

IDEALIZACE MODELU SPŘAŽENÍ DŘEVO-VLÁKNOBETONOVÝCH KOMPOZITNÍCH KONSTRUKCÍ ■ IDEALIZATION OF THE CONNECTION MODEL FOR TIMBER-FIBRE CONCRETE COMPOSITE STRUCTURES

Milan Holý, Vojtěch Petřík,
Radomír Pukl

Článek se zabývá implementací materiálového modelu kontaktu do komplexních modelů pro nelineární analýzu dřevo-vláknobetonových kompozitních konstrukcí. Modelování spřažení pomocí diskretních spřahovacích prvků vede u komplexních modelů k vysokému počtu konečných prvků, a tím i k vysoké výpočetní náročnosti. V případě výpočtů zaměřených na globální analýzu konstrukce se proto aplikuje spřažení „rozetřené“ neboli rovnoměrně na celou plochu kontaktu mezi oběma materiály. Cílem článku je představit možný způsob idealizace modelu spojitého kontaktu, který aproximuje skutečné chování dřevo-vláknobetonové konstrukce a zároveň je univerzálně aplikovatelný pro komplexní modely plynoucí z potřeby projekční praxe. ■ This paper deals with implementation of the material parameters to the complex models for nonlinear analysis of timber-fibre concrete composite structures. Model of the connection based on the discrete coupling elements leads to a high number of finite elements which means high computational demand if the complex models are used. Therefore, continuous contact smeared over the area of contact between both the materials is applied in the case of calculations for global analysis of the structure. The aim of this article is to present a possible way of idealization of the continuous contact model that approximates the actual behaviour of timber-fibre reinforced concrete structures. Material model of the contact is based on the Mohr-Coulomb theory. This model is generally applicable to complex systems resulting from designers practice needs.

Prezentovaný model kontaktu byl odvozen z protlačovací zkoušky tělesa z rostlého dřeva třídy C24 spřaženého v pěti případech s vláknobetonovou (FRC) deskou tloušťky 60 mm a ve čtyřech případech s deskou tloušťky 35 mm z ultra vysokohodnotného vláknobetonu (UHPFRC). Spřažení bylo realizováno speciálními spřahovacími vruty TCC o průměru 7,3 mm a délce 150 mm zabudovanými pod úhlem 45°.

Záznam protlačovací zkoušky představuje závislost přenášené síly na pokluzu v kontaktní spáře. Pro účely numerické simulace byl náběh působící síly vyvolaný zatlačením podpor eliminován, což bylo dosaženo posunem asymptoty tak, aby procházela počátkem souřadného systému (obr. 2a). Upravené záznamy zkoušek převedené na závislost napětí-pokluz jsou uvedeny na obr. 1.

Z výsledků protlačovacích zkoušek je patrné, že rozdílná tloušťka a pevnost vláknobetonových komponent FRC a UHPFRC nemá vliv na chování spřažení z hlediska jeho tuhosti, smykové pevnosti i deformačního změkčení.

MODEL PROTlačOVACÍ ZKOUŠKY

Nelineární numerickou analýzou v programu ATENA bylo prokázáno, že vhodnou volbou materiálových parametrů spojitého kontaktu lze dosáhnout velmi dobré shody výsledků numerických simulací protlačovacích zkoušek (3D) s experimenty.

Materiálový model kontaktu je za-

ložen na Mohr-Coulombově teorii. Je definován parametry reprezentujícími skutečné fyzikální vlastnosti kontaktu, které tvoří smyková pevnost (koheze) c , tahová pevnost f_t a součinitel tření φ , a dále parametry sloužícími k numerickým účelům, kterými jsou základní a minimální hodnota normálové a tečné tuhosti K_{nn} , $K_{nn,min}$ a K_{tt} , $K_{tt,min}$.

