

# VYUŽITÍ METODY ZRALOSTI PRO STANOVENÍ PEVNOSTI BETONU NA REÁLNÝCH STAVBÁCH ■ UTILIZATION OF THE MATURITY METHOD TO SET THE STRENGTH OF CONCRETE AT REAL STRUCTURES

Pavel Kasal, Václav Lorenc,  
Radek Syka

Článek popisuje základní princip metody zralosti, resp. systém Concremote pro monitorování pevnosti v tlaku betonu založený na této metodě, a čtyři projekty, při jejichž realizaci byl tento systém využit v praxi. ■ This paper describes basic principles of maturity method or the Concremote system to monitor compressive strength of concrete based on this method and four projects where this monitoring system was used.

Stanovení pevnosti v tlaku betonu raného stáří je užitečné zejména pro určení správného času pro činnosti ve stavebním procesu, které jsou důležité s ohledem na harmonogram stavby. Pomocí systému měření, který využívá metodu zralosti pro monitorování tlakové pevnosti betonu v reálném čase, je na staveništi možné stanovit vhodný čas pro odbednění, posunutí šplhacího bednění, zatížení konstrukce, vnesení předpětí či ukončení ošetřování. Proces výstavby železobetonových konstrukcí je tak možné optimalizovat z hlediska bezpečnosti, kvality, času i financí. Lze např. zkrátit dobu jednoho cyklu, příp. použít méně bednění a ušetřit tak náklady na stavbu.

## METODA ZRALOSTI

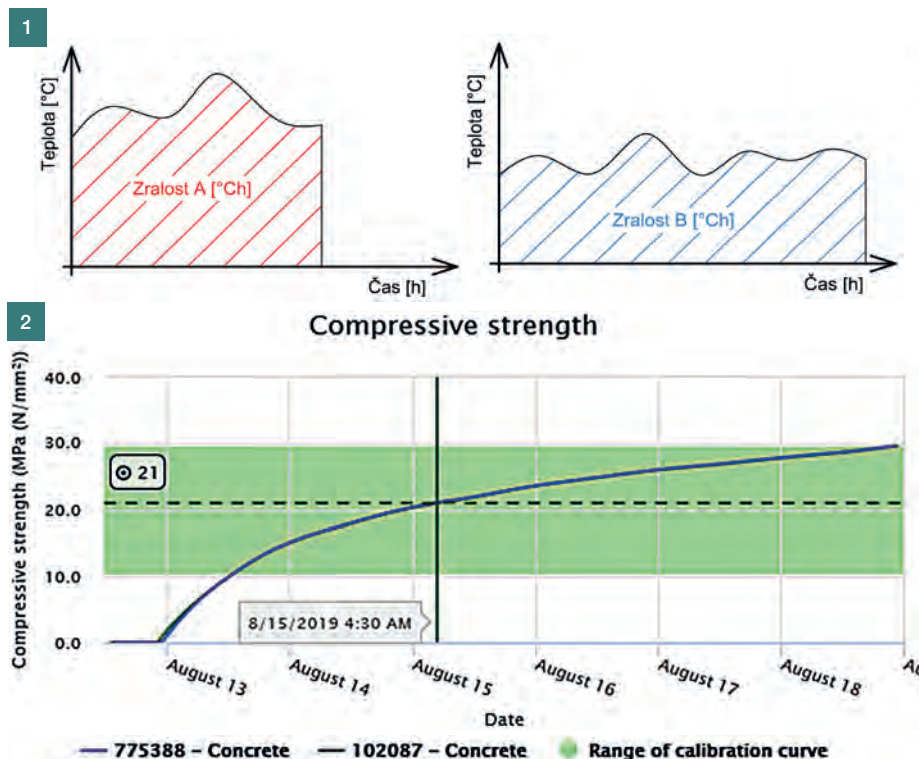
Metoda zralosti je nedestruktivní metoda, která umožňuje stanovit hodnoty pevnosti v tlaku betonu raného stáří. Využívá jednoduchého vztahu – přímé úměry – mezi pevností betonu v tlaku a teplotní historií. Při použití metody zralosti se předpokládá, že vzorky ze stejné betonové směsi, které mají srovnatelnou zralost, budou vykazovat i srovnatelných hodnot pevnosti v tlaku, a to nezávisle na rozložení teplot v čase. Princip metody a toto tvrzení ilustruje obr. 1. [1], [2]

