

## MODUL PRUŽNOSTI AUTOMATICKY? MODULUS OF ELASTICITY AUTOMATICALLY (IN ITSELF WITHOUT CONTROL)?

JITKA VAŠKOVÁ, MICHAL ŠTEVULA,  
VLADIMÍR VESELÝ

*Převážnou část dvacátého století byla základní charakteristikou betonu jeho pevnost v tlaku. V devadesátých letech se vlivem vývoje způsobu navrhování a změn v technologických výstavby a výroby betonu staly dominantními požadavky trvanlivost a definované přetvárné vlastnosti betonu.*

*Compressive strength was a general characteristic of concrete for main part of the twentieth century. Due to a new design approach, development of building and concrete production technologies the requirements for durability and strain behavior of concrete have started dominant from the nineties.*

Ještě před rokem 1996, kdy byla v život uvedena norma P ENV 206-1 pro výrobu, specifikaci a shodu betonu, jsme znali označování betonu pouze ve formě B35. Výše uvedená předběžná a posléze i definitivní evropská norma EN 206-1 zavedla podrobnější specifikaci betonu zaměřenou na jeho trvanlivost (pro daný stupeň vlivu prostředí je stanoven maximální vodní součinitel, minimální množství cementu, minimální pevnostní třída betonu a popřípadě další požadavky, jako je provzdušnění či použití mrazuvzdorného kameniva). Požadujeme-li pouze pevnost v tlaku a trvanlivost, je to postačující.

Specifikaci betonu je potřeba chápat jako způsob předávání informací mezi jednotlivými účastníky výstavby. Pokud půjdeme koupit auto, osobně navštívíme obchodníka, sdělíme mu nějakou naši úvodní představu a ve spolupráci s ním se dobereme konkrétního vozu s konkrétním motorem a konkrétní výbavou za konkrétní cenu. Celé jednání je předáváním informací. Pokud obchodníkovi pouze zašleme dopis s textem „chci limuzínu“, můžeme obdržet Fabii s motorem o výkonu 55 kW v základní výbavě. V případě, že jsme očekávali „čtyřkolku“ se sportovním výkonem a velkým kufrem a komfortem, budeme asi zklamáni. Zavádí-li projektant do výpočtu některé

předpoklady, např. modul pružnosti, pevnost betonu v tahu apod., a chce-li, aby byly naplněny při realizaci, měl by tento požadavek sdělit výrobci betonu. Spolehně-li se ve specifikaci pouze na pevnostní třídu, stává se hráčem loterie.

V minulosti měl takový hráč velmi dobrou šanci na výhru, neboli na naplnění svých předpokladů ohledně modulu pružnosti, aniž je uvedl v projektu jako požadavek. Důvod je jednoduchý. Výroba betonu byla do počátku devadesátých let velmi konzervativní: voda, kamenivo, cement, výjimečně několik kilogramů (10 až 30) popílku a nějaké přísady. S nástupem samozhutnitelných a později dalších moderních betonů se situace změnila. Z různých důvodů se do betonu dává až několikanásobně více popílku a běžně se používají přísady, často polykarboxyláty. Dříve běžná maximální frakce kameniva 32 mm se snižuje na 16 mm. To vše ovlivňuje modul pružnosti betonu. Může dojít k jeho snížení až o 30 %.

Nejčastější důvody uvedených skutečností:

- lepší čerpatelnost, zpracovatelnost – větší množství jemných podílů, max. zrna kameniva spíše 16 než 32 mm, někdy i 8 mm,
- odolnost vůči průniku tlakové vody – větší množství jemných podílů, nízký vodní součinitel při snadné zpracovatelnosti,
- zpracovatelnost při zachování nízkého vodního součinitele – použití plastifikátorů, často polykarboxylátů,
- dokonalejší (hladší) povrchy – větší množství jemných podílů,
- nižší cena – nahrazení části cementu popílkiem,
- ekologie – zpracování odpadů z jiných odvětví průmyslu (nejčastěji popílek, křemičité úlety, jemně mletá struska).