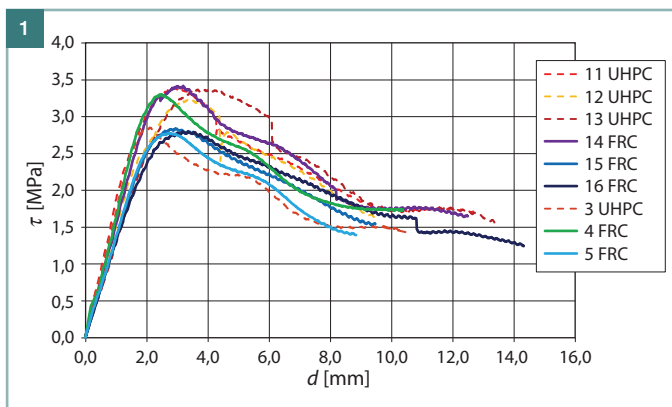
U protlačovací zkoušky je kontaktní plocha namáhána převážně smykem, a proto mají v tomto případě hlavní vliv smykové parametry. Základní hodnota tečné tuhosti určuje směr asymptoty. Vrcholový bod grafu závislosti napětí na pokluzu je určen hodnotou smykové pevnosti. Deformační změkčení lze aproximovat funkcí definující pokles koheze v závislosti na rostoucím posunu. Součinitel smykového tření mezi dřevem a betonem má v případě protlačovací zkoušky zanedbatelný vliv, protože plocha kontaktu není přitlačována vnějším zatížením. Vzhledem k tomu, že spřahovací trny jsou instalovány se sklonem 45° ve směru smykového toku ve spáře, nejsou normálová napětí kolmo na plochu kontaktu nulová. Normálová napětí vznikají rovněž vlivem excentricity podepření a vnašené síly, kdy horní část spáry je tažená a spodní část tlačena (obr. 3). V obecném případě, kdy je plocha kontaktu přitlačována vnějším zatížením, se tření více uplatní. Součinitel tření je uvažován konzervativní hodnotou 0,2.

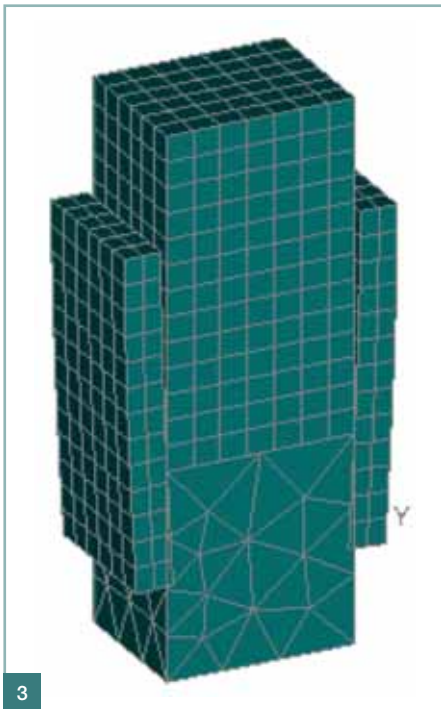
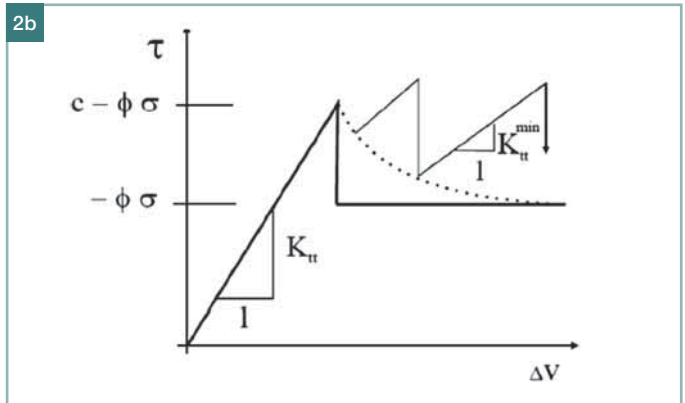
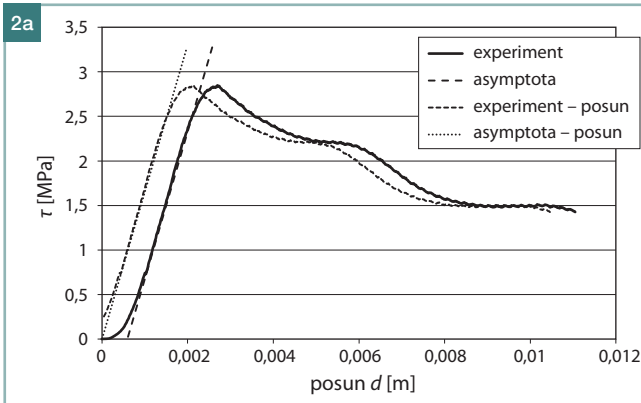
Pro zjištění normálové tuhosti a tahové pevnosti kontaktu by bylo potřeba provést zkoušku kontaktu v ta-