Před použitím metody zralosti je potřeba provést kalibraci pro konkrétní betonovou směs, jejímž cílem je získat vztah mezi pevností betonu v tlaku a zralostí betonu. Kalibrace se provádí v laboratoři pomocí šesti zkušebních těles z betonové směsi, která bude použita na staveništi. Po zhotovení zkušebních těles se v pravidelných intervalech měří a zaznamenává jejich teplota v čase od uložení. Dle stanoveného rozvrhu je na lisu v různých časech od uložení zkoušena pevnost v tlaku zkušebních těles. Na základě naměřených teplot a pevností na zkušebních tělesech s různou zralostí (tedy i s různým časem od vytvoření vzorků) je možné za pomoci metody zralosti vynést výslednou kalibrační křivku. Kalibrační křivka

je zakreslená v grafu, kde je na svislé ose pevnost v tlaku a na vodorovné ose v logaritmickém měřítku zralost. Jedná se tedy o vztah mezi pevností v tlaku, která je následně metodou stanovována, a zralostí, kterou lze jednoduše spočítat na základě měření teploty v čase. Kalibrace musí být provedena pro všechny konkrétní receptury betonové směsi, u kterých bude používána metoda zralosti pro stanovení pevnosti v tlaku. Složení betonové směsi nesmí být po kalibraci měněno.

## De Vree

Mezi tři nepoužívanější metody zralosti patří Nurse–Saul, Arrhenius a De Vree. Všechny tyto metody vycházejí ze základního předpokladu, že je pevnost betonu v tlaku přímo úměrná stáří a teplotní historii. Liší se ostatními parametry, které se vztahují k vlastnostem



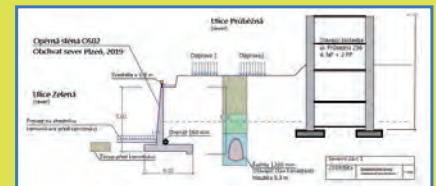
1 Princip metody zralosti 2 Příklad výsledků měření v reálném čase na webovém portále 3 Concremote: a) stropní senzor druhé generace s kolébkou pro nabíjení, b) kabelový senzor druhé generace s kolébkou pro nabíjení 4 Stěnové čidlo osazené na bednění ■ 1 Principle of maturity method 2 Example of real-time results of measurements on the webportal 3 Concremote: a) slab sensor generation 2.0 with a charging cradle, b) cable sensor generation 2.0 with a charging cradle 4 Wall sensing element fixed to the formwork



- Statické výpočty a posouzení, betonových, ocelových, dřevěných a zděných konstrukcí.
- Podpora Eurokódů včetně národních příloh pro Českou republiku a Slovensko.
- Cenově dostupné programy.
- Jednoduché ovládání.
- Přehledné a plně editovatelné výstupy.
- BIM a spolupráce s ostatními programy.

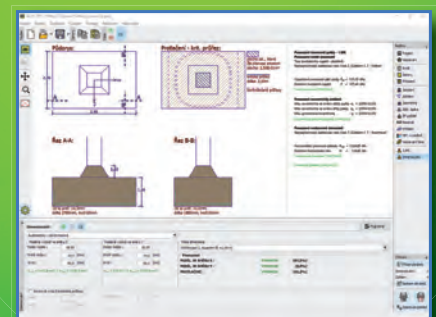
### Edice 2020 přináší funkci Popisky do GEO5 a FIN EC.

