

VLIV SLOŽENÍ BETONU NA JEHO MODUL PRUŽNOSTI: POROVNÁNÍ EXPERIMENTU A HODNOT Z EUROKÓDU 2

INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF CONCRETE ON ITS MODULUS OF ELASTICITY: COMPARISON OF AN EXPERIMENT AND THE VALUES FROM EUROCODE 2

Dalibor Kocáb, Romana Halamová,
Tomáš Vymazal, Oldřich Žalud

Príspevek se zabývá experimentálním stanovením vlivu složení betonu na hodnotu jeho modulu pružnosti. Modul pružnosti je jednou z nejdůležitějších vlastností betonu. Ovlivňuje deformace betonu, ale může mít vliv i na jeho další důležité parametry, jako jsou např. dotvarování nebo smršťování, které zase ovlivňují chování či trvanlivost celých konstrukčních prvků nebo přímo konstrukcí. Pro popisovaný experiment byly vyrobeny menší bloky z devíti betonů, které se lišily pouze v množství cementu a přísad. Na zkušebních tělesech, odebraných pomocí jádrového vrtání, byl stanoven dynamický i statický modul pružnosti, přičemž získané hodnoty byly porovnány s hodnotami uvedenými v normě ČSN EN 1992-1-1 (Eurokódu 2). ■ This paper deals with experimental determination of the influence of composition of concrete on the value of its modulus of elasticity. Modulus of elasticity is one of the most important properties of concrete. It affects deformation of concrete, but may also influence other important parameters of concrete such as creep or shrinkage, which in turn affect the behaviour and durability of the entire structural elements or the structures themselves. Smaller blocks from nine concretes were produced for the described experiment which differed only in the amount of cement and admixtures. The test specimens, acquired by core drilling, were subjected to the determination of the dynamic and static modulus of elasticity and the obtained values were then compared with the values stated in the standard ČSN EN 1992-1-1 (Eurocode 2).

Ještě v relativně nedávné minulosti byla nejvýznamnější a v některých případech jedinou rozhodující charakteristikou betonu jeho pevnost v tlaku. Koncem druhé poloviny minulého století nastal výrazný progres ve vývoji navrhování konstrukcí, v technologii výstavby a zejména ve výrobě betonů, které je v současné době možné nazvat moderní či vysokohodnotné [1], [2].

V kontextu těchto zásadních změn ve stavebnictví došlo také ke změně přístupu k samotnému betonu. Dominantními požadavky se staly trvalá udržitelnost, environmentální aspekty a především trvanlivost [3]. Trvanlivost betonu

je však poněkud vágní pojem, který lze chápat v širokých mezích. K vlastnostem betonu, které jeho trvanlivost zásadním způsobem ovlivňují, bezesporu patří propustnostní charakteristiky, náchylnost k tvorbě trhlin zejména vlivem smršťování a také pružnostní parametry, mezi něž náleží modul pružnosti [4].

Modul pružnosti betonu je důležitým faktorem při výpočtu deformací prvků či celých konstrukcí, dotvarování nebo napětí, např. od smršťování. Současné trendy ve stavebnictví požadují stavět co možná nejjednodušší konstrukce, které jsou velmi často předpjaté a u nichž je důležitost modulu pružnosti betonu zřejmá. Proto se tato vlastnost betonu dostává v posledních letech do popředí zájmu stavebních inženýrů i vědeckých institucí [5]. Jedním z hlavních problémů modulu pružnosti je jeho udávaná hodnota v normě ČSN EN 1992-1-1 (Eurokód 2) [6], podle které jsou obvykle betonové stavby navrhovány. Zatímco pevnost v tlaku je v normě [6] klasifikována dle pevnostních tříd (které odpovídají charakteristické válcové a krychelné pevnosti, přičemž tyto hodnoty jsou pětiprocentními kvantily pevností) a také průměrnou pevností f_{cm} pro jednotlivé třídy, modul pružnosti je pro každou pevnostní třídu udáván pouze jako průměrná hodnota E_{cm} (jedná se o sečnový neboli statický modul pružnosti). Navíc je tato hodnota přímo závislá na pevnosti f_{cm} .

V dnešní době, kdy se při výrobě betonů používají nejrůznější přísady a příměsi, pomocí kterých lze poměrně snadno zvýšit pevnost betonu v tlaku, se však ukazuje, že modul pružnosti na pevnosti závislý není a že zvýšení jeho hodnoty je nepoměrně náročnější než zvýšení pevnosti v tlaku. Vzniká tak situace, kdy modul pružnosti betonu jedné pevnostní třídy může dosahovat značného rozptylu hodnot a tyto hodnoty jsou zpravidla nižší než E_{cm} , což velmi přesně vystihl článek [7] v grafech 12 a 13, ale také např. příspěvky [8], [9] a [10]. Eurokód 2 [6] nicméně uvádí, že deformace betonu, potažmo jeho modul pružnosti, je velkou měrou závislý na složení betonu, především

na kamenivu. Hodnoty E_{cm} jsou uvažovány pro betony se silikátovým kamenivem. V případě použití vápencového nebo pískovcového kameniva se mají hodnoty E_{cm} snížit o 10 %, resp. o 30 %, a u betonů s čedičovým kamenivem se mají naopak zvýšit o 20 %. Použité kamenivo však není jediným důležitým faktorem, který hodnotu modulu pružnosti ovlivňuje. Norma [6] až na výjimku tří výše uvedených druhů kameniva neřeší žádný přirozený rozptyl hodnot modulu pružnosti ani jeho charakteristickou hodnotu.

