

# MĚŘENÍ PÓROVÉHO TLAKU V BETONU ZA VYSOKÝCH TEPLOT

Roman Chylik, \*

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.  
roman.chylik@fsv.cvut.cz

## ABSTRAKT

Následující příspěvek se zabývá měřením pórového tlaku v betonu pomocí inovativní, autorem vyvinuté techniky měření. Zprvu shrnuje výsledky 3 nezávislých měření, prováděných pomocí totožného schématu a při snaze o co nejpodobnější okrajové podmínky. Následně je prezentován průběh a výsledky měření na vzorku větších rozměrů, který byl měřen pomocí dvou měřicích zařízení současně.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Pórový tlak • Měření • Vysoké teploty • Odštěpování • Beton • Požár

## ABSTRACT

The following paper deals with the measurement of pore pressure in concrete exposed to high temperature using an innovative, author-developed measurement technique. First, it summarizes the results of 3 independent measurements, performed using the same scheme and in an effort to find the boundary conditions as similar as possible. Subsequently, the process and results of measurements on a specimen of larger dimensions, which was measured using two measuring devices simultaneously, are presented.

## KEYWORDS

Pore pressure • Measurement • High temperatures • Spalling • Concrete • Fire

## 1. ÚVOD

V případě, kdy je beton vystaven působení vysokých teplot, dochází v jeho matici k fyzikálním změnám a transportním procesům spojeným zejména s odpařováním vody ze struktury betonu. Následkem odpařování vody a transportu vodní páry skrze pórový systém betonu je vznik pórového tlaku. Ačkoliv hodnotu pórového tlaku lze určit na základě různých matematických modelů a následky působení pórového tlaku jsou snadno a přímo viditelné případným odštěpováním betonu, je komplikované hodnotu pórového tlaku stanovit experimentálně.

## 2. METODY MĚŘENÍ

Měření pórového tlaku probíhalo podle autorem vyvinuté měřicí techniky. Zprvu byl pórový tlak měřen na jednotlivých

tělesech, avšak naměřené hodnoty se i přes veškerou snahu o totožné provedení měření (poloha vrtu, délka a průměr vrtu, složení betonu, stáří vzorku, vlhkost vzorku, výkon zahřívacího zařízení) značně lišily. Z tohoto důvodu bylo provedeno validační měření pomocí dvou vrtů s manometrem současně.

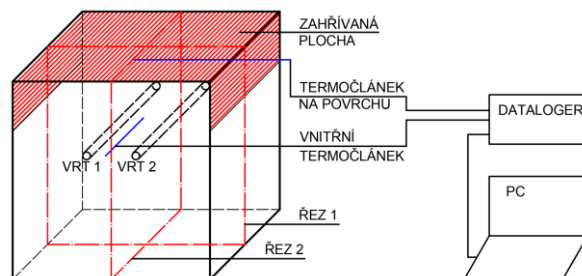
### 2.1. Jednotlivá měření

Na obrázku 4 je uvedeno porovnání 3 jednotlivě provedených měření pórového tlaku v betonu při vystavení vysokým teplotám. Měření probíhalo na krychlich o hraně 150 mm. Sběrný vrt o délce 100 mm a průměru 8 mm se nacházel 30 mm od zahřívajícího povrchu. Vzorek byl před měřením uskladněn ve vodě pro zajištění jeho plné saturace. Pro ověření hypotézy, že naměřené rozdíly lze přisoudit odchylce v pórovitosti a kvalitě betonu, který nebyl vyroben v rámci jedné záměsi, přestože byly vzorky vyrobeny ze shodné receptury.

### 2.2. Validační měření a výpočet teplotního pole

Validační měření bylo provedeno na krychli o hraně 200 mm. Vzorek obsahoval dva vrty délky 100 mm a průměru 8 mm. Osa sběrných vrtů byla 75 mm od zahřívajícího povrchu. Vzorek v průběhu měření je zobrazen na obrázku 2 a naměřené hodnoty pórového tlaku na obrázku 5. Celkové schéma experimentu je znázorněno na obrázku 1.

