

# K PROBLEMATICE URČOVÁNÍ PEVNOSTI BETONU V KONSTRUKCI Z RYCHLOSTI ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKOVÉHO IMPULSU PODLE ČSN EN 13791 ■ ON DETERMINATION OF CONSTRUCTION CONCRETE STRENGTH BASED ON ULTRASONIC PULSE VELOCITY ACCORDING TO ČSN EN 13791

Jiří Brožovský

Ultrazvuková metoda je jednou z alternativ pro nedestruktivní zkoušení betonu, a to jak v konstrukci, tak i na zkušebních tělesech připravených zpravidla z jádrových vývrtů odebraných z konstrukce. Pomocí této metody lze zjišťovat pevnostní charakteristiky (pevnost v tlaku) i dynamický modul pružnosti betonu. V článku je uvedena analýza základního vztahu z ČSN EN 13791 pro určení pevnosti betonu v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Matematické vyjádření tohoto vztahu je chybné, v prvním členu tohoto vztahu má být správně druhá mocnina rychlosti šíření ultrazvukového impulsu. Vlastní základní vztah je scestný, neodpovídá realitě ani bohatým poznatkům ze zjišťování pevnosti betonu ze zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou. V případě, že by byla pevnost betonu v tlaku zjišťována z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu, je vhodné použití směrného kalibračního vztahu ČSN 73 1371:2011 a provést následné upřesnění pevností postupem uvedeným v této normě. ■ The ultrasonic pulse method is one of options as to concrete non-destructive testing; it can be used on constructions as well as on test specimens as prepared – in principle – from cores taken from construction. This method is applicable to detection of both strength parameter (i.e. compression strength) and dynamic modulus of elasticity. This paper analyzes primary formula of ČSN EN 13791 designed for determination of concrete strength based on ultrasonic pulse velocity. However, this mathematical formula is wrong because the first term is to be square of ultrasonic pulse velocity. The basic formula on its own is far off reality; it mismatches comprehensive experience in determination on concrete strength pursuant to testing using ultrasonic pulse method. In case that concrete strength is determined based on ultrasonic pulse velocity, it would be appropriate to use indicative calibration correlation according to ČSN 73 1371:2011 followed by correction of strength values through procedure as mentioned in this Standard.

Ultrazvuková metoda je jednou z alternativ pro nedestruktivní zkoušení betonu, a to jak v konstrukci, tak i na zkušebních tělesech připravených zpravidla z jádrových vývrtů odebraných z konstrukce. Pomocí této metody lze zjišťovat pevnostní charakteristiky (pevnost v tlaku) i dynamický modul pružnosti betonu.

Ve stavební praxi však zdaleka nedoznala takového využití jako tvrdoměrné metody. Důvodů je několik – finančně nákladné zkušební zařízení, limitované použití při zkouškách na konstrukci při přímém prozvučování, vlivy složek betonu a vlhkosti na výsledky měření, a tudíž problematické zpracování univerzálního (obecného = základního) kalibračního vztahu pro stanovení pevnosti betonu z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.

Pro nedestruktivní zkoušení betonu byly do systému českých technických norem převzaty i evropské normy pro zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou.

V současné době platí pro zkoušení betonu ultrazvukovou impulsovou metodou evropská norma ČSN EN 12504-4; nově vydaná česká technická norma ČSN 73 1371 s účinností od 1. října 2011.

V článku je provedeno zhodnocení využitelnosti základ-

ní křivky pro určení pevnosti betonu v konstrukci uvedené v ČSN EN 13791 resp. EN 13791.

## PŘEHLED NOREM SOUVISEJÍCÍCH SE ZJIŠŤOVÁNÍM PEVNOSTI BETONU V KONSTRUKCI ULTRAZVUKOVOU IMPULSOVOU METODOU

V současné době pro zkoušení betonu a stanovení jeho parametrů existuje souběh evropských a národních norem.