Přitom je dlouhodobě známo, že na složkách čerstvého betonu závisí i jeho výsledný modul pružnosti. Uváděly to a uvádějí i normy pro navrhování a výrobu betonu. Např.:

### ČSN 73 1201 (rok vydání 1986)

2.1.1.3. Pokud jsou u třídy betonu požadovány v návrhu (v projektové dokumen-

taci apod.) další kontrolované vlastnosti než pevnost v tlaku (např. pevnost v tahu, **modul pružnosti**, objemová hmotnost apod.), popřípadě je požadován beton se zvláštními vlastnostmi (obrusnost, vodotěsnost, mrazuvzdornost), nebo je předpokládáno použití betonu se zvýšeným obsahem záměsové vody, **je toto nutné uvést v návrhu** (v příslušné dokumentaci).

### ČSN 73 2400 (rok vydání 1986)

3.1.4. Jsou-li projektovou dokumentací nebo jinými normami stanoveny požadavky na třídu betonu a mimo to ještě na pevnost v tahu nebo na **modul pružnosti** nebo na objemovou hmotnost, vyrábí se obyčejný hutný beton a kontrolují se všechny požadované vlastnosti (viz tab. 2\*).

**Tyto betony se označují třídou betonu lomenou**

- hodnotou předepsané zaručené pevnosti betonu v tahu v MPa, nebo
- písmenem **E** a předepsanou hodnotou modulu pružnosti v GPa, nebo
- hodnotou předepsané objemové hmotnosti betonu v  $\text{kgm}^{-3}$ .

### ČSN P ENV 1992-1-1:1991

(rok vydání 1994)

#### 3.1.2.5 Přetvárné vlastnosti

(1) Hodnoty vlastností materiálů, které jsou nutné pro výpočet okamžitých i dlouhodobých přetvoření betonu, **nezávisí jen na pevnostní třídě betonu**, ale také na vlastnostech kameniva a dalších parametrech souvisejících se složením směsi, a na prostředí. V případech, kdy je nutný přesný výpočet, se proto musí tyto hodnoty získat z údajů o příslušných materiálech a podmínkách provozu. Obvykle však postačuje přibližný odhad hodnot.

#### 3.1.2.5.2 Modul pružnosti

(1) Modul pružnosti nezávisí pouze na pevnosti betonu dané třídy, ale také na vlastnostech použitého kameniva (viz 3.1.2.5(1)\*).

(2) Nejsou-li tyto údaje k dispozici, nebo v případech, kdy se nepožaduje velká přesnost, lze použít střední hodnoty sečnového modulu  $E_{cm}$  pro danou třídu betonu podle tab. 3.2\*. Hodnoty

v této tabulce jsou odvozeny z pracovního diagramu betonu při uvažování napětí  $\sigma_c = 0$  a  $\sigma_c = 0,4f_{ck}$  (viz obr. 3.1\*;  $\sigma_c$  = je napětí betonu v tlaku).

(3) Hodnoty v tab. 3.2.\* odpovídají vztahu:

$$E_{cm} = 9,5(f_{ck} + 8)^{1/3} \quad (E_{cm} \text{ v kN/mm}^2; f_{ck} \text{ v N/mm}^2).$$

Platí pro beton ošetřovaný za běžných podmínek, vyrobený z kameniva obsahujícího převážně hrubou křemičitou frakci. **V případech, kdy mají průhyby rozhodující význam**, je třeba provést zkoušky betonu vyrobeného z kameniva, kterého se použije v konstrukci. V jiných případech se mohou získat spolehlivé hodnoty  $E_{cm}$  ze zkušeností, které jsou založeny na výsledcích zkoušek vzorků s obdobným kamenivem. **Jedná-li se však o kamenivo s neznámými vlastnostmi**, doporučuje se volit  $E_{cm}$  v určitém rozmezí hodnot.

### ČSN EN 1992-1-1 (rok vydání 2006)

#### 1.3 Předpoklady

(1) P Kromě uvedených obecných předpokladů

- konstrukce jsou navrhovány příslušně kvalifikovanými a zkušenými osobami;
- je zajištěn náležitý dohled a kontrola jakosti ve výrobnách, betonárnách a na stavbě;
- stavbu provádějí osoby s příslušnou odborností a zkušenostmi;
- stavební materiály a výrobky se používají podle ustanovení tohoto Eurokódu nebo podle příslušných specifikací materiálů nebo výrobků;
- konstrukce bude náležitě udržována;
- konstrukce bude používána v souladu s požadavky uvažovanými při návrhu konstrukce;
- musí být splněny požadavky na provádění stavebních prací stanovené v EN 13 670.