Nově lze kreslit čáry, kružnice, křivky, polygony, případně vytvářet rozpisky a komentáře.



## GEO5

Geotechnické programy



- Posouzení základů, zdí, stability svahů, pilot, pažení, výpočty tunelů, atd.
- Zpracování geologické dokumentace vrtů, sond a tvorby řezů včetně digitálního modelu terénu.
- Jednoduché uživatelské prostředí.



betonu. Odlišnost spočívá také v přesnosti a složitosti výpočtu. [1], [2]

Vzhledem k přesnosti a zároven jednoduhosti je v Evropě velmi často používána metoda De Vree, označovaná také jako vážená zralost. Byla vyvinuta v roce 1970 v Holandsku a do nynější podoby dále upravena v roce 1979. [1], [2] Platí u ní vztah:

$$M_w = \sum_0^t \frac{10(C^{0,17-1,245} - C^{-2,245})}{\ln C} \Delta t \quad (1)$$

kde  $M_w$  je vážená zralost [°Ch],  $T$  průměrná teplota [°C],  $C$  konstanta cementu [-] a  $\Delta t$  časový interval [h].

Konstanta  $C$  zahrnuje citlivost cementu na teplotu betonu. Tato konstanta se stanovuje experimentálně podle postupu uvedeného v holandské normě NEN 5790 a obvykle je možné získat její hodnotu od dodavatele betonu. Hodnoty této konstanty se pohybují přibližně v rozsahu 1,15 až 1,65. Nízká hodnota znamená nízkou citlivost cementu na teplotu betonu, která je typická např. pro beton s portlandským cementem. [1], [2]

### PRAKTICKÉ VYUŽITÍ METODY

Metoda zralosti, ve většině projektů konkrétně metoda De Vree, je v praxi využívána systémem Concremate. Hlavními součástmi tohoto systému jsou měřicí zařízení a webový portál. Měřicí zařízení-senzor provádí záznam teploty v čase a odesílá zaznamenaná data na server, kde dochází k vyhodnocení dat, resp. výpočtu pevnosti betonu v tlaku na základě předem provedené kalibrace pro konkrétní použitou betonovou směs. Uživatel tak má na webovém portálu v reálném čase k těmto datům přístup prostřednictvím počítače či chytrého telefonu odkudkoliv. Je tedy možné sledovat vývoj pevnosti v tlaku (obr. 2) či teplotu betonu a na základě těchto informací učinit rozhodnutí a řídit stavební práce jako např. odbedňování, předpínání či ošetřování.

Kromě měření umožňuje tento systém i předpověď vývoje pevnosti na základě teplot zadaných uživatelem nebo porovnání vývoje pevnosti různých nakalibrovaných betonových směsí při různých teplotních scénářích.

Dalšími možnostmi použití systému je měření teplotních rozdílů u masivních konstrukcí z důvodu eliminace trhlin a monitorování zralosti pohledového betonu za účelem dosažení srovnatelného barevného odstínu.

### STROPNÍ A KABELOVÉ SENZORY

Stropní a kabelové senzory zajišťují měření a odesílání naměřených teplot v čase. Standardně nastavený senzor zaznamenává teplotu každých 10 minut a data odesílá každých 60 minut. Senzor zaznamenává teplotu betonu i teplotu okolního prostředí. Pro výpočty slouží teplota betonu, teplota prostředí je měřena kvůli lepšímu přehledu o situaci na stavbě a interpretaci výsledků.

Stropní senzory (obr. 3a) se po aplikaci odbedňovacího oleje na jejich dolní část pokládají na právě uložený beton. Teplotní senzor pro teplotu betonu je umístěn v ocelovém kuželu v dolní části. Výhodou druhé generace senzorů je dobíjecí baterie, LED dioda s indikací stavu senzoru, podpora 3G, 4G a možnost stažení dat pomocí bluetooth v prostředí bez mobilní sítě, např. při výstavbě tunelů.

