

# VYUŽITÍ ÚLETOVÝCH POPÍLKŮ PRO BETONÁŽ MASIVNÍCH KONSTRUKCÍ ■ UTILIZATION OF FLY ASH FOR MASSIVE CONCRETE STRUCTURES

Vít Šmilauer, Ondřej Zobal,  
Zdeněk Bittnar, Rudolf Hela,  
Roman Snop, Pavel Donát

Pro betonáž masivních konstrukcí se osvědčilo použití betonu s nižším obsahem slinku a velkým množstvím úletového popílku. Článek ukazuje realizaci několika masivních konstrukcí, kde došlo k malému nárůstu teplot během hydratace. Na základě kalibrovaných víceúrovňových virtuálních simulací byl vytvořen a validován jednoduchý nomogram pro stanovení maximálního teplot na masivních prvcích. ■ *Low amount of clinker and high substitution of fly ash were found beneficial for massive concrete structures. Realizations described in this article demonstrate low temperature rise during concrete hardening in several cases. Based on calibrated multiscale virtual simulations, a simple nomogram for maximum temperature was created and validated.*

Využitím vedlejších energetických produktů se zabývá řada odborných specializovaných pracovišť již desítky let. Asociace pro využití energetických produktů (ASVEP) a Teplárenské sdružení ČR (TS ČR) eviduje přibližně 97 % celkové roční produkce všech vedlejších energetických produktů na území České republiky, která činí 13 mil. t/rok (obr. 1). Přesná čísla stále nejsou k dispozici, zejména z důvodu nejasné legislativy vztahující se na tyto produkty. Část je evidována v režimu odpadů, část v režimu stavebních výrobků, případně chemických látek. Z betonářského pohledu je nejdůležitější vysokoteplotní úletový popílek, kterého se vyprodukuje 6,2 mil. t/rok, z toho 6 mil. t/rok z hnědého a 0,2 mil. t/rok z černého uhlí.

Stavebnictví představuje ideální sektor pro hromadné využití těchto druhotných surovin (obr. 2). Velké ekonomické výhody přináší využití popílků přímo na stavbách, při budování silnic, dálnic, letišť, železnic, přehrad a při řadě dalších zemních prací. Za perspektivní oblasti aplikace elektrárenských popílků se dnes považuje zejména výroba pórobetonu, náhrada cementu v betonových směsích a stabilizace zemin.

Obr. 2 ukazuje statistiku využití energetických produktů v ČR dle ASVEP a TS ČR. 59 % energetických produktů se používá zpět na zásyp povrchových dolů. Pro výrobu cementu, betonu, pórobetonu a cihlářských výrobků se používá přibližně 11 % produkce. Zde je stále skryt velký potenciál pro širší využití popílků při výrobě betonu a optimalizaci jeho výsledných vlastností.

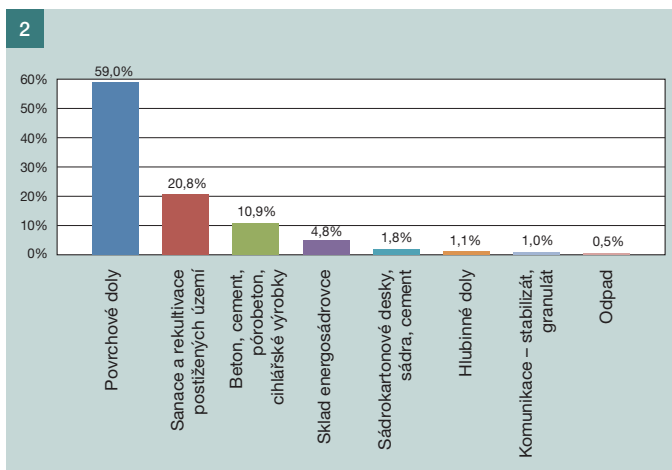
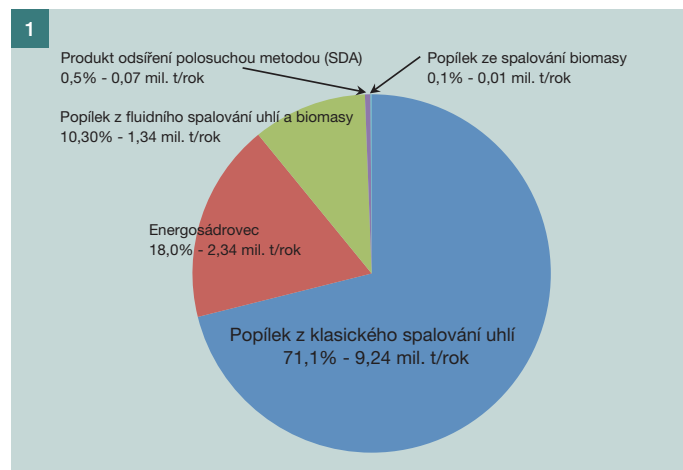
Nejvýznamnějším faktorem značně limitujícím využití energetických produktů v České republice je často si odporující legislativa, např. nejednoznačnost termínů odpad versus výrobek, různé metody hodnocení vlivu na lidské zdraví a životní prostředí vyplývající buď z legislativy vztahující se na odpady, nebo z legislativy vztahující se na výrobky, případně chemické látky. Cílem a strategií v oblasti energetických produktů zůstává náhrada za primární přírodní nerostné suroviny (kámen, vápenc, slínek), ochrana životního prostředí (snížení emisí skleníkových plynů) a využití ekonomických přínosů (zlevnění nákladů ve stavebním průmyslu).