Kromě měření pórového tlaku byly měřeny i teploty, a to mezi zdrojem teplotního zatížení (keramická dečka) a vzorkem a rovněž i v místě sběrných vrtů. Pro přesnější představu o rozložení teplot napříč vzorkem byl proveden výpočet rozložení teplot v průřezu. V místě zahřívání byla známa teplota – změřena povrchovým termočlánkem mezi zahřívací dečkou a vzorkem a na místě kontaktu se vzduchem byla uvažována počáteční teplota  $T_0 = 20^\circ\text{C}$ . Emisivita materiálu byla uvažována 0,7.



Obrázek 1 : Schéma měření.

\* Školitel: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

Jak lze vidět z obrázku 3 a 4, v průběhu zahřívání v čase  $t = 45$  min nastalo odštěpování vzorku. Jelikož má zahřívací dečka rozměry 200x300 mm a podstava zkušební krychle jen 200x200 mm, docházelo k ohřívání i bočních stěn v délce 50 mm (zahřívaná plocha je znázorněna na obrázku 1). Částečné zahřívání bočních stěn bylo zvoleno cíleně, aby směr prostupu nasycené a částečně nasycené vrstvy směřoval ke sběrným vrtům. Z numerické simulace teplotního pole je patrné, že teplota povrchu v době odštěpování byla v rozmezí 260 – 360 °C.