Při použití kabelových senzorů (obr. 3b) je nutné připojit stěnové čidlo (obr. 4) či měřicí kabel. Stěnové čidlo se připevňuje na stěnové a šplhací bednění. Teplota je snímána v rovině překližky přes vyvrtaný otvor. V případě měření masivních konstrukcí či u jiných aplikací, kde je třeba měřit v konstrukci, se využívají ztracené měřicí kabely s jedním či třemi měřicími body. Senzory druhé generace jsou schopny pracovat s kabely, které mají až šest měřících bodů.

## PŘÍKLADY REALIZOVANÝCH PROJEKTŮ

Tato kapitola popisuje čtyři z více než tisíce projektů, při jejichž realizaci byl monitorovací systém využit. V příkladech jsou zastoupeny dvě mostní konstrukce a jeden domov seniorů realizovaný v Německu a jedna administrativní budova realizovaná v České republice. Hlavním důvodem použití monitorovacího systému v těchto projektech bylo dosáhnout zkrácení doby výstavby a úspory financí při realizaci stavby. To bylo možné díky řízení procesů výstavby na základě údajů o pevnosti v tlaku betonu u realizovaných konstrukcí v reálném čase.

### Mostní konstrukce, Petersdorfer See, Německo

Prvním příkladem je mostní konstrukce, která je součástí dálnice A19 a vede přes jezero Petersdorfer nacházející se mezi Rostockem a Berlínem (obr. 5). Jedná se o spřaženou ocelobetonovou konstrukci, celková délka mostu je 264 m. Tento most musel být kvůli poškozené ocelové konstrukci přestavěn. Rekonstrukce byla rozdělena na dvě části, na jednu část mostu byl převeden provoz a na druhé probíhala rekonstrukce. Západní část dálničního mostu vedoucího jižním směrem byla se zpožděním dokončena v červenci 2018.

V srpnu 2018 začaly demolice a zakládání druhé, východní části dálničního mostu vedoucí na sever. Vzhledem k tomu, že při výstavbě západní části mostu došlo ke zpoždění, bylo třeba dobu výstavby východní části oproti původnímu plánu zkrátit.

Kromě navrženého řešení bednění pro rychlou výstavbu byl zde použit také Concremate. Původně chtěla stavební firma Johann Bunte Bauunternehmung GmbH & Co. KG systém

vyzkoušet jen pro monitorování pevnosti betonu v reálném čase, ale po zjištění možnosti úspory času byl nasazen po celou dobu výstavby.

Na základě statických požadavků bylo nutné, aby beton předchozího pracovního záběru, předtím než byla zahájena betonáž následujícího pracovního záběru, vykazoval pevnost v tlaku 22,5 MPa (to odpovídá 50 % hodnoty pevnosti po 28 dnech). Hlavním důvodem použití monitorovacího systému nebylo tedy monitorování pevnosti betonu kvůli rychlému odbednění, ale kvůli zahájení betonáže na následujícím pracovním záběru.

Stavbyvedoucí a zástupce investora byli s monitorovacím systémem spokojeni, protože se jim díky jeho použití podařilo držet plánovaný harmonogram prací.

### Mostní konstrukce Seckachtal, Adelsheim, Německo

Druhým příkladem je mostní konstrukce Seckachtal, která je součástí silnice B292 a nachází se nedaleko města Heilbronn (obr. 6). Jedná se o jednokomorový most o pěti polích a celkové délce 290 m.

Výstavba mostu byla rozdělena na třicetimetrové pracovní záběry, které byly vysouvány přes čtyři pilíře. Zásadním problémem byl postup posunu, který byl ovlivněn složitou geometrií mostu. Z důvodu úspory času se účastníci stavby rozhodli použít monitorovací systém již během přípravné fáze projektu. Hlavním cílem byla tedy optimalizace času pracovního záběru.