Popílek používaný do betonu musí splňovat parametry, které vyžadují normy EN 450 a EN 12620. Jedná se ze-

jména o množství nespáleného uhlíku, volného CaO, obsahu alkálií, jemnosti a radioaktivity. Popílek také může nahrazovat část cementu dle EN 197-1, kde se u běžných směsných popílkových cementů CEM II dosahuje náhrady slinku 25 %.

Použití popílku v betonu a variabilita jeho vlastností s sebou nese celou řadu technologických změn oproti standardnímu betonu: rozdílná zpracovatelnost, možné odlučování záměsové vody, pomalejší nárůst pevnosti, nižší hydratační teplo, či změna barevnosti povrchu. Z těchto důvodů má popílek pro řadu technologů spíše negativní přínos. Zde je třeba poznamenat, že modernizace technologií spalování a odlučování popílku situaci významně zlepšila a na trh se dostává přesněji definovaný produkt. Přesto nachází úletový popílek uplatnění zejména pro méně náročné betony, které jsou vyráběny ve velkých objemech. Do této kategorie patří zejména masivní betonové konstrukce, jako jsou základové desky, velkopřůměrové piloty, opěrné stěny či přehradní tělesa.

Popílek vykazuje velmi pomalou purolánovou reakci s hydroxidem vápenatým. U standardního úletového popílku s nízkým obsahem CaO zreaguje po 28 dnech okolo 12 % a v 90 dnech 30 % při 25% substituci slinku a vodním součiniteli 0,5 [1]. Přitom dochází k úbytku hydroxidu vápenatého a vzniku purolánového C-S-H gelu za současného snížení kapilární porozity. Tím se vysvětluje dlouhodobý nárůst pevnosti popílkového betonu, jeho zvýšená odolnost v chemicky agresivním prostředí i malá permeabilita.





Obr. 1 Produkce vedlejších energetických produktů v ČR, 2012 ■ Fig. 1 Production of energetic by-products in the Czech Republic, 2012

Obr. 2 Využití vedlejších energetických produktů v ČR, 2012 ■ Fig. 2 Utilization of energetic by-products in the Czech Republic, 2012

Obr. 3 Beton Orlické přehrady ■ Fig. 3 Concrete of the Orlik dam

Obr. 4 Betonáž desky AZ Tower, Brno ■ Fig. 4 Casting of the foundation slab, AZ Tower, Brno



Tab. 1 Charakteristické složení betonů s přísadkou popílků ■ Tab. 1 Characteristic compositions of ash concretes

Složky betonu	Přehrada Orlik, jádrový, C8/10 [2]	HVFA Hawaj C12/15 [3]	HVFA C20/25 [4]	HVFA C40/50 [4]
CEM I <sup>1)</sup> [kg/m <sup>3</sup> ]	90	106	100 až 130	180 až 200
Struska [kg/m <sup>3</sup> ]	40	–	–	–
Popílek [kg/m <sup>3</sup> ]	50	144	125 až 150	200 až 225
Voda [kg/m <sup>3</sup> ]	97,2	100	120 až 130	100 až 120
Jemné kamenivo [kg/m <sup>3</sup> ]	650	945	~800	~800
Hrubé kamenivo [kg/m <sup>3</sup> ]	1 510	1 120	~1 200	~1 200
Voda/pojivo	0,54	0,4	0,4 až 0,45	0,3 až 0,32
$f_{ck,cube}$ 28 dní	10,1	15	25	40
$f_{ck,cube}$ 90 dní	18	25	–	–
$f_{ck,cube}$ 1 rok	23,4	40	40	60
$f_{ck,cube}$ 50 let	38,7	–	–	–

<sup>1)</sup> Hmotnost slínky u směsných cementů

## PŘÍKLADY KONSTRUKCÍ S VYUŽITÍM POPÍLKU

Betony s příměsí popílků a úletového popílků byly použity v celé řadě stavebních konstrukcí. Následující kapitola ukazuje několik realizací, které také slouží k pozdější validaci nomogramu maximálních teplot při betonáži.

### Orlická přehrada

V období výstavby 1956 až 1961 se pro těleso přehrady vyrobilo 923 000 m<sup>3</sup> betonu (obr. 3) [2]. Šlo o jednu z nejnákladnějších staveb té doby s cenou okolo 1 mld. Kčs.

Pro betonáž vnitřního tělesa přehrady Orlik byl použit jádrový beton s příměsí popílků (tab. 1). Struskoportlandský (dříve železoportlandský) cement se dovážel z Králova Dvora. Při betonáži byla změřena maximální teplota uvnitř bloku 40 °C ve třiceti dnech hydratace. Jednalo se o nárůst teploty betonu pouze o 22,5 °C.

### AZ Tower Brno

Beton s příměsí úletového popílků byl použit také při betonáži základové desky nejvyšší budovy v ČR, AZ Tower Br-

no, s nadzemní výškou 111 m. Deska slouží zároveň jako bílá vana rozměrů 92,25 x 60,45 m o tloušťce 0,75 m pod výškovou stavbou a 0,45 m v ostatních částech (obr. 4).

