

**České vysoké učení technické v Praze**

**Fakulta stavební**

**Czech Technical University in Prague**

**Faculty of Civil Engineering**

**doc. Ing. Zbyšek Pavlík, Ph.D.**

**Application of semi-scale experiments for determination of  
hygrothermal function of building materials and structures**

**Aplikace „Semi-Scale“ experimentů při stanovení tepelně-vlhkostní  
funkce stavebních materiálů a konstrukcí**

## **Summary**

The present day possesses incessantly higher requirements on comfort and quality of internal environment of buildings. The internal environment behaviour is related among all to the performance of the materials inbuilt in the building envelopes and also by proper choice of the technological solution. On this account, it is necessary to test the building materials or the whole building structures from the point of view of their physical, chemical, and mechanical properties. Especially, knowledge in hygric and thermal performance of building materials and structures represent serious and decisive information for their proper and effective application in buildings. It has clear relation to buildings functionality, durability, and service life, and must be considered within the optimal design of buildings, new materials, and innovative technological solutions.

This lecture provides an overview of the currently applied methods and testing procedures for the assessment of hygrothermal behaviour of building materials, or the whole building structures, whereas the particular methods are discussed from the point of view of their applicability, reliability, time demands, and financial costs. For the given methods, practical examples of their application realized by author are presented. Substantial part of the lecture is dedicated to the semi-scale experimental technique for testing the building materials and structures in sufficiently large volume by the use of sophisticated laboratory methods for measurement of field variables as moisture content, relative humidity, temperature, heat flux, etc. Several application examples are presented in order to show the complexity of the semi-scale analysis. In the final part of the lecture, there are presented two experiments demonstrating the applicability of semi-scale experimental analysis for testing the material properties and evaluation their hygrothermal function. Within these tests, experimental testing of newly developed cavity brick block is presented in order to access their thermo-physical and thermo-technical properties. For the chosen brick block, its functionality is tested in harmful winter climatic conditions corresponding to the test reference year for Prague. Finally, the studied topic is summarized, and possibilities and directions of further research are given.

## **Souhrn**

Současná doba klade stále vyšší požadavky na kvalitu a komfort vnitřního prostředí budov. Stav vnitřního prostředí je kromě hygienických a dalších parametrů určen především vlastnostmi a funkcí materiálů tvořících obvodové konstrukce budov a také zvolením vhodného technologického řešení při jejich realizaci. Z tohoto důvodu je zcela nezbytné zabývat se testováním stavebních materiálů či stavebních konstrukcí z pohledu jejich fyzikálních, chemických, a mechanických vlastností. Zejména znalost vlhkostní a tepelné funkce materiálů a stavebních konstrukcí představuje podstatnou a rozhodující informaci pro jejich správnou a efektivní aplikaci při konstrukci budov. Tato skutečnost má přímou vazbu k funkčnosti budov, jejich trvanlivosti a životnosti a musí být vždy zohledněna při optimálním návrhu budov, nových materiálů a inovativních technologických řešení.

Tato přednáška poskytuje přehled v současné době používaných metod a postupů pro stanovení tepelně-vlhkostní funkce stavebních materiálů nebo celých stavebních konstrukcí. Jednotlivé uvedené metody jsou analyzovány z pohledu jejich aplikovatelnosti, spolehlivosti, časové a finanční náročnosti, přičemž pro každou z metod jsou uvedeny příklady praktické aplikace realizované autorem. Podstatná část přednášky je věnována popisu „semi-scale“ metody, která byla navržena a vytvořena za účelem testování materiálů a konstrukcí o dostatečně velkém objemu s využitím sofistikovaných laboratorních metod pro měření obsahu kapalně vlhkosti, relativní vlhkosti, teploty, tepelného toku, obsahu solí atd. Zmíněna je řada praktických aplikací „semi-scale“ experimentů, což demonstruje jejich komplexitu a velký potenciál pro sledování vlastní a chování stavebních materiálů a konstrukcí. V závěrečné části práce jsou detailněji prezentovány dva „semi-scale“ experimenty, v rámci kterých bylo nejprve provedeno stanovení tepelně-fyzikálních a tepelně-technických parametrů nových typů cihelných bloků s různými typy výplňového materiálu a následně byla monitorována tepelně-vlhkostní funkce vybraného cihelného bloku při vystavení zimním klimatickým podmínkám. Nakonec jsou získané poznatky shrnuty a nastíněny možnosti dalšího výzkumu.

**Klíčová slova**

tepelně-vlhkostní funkce stavebních materiálů a konstrukcí, kvalita a komfort vnitřního prostoru, spotřeba energie na provoz budov, tepelné a vlhkostní vlastnosti materiálů, negativní vliv vlhkosti na chování materiálů, in-situ měření, měření na testovacích budovách, laboratorní analýza materiálových parametrů v kombinaci s počítačovým modelováním tepelně-vlhkostní funkce, „semi-scale“ experimenty

**Keywords**

hygrothermal function of building materials and structures, quality and comfort of interior climate, energy consumption of building sector, thermal and hygric material properties, moisture negative effect on materials performance, in-situ measurement, test house measurement, laboratory analysis of materials properties in combination with computational modelling of hygrothermal function, semi-scale experiments

## **Obsah**

|  |    |
|--|----|
| Summary .....  | 2  |
| Souhrn .....   | 3  |
| Klíčová slova .....  | 4  |
| Keywords .....   | 4  |
| 1. Úvod.....   | 6  |
| 2. Metody stanovení tepelně-vlhkostní funkce stavebních materiálů,<br>konstrukcí a budov .....       | 8  |
| 2.1 Počítačové modelování .....  | 8  |
| 2.2 Experimentální stanovení fyzikálních materiálových parametrů v<br>laboratorních podmínkách ..... | 9  |
| 2.3 In-situ analýza, testovací objekty a konstrukce .....  | 10 |
| 3. „Semi-scale“ experimenty.....   | 14 |
| 4. Závěr .....   | 21 |
| Literatura .....   | 22 |
| Poděkování.....  | 23 |

## 1. Úvod

Spotřeba energie na vytápění budov a na jejich chlazení v teplejších obdobích roku představuje závažný globální problém [1]. Provozu budov bylo v roce 2010 připisováno 25% z celkové celosvětové spotřeby energie, což je třetí největší spotřeba za průmyslem (32%) a dopravou (31). Na provoz budov bylo v roce 2009 v USA a EU spotřebováno přibližně 40% energie produkované z fosilních paliv [2]. Tato skutečnost má za následek fakt, že třetina skleníkových plynů je do ovzduší emitována v důsledku provozu budov, což má přímý negativní environmentální dopad, například z pohledu globálního oteplování [3].

