

# MĚŘENÍ PÓROVÉHO TLAKU V BETONU ZA VYSOKÝCH TEPLOT: POUČENÍ Z PRVOTNÍHO NEÚSPĚCHU

Roman Chylík, \*

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

Pórový tlak v betonu je obecně známý jev, který lze popsat pomocí různých matematických modelů, je jednoduché sledovat jeho následky ve formě odštěpování, ale je relativně komplikované experimentálně změřit jeho hodnotu. Jelikož neexistuje standardizovaný postup pro toto měření, výsledky a získaná data mohou být značně ovlivněna měřicí technikou a tím znemožněno nezkrácené porovnání změřených hodnot. Následující příspěvek se zabývá letným popisem měřících technik a rozdílů, realizací prvotního experimentu, popisem jeho neúspěchu a představuje provedené modifikace, které zapříčinily úspěšné naměření pórového tlaku v betonu za vysokých teplot.

## KLÍČOVÁ SLOVA

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

## ABSTRACT

Pore pressure in concrete is a well-known phenomenon that can be described using various mathematical models, it is easy to observe its consequences in the form of spalling of concrete, but it is relatively complicated to measure its value experimentally. As there is no standardized procedure for this measurement, the results and the obtained data can be significantly influenced by the measurement technique. The following paper deals with a description of measuring techniques and differences during measurement, the implementation of the initial experiment, a description of its failure and presents the modifications that have caused the successful measurement of pore pressure in concrete at high temperatures.

## 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. Následující příspěvek se zabývá porovnáním v současné době používaných a publikovaných metod pro přímé měření pórového tlaku a vyhodnocuje možné příčiny nezdaru realizovaného experimentu.

## 2. OBECNÁ NASTAVENÍ EXPERIMENTU

Nastavení experimentu bylo určeno na základě rozsáhlé rešerše aktuálně prováděných měření. Jelikož měření není v současné době standardizováno, je prováděno dle technických možností a vybavení používaného při měření na daném pracovišti. Tato skutečnost způsobuje značné rozdíly v naměřených hodnotách a minimalizuje možnost vzájemného porovnání výsledků.

Nejvýznamnější rozdíly při měření pórového tlaku jsou v typu teplotního zdroje, tvaru tělesa a způsobu zahřívání zkušební vzorku. Další významné rozdíly v měření spočívají v typu měřidla tlaku a přenosového média.

Následující podkapitoly shrnují základní vybavení přiměřené hodnot pórového tlaku

### 2.1. Teplotní zdroj

Jako teplotní zdroj bývají používány elektrické pece (*Gyeongcheol et al. 2019*), plynové zářiče a pece (*Phan, 2008*) nebo keramické topné desky, jejichž režimy zahřívání lze řídit různými teplotními křivkami.

Volba zahřívací křivky je velmi často závislá dle zvyklostí a preferencí oblasti, ve které měření probíhá, jelikož standardně bývá měření pórového tlaku přidružené měření při ověřování náchylnosti betonové směsi k odštěpování při ověřování požární odolnosti materiálu použitého například na strategicky významné stavby. Při volbě teplotní křivky je důležité vzít také v úvahu případný účel konstrukce, ve které se ověřovaná betonová směs bude vyskytovat a jakému požárnímu scénáři bude vystavena.

Pro měření pórového tlaku se využívají buďto křivky s významným nárůstem teploty, nebo lze alternativně využít pomalého zahřívání, kdy se rychlost zahřívání pohybuje v

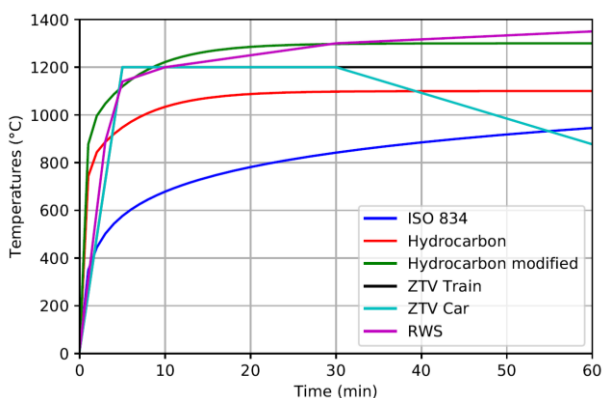
---

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

rozmezí 1°C/min (Gyeongcheol et al. 2019) až 5°C/min (Phan, 2008). Vzhledem k malému teplotnímu gradientu u pomalého zahřívání napříč průřezem je pórový tlak a případné odštěpování způsobeno převážně fázovou změnou skupenství vody a transportní procesy vodní páry napříč vzorkem a vznik plně saturované vrstvy je upozaděn. Volba zahřívání je zpravidla závislá na teplotním zdroji a počtu zahřívání stěn zkoumaného tělesa.