Použit byl beton třídy C25/30 XA2, S3. V receptuře byla použita kombinace černouhelného popílků z elektrárny Dětmárovice v dávkování 80 kg/m<sup>3</sup> současně s jemně mletou granulovanou vysokopecní struskou, cementem CEM I 42,5 a plastifikační přísadou na bázi polykarboxylátu. Kamenivo frakce 0–4 mm bylo těžené prané, hrubé kamenivo frakcí 8–16 a 11–22 mm drcené.

Beton byl navržen na 90denní pevnost s pozvolným náběhem. Tím se dosáhlo redukce teplot během hydratace a eliminace smršťovacích trhlin. Tlakové pevnosti vykazovaly hodnoty v 7 dnech 15,8 MPa, ve 28 dnech 26,4 MPa a v 90 dnech 37,5 MPa.

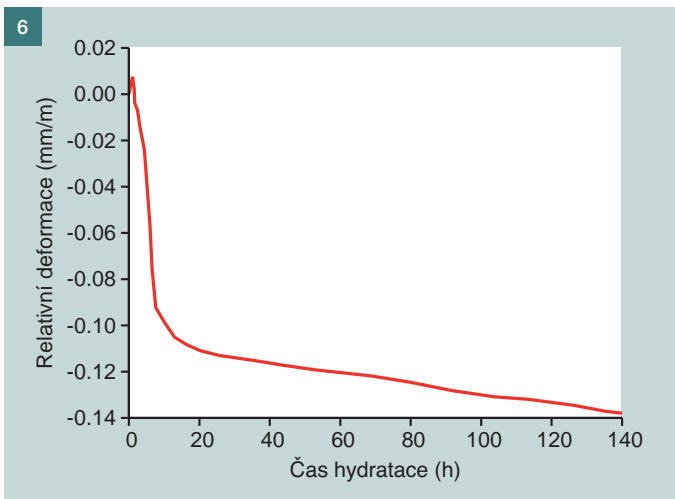
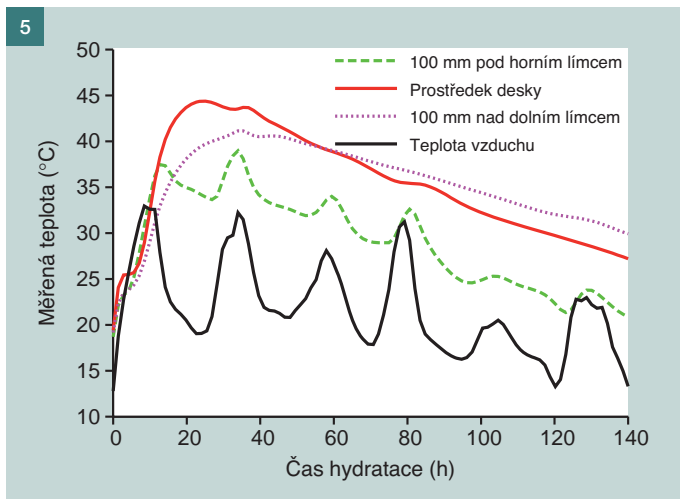
Vzhledem k relativně vysokým teplotám při letní betonáži bylo potřeba omezit teplotu betonu během hydratace a eliminovat velikost objemových změn. Teplotní průběh se měřil ve třech výškových úrovních desky, tj.

ve 100, 375 a 650 mm výšky od horního líce desky. Průběh teplot do šesti dnů je znázorněn na obr. 5, maximální teplota uprostřed tloušťky desky dosáhla 45 °C.

Průběh volného smršťování betonu byl experimentálně měřen na třech hranolech 100 x 100 x 400 mm v laboratoři při okolní teplotě 25 °C. Na hranolech se měřila vzdálenost pevných bodů na povrchu v rozteči 300 mm. Jedná se o spolupůsobení autogenního smršťování (pokud by nedocházelo k odpařování vody z povrchu) a smršťování při vysychání s gradientem vlhkosti. Průměrná hodnota smrštění je relativně malá ve srovnání s betony podobných tříd (obr. 6). Ani detailní prohlídka desky v týdnu po betonáži neodhalila žádné viditelné smršťovací trhliny.

### Základová deska na Hawaji

V roce 1985 byl Malhotrou [9] představen beton s názvem „High Volume Fly Ash“ (HVFA). Podmínkou je náhrada alespoň 50 % hm. slínky popílkem. Nejznámějším příkladem je stavba základové desky hinduistického chrámu



na Hawaji v roce 1999 [3]. Deska 36 x 17 x 1,3 m byla betonována ve dvou vrstvách bez výztuže. Do betonu byl navíc přidán plastifikátor a provzdušňovač (tab. 1). Nárůst teplot během betonáže činil pouhých 13 °C a inspekce po šesti letech neodhalila žádné makroskopické trhliny. Očekávaná životnost desky je přes 1 000 let [3].

**ISOTERMÁLNÍ KALORIMETRIE**

Pro kvantifikaci účinku popílku na hydratační teplo byla provedena série kalorimetrických měření. Cílem bylo zjistit reaktivnost českých popílků a provést následnou kalibraci modelů pro betonáž masivních konstrukcí.

