

SPECIFIKACE BETONU POMOCÍ JEHO VLASTNOSTÍ ■

PERFORMANCE-BASED SPECIFICATION FOR CONCRETE

Jakub Hobza, Robert Coufal,
Jan L. Vítek

Přístupy k návrhu betonové směsi mohou mít různé formy: preskriptivní návrh, výkonový návrh, nebo jejich kombinaci. Cílem článku je objasnit a porovnat tyto různé přístupy k návrhu receptur a na výsledcích provedených zkoušek poukázat na nejasnosti a problémy spojené s preskriptivním návrhem. ■ *Design of the concrete mixture can be based on different approaches: prescriptive design, performance-based design and their combination. The goal of this paper is to clarify and compare these two different approaches. Using the results of the tests, the ambiguities and problems connected with the prescriptive design are pointed out.*

Z betonu se postupem času stal jeden z nejpoužívanějších stavebních materiálů jak v České republice, tak i ve světě. Dnes se beton využívá snad ve všech stavebních odvětvích, a to nejen pro účely konstrukční, ale zároveň také estetické a zcela běžně se již setkáváme i s požadavky na beton pohledový či probarvovaný.

Tato široká oblast uplatnění přispívá k velmi rychlému vývoji v oblasti technologie betonu, který se týká zejména jeho přísad a příměsí. Díky tomuto vývoji lze vytvořit velmi složité betonové konstrukce a zároveň lze zajistit investorem požadovanou kvalitu a životnost betonu.

Při navrhování betonové směsi je historicky zakořeněna preskriptivní neboli předpisová specifikace betonové směsi. Kvůli limitování množství a typu přísad, příměsí, cementu a vody však tento typ specifikace bohužel ztěžuje vývoj nových technologických postupů, neboť je často založen na historických zkušenostech a empirických vztazích, které mohou vést k vyšším nákladům nebo k nechtěným výsledkům. Logickým krokem je tedy přechod z preskriptivní specifikace na performance-based (výkonovou) specifikaci neboli specifikaci na základě požadovaných výsledných (uživatelé specifikovaných) vlastností.

PRESKRIPTIVNÍ SPECIFIKACE

Preskriptivní specifikace definuje přesné metody výroby betonové směsi a zároveň určuje nebo omezuje množství jejích složek. Zaměřuje se převážně na vlast-

nosti vstupních složek, dávkování, míchání, dopravu a následné ošetřování. Tato metoda se opírá převážně o dlouhodobá zkoušení, zkušenosti a empirické vztahy a málokdy zohledňuje vztah mezi specifikovanými detaily a konečnými vlastnostmi betonu. Může se tedy stát, že výsledné vlastnosti neodpovídají původním požadavkům zákazníka. [1], [2]

Obecně můžeme mezi preskriptivní charakteristiky zařadit všechny charakteristiky, které udávají nebo omezují množství primárních a sekundárních surovin v betonu. **Základní preskriptivní charakteristiky** tedy jsou:

- minimální množství cementu,
- druh a třída cementu,
- maximální nebo přesně stanovené množství příměsí, přísad a jejich specifikace,
- specifikace frakce kameniva,
- maximální vodní součinitel. [2], [3]

Za příklad preskriptivní specifikace betonu lze považovat specifikaci dle normy ČSN EN 206. Např. pro stupeň vlivu prostředí XF4 je zde předepsán maximální vodní součinitel 0,45, minimální množství cementu 340 kg/m³ a obsah vzduchu minimálně 4 %. Není zde vůbec řešeno ověřování odolnosti finální receptury v daném prostředí a odolnost se pouze předpokládá na základě složení betonu a historických zkušeností. [6]

VÝKONOVÁ SPECIFIKACE

Výkonová specifikace neboli specifikace na základě výsledných nebo konečných vlastností betonu (Performance-based specification of concrete) je podle National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA, USA) definována jako „soubor instrukcí, které obsahují funkční požadavky pro ztvrdlý beton, s ohledem na jeho aplikaci. Tyto instrukce by měly být jasné, dosažitelné, měřitelné a vykonatelné“. Skupina ACI's Innovative Task Group (ITG, USA) ji definuje takto: „specifikace na základě výsledných vlastností definuje požadovaný výsledek, kritéria k posouzení vlastností a ověření bez požadavků na způsob, jak se těchto výsledků dosáhne“. [1], [2]

