

PARAMETRY BETONU – SPECIFIKACE, PŘEDPOKLADY A REALITA ■ FEATURES OF CONCRETE – SPECIFICATIONS, PRESUMPTIONS AND REALITY

Robert Coufal

Beton je velmi variabilním materiálem, jehož vlastnosti velkou měrou závisí na jeho složení. Toto složení může být pro beton se stejnou specifikací velmi odlišné, a tak i parametry stejně specifikovaného betonu mohou být různé. Oproti tomu má návrhová norma ČSN EN 1992-1-1 přiřazeny idealizované parametry ke každé pevnostní třídě, které jsou pak používány pro výpočet. Tento článek se zabývá porovnáním těchto teoretických parametrů s parametry reálnými. ■ Concrete is a very variable material; its qualities to high extent depend on its design. This design could be very different even in concretes with the same specification and therefore the qualities of the same concrete specifications could differ. The design standard CSN EN 1992-1-1 classifies ideal qualities to each strength class which are then used for calculation. This article focuses on comparison of these theoretical qualities with their real qualities.

Na beton a jeho parametry se pohlíží dvěma způsoby. Jeden pohled je pohled statika, který se řídí normou ČSN EN 1992-1-1 a který předpokládá, že ke každé pevnostní třídě betonu je přiřazena jedna konkrétní hodnota modulu pružnosti, pevnosti v tahu, objemových změn a jiných parametrů. Druhým pohledem je pohled výrobce betonu, který má vedle pevnostní třídy specifikovány především stupně vlivu prostředí, které složení, ale i výslednou pevnost betonu ovlivňují mnohem výrazněji. Výsledkem je, že beton jedné pevnostní třídy může mít velmi odlišné reálné pevnosti, ale také, že beton stejné reálné pevnosti může mít velmi odlišné ostatní parametry. Vyráběný beton tak nemusí mít parametry, s kterými bylo pro konstrukci počítáno.

Jsou projekty, ve kterých jsou kromě standardní specifikace dle ČSN EN 206 specifikovány i ostatní parametry dle ČSN EN 1992-1-1. Problémem je, že tyto dodatečně specifikované parametry jsou většinou ve formě střední (průměrné) hodnoty a zároveň, že není stanovena zkušební metoda ani forma kontroly shody. Takto specifikované parametry jsou tedy pro technologa betonárny velmi špatně splnitelné a pro objednatelů špatně vymahatelné.

NORMOVÉ PŘEDPOKLADY

Beton je aktuálně vyráběn dle normy ČSN EN 206 nebo dle kombinace ČSN EN 206 a ČSN P 73 2404, příp. dle TN SVB ČR 01-2014 (původní ČSN EN 206-1, změna Z3, Z4). Dle těchto norem se přesně definují parametry, které má beton splnit, včetně systému kontroly shody. Toto se týká standardních parametrů, jako je např. pevnost v tlaku, vodní součinitel nebo maximální průsak. Výpočty konstrukcí se nejčastěji provádí dle ČSN EN 1992-1-1, kde jsou uvedeny i další parametry betonu vztahované k pevnostní třídě. Jedná se např. o modul pružnosti, pevnost v tahu nebo smrštění. Hodnoty těchto parametrů vychází z výsledků měření starších než 30 let a mohou se významně lišit od hodnot naměřených na moderních betonech.