Tab. 1 Materiálové charakteristiky použitých vláknobetonů ■
Tab. 1 Material properties of the used fibre-concretes

Vlastnost		FRC	UHPFRC
Pevnost v tlaku	[MPa]	45	150
Pevnost v tahu za ohybu	[MPa]	4,4	14
Ekvivalentní pevnost v tahu	[MPa]	1,6	5,4
Modul pružnosti	[MPa]	29 016	50 600

Obr. 1 Záznamy protlačovacích zkoušek – závislost napětí-pokluz ■
Fig. 1 Modified records of the push-out shear tests – stress-slip diagram





Obr. 2a Záznam protlačovací zkoušky a jeho posun pro účely numerické simulace, b) materiálový model kontaktu v programu ATENA ■ Fig. 2 a) Record of the push-out shear tests and its modification for the numerical simulation, b) material model of the connection in the ATENA program

Obr. 3 Patrná deformace modelu vlivem vzájemné excentricity vnášené síly a podpor ■ Fig. 3 Deformation of the model caused by eccentricity between load and support

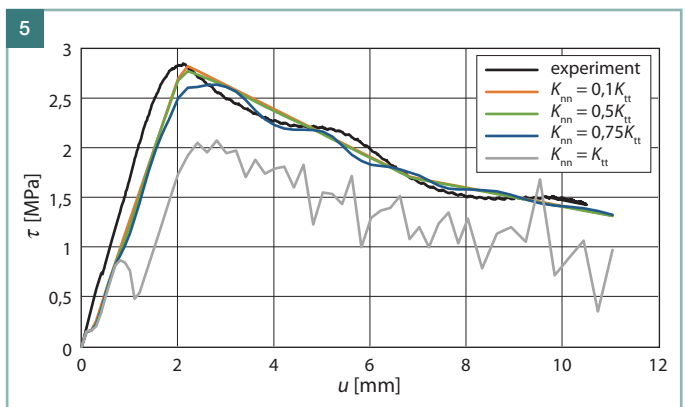
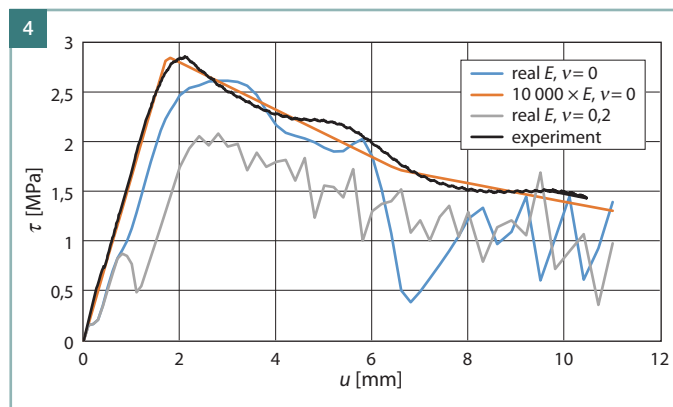
Obr. 4 Vliv úpravy modulu pružnosti a Poissonova čísla spřažených materiálů v programu ATENA na simulaci protlačovací zkoušky ■ Fig. 4 Adjustments of the modulus of elasticity and Poisson's ratio of coupled materials and its effect on the push-out shear test simulation in the ATENA program