Složení cementových past je shrnuto v tab. 2. Náhražka cementu popílkem byla 0, 25 a 55 % hmotnosti. Použil se úletový popílek do betonu z elektrárny Počerady (EPc), Mělník (EME) a Tušimice (ETu). Vodní součinitel všech past byl konstantní 0,5. Tento součinitel byl zvolen jako kompromis mezi zpracovatelností jednotlivých záměsí. Použitý cement byl Mokrý CEM I 42,5 R ve všech záměsích. Míchání směsí bylo prováděno nejprve ručně po dobu 60 s a poté byl každý vzorek vibrován v třepačce IKA Vortex po dobu 20 s.

Pro určení tepelných toků a integraci uvolněného reakčního tepla byl použit izotermální kalorimetr TamAIR. Obr. 7 zachycuje celkové uvolněné teplo a výsledky jsou normalizovány na gram pojiva, tj. slínku, sádrovce a popílku. Všechny popílkův mírně zvyšují reakční kinetiku do cca 100 h tvrdnutí a potvrzují známý „filler effect“ zvětšené reakční plochy pro heterogenní nukleaci. Nejvíce je tento efekt patrný u jemného popílku ETu sekce 3.

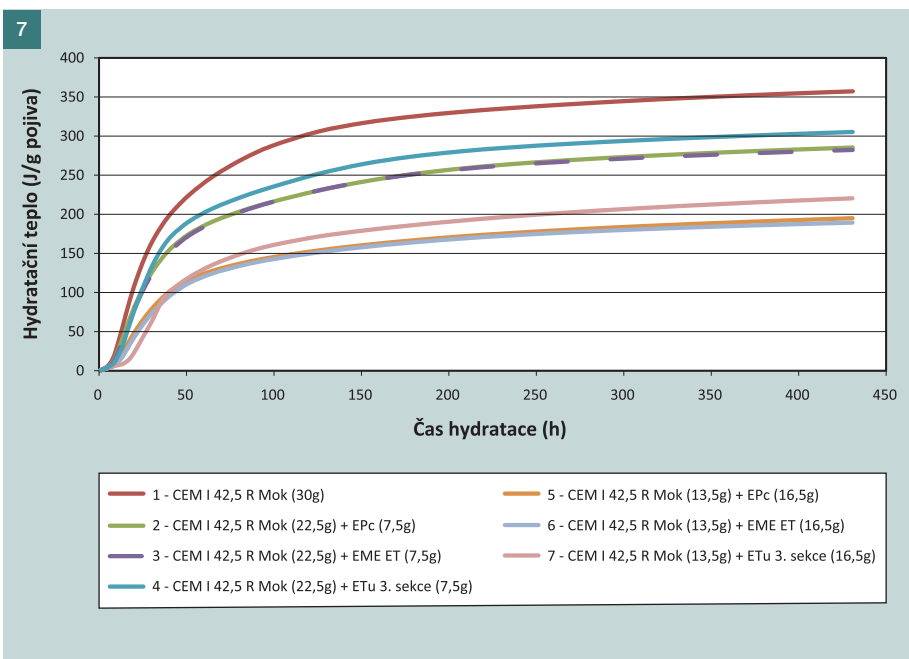
Tab. 3 udává hydratační tepla pro 3, 7 a 18 dní hydratace, která jsou nyní normovaná ke gramu slínku se sá-

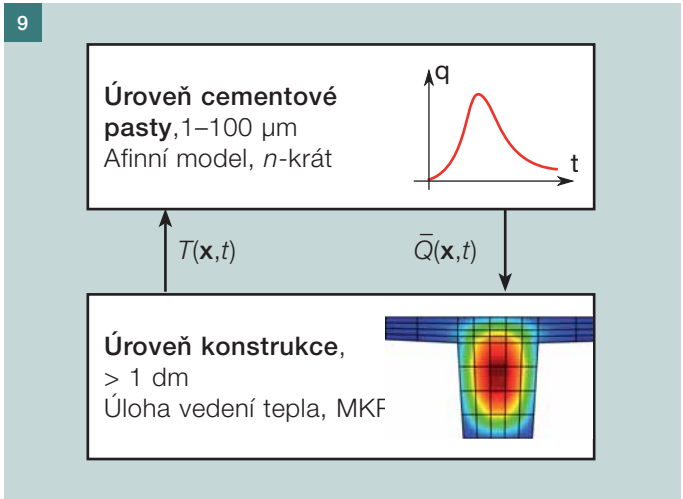
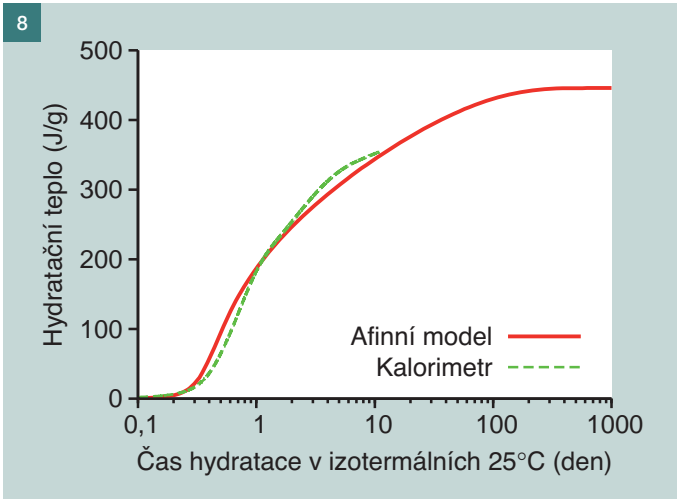
Tab. 2 Složení a navážky pojiv pro izotermální kalorimetr ■ Tab. 2 Binder's compositions for isothermal calorimeter