V systému českých technických norem pro zkoušení ultrazvukovou impulsovou metodou jsou zahrnuty tyto evropské normy:

- ČSN EN 13791:2007 „Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích“,
- ČSN EN 12504-1:2009 „Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrtvy – Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku“,
- ČSN EN 12504-4:2005 „Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu“.

K uvedeným evropským normám zahrnuje systém českých technických norem i platné národní technické normy:

- ČSN 73 2011:1988 „Nedeštruktívne skúšanie betónových konštrukcií“ (určená ve smyslu NV 163/2002 Sb.),
- ČSN 73 1371:2011 „Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu“,
- ČSN 73 1370:2011 „Nedestruktivní zkoušení betonu – Společná ustanovení“.

## PODSTATA METODY A ZÁKLADNÍ FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ ULTRAZVUKOVOU IMPULSOVOU METODOU

Podstata ultrazvukové impulsové metody spočívá ve vyslání opakovaných ultrazvukových impulsů budičem do materiálu a následném snímání impulsů prošlých vyšetřovaným materiálem. Sleduje se doba průchodu jeho čela od budiče do snímače, tedy čas potřebný k překonání určité vzdálenosti. Z doby průchodu ultrazvukových impulsů a známé dráhy se vypočítá rychlost ultrazvukového impulsu.

Rychlost šíření ultrazvukového impulsu se vypočítá dle vztahu (1) (označení veličin převzato z ČSN EN 12504-4):

$$V = \frac{L}{T} \quad (1)$$

kde  $V$  je rychlost šíření ultrazvukového impulsu [km/s],  $L$  délka měřící základny [mm] a  $T$  čas, který uplyne při průběhu impulsu měřící základnou [μs].

Měření lze provádět čtyřmi způsoby umístění sond:

- přímé prozvučování (protilehlá poloha sond – sondy jsou umístěny proti sobě),
- polopřímé prozvučování (sondy jsou sice umístěny na protilehlých stranách vzorku či konstrukce, ale ne přímo proti sobě),
- šikmé prozvučování (sondy jsou umístěny přes roh),
- nepřímé prozvučování (obě sondy se nachází na stejné straně zkoušené konstrukce vzorku).

Výsledky měření ultrazvukovou impulsovou metodou jsou

ovlivňovány řadou faktorů, např. vlhkostí materiálu, rozměrem vzorku, vlastní frekvencí budiče, prostředky akustické vazby, komponenty materiálu a vadami ve struktuře.

### OBLAST VYUŽITÍ JEDNOTLIVÝCH NOREM PRO ZJIŠŤOVÁNÍ PEVNOSTI BETONU V KONSTRUKCI

Výsledkem měření ultrazvukovou impulsovou metodou je rychlost šíření ultrazvukového impulsu. (*Tento termín je převzat z názvu ČSN EN 12504-4, i když v textu normy jsou využívány i termíny rychlost šíření impulsu, rychlost impulsu pro stejný anglický termín ultrasonic pulse velocity*).

Výpočtem při znalosti rychlosti šíření impulsu a objemové hmotnosti betonu lze stanovit dynamický modul pružnosti betonu; v případě, že existuje kalibrační vztah, lze z rychlosti šíření impulsu stanovit i pevnost betonu v tlaku.

### ČSN EN 12504-4 „Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu“

Tato norma kodifikuje postupy pro využití ultrazvukové impulsové metody ke zjišťování rychlosti šíření ultrazvukového impulsu v betonu. Stanovuje požadavky na zkušební zařízení, zkušební postupy včetně přehledu faktorů, které je třeba zohlednit při měření, aby bylo možno zajistit reprodukovatelnost výsledků. Uvádí postup pro zpracování výsledků měření.

V příloze A je popsán postup měření při nepřímém (povrchovém) prozvučování.

V příloze B jsou okomentovány faktory ovlivňující rychlost šíření ultrazvukového impulsu v betonu, konkrétně jsou zde uvedeny tyto faktory – vlhkost, teplota betonu, měřicí základna, tvar a velikost těles, vliv výztužné oceli, trhlin a dutin v betonu.

Příloha C uvádí postup pro zpracování vztahu mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností.