Mezi výkonové charakteristiky můžeme zařadit všechny parametry, které popisují výsledný stav buďto čerstvého, nebo ztvrdlého betonu. Mezi

základní charakteristiky pro čerstvý beton patří:

- zpracovatelnost,
- sednutí kužele,
- čerpatelnost,
- segregace neboli oddělení některých složek (např. hrubého kameniva) od zbytku betonu,
- krvácení,
- obsah vzduchu,
- teplota,
- homogennost směsi.

Charakteristiky pro ztvrdlý beton jsou:

- pevnost v tlaku,
- pevnost v tahu,
- pevnost v tahu za ohybu,
- objemové změny,
- pórovitost,
- rozmístění pórů ve směsi,
- propustnost,
- odolnost proti mrazu,
- odolnost proti obrusu,
- odolnost proti síranům,
- odolnost proti kyselinám,
- teplotní vodivost,
- objemová hmotnost,
- absorpce radiace,
- barva,
- cena. [2], [3]

Za příklad výkonové specifikace lze částečně považovat doplňkovou normu ČSN P 73 2404, která např. pro stupeň vlivu prostředí XF4 kromě preskriptivních parametrů (vodní součinitel, množství cementu) uvádí i výkonové parametry určující trvanlivost betonu v daném prostředí (maximální průsak, odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování). Samozřejmostí je uvedení způsobu zkoušení parametru a kritérií kontroly shody. Čistá výkonová specifikace by znamenala specifikaci pouze výkonových parametrů (maximální průsak, odolnost betonu vůči zmrazování a rozmrazování) bez specifikace preskriptivních parametrů (vodní součinitel, množství cementu apod.). [7]

PROBLEMATIKA SPECIFIKACE MAXIMÁLNÍHO VODNÍHO SOUČiniteLE

V současné době je betonová směs v České republice specifikována podle normy ČSN EN 206+A1, příp. pomocí kombinace norem ČSN EN 206+A1 a ČSN P 73 2404. Dle těchto norem jsou specifikovány minimální pevnosti betonu v tlaku, stupně vlivu prostředí,

Tab. 1 Znárodnění porovnávaných receptur
Tab. 1 Illustration of the compared recipes

| Vodní součinitel w/c | Množství cementu v 1 m ³ [kg] | | |
|-------------------------|--|-----|-----|
| | 400 | 350 | 300 |
| 0,45 | | + | |
| 0,50 | + | + | + |
| 0,55 | | + | |

Tab. 2 Výsledky zkoušky sednutí kužele
Tab. 2 Results of the slump test

| Množství cementu v 1 m ³ [kg] | 300 | 350 | 400 | 350 | 350 | 350 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| vodní součinitel | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,45 | 0,5 | 0,55 |
| typ kameniva | těžené | těžené | těžené | drcené | drcené | drcené |
| sednutí [mm] | 220 | 220 | 200 | 230 | 230 | 120 |

maximální velikosti zrna kameniva, obsah chloridů a konzistence. Další obvyklé charakteristiky jsou modul pružnosti, maximální průsak tlakovou vodou, obsah vzduchu a doba dosažení minimální pevnosti v tlaku (28, 56 a 90 dní). [6], [7]

Výrobce betonu je povinen zajistit dosažení těchto charakteristik, zároveň je ale omezen předepsaným limitním složením a limitními parametry uvedenými v normách, konkrétně maximálním vodním součinitelem, minimální pevností betonu v tlaku, minimálním množstvím cementu a v některých případech maximálním průsakem tlakovou vodou a minimálním obsahem vzduchu (jedná se hlavně o beton vystavený působení zmrazovacích cyklů).