Označení pojiva	Hmotnost [g]			Hmotnost vzorku v kalorimetru [g]	Hmotnost CEM I v ampuli [g]
	CEM I 42,5 R Mokrý	Popílek	Voda		
1	30	-	15	29,308	29,308
2	22,5	EPc (7,5)	15	27,499	20,624
3	22,5	EME (7,5)	15	28,525	21,394
4	22,5	ETu 3. sekce (7,5)	15	30,586	22,94
5	13,5	EPc (16,5)	15	28,357	12,761
6	13,5	EME (16,5)	15	30,322	13,645
7	13,5	ETu 3. sekce (16,5)	15	29,453	13,254

Tab. 3 Hodnoty hydratačního tepla pro směsné pasty ve 3, 7 a 18 dnech ■ Tab. 3 Hydration heat for blended cements at 3, 7, and 18 days

Označení pojiva	Q <sub>3</sub> [J/g slínku]	Q <sub>7</sub> [J/g slínku]	Q <sub>18</sub> [J/g slínku]
1 - CEM I 42,5 R Mok (30)	258	322	357
2 - CEM I 42,5 R Mok (22,5) + EPc (7,5)	263	330	381
3 - CEM I 42,5 R Mok (22,5) + EME (7,5)	261	330	376
4 - CEM I 42,5 R Mok (22,5) + ETu 3. sekce (7,5)	286	361	407
5 - CEM I 42,5 R Mok (13,5) + EPc (16,5)	294	365	433
6 - CEM I 42,5 R Mok (13,5) + EME (16,5)	287	360	421
7 - CEM I 42,5 R Mok (13,5) + ETu 3. sekce (16,5)	315	408	490





Obr. 5 Průběh teplot na základové desce AZ Tower, Brno | Fig. 5 Temperature evolution in the foundation slab of AZ Tower, Brno

Obr. 6 Laboratorní měření smrštění AZ Tower, Brno | Fig. 6 Measuring shrinkage of the AZ Tower, Brno, in the lab

Obr. 7 Vývoj hydratačního tepla při izotermálních 20 °C | Fig. 7 Evolution of hydration heat at isothermal 20 °C

Obr. 8 Aproximace afinním modelem, Mokrá CEM I 42,5 R | Fig. 8 Approximation by an affinity model, Mokrá CEM I 42.5 R

Obr. 9 Sdružení úrovně cementové pasty s úrovní konstrukce | Fig. 9 Coupling between cement paste and structural levels

rovcem. Popílek mírně zvyšuje uvolněné teplo oproti referenčnímu portlandskému cementu, což nehraje zásadní roli. Tento fakt výrazně zjednodušuje modelování vývoje teplot v tvrdnoucí betonové konstrukci.

**AFINNÍ MODEL HYDRATACE**

Pro modelování množství uvolňovaného tepla během hydratace je potřeba model, který může být kalibrován na různé cementy. Poměrně vhodný se jeví čtyřparametrický afinní model, který je založen na empirické funkci. Nejprve se definuje pojem stupně hydratace  $\alpha(t)$ , který je svázán s množstvím uvolněného tepla z izotermálního kalorimetru dle rovnice

$$\frac{Q_h(t)}{Q_{h,pot}} \approx \alpha(t), \tag{1}$$

kde  $Q_{h,pot}$  je potenciální hydratační teplo, obvykle udávané v J na gram pojiva.  $Q_h(t)$  představuje množství uvolněného tepla v určitém čase hydratace.

Afinita  $A_{25}$  definuje přírůstek stupně hydratace v závislosti na aktuálním stupni hydratace. Pro převod z referenční teploty 25 °C na obecnou izotermální teplotu  $T$  se použije sdružení s Arrheniovou rovnicí ve tvaru

$$\frac{1}{Q_{h,pot}} \frac{\partial Q_h}{\partial t} = \frac{\partial \alpha}{\partial t} = \tilde{A}_{25} \exp \left[ \frac{E_a}{R} \left( \frac{1}{T_{25}} - \frac{1}{T} \right) \right], \tag{2}$$

kde  $E_a$  je aktivační energie, přibližně 40 kJ/mol a  $R$  je univerzální plynová konstanta 8,31447 JK<sup>-1</sup>mol<sup>-1</sup> [5]. Empirická afinní funkce  $A_{25}$  je volena jako čtyřparametrická ve tvaru

$$\tilde{A}_{25} = B_1 \left( \frac{B_2}{\alpha_\infty} + \alpha \right) (\alpha_\infty - \alpha) \exp \left( -\bar{\eta} \frac{\alpha}{\alpha_\infty} \right) \tag{3}$$

s neznámými parametry  $B_1, B_2, \alpha_\infty, \bar{\eta}$ . Výše uvedené rovnice je třeba integrovat numericky v čase pomocí vhodné diferenční substituce [5]. Na obr. 8 je shoda afinního modelu hydratace s výsledky izotermální kalorimetrie pro cement Mokrá CEM I 42,5 R. Při simulaci uvažujeme, že popílek se na počáteční hydrataci nepodílí a směsný popílkový cement lze modelovat pouze jako reagující slinkek s inertní příměsí popílku.

