

METODA ZRALOSTI – PRINCIP, KALIBRACE, POUŽITÍ A PŘESNOST

Pavel Kasal, *

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

ABSTRAKT

Tento příspěvek se zabývá praktickým použitím metody zralosti de Vree, zejména provedením kalibrace, přesností určování pevnosti v tlaku betonu touto metodou a rozsahem jejího použití. Vzhledem k tomu, že metoda zralosti se v české literatuře téměř nevyskytuje, tak velká část příspěvku je věnována výkladu teoretických principů metody. V příspěvku jsou uvedeny tři prováděné zkoušky přesnosti z odlišných provozů a států. Hlavním cílem příspěvku je podrobnější seznámení s metodou zralosti a získání představy o možné přesnosti. Tento příspěvek se zabývá následujícími otázkami. Jak se provádí kalibrace? K čemu je možné kalibrační přímku použít? Jaká jsou její omezení a přesnost?

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton raného stáří • Pevnost v tlaku • Metoda zralosti • Kalibrační přímka • Validace

ABSTRACT

This paper deals with the practical use of the maturity method DeVree. The procedure of calibration, the accuracy of estimated compressive strength value, and limitations of the method are presented. Due to the lack of data about this method in Czech literature, theoretical principles of the method are shown in large part of the paper. Three tests of accuracy are presented from different settings and regions. The main goal of this paper is the detailed introduction of the maturity method and a clear picture of possible accuracy. The paper deals with the following questions. How to perform calibration? What is the possible use of a calibration curve? What are the limitations and accuracy?

KEYWORDS

Early-age concrete • Compressive strength • Maturity method • Calibration line • Validation

1. ÚVOD

Metoda zralosti, jejíž základy vznikly již v 50. letech minulého století, umožňuje výpočtem stanovit hodnoty pevnosti v tlaku u betonu raného stáří. Princip výpočtu využívá předpoklad, že

pevnost v tlaku je funkcí zralosti, tedy času a teplotní historie. Pro její použití je nejdříve třeba provedení kalibrace pro konkrétní betonovou směs, dále měření a záznam času a teploty betonu od momentu uložení čerstvého betonu do bednění. Na základě měřených dat a předem provedené kalibrace je předpovídána hodnota pevnosti betonu v tlaku. [1; 2]

Úspěšné provedení kalibrace pro určitou betonovou směs a minimalizace změn ve složení betonové směsi je důležitým předpokladem pro spolehlivé použití metody zralosti.

Tento příspěvek se zabývá následujícími otázkami. Jak se taková kalibrace provádí? K čemu je možné kalibrační přímku použít? Jaká jsou její omezení a přesnost?

2. KALIBRACE

Cílem kalibrace je získání vztahu mezi zralostí a pevností v tlaku betonu raného stáří. Zralost betonu je možné snadno spočítat na základě snadno měřitelných dat (teploty a času) a pevnost v tlaku je jedna z klíčových vlastností, kterou chceme zjistit.

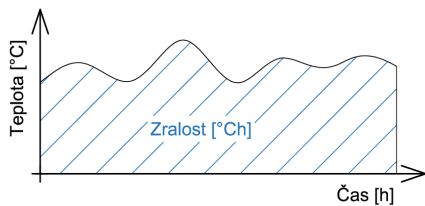
Postup kalibrace je nutné předem stanovit s ohledem na to, pro jaký účel bude metoda zralosti použita (optimální odbedňování, předpínání, apod.). Pro účel použití se stanoví cílová hodnota pevnosti, ke které se kalibrace bude provádět, tedy například pro optimální odbedňování stropů 70% hodnoty pevnosti po 28 dnech.

2.1. Provedení

Kalibrace se provádí v laboratoři pomocí minimálně pěti vytvořených standardních zkušebních vzorků z betonové směsi, která bude použita na staveništi. Po zhotovení zkušebních vzorků se v pravidelných intervalech měří jejich teplota a je postupně dle stanoveného rozvrhu destruktivně zkoušena jejich pevnost v tlaku pomocí lisu. Z naměřeného průběhu teploty v čase je možné pro každou zkušební krychli spočítat zralost v době provádění destruktivní zkoušky pevnosti v tlaku a přiřadit ji k výsledné pevnosti z lisu.