Obrázek 1: Keramická topná dečka



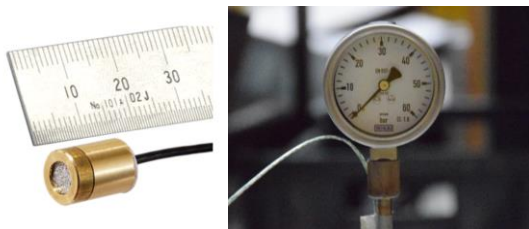
Obrázek 2: Základní požární křivky při měření pórového tlaku a odštěpování

## 2.2. Měřicí sestava

Měřicí sestavu lze rozdělit na 3 základní části a to sběrnou, přenosovou a měřicí.

### 2.2.1. Měřicí část

K měření pórového tlaku jsou používána mechanická měřicí zařízení (manometry) nebo elektronické senzory (Pore pressure transducers) určené k měření pórového tlaku, avšak jejich přesnost a možnost použití je zpravidla limitováno teplotním rozsahem použití. Je tedy vhodné měřicí čidlo nebo zařízení umístit mimo zahřívání vzorek a celý systém doplnit uzavřeným přenosovým systémem.



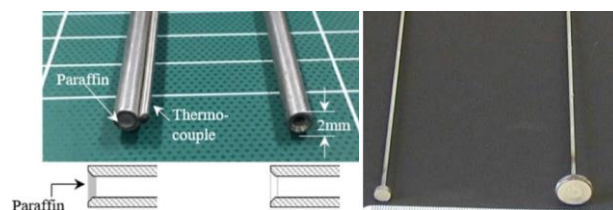
Obrázek 3: Sensor k měření pórového tlaku (vlevo) a manometr připojený na přenosovou trubičku (vpravo)

### 2.2.2. Přenosová část

Přenosová soustava se zpravidla skládá z duté ocelové trubičky vyplněné přenosovým médiem. Přenosové médium bývá nejčastěji silikonový olej, který je vhodný použit na vysokoteplotní aplikace vzhledem k jeho teplotní stálosti. Dle (Li et al. 2020) lze použít jako přenosové médium i vzduch nebo jinou ocelovou trubičku, která působí jako píst.

### 2.2.3. Sběrná část

Významný rozdíl mezi jednotlivými publikovanými pracemi je ve sběrné části měřicí sestavy. Sběrnou částí se rozumí místo, ve které pórový tlak vstupuje do přenosové soustavy. V současné době existují dva základní způsoby provedení sběrné části, a to provedení bez sběrného kalíšku a se sběrným kalískem vyplněným porézním slitutým kovem.



Obrázek 4: Sběrná část měřicí soustavy – trubička bez zakončení (vlevo) (Gyeongcheol et al. 2019) a trubička doplněná sběrným kalískem s porézním slitutým kovem (vpravo) (Phan et al. 2008)

## 3. POPIS PROVEDENÉHO EXPERIMENTU

Na základě provedené rešerše bylo navrženo základní schéma experimentu. Betonové vzorky velikosti 150x300x120 mm byly osazeny přenosovou ocelovou trubičkou průměru 8mm a tloušťky stěny 2mm. Přenosová trubička byla na svém povrchu doplněna pláštovým termočlánkem (obr. 5) pro měření teploty v místě sběrné části. Experiment byl variantně proveden s dvěma přenosovými médii v trubičce (silikonový olej, vzduch).