**PROPOJENÍ ÚROVNĚ MATERIÁLU S ÚROVNÍ KONSTRUKCE**

Propojení materiálové úrovně afinního modelu s úrovní konstrukce se děje pomocí přenosu teploty a tepla (obr. 9). Tento víceúrovňový přístup byl detailněji publikován, rozveden a validován [6]. Pro každý integrační bod na konečném prvku existuje samostatný sdružený afinní model.

Na úrovni konstrukce se řeší rovnice vedení tepla ve tvaru [7]

$$-\nabla^T \mathbf{q}(\mathbf{x}) + \bar{Q}(\mathbf{x}, t) = \rho(\mathbf{x})c_v(\mathbf{x}) \frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t}, \tag{4}$$

kde  $\mathbf{q}(\mathbf{x})$  [W/m<sup>2</sup>] představuje tepelný tok,  $Q(\mathbf{x}, t)$  [W/m<sup>3</sup>] představuje známý zdroj hydratačního tepla,  $\rho(\mathbf{x})$  [kg/m<sup>3</sup>] je hustota materiálu,  $c_v(\mathbf{x})$  [Jkg<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>] je měrná tepelná kapacita a  $T(\mathbf{x}, t)$  [K] je pole teplot. K této rovnici kromě počátečních podmínek lze dále definovat různé okrajové podmínky. Nejdůležitější je pravděpodobně Cauchyho podmínkou pro přestup tepla se součinitelem přestupu tepla  $h$  [Wm<sup>-2</sup>K<sup>-1</sup>], který se pohybuje v rozmezí 0 až 31 pro různé typy kontaktu s prostředím [5].

**Vývoj teplot při betonáži pro jednorozměrnou úlohu**

Na základě kalibrovaného afinního modelu pro cement Mokrá CEM I 42,5 R bylo provedeno 150 simulací vývoje teplot při betonáži různě tlustých prvků. Jedná se o jednorozměrnou úlohu vedení tepla s tepelným tokem pouze přes tloušťku prvku, která dobře odpovídá betonáži například dlouhých stěn.

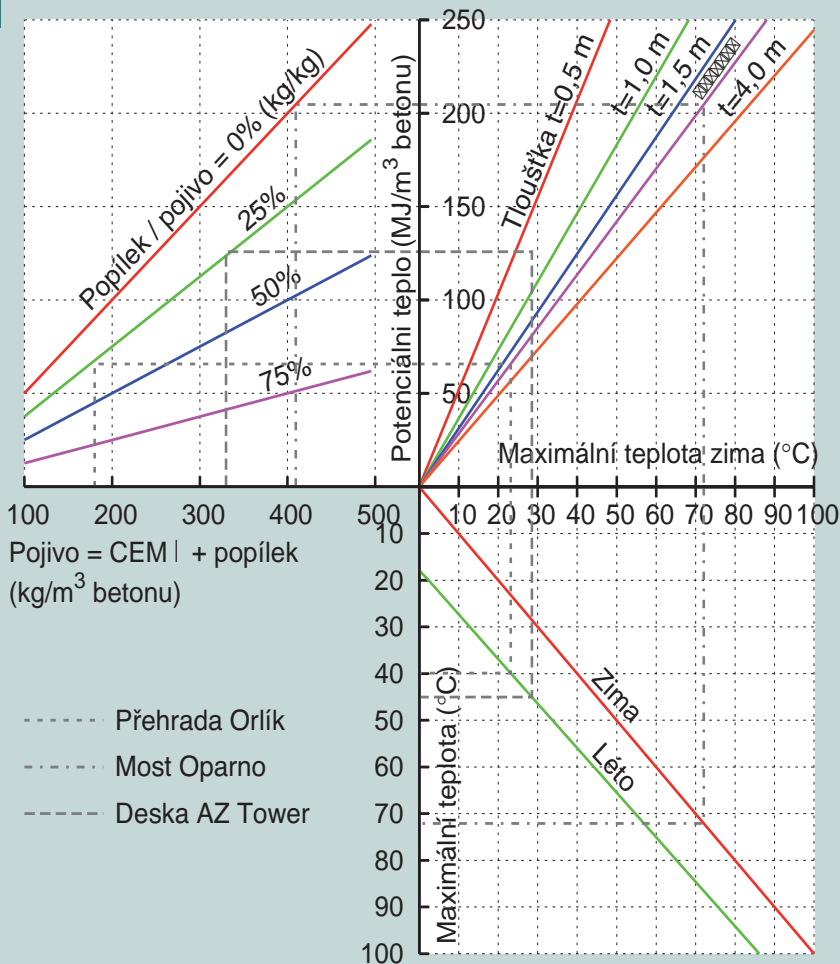
V modelu jsme uvažovali následující parametry:

- množství pojiva 100, 200, 300, 400, 500 kg/m<sup>3</sup> betonu,
- pojivo s  $Q_{pot}$  500, 375, 225 J/g, tyto hodnoty postupně odpovídají číselnému CEM I a substituci popílkem ve výši 25 % a 55 % hm.
- tloušťku betonových prvků 0,5; 1; 1,5; 2 a 4 m,
- betonáž léto či zima s počátečními a okrajovými podmínkami
  - léto: počáteční teplota betonu 20 °C, teplota okolního vzduchu 25 °C,
  - zima: počáteční teplota betonu 10 °C, teplota okolního vzduchu 5 °C.