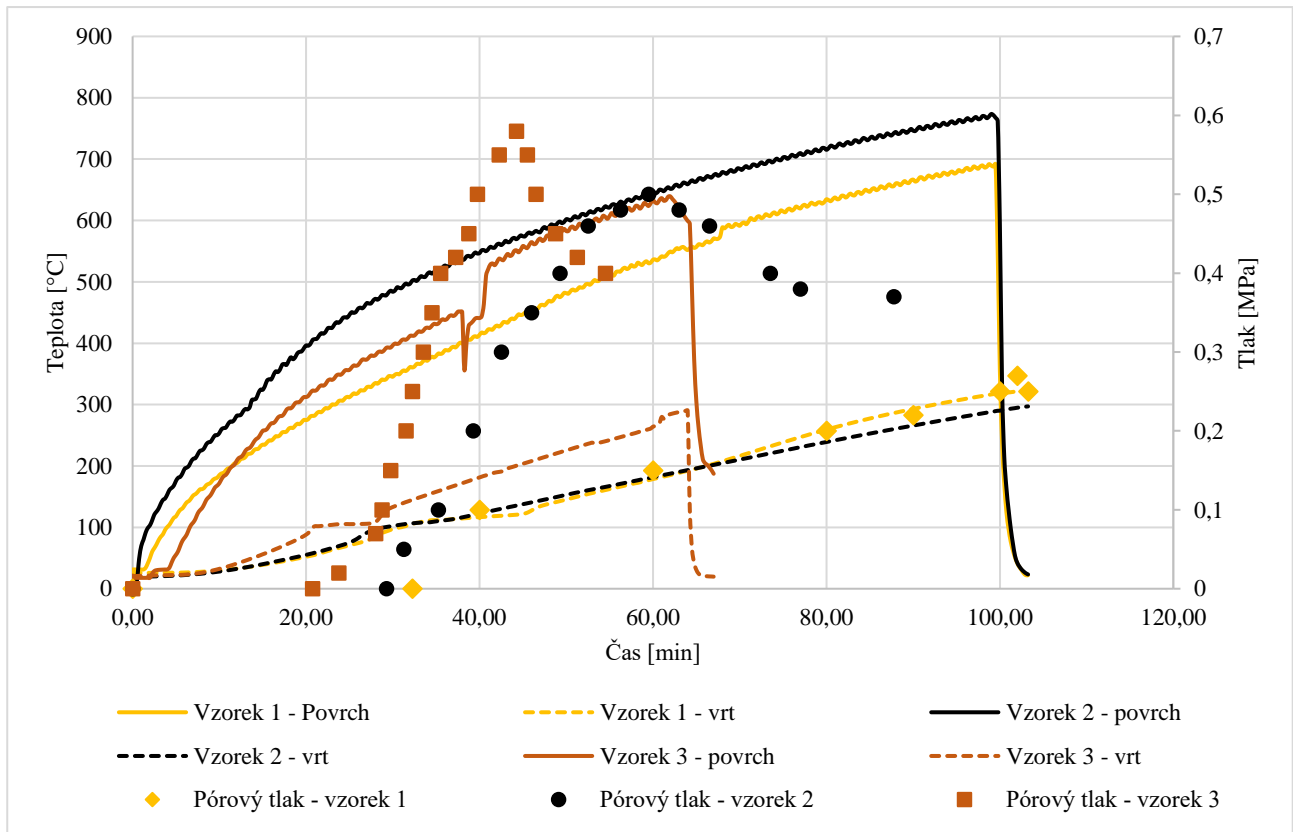


Obrázek 2 : Vzorek během měření

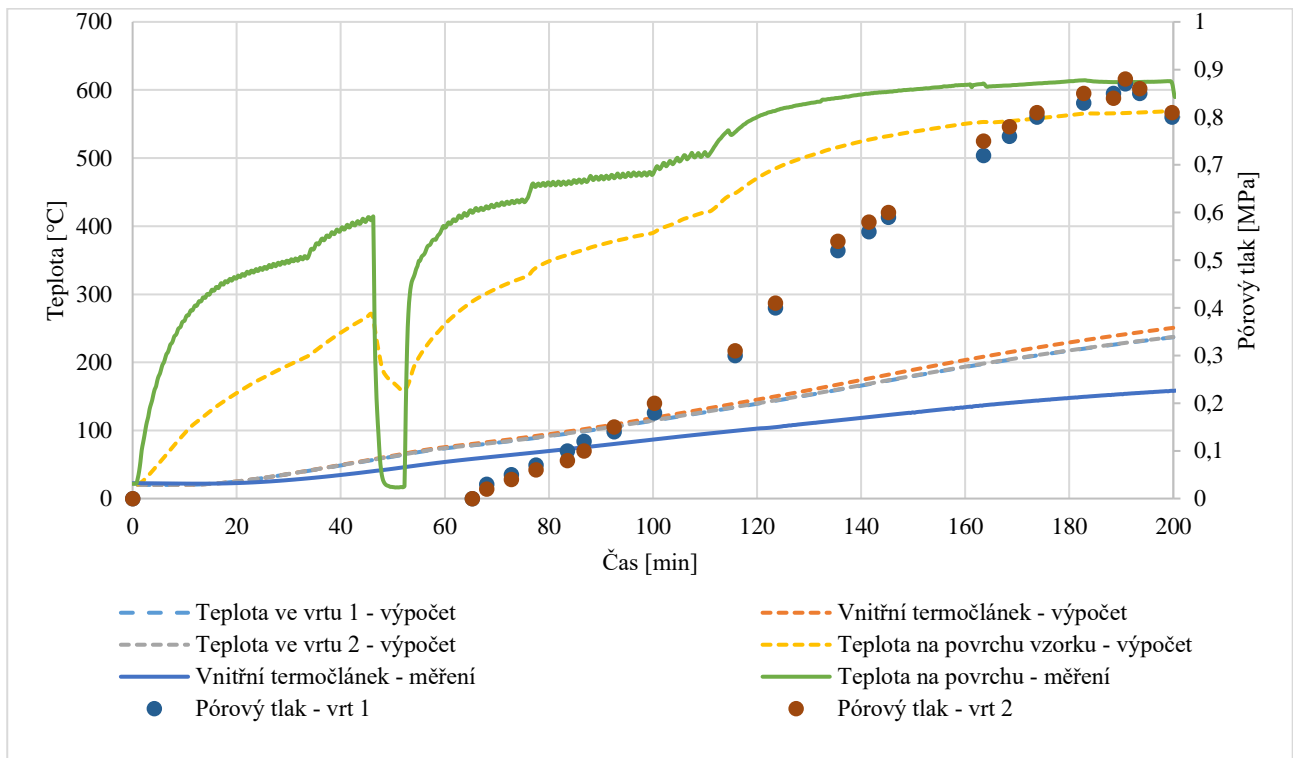
Na obrázku 3 lze pozorovat odštěpené části vzorku spolu s vyznačením jednotlivých řezů, ve kterých byl proveden níže prezentovaný výpočet rozložení teplot v průřezu. Hloubka odštěpeného betonu dosahovala v maximálních hodnotách (hrana krychle) hloubky 12 mm. Změna průřezu betonové krychle po odštěpení byla při výpočtu rozložení teplot ve vzorku zanedbána.