Jednou ze základních preskriptivních charakteristik je vodní součinitel, který udává poměr mezi hmotností vody a hmotností cementu. Dlouhodobým zkoušením bylo zjištěno, že vodní součinitel má pro pevnost betonu velký význam. Vyšší vodní součinitel pevnost snižuje a naopak nižší vodní součinitel pevnost zvyšuje. Bylo jednoznačně prokázáno, že největší vliv na pevnost betonu má pórovitost cementového kamene. Pokud zvýšíme vodní součinitel, navýšíme množství vody v betonové směsi, a tím zvýšíme i výslednou pórovitost betonu.

Prvním problémem je, že vodní součinitel je takřka nezjistitelný na ztvrdlém betonu. Dalším problémem je koncepce k-hodnoty pro zohlednění příměsí při výpočtu vodního součinitele, kdy k-hodnota zohledňuje množství příměsí přidané zvlášť, zároveň je ale při-

měř, která je součástí cementu (např. u směsných cementů), uvažována jako portlandský cement. Třetím zásadním problémem této preskriptivní charakteristiky je určitá nejasnost v dávkování. Při stejném vodním součinitele bude betonová směs s větším množstvím cementu obsahovat větší množství vody než směs s nižším množstvím cementu. Dá se tedy říci, že tyto dvě směsi mohou mít při stejném vodním součinitele odlišné výsledné vlastnosti. Tato problematika je blíže popsána a řešena v následující části článku.

ZPRACOVATELNOST POROVNÁVANÝCH RECEPTUR

Cílem experimentu bylo porovnat receptury, které se od sebe odlišují jak různým množstvím cementu, tak různým vodním součinitelem. Tab. 1 popisuje vybraná množství cementu a hodnoty vodního součinitele. Konzistence čerstvého betonu byla měřena pomocí zkoušky sednutí kužele (tab. 2).

Protože každá receptura obsahuje různé množství vody, byla snaha kompenzovat tento fakt přidáním různého množství plastifikačních přísad, aby konzistence receptur byla co nejpodobnější. Problém nastal u receptury s 300 kg cementu a vodním součinitelem 0,5, kde bylo kvůli menšímu obsahu vody přidáno větší množství plastifikačních přísad. Sednutí sice bylo naměřeno 220 mm, ale směs byla „přepřelastovaná“ (s příliš vysokým obsahem plastifikátoru) a konzistence „medová“. Obdobný problém se vyskytl u receptury s 350 kg cementu a vodním sou-

činitelem 0,45, kde bylo změřeno sednutí 230 mm. Obě tyto směsi by byly pro běžné použití neakceptovatelné. Naopak u receptury s 350 kg cementu a vodním součinitelem 0,55 bylo dosaženo sednutí pouze 120 mm, ale výsledná zpracovatelnost při výrobě vzorků byla přijatelná.

Sednutí kužele je jednoduchá a rychlá zkouška zpracovatelnosti, velkou výhodou ale zůstává, že může zkruslovat skutečnou zpracovatelnost např. přeplastované směsi. Největší vliv na zpracovatelnost však nemá vodní součinitel, ale spíše absolutní množství záměsové vody.

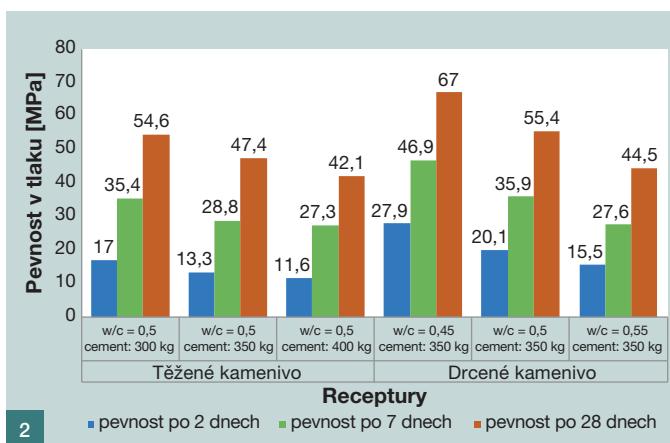
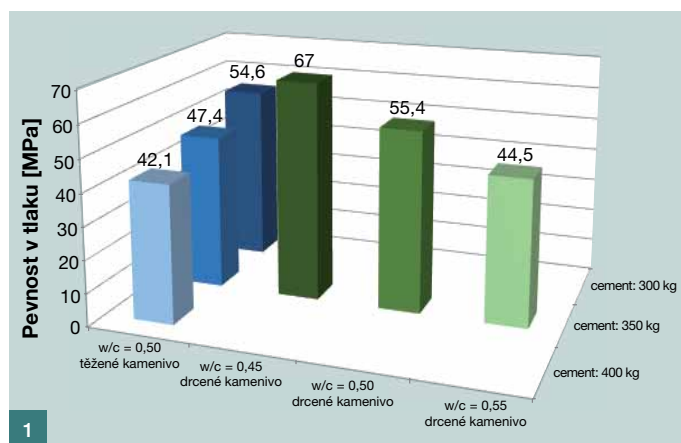
PEVNOST V TLAKU