Dále byly uvažovány standardní parametry: objemová hmotnost betonu 2 500 kgm<sup>-3</sup>, tepelná vodivost 1,7 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>, měrná tepelná kapacita



10



Obr. 10 Nomogram pro určení maximální teploty, cement Mokrá CEM I 42,5 R

Fig. 10 Nomogram for maximum temperature, cement Mokrá CEM I 42,5 R

Obr. 11 Shoda 150 virtuálních simulací pomocí nomogramu

Obr. 12 Teplotní pole, tloušťka 1 m, letní betonáž, 41,4 h

ta betonu  $870 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ , součinitel přestupu tepla  $5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$  (odpovídá např. dřevěnému bednění tloušťky 20 mm).

Výsledky simulací byly převedeny do přehledného nomogramu (obr. 10) s několika předešlymi případy pro validaci.

Odečet začíná na levé horizontální ose, kde se definuje množství pojiva v betonu. Zadá se substituce slinuku popílkem, která snižuje potenciální hydratační teplo betonu. Definuje se tloušťka prvku, přes kterou probíhá

há jednorozměrná disipace hydratačního tepla do okolí. Výsledkem je maximální teplota v zimním období betonáže, která může být přepočtena na letní podmínky. Maximální teplota se nakonec odečte na spodní vertikální ose.

Závislosti v nomogramu na obr. 10 lze zapsat pomocí lineárních rovnic, jejichž parametry byly získány regresí:

$$\text{Potenciální teplo [MJ/m}^3\text{]} = \quad (5)$$

$$= 0,5 \cdot \text{Pojivo [kg/m}^3\text{]} \cdot$$

$$\left( 1 - \frac{\text{Popílek [kg/m}^3\text{]}}{\text{Pojivo [kg/m}^3\text{]}} \right)$$

$$\text{Max. teplota zima [}^\circ\text{C]} = \quad (6)$$

$$= \text{Potenciální teplo [MJ/m}^3\text{]} / (5,17; 3,66; 3,12; 2,84; 2,45)$$

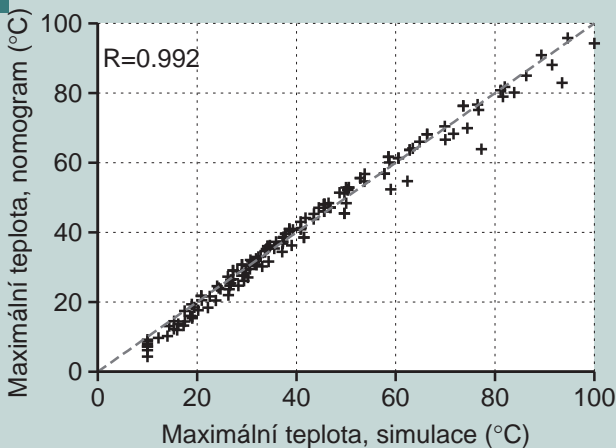
$$\text{Max. teplota léto [}^\circ\text{C]} = \quad (7)$$

$$= 0,954 \cdot \text{Max. teplota zima [}^\circ\text{C]} + 17,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

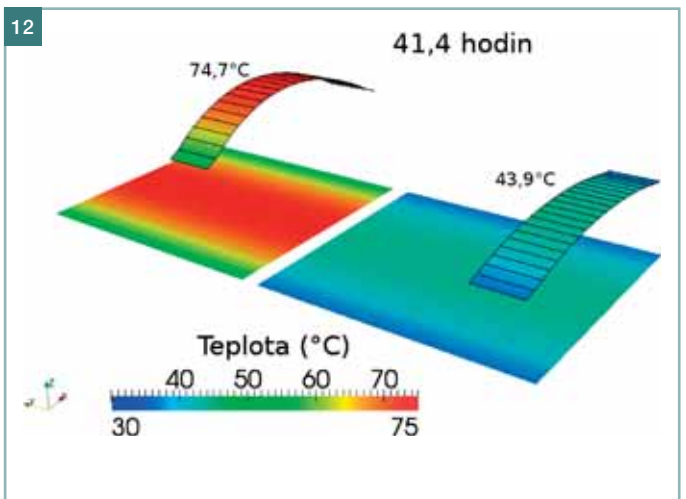
Součin lineárních aproximací z rovnic (5) až (7) a maximální teploty ze simulace vykazuje velmi vysoký Pearsonův korelační koeficient  $R = 0,992$  (obr. 11). Tím se poměrně složitý problém víceúrovňových simulací elegantně zredukuje na jednoduché analytické výrazy. Dosažení maximálních teplot v betonu kolísá pro všechny simulace mezi 0 až 300 h s poměrně složitými aproximacemi, které zde neuvádíme.