Výpočet zralosti se provádí například pomocí vzorce (1), pro názornost si lze zjednodušeně zralost představit jako integrál křivky průběhu teploty v čase (obrázek 1) od uložení betonu – vytvoření vzorku.

* Školitel: prof. Ing. Jan L. Víték, CSc., FEng.

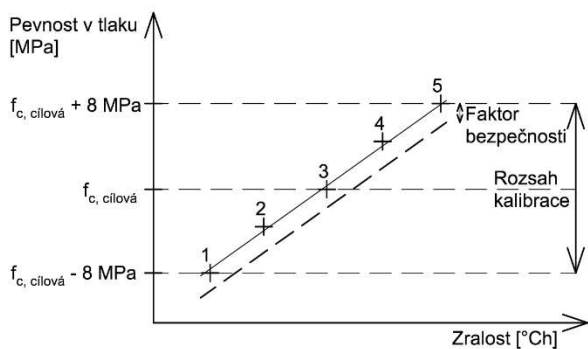


Obrázek 1: Schématické znázornění výpočtu zralosti

Na základě vypočtených zralostí a destruktivně stanovených pevností zkušebních těles je možné za pomoci lineární regrese vynést regresní přímkou (obrázek 2 – plná čára), která je obvykle posunuta v grafu směrem dolů o faktor bezpečnosti. S ohledem na možné odchylky měření teploty a možné nepřesnosti v kalibraci se zavádí zmíněný faktor bezpečnosti, který minimalizuje riziko, že stanovená metodou pevnost bude vyšší než skutečná pevnost. Hodnota faktoru bezpečnosti je podrobně popsána v holandské normě NEN 5970, tuto hodnotu lze navýšit dalšími bezpečnostními přírážkami. V běžných projektech s použitím běžných betonových směsí se pohybuje faktor bezpečnosti v rozsahu 2,5 – 3 MPa. Výsledkem kalibrace je kalibrační přímkou (obrázek 2 – čárkovaná čára) zakreslená v grafu, kde na svislé ose je pevnost v tlaku a na vodorovné ose v logaritmickém měřítku zralost. Jedná se tedy o zmíněný vztah mezi pevností v tlaku a zralostí. [3]

Kalibrace musí být provedena pro všechny konkrétní betonové směsi, u kterých bude používána metoda zralosti pro stanovení pevností v tlaku. Jak již bylo zmíněno, kalibrace se také provádí vždy pro konkrétní cílovou hodnotu, tedy pro hodnotu pevnosti, kterou je nutno dosáhnout pro zahájení kritických operací jako například: odbedňování, předpínání, posun šplhacího bednění, zatížení konstrukce a další. V ideálním případě by měl kalibrační rozsah pokrýt oblast pevností ± 8 MPa od cílové pevnosti (obrázek 2) pro zajištění přesnosti výsledku právě v blízkém okolí cílové pevnosti. [3]

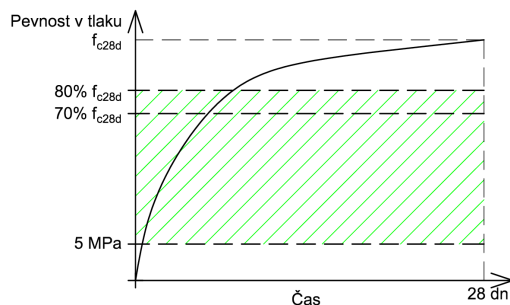
Složení betonové směsi nesmí být po kalibraci měněno.



Obrázek 2: Kalibrační čára a ideální rozsah kalibrace

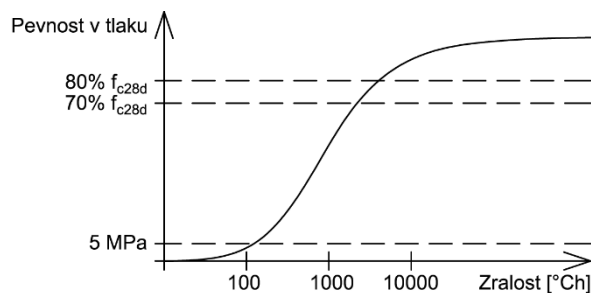
2.2. Rozsah použití

Metoda zralosti se používá pro stanovení pevnosti pouze v případě betonu raného stáří. Za beton raného stáří se běžně považuje beton do 14 dnů od uložení do bednění. Rozsah použití metody zralosti je vhodné definovat přesněji (obrázek 3).