Obr. 5 Vliv úpravy normálové tuhosti na průběh simulace protlačovací zkoušky ■ Fig. 5 Effect of adjustments of normal stiffness on the push-out shear test simulation

hu. Tahová pevnost bývá zpravidla oproti smykové pevnosti zhruba poloviční, a proto z ní byla odvozena. Pokles tahové pevnosti (tahové změkčení) by měl zhruba odpovídat smykovému změkčení. Na základě zkušeností autorů výpočetního programu je doporučeno uvažovat normálovou tuhost stejnou hodnotou jako smykovou tuhost.

K modelu protlačovací zkoušky lze použít pro dosažení shody s experi-

mentem v zásadě dva přístupy. První je založen na předpokladu, že beton a dřevo se nedeformují (chovají se jako tuhá tělesa) a veškerá přetvoření v závislosti na vnášené síle jsou simulována výhradně materiálem kontaktu – tzn. materiálové charakteristiky (E , ν) dřeva a betonu musí být příslušně upraveny. Ve skutečnosti jsou však součástí naměřené deformace při smykové zkoušce také deformace spřažených materiálů.



Lze tak sice velmi výstižně aproximovat experimentálně zjištěnou závislost $\tau(\delta)$, odpovídající materiálový model však není zcela vhodný pro aplikaci v numerických modelech komplexněji namáhaných konstrukcí či konstrukčních prvků, neboť nerespektuje (popřípadě tendenčně interpretuje) jiné důležité materiálové parametry, jako je např. modul pružnosti. V případě ohýbaného spřaženého nosníku má modul pružnosti spřažených materiálů nezanedbatelný vliv z hlediska chování konstrukce.

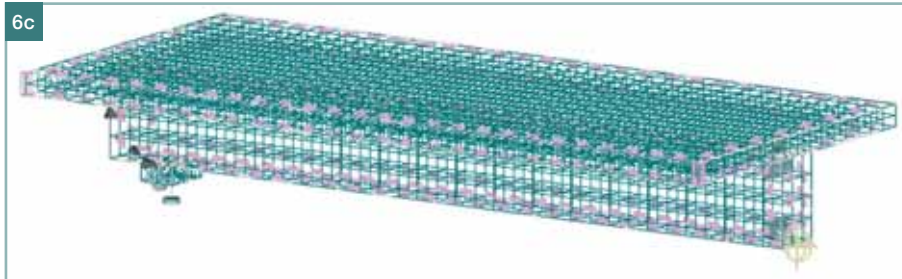
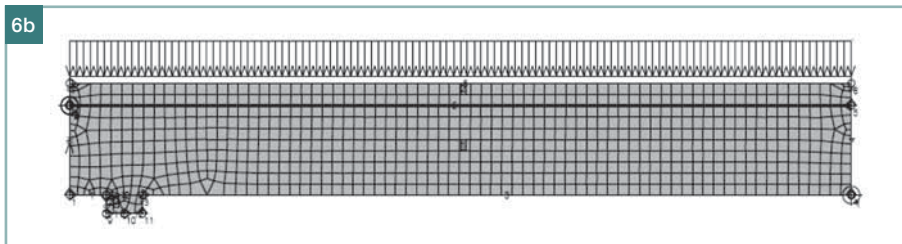
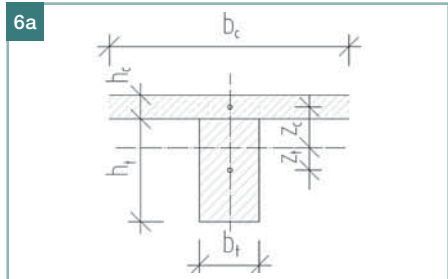
Výstižnější je proto implementovat materiálové charakteristiky (zejména modul pružnosti E a Poissonův součinitel ν) spřažených materiálů do materiálového modelu beze změny tak, aby odpovídaly jejich fyzikálnímu významu, a variovat pouze parametry materiálového modelu kontaktu. Při tomto přístupu však výpočet poněkud hůře konverguje a nelze docílit ideální shody mezi experimentem a numerickou simulací – viz „zvlnění“ závislosti napětí na prokluzu na obr. 4.