V budoucnu je možné předpokládat snížení podílu provozu budov na celkové spotřebě energie v důsledku dlouhodobého nárůstu požadavků na tepelně-izolační funkci budov a optimalizaci metod vytápění a chlazení. Tato snaha o snížení celkové energetické náročnosti budov vede v současnosti k návrhu a výstavbě nízkoenergetických či pasivních domů, jejichž celková spotřeba energie je výrazně nižší než u budov, navrhovaných dle platných technických standardů. Přesto je do budoucna počítáno se snížením energie na provoz budov pouze o 5% v důsledku zvyšujících se nároků uživatelů na komfort a kvalitu vnitřního prostředí. Toto snížení však není možné považovat z dlouhodobého hlediska za únosné a bude nezbytné navrhovat nové materiály a konstrukce, které výrazně omezí energetické ztráty stavebních konstrukcí a budov. Z tohoto důvodu budou navrhovány nové typy tepelně-izolačních materiálů, například na základě modifikace mikrostruktury materiálů (aplikace nanomateriálů), vakuových panelů, výplňových zdících bloků apod. Uplatnění naleznou také materiály, které budou schopny reagovat na změnu tepelných podmínek budovy a jejího okolí a v závislosti na této změně cíleně měnit své vlastnosti. Takovými materiály jsou například materiály využívající fázové změny pro akumulaci tepelné energie a její zpětné uvolnění v závislosti na tepelném režimu konstrukce [4], [5].

Pro optimální návrh materiálů či nových technologických a konstrukčních řešení je nezbytné stanovit tepelnou funkci a chování materiálů v reálných provozních podmínkách, kterým bude konstrukce během své životnosti vystavena. Kromě tepelné funkce je nutné vždy zohlednit také vlhkostní

funkci a stav materiálů, neboť zvýšená vlhkost negativně ovlivňuje užité vlastnosti a trvanlivost konstrukcí a má výrazný vliv na kvalitu vnitřního prostředí budov z hygienického hlediska.

Vlhkost stavebních materiálů představuje důležité téma stavebního výzkumu a praxe. Je zcela evidentní, že nárůst vlhkosti stavebních konstrukcí vede k závažným negativním důsledkům, jaký představuje například degradace materiálů (rozpad pevné struktury anorganických malt, porézních kamenů, keramických cihel, rozklad pojiv apod.). Nadměrná vlhkost způsobuje také biologické znehodnocení konstrukcí a negativně působí také na hygienické podmínky vnitřního prostředí budov [6]. Významný je vliv nárůstu vlhkosti na pokles mechanické pevnosti materiálů a na zhoršení jejich tepelně izolační funkce [7]. Z výše uvedených skutečností vyplývá nutnost zamezit pronikání vlhkosti do stavebních konstrukcí a to po celou dobu jejich životnosti. V případě, že dojde k proniknutí vlhkosti do konstrukce a k následnému poškození její funkčnosti, je pro optimální návrh sanačních a rekonstrukčních postupů nezbytné stanovit a monitorovat obsah a distribuci vlhkosti, stanovit vlhkostní vlastnosti materiálu a odhadnout vlhkostní chování materiálů a konstrukcí v širším časovém horizontu. Znalost vlhkostní funkce materiálů je nezbytná také v materiálovém výzkumu, zejména při řízeném návrhu materiálů definovaných vlastností.

Pro stavební praxi a výzkum představuje podrobná znalost tepelně-vlhkostního chování stavebních materiálů a konstrukcí nezbytnou informaci pro sofistikovaný návrh nových materiálů, konstrukcí, případně inovativních systémových řešení, například obvodových plášťů budov.

## **2. Metody stanovení tepelně-vlhkostní funkce stavebních materiálů, konstrukcí a budov**

Pro stanovení tepelně-vlhkostní funkce stavebních materiálů a konstrukcí je v zásadě možné využít čtyři následující principy:

- počítačové modelování současného transportu tepla a vlhkosti v kombinaci s experimentálním stanovením vstupních materiálových parametrů;
- experimentální stanovení fyzikálních materiálových parametrů v laboratorních podmínkách, na jejichž základě je proveden odhad chování materiálů v širším časovém horizontu a v reálných klimatických podmínkách;
- měření v reálném prostředí a reálném měřítku přímo na vyšetřovaných budovách, měření na testovacích budovách či konstrukcích;
- „semi-scale“ analýza.

První tři postupy budou probrány v rámci této kapitoly. „Semi-scale“ analýze jako nové, optimalizované metodě, bude věnována kapitola následující.

### *2.1 Počítačové modelování*

Počítačové modelování transportu tepla a vlhkosti představuje efektivní nástroj pro stanovení tepelně-vlhkostní funkce stavebních materiálů a konstrukcí. Je využíváno pro studium trvanlivosti, analýzu rizik, dlouhodobé časové zatížení konstrukcí podmínkami prostředí, studium působení vlivu vlhkosti na konstrukce apod.

V rámci výzkumu byla formulována řada matematicko-fyzikálních modelů popisujících současný transport tepla a vlhkosti, které jsou běžně aplikovány nejen ve stavebním výzkumu, ale i v projekční praxi. Sofistikovanější modely pak vztahují tepelné a vlhkostní chování materiálů ke stavům napjatosti a deformace. Obecně jsou tyto modely označovány anglickým zkráceným názvem „HAM models - Heat, Air, and Moisture Transport“. Z nejčastěji aplikovaných počítačových programů je možné uvést například programy Delphin [8], LATENITE, MOIST, TCCC2D, hygIRC, WUFI [9], TRANSMAT, HMS Transport [10]. Tyto programy



využívají vlastní databáze materiálových parametrů a klimatických podmínek.

Přestože je počítačové modelování velmi oblíbeným nástrojem pro analýzu tepelně-vlhkostního chování konstrukcí, je nutné si uvědomit jeho omezení a položit si otázku: JAK SPOLEHLIVÉ JE POČÍTAČOVÉ MODELOVÁNÍ?