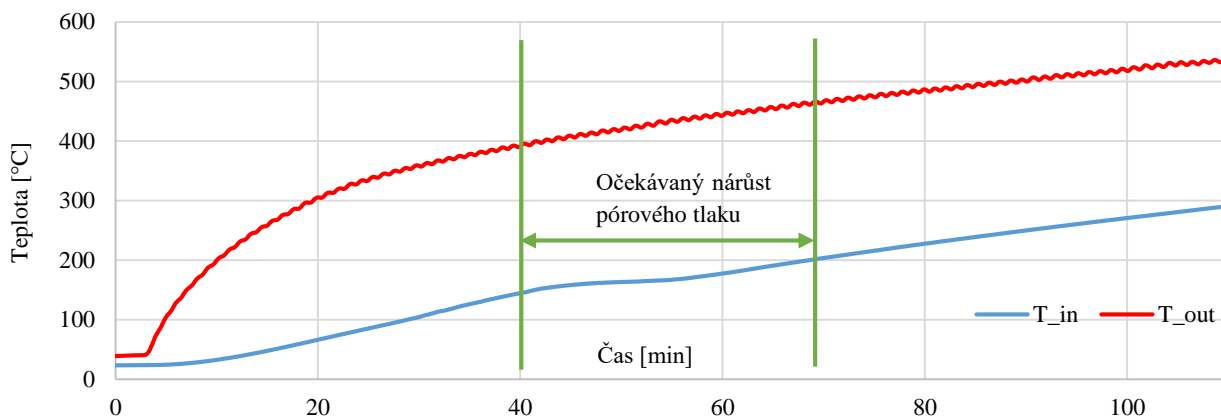
Sběrná část se nacházela 20 mm od zahřívání povrchu. Přenosová trubička byla během betonáže vyplněna drátem o průměru 3,8mm, aby bylo omezeno zanesení přenosové trubičky cementovým mlékem případně drobným kamenivem.

Měření pórového tlaku bylo provedeno pomocí mechanického manometru, který byl umístěn na konci přenosové trubičky mimo vzorek.



Obrázek 5: Zakončení přenosové trubičky s termočlánkem

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



Obrázek 6: Průběh teplot v čase

Na obrázku 6 jsou znázorněny naměřené teploty mezi povrchem vzorku a keramickou topnou dečkou ( $T_{out}$ ) a teploty uvnitř vzorku v oblasti sběrného místa ( $T_{in}$ ) pro jeden ze dvou zahřívavých vzorků.

#### 4. VYHODNOCENÍ EXPERIMENTU

Ačkoliv byl experiment proveden na základě podrobné rešerše, pórový tlak se nepodařilo naměřit. Při vyhodnocování byly stanoveny hlavní příčiny neúspěchu.

##### 4.1. Zakončení přenosové trubičky

Přenosová trubička nebyla ukončena sběrným kalíškem ani porézním kovem. Toto provedení je možné a běžné (*Li et al. 2020*), avšak dochází k omezení plochy, ze které je pórový tlak měřen. Dále je bez použití sběrného kalíšku vnesena značná náhodnost měřené oblasti, jelikož beton nelze považovat za materiál homogenní. Rovněž bylo při odbedňování vzorků detekováno zatečení cementového mléka do přenosové trubičky.

##### 4.2. Délka přenosové trubičky

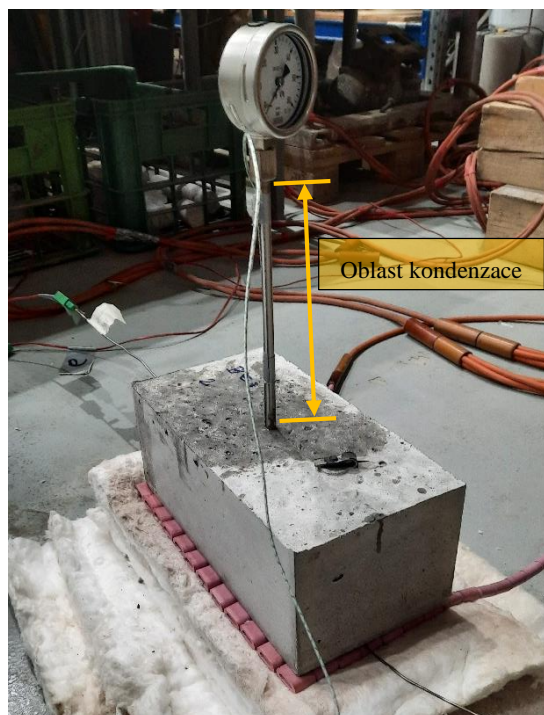
Za nevyhovující byla dále vyhodnocena délka přenosové trubičky. Trubička byla mezi vzorkem a manometrem ochlazována. V případě, kdy byla trubička naplněna vzduchem, docházelo ke kondenzaci vodní páry na vnitřním povrchu trubičky, čímž byl eliminován nárůst tlaku. Ve variantě, kdy byla přenosová trubička naplněna olejem, bylo pozorováno snížení hladiny a vznik volného prostoru ke kondenzaci vodní páry. Oblast kondenzace je znázorněna na obrázku 7.