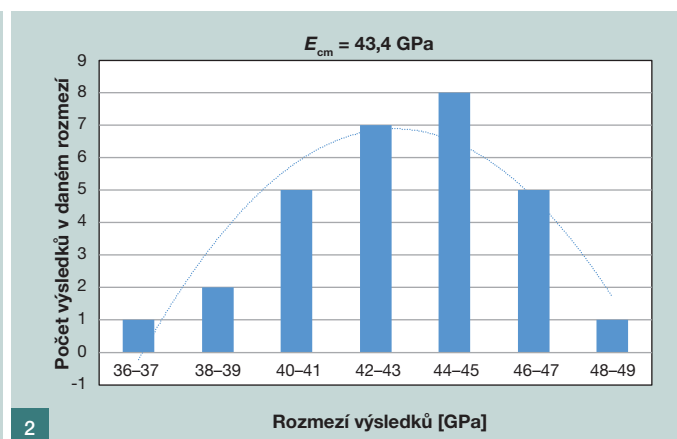
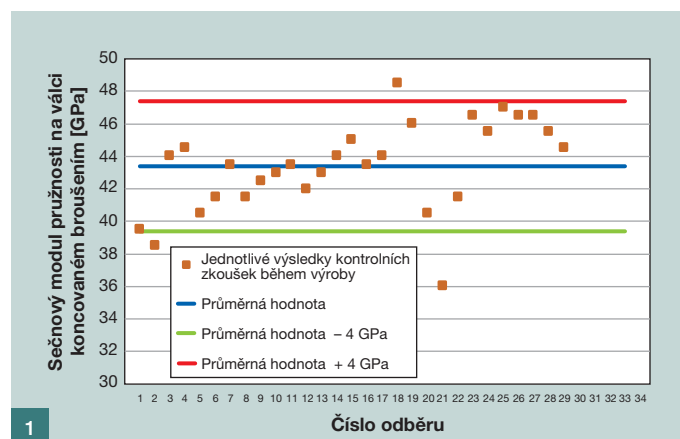
Problémem je, že přestože jsou hodnoty uvedené v návrhové normě ČSN EN 1992-1-1 vesměs uvažovány jako orientační a průměrné, jsou v současnosti předepisovány do projektů jako zaručené (minimální). Nejlépe je toto vidět na válcové pevnosti v tlaku. Například pro beton třídy C30/37 je normou

ČSN 1992-1-1 uvažovaná charakteristická (zaručená) válcová pevnost v tlaku f_{ck} 30 MPa, zatímco se uvažuje, že střední (průměrná) hodnota válcové pevnosti v tlaku f_{cm} bude činit 38 MPa. Válcová pevnost v tlaku se tedy pro tuto pevnostní třídu bude pravděpodobně pohybovat v rozmezí 30 až 46 MPa. Pro další parametry, jako je třeba modul pružnosti nebo pevnost v tahu, jsou již ale uvedeny pouze střední (průměrné) hodnoty a lze tak předpokládat, že tyto parametry budou okolo této střední hodnoty kolísat obdobně, jako je tomu u pevnosti v tlaku. Takto to ale bohužel odbornou veřejností většinou chápáno není a naopak se předpokládá, že normou uváděné střední hodnoty parametrů musí být zaručeny. Z tohoto mylného předpokladu pak může vyplývat nutnost zvýšit reálnou pevnost betonu.

Hlavním problémem je ale chybějící systém prokázání a kontroly shody, jak bude uvedeno dále.

MODUL PRUŽNOSTI

Modul pružnosti je důležitým parametrem betonu, zejména pro výpočet deformací nebo dotvarování. Jako parametr betonu je i stále častěji předepisován v projektové dokumentaci. Střední (průměrná) hodnota E_{cm} je v ČSN EN 1992-1-1 uvedena v Tabulce 3.1 – Pevnostní a deformační charakteristiky betonu a je vztahována k pevnostní třídě. Podle této normy je hodnota modulu pružnosti E_{cm} také nejčastěji předepisována. U modulu pružnosti jsou největší problémy s jeho měřením, specifikací a kontrolou shody. Naměřená hodnota modulu pružnosti je kromě složení betonu největší měrou ovlivněna typem po-



užitého zkušebního tělesa (trávec, válec) a způsobem zakoncování (broušení, sírná malta...) a její hodnoty ovlivňuje používané zkušební zařízení v konkrétní zkušební laboratoři. Ve výsledku je tedy velmi mnoho vlivů, které velikost modulu pružnosti ovlivňují a způsobují velký rozptyl naměřených výsledků okolo střední hodnoty.

Příklad výsledků z měření na betonu se zaručeným modulem pružnosti 35 GPa za časové období čtyř měsíců je uveden v grafu na obr. 1. Z grafu je patrné, že naprostá většina výsledků se pohybuje v rozmezí ±4 GPa od průměrné hodnoty. Všechny výsledky jsou vyhovující, ale pro jejich dosažení s dostatečnou jistotou je střední hodnota vyšší o více než 8 GPa než zaručená hodnota. Uvedené moduly pružnosti byly měřeny po celou dobu na stejné receptuře, ve stejné laboratoři na válcích koncovaných broušením. Toto je nutné si uvědomit při specifikaci modulu pružnosti. Pokud totiž specifikujeme střední (průměrnou) hodnotu modulu pružnosti E_{cm} a vyráběná receptura betonu bude mít průměrný modul pružnosti na stejné úrovni, musíme přesto počítat s rozptylem jednotlivých naměřených výsledků v rozmezí cca 8 GPa. Histogram těchto výsledků s patrným normálním rozdělením výsledků je uveden na obr. 2.