Pro monitorování pevnosti betonu v oblasti kotvení dodatečně předpínaných kabelů byly použity kabelové senzory v kombinaci s kabely se třemi měřicími body. Díky nasazení monitorovacího systému se podařilo ušetřit

1,5 dne u jednoho pracovního záběru a projekt byl dokončen dříve, než se očekávalo.

### Domov seniorů AWO Föhrenpark, Mnichov, Německo

Třetím příkladem je domov seniorů v borovicovém parku s kapacitou 133 míst v Mnichově, který realizovala firma Zechbau ve sdružení s firmou Glöckle v roce 2016 až 2017 (obr. 7). Pětipodlažní budova má komplikovaný půdorysný tvar, který dokonale zapadá do okolní krajiny.

Z důvodu zpožděného začátku výstavby bylo třeba proces výstavby železobetonových konstrukcí zrychlit. Prostor pro skladování stavebního materiálu byl značně omezen, protože je budova obklopena parkem. Cílem stavební firmy bylo efektivní využití stropního bednění s minimálními nároky na skladování a bez časové prodlevy.

Během přípravy projektu bylo stanoveno potřebné množství 1 800 m<sup>2</sup> stropního bednění na 13 000 m<sup>2</sup> stropů. Byla provedena kalibrace dvou letních a jedné zimní betonové směsi. Na stavbě byly použity tři stropní senzory.

Po optimalizaci projektu s použitím monitorovacího systému byla potřebná plocha bednění snížena na přibližně 1 100 m<sup>2</sup> a bylo tedy možné ušetřit přibližně 30 % nákladů za stropní bednění. Stavební firma původně předpokládala odbedňování stropních konstrukcí po 6 až 7 dnech. S použitím monitorovacího systému se tento čas podařilo zredukovat na 3 dny. Výsledkem tak bylo urychlení stavby o 6 týdnů.

Cena za Concremate na této stavbě činila cca 9 000 euro a úspora nákladů byla vyčíslena na šestimístnou sumu v eurech.



## Komplex administrativních budov Vlněna, Brno, Česká republika

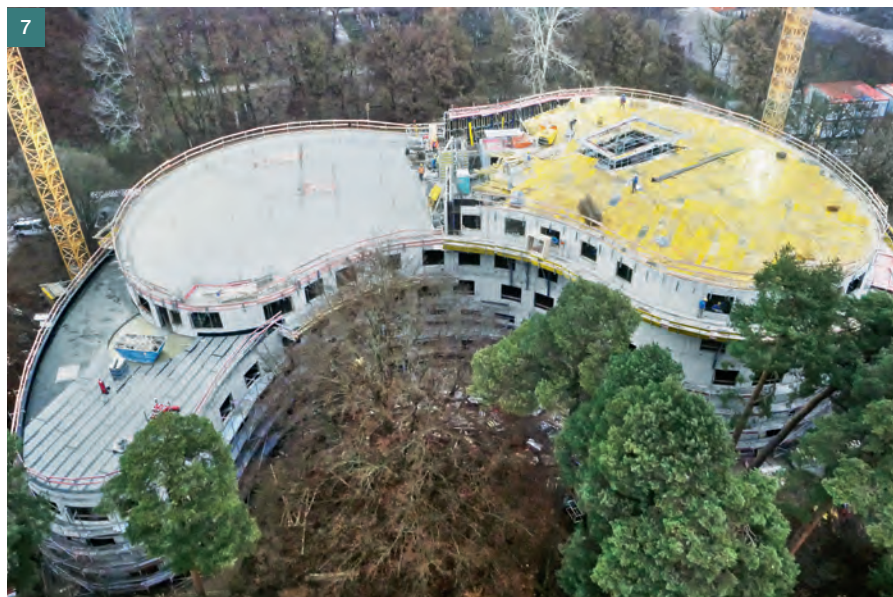
Posledním, domácím příkladem je komplex administrativních budov Vlněna v Brně, jehož železobetonová konstrukce byla realizována firmou PSG, a. s., v druhé polovině roku 2018 (obr. 8). Budova má dvě podzemní a 12 nadzemních podlaží a nabízí cca 75 000 m<sup>2</sup> kancelářských a komerčních ploch.