##### 4.3. Chybějící izolace na povrchu vzorku

Jelikož v doposud prezentovaných měřeních probíhal ohřev vzorku v elektrických nebo plynových pecích, byly zkušební vzorky zahřívány po celém povrchu nebo z jedné strany s tím, že zbylé hrany byly izolovány. Jelikož vodní pára putuje materiálem ve směru největšího teplotního gradientu, chybějící tepelná izolace na povrchu vzorku ovlivnila rozložení teplot, vodní pára unikala povrchem vzorku, nedocházelo k hromadění vodní páry v pórovém systému a vzniku nasycené vrstvy vlivem transportu vodních par.

#### 4.4. Nedostatečný teplotní gradient zahřívání

S ohledem na použité zahřívací zařízení nebylo dosaženo běžně využívaných teplotních křivek, avšak rychlost zahřívání má vliv zejména na změřenou hodnotu pórového tlaku, ne však na jeho výskyt.

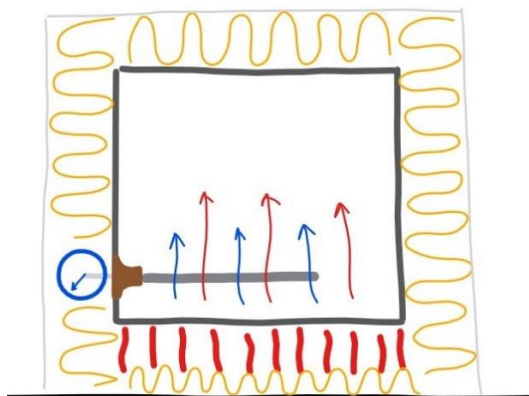


Obrázek 7: Vzorek během měření pórového tlaku

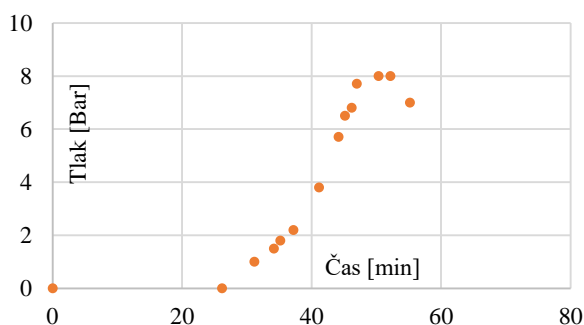
#### 5. UPRAVENÝ EXPERIMENT

Na základě výše uvedených poznatků došlo k úpravě prováděného experimentu s ohledem na dostupné technické vybavení. Zvláštní pozornost byla věnována právě provedení sběrného místa pórového tlaku a minimalizaci přenosové části měřící soustavy. Bylo navrženo inovativní, doposud nepublikované řešení, které spočívalo v umístění fitinku s vnitřním závitem do tělesa při betonáži a následné provedení vrtu, který je vodorovný s rovinou zahřívání vzorku (sběrný vrt se nachází v isotermě a isobaře). Toto řešení umožňuje

volit délku a průměr vrtu, čímž je ovlivněna plocha, ze které je pórový tlak měřen. Toto řešení vede k eliminaci vlivu nehomogenity betonu v místě měřeného místa. Schéma upraveného experimentu je znázorněno na obrázku 8.



Obrázek 8: Schéma upraveného experimentu



Obrázek 9: Naměřený pórový tlak v betonu

Na obrázku 9 je prezentován prvotní záznam z úspěšného měření pórového tlaku betonu za zvýšených teplot. V současné době probíhají další modifikace provedení experimentu, aby nebyly naměřené výsledky ovlivněné technologickými vlivy, ale jen rozdíly ve fyzikálních vlastnostech testovaných betonových směsí.

## 6. ZÁVĚR

Prezentovaný článek se zabýval zejména neúspěchy při měření pórového tlaku v betonu za zvýšených teplot. Ačkoliv prvotní provedení experimentu bylo stanoveno na základě prací prezentovaných v zahraničí, měření nebylo úspěšné. Tato skutečnost ukázala potřebu přizpůsobit techniku měření technickému vybavení pracoviště, ale zejména poukázala na potřebu mezinárodní standardizace a sjednocení měřicího postupu, aby bylo vypovídající porovnání měřených hodnot. V závěru článku je prezentováno upravení experimentu optimalizované pro technologické možnosti používaného vybavení, které vedlo k úspěšnému změření pórového tlaku v betonu za zvýšených teplot.

## PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl za finanční podpory projektů SGS19/149/OHK1/3T/11, SGS20/109/OHK1/2T/11 a SGS21/040/OHK1/1T/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.*