Obrázek 3: Rozsah možného použití metody zralosti

Nejnižší hodnotou pevnosti, která je možná stanovovat pomocí této metody je cca 5 MPa. Horní hranice je 70% (za jistých podmínek zpravidla i 80%) hodnoty pevnosti po 28 dnech. Obrázek 4 zorazuje vztah pevnosti v tlaku betonu a zralosti, zralost na vodorovné ose je v logaritmickém měřítku. Zmíněné limity vyplývají ze vztahu pevnosti v tlaku betonu a zralosti, který popisuje křivka, ale v případě metody zralosti je určitý interval aproximován přímkou. Dolní hranici použitelnosti omezuje také zmíněný nutný rozsah v kombinaci s minimální pevností (přibližně 3 MPa), kdy lze bez problému provést zkoušku pevnosti v tlaku na lisu.



Obrázek 4: Vztah pevnosti v tlaku betonu a zralosti

2.3. Použitá metoda

Jednou z používaných metod zralosti je metoda De Vree označována také jako vážená zralost, která byla vyvinuta v roce 1970 v Holandsku a dále upravena do nynější podoby v roce 1979. Metoda De Vree i princip jejího výpočtu je podobný vůbec první používané metodě zralosti Nurse–Saul, ale její výsledky jsou přesnější díky zahrnutí teplotní citlivosti cementu. Tato metoda je vhodná k praktickému použití vzhledem k přesnosti a jednoduchosti, proto je také často používána v Evropě. Výpočet vážené zralosti se provádí dle následujícího vzorce. [1; 4]

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

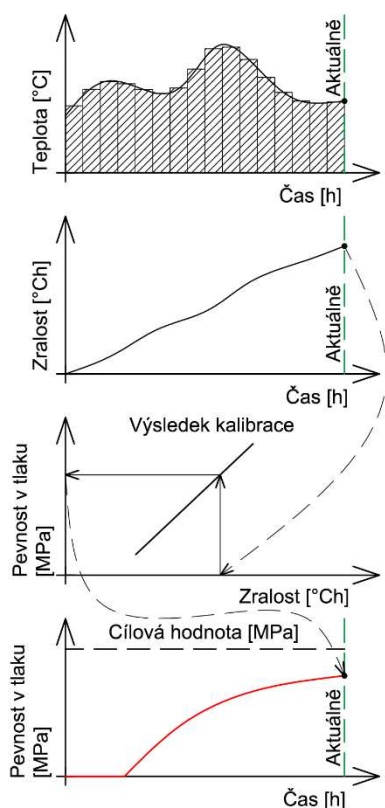
M_w	vážená zralost [°Ch]
T	průměrná teplota [°C]
C	C-konstanta cementu [-]
Δt	časový interval [h]

Konstanta C zahrnuje citlivost cementu vzhledem k teplotě. Tato konstanta se stanovuje experimentálně podle postupu uvedeného v holandské normě NEN 5970,

obvykle je možné získat hodnotu této konstanty od dodavatele betonu. Hodnoty této konstanty se pohybují přibližně v rozsahu 1,15 – 1,65. Nízká hodnota znamená nízkou teplotní citlivost, která je typická například pro beton s portlandským cementem. [1; 4]

3. POUŽITÍ

Metoda zralosti lze po provedení kalibrace konkrétní betonové směsi použít pro stanovení pevnosti v tlaku betonu raného stáří. K tomu je zpravidla využíván některý z komerčních systémů měření. Princip stanovení pevnosti v tlaku betonu popisuje obrázek 5.



