HODNOCENÍ PEVNOSTI V TLAKU VYSOKOHODNOTNÝCH BETONŮ ODRAZOVÝMI TVRDOMĚRY ▮ COMPRESSION STRENGTH OF HIGH-PERFORMANCE CONCRETE: EVALUATION BY REBOUND HAMMERS

Jiří Brožovský

V poslední době nachází vysokohodnotné betony stále větší uplatnění ve stavební praxi. Kromě kontrolních zkoušek betonu v laboratoři mohou vzniknout i situace, kdy je nezbytné ověřovat kvalitu betonu zabudovaného v konstrukci. Pevnost betonu v tlaku v konstrukci lze zkoušet jednak destruktivně na vzorcích vyjmutých z konstrukce a jednak nedestruktivními metodami zkoušení. Pro zjišťování pevnosti vysokohodnotných betonů odrazovými tvrdoměry nejsou však k dispozici kalibrační vztahy mezi hodnotou odrazu tvrdoměru a pevností v tlaku. V článku jsou uvedeny poznatky z nedestruktivního zkoušení vysokohodnotných betonů odrazovými tvrdoměry systému Schmidt typu N a L. Byly zpracovány kalibrační vztahy pro určení pevnosti v tlaku HPC z hodnoty odrazu tvrdoměru. Zkoušky betonů byly prováděny ve stáří 1 až 60 dní. Prakticky využitelné kalibrační vztahy byly získány pro Schmidtův tvrdoměr typu N. Z porovnání vztahů uvedených v ČSN 73 1373 a ČSN EN 13791 vyplynulo, že vztahy z norem podhodnocují pevnosti vysokohodnotných betonů. Rozšíření použitelnosti vztahů uvedených v ČSN EN 13791 a ČSN 73 1373 dopočítáním pevností z hodnot odrazu, které leží za horní hranicí platnosti kalibračního vztahu má obdobnou tendenci, tj. podhodnocení pevnosti HPC, a proto není vhodné. ▮ Recently, use of high-performance concretes (HPC) in building industry intensifies. In addition to concrete laboratory check tests, quality of built-in concrete is to be confirmed in some potential situations, too. Compression strength of built-in concrete is possible to check either destructively on samples obtained from the respective structure, or by using non-destructive testing methods. However, in case of using the rebound hammers in order to test compression strength of high-performance concrete, calibration correlations between rebound value and compression strength are not available by now. The paper describes findings as to non-destructive testing of high-performance concretes through use of Schmidt impact hammers N and L types. Calibration correlations for determination of HPC compression strength based on the hammer rebound value have been elaborated. Concretes were tested at the age from 1 to 60 days. Only the Schmidt impact hammer N type provided practically usable calibration correlations. In comparison, we have found that standard correlations as mentioned in ČSN 731373 and ČSN EN 13791 undervalue actual strength of high-performance concretes. Extension of correlation usability as stated in ČSN EN 13791 and ČSN 731373 through strength recount from rebound values over upper limit of calibration correlation validity features similar trend i.e. undervaluation of HPC strength; that is why it is inadvisable to proceed in this way.

Vysokohodnotné betony lze charakterizovat jako betony pevnostní třídy C55/67 a vyšší, u kterých jedna nebo více vlastností kvalitativně převyšuje vlastnosti obyčejných betonů. Mezi vysokohodnotné betony patří i vysokopevnostní betony, kam dle ČSN EN 206-1 patří obyčejné a těžké betony s pevnostní třídou C55/67 a vyšší.

V poslední době stále větší uplatnění ve stavební praxi nachází vysokohodnotné betony.

Kromě kontrolních zkoušek betonu v laboratoři mohou vzniknout i situace, kdy je nezbytné ověřovat kvalitu betonu zabudovaného v konstrukci. Toto lze provádět několika způsoby, konkrétně:

- zjišťováním pevnosti v tlaku na válcových zkušebních tělesech odebraných z konstrukce (v tomto případě vzniká narušení vyšetřované konstrukce, což vede k omezení míst odběru vývrtů; problémy s odběrem v nepřístupných místech),
- pomocí metod nedestruktivního a seminedestruktivních zkoušení (odrazové tvrdoměry, ultrazvuková impulsová metoda, metoda vytrhávání trnu apod.),
- kombinace uvedených metod.