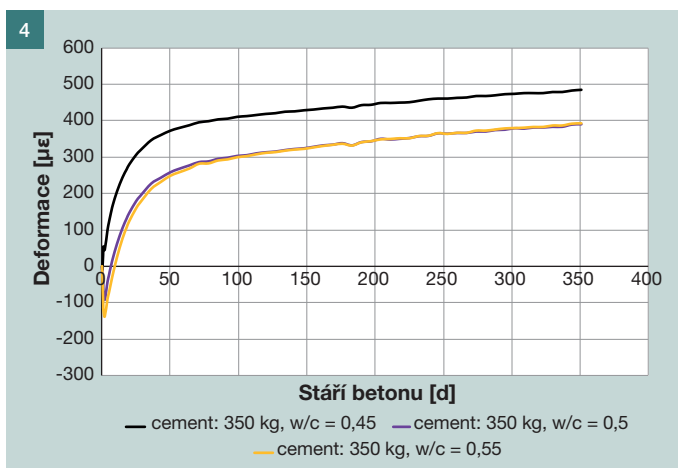
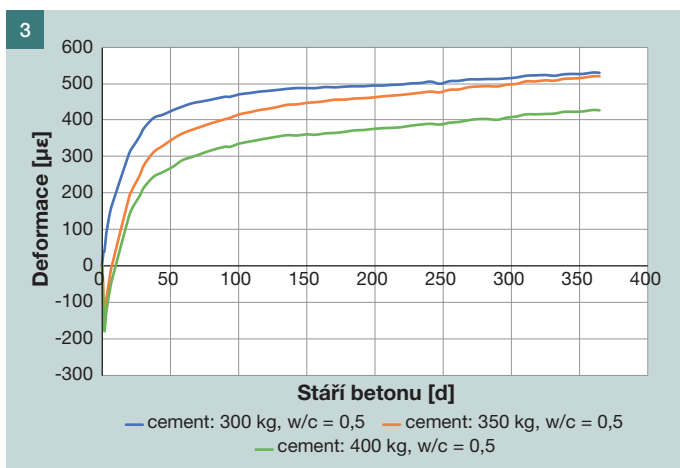
Pevnost v tlaku byla měřena na krychlicích o hraně 150 mm, a to při stáří betonu 2, 7 a 28 dní. Pokud porovnáme receptury s různým vodním součinitelem a stejným množstvím cementu, nikoho pravděpodobně nepřekvapí, že se zvyšujícím se vodním součinitelem klesá pevnost betonu v tlaku. Tento dlouhodobě odzkoušený a obecně přijímaný vztah poprvé popsal T. C. Powers v roce 1958. [8]

Když porovnáme receptury, které mají stejný vodní součinitel, ale různé množství cementu, výsledky ukazují, že se vzrůstajícím množstvím cementu klesá pevnost betonu v tlaku (obr. 1 a 2).

Obr. 1 Krychelná pevnost v tlaku po 28 dnech
Fig. 1 Cube compressive strength at 28 days

Obr. 2 Krychelná pevnost v tlaku
Obr. 2 Cube compressive strength





Pevnost betonu v tlaku pravděpodobně nezáleží tolik na množství cementu v betonu, ale více záleží na množství záměsové vody, a tedy na výsledné pórovitosti. Vliv kameniva je též zajímavý. Beton s 350 kg cementu a vodním součinitelem 0,5 vykazuje pevnost 47,4 MPa při použití těžného kameniva, zatímco u drčeného kameniva je pevnost 55,4 MPa, což je značný rozdíl (nárůst 17 %).