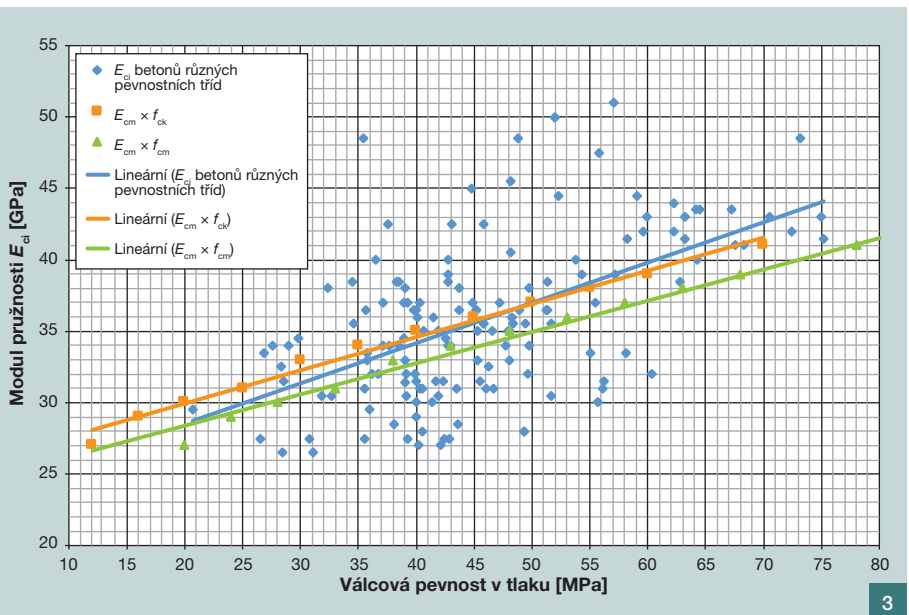
Uvedený případ byl specifický tím, že se modul pružnosti měřil na jedné receptuře, jednom typu tělesa a ve stejné laboratoři. Ve chvíli, kdy shrneme výsledky měření modulů pružnosti na různých recepturách, různých tělesech a v různých laboratořích, rozptyl výsledků vztahených k pevnosti v tlaku se ještě zvětší (obr. 3).

Směrnice výsledků zhruba odpovídá závislosti modul pružnosti E_{cm} × charakteristická válcová pevnost v tlaku f_{ck} uvedené v normě ČSN EN 1992-1-1. Pokud bychom střední hodnotu modulu pružnosti E_{cm} přiřadili k střední hod-

notě válcové pevnosti v tlaku f_{cm} , shoda již nebude taková a naměřené výsledky jsou spíše výše než normové. V literatuře je naopak častěji uváděno, že naměřené hodnoty modulu pružnosti jsou nižší, než je normový předpoklad. V tomto případě mohly být výsledky ovlivněny faktem, že většina hodnot je naměřena na válcích koncovaných broušením, kde hodnoty modulů vycházejí vyšší. V obou případech se ale význam hodnoty E_{cm} ukazuje jakožto hodnota průměrná pro danou pevnost v tlaku a ne jako hodnota zaručená. Je tedy nutno si uvědomit, že při chybné specifikaci modulu pružnosti jako hodnoty zaručené místo hodnoty průměrné nutíme ve většině případů dodavatele betonu zvýšit reálnou pevnostní třídu betonu o několik stupňů. Např. při požadavku na zaručený modul pružnosti 33 GPa (střední hodnota dle ČSN EN 1992-1-1 pro C30/37) vlastně vyžadujeme střední hodnotu modulu pružnosti E_{cm} cca 37 GPa, tzn. pevnostní třídu betonu C50/60.

Samostatnou kapitolou je porovnání výsledků modulů pružnosti naměře-

ných na různých tělesech, různě koncovaných a zjišťovaných v různých laboratořích. Tomuto tématu jsou věnovány celé diplomové či disertační práce a není možno zde tuto problematiku plně obsáhnout. Její nástin je uveden v grafu na obr. 4, kde je provedeno porovnání pevností a modulů pružnosti na trávci a válcích (koncování broušením), celkem ve třech laboratořích a na třech recepturách. Tělesa byla odebrána všechna najednou z každé receptury. Je patrné, že laboratoř č. 2 dává systematicky nižší výsledky modulů pružnosti než laboratoř č. 1 a zároveň, že výsledky naměřené na trávci vychází zhruba mezi naměřenými výsledky na válcích v ostatních laboratořích. I při maximální péči dodavatele betonu tak může dojít k neshodě v případech, kdy provádí kontrolní zkoušky u laboratoře se systematicky vyššími výsledky a u odběratele betonu je beton kontrolován v laboratoři se systematicky nižšími výsledky. Není přitom jasné, která hodnota je správná. Problematika modulů pružnosti je detailně zpracována v technickém předpisu TP ČBS 05.



