

## EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ PRŮBĚHU TEPLoty VE STAVEBNÍCH MATERIÁLECH POROVNANÉ S NUMERICKÝM VÝPOČTEM

### MEASUREMENT AND CALCULATION OF TEMPERATURE CHANGES IN BUILDING MATERIALS DURING FREEZE-THAW CYCLE

Tomáš DOLEŽEL, Petr KONVALINKA<sup>1</sup>

#### *Abstrakt*

Projekt se zabývá experimentálním vyšetřováním šíření tepla ve stavebních materiálech při různých teplotách okolí a různé vlhkosti zkušebních těles vyrobených z betonu, cihlobetonu a tvárnice Ytong. V první části projektu byla provedena měření teploty na vzorcích o různých vlhkostech při kladné a záporné teplotě okolí, v další části pak vyhodnocení vypočtených a změřených hodnot. Výpočet proběhl v programu DELPHIN, který neuvažuje změnu skupenství vody při teplotách pod bodem mrazu.

**Klíčová slova:** vlhkost, zmrazování a rozmrazování, průběh teploty, pórovitý materiál

#### *Abstract*

This paper presents the effect of moisture content on heat transport simulation using the Delphin computer code. In this project concrete, broken-brick concrete and porous concrete (Ytong) specimens with different moisture content were loaded with freeze and thaw cycle. Calculated and measured data were analyzed and following conclusion have been made. The difference between calculated and measured data is strongly influenced by the moisture content when the freeze cycle is simulated. There is almost no influence between moisture content and error of calculated and measured data when simulating thaw cycle.

**Keywords:** moisture, heat transport, computer simulation, porous material.

## ÚVOD

Tento příspěvek se zabývá zjištěním přesnosti výpočtu šíření teploty ve vzorcích vyrobených z betonu, cihlobetonu a tvárnice Ytong o různé vnitřní vlhkosti při záporných a kladných teplotách prostředí pomocí numerického modelu v programu DELPHIN, který neuvažuje změnu skupenství vody při teplotách pod bodem mrazu. V první části byla provedena měření teploty na vzorcích o různých vlhkostech při simulaci zmrazování a rozmrazování, v další části pak vyhodnocení vypočtených a změřených hodnot. Největší rozdíl mezi změřenými a vypočtenými hodnotami se předpokládá u vzorků s největší vlhkostí při zatížení zápornou teplotou, nejmenší naopak u vzorků s nízkou vnitřní vlhkostí.

---

<sup>1</sup> Ing. Tomáš DOLEŽEL, doc. Ing. Petr KONVALINKA, CSc, Fakulta Stavební ČVUT, [tomas.dolezel@fsv.cvut.cz](mailto:tomas.dolezel@fsv.cvut.cz), [conwa@fsv.cvut.cz](mailto:conwa@fsv.cvut.cz)  
Lektoroval: prof. Ing. Alexander GMITERKO, PhD., KAMaM, SjF TU v Košiciach, [alexander.gmiterko@tuke.sk](mailto:alexander.gmiterko@tuke.sk)

## VZORKY A EXPERIMENT

Přípravě zkušebních těles byla věnována velká pozornost. Jako vzorky pro měření byly použity tři krychle z prostého betonu, tři z cihlobetonu a tři z Ytongu o rozměrech 100x100x100mm obalené z pěti stran tepelnou izolací z minerální plsti značky ORSIK. Složení betonových směsí je znázorněno v tabulkách Tab.1 a Tab.2.

**Složení použité betonové směsi** **Tabulka 1**

Složky		C 45/55
Portlandský cement CEM II [kg/m <sup>3</sup> ]		440
Štěrk [kg/m <sup>3</sup> ]	Frakce 8 - 16 mm [kg/m <sup>3</sup> ]	720
	Frakce 4 - 8 mm [kg/m <sup>3</sup> ]	340
	Frakce 0 - 4 mm [kg/m <sup>3</sup> ]	783
Voda [kg/m <sup>3</sup> ]		180

**Složení cihlobetonu** **Tabulka 2**

Složky		Cihlobeton
Portlandský cement CEM II/B - S 32,5R [kg/m <sup>3</sup> ]		424
Cihelná drť [kg/m <sup>3</sup> ]	Frakce 4 - 8 mm [kg/m <sup>3</sup> ]	401
	Frakce 0 - 4 mm [kg/m <sup>3</sup> ]	795
Voda [kg/m <sup>3</sup> ]		417