„Zvlnění“ lze kromě úpravy spřažených materiálů eliminovat také snížením normálové tuhosti kontaktu vzhledem k tuhosti tečné (obr. 5).

Snížením normálové tuhosti kontaktu dojde k uhlazení diagramu závislosti smykového napětí na prokluzu. U modelů s reálnými moduly pružnosti

Tab. 2 Geometrie průřezu a materiálové charakteristiky ■ Tab. 2 Geometry of the cross-section and material properties

Dřevo			Beton		
h_t	[m]	0,24	h_c	[m]	0,06
b_t	[m]	0,14	b_c	[m]	0,94
E_t	[GPa]	12	E_c	[GPa]	29



spřažených materiálů dochází na počátku zatěžování k určitému „skoku“ – pozvolnějšímu náběhu tuhosti. Podobný pozvolný náběh lze pozorovat i u výsledků experimentu, pro účely numerické simulace byl ale eliminován posunem asymptoty v rámci odstranění vlivu „zatlačení podpor“. Část pozvolného náběhu je však pravděpodobně způsobena deformací materiálu spřažených komponent.

KOMPLEXNÍ MODEL

Ověření materiálového modelu kontaktu bylo provedeno numerickou simulací prostého nosníku zatíženého rovnoměrným spojitým zatížením. Byl zvolen průřez nosníku ve tvaru T, který je tvořen trámem šířky 140 mm a výšky 240 mm z konstrukčního dřeva třídy C24 spřaženým s drátkobetonovou deskou šířky 940 mm a výšky 60 mm s pevností v tlaku 45 MPa a modulem pružnosti 29 GPa. Spřažení je realizováno speciálními spřahovacími vruty TCC o průměru 7,3 mm a délce 150 mm zabudovanými pod úhlem 45°. Popis modelu je uveden na obr. 6.

Pro ověření materiálového modelu kontaktu byl použit elastický mate-

riálový model dřeva a drátkobetonu, aby výsledky nebyly ovlivněny porušením desky či trámu. Naladění kontaktu bylo nejprve provedeno na modelu v programu ATENA 2D. Výsledky ze 3D modelu v ATENA 3D pak byly porovnány s jednoduchým lineárním výpočtem na základě γ -metody, která je součástí Eurokódu 5, vychází z předpokladu nepoddajného spřažení a využívá se pro složené průřezy ze dřeva. Metoda vychází z modelu s konstantní tuhostí pokluzu a je odvozena pro prostě podepřený nosník se sinusovým průběhem momentů. Tento model aplikuje redukci Steinerova doplnku součinitelem γ při výpočtu momentu setrvačnosti průřezu na základě předpokladu nepoddajného spřažení, čímž aproximuje poddajné spřažení. Redukční součinitel γ je určen z průřezových vlastností částí průřezu, délky rozpětí, tuhosti spřahujících prostředků a jejich vzdáleností mezi sebou. γ -metodu lze dostatečně přesně aplikovat také pro parabolický průběh momentů či pro tuhost spřažení rozdělenou na základě průběhu posouvající síly.

Z obr. 7 je zřejmé, že řady grafu pro varianty $K_{nn} = K_{tt}$, $K_{nn} = 0,5K_{tt}$,

$K_{nn} = 0,1K_{tt}$, $0,5f_{t0}$, $2f_{t0}$ se navzájem překrývají, liší se od sebe v řádu setin. Změna normálové tuhosti a tahové pevnosti kontaktu nemá tedy rozhodující vliv na chování ohybané konstrukce, neboť spára je přitlačována svislým zatížením. Z toho je zřejmé, že jak pro parametry kontaktu odvozené za použití idealizace spřažených komponent jako tuhých těles, tak pomocí redukce normálové tuhosti se průhyby nijak výrazně neliší.