3

Obr. 1 Výsledky z měření modulů pružnosti na jedné receptuře betonu, na válcí koncovaném broušením, v jedné zkušební laboratoři

Fig. 1 Results of measurements of the modulus of elasticity in one concrete design on a cylinder capped by grinding in one test lab

Obr. 2 Histogram výsledků modulů pružnosti na betonu se zaručeným modulem pružnosti 35 GPa z obr. 1

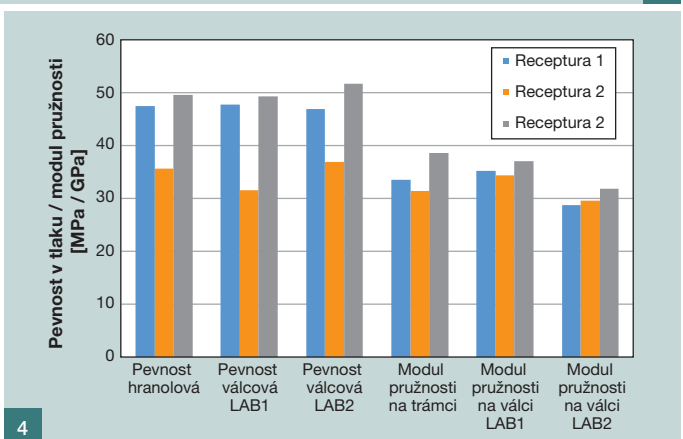
Fig. 2 Histogram of the results of the modulus of elasticity in concrete with guaranteed modulus of elasticity of 35 GPa shown in fig. 1

Obr. 3 Moduly pružnosti vztahených k válcové pevnosti v tlaku (zdroj: TP ČBS 05)

Fig. 3 Modulus of elasticity related to the cylinder compressive strength (source: TP ČBS 05 (Technical Rules of Czech Concrete Society No. 5))

Obr. 4 Porovnání charakteristik betonu měřených v různých laboratořích, na různých tělesech, na různých recepturách

Fig. 4 Comparison of features of concrete measured in different laboratories on different elements and of different designs



4

Tab. 1 Porovnání pevnosti v tahu měřené různými metodami

■ Tab. 1 Comparison of the tensile strength measured by using different methods

Číslo záměsi		1	2	3
krychelná pevnost v tlaku	[MPa]	60,3	64,9	66,7
pevnostní třída betonu dle pevnosti v tlaku		C40/50	C45/55	C45/55
f_{ctm} dle normy ČSN EN 1992-1-1, Tabulka 3.1	[MPa]	3,5	3,8	3,8
pevnost v prostém tahu f_{ct}	[MPa]	2,9	3,3	3,1
pevnost v příčném tahu $f_{ct,sp}$	[MPa]	4,3	4,95	4,4
přepoččet $f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp}$	[MPa]	3,87	4,455	3,96
pevnost v tahu za ohybu, trámec 400 mm R_{ft}	[MPa]	6,7	7,4	7,5
přepoččet $R_{ft}(f_{ct}) = 0,65 R_{ft}$	[MPa]	4,355	4,81	4,875

Pevnost v tahu

U pevnosti v tahu je situace podobná jako u modulu pružnosti. Pro jednotlivé pevnostní třídy jsou uvedeny střední (průměrné) hodnoty pevnosti v prostém tahu f_{ctm} . Tyto hodnoty jsou uvažovány jako orientační pro výpočet, nicméně u některých staveb jsou projektem vyžadovány jako zaručené. V tab. 1 je vidět porovnání pevností v tahu měřených různými metodami. Dle ČSN EN 1992-1-1 se dá pevnost v prostém tahu vypočítat z příčného tahu dle vzorce:

$$f_{ct} = 0,9 f_{ct,sp} \quad (1)$$

Dle normy ČSN 73 1318 lze pevnost v prostém tahu R_t vypočítat z pevnosti v tahu za ohybu R_{ft} dle vzorce:

$$R_t = 0,65 R_{ft} \quad (2)$$

Porovnání je provedeno na třech různých betonech, nicméně s podobnými výsledky. V porovnání vychází výsledky pevnosti v prostém tahu vždy hůře, než je uvedeno v Tabulce 3.1 normy ČSN EN 1992-1-1. Na druhou stranu, pokud je pevnost v prostém tahu přepočítána z pevnosti v příčném tahu nebo tahu za ohybu, zjištěná hodnota je vždy vyšší než je normový předpoklad. I u pevnosti v tahu je tedy nutné v případech, kde je nutné tento parametr předepisovat, specifikovat nejen požadovanou hodnotu, ale i způ-

sob jejího měření a způsob kontroly shody.