V případě využití nedestruktivních metod zkoušení je však nezbytné mít k dispozici kalibrační vztahy mezi parametrem z nedestruktivního zkoušení a pevností betonu v tlaku.

V článku je řešena jednak problematika zjišťování pevnosti v tlaku vysokohodnotných betonů s využitím odrazových tvrdoměrů, konkrétně Schmidtova tvrdoměru typu N a L, a jednak zhodnocení využitelností stávajících kalibračních vztahů uvedených v normách ČSN EN 13791 a ČSN 73 1373 pro zkoušení obyčejných betonů.

ZKUŠEBNÍ ZAŘÍZENÍ A POSTUPY ZKOUŠENÍ

Schmidtovy odrazové tvrdoměry

Zkoušení bylo prováděno Schmidtovým tvrdoměrem typu N a L („Original“ – mechanický). Základní parametry tvrdoměrů jsou následující:

- tvrdoměr typ N: energie rázu 2,25 J, dle údajů výrobce umožňuje zjišťovat pevnosti betonu v tlaku v rozmezí 10 až 70 MPa; ČSN 73 1373 je určen pro zkoušení konstrukcí s minimální tloušťkou 100 mm.
- tvrdoměr typ L: energie rázu 0,75 J, dle údajů výrobce umožňuje zjišťovat pevnosti betonu v tlaku v rozmezí 10 až 70 MPa; ČSN 73 1373 je určen pro zkoušení konstrukcí s minimální tloušťkou 60 mm.

Výstupem měření tímto typem tvrdoměrů je hodnota odrazu.

Zkušební postup

Zkušební zařízení musí splňovat požadavky ČSN EN 12504 – 2.

Zkušební tělesa – zkoušení bylo prováděno na krychlích o hraně 150 mm, stáří betonu bylo 1, 2, 7, 14, 21, 28 a 60 dnů. Vzorky byly uloženy v normovém uložení (t = 20±2 °C, $\varphi \geq$ 95 %). Zkoušeny byly betony pevnostní třídy C55/67 a C80/95.

Zkušební plocha – zkušební plocha byla upravována postupem dle ČSN 73 1373 (vybroušení za sucha tak, aby byla patrná struktura betonu). Po obroušení byly ze zkušební plochy odstraněny veškeré nečistoty a jiné cizorodé částice.

Postup zkoušení – zkušební těleso bylo umístěno do zkušebního lisu a zatíženo silou odpovídající 10 % předpokládané pevnosti betonu (postup dle ČSN 73 1373), která byla na této hodnotě udržována po celou dobu zkoušení odrazovým tvrdoměrem. Na každé zkušební ploše bylo provedeno patnáct měření odrazovým tvrdoměrem, přičemž minimální vzdálenost mezi jednotlivými zkušebními body a od hrany zkušebního tělesa je 25 mm. Poloha tvrdoměru byla **vodorovná**.

Po ukončení nedestruktivních zkoušek bylo zkušební těleso zatíženo až do porušení. Pevnost betonu v tlaku se stanoví výpočtem podle vzorce (1):

$$f_{c,cu} = \frac{F}{A_c} \text{ [MPa]}, \quad (1)$$

kde $f_{c,cu}$ značí pevnost betonu v tlaku, F sílu při porušení [N] a A_c tlačnou plochu [mm^2].

Vyhodnocení výsledků zkoušek – výsledkem měření je soubor hodnot odrazů na zkoušeném výrobku. Ze souboru jednotlivých hodnot odrazu R_i na zkušební ploše se vypočítá průměrná hodnota odrazu na výrobku R_z a horní a spodní mez, která je ±13 % od střední hodnoty. Hodnoty odrazu R_i ležící mimo tento interval se vyloučí. Ze zbývajících hodnot se znovu vypočítá střední hodnota R_z. Jestliže po vyloučení odlehlých hodnot R_i zůstane méně než dvanáct platných hodnot, zkoušený vzorek se vyloučí a nahradí se novým.

VÝSLEDKY ZKOUŠENÍ A KALIBRAČNÍ VZTAHY

Pro zpracování kalibračních vztahů bylo odzkoušeno celkem 125 zkušebních betonových krychlí, které byly zkoušeny ve stáří 1, 2, 7, 14, 21, 28 a 60 dní. Na základě výsledků destruktivních a nedestruktivních zkoušek byly zpracovány s využitím metody nejmenších čtverců kalibrační vztahy pro určení pevnosti betonu v tlaku z hodnoty odrazu.