#### 3.1.3. Pružné deformace

(1) Pružné deformace betonu velkou měrou závisí na jeho složení (zejména na kamenivu). Hodnoty uvedené v této normě se mají uvažovat za směrné pro obecné použití. Avšak pokud je konstrukce citlivá na odchylky od těchto obecných hodnot, mají se tyto hodnoty stanovit přesněji.

(2) Modul pružnosti betonu závisí na modulu pružnosti jeho složek. Přibližné hodnoty modulu pružnosti  $E_{cm}$  (sečnová hodnota mezi  $\sigma_c = 0$  a  $0,4 f_{cm}$ ) pro beto-

ny se silikátovým kamenivem jsou uvedeny v tabulce 3.1\*. Pro vápencové a pískovcové kamenivo se mají hodnoty snížit o 10, resp. 30 %. Pro čedičové kamenivo se mají hodnoty zvýšit o 20 %.

Z uvedených citací jasně vyplývá, že v případech řešení citlivých na přetvoření je potřeba buď v návrhu **počítat s odpovídajícím modulem pružnosti**, nebo si **modul pružnosti předepsat ve specifikaci**. Použití tabulkové hodnoty ve výpočtu a ve specifikaci požadovat pouze pevnost v tlaku je přinejmenším nedostatečná komunikace. Navíc je třeba uvážit, že ony tabulkové hodnoty pocházejí pravděpodobně z doby před vznikem moderních betonů a nemohou tedy postihnout nové jevy a trendy.

Porovnáme-li současnost a minulost starší 15 let, obdržíme značné rozdíly:

- v navrhování se používají počítače s zpracovanými a přesnějšími programy,
- pracovní diagramy materiálů jsou lépe známy a jejich aplikace ve výpočtu se velmi přiblížila realitě,
- běžně se používají betony vyšších tříd,
- jsou navrhovány subtilnější konstrukce s menším počtem podpor (nejpopulárnější stropní konstrukcí v oblasti pozemních staveb je štíhlá bodově podepřená deska),
- složení čerstvého betonu se z důvodů uvedených výše změnilo,
- rychlost výstavby všech objektů je s minulostí nesouměřitelná, k odbedňování konstrukcí dochází standardně po několika dnech,
- investoři a architekti preferují subtilnější konstrukce a „otevřené“ dispozice.

Uvedené skutečnosti vedou k novým jevům v praxi:

- výpočty se ženou více „na hranu“ stejně jako namáhání materiálů,
- s betony vyšších pevnostních tříd přichází větší namáhání, štíhlost, zatěžuje se mladší beton.

Vyjmenované okolnosti významně ovlivňují velikost deformací, zejména dotvarování.

#### Výpočet průhybu železobetonové stropní desky s různými hodnotami modulu pružnosti

Stropní deska tloušťky 0,18 m působí jako prostý nosník s teoretickým rozpětím 5 m. Je navržena z betonu C30/37 (návrhová hodnota pevnosti v tlaku  $f_{cd} = 30/1,5 = 20$  MPa, střední hod-

nota modulu pružnosti z tab.3.1 ČSN EN 1992-1-1  $E_{cm} = 32$  GPa, pevnost v tahu  $f_{ctm} = 2,9$  MPa), vyztužení  $\varnothing 10$  po 100 mm z oceli S500 ( $f_{yd} = 500/1,15 = 434,78$  MPa, krytí 25 mm).

Zjednodušený výpočet průhybu desky od účinku kvazistálého zatížení bez uvažování účinku smršťování betonu byl proveden pro stejné hodnoty pevnosti v tlaku a tahu a pro dvě různé hodnoty modulu pružnosti:

- a) tabulkovou  $E_{cm} = 32$  GPa,
- b) sníženou o cca 30 %

$$E_{cm} = 22 \text{ GPa.}$$

Pro výpočet účinků dlouhodobého zatížení bylo uvažováno lineární dotvarování, součinitel dotvarování  $\varphi(\infty, t_0)$  podle postupu čl. 3.1.4 ČSN EN 1992-1-1 za předpokladu cementu třídy N (např. CEM 42,5N), stáří betonu v době zatížení  $t_0 = 28$  d. Pro druhý případ byla hodnota  $\varphi(\infty, t_0)$  stanovena přibližně jako pro beton třídy s odpovídajícím modulem pružnosti. Je nutné poznamenat, že pro navrhování betonových konstrukcí jsou dle ČSN EN 1992-1-1 určeny betony pevnostní třídy nejméně C12/15, pro který tab.3.1 uvádí hodnotu  $E_{cm} = 27$  GPa.