### ČSN 73 1371 „Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu“

Nahrazuje od 1. října 2011 ČSN 73 1371 Ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu vydanou v roce 1982.

Uvedená norma kodifikuje požadavky na zkušební zařízení a uvádí postupy měření. Podrobně se zabývá stanovením rychlosti šíření ultrazvukového impulsu s ohledem na rozměrnost prostředí, stanovením vlastností betonu (dynamického modulu pružnosti betonu v tlaku nebo v tahu, pevnosti betonu v tlaku) a také využitím ultrazvukové impulsové metody pro zjišťování narušení betonu.

Pro určení pevnosti betonu v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu je uváděn jednak postup pro zpracování kalibračních vztahů a jednak postup pro zpřesnění obecného a směrného kalibračního vztahu. Upřesněnou pevnost betonu v tlaku (dle ČSN 73 1370) lze stanovit dle úzkého určujícího nebo širokého určujícího kalibračního vztahu, anebo podle obecného kalibračního vztahu, resp. směrného kalibračního vztahu upřesněného součinitelem  $\alpha$ .

Norma neuvádí konkrétní obecný (základní) kalibrační vztah, pouze pod čarou je uvedeno, že jako směrný kalibrační vztah lze použít např. vztah (2):

$$f_{be} = 9,9v_{L3}^2 - 56v_{L3} + 87,3 \quad (2)$$

kde  $v_{L3}$  je impulsová rychlost UZ podélných vln v trojrozměrném prostředí [km/s] a  $f_{be}$  pevnost betonu v tlaku s nezaručenou přesností [MPa].

Kromě pevnosti betonu je dalším parametrem i jeho modul pružnosti. Z nedestruktivních zkoušek lze získat tzv. dynamický modul pružnosti; dynamický modul pružnosti v tlaku – tahu  $E_{cu}$  se vypočítá dle vztahu (3):

$$E_{cu} = \rho v_L^2 \frac{1}{k^2} \quad (3)$$

kde  $\rho$  je objemová hmotnost betonu [kg/m<sup>3</sup>],  $v_L$  impulsová rychlost podélného UZ vlnění [km/s] a  $k$  součinitel rozměrnosti prostředí.

### ČSN EN 13791 „Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích“

Při využití ultrazvukové impulsové metody pro posuzování charakteristické pevnosti betonu v tlaku je nezbytné provádět upřesnění výsledků nedestruktivních zkoušek po kalibraci se zkouškami vývrtů.

V případě využití ultrazvukové impulsové metody odkazuje se na zkušební zařízení, postupy a vyjádření výsledků uvedené v ČSN EN 12504-1 – odběr a zkoušení vývrtů a ČSN EN 12504-4 pro měření rychlosti šíření ultrazvukového impulsu.

Základní křivka je v ČSN EN 13791 vyjádřena vztahem (4) pro výpočet pevnosti betonu  $f_v$  z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu v:

$$f_v = 62,5v - 497,5v + 990 \quad 4 \leq v \leq 4,8 \quad (4)$$

kde  $f_v$  je počáteční hodnota pevnosti betonu v tlaku v konstrukci získaná ze základní křivky pro rychlost šíření ultrazvukového impulsu [MPa] a  $v$  výsledek zkoušky rychlosti šíření ultrazvukového impulsu [km/s].

Uvedený vztah je použitelný pouze v případě, kdy je prováděno upřesnění/kalibrace výsledků nedestruktivních zkoušek pomocí destruktivních zkoušek na odebraných jádrových vývrtech; platnost tímto způsobem upřesněné křivky je limitována zjištěnými hodnotami rychlosti šíření ultrazvukového impulsu – hodnoty rychlosti šíření ultrazvukového impulsu mohou být  $\pm 0,05$  km/s mimo rozsah, pro který byla základní křivka upřesněna.

Pro uvedenou základní křivku (4) není specifikována určená pevnost, tj. zda se jedná o krychelnou či válcovou.