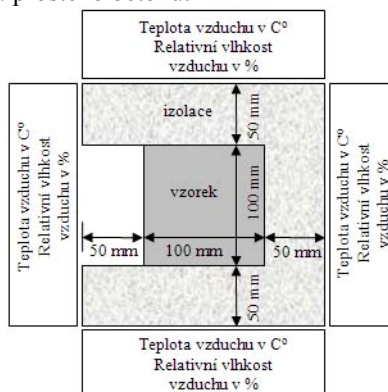
Každý vzorek byl nejprve opatřen v těžišti jedním teplotním čidlem a poté zvážen. Pro zajištění co nejnižší vnitřní vlhkosti byla jedna krychle z každého materiálu sušena v elektrické peci. Další skupina tří krychlí z každého materiálu byla umístěna do vodní lázně. U těchto vzorků byly požadováno dosažení co nejvyšší vnitřní vlhkosti. U zbylých vzorků nebyla měněna vnitřní vlhkost. Ihned po ukončení sušení nebo namáčení byly krychle zváženy a zaizolovány tenkou vrstvou epoxidové pryskyřice. Epoxidová pryskyřice zabraňuje kolísání vnitřní vlhkosti, které je způsobeno různou vlhkostí tělesa a okolního prostředí. Rozdíl hmotností před začátkem a koncem sušení nebo namáčení udává změnu vlhkosti ve vzorku (Tab. 3). Nakonec byly všechny vzorky z pěti stran zaizolovány tepelnou izolací značky ORSIK.

**Změna hmotnosti způsobená změnou vlhkosti** **Tabulka 3**

Materiál	Vzorek	Hmotnost A [g]	Hmotnost B [g]	B - A [g]
Beton	Normální vlhkost	2421	2421	0
	Snížená vlhkost	2367	2360	-7
	Zvýšená vlhkost	2342	2454	112
Cihlobeton	Normální vlhkost	1848	1848	0
	Snížená vlhkost	1853	1744	-109
	Zvýšená vlhkost	1869	2009	140
Ytong	Normální vlhkost	559	559	-18
	Snížená vlhkost	559	541	0,7
	Zvýšená vlhkost	554	887	333

## SIMULACE V PROGRAMU DELPHIN

Na obr.1 je znázorněn použitý model v programu DELPHIN. Okrajové podmínky se mění podle toho, zda simulují uložení vzorku v mrazicím boxu nebo v termostatické komoře. Měření základních fyzikálních veličin potřebných pro numerickou simulaci proběhlo na měřicím zařízení ISOMET (Tab. 4). V případě simulace uložení vzorků v mrazicím boxu byla zvolena teplota okolního vzduchu  $-40^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkost vzduchu 20%. Teplota vzorků na začátku výpočtu byla  $+40^{\circ}\text{C}$  nebo  $0^{\circ}\text{C}$  u krychle z prostého betonu. Při simulaci uložení vzorků v termostatické komoře byla zvolena teplota okolního vzduchu  $+40^{\circ}\text{C}$  a relativní vlhkost 7%. Teplota vzorků na začátku výpočtu byla  $-40^{\circ}\text{C}$  nebo  $0^{\circ}\text{C}$  u prostého betonu.



Obr.1 Použitý model (DELPHIN)

### Změřené materiálové charakteristiky (ISOMET)

Tabulka 4

Materiál	Vzorek	$\lambda$ [W/mK]	$c$ [J/kgK]	Relativní vlhkost [%]
Beton	Normální vlhkost	2,08	1050	0,9
	Snížená vlhkost	1,44	950	0,2
	Zvýšená vlhkost	1,83	950	12,1
Cihlobeton	Normální vlhkost	0,91	860	11,1
	Snížená vlhkost	0,65	910	0,2
	Zvýšená vlhkost	1,20	880	25,1
Ytong	Normální vlhkost	0,12	1330	2,0
	Snížená vlhkost	0,10	1230	0,2
	Zvýšená vlhkost	0,46	2000	35,3