Využitelnost kalibračních vztahů byla hodnocena na základě hodnoty korelačního koeficientu r, který charakterizuje těsnost korelace mezi pevností betonu v tlaku a hodnotou odrazu tvrdoměru. Pro hodnocení byla využita kritéria uvedená v [3]:

$0{,}5 \geq r < 0{,}7$ – význačná těsnost vztahu
$0{,}7 \geq r < 0{,}9$ – vysoký stupeň těsnosti vztahu
$r \geq 0{,}9$ – vysoká vázanost mezi proměnnými

Z hlediska praktického využití jsou vhodné kalibrační vztahy s hodnotou korelačního koeficientu $r \geq 0{,}85$.

Výsledky měření jsou graficky znázorněny na obr. 1 – Schmidtův tvrdoměr typu N a na obr. 2 – Schmidtův tvrdoměr typu L.

Kalibrační vztahy

Pro určení pevnosti betonu v tlaku z hodnoty odrazu tvrdoměru byly metodou nejmenších čtverců zpracovány následující kalibrační vztahy (2) až (11):

Schmidtův tvrdoměr typ N

- stáří betonu 1 až 60 dní: $f_{ce,N} = 0{,}0315\, R_N^{1,975}$, (2)
  kde $R \in \{15; 64\}$ a $r = 0{,}97$,
- stáří betonu 2 až 60 dní: $f_{ce,N} = 0{,}0549\, R_N^{1,8326}$, (3)
  kde $R \in \{30; 64\}$ a $r = 0{,}94$,
- stáří betonu 7 až 60 dní:
  $f_{ce,N} = 0{,}0096\, R_N^2 + 1{,}4231\, R_N - 21{,}8$ (4)
  kde $R \in \{30; 64\}$ a $r = 0{,}9$,
- stáří betonu 2 až 7 dní: $f_{ce,N} = 0{,}0561\, R_N^{1,8098}$, (5)
  kde $R \in \{30; 56\}$ a $r = 0{,}97$,
- stáří betonu 1 až 7 dní: $f_{ce,N} = 0{,}0561\, R_N^{1,8098}$, (6)
  kde $R \in \{15; 56\}$ a $r = 0{,}97$.

Schmidtův tvrdoměr typ L

- stáří betonu 1 až 7 dní: $f_{ce,L} = 0{,}0914\, R_L^{1,7443}$, (7)
  kde $R \in \{15; 50\}$ a $r = 0{,}97$,
- stáří betonu 2 až 7 dní: $f_{ce,L} = 0{,}03517\, R_L^{1,3762}$, (8)
  kde $R \in \{25; 50\}$ a $r = 0{,}95$,
- stáří betonu 7 až 60 dní:
  $f_{ce,L} = 0{,}0727\, R_L^2 - 4{,}1545\, R_L - 109{,}1$ (9)
  kde $R \in \{34; 56\}$ a $r = 0{,}85$.

POROVNÁNÍ ZPRACOVANÝCH KALIBRAČNÍCH VZTAHŮ SE VZTAHY UVEDENÝMI V EN 13791 A ČSN 73 1373

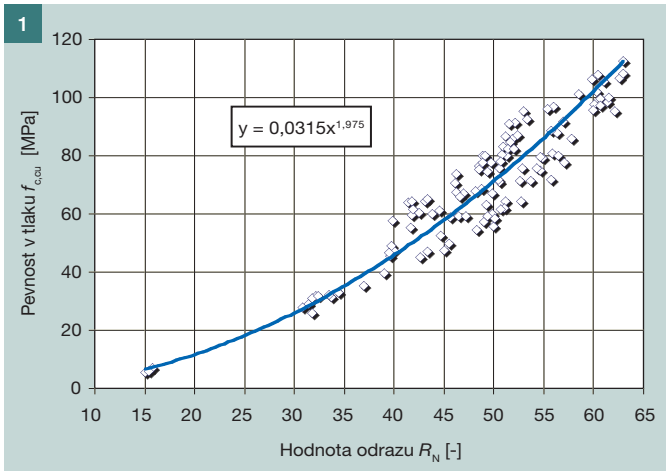
Vztahy pro určení pevnosti betonu v konstrukci z hodnoty odrazu odrazového tvrdoměru uvedené v EN 13791 a ČSN 73 1373 jsou zpracovány pro dříve vyráběné hutné betony s pevnostmi do 60 MPa.

