměrem Greisinger GMH 3810</i>	56
<i>Obr. 40 Naměřené hodnoty vlhkosti v jednotlivých měřících bodech</i>	58
<i>Obr. 41 Přehled naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých měřících bodech na začátku měření po 30ti dnech od zapojení ventilátoru</i>	59
<i>Obr. 42 Přehled naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých měřících bodech po 15ti měsících od zapojení ventilátoru</i>	59
<i>Obr. 43 Výsledky numerické simulace – obsah vody v referenčním modelu a v modelu se vzduchovou dutinou (vytvořeno v programu WUFI 2D)</i>	60
<i>Obr. 44 Schéma uspořádání laboratorního modelu v měřítku 1:2</i>	61
<i>Obr. 45 Laboratorní model s dutinami</i>	61
<i>Obr. 46 Laboratorní model s dutinami a bez</i>	62
<i>Obr. 47 Finální laboratorní modely</i>	63
<i>Obr. 48 Ventilátory zajišťující proudění vzduchu v dutinách</i>	63
<i>Obr. 49 Zapojení ventilátorů</i>	64
<i>Obr. 50 Měření vlhkosti odporovým vlhkoměrem</i>	64
<i>Obr. 51 Naměřené hodnoty vlhkosti v jednotlivých měřících bodech</i>	65
<i>Obr. 52 Přehled naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých měřících bodech na začátku měření po 30ti dnech od zapojení ventilátoru</i>	66
<i>Obr. 53 Přehled naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých měřících bodech po 10ti měsících od zapojení ventilátoru</i>	66

<i>Obr. 54 Výsledky numerické simulace – obsah vody v referenčním modelu a v modelu s oboustrannou vzduchovou dutinou (vytvořeno v programu WUFI 2D).....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 55 Schéma uspořádání laboratorního modelu v měřítku 1:2.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 56 Aplikace profilované nopové fólie.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 57 Finální laboratorní model.....</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 58 Naměřené hodnoty vlhkosti v jednotlivých měřících bodech.....</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 59 Přehled naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých měřících bodech na začátku měření.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 60 Přehled naměřených hodnot vlhkosti v jednotlivých měřících bodech po 10ti měsících od začátku měření.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 61 Výsledky numerické simulace – obsah vody v referenčním modelu a v modelu s nopovou fólií (vytvořeno v programu WUFI 2D).....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 62 Výsledný průběh teplot v dutině [°C] pro rychlost proudění na vstupu 0,3 m/s (vytvořeno v programu COMSOL Multiphysics).....</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 63 Výsledný průběh rychlosti proudění vzduchu v dutině [m/s] pro rychlost proudění na vstupu 0,3 m/s (vytvořeno v programu COMSOL Multiphysics).....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 64 Výsledný průběh teplot v dutině [°C] pro rychlost proudění na vstupu 1,5 m/s (vytvořeno v programu COMSOL Multiphysics).....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 65 Výsledný průběh rychlosti proudění vzduchu v dutině [m/s] pro rychlost proudění na vstupu 1,5 m/s (vytvořeno v programu COMSOL Multiphysics).....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 66 Výsledný průběh teplot v dutině [°C] za bezvětrí (vytvořeno v programu COMSOL Multiphysics).....</i>	<i>78</i>

8.2. Seznam tabulek

<i>Tab. 1 Klasifikace vlhkosti zdiva dle ČSN P 73 0610 [11].....</i>	<i>12</i>
<i>Tab. 2 Naměřené hodnoty vlhkosti kapacitním vlhkoměrem Greisinger GMK 100.....</i>	<i>36</i>
<i>Tab. 3 Výsledky měření kapacitním vlhkoměrem.....</i>	<i>45</i>
<i>Tab. 4 Výsledky měření kapacitním přístrojem.....</i>	<i>48</i>
<i>Tab. 5 Výsledky měření odporovým přístrojem GMH 3810.....</i>	<i>51</i>
<i>Tab. 6 Materiálové charakteristiky.....</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 7 Konečné hodnoty naměřených vlhkostí w [% hm], po 15ti měsících větrání pomocí ventilátoru při rychlosti proudění vzduchu 0,05 m/s.....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 8 Konečné hodnoty naměřených vlhkostí w [% hm], po 10ti měsících větrání pomocí ventilátorů při rychlosti proudění vzduchu 0,05 m/s.....</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 9 Konečné hodnoty naměřených vlhkostí w [% hm], po 10ti měsících od začátku měření.....</i>	<i>70</i>

8.3. Seznam použitých zkratek a symbolů

symbol	jednotka	popis
w	%	hmotnostní vlhkost
m_w	kg	hmotnost vlhkého materiálu
m_d	kg	hmotnost suchého materiálu
p	%	pórovitost
V_v	m^3	objem volného prostoru
V_s	m^3	objem pevných částic
NV	%	nasákavost
NV_v	%	objemová nasákavost
w_w	kg	hmotnost vzorku před vysušením
w_d	kg	hmotnost vzorku po vysušení
ρ_d	kg/m^3	objemová hmotnost vysušeného vzorku
ρ_w	kg/m^3	objemová hmotnost vody
ω	°	úhel smáčení
h	mm	výška
σ	N/m	povrchové napětí
r	mm	poloměr kapiláry
ρ	kg/m^3	objemová hmotnost
μ	-	faktor difúzního odporu
d_μ	m	difúzní odpor
d	m	tloušťka vrstvy
g	m/s^2	gravitační zrychlení
$P_{v,sat}$	Pa	parciální tlak nasycené vodní páry
P_v	Pa	parciální tlak vodní páry
φ	%	relativní vlhkost vzduchu
t_w	°C	teplota vzduchu
m_{VP}	$kg/m^2 s$	množství vodní páry
R	J/K.mol	plynová konstanta
p_s	Pa	částečný tlak syté páry při teplotě t_D
p_{EX}	Pa	tlak páry v exteriéru
T_D	°C	termodynamická teplota v mezeře
v	m/s	rychlost proudění
A	$kg/(m^2 \sqrt{s})$	absorpční koeficient vody
T_e	°C	venkovní teplota vzduchu
T_{ai}	°C	vnitřní teplota vzduchu
T_{gr}	°C	teplota zeminy
ČSN		Česká státní norma
WTA		Vědeckotechnická společnost pro sanace staveb a péči o památky
CFD		Computational Fluid Dynamics