### PEVNOSTI BETONU V TLAKU ZE ZÁKLADNÍ KŘIVKY PRO RYCHLOST ŠÍŘENÍ ULTRAZVUKOVÉHO IMPULSU V ČSN EN 13791

#### Matematické vyjádření základní křivky

Nejdříve je třeba uvést správné matematické vyjádření základní křivky. V české verzi EN 13791 je uvedena základní křivka pro výpočet pevnosti v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu ve tvaru (4):

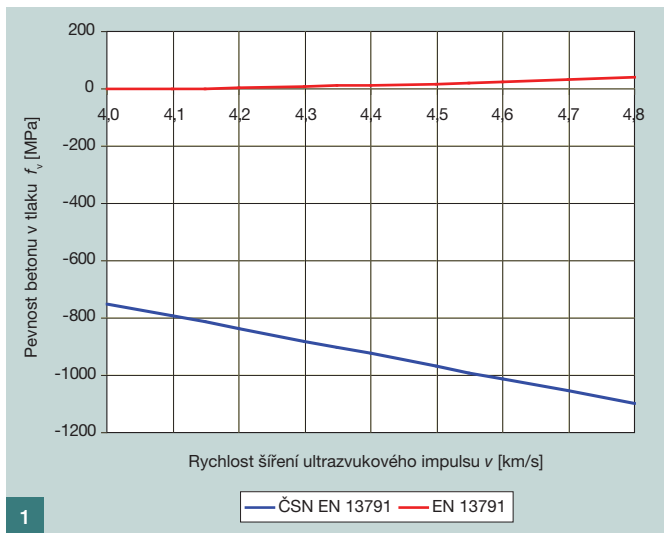
$$f_v = 62,5v - 497,5v + 990 \quad (4)$$

správně však má mít základní křivka matematický tvar vyjádřený vztahem (5), tento odpovídá grafickému znázornění základní křivky v normě (obr. 3 v ČSN EN 13791)

$$f_v = 62,5v^2 - 497,5v + 990 \quad (5)$$

Na obr. 1 je graficky znázorněn průběh základních křivek pro výpočet pevnosti betonu v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu dle matematických vztahů (5) a (4) – česká verze ČSN EN 13791.

Z uvedeného je zřejmé, že opomenutí druhé mocniny rych-



Tab. 1 Informativní hodnocení kvality betonu dle rychlosti šíření ultrazvukového impulsu [2] ■ Tab. 1 Informative assessment of concrete quality based on ultrasonic pulse velocity [2]

Rychlost šíření ultrazvukového impulsu [km/s]	Kvalita betonu
< 2	velmi špatná
2 až 3	špatná
3,1 až 3,5	neuspokojivá
3,5 až 4,5	dobrá
> 4,5	vyňikající

losti šíření ultrazvukového impulsu v prvním členu vztahu (4) uvedeného v české verzi EN 13791 má za následek, že při výpočtu pevnosti jsou získány záporné, tj. nesmyslné hodnoty pevnosti betonu. Z tohoto důvodu je uvedený vztah nepoužitelný. Je spodivem, že taková zásadní chyba je obsažena v české technické normě.

### Rozsah využití základní křivky

V normě je uvedeno, že uvedená křivka je využitelná pro betony, v nichž se rychlost šíření ultrazvukového impulsu pohybuje v rozmezí **4 až 4,8 km/s**. Při výpočtu pevnosti dle tohoto základního vztahu ve správném matematickém tvaru (5) zjistíme, že pevnosti se pohybují od 0 MPa ( $v = 4$  km/s) do 42 MPa ( $v = 4,8$  km/s). K tomuto jsou stručně uvedeny následující poznatky.