V letech 2000 až 2003 byl řešen projekt Evropské unie HAMSTAD – Determination of liquid water transfer properties of porous building materials and development of numerical assessment methods, který řešil otázku experimentálního stanovení fyzikálních vlastností stavebních materiálů a jejich implementace do počítačových modelů. Jedním z výstupů projektu bylo formulování testovacích úloh pro posouzení spolehlivosti HAM modelů [11]. Ze závěrů projektu HAMSTAD je evidentní, že spolehlivost HAM modelů je vysoce závislá na přesnosti stanovení materiálových parametrů, které jsou využívány jako vstupní parametry pro počítačové modelování [12].

Pro efektivní a spolehlivé počítačové analýzy musí být fyzikální parametry materiálů určeny v závislosti na vlhkosti a teplotě v rozsahu jejich předpokládaného klimatického zatížení. To však není vždy možné, zejména z důvodu časové a finanční náročnosti experimentů. Problém jsou také nejistoty měření (chyby měření, měřících zařízení atd.), které mají ve svém důsledku výrazný vliv na přesnost a spolehlivost počítačového modelování. Dalším problémem je transport vlhkosti a tepla přes rozhraní jednotlivých materiálů. Zde je nutné stanovit přechodové odpory na základě kalibrace počítačových modelů pomocí přesně specifikovaných a dobře navržených experimentálních testů, které jsou následně analyzovány pomocí počítačového modelování. Za tímto účelem je možné využít testovacích budov či konstrukcí, nebo „semi-scale“ experimentů.

### *2.2 Experimentální stanovení fyzikálních materiálových parametrů v laboratorních podmínkách*

Na základě měření základních fyzikálních, vlhkostních a tepelných vlastností materiálů tvořících stavební konstrukci je možné odhadnout a předpovědět chování konstrukce při jejím vystavení reálným klimatickým podmínkám. Tento postup stanovení tepelně-vlhkostní funkce stavebních konstrukcí je však obtížně kvantifikovatelný a je ho možné použít spíše jako doprovodný nástroj při návrhu budov.

### 2.3 In-situ analýza, testovací objekty a konstrukce

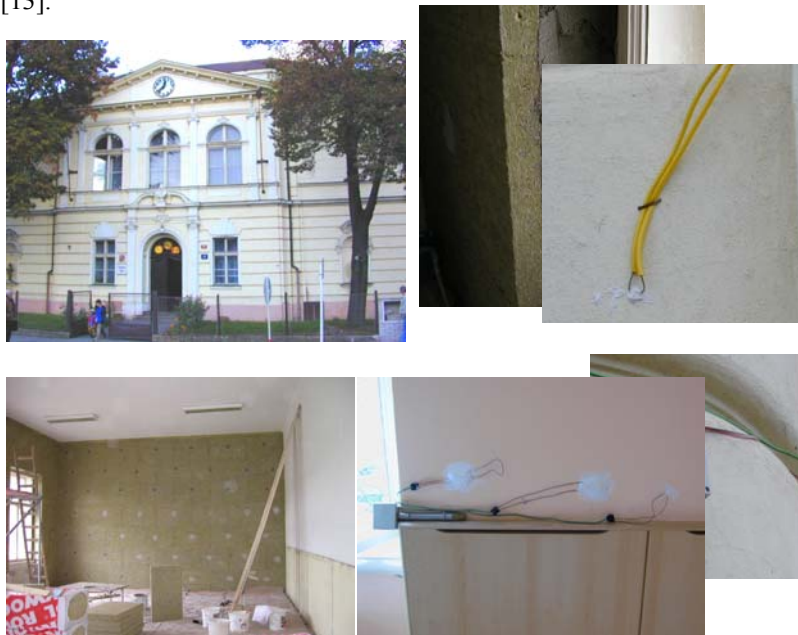
Tento způsob stanovení tepelně-vlhkostní funkce stavebních konstrukcí je možné aplikovat jak na stávajících konstrukcích a budovách, tak při zkoušení nových materiálů a technologických řešení. V rámci měření je realizováno kontinuální monitorování obsahu vlhkosti, relativní vlhkosti, teploty, kapilárního tlaku a dalších parametrů v reálných podmínkách konstrukce. Je možné také odebírat vzorky materiálů a následně je podrobit laboratorní analýze. Takto je například prováděn stavebně-technický průzkum budov, přičemž se běžně stanovuje obsah vlhkosti, anorganických solí, chemické složení materiálů atd. Za nevýhodu této metody je možné považovat finanční a časovou náročnost experimentů, které probíhají v reálném čase, problémy s instalací a kalibrací senzorů a je nutné také zmínit otázku dlouhodobé spolehlivosti senzorů, které jsou běžně zatíženy hysterezními efekty.

Z praktického pohledu poskytuje experimentální monitorování chování budov in-situ nejvíce spolehlivou informaci o jejich funkčnosti v reálných klimatických podmínkách a v praxi je velmi populární, především v materiálovém výzkumu při finálním testování nových materiálů a aplikačních technologií. Na Obr. 1 je zobrazen příklad testovací budovy, kde probíhá sledování funkce různých typů obvodových plášťů a střešních konstrukcí.



Obr. 1 Příklad testovací budovy

Jako příklad aplikace in-situ analýzy při ověření funkčnosti nových typů materiálů je možné uvést testování funkčnosti nově vyvinutého vnitřního tepelně-izolačního systému na bázi minerální hydrofilní minerální vlny, který jsme aplikovali při rekonstrukci budovy mateřské školy v Hlubočepích. Tento systém byl navržen v rámci řešení projektu EU INSUMAT - Development of insulation materials with specially designed properties for building renovation, který byl řešen v letech 2000 – 2003. Na základě požadavků, které byly formulovány v rámci počítačové analýzy obvodových plášťů budov, byly ve spolupráci s industriálními partnery cíleně vyvinuty jednotlivé materiály. Ty byly nejprve testovány v laboratoři a na základě posouzení jejich funkčnosti bylo rozhodnuto o jejich aplikaci a finálním testování na rekonstruovaném objektu. Funkčnost vyvinutého izolačního systému byla sledována po dobu pěti let, měřením teplotních a vlhkostních polí v předpokládaných kritických místech budovy. Postup realizace izolačního systému a měření je patrný z následujících obrázků [13].