Obrázek 5: Princip stanovení pevnosti betonu v tlaku metodou zralosti

Měřicí zařízení (sensor), který je součástí systému měření, provádí záznam teploty betonu v čase. Z průběhu teploty lze vypočítat zralost (dle vzorce 1) ve schématu (obrázek 5) je zralost zjednodušeně naznačena jako postupná akumulace průměrných teplot v jednotlivých hodinách. Ze zralosti pomocí kalibrační křivky lze získat aktuální pevnost betonu v tlaku.

3.1. Další možné využití

Metoda zralosti se používá i ve výpočetních programech, ve kterých se provádí simulace zrání betonu. Tyto simulace se uplatní například při výpočtech zaměřených na eliminaci vzniku trhlin a využívají se zejména u složitých a rozsáhlých projektů masivních konstrukcí. [1]

Druhou, ve stavební praxi častěji využívanou aplikací, je již zmíněné stanovení pevnosti betonu v tlaku během výstavby. Nejedná se pouze o stanovování pevnosti v tlaku u právě zrajícího betonu. Pomocí kalibrační přímky a odhadu teploty betonu v nadcházejících hodinách lze také předpovědět čas, kdy bude dosažena cílová hodnota pevnosti. Díky kalibraci lze také snadno porovnat výkonnost kalibrovaných betonových směsí během různých teplotních scénářů.

3.2. Systém měření

Jedním z komerčních systémů, který umožňuje monitorování pevnosti v tlaku betonu a byl použit i pro měření uvedená níže, je systém Concremate. Tento systém je založený na metodě zralosti, ve většině případech se jedná konkrétně o metodu DeVree, ale je možné ho použít i s jinými metodami (Nurse-Saul či Arrhenius).

Hlavními součástmi systému Concremate jsou senzor a webový portál. Senzor provádí záznam teploty v čase a odesílá zaznamenaná data na server, kde dochází k vyhodnocení dat – výpočtu pevnosti betonu v tlaku (viz kapitola 3). Uživatel má tak na webovém portálu v reálném čase k těmto datům přístup prostřednictvím počítače či chytrého telefonu odkudkoliv.

K usnadnění kalibrace tento systém používá kalibrační boxy. Jeden kalibrační box (obrázek 7) obsahuje tři izolované formy pro zkušební vzorky. Každý zkušební vzorek je měřen teplotním senzorem a zaznamenaná data jsou odesílána do výpočetního centra. Pro kalibraci se používají dva kalibrační boxy = 6 zkušebních krychlí, 5 dle NEN 5970, jedna záložní. Celý proces kalibrace je prováděn se vzdálenou spoluprací technologů. [3]



Obrázek 6: Osazený stropní senzor na právě uloženém betonu

4. PŘESNOST

Přesnost stanovené hodnoty pevnosti v tlaku metodou zralosti při použití v praxi závisí na následujících faktorech, které jsou dále podrobněji rozebrány:

- použité metodě zralosti,
- kvalitě provedení kalibrace,
- minimalizaci odchylek ve výrobě betonové směsi,
- přesnosti použitých senzorů,
- vhodném umístění senzorů.

Mezi nejčastěji používané metody patří Nurse-Saul, Arrhenius a de Vree. První dvě zmíněné metody jsou více používané v severní Americe a poslední metoda je převážně používána v Evropě. Jak již bylo uvedeno použití metody de Vree je

výhodně kvůli jednoduchosti výpočtu i provedení kalibrace a zároveň poměrně vysoké přesnosti.

Pro kvalitně provedenou kalibraci je třeba dobře naplánovaný kalibrační rozvrh zkoušení krychlí na lisu tak, aby byla cílová hodnota ideálně uprostřed rozsahu kalibrace. Dále je důležité také provedení zkušebních vzorků a to především zhuštění betonové směsi. Nepřesnosti měření jsou v případě použitého systému Concremote redukovány vzhledem k použití kalibračních boxů.



Obrázek 7: Právě vytvořené vzorky v kalibračním boxu

Minimalizace odchylek ve výrobě betonové směsi závisí především na dodavateli betonu a lze ověřit tzv. validací.

Teplotní senzory systému Concremote jsou kalibrovány a dosahují přesnosti ± 1 °C což je pro dané použití optimální.