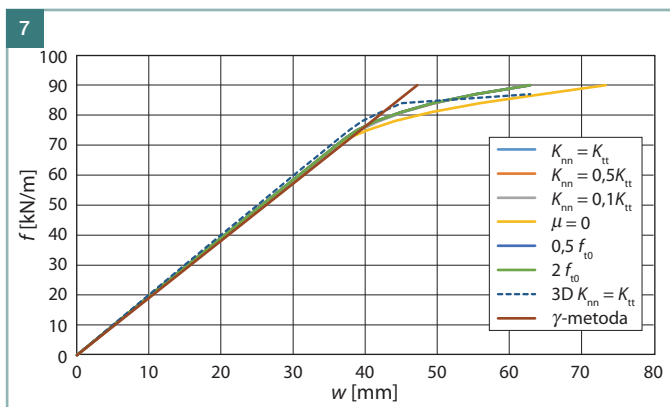
Zatímco v případě simulace protlačovací zkoušky neměl součinitel tření μ podstatný vliv na chování konstrukce, zde se jeho změna projeví výrazněji (obr. 7, základní hodnota je $\mu = 0,2$, ve „žluté variantě“ je použito $\mu = 0$). Tření má vliv po dosažení smykové pevnosti.

ZÁVĚR

Nelineární numerickou analýzou v programu ATENA bylo prokázáno, že vhodnou volbou materiálových parametrů spojitěho kontaktu lze dosáhnout velmi dobré shody výsledků numerických simulací protlačovacích zkoušek s experimenty. Bylo ověřeno, že parametry materiálového modelu kontaktu odvozené z experimen-

Obr. 6 Numerické modely: a) T průřez, b) model ATENA 2D, c) model ATENA 3D ■ Fig. 6 Numerical models: a) T-shape cross-section, b) model ATENA 2D, c) model ATENA 3D

Obr. 7 Graf průhybu uprostřed nosníku v závislosti na rovnoměrném spojitěm zatížení – porovnání výpočtu s různými parametry kontaktu v ATENA 2D s modelem v ATENA 3D a vztahů odvozených z γ -metody ■ Fig. 7 Load-deflection diagram of simply supported beam with uniformly distributed load for cross-section in the middle of span – calculation with several material parameters of the connection model in ATENA 2D and comparison with ATENA 3D and γ -method



Literatura:

- [1] PETŘÍK, V., PHILIPP, N. Dřevo-vláknobetonové kompozitní konstrukce – experimentální program. *Beton TKS*. 2013, roč. 13, č. 1, s. 70–73.
- [2] PETŘÍK, V., PHILIPP, N., KŘÍSTEK, V., PŮLPÁN, M. Full-scale testy kompozitních konstrukcí FRC-dřevo, UHPFRC-dřevo. In: *Sborník 18. konference Betonářské dny, Sekce: Mosty 2*. Praha, 2011, str. 337-342.
- [3] ŠLAPKA, P. Vyhodnocení protlačovacích zkoušek a stanovení materiálových parametrů modelu rozetřeného spřažení a následná numerická analýza chování spřahovacího trnu. In: *Phd Workshop*. FSV ČVUT, Praha, 2013.

tu lze dále úspěšně použít v komplexních modelech pro prvky namáhané ohybem.

V případě ohybem namáhaného prvku zatíženého rovnoměrným spojitým zatížením má oproti protlačovací zkoušce nezanedbatelný vliv tření. U modelovaného spřaženého ohybaného prvku byla dosažena mez pevnosti materiálů trámu i desky dřeva, než došlo k dosažení nelineární oblasti nárůstu prokluzu. V případě vhodně zvolených dimenzí kompozitní konstrukce dojde dříve k porušení spřažených komponent, a spřažení lze tedy uvažovat jako lineárně tuhé.