*Obr. 2 Realizace navrženého izolačního systému a měření*

V současné době spolupracuje naše pracoviště s firmou HELUZ cihlářský průmysl v. o. s. na návrhu nových typů cihelných bloků pro pasivní budovy. V rámci řešení projektu byl realizován testovací pasivní dům, na kterém nyní probíhá monitorování jeho tepelné a vlhkostní funkce. Parametry testovacího domu jsou uvedeny v Tab. 1 a 2. Postup realizace je demonstrován na Obr. 3 – 5.

Tab. 1 Vlastnosti obvodových konstrukcí

| Tepelně-technické vlastnosti stavebních konstrukcí a stavebních otvorů |                        |                        |
|--|------------------------|------------------------|
| Konstrukce   | U (W/m <sup>2</sup> K) | R (m <sup>2</sup> K/W) |
| Střecha  | 0.09                   | 10.94                  |
| Stěna vnější   | 0.11                   | 8.92                   |
| Okna   | 0.61                   |                        |
| Podlaha na terénu  | 0.13                   | 7.52                   |

Tab. 2 Posouzení energetické náročnosti

| Vyhodnocení výsledků posouzení podle TNI 73 0329 (2010), výpočty                  |  |
|---|--|
| Průměrný součinitel prostupu tepla budovy $U_{em} = 0,14 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ | $U_{em} \leq 0,22 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ,<br>$E_A \text{ max} \leq 20 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$ ,<br>požadavky pro energeticky pasivní RD jsou splněny |
| Měrná spotřeba tepla na vytápění $E_A = 15 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$             |  |



Obr. 3 Zakládání zdiva



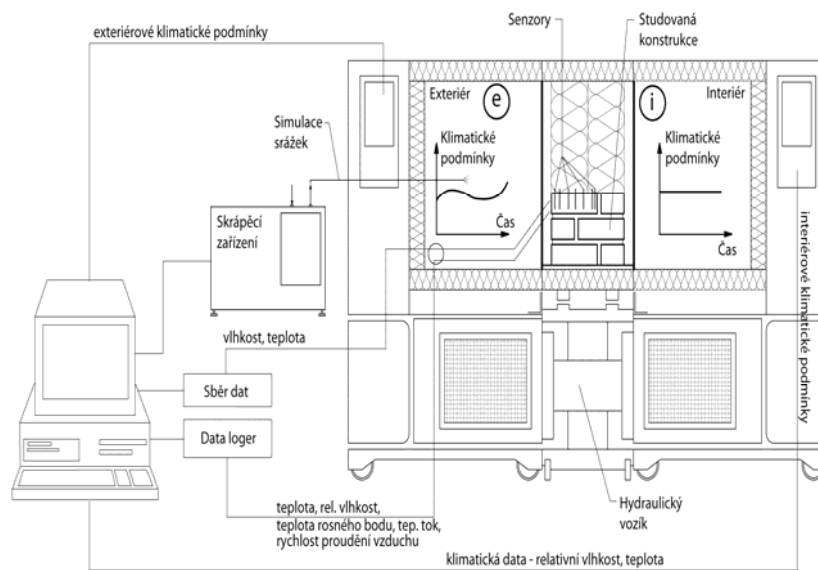
*Obr. 4 Realizace střešní konstrukce*



*Obr. 5 Celkový pohled na pasivní dům*

### 3. „Semi-scale“ experimenty

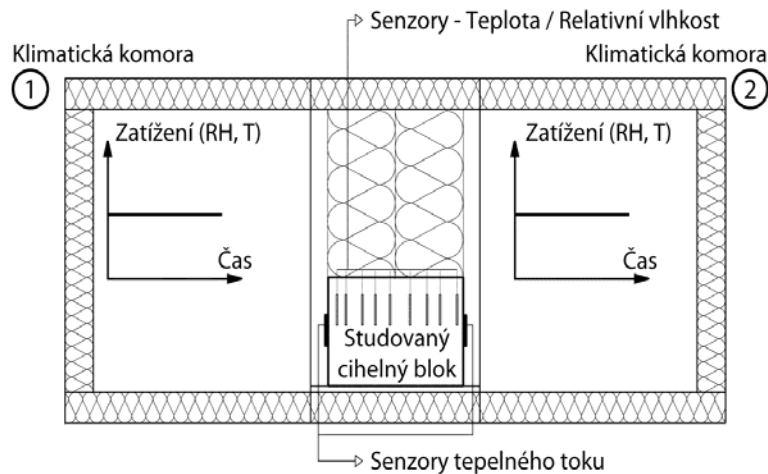
Tento typ experimentální analýzy představuje mezistupeň mezi měřením in-situ a počítačovým modelováním kombinovaným s laboratorním stanovením vstupních materiálových parametrů. Vhodně využívá výhod obou výše uvedených metodických postupů, přičemž je zachován dostatečně velký rozměr testované konstrukce či vzorku materiálu a pro měření je využito sofistikovaných laboratorních metod pro stanovení obsahu vlhkosti, relativní vlhkosti, teploty, tepelného toku, rychlosti proudění vzduchu, salinity atd. Tak je dosaženo velké přesnosti měření, neboť kalibrace měřících metod v laboratorních podmínkách je oproti měření in-situ snazší. V rámci experimentů je možné simulovat klimatické zatížení konstrukce velmi blízké realitě (simulace teploty, relativní vlhkosti, zatížení deštěm, slunečního záření, transportu solí, atd.). Zde je využíváno meteorologických dat, například ve formě referenčního roku. Je možné simulovat také kritická klimatická data, nebo normou či jiným předpisem definované podmínky zkoušky. Experimenty jsou tedy realizovány za jasně definovaných a kontrolovaných podmínek. Schematicky je princip „semi-scale“ experimentů zobrazen na Obr. 6.