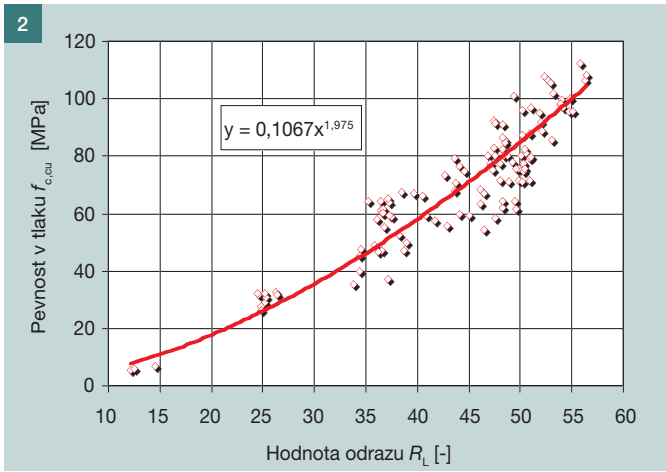
Porovnání zpracovaných kalibračních vztahů (2) až (4), (7) a (9) bylo provedeno jednak pro rozsah platnosti kalibračních vztahů uvedených v normách vztahy (10) až (13) a jednak byly tyto vztahy dopočítány až do maximální hodnoty odrazu zjištěné při tvrdoměrném zkoušení vysokohodnotných betonů, aby bylo možno posoudit jejich případnou použitelnost (obr. 3 a 4).

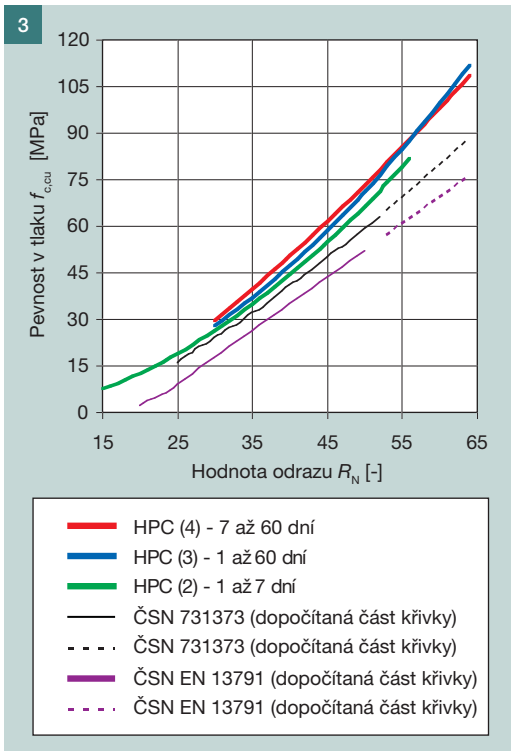
V EN 13791 jsou pro základní křivku uvedeny dva vztahy, (10) a (11), pro výpočet pevnosti betonu f_R z hodnoty odrazu tvrdoměru R:

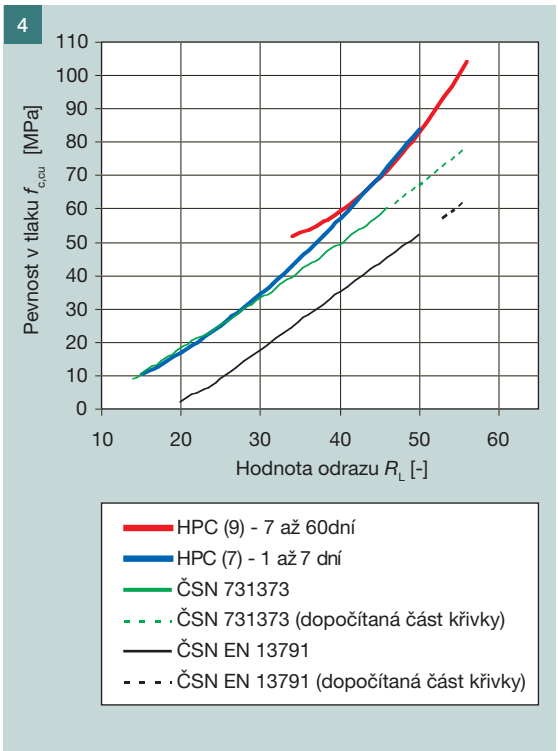
Obr. 1 Výsledky zkoušek vysokohodnotného betonu – závislost mezi hodnotou odrazu Schmidtova tvrdoměru typu N a pevností betonu v tlaku ▮ Fig. 1 Result of high performance concrete tests – correlation between rebound value of Schmidt hammer N type and compression strength of concrete