## MĚŘENÍ NA VZORCÍCH

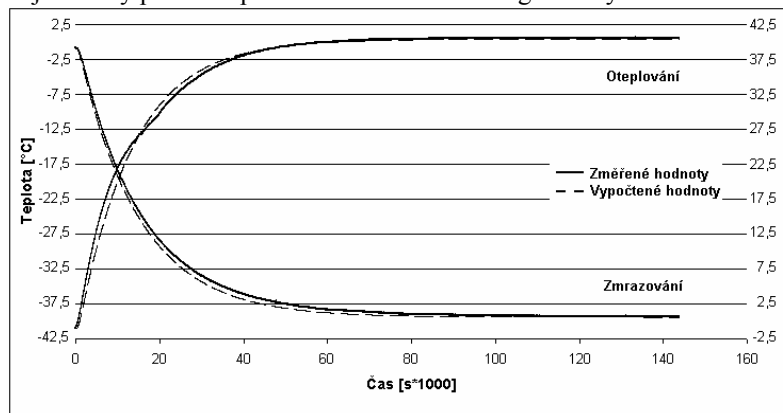
Zatěžování teplotou proběhlo v laboratoři experimentálního centra FSV, které je na tato měření plně vybaveno. Zatěžovací doba byla stanovena na 40 hodin. Vzorky z prostého betonu byly před každým zatěžováním zápornou nebo kladnou teplotou zchlazeny na  $0^{\circ}\text{C}$ . Vzorky z cihlobetonu a Ytongu byly na měření připravovány jinak. Krychle z těchto materiálů byly před zmrazováním zahřáty na teplotu  $+40^{\circ}\text{C}$  a při simulaci rozmrazování zchlazeny na teplotu  $-40^{\circ}\text{C}$ . Zatěžování zápornou i kladnou teplotou probíhalo na každém vzorku jednotlivě. Zmrazování proběhlo v mrazicím boxu při teplotě  $-40^{\circ}\text{C}$  postupně na všech tělesech. Po ukončení zmrazování, byly vzorky opět uvedeny na výchozí teplotu a poté jednotlivě zatěžovány v termostatické komoře teplotou  $+40^{\circ}\text{C}$ .

## VÝSLEDKY

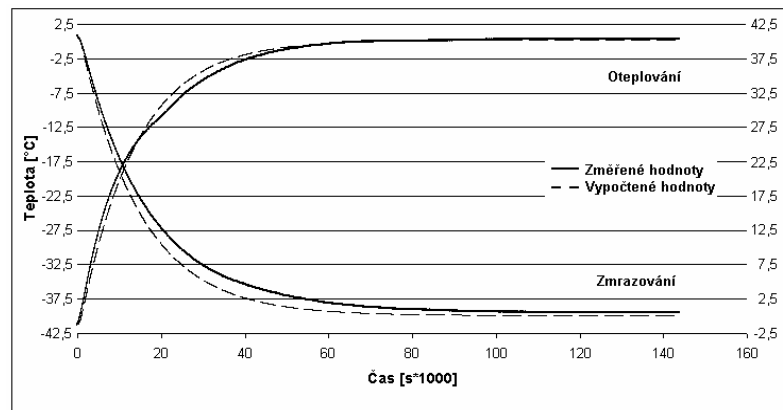
Z grafů průběhu šíření teplot je zřejmé, že chyba mezi změřenými a vypočtenými hodnotami při simulaci zahřívání vzorků je velmi malá. Např. pro všechny betonové vzorky zůstává průměrná chyba do 0,25°C. Nepřesnost výpočtu se při zmrazování vzorků zvyšuje s rostoucí vnitřní vlhkostí. Betonový vzorek s nejnižší vlhkostí vykazuje průměrnou chybu mezi měřením a výpočtem 0,49°C a maximální odchylku vypočtených a změřených hodnot rovnu 1,39°C. Betonová krychle s normální vlhkostí vykazuje průměrnou odchylku 1,17°C s maximální odchylkou vypočtených a změřených hodnot rovnou 2,51°C. U betonového vzorku s vysokou vlhkostí se již hodnoty změřené a vypočtené liší velmi výrazně. Průměrná chyba je 2,16°C a maximální odchylka vypočtených a změřených hodnot dokonce 6,09°C.

Obr.2,3,4 znázorňují časový průběh teplot v těžišti betonových těles postupně pro sníženou, normální a zvýšenou vlhkost vzorku. V každém grafu je vykreslen průběh změřené a vypočtené teploty při zahřívání i zmrazování vzorků. Plná čára znázorňuje změřené hodnoty a čárkovaná hodnoty vypočtené. Hodnoty teplot na levé straně grafu patří k datům vyjadřujícím zmrazování a hodnoty teplot na pravé straně grafu k datům znázorňujícím zahřívání vzorků.

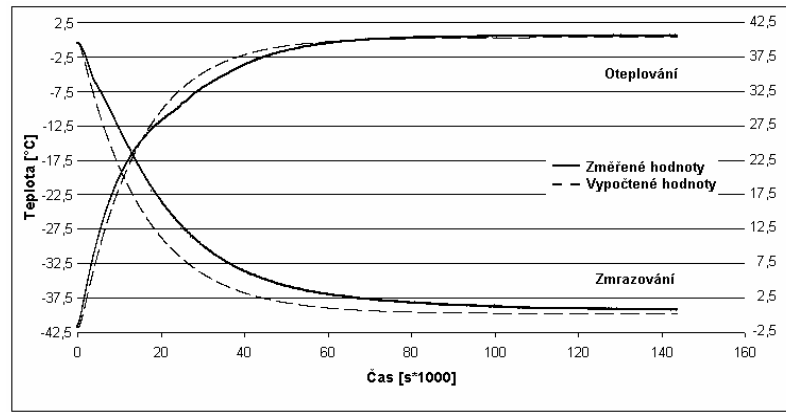
Obr.5 znázorňuje časový průběh teplot v těžišti tělesa z cihlobetonu se zvýšenou vlhkostí, obr.6 znázorňuje časový průběh teplot v těžišti tělesa z Ytongu se zvýšenou vlhkostí.