Obr. 6 Schéma „semi-scale“ experimentů

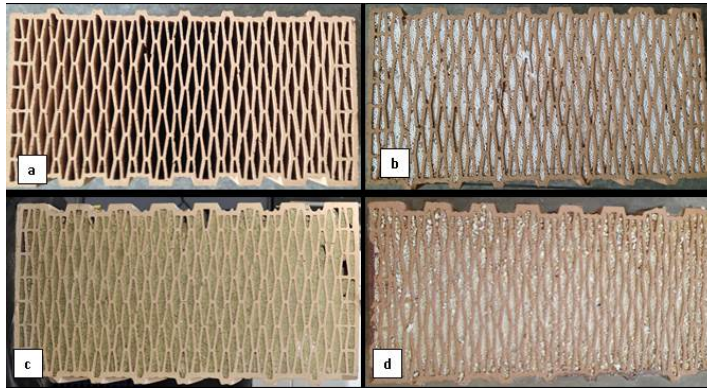
Jak je zřejmé z Obr. 6, princip „semi-scale“ experimentů je založen na simulování klimatického zatížení konstrukce, která je umístěna v testovacím tunelu mezi klimatickými komorami [14], [15]. V testované konstrukci jsou pak měřeny požadované fyzikální parametry. „Semi-scale“ experimenty jsme na našem pracovišti použili například při ověření funkčnosti vnitřního tepelně-izolačního systému, stanovení tepelně-vlhkostní funkce obvodového pláště na bázi sádrových bloků, monitorování teplotních a vlhkostních profilů v kamenném zdivu, stanovení tepelných vlastností cihelných bloků, testování stavebních detailů, kalibraci počítačových modelů, stanovení přechodových odporů atd. [16], [17], [18].

Praktickým příkladem použitelnosti „semi-scale“ experimentů je jejich využití při stanovení tepelně-fyzikálních a tepelně-technických vlastností nových typů cihelných bloků. Pro jejich stanovení není možné použít běžné metody a zařízení pro měření tepelných vlastností, jako například metody záblesku, impulzní metody, metody teplého drátu (transientní metody) či metody stacionární v uspořádání guarded hot plate. Tyto experimentální laboratorní metody umožní měřit pouze vzorky menších rozměrů, nejčastěji deskového tvaru. Pro měření cihelných bloků, které mají typickou tloušťku 250 – 500 mm, se však nedají použít. Z tohoto důvodu jsme realizovali „semi-scale“ experiment, jehož schéma je na Obr. 7.



Obr. 7 Schéma měření tepelných vlastností cihelných bloků

Testovány byly čtyři typy nově vyvinutých cihelných bloků (viz Obr. 8).



Obr. 8 Testované typy cihelných bloků a) vzduchové dutiny b) dutiny vyplněny polystyrenem c) dutiny vyplněny minerální vlnou d) dutiny vyplněné drcenou PU pěnou

V klimatických komorách byly nastaveny diferenční teploty 15/30°C, a relativní vlhkost  $\approx 30\%$ . Tímto způsobem byl simulován 1-D transport tepla až do dosažení ustáleného tepelného toku. Během měření byla kontinuálně monitorována distribuce teploty a relativní vlhkosti v měřených cihelných blocích a na povrchu byl měřen tepelný tok. Pro měření byly použity kombinované senzory relativní vlhkosti a teploty firmy Ahlborn. Kapacitní senzory relativní vlhkosti jsou aplikovatelné v rozsahu 5-98% s přesností  $\pm 2\%$ , NTC termistory měří s přesností  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  v rozsahu teploty  $0^\circ\text{C}$  to  $70^\circ\text{C}$ . Tepelný tok byl monitorován senzorem Ahlborn FQA020C. Tento senzor má kruhový tvar průměru 33 mm a měří s přesností  $\pm 5\%$  z měřené hodnoty. Na základě naměřeného ustáleného tepelného toku byl dle Fourierova vztahu nejprve stanoven efektivní součinitel tepelné vodivosti, z něhož byl následně vypočten tepelný odpor a součinitel přestupu tepla. Základní vlastnosti keramické matrice jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Vlastnosti keramické matrice

| Objemová hmotnost<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | Hustota matrice<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | Celková otevřená pórovitost<br>(-) |
|--|--|------------------------------------|
| 1 389                                    | 2 830                                  | 0.51                               |

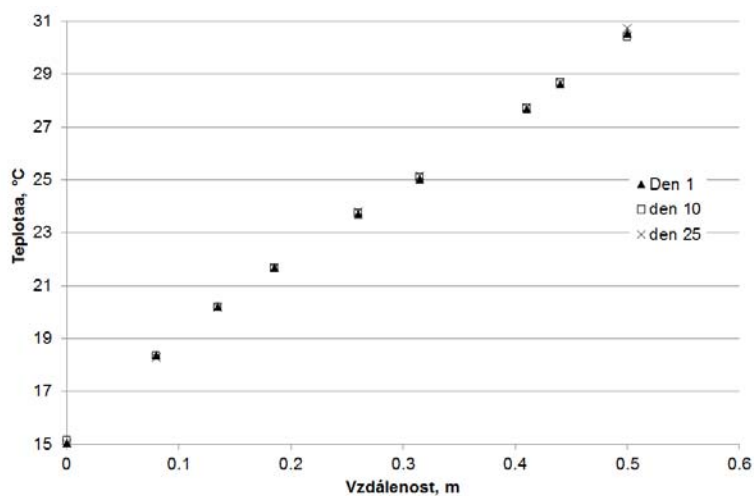


V Tab. 4 je uvedena tepelná vodivost keramické matrice stanovená impulsní transienční metodou v závislosti na vlhkosti. Nízké hodnoty součinitele tepelné vodivosti jsou způsobeny vysokou pórovitostí keramiky, která je důsledkem vyhoření slámy tvořící součást čerstvé keramické směsi.

Tab. 4 Tepelná vodivost keramické matrice

| Obsah vlhkosti (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> ) | Tepelná vodivost (W/mK) |
|--|-------------------------|
| 0.0  | 0.3                     |
| 0.11   | 0.44                    |
| 0.13   | 0.57                    |
| 0.29   | 0.75                    |
| 0.36   | 0.88                    |
| 0.46   | 1.03                    |
| 0.49   | 1.06                    |

Distribuce teploty naměřená pro cihlu bez výplňového materiálu v dutinách je zobrazena na Obr. 9. Z grafu je evidentní stacionární stav experimentu.