Výsledné hodnoty průhybu od dlouhodobého účinku kvazistálé kombinace zatížení, 7,1 kN/m<sup>2</sup> jsou:

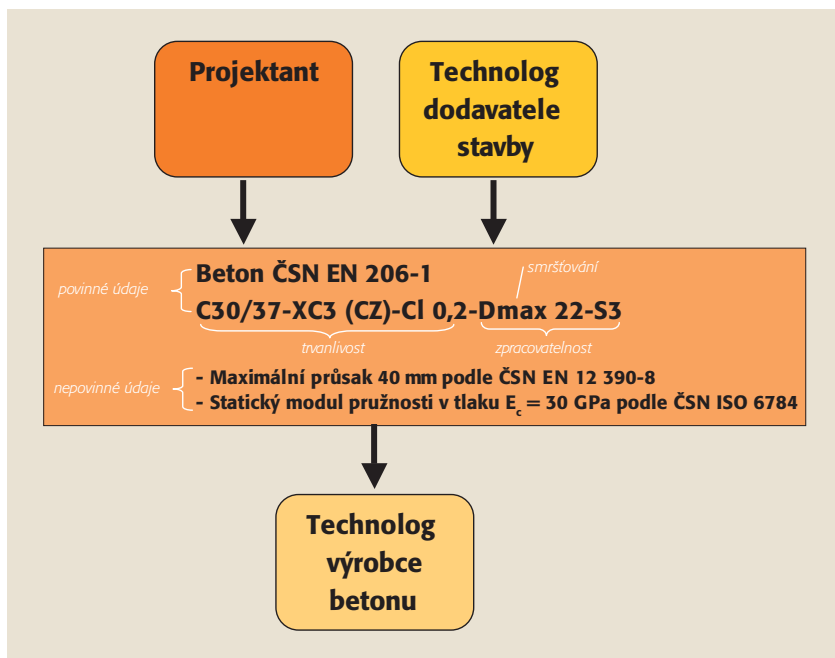
- a) 11,6 mm,
- b) 20,2 mm.

Pro vyšší zatížení 9,7 kN/m<sup>2</sup>:

- a) 31,5 mm,
- b) 39,3 mm.

Uvedený příklad ukazuje vliv hodnoty modulu pružnosti na průhyb prvku. ČSN EN 1992-1-1, stejně jako další normy, ve svých člancích upozorňuje, že hodnoty uvedené v tab. 3.1 jsou směrné pro obecné použití a u konstrukcí citlivých na odchylky se mají stanovit přesněji. Obdobně při zjednodušeném posouzení průhybu pomocí ohybové štíhlosti je nutné uvážit skutečné vlastnosti betonu nejen podle pevnostní třídy. Tabulkové hodnoty ohybové štíhlosti, uvedené v normách podle třídy betonu, je pak třeba upravit.

Proto je povinností projektanta, aby u konstrukcí, kde o parametrech návrhu rozhoduje přetvoření (resp. obecné podmínky mezního stavu použitelnosti), vždy ve specifikaci betonu deklaroval požadavky na přetvárné vlastnosti betonu (modul pružnosti); a aby v projektu uvedl stáří betonu v době zatížení, délku a způsob ošetřování atd.



Obr. 1 Příklad specifikace betonu dle ČSN EN 206-1 a komunikace mezi projektantem, technologem dodavatele stavby a technologem výrobce betonu

Fig. 1 Example of concrete specification according to ČSN EN 206-1 and communication between a designer, a technologist of contractor and a one of concrete producer

ti, něco stojí. Je otázkou, zda je ve finále štíhlejší deska levnější než deska tlustější, a tudíž tužší a jsou-li vytvořena rizika dostatečně vyvážena výhodami subtilnějšího řešení.

\* Poznámka: číslo tabulky nebo odstavce, na který se odvolává text normy, nepublikované v tomto článku.