Vzhledem k omezenému času pro zhotovení železobetonových konstrukcí bylo třeba zvolit velmi efektivní způsob realizace. Na stavbě byl nasazen monitorovací systém, díky kterému bylo možné efektivně řídit odbedňování stropů. Byla provedena kalibrace pro tři betonové směsi a měření zajišťovaly čtyři stropní senzory. Na bednění stropů byl použit systém Dokadek 30, který umožňuje rychlé sestavení a odbednění díky propracovanému systémovému řešení manipulace s jednotlivými prvky o ploše 3 m<sup>2</sup>.

Tým stavbyvedoucích byl s monitorovacím systémem spokojen a skutečně řídil odbedňování na základě informací o pevnosti betonu z tohoto systému. V letním období probíhalo odbedňování stropů již po třech dnech.

### ZÁVĚR

Při použití systému měření, který na základě metody zralosti monitoruje pevnost betonu raného stáří, lze snadno optimalizovat proces výstavby železobetonových konstrukcí z hlediska bezpečnosti, času i financí. Snadno dostupná data o pevnosti betonu v reálném čase pomáhají na staveništi stanovit vhodný čas pro odbednění, posunutí šplhacího bednění, zatížení konstrukce, vnesení předpětí či ukončení ošetřování. Výsledkem může být, jak dokládají uvedené příklady, zkrácení



5 Rekonstrukce dálničního mostu přes jezero Petersdorfer 6 Výstavba silničního mostu Seckachtal 7 Domov seniorů v Mnichově 8 Komplex administrativních budov Vlněna v Brně  
 5 Reconstruction of the motorway bridge over the Petersdorfer lake 6 Construction of the Seckachtal road bridge 7 Retirement home in Munich 8 Office building complex Vlněna in Brno

doby jednoho cyklu nebo použití menšího množství bednění na stavbě, což vede k úspoře nákladů.

V porovnání s běžným Schmidovým tvrdoměrem lze dosahovat přesnějších výsledků s omezením vlivu lidského faktoru a omezením vlivu kvality povrchové vrstvy betonu na stanovenou hodnotu pevnosti betonu v tlaku. [1], [3]

Počet realizovaných projektů s použitím tohoto systému na území Evropy neustále narůstá stejně jako pozitivní zpětné vazby od realizačních firem. S nástupem BIM a rozvojem digitalizace ve stavebnictví se dá očekávat, že systém, který umožňuje mimo jiné

i přehlednou dokumentaci měření, bude v budoucnu při výstavbě železobetonových konstrukcí využíván stále častěji.

#### Literatura:

- [1] MALHOTRA, V. M., CARINO, N. J. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2004. ISBN 08-031-2099-0
- [2] SOUTSOS, M., KANAVARIS, F., HATZITHEODOROU, A. Critical analysis of strength estimates from maturity functions. *Case Studies in Construction Materials*. 2018, Vol. 9, pp. 1–19.
- [3] REINISCH, A., PEYERL, M., MAIER, G., KRISPEL, S. Confirmation of Real Time Concrete Strength in Construction Projects. In: *11th CCC Congress HAINBURG 2015*. Hainburg: Central European Congress on Concrete Engineering, 2015. Session 5.

Ing. Pavel Kasal  
 Doka GmbH  
 pavel.kasal@doka.com



Václav Lorenc  
 Česká Doka bednicí technika, spol. s r. o.  
 vaclav.lorenc@doka.com



Radek Syka  
 Česká Doka bednicí technika, spol. s r. o.  
 radek.syka@doka.com