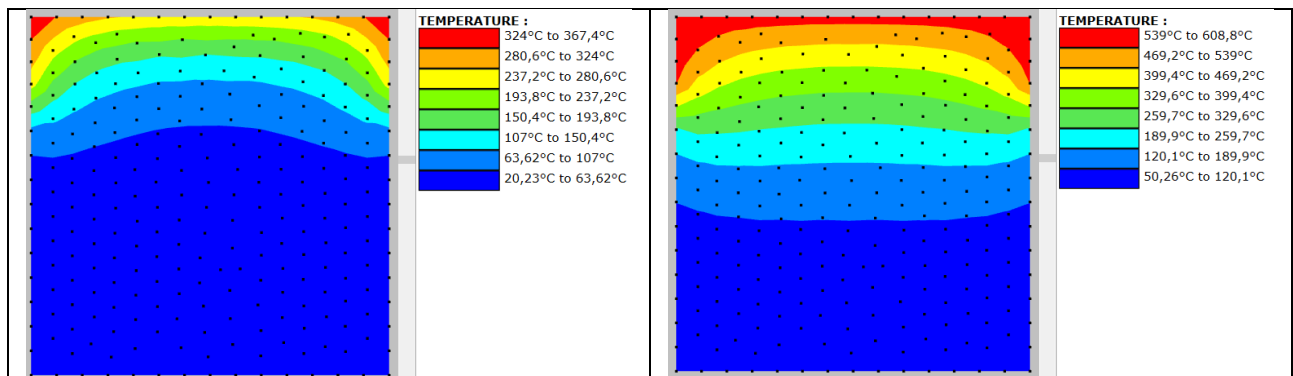
Obrázek 3: Vzorek po odštěpování během zahřívání



Obrázek 4 : Porovnání tří jednotlivých měření pórového tlaku.