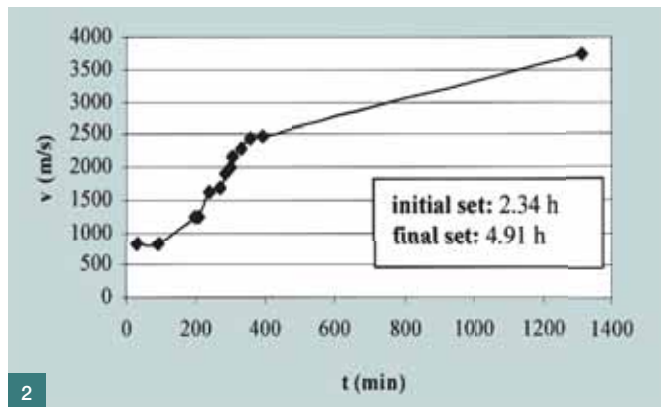
V literatuře [2] je uváděno informativní hodnocení kvality betonu dle rychlosti šíření ultrazvukového impulsu (tab. 1).

Z uvedeného informativního hodnocení kvality betonu podle rychlosti šíření ultrazvukového impulsu je zřejmé, že v betonech s pevností vyšší než nula je rychlost šíření ultrazvukového impulsu menší než 4 km/s, tj. menší než uvedená spodní hranice základní křivky (5).

Pro ilustraci je z literatury [3] uveden průběh změny rychlosti šíření ultrazvukového impulsu v čerstvém betonu do jeho zatvrdnutí (obr. 2). Z grafu je zřejmé, že beton ve fázi tuhnutí, tj. když je jeho pevnost 0 (nula) MPa, není rychlost šíření ultrazvukového impulsu nulová, jak vychází ze základní křivky v EN 13791.

### Porovnání základní křivky z EN 13791 s kalibračními vztahy z literatury

Jsou porovnávány vybrané vztahy z literatury [4] až [10] a autora [1] pro určení pevnosti betonu v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu se základní křivkou z EN 13791 (obr. 3).



Obr. 1 Porovnání základních vztahů pro výpočet pevnosti betonu v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu dle matematických vztahů (5) a (4) – česká verze ČSN EN 13791 ■ Fig. 1 Comparison of basic curves serving for concrete strength calculation based on ultrasonic pulse velocity using formulae (5) and (4) according to Czech version of EN 13791

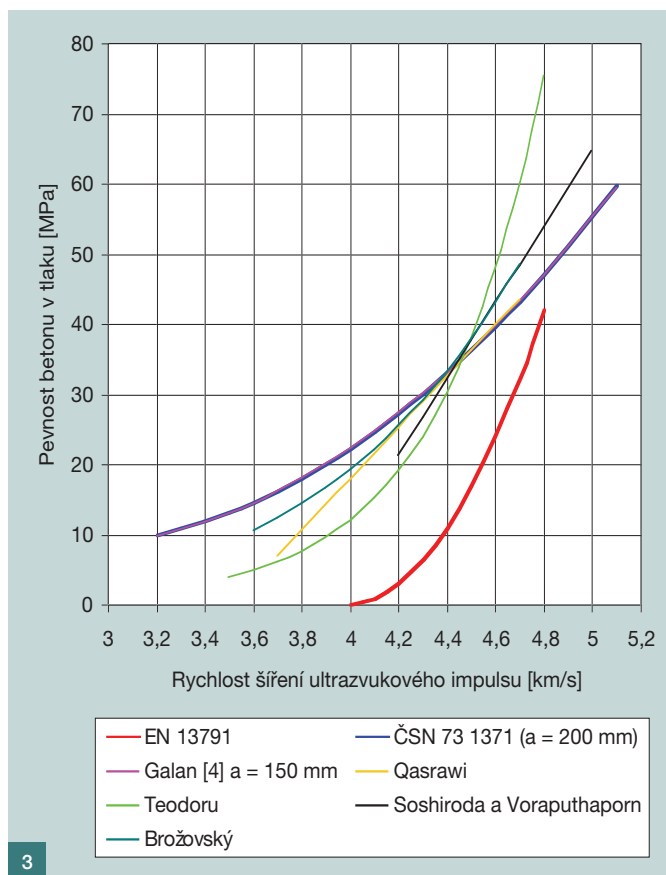
Obr. 2 Průběh rychlosti šíření ultrazvukového impulsu během tuhnutí a tvrdnutí betonu (převzato z [3]) ■ Fig. 2 Course of ultrasonic pulse velocity during concrete setting/hardening (see Lit. [3])