V příspěvku byly využity výsledky získané při řešení VZ MSM 6840770001 Spolehlivost, optimalizace a trvanlivost stavebních materiálů a konstrukcí

## ZÁVĚR

Závěrem je potřeba říci:

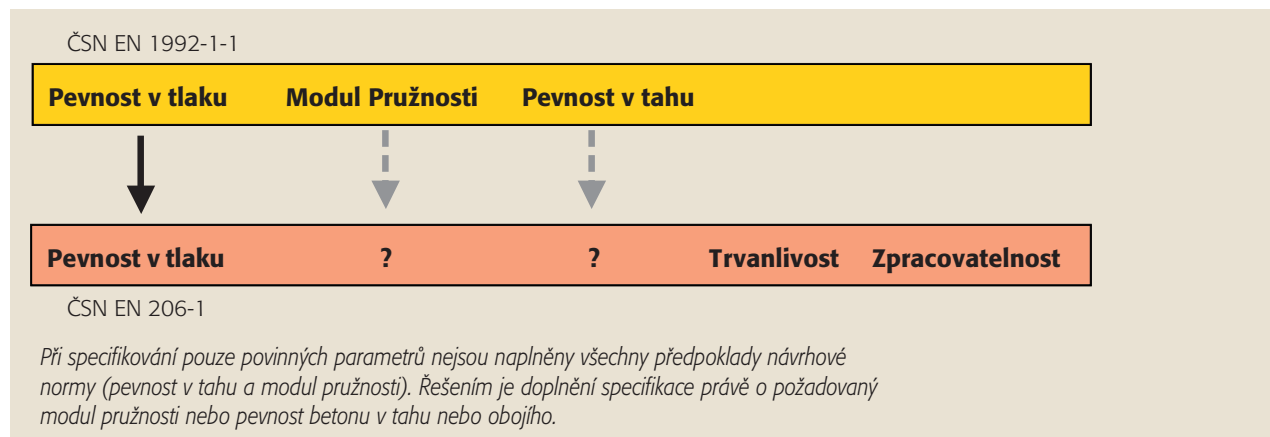
- Hovoříme o parametrech, které mají přímý vliv na deformace betonových konstrukcí včetně dotvarování, jde tedy o ověřování mezního stavu použitelnosti, ne o problémy s únosností.
- Je triviální se podobnému hazardu vyhnout, předáme-li požadavek na vlastnosti materiálu výrobci betonu. Všichni známe staré označení betonů například „B25 V4“. Zde byl požadavek na kvalitu ohledně odolnosti vůči pronikání tlakové vody. Je zřejmé, že beton „B25“ vodostavebním být mohl, ale také nemusel.
- Není potřeba, aby se každý statik stal odborníkem na technologii výroby čerstvého betonu. Je ale nezbytné, aby byl schopen odpovídajícím způsobem komunikovat s technologem dodavatele stavby a technologem výrobce beto-

nu. Například prostřednictvím odpovídající specifikace betonu.

- Každá specifikace musí být zároveň uskutečnitelná v praxi. Kombinace požadavků C16/20 s modulem pružnosti 60 GPa bude ještě nějakou dobu věcí z oblasti sci-fi.
- Všechno souvisí se vším. Volba tenčí stropní desky vede k použití betonu vyšší třídy, menší tuhosti konstrukce či prvku, vyššímu stupni vyztužení a větší citlivosti konstrukce na přetvoření. Je jí to dáno do její genetické výbavy. Opatření pro snížení míry tohoto nebezpečí, např. požadovaný vyšší modul pružnos-

Obr. 2 Vazba mezi ČSN EN 1992-1-1 a ČSN EN 206-1 z hlediska specifikace betonu

Fig. 2 Relation between ČSN EN 1992-1-1 and ČSN EN 206-1 from concrete specification point of view



Ing. Jitka Vašková, CSc.  
Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Katedra betonových a zděných konstrukcí  
Tháškova 7, 166 29 Praha 6  
tel.: 224 354 636, fax 233 335 797  
e-mail: jitka.vaskova@fsv.cvut.cz  
www.concrete.fsv.cvut.cz

Ing. Michal Števela, Ph.D.  
Svaz výrobců betonu ČR  
Na Zámecké 9, 140 00 Praha 4  
tel.: 246 030 153  
e-mail: svb@svb.cz, www.svb.cz

Ing. Vladimír Veselý  
Betotech, s. r. o.  
Beroun 660, 266 01 Beroun  
tel.: 311 644 063  
e-mail: vladimir.vesely@betotech.cz  
www.betotech.cz