SMRŠŤOVÁNÍ

Smršťování betonu bylo měřeno na válcích o průměru podstavy 150 mm a výšce 300 mm pomocí zabetonovaných strunových tenzometrů TES/5.5/T. Vzorky byly uloženy v normálním laboratorním prostředí po dobu 48 h, poté byly odbedněny a uloženy do klimatizované místnosti s řízenou teplotou a vlhkostí ($T = 18$ až 22 °C, $RH = 60$ až 70 %). Protože se zkoumané vzorky nacházely vždy ve stejných laboratorních podmínkách, mohou být rozdíly mezi objemovými změnami betonu přičítány pouze různému složení receptur.

Smršťování betonu závisí na složení betonu a na podmínkách, kterým je betonová konstrukce vystavena. Celkové smršťování lze rozdělit na smršťování

autogenní a smršťování od vysychání. Obecně se předpokládá, že autogenní smršťování závisí zejména na množství cementu v betonu a není ovlivněno vlhkostí prostředí, ve kterém jsou tělesa uložena. Smršťování od vysychání zásadním způsobem ovlivňuje zejména množství vody v betonu a vlhkost prostředí, ve kterém je beton uložen. Smršťování od vysychání může paradoxně snižovat zvyšování množství cementu v betonu. Voda se zvyšujícím se množstvím cementu méně vysychá a větší podíl zhydratuje s cementem. Výsledkem je mírně zvýšené autogenní smršťování, ale snížené smršťování od vysychání. [5]

Na obr. 3 a 4 je ukázka reálně měřených objemových změn v závislosti na různém množství cementu, různém vodním součiniteli a různých typech kameniva.

Z výsledků vyplývá, že nabývání betonu v počátečním stadiu zrání se zvyšuje společně se zvýšením množství cementu nebo zvýšením množství záměsové vody. Pokud tedy budeme uvažovat objemové změny betonu celkově, a to jak bobtnání, tak smršťování, zjistíme, že předem zmíněné předpoklady o závislosti množství cementu a množ-

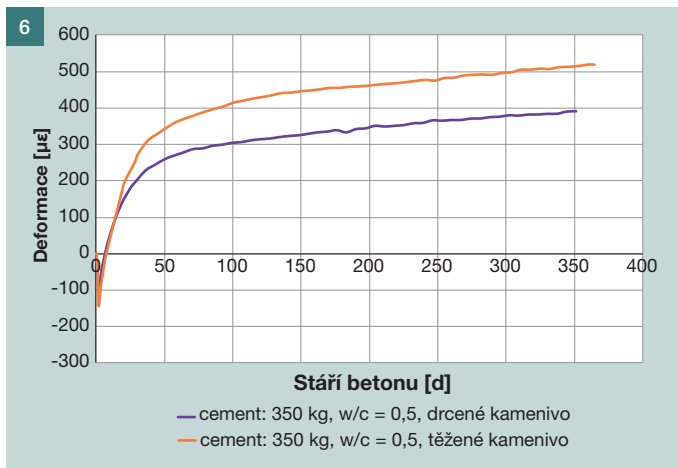
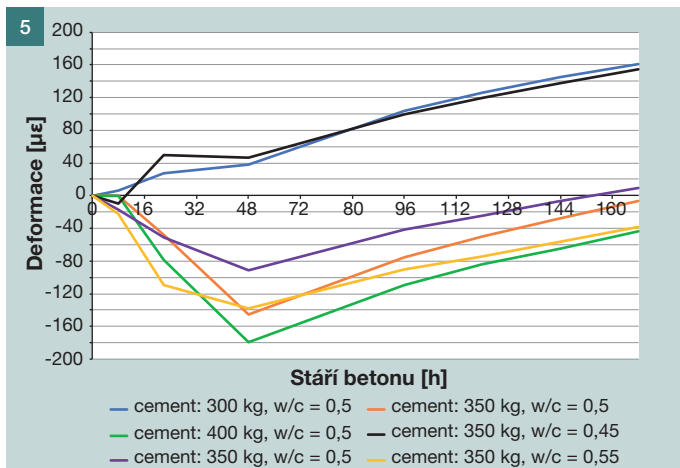
ství záměsové vody na smršťování nejsou zcela relevantní. Tedy receptury s největším množstvím cementu nebo záměsové vody vykazují největší bobtnání, a proto nejmenší smršťování. Zároveň je zde potvrzen předpoklad, že smršťování od vysychání může snižovat množství cementu.