Obr. 3 Porovnání vztahů pro výpočet pevnosti betonu v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu z literatury (6) až (10) a ČSN 73 1371 (2) se základním vztahem z EN 13791 (5) ■ Fig. 3 Comparison of basic curves serving for concrete strength calculation based on ultrasonic pulse velocity using formulae (6 to 10) from literature and ČSN 73 1371 (2) with basic curve of EN 13791 (5)

- Směrný kalibrační vztah z ČSN 73 1371:
 
$$f_{be} = 9,9v_{L3}^2 - 56v_{L3} + 87,3, \quad (2)$$
 kde  $3,2 \leq v_{L3} \leq 5,1$ ;  $v$  [4] je uváděn jako obecný kalibrační vztah odvozený ze zkoušek krychlí s délkou hrany 200 mm,
- Galan 1984 [4]:
 
$$f_{be} = 9,6601v_{L3}^2 - 54,0228v_{L3} + 87,3, \quad (6)$$
 kde  $3,2 \leq v_{L3} \leq 5,1$  je obecný kalibrační vztah odvozený ze zkoušek krychlí s délkou hrany 150 mm,
- Qasrawi 2000 [5]:
 
$$f_c = 36,72v - 129,077; \text{ kde } 6 \leq f_c \leq 42 \quad (7)$$
- Teodoru 1988 [6]:
 
$$f_c = 0,00121e^{2,30v}; \text{ kde } 4 \leq f_c \leq 80 \quad (8)$$
- Soshiroda a Voraputhaporn 1999 [7]:
 
$$f_{c28} = 54,18v - 206,27; \text{ kde } 20 \leq f_c \leq 65 \quad (9)$$
- Brožovský [1]:
 
$$f_c = 0,0066v^{5,7523}; \text{ kde } 3,6 \leq v \leq 4,7 \quad (10)$$

Z porovnání základní křivky pro výpočet pevnosti betonu v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu uvedené v EN 13791 se vztahy z odborné literatury vyplývá, že základní křivka z EN 13791 je scestná, a to především z těchto důvodů:

- ztvrdlý beton nemá pevnost v tlaku 0 MPa,
- spodní hranice základní křivky 4 km/s odporuje reálným hodnotám rychlosti šíření ultrazvukového impulsu zjišťovaným na cementových betonech; u betonů nižších pevností je rychlost šíření ultrazvukového impulsu pod spodní hranicí základní křivky 4 km/s, a tudíž nelze z uvedené základní křivky vypočítat příslušnou pevnost betonu v tlaku (obr. 3),



• norma EN 13791 předpokládá upřesnění výsledků nede­struktivních zkoušek s využitím výsledků zkoušek válcových zkušebních těles upravených z jádrových vývrtů odebraných z konstrukce – viz postup uvedený v čl. 8.3.3. Uvedený postup řeší upřesnění pevností betonu v tlaku z nede­struktivních zkoušek, ale v rozsahu daném platností příslušné základní křivky, v daném případě křivky vyjadřující vztah mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a pevností betonu v tlaku, kde je dán rozsah platnosti v mezích intervalu 4 až 4,8 km/s.

### ZÁVĚR

Na základě provedené analýzy základní křivky pro určení pevnosti betonu v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu uvedené v ČSN EN 13791 lze konstatovat:

Matematické vyjádření základní křivky uvedené v ČSN EN 13791 je nesprávné. V případě využití postupu pro hodnocení pevnosti betonu v tlaku dle ČSN EN 13791 je třeba využívat základní křivku ve tvaru  $f_v = 62,5v^2 - 497,5v + 990$ .

Základní křivka uvedená v ČSN EN 13791 pro určení pevnosti betonu v tlaku z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu je nesmyslná a neodpovídá realitě. Kromě toho není rozlišován typ pevnosti v tlaku – krychelná, válcová. Z těchto důvodů není vhodná pro praktické použití.