Vhodné umístění senzoru závisí na klientovi, který systém využívá. Doporučuje se při umístění senzoru zvážit pokrytí nejméně příznivá místa na konstrukci:

- chladné místo (stín, vítr),
- staticky důležité místo (např. střed rozpětí),
- postup betonáže (konec pracovního záběru).

Tato kapitola dále ukazuje přesnost metody zralosti a použitého systému, tedy odchylku vzhledem k hodnotě pevnosti v tlaku zjištěné destruktivně na lisu. Tři uvedené příklady pocházejí z různých zemí (Maďarsko, Česká republika, Rakousko) a z různých provozů. Nejedná se sice o velké množství vzorků, ale lze si na základě těchto tří měření vytvořit představu o přesnosti metody zralosti DeVree a systému Concremote.

4.1. Validace

Validací se ověřuje platnost kalibrace a zároveň slouží pro kontrolu dodavatele betonové směsi, že dodává betonovou směs stejného složení. Cílem validace pro konkrétní betonovou směs bývá zejména kontrola kalibrace s časovým odstupem po určitém intervalu.

Validací lze také ukázat funkčnost a přesnost tohoto systému založeného na metodě zralosti. Postup validace popisuje norma NEN 5790, nicméně důležitější než přesný postup je princip, tedy porovnání hodnoty stanovené metodou zralosti s hodnotou získanou destruktivní metodou. [3]

Při validaci se vytvoří pomocí standardních forem tři zkušební krychle z konkrétní betonové směsi, pro kterou byla provedena kalibrace. Na jedno zkušební těleso se osadí senzor a zbylé dvě se pouze překryjí překližkou. Po dosažení cílové hodnoty se provede destruktivní zkouška všech těles a průměr těchto tří hodnot se porovná s hodnotou, která byla stanovena pomocí metody zralosti. Dále jsou uvedené zmíněné tři příklady validací.

4.2. Validace - bez výrobní odchylky

První uvedená validace byla provedena v rámci školení klienta v maďarském areálu prefy současně s kalibrací. Jejím cílem bylo seznámení klienta s procesem provádění validace a také ukázka přesnosti systému. Zde byl použit beton C50/60 a cílová hodnota, v tomto případě pro předpínání TT nosníků, byla 40 MPa. Z jedné dávky betonu byla provedena jak kalibrace, tak validace. Kalibrační krychle byly uloženy v izolovaných kalibračních boxech a validační krychle v ocelových formách, teploty skladování byly tedy odlišné. Z důvodu průběhu obou procesů najednou bylo zkoušení tří validačních krychlí naplánováno postupně s časovým odstupem a krychle se senzorem byla zkoušena jako poslední. Po dokončení kalibrace a vytvoření kalibrační křivky byla kalibrační křivka zpětně přiřazena k měření validace. Zároveň bylo zjištěno, že poslední zkoušená validační krychle dosahovala hodnoty pevnosti v rozsahu platnosti kalibrace a vykazovala přesně hodnotu cílové pevnosti. Na základě těchto výsledků lze tedy ověřit přesnost metody.

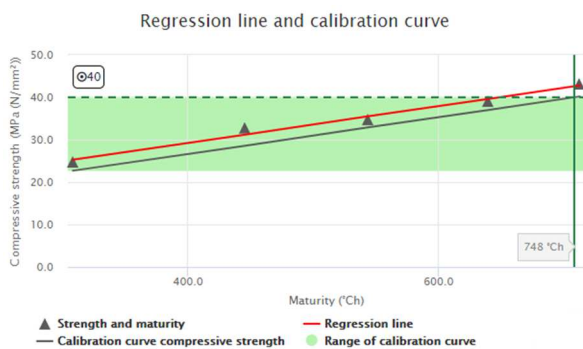
Výsledky jsou následující:

Hodnota dle Concremote:	$f_c = 37,4$ MPa
Výsledky pevnosti z lisu:	$f_c = 40,0$ MPa
Uvažovaný faktor bezpečnosti:	SF = 2,6 MPa

Pokud bychom ale chtěli ověřit detailněji funkčnost systému a metody zralosti, je nutné pracovat i s faktorem bezpečnosti, o který je posunuta kalibrační křivka z důvodu bezpečnosti výsledku. Hodnota stanovená systémem Concremote je tedy v tomto případě snížena o faktor bezpečnosti SF = 2,6 MPa. Po přičtení faktoru bezpečnosti k hodnotě stanovené systémem Concremote dostaneme hodnotu 40,0 MPa, která s přesností na desetinu odpovídá hodnotě z lisu.