Obr. 2 Výsledky zkoušek vysokohodnotného betonu – závislost mezi hodnotou odrazu Schmidtova tvrdoměru typu L a pevností betonu v tlaku ▮ Fig. 2 Result of high performance concrete tests – correlation between bounce value of Schmidt hammer L type and compression strength of concrete









Obr. 3 Porovnání vztahů z EN 13791 a ČSN 73 1373 se zpracovanými kalibračními vztahy (2) až (4) pro HPC – Schmidtův tvrdoměr typu N ▮
Fig. 3 Comparison of relations by EN 13791 and ČSN 73 1373 with elaborated calibration relations (2 – 4) for HPC – Schmidt impact hammer, N type

Obr. 4 Porovnání vztahů z EN 13791 a ČSN 73 1373 se zpracovaným kalibračním vztahem (7) a (9) pro HPC – Schmidtův tvrdoměr typu L ▮
Fig. 4 Comparison of relations by EN 13791 and ČSN 73 1373 with elaborated calibration relations (7) and (9) for HPC – Schmidt impact hammer, L type

- $f_R = 1{,}25\,R - 23$, kde $20 \le R \le 24$ (10)
- $f_R = 1{,}73\,R - 34{,}5$, kde $24 \le R \le 50$ (11)

Pro vodorovnou polohu tvrdoměru byly z tabulkových hodnot uvedených v ČSN 73 1373 zpracovány vztahy (12) – Schmidtův tvrdoměr typu N a (13) – Schmidtův tvrdoměr typu L pro výpočet pevnosti betonu f_R z hodnoty odrazu tvrdoměru R:

- $f_R = 0{,}0095\,R^2 + 1{,}0046\,R - 14{,}998$, kde $25 \le R \le 52$ (12)
- $f_R = 0{,}0061\,R^2 + 1{,}2187\,R - 9{,}2771$, kde $14 \le R \le 46$ (13)

Vzhledem ke skutečnosti, že pro vztahy (10) a (11) pro výpočet pevnosti betonu v konstrukci uvedené v EN 13791, není specifikován typ tvrdoměru z hlediska vyvozované energie rázu, byly použity i pro porovnání prováděné pro Schmidtův tvrdoměr typu L.

ZÁVĚR

Na základě provedené analýzy zpracovaných kalibračních vztahů pro určení pevnosti v tlaku vysokohodnotných betonů z hodnoty odrazu Schmidtova tvrdoměru typu N a L a porovnání se vztahy uváděnými v normách v lze konstatovat:

Schmidtův tvrdoměr typu N

Pro určení pevnosti vysokohodnotných betonů v tlaku z hodnoty Schmidtova tvrdoměru typu N byl zpracován směrný kalibrační vztah (3) $f_{ce,N} = 0{,}0549 R_N^{1{,}8326}$ pro stáří betonu 2 až 60 dní, který se vyznačuje vysokou vázaností mezi proměnnými ($r = 0{,}94$) a je prakticky použitelný. Jeho využití se doporučuje od hodnoty odrazu tvrdoměru $R_N \ge 30$. Pro určování pevností vysokohodnotných betonů ve stáří 1 až 7 dní lze také využít zpracovaný vztah (2).

Z porovnání vztahů pro určení pevnosti betonu z hodnoty odrazu tvrdoměru uvedených v EN 13791 (10) a (11) a ČSN 73 1373 (12) se vztahy (2) až (4) zpracovanými pro vysokohodnotné betony vyplývá, že normové vztahy (10) až (12) podhodnocují pevnosti betonu.