Tento stav by se však mohl v budoucnu změnit. V normě [6] je dále uvedeno, že se hodnoty E_{cm} mají považovat za směrné pro obecné užití, avšak u konstrukcí citlivých na odchylky od těchto obecných hodnot, tedy u konstrukcí citlivých na deformace, se doporučuje stanovit hodnoty přesněji. Do statických výpočtů by v těchto případech měly vstupovat hodnoty modulu pružnosti betonu stanovené experimentálně, což je rozumný přístup.

EXPERIMENT

Cílem popisovaného experimentu bylo ověřit vliv složení betonu na hodnotu modulu pružnosti a především zjištěné hodnoty porovnat s hodnotami E_{cm} uváděnými v Eurokódu 2 [6]. V experimentu bylo použito žulové kamenivo, které má poměrně vysoký modul pružnosti. Zjištěné hodnoty modulu pružnosti betonu by tedy teoreticky měly odpovídat hodnotám E_{cm} . Jako zkušební tělesa sloužily jádrové vývrty z betonových bloků, které byly vyrobeny z devíti různých betonů.

MATERIÁL A ZKUŠEBNÍ TĚLESA

Pro potřeby experimentu bylo navrženo devět receptur betonu, které se lišily pouze vodním součinitelem a množstvím přísad. Označeny byly písmenem, tedy A až I. Pro výrobu všech betonů byl použit cement CEM I 42,5 R, těžžený písek 0-4 mm a hrubé drcené kamenivo (granodiorit) frakcí 4-8 mm a 8-16 mm. Množství hrubého kameniva bylo ve

Tab. 1 Složení použitých betonů [kg/m³] ■ **Tab. 1** Composition of used concretes [kg/m³]

Složka [kg]	Označení betonu								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
CEM I 42,5 R	250	300	300	350	400	350	400	350	400
písek 0-4mm	975	925	925	875	825	875	825	875	825
kamenivo 4-8mm	185	185	185	185	185	185	185	185	185
kamenivo 8-16mm	695	695	695	695	695	695	695	695	695
voda	204	204	179	179	179	174	174	164	164
plastifikační přísada	0,00	0,00	0,75	0,88	1,00	1,75	2,00	1,75	2,00
provzdušňovací přísada	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,75	0,75

Tab. 2 Vodní součinitel a vlastnosti čerstvých betonů ■**Tab. 2** Water-cement ratio and properties of fresh concretes

Vlastnost	Označení betonu								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
vodní součinitel	0,76	0,63	0,55	0,47	0,41	0,46	0,40	0,43	0,38
objemová hmotnost [kg/m ³]	2 250	2 320	2 280	2 300	2 300	2 270	2 300	2 190	2 260
roztíř [mm]	440	410	360	350	370	340	330	330	320
obsah vzduchu [%]	2,8	2,7	3,6	2,8	3,2	3,5	3,0	6,2	5,7

všech použitých betonech stejné, betony se v podstatě lišily pouze v množství cementu (250, 300, 350 a 400 kg na 1 m³ čerstvého betonu) a v dávce plastifikační přísady na bázi PCE. Změny v dávkování vody a cementu byly kompenzovány změnou dávkování písku (při zvyšující se dávce cementu byla dávka písku redukována). Betony s označením A a B plastifikátor vůbec neobsahovaly, betony s označením C, D a E obsahovaly plastifikační přísadu v množství 0,25 % z hmotnosti cementu a betony označené F a G obsahovaly plastifikační přísadu v množství 0,50 % z hmotnosti cementu. Poslední dva betony H a I obsahovaly kromě plastifikační přísady (o stejné dávce jako betony F a G) také provzdušňovací přísadu. Množství dávkované vody bylo upraveno dle množství přísad tak, aby byla u všech betonů dosažena přibližně stejná zpracovatelnost. Podrobnější informace o složení použitých betonů jsou uvedeny v tab. 1. Tab. 2 uvádí hodnotu vodního součinitele betonů a také jejich základní vlastnosti v čerstvém stavu, které byly stanoveny v souladu s příslušnými normami řady ČSN EN 12350 [11].