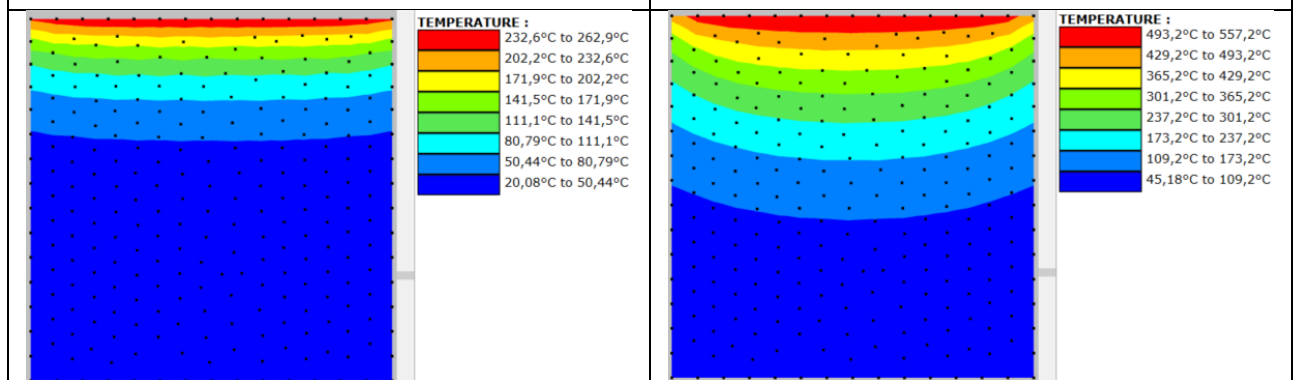


Obrázek 5 : Výsledky validačního měření pórového tlaku na dvou vrtech současně.



Obrázek 6: Rozložení teplotního pole v průřezu v čase odštěpování - řez 1

Obrázek 7: Rozložení teplotního pole v průřezu v době měření maximálních hodnot pórového tlaku – řez 1



Obrázek 8: Rozložení teplotního pole v průřezu v čase odštěpování – řez 2

Obrázek 9: Rozložení teplotního pole v průřezu v době měření maximálních hodnot pórového tlaku – řez 2

\* Školitel: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.

### 3. ZÁVĚR

Sdružené validační měření pórového tlaku pomocí dvou samostatných vrtů v rámci jednoho vzorku ukázalo, že byla dosažena velmi vysoká přesnost a shoda v naměřených hodnotách. Maximální hodnota pórového tlaku dosahovala 0,9 MPa (pro oba vrty). Odštěpování, které nastalo ve 45 minutě zahřívání, probíhalo v rozmezí jedné minuty pro obě odštěpené plochy. Výpočet teploty v průřezu vzorku ukázal, že odštěpování nastalo při teplotě betonu v rozmezí 260 – 360°C, což odpovídá pórovému tlaku < 5 MPa v případě uvažování dokonale izolovaného a plně saturovaného prostředí a výpočtu podle vztahu Hyland & Vexler.

Z porovnání průběhu vývoje pórového tlaku a maximálních dosažených hodnot je zřejmé, že vyvíjená metoda měření pórového tlaku je do značné míry citlivá na okrajové podmínky v průběhu měření. Avšak, probíhá-li měření za podmínek konstantních a na materiálu shodných mechanických a fyzikálních vlastností, lze metodu hodnotit jako přesnou a funkční. Z dosavadně provedených experimentů zaměřených na měření pórového tlaku v betonu vystaveného vysokým teplotám lze konstatovat, že nově vyvíjená měřicí technika má potenciál být jednoduchou a dostatečně přesnou metodou měření, kterou je možné využít pro elementární porovnání hodnoty pórového tlaku.

### PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu SGS22/033/OHK1/1T/11, SGS22/091/OHK1/2T/11 a SGS22/090/OHK1/2T/11

### Reference

- Jeongwon, K., Dongwoo, R., & Takafumi, N., (2011) The spalling mechanism of high-strength concrete under fire. *Magazine of Concrete Research* **vol. 63**, 357-370
- Gyeongcheol, Ch., Gyuyong, K., Minho, Y., Euichul, H., Jeongsoo, N., & Nenad, G. (2019), Effect of moisture migration and water vapor pressure build-up with the heating rate on concrete spalling type. *Cement and Concrete Research*, **vol. 116**, 1-10
- Li, Y., Zhang, D., & Tan, K. H., (2020) On measuring techniques of pore pressure in concrete at elevated temperature. *Cement and Concrete Composites*, **vol. 114**
- Phan, L. T., (2008) Pore pressure and explosive spalling in concrete. *Materials and Structures*, **vol. 41**, 1623-1632
- Tomáš, J., Metody měření pórového tlaku v betonu vystaveném vysokým teplotám *Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické, 2021.*

---

\* Školitel: doc. Ing. Jitka Vašková, CSc.