Obr. 9 Distribuce teploty v cihelném bloku se vzduchovými dutinami

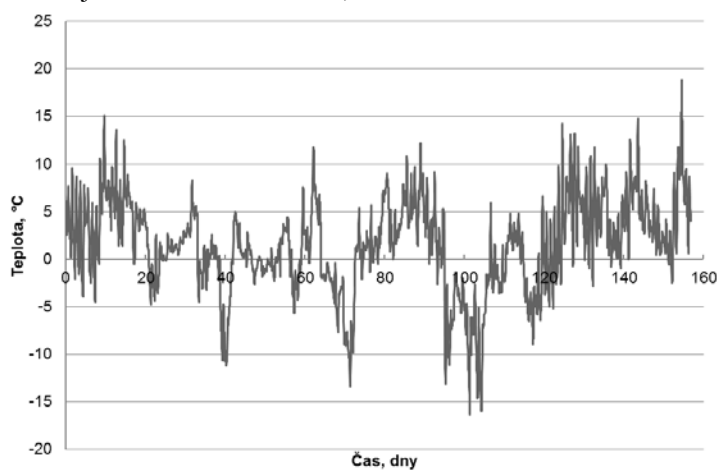
Výsledky vyšetřovaných tepelných parametrů shrnuje Tab. 5. Z výsledků je evidentní přínos výplně dutin pro celkovou tepelně-izolační funkci cihelných bloků. Nejlepší parametry z tepelně-izolačního pohledu vykazují

cihelných blok s dutinami vyplněnými minerální vlnou. Nicméně všechny testované materiály vykazují nízké hodnoty součinitele přestupu tepla a splňují normové požadavky pro jednovrstvé obvodové pláště budov.

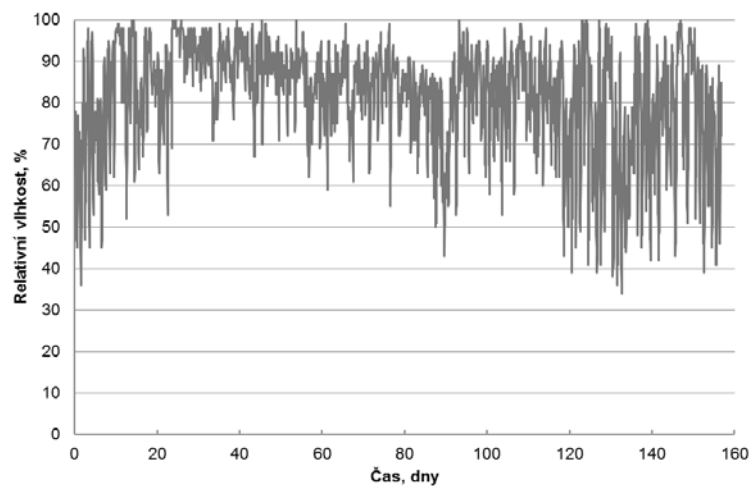
Tab. 5 Tepelné vlastnosti testovaných cihelných bloků

|   | Výplň dutin |            |                           |                           |       |
|---|-------------|------------|---------------------------|---------------------------|-------|
|   | Vzduch      | Polystyrén | Hydrofobizovaná min. vlna | Hydrofilní minerální vlna | PU    |
| Efektivní tepelná vodivost (W/mK)             | 0.124       | 0.085      | 0.077                     | 0.074                     | 0.081 |
| Tepelný odpor (m <sup>2</sup> K/W)            | 4.03        | 5.88       | 6.49                      | 6.76                      | 6.17  |
| Součinitel přestupu tepla (W/m <sup>2</sup> ) | 0.25        | 0.17       | 0.15                      | 0.15                      | 0.16  |

V dalším experimentu jsme cihelný blok s dutinami vyplněnými drcenou odpadní PU pěnou zatížili klimatickými podmínkami pro zimní období (1. listopad – 31. březen) odpovídajícími referenčnímu roku pro Prahu. Tato klimatická data byla aplikována na vnější straně testovaného bloku. Na interiérové straně byly simulovány konstantní klimatické podmínky, konkrétně teplota  $21 \pm 0.5$  °C a relativní vlhkost  $50 \pm 2\%$ . Klimatická data pro exteriér jsou uvedena na Obr. 10, 11.

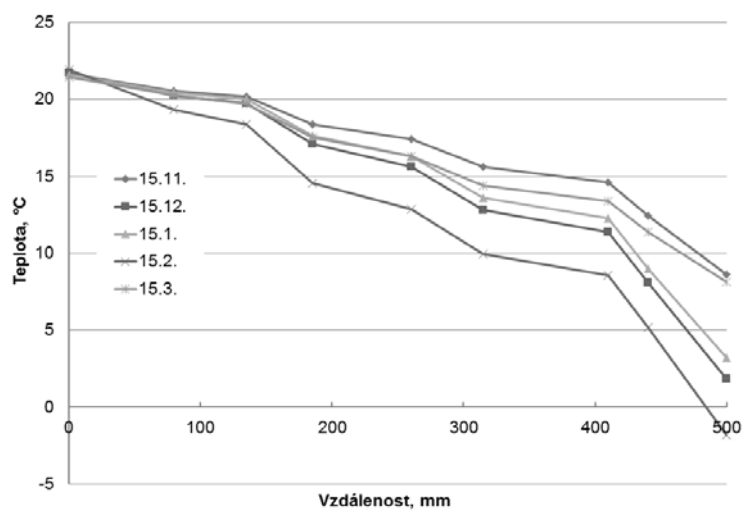


Obr. 10 Simulovaná teplotní klimatická data

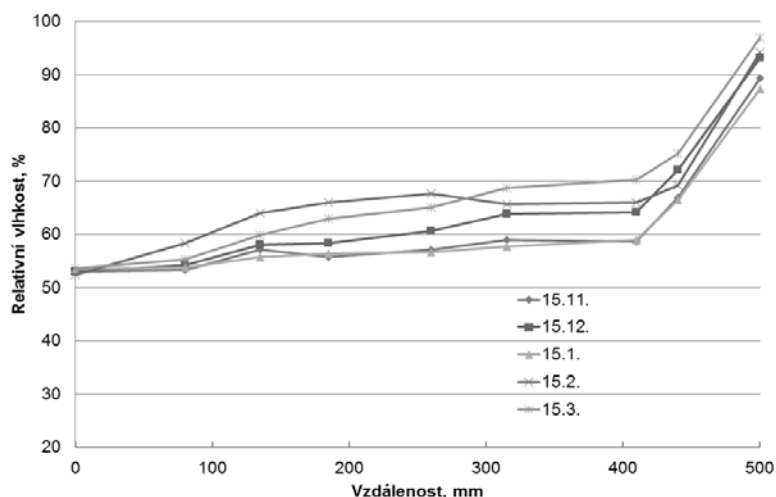


Obr. 11 Simulovaná vlhkostní klimatická data

Naměřené profily teploty a relativní vlhkosti jsou uvedeny na Obr. 12, 13.