Smrštění

Smrštění betonu závisí na složení betonu a na podmínkách, kterým je betonová konstrukce vystavena. Celkové poměrné smrštění lze rozdělit na smrštění autogenní a smrštění vysycháním.

Autogenní smrštění závisí zejména na množství cementu v betonu a není ovlivněno vlhkostí prostředí, v kterém jsou tělesa uložena. Autogenní smrštění se tedy ve většině případů zvyšuje se zvyšující se pevnostní třídou betonu

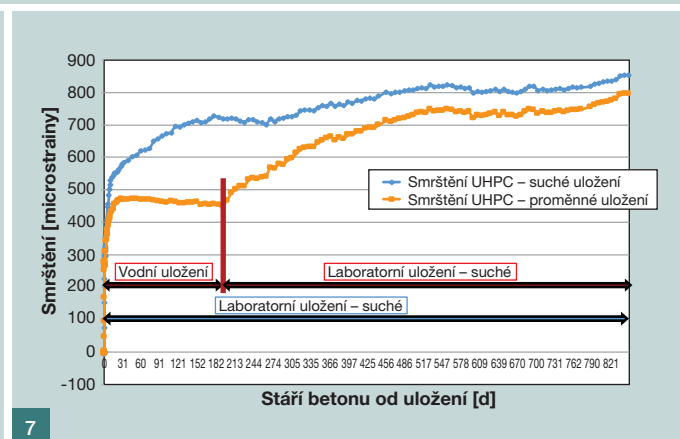
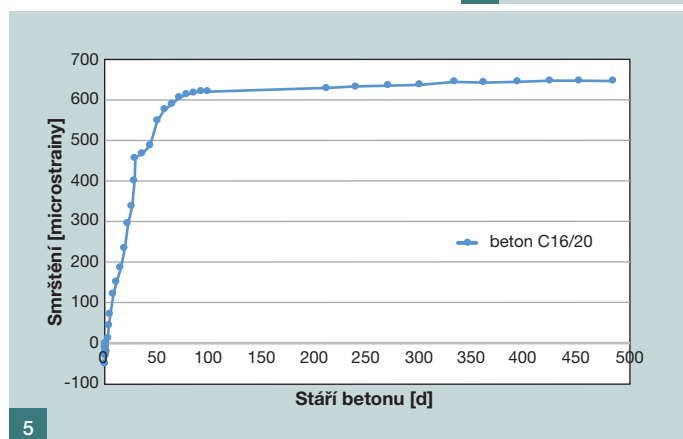
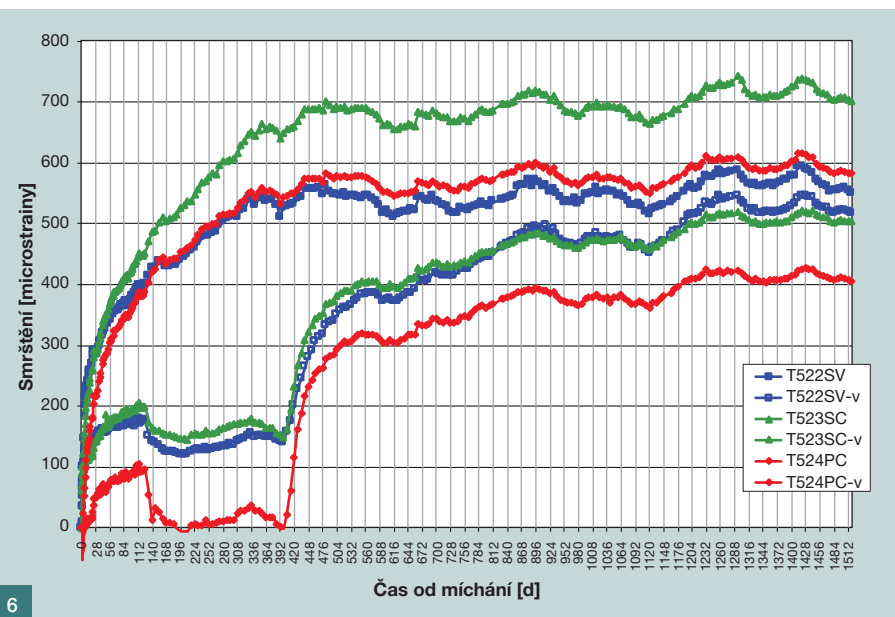
Obr. 5 Celkové smrštění betonu C16/20 ■ Fig. 5 Total shrinkage of the C16/20 concrete