V případě, že by byla pevnost betonu v tlaku zjišťována z rychlosti šíření ultrazvukového impulsu, je vhodné použití vztahu (2)  $f_{be} = 9,9v_{L3}^2 - 56v_{L3} + 87,3$  z ČSN 73 1371, i když vyjadřuje vztah mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a krychelnou pevností na krychlích s délkou hrany 200 mm. Obecný kalibrační vztah (6), zpracovaný Galanem [4] a vyjadřující vztah mezi rychlostí šíření ultrazvukového impulsu a krychelnou pevností na krychlích s délkou hrany 150 mm je totožný se vztahem (2) – viz obr. 3.

Výrazně širší uplatnění má ultrazvuková impulsová meto-

### Literatura:

- [1] Drochytka R. a kol.: Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí, VUT v Brně, Závěrečná roční zpráva projektu MSM 0021630511, Brno, 2010. Brožovský J. Dílčí téma 3.
- [2] Whitehurst E. A.: Evaluation of Concrete Properties from Sonic Tests, ACI Monograph No. 2, ACT, Detroit, MI 1966
- [3] Mikulić D., Sekulić D., Štirmer N., Bjegović D.: Application of ultrasonic methods for early age concrete characterisation In GRUM, J. Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering – The 8th Inter. Conf. of The Slovenian Society for Non-Destructive Testing. 1<sup>st</sup> ed. Ljubljana: The Slovenian Society for Non-Destructive Testing, 2005, pp. 99–108, ISBN 961-90610-5-5
- [4] Galan A.: Kombinované ultrazvukové metódy skúšania betónu, Veda, Bratislava 1984, 150 s.
- [5] Qasrawi H. Y.: 2000, “Concrete strength by combined nonde­structive methods simply and reliably predicted”, Cement and Concrete Research, n. 30, January, pp. 739–746
- [6] Teodoru G. V.: 1988, “The Use of Simultaneous Nondestructive Tests to Predict the Compressive Strength of Concrete”, Nondestructive Testing, Special Publication SP-112, American Concrete Institute, Detroit, pp. 137–152
- [7] Soshiroda T., Voraputhaporn K.: 1999, “Recommended method for earlier inspection of concrete quality by non-destructive testing”, Concrete durability and repair technology, September, Dundee, pp. 259–264
- [8] Brožovský J.: Nede­struktivní zkoušení betonu odrazovými tvrdo­měry v konstrukci podle evropských norem a českých technic­kých norem. Beton TKS 6/2010, str. 40-45, ISSN 1213-3116
- [9] ČSN EN 13791 Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstruk­cích a v prefabrikovaných betonových dílcích
- [10] ČSN EN 12504-1 Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrtý – Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku
- [11] ČSN EN 12504-4 Zkoušení betonu – Část 4: Stanovení rychlosti šíření ultrazvukového impulsu
- [12] ČSN 73 1371:2011 Nede­struktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulsová metoda zkoušení betonu
- [13] ČSN 73 1370:2011 Nede­struktivní zkoušení betonu – Společná ustanovení
- [14] ČSN 73 1380 Zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazování – Porušení vnitřní struktury
- [15] ČSN 73 2011 Nede­struktivní zkoušení betonu v konstrukcích

da jednak při hodnocení trvanlivostních parametrů betonu (zkoušení odolnosti betonu proti zmrazování a rozmrazová­ní, zjišťování korozní odolnosti betonu) a jednak při zjišťová­ní dynamického modulu pružnosti betonu.

Článek byl vytvořen za podpory záměru VVZ MSM 0021630511 Progresivní stavební materiály s využitím druhotných surovin a jejich vliv na životnost konstrukcí.

Doc. Ing. Jiří Brožovský, CSc.  
Ústav technologie stavebních hmot a dílců  
Fakulta stavební VUT v Brně  
e-mail: brozovsky.j@fce.vutbr.cz  
tel.: 541 147 513, 777 347 082



Text článku byl posouzen odbornými lektory.