Tento příklad ukazuje vysokou přesnost metody zralosti a systému Concremote. Zde se však jednalo o stejnou záměs betonové směsi jak pro kalibraci, tak pro validaci.

Obrázek 8 zobrazuje kalibrační křivku včetně kalibračního rozsahu, který je ohraničen hodnotami 22,7 MPa a 40,2 MPa. V tomto případě se jednalo o velmi „rychlou“ betonovou směs, kde je plánování kalibračního rozvrhu na základě konkrétní specifikace směsi složitější. Je zřejmé, že se nejedná o ideální kalibrační rozsah – zkoušené kalibrační vzorky byly zkoušeny příliš brzy. Nicméně z pohledu lineární regrese se jedná o velmi přesnou kalibraci, protože koeficient determinace je $R^2 = 96,24\%$.



Obrázek 8: Kalibrační křivka z prvního příkladu projektu

4.3. Validace – s výrobní odchylkou

Druhý příklad validace byl proveden u jednoho z projektů v České republice, dle postupu zmíněného v kapitole 4.1. V tomto projektu byl použit beton C25/30 a cílová hodnota pro odbedňování stropních konstrukcí byla 21 MPa. Na rozdíl od prvního příkladu byla validace provedena měsíc po kalibraci. V tomto případě se tedy nejednalo o betonovou směs z jedné záměsi. Výsledky jsou následující:

Hodnota z Concremote (snížena o SF) $f_c = 21,9$ MPa

Výsledky pevnosti z lisu:

Zkušební krychle č. 1 (se senzorem) $f_c = 23,3$ MPa

Zkušební krychle č. 2 $f_c = 24,9$ MPa

Zkušební krychle č. 3 $f_c = 24,4$ MPa

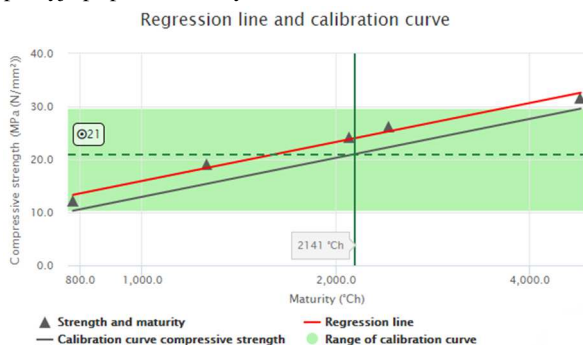
Průměrná hodnota z lisu $f_c = 24,2$ MPa

Rozdíl: $\Delta = 24,2 - 21,9 = 2,3$ MPa (na stranu bezpečnosti)

Uvažovaný faktor bezpečnosti: SF = 3,0 MPa

(bezpečnostní rezerva Concremote)

U tohoto projektu byl faktor bezpečnosti stanoven SF = 3 MPa, tedy hodnota zobrazované pevnosti (21,9 MPa) je vždy o 3 MPa snížena. Po přičtení faktoru bezpečnosti k hodnotě z Concremote se získá skutečná hodnota pevnosti dle metody zralosti bez jakékoliv bezpečnostní rezervy $21,9 + 3 = 24,9$ MPa a porovnáním s průměrnou hodnotou z lisu 24,2 MPa vychází rozdíl 0,7 MPa. To je v praxi zanedbatelná hodnota a vzhledem k odchylkám jednotlivých záměsí betonové směsi, se jedná o velice přesný výsledek. Dále tento výsledek ukazuje, že vypočtený faktor bezpečnosti s rezervou pokryje případnou odchylku.