Pro ilustraci je na obr. 12 uveden průběh teplotního pole při maximální teplotě betonu. V tomto případě se uvažuje tloušťka prvku 1 m, obsah cementu  $400 \text{ kg/m}^3$ , náhrada cementu popílkem 0 % (vlevo) a 55 % (vpravo) bě-

11



12



## Literatura:

- [1] Lam L., Wong Y. L., Poon C. S.: Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems, *Cement and Concrete Research* 30, 2000, p. 747–756
- [2] Zobal O. et al.: Analýza betonu z tělesa přehrady Orlik po padesáti letech, *Beton TKS* 2/2014, str. 19–25
- [3] Mehta P. K., Monteiro P. J. M.: *Concrete – Microstructure, Properties, and Materials*, 3. ed., 2006 vydal McGraw-Hill Professional, ISBN 9780070636064
- [4] United Kingdom Quality Ash Association: *High Volume Fly Ash Concrete*, Technical Datasheet 1.8, 2012
- [5] Šmilauer V.: *Multiscale hierarchical modeling of hydrating concrete*, Saxe-Coburg Publ., 2014
- [6] da Silva W., Šmilauer V., Štemberk P.: *Upscaling semi-adiabatic measurements for simulating temperature evolution of mass concrete structures*, *Materials and Structures*, 2014, v tisku
- [7] Patzák B. and Bittnar Z.: Design of object oriented finite element code, *Advances in Engineering Software*, 32 (10–11), 759–767, 2001, [www.oofem.org](http://www.oofem.org)
- [8] Šmilauer V., Vítek J. L., Patzák B., Bittnar Z.: *Optimalizace chlazení oblouku Oparenského mostu*, *Beton TKS* 4/2011, roč. 11, str. 62–65
- [9] Malhotra V. M., Ramezani-pour A. A.: *Fly Ash in Concrete*, 2. ed., 1994, vydal CANMET, ISBN 9780660157641

hem letní betonáže. Maximální teploty dosahují 74,7 a 43,9 °C.

Validace nomogramu je provedena pro tři charakteristické stavební konstrukce. Na Orlické přehradě s pojivem 180 kg/m<sup>3</sup> (tab. 1) bylo dosaženo během letních měsíců 40 °C. V našem případě jsme uvažovali železoportland-

ský cement s kinetikou i potenciálním teplem jako CEM I 42,5R a tloušťku betonované vrstvy 2 m. Druhý příklad je betonáž zkušební lamely oblouku mostu přes Oparenské údolí bez chlazení, kdy maximální teplota dosáhla přibližně 75 °C. Uvažovali jsme pouze slínek 409,5 kg/m<sup>3</sup> [8]. Třetím je betonáž základové desky AZ Tower, kdy teplota dosáhla 45 °C. Všechny uvedené příklady dobře validují uvedený nomogram pro stanovení maximální teploty na betonové konstrukci.

## ZÁVĚR

Náhrada slinku popílkem představuje efektivní způsob snížení teplot v masivních betonových konstrukcích. Kalorimetrie prokázala relativně nevýznamný příspěvek popílků k hydrataci slinkových minerálů. Díky tomu se provedlo zjednodušení víceúrovňových simulací pro vývoj teplot betonových konstrukcí, kde se popílek mohl uvažovat jako inertní složka.

Na základě 150 virtuálních simulací byl sestaven nomogram pro předpověď maximálních teplot na betonových konstrukcích. Doufáme, že poslouží nejen technologům pro rychlý odhad teplot a k návrhu optimálních betonových směsí. Současná situace v ČR přímo vybízí k masovějšímu používání kvalitních úletových popílků.

Príspevek vznikl za podpory projektu MPO FR-TI3/757 „Zvýšení potenciálu elektrárenských popílků jako alternativního pojiva pro výrobu ekologicky šetrných cementových kompozitů“ a Centra kompetence TAČR TE01020168.

doc. Ing. Vít Šmilauer, Ph.D.

e-mail: vit.smilauer@fsv.cvut.cz

tel.: 224 354 483



Ing. Ondřej Zobal

e-mail: ondrej.zobal@fsv.cvut.cz

tel.: 224 354 495



prof. Ing. Zdeněk Bittnar, DrSc.

e-mail: bittnar@fsv.cvut.cz

tel.: 224 353 869



všichni: Katedra mechaniky  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Tháškova 7, 166 29 Praha 6

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.  
Ústav technologie stavebních  
hmot a dílců

Fakulta stavební VUT v Brně

Veveří 331/95, 602 00 Brno

e-mail: hela.r@fce.vutbr.cz

tel.: 541 147 508



Ing. Roman Snop

e-mail: roman.snop@cez.cz



Ing. Pavel Donát

e-mail: pavel.donat@cez.cz



oba: ČEZ Energetické  
produkty, s. r. o.

Komenského 534, 253 01 Hostivice

tel.: 211 046 504

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

## Ověřte Vaši konstrukci programem ATENA!

Připojte se ke špičkovým inženýrům, kteří používají počítačovou simulaci pro kontrolu a navrhování bezpečných a spolehlivých staveb.



### Nabízíme:

- jedinečný software pro nelineární analýzu a hodnocení bezpečnosti  
- programy ATENA Engineering, ATENA Science, SARA
- uživatelskou podporu a údržbu
- poradenství v oblasti nelineárních výpočtů a spolehlivosti konstrukcí

### Použití pro:

- budovy, mosty, energetické, vodohospodářské a podzemní stavby
- prostý a vyztužený beton, drátkobeton, vláknobeton
- stanovení šířky trhlin, průhybů, optimalizaci výztuže
- ověření únosnosti, odolnosti, spolehlivosti, zesilování konstrukcí



Objednejte nyní novou  
verzi 5 programu ATENA!

Na Hřebenkách 55 • 150 00 Praha 5 • tel: +420 220 610 018

e-mail: [cervenka@cervenka.cz](mailto:cervenka@cervenka.cz) • web: [www.cervenka.cz](http://www.cervenka.cz)