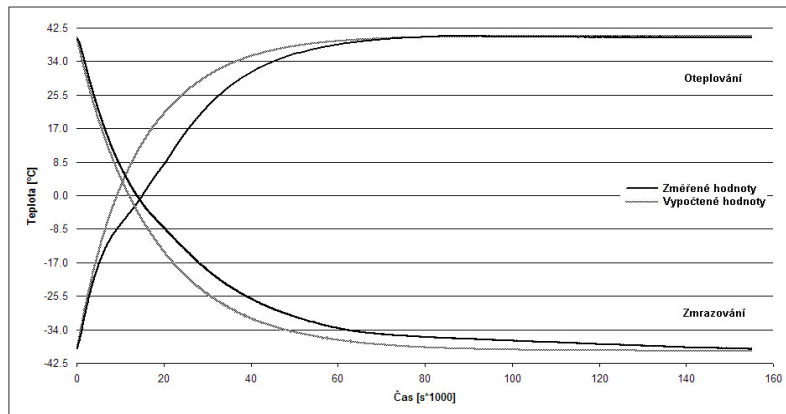
Obr.2 Průběh teploty v těžišti – betonový vzorek se sníženou vlhkostí



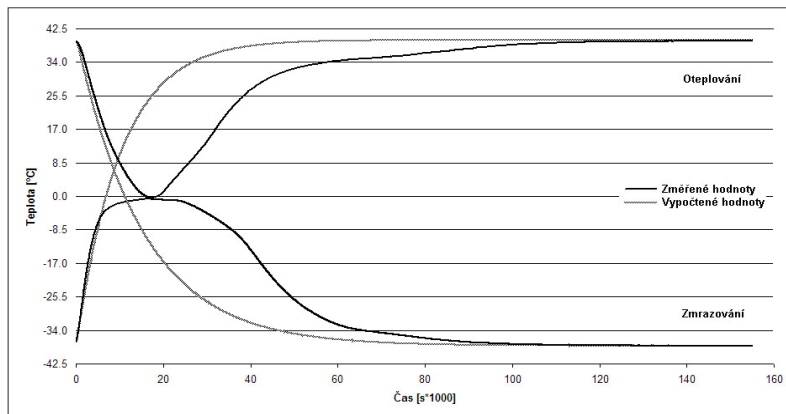
Obr.3 Průběh teploty v těžišti – betonový vzorek o normální vlhkosti



Obr.4 Průběh teploty v těžišti – betonový vzorek se zvýšenou vlhkostí



Obr.5 Průběh teploty v těžišti – cihlobeton se zvýšenou vlhkostí



Obr.6 Průběh teploty v těžišti – Ytong se zvýšenou vlhkostí

## ZÁVĚR

Výsledky přímého měření teplot ve vzorcích pomocí teplotních čidel porovnané se simulací šíření teploty (DELPHIN) vedou k následujícím závěrům:

- Numerický výpočet v programu Delphin dává velmi spolehlivé výsledky při výpočtu šíření teploty v případě teploty prostředí pohybující se v kladných hodnotách nebo při velmi malé vlhkosti vzorku. V případě simulace zmrazování chyba výpočtu roste s velikostí vnitřní vlhkosti vzorků.
- Největší odchylka mezi změřenými a vypočtenými hodnotami byla zjištěna u vzorku z Ytongu s největší vnitřní vlhkostí. Velikost maximální odchylky mezi vypočtenými a změřenými hodnotami je rovna 27,53°C a velikost průměrné odchylky mezi výpočtem a měřením je rovna 6,05°C.
- Program Delphin lze bezpečně používat pro výpočet šíření teploty u vzorků s velmi malou vnitřní vlhkostí nebo pouze při teplotách kdy nedochází ke skupenským změnám vody ve vzorcích, které program Delphin ve svém výpočtu neuvažuje.

## LITERATURA

- [1] ČERNÝ, R.; ROVNANÍKOVÁ, P.: *Transport Processes in Concrete*. Wiltshire – Great Britain, 2002, ISBN 0-415-24264-9.
- [2] PYTLÍK, P.: *Technologie Betonu*. Vysoké učení technické v Brně, Nakladatelství VUTIUM, 2000, ISBN 80-214-1647-5.
- [3] GRUNEWALD, J.: *Documentation of the Numerical Simulation Program DIM3.1*. University of Technology Dresden, 2000