Obrázek 9: Kalibrační křivka z druhého příkladu projektu

Plánování kalibrace této betonové směsi bylo provedeno výborně vzhledem k rozsahu kalibrace od 10,30 MPa do 29,60 MPa (obrázek 9). Z pohledu lineární regrese se jedná o průměrný výsledek $R^2 = 84,15\%$

4.4. Rozsáhlejší zkouška přesnosti

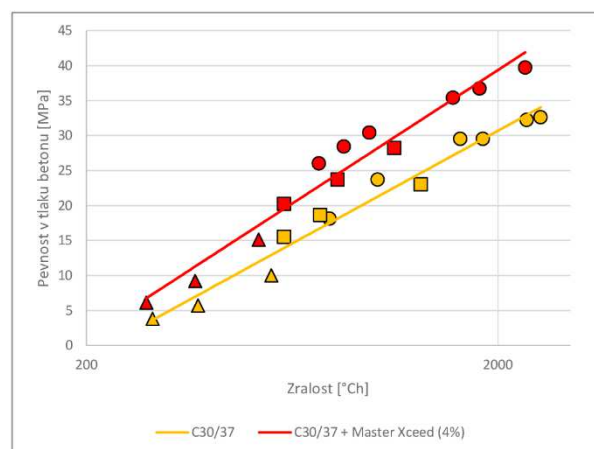
Třetím příkladem je rozsáhlejší zkouška, která byla provedena v jedné vídeňské laboratoři. Zde byly provedeny kalibrace pro betonovou směs ve dvou variantách, v prvním případě nebyl použit urychlovač tvrdnutí a v druhém případě byl přidán Master X-Seed (4%). Specifikace betonové směsi byla následující:

C30/37 B2 PB CEM II A-S 42,5R F52 GK22 (dle ÖNORM)

Množství cementu: 340 kg/m³, vodní součinitel: 0,51

Kalibrace byla provedena tři měsíce před validací. V tomto případě byl ale kalibrační proces trochu odlišný. Kalibrační křivka byla vytvořena ze vzorků umístěných v lednici (3ks – značeno trojúhelníky), v laboratoři (3ks – značeno čtverci), v izolovaných kalibračních boxech (6ks – značeno kruhy). Obrázek 10 zobrazuje obě kalibrační přímky včetně výsledků jednotlivých vzorků. Cílem odlišného postupu kalibrace byla demonstrace jak metoda zralosti funguje a zejména toho, že pro kalibraci je možné použít i vzorky z prostředí o různých teplotách. Nicméně největší přesnosti se dosáhne kalibrací v kalibračních boxech, protože jsou eliminovány možné vnější vlivy.

Rozsah kalibrace v tomto případě pokrýval celou oblast použitelnosti metody zralosti. Při požadavku na přesné výsledky toto není zcela vhodné řešení. Lepší je kalibrovat vždy oblast v okolí hodnoty pevnosti, které chceme dosáhnout. Tím získáme maximální přesnost v blízkém okolí naší cílové hodnoty. Z hlediska teorie se jedná o nahrazování části křivky přímkou (viz kapitola 2.1). V případě výsledku těchto kalibrací byl koeficient determinace větší než 80% u obou regresech přímek.



Obrázek 10: Kalibrační křivky betonu bez a s přidáním urychlovače tvrdnutí (trojúhelník – vzorky v lednici, čtverec – vzorky v laboratoři, kruh – vzorky v izolovaném boxu)

V rámci validace, o 3 měsíce později, bylo vytvořeno 8 zkušebních krychlí z obou variant betonové směsi – bez použití urychlovače tvrdnutí a s urychlovačem tvrdnutí. Dvě čtveřice krychlí byly skladovány ve venkovním prostředí, kde se teplota pohybovala okolo 7°C a dvě čtveřice byly umístěny v laboratoři, kde byla téměř konstantní teplota 20°C. Jedna krychle ze čtveřice byla osazena senzorem Concremate a předpokládalo se, že vývoj teploty je stejný i ve třech zbylých zkoušených krychlích.