Zajímavé je, že betony s recepturami s malým množstvím cementu (300 kg/m^3) nebo s malým množstvím vody ($w/c = 0,45$) vůbec nebobtnaly. Z grafu na obr. 5 je patrný detail prvních sedmi dnů. Je zde vidět, že bobtnání končí vždy po dvou dnech, kdy došlo k odbednění vzorků a kdy se tedy začalo projevovat plné vysychání.

Obr. 6 ilustruje průběh objemových změn dvou receptur, které se od sebe liší pouze různým druhem kameniva frakce 11/22, resp. se jedná o kamenivo těžné a drčené. Je zde patrné, že volba kameniva výrazně ovlivňuje průběh objemových změn, receptura s drčeným kamenivem měla výrazně menší bobtnání i smršťování.

ZÁVĚR

Cílem příspěvku bylo popsat a porovnat dva základní přístupy ke specifikaci betonové směsi, poukázat na ne-



Obr. 3 Průběh objemových změn (smršťování/nabývání), těžené kamenivo
 Fig. 3 Time development of volume changes (shrinkage/swelling), rounded aggregate

Obr. 4 Průběh objemových změn (smršťování/nabývání), drcené kamenivo
 Fig. 4 Time development of volume changes (shrinkage/swelling), crushed aggregate

Obr. 5 Průběh objemových změn (smršťování/nabývání), detail prvních sedmi dnů
 Fig. 5 Time development of volume changes (shrinkage/swelling), detail of the first seven days

Obr. 6 Porovnání objemových změn (smršťování/nabývání) stejné receptury s různým typem kameniva
 Fig. 6 Comparison of volume changes (shrinkage/swelling), identical recipes, only different type of aggregate

jasnosti a problémy vodního součinitele a ověřit tyto předpoklady zkouškami. Z provedených zkoušek následně vyplývají tyto závěry:

- rozhodující podíl na výsledných vlastnostech má celkové množství vody v záměsi,
- receptura s množstvím cementu 400 kg/m^3 má proti receptuře s množstvím cementu 300 kg/m^3 při stejném vodním součiniteli výrazně nižší pevnost v tlaku a výrazně lepší zpracovatelnost,
- změna již jedné složky receptury (v našem případě kameniva frakce 11/22 z těžného na drcené) má zásadní vliv na konečné vlastnosti betonu,
- při vyhodnocování smršťování je třeba vzít v úvahu nejen množství vody, množství cementu a ošetřování, ale také počáteční bobtnání.

Je tedy nutné omezovat maximální vodní součinitel a minimální množství cementu, pokud z výsledků jasně plyne, že s rostoucím množstvím cementu při stejném vodním součiniteli klesají kvalitativní vlastnosti? Bylo by prospěšnější více se soustředit na potřebné finální vlastnosti betonu než předepisovat, jak se k těmto vlastnostem dostat.

Jak plyne z uvedených výsledků, vlastnosti betonu jsou výrazně ovlivněny již malou změnou v jeho složení. To je třeba uvážit ve statických výpočtech, kde se používají normové materiálové modely (zejména pro objemové změny). Ty často nejsou schopny diskutované změny ve složení betonu respektovat, a proto je při návrhu konstrukcí nutné ponechat příslušné rezervy na možné odchylky v chování betonu.