Ing. Milan Holý
Fakulta stavební ČVUT v Praze
Katedra betonových
a zděných konstrukcí
e-mail: milan.holy@fsv.cvut.cz



Ing. Vojtěch Petřík, Ph.D.
Obermeyer Helika, a. s.
e-mail: vojtech.petrik@obermeyer.cz



Ing. Radomír Pukl, CSc.
Červenka Consulting, s. r. o.
e-mail: radomir.pukl@cervenka.cz



Text článku byl posouzen odborným lektorem.
The text was reviewed.



UMÍTE BETONOVAT? MY PROFESIONÁLOVÉ ANO

V České republice se ročně vyrábí 5 až 7 mil. m³ transportbetonu. Beton či betonová konstrukce nechybí v žádné stavbě. Na kvalitě betonu závisí celková kvalita provedeného díla a jeho životnost. Každá technologická nekázeň, chyby pracovníků během výroby, přepravy a ukládání, zpracování čerstvého betonu a ošetřování prováděné betonové konstrukce jsou nepřijatelné, neboť jsou častou příčinou poruch a snížené životnosti betonových konstrukcí (počítající se minimálně na 50 až 100 let). Jejich náprava je ve většině případů komplikovaná a někdy i prakticky nemožná.

Zatímco pro fázi výroby a přepravy čerstvého betonu jsou všichni odborně připravováni a školeni (např. průkaz strojníka), navazující betonáže a ošetřování betonových konstrukcí velmi často provádějí pracovníci bez jakékoli kvalifikace a znalostí. Zpracování a ošetřování betonových konstrukcí, které následují po dodávce transportbetonu na stavbu, musí být rovněž prováděno profesionálně, s maximální pečlivostí a bez chyb.

Nelze tolerovat nekontrolované přidávání vody při přejímce čerstvého betonu, nedodržování technologických postupů a pravidel při jeho ukládání, zpracovávání a ošetřování nejen v zimním období, ale i v létě. Příčinou těchto

chyb jsou často nedostatečné odborné znalosti pracovníků, kteří betonáže na stavbách provádějí, nebo i nedostatečný počet pracovníků potřebných k plynulé betonáži a ošetřování. Dochází tak nejen k znehodnocení práce v systému budování konstrukcí z monolitického betonu, ale především k snížení kvality a životnosti betonových konstrukcí.

Proto navrhuji, aby všichni betonáři absolvovali jednotné **odborné školení** v rozsahu cca tří dnů (24 h) zakončené závěrečným pohovorem a vydáním osvědčení s centrální evidencí podobně jako strojnické průkazy ve smyslu vyhlášky 77/65 Sb. Cílem bude poskytnout a doplnit potřebné informace a znalosti o strojní technice nezbytné pro betonáž na stavbě v souladu především s ČSN EN 13 670 a ČSN EN 206, aby bylo dosaženo projektem stanovené kvality betonové konstrukce a bezpečnosti práce na všech stavbách.

Součástí písemné přihlášky by mělo být potvrzení lékaře o zdravotní způsobilosti a odborná praxe minimálně 100 h.

Ing. Vladimír Spěvák, CSc.
e-mail: vladimir.spevak@seznam.cz



NÁVRH OBSAHU ŠKOLENÍ PRO BETONÁŘE

- Úvod
- Význam a cíl školení
- Rozhodující předpisy pro provádění betonových konstrukcí
- Požadavky na kvalitní čerstvý beton a beton
 - vlastnosti čerstvého betonu
 - vlastnosti ztvrdlého betonu
 - vliv prostředí
 - přejímka čerstvého betonu na stavbě
- Technologie zpracování čerstvého betonu
 - ukládání čerstvého betonu
 - zhutňování čerstvého betonu
 - tvrdnutí betonu
 - betonáž v létě
 - betonáž v zimě
 - ošetřování betonu
 - odbedňování
 - kontrola
- Bezpečnost práce a ochrana zdraví
 - základní předpisy na zajištění bezpečné práce a obsluhy zařízení
 - základní pojmy a požadavky
 - obecné povinnosti vedení stavby
 - obecné povinnosti betonáře
- Opakování, diskuze
- Závěrečná zkouška, pohovor, předání osvědčení