Obrázek 11: Vzorky skladované ve vnějším prostředí

Zmíněné vzorky byly následně zkoušeny po 24 h, 27 h a 30 h od vytvoření. Tabulka 1 zobrazuje všechny výsledky této validace včetně rozdílu mezi hodnotou z lisu a hodnotou stanovenou pomocí systému Concremate. U hodnot stanovených systémem Concremate není uvažován žádný bezpečnostní faktor. Z výsledků je zřejmé, že bezpečnostní faktor používaný u běžných projektů 2,5 – 3,0 MPa je schopen pokrýt odchylky.

Mimo téma metody zralosti je zde vidět jedno důležité zjištění. S urychlovačem tuhnutí v chladnějším prostředí jsou dosahovány srovnatelné výsledky jako bez urychlovače tuhnutí v teplejším prostředí.

Tabulka 1: Výsledky validace (bez zahrnutí faktoru bezpečnosti)

Teplota prostředí, čas zkoušky	C30/37 [MPa]			C30/37 + Xseed [MPa]		
	Zkouška na lisu	Concre - mote	Rozdíl	Zkouška na lisu	Concre - mote	Rozdíl
≈7°C, 24h	5,0	5,7	-0,7	11,3	11,8	-0,5
≈7°C, 27h	6,6	7,9	-1,3	13,5	14,2	-0,7
≈7°C, 30h	11,0	11,0	0,0	16,0	17,0	-1,0
≈20°C, 24h	12,5	14,4	-1,9	19,0	21,2	-2,2
≈20°C, 27h	14,7	16,6	-1,9	21,3	23,8	-2,5
≈20°C, 30h	17,3	19,0	-1,7	24,7	26,1	-1,4

5. ZÁVĚR

Metoda zralosti je používána zejména pro stanovení pevnosti betonu v tlaku během výstavby. Kromě samotného stanovení pevnosti v reálném čase u zrajícího betonu umožňuje také předpověď vývoje pevnosti či porovnání různých betonových směsí při různých teplotních schémátech. Tato metoda je používána i v sofistikovaných výpočetních programech pro modelování vývoje pevnosti betonu.

Pro spolehlivé použití metody zralosti je klíčové správné naplánování a provedení kalibrace pro betonovou směs, u které bude následně monitorována pevnost v tlaku.

Z výše uvedených výsledků, které byly získány ve třech zcela odlišných prostředích (prefa, stavba, laboratoř) a státech, lze konstatovat, že přesnost metody zralosti v kombinaci s použitým systémem je zcela určitě vhodná pro spolehlivé použití na staveništi. Běžně používané hodnoty faktoru bezpečnosti spolehlivě pokryjí případné odchylky. Příkladem typického použití je monitorování pevnosti betonu v tlaku u stropní konstrukce kvůli odbedňování či předpínání.

U aplikací, kde je třeba vyšší přesnost, je nutné věnovat maximální pozornost správnému vytvoření zkušebních vzorků a používat kalibrační boxy. Použití metody zralosti s vyšším požadavkem na přesnost je například realizace cementobetonových krytů vozovek, kde je potřeba znát přesnou hodnotu pevnosti kvůli provedení řezu smršťovacích spár. Řez je nutné provést přesně při určité hodnotě pevnosti, nikoliv při vyšší hodnotě. Použitý faktor bezpečnosti je proto u těchto aplikací minimální, případně nulový.

PODĚKOVÁNÍ

V závěru bych rád poděkoval svému kolegovi Dipl.-Ing. Werneru Wenighoferovi za diskuzi a podněty spojené s tímto tématem.

CITOVANÁ LITERATURA

- [1] MALHOTRA, V. M. a Nicholas J. CARINO. *Handbook on nondestructive testing of concrete*. 2nd ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press, 2004. ISBN 08-031-2099-0.
- [2] *Maturity Methods to Estimate Concrete Strength*. 1. Maryland: National Ready Mixed Concrete Association, 2006.
- [3] NEN 5970. *Determination of the compressive strength development of early age concrete on the basis of the weighted maturity*. 1. Netherlands: Dutch Standard, 2001.
- [4] SOUTSOS, KANAVARIS a HATZITHEODOROU. Critical analysis of strength estimates from maturity functions. *Case Studies in Construction Materials*. 2018, , 1-19.