Obr. 12 Teplotní profily v podélné ose cihelného bloku



Obr. 13 Distribuce relativní vlhkosti v podélné ose cihelného bloku

Při pohledu na naměřené teplotní profily můžeme pozorovat sensitivitu studovaného cihelného bloku na změny exteriérové teploty. Tepelně-izolační funkce analyzovaného bloku může být celkově považována za vyhovující, což je pro praktickou aplikaci vyvinutého materiálů velmi slibné. Ve vzdálenosti 150 mm od interiérového povrchu byly naměřeny teploty kolem 20°C. To je z pohledu udržení požadované kvality vnitřního prostředí budov velmi dobré.

Relativní vlhkost v cihelném bloku odpovídala vysoké relativní vlhkosti klimatických dat pro simulované zimní období. Nejnižší hodnoty relativní vlhkosti byly zaznamenány pro listopad a leden. V těchto měsících byla relativní vlhkost do vzdálenosti 400 mm od vnitřního povrchu < 60%. Ve zbývajících studovaných měsících došlo k částečnému nárůstu relativní vlhkosti a její hodnoty byly v rozmezí 55 – 65%.

Z pohledu použitelnosti „semi-scale“ experimentů je evidentní, že prezentované experimentální uspořádání je vhodné pro takovéto typy analýz.

#### 4. Závěr

Stanovení tepelně-vlhkostní funkce stavebních materiálů a konstrukcí je zcela nezbytné pro jejich optimální návrh z pohledu funkčnosti a trvanlivosti. Pro stanovení tepelného a vlhkostního chování je možné využít počítačové modelování v kombinaci se stanovením materiálových parametrů, in-situ měření na testovacích budovách nebo přímo na stávajících objektech či odhad chování materiálů na základě jejich vlastností.

„Semi-scale“ experimenty využívají výhod výše zmíněných metod a eliminují jejich nedostatky, přičemž praktické ukázky realizovaných experimentů a publikovaných prací demonstrují použitelnost takovýchto analýz v materiálovém výzkumu či při návrhu nových technologických řešení stavebních konstrukcí.

In-situ analýza přesto zůstává finální a rozhodujícím krokem při testování a ověřování funkčnosti nově vyvinutých materiálů.

## Literatura

- [1] P. Tatsidjoudoug, N. Le Pierrès, L. Luo (2013) A review of potential materials for thermal energy storage in building applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 327-349.
- [2] A. Waqas, Z.U. Din (2013) Phase change material (PCM) storage for free cooling of buildings - A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 607-625.
- [3] British Petroleum (2010) *Statistical Review of World Energy*.
- [4] Z. Pavlík, A. Trník, J. Ondruška, M. Keppert, M. Pavlíková, P. Volfová, V. Kaulich, R. Černý (2013) Apparent Thermal Properties of Phase-Change Materials: An Analysis Using Differential Scanning Calorimetry and Impulse Method, *International Journal of Thermophysics*, 34, 851-864.
- [5] L.F. Cabeza, A. Castell, C. Barreneche, A. de Gracia, A.I. Fernandez (2011) Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15, 1675-1695. (2011)
- [6] C.G. Bornehag, F. Blomquist, F. Gyntelberg, B. Jaervholm, P. Malmberg, L. Nordwall,, A. Nielsen, G. Pershagen, J. Sundell (2001) Dampness in Building and Health Nordic Interdisciplinary Review of the Scientific Evidence on Associations between Exposure to “Dampness” in Buildings and Health Effects (NORDDAMP), *Indoor Air*, 11, 72-86.
- [7] M. Jiříčková, Z. Pavlík, L. Fiala, R. Černý (2006) Thermal Properties of Mineral Wool Materials Partially Saturated by Water, *International Journal of Thermophysics*, 27, 1214-1227.
- [8] J. Grunewald, J. (2000) DELPHIN 4.1 - Documentation, Theoretical Fundamentals, TU Dresden, Dresden.
- [9] H.M. Künzle, H.M. (1999) WUFI: PC Program for Calculating the Coupled Heat and Moisture Transfer in Building Components, Fraunhofer Institute for Building Physics, Holzkirchen, Germany.
- [10] V. Kočí, J. Maděra, R. Černý (2013) Computational model of coupled heat, moisture and salt transport in multi-layered building structures: Implementation of the deterministic physical model and example of application, 11<sup>th</sup> International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics ICNAAM 2013, 1558, 968 – 971.
- [11] C.E. Hagentoft, A.S. Kalagasidis, B. Adl-Zarrabi, S. Roels, J. Carmeliet, H. Hens, J. Grunewald, M. Funk, R. Becker, D. Shamir, O.

- Adan, H. Brocken, K. Kumaran, R. Djebbar, R. (2004) Assessment Method of Numerical Prediction Models for Combined Heat, Air and Moisture Transfer in Buildings Components: Benchmarks for One-dimensional Cases, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 27, 327-352.
- [12] S. Roels, J. Carmeliet, H. Hens, O. Adan, H. Brocken, R. Cerny, Z. Pavlik, C. Hall, K. Kumaran, L. Pel, R. Plagge (2004) Interlaboratory comparison of hygric properties of porous building materials, *Journal of Thermal Envelope and Building Science*, 27, 307-325.
- [13] Z. Pavlík, J. Toman, R. Černý (2003) Test House for Validation of Hygrothermal Performance of Interior Thermal Insulation System on Mineral Wool Basis, *Proceedings of Workshop 2003, Prague: CTU, vol. B, 938-939*
- [14] Z. Pavlík, J. Pavlík, M. Jiříčková, R. Černý (2002) System for Testing the Hygrothermal Performance of Multi-Layered Building Envelopes, *Journal of Thermal Envelope & Building Science*, 25, 239-249.
- [15] Z. Pavlík, Z., Černý (2002) Design of the NONSTAT Measuring System for Hygrothermal Analysis of Multi-Layered Building Envelopes, *Building Research Journal*, 50, 209-224.
- [16] Z. Pavlík, M. Jiříčková, R. Černý (2004) Semi-Scale Testing of Multi-Layered Building Envelope on The Basis of HPC in Difference Climate Conditions, *Roczniki Inżynierii Budowlanej*, 10, 17-24.
- [17] Z. Pavlík, R. Černý (2006) Application of TDR Measurement Technology for Construction Materials in Semi-Scale Experiments: A Practical Example, *International Agrophysics*, 19, 57-60.
- [18] Z. Pavlík, J. Mihulka, J. Žumár, M. Pavlíková, R. Černý (2011) Interface Resistances in Heat and Moisture Transport: Semi-Scale Experimental Analysis, *Materials Characterization V Computational Methods and Experiments*, Southampton: WIT Press, 199-209.