Obr. 6 Celkové a autogenní smrštění betonu C40/50 ■ Fig. 6 Total and autogenous shrinkage of the C40/50 concretes

Obr. 7 Celkové a autogenní smrštění UHPC ■ Fig. 7 Total and autogenous shrinkage of the UHPC

a jeho nejvýznamnější část proběhne do 28 dnů stáří betonu (má podobný průběh v čase jako je nárůst pevnosti).

Smrštění od vysychání zásadním způsobem ovlivňuje zejména množství vody v betonu a vlhkost prostředí, v kterém je beton uložen. Smrštění 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 smrštění, ale snížené smrštění od vysychání. Za betony s výrazně omeze-



ným smrštěním dle rakouské normy ÖNORM B 4710-1:2007 se považují ty, které obsahují maximálně 170 kg/m³ účinné vody. Dále např. typové betony WU3 pro bílé vany dle [1] obsahují maximálně 165 kg/m³ účinné vody. Tyto požadavky odpovídají reálnému chování betonu, kdy velikost smrštění ve stejném prostředí závisí nejvýznamněji na obsahu vody v betonu. Oproti tomu je velikost smrštění od vysychání dle ČSN EN 1992-1-1 vztažena ve stejném prostředí pouze k pevnostní třídě betonu, což neodpovídá realitě. Celkově jsou hodnoty smrštění uvedené v normě, vycházející z naměřených výsledků před více než 30 lety, výrazně podhodnocené.

Na grafech na obr. 5 až 7 jsou příklady reálně změřených průběhů smrštění na betonech pevnostní třídy C16/20, C40/50 a UHPC (150 MPa). Na betonech C40/50 a UHPC je smrštění rozděleno na autogenní a celkové. Smrštění je měřeno na válcích se zabudovanými tenzometry dle technického předpisu společnosti TBG Metrostav – TBG MTS 2014/09/A. Měření bylo pro-

váděno od chvíle uložení betonu do forem. Je vidět trend, který je podpořen i dalšími výsledky autora, že neplatí přímá úměra mezi smrštěním a pevnostní třídou. Naopak se dá vyzorovat trend, že nejnižší celkové smrštění mají betony s pevnostní třídou mezi C25/30 až C40/50, u kterých je výrazně omezen obsah vody a zároveň neobsahují výrazně zvýšené množství cementu. Naopak vyšší smrštění je u betonů základních (nižší pevnostní třídy a stupně vlivu prostředí) a u betonů vysokopevnostních a UHPC (vyšší obsah cementu a příměsí).

ZÁVĚR

V příspěvku byl na několika parametrech betonu ukázán rozpor mezi realitou a normovými předpoklady. Beton je v závislosti na složení natolik proměnlivým materiálem, že nelze brát uvedené výsledky jako neměnnou definitivní pravdu. Cílem bylo ukázat variabilitu naměřených výsledků (moduly pružnosti), velký vliv zvolené metody na naměřený výsledek (pevnosti v tahu) a vyvrátit některé zavedené mýty (vyš-

ší pevnost = vyšší smrštění). Je nutno pečlivě rozmyslet, jak je který parametr betonu nezbytně dodržet při výrobě a nepředepisovat automaticky pro všechny betony všechny parametry dle Tabulky 3.1 z ČSN EN 1992-1-1 do projektu. Pokud už je nutno některý parametr betonu při výrobě dodržet, je nutno:

- jednoznačně předepsat hodnotu parametru,
- pečlivě rozmyslet, zda se jedná o hodnotu zaručenou nebo průměrnou,
- předepsat způsob ověřování parametru (zkušební metodu a zkušební těleso),
- popsat požadovaný způsob kontroly shody.

V případě modulu pružnosti je možné předepsat vše výše uvedené dle nového technického předpisu TP ČBS 05.

Ing. Robert Coufal, Ph.D.

TBG Metrostav

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