Z jednotlivých betonů bylo vyrobeno větší množství zkušebních těles, mezi nimiž byly betonové bloky, které měly tvar kvádry o jmenovitých rozměrech 300 × 300 × 150 mm. Po betonáži byly naplněné formy přikryty připravenými víky a uloženy v standardních

laboratorních podmínkách. Po 72 h zrání betonu byly všechny bloky vyjmuty z forem a uloženy do vodní lázně o teplotě 20 ± 2 °C. Ve stáří 28 dní bylo na těchto blocích provedeno měření propustnosti pro vodu i pro plyny, viz příspěvek [12]. Po tomto nedestruktivním testování byly bloky ponechány bez dalšího ošetřování v standardních laboratorních podmínkách. Ve stáří betonů 210 až 230 dní byla pomocí jádrového vrtání odebrána ze třech betonových bloků tělesa o jmenovitém průměru 75 a 100 mm. Z každého bloku byly odebrány dva jádrové vývrty průměru 75 mm a jeden jádrový průměru 100 mm. Z vývrty o průměru 100 mm byla pomocí kotoučového řezání připravena dvě zkušební tělesa tvaru válce délky 100 mm a z každého vývrty o průměru 75 mm bylo stejným postupem připraveno jedno zkušební těleso délky 200 mm a také jedno zkušební těleso délky 75 mm. Z každého betonu tak bylo pro potřeby experimentu připraveno šest zkušebních válců 100 × 100 mm, šest zkušebních válců 75 × 200 mm a šest zkušebních válců 75 × 75 mm. Tlačné plochy všech zkušebních těles byly upraveny broušením.

POUŽITÉ ZKUŠEBNÍ METODY

Na všech zkušebních válcích průměru a výšky 100 mm i průměru a výšky 75 mm (tedy na všech zkušebních tělesech se štíhlostí rovnou 1) byla

určena pevnost v tlaku dle normy ČSN EN 12390-3 [13]. Výsledky pevnosti v tlaku válců 100 × 100 mm sloužily ke stanovení pevnostní třídy betonů, výsledky pevnosti v tlaku válců 75 × 75 mm sloužily k určení horní zatěžovací meze při zkoušce statického modulu pružnosti, která má odpovídat třetině pevnosti zkušebních těles. Na válcích 75 × 200 mm byl nejdříve určen dynamický modul pružnosti pomocí ultrazvukové impulzové a rezonanční metody a poté statický modul pružnosti v tlaku.

Na zkušebních tělesech určených k měření modulu pružnosti betonu byla nejdříve v podélné ose stanovena doba průchodu ultrazvukového (dále též UZ) vlnění. Ultrazvukový přístroj byl před každým měřením kalibrován a pro měření byly použity sondy o frekvenci 150 kHz. Na každém zkušebním tělese bylo měření provedeno třikrát a ze stanovených dob průchodu UZ vlnění byla vypočtena rychlost šíření ultrazvukového vlnění betonem. Podle normy ČSN 73 1371 [14] byl následně vypočten dynamický modul pružnosti E_{cu} . Dále byly na zkušebních válcích stanoveny vlastní frekvence podélného, příčného a kroutivého kmitání. Ke stanovení rezonančních frekvencí byl použit osciloskop Handyscope HS4 se snímači akustické emise. Kmitání zkušebních těles bylo vybuzeáno úderem pomocí impulsního kladívka a samotné vlastní frekvence byly zjištěny pomocí softwaru, který pracuje na principu rychlé Fourierovy transformace a který je součástí dodávky osciloskopu. Ze zjištěných hodnot vlastních frekvencí byly podle normy ČSN 73 1372 [15] vypočteny dynamické moduly pružnosti E_{crL} (z vlastní frekvence podélného kmitání) a E_{crf} (z vlastní frekvence příčného kmitání). Výhodou rezonanční metody je možnost stanovení také dynamického modulu pružnosti ve smyku G_{cr} a především dynamického Poissonova čísla ν_{cr} , jehož hodnota vstupuje do výpočtu E_{cu} (a bez měření rezonanční metodou je zpravidla pouze odhadována). Více o použitých dynamických metodách lze najít např. v článku [16].

Po provedení nedestruktivního měření byla na všech zkušebních válcích 75 × 200 mm provedena statická zkouška dle normy ČSN EN 12390-13, metody B [17], na základě níž byl stanoven statický modul pružnosti $E_{c,s}$. Výsledné hodnoty $E_{c,s}$ by se od hodnot E_c dle normy ČSN ISO 1920-10

[18] neměly statisticky významně lišit, viz článek [19]. Zkušební tělesa byla cyklicky zatěžována ve zkušebním lisu ALPHA 3-3000 S firmy Form+Test za současného měření jejich podélných deformací pomocí elektricko-odporových tenzometrů, které jsou součástí zkušebního lisu (obr. 1).

VÝSLEDKY A JEJICH DISKUZE

Výsledky pevnosti v tlaku stanovené na zkušebních tělesech průměru i výšky 100mm jsou uvedeny v tab. 3, a to včetně pevnostních tříd jednotlivých betonů, které byly stanoveny dle normy ČSN EN 13791 [20]. Hodnoty dynamických modulů pružnosti, které byly během experimentu určeny na všech betonech, jsou uvedeny v tab. 4