### **Poděkování**

Výzkum byl podpořen výzkumným záměrem Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy České republiky č. MSM 6840770031.

**doc. Ing. Zbyšek Pavlík, Ph.D.**

Datum a místo narození: 23. 1. 1976, Chrudim

Vzdělání, pedagogické a vědecké hodnosti:

1990 – 1994

Gymnázium Josefa Ressela, Chrudim.

1994 – 2000

Fakulta stavební ČVUT v Praze, Ing. v oboru pozemní stavby a konstrukce.

2000 – 2003

Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební ČVUT v Praze, Ph.D. v oboru fyzikální a materiálové inženýrství.

2010

Jmenován docentem na ČVUT v Praze, habilitace v oboru Teorie stavebních konstrukcí a materiálů, habilitační práce na téma „Identification of Parameters Describing the Coupled Moisture and Salt Transport in Porous Building Materials“.

Odborná a pedagogická praxe:

1999 – 2000

Jiran Kohout architekti s.r.o. – projekční praxe.

2000 – 2003

Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební, ČVUT v Praze - výuka stavební mechaniky, pružnosti a pevnosti v rámci doktorského studia, spolupráce při řešení vědeckovýzkumných projektů katedry, řešitel projektu IGS.

2003 – 2007

Katedra stavební mechaniky, Fakulta stavební ČVUT v Praze, odborný asistent, výuka stavební mechaniky, pružnosti a pevnosti, izolačních materiálů, vedení studentských projektů, vědecko-výzkumná činnost, řešení grantových projektů.

2007 – dosud

Katedra materiálového inženýrství a chemie, Fakulta stavební ČVUT v Praze, docent, výuka předmětů týkajících se problematiky materiálového inženýrství a izolačních materiálů, vedení studentských projektů, magisterských a bakalářských prací, vedení doktorandů, vedení studentů při



SVOČ, organizátor doktorských seminářů, editor sborníků z konferencí a seminářů, organizátor konferencí, člen vědeckých výborů mezinárodních konferencí, člen oborové rady doktorského studijního oboru Fyzikální a materiálové inženýrství v programu Stavební inženýrství, člen oborové komise F1 pro výběrové řízení FRVŠ MŠMT ČR za fakultu stavební.

Výzkumná činnost:

Stanovení tepelných a vlhkostních vlastností porézních stavebních materiálů ve vazbě na podmínky prostředí, vývoj metodiky měření pro sledování obsahu kapalné vlhkosti v materiálech a konstrukcích, experimentální a teoretická analýza transportu a akumulace anorganických solí v porézních materiálech, testování materiálů a stavebních konstrukcí v podmínkách diferenčního klimatu, aplikace druhotných surovinových zdrojů při výrobě stavebních materiálů vysokých užitných vlastností, studium PCM materiálů a jejich implementace do stavebních konstrukcí, vývoj nových typů kompozitních materiálů nahrazujících částečně pojivo na bázi Portlandského cementu, analýza trvanlivosti stavebních materiálů a jejich degradace.

Spolupráce s praxí:

Spolupráce s praxí při stavebnětechnickém průzkumu sanovaných objektů a při určování charakteristik materiálů.

Vedoucí akreditované laboratoře OL 123.

Člen Technické komise pro akreditaci zkušebních laboratoří působících v oblasti stavebnictví, která je zřízena jako poradní a konzultační orgán ředitele Českého institutu pro akreditaci, o.p.s. při Technickém výboru pro akreditaci zkušebních laboratoří.

Publikační činnost:

Autor či spoluautor následujících publikací: 1 monografie, 2 knih, 2 vysokoškolských přednáškových skript, 33 článků v databázi WoS, 31 článků v mezinárodních recenzovaných časopisech neuvedených v databázi WoS, 129 příspěvků na mezinárodních konferencích, 31 článků v českých

recenzovaných časopisech, 97 příspěvků ve sbornících českých a slovenských konferencí, 4 užité vzory, 5 funkčních vzorky, 3 autorizované softwary, h-index 5(WoS).

Celkem 87 citací v databázi WoS, 235 citací v databázi SCOPUS (h-index 8) a dalších 20 citací neuvedených v databázích.

Udělené projekty:

Celkem uděleno 14 externích grantů ČR, z toho 2 GAČR, 1 FRVŠ, 1 RP MŠMT ČR, 10 MŠMT ČR v rámci MEB a KONTAKT.

Člen řešitelského kolektivu:

1 VZ MŠMT ČR, 1 MK ČR, 3 MPO ČR, 3 EU, 9 GAČR, 5 MPO ČR, 6 MŠMT ČR v rámci KONTAKT.

Vybrané publikace:

R. Černý, Z. Pavlík, P. Rovnaníková (2004) Experimental Analysis of Coupled Water and Chloride Transport in Cement Mortar, Cement and Concrete Composites, 26, 705-715.

Z. Pavlík, M. Jiříčková, J. Pavlík, R. Černý (2005) Interior Thermal Insulation System Based on Hydrophilic Mineral Wool, Journal of Building Physics, 29, 21-35.

L. Zuda, Z. Pavlík, P. Rovnaníková, P. Bayer, R. Černý (2006) Properties of Alkali Activated Aluminosilicate Material After Thermal Load, International Journal of Thermophysics 27, 1250-1263.

Z. Pavlík, R. Černý (2008) Experimental Assessment of Hygrothermal Performance of an Interior Thermal Insulation System Using a Laboratory Technique Simulating On-Site Conditions, Energy and Buildings 40, 673-678.

Z. Pavlík, R. Černý (2008) Hygrothermal Performance Study of an Innovative Interior Thermal Insulation System, Applied Thermal Engineering, 29, 1941-1946.

Z. Pavlík, J. Žumár, I. Medved', R. Černý (2012) Water vapor adsorption in porous building materials: experimental measurement and theoretical analysis, Transport in Porous Media, 91, 939-954.