Výkonová (performance-based) specifikace i preskriptivní specifikace mají své výhody i úskalí a každá z nich se

Literatura:

- [1] BICKEY, J., HOOTON, R. D., HOVER, K. C.. Preparation of a Performance-based Specification for Cast-In-Place Concrete. *NRMCA research and engineering* [online]. RMC Research Foundation, 2006. Dostupné z: <http://www.nrmca.org/P2P/Phase%20I%20Report%20Final%20January%202006.pdf>
- [2] ACI Committee 329. *Report on Performance-Based Requirements for Concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute, 2014. 46 p. ISBN 978-0-87031-974-7
- [3] LOBO, C., LEMAY, L., OBLA, K. Performance-Based Specifications for Concrete. *NRMCA research and engineering* [online]. NRMCA, 2012. Dostupné z: <https://www.nrmca.org/research/Performance-based%20Specifications%20for%20Concrete%20Paper%20for%20AE%20Conference.pdf>
- [4] TEPLÝ, B. Performance-based navrhování betonových konstrukcí a specifikace betonu. *Beton TKS*. 2009, roč. 9, č. 2, s. 42–45. ISSN 1213-3116
- [5] COUFAL, R. Parametry betonu – specifikace, předpoklady a realita. *Beton TKS*. 2017, roč. 17, č. 2, s. 34–37. ISSN 1213-3116
- [6] ČSN EN 206. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. ICS 91.100.30. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [7] ČSN P 73 2404. *Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – doplňující informace*. ICS 91.100.30. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [8] PAVLÍKOVÁ, M., PAVLÍK, Z., HOŠEK, J. *Materiálové inženýrství I*. 2., rozšířené vydání. Praha, 2011.

bude pravděpodobně více hodit pro jiný typ projektu. Právě proto by investor, projektant a hlavně výrobce betonu měli mít možnost volby mezi preskriptivním návrhem betonu a performance-based (výkonovým) návrhem.

V článku jsou uvedeny některé výsledky získané za podpory TAČR, projektu č. TE01020168 (Centrum kompetence CESTI).

Bc. Jakub Hobza

TBG Metrostav, s. r. o.

& Fakulta stavební ČVUT v Praze

e-mail: jakub.hobza@tbg-beton.cz



Ing. Robert Coufal, Ph.D.

TBG Metrostav, s. r. o.

e-mail: robert.coufal@tbg-beton.cz



prof. Ing. Jan L. Vítek, CSc., FEng.

Metrostav, a. s.

& Fakulta stavební ČVUT v Praze

e-mail: jan.vitek@metrostav.cz



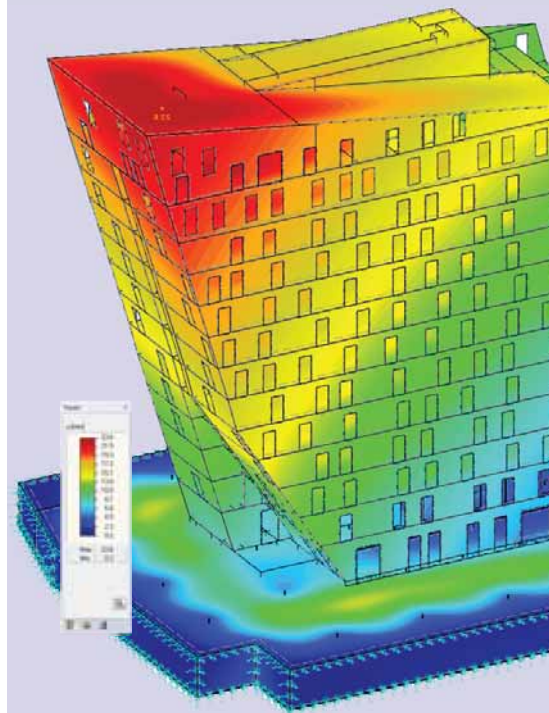
Firemní prezentace

RFEM 5

MKP Program pro výpočet 3D konstrukcí

RSTAB 8

Program pro výpočet prutových konstrukcí



**ZKUŠEBNÍ VERZE
 ZDARMA NA
www.dlubal.cz**

Statika, která Vás bude bavit !



Dlubal

Dlubal Software s.r.o.
 Anglická 28, 120 00 Praha 2
 +420 227 203 206
info@dlubal.cz
www.dlubal.cz