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] *Janko J.:* Statistické tabulky, ČSAV, Praha, 1958
[3] *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
[4] *Brožovský J., Fojtík T., Brožovský J., jr.:* Built-in Concretes Made with Gypsum Free Cements: Compression Strength Determination Using Nondestructive Testing Methods, The 3rd Inter. Conf. on Structural Engineering, Mechanics and Computation, Cape Town, South Africa, 2007
[5] ČSN EN 13791 Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích
[6] ČSN EN 12504-1 Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 1: Vývrty – Odběr, vyšetření a zkoušení v tlaku
[7] ČSN EN 12504-2 Zkoušení betonu v konstrukcích – Část 2: Nedestruktivní zkoušení – Stanovení tvrdosti odrazovým tvrdoměrem ČSN 73 1373 : 1983 Tvrdoměrné metody zkoušení betonu
[8] ČSN 73 1373 : 2011 Nedestruktivní zkoušení betonu – Tvrdoměrné metody zkoušení betonu

Schmidtův tvrdoměr typu L

Zpracovaný kalibrační vztah (9) pro hodnoty odrazu betonu $R_L > 30$ vykazuje hodnotu koeficientu korelace $r = 0{,}85$, tj. je na hranici praktické použitelnosti, což omezuje využitelnost tohoto typu tvrdoměru při hodnocení pevností vysokohodnotných betonů.

Z porovnání vztahu (9) pro HPC, hodnoty odrazu betonu $R_L > 30$, se vztahy uvedenými v EN 13791 (10, 11) a ČSN 73 1373 (13) vyplývá, že uvedené vztahy podhodnocují pevnosti betonu.

Z porovnání vztahu (7) pro HPC (stáří betonu 1 až 7 dní)

se vztahem (13) pro Schmidtův tvrdoměr typu L uvedený v ČSN 73 1373 vyplývá, že pro hodnoty odrazu $R_L \leq 30$ není významný rozdíl mezi vyhodnocenými pevnostmi dle těchto vztahů.

Ostatní

Rozšíření použitelnosti vztahů uvedených v ČSN EN 13791 a ČSN 73 1373 dopočítáním pevností z hodnot odrazu, které leží za horní hranicí platnosti kalibračního vztahu, má obdobnou tendenci, tj. podhodnocení pevnosti HPC, a proto není vhodné.

Rozdílné hodnoty pevností pro stejné hodnoty odrazu lze vysvětlit rozdílným složením, a tím i rozdílnou strukturou vysokohodnotných / vysokopevnostních betonů ve srovnání s dříve vyráběnými obyčejnými betony, pro které byly normové kalibrační vztahy zpracovány.

Pro upřesnění výsledků nedestruktivních zkoušek pevnosti betonu v tlaku odrazovým tvrdoměrem se doporučuje postupovat dle ustanovení ČSN 73 1373:2011.

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 odborným lektorem.

HYDROPOL

PRO ZAJÍMAVÉ PROJEKTY V ENERGETICE
HLEDÁME

- **projektového manažera v investiční výstavbě** (VŠ technického směru)
- **zkušené projektanty** (VŠ technického směru)
- **developera projektu**
- **statika se zaměřením na vodní stavby**
- **vedoucího nákupu** (stavba a technologie)

• tel.: +420 603 488 883
• e-mail: zamestnani@hydropol.cz

www.hydropol.cz

SSBK

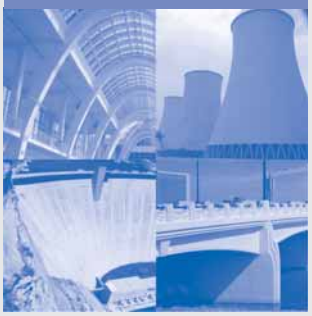
SDRUŽENÍ PRO SANACE BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

zájmové sdružení právnických osob registrovaných v České republice, zabývající se sanacemi betonových konstrukcí

pořádání mezinárodního sympozia se sanační tématikou

pořádání kurzů, seminářů a setkání odborníků

spolupráce na tvorbě normativní báze v oboru sanací betonových konstrukcí



SDRUŽENÍ PRO SANACE BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ
Sirotkova 3134/54a, CZ - 616 00 Brno, Tel.: +420 541 421 188, Fax: +420 541 421 180, E-mail: ssbk@ssbk.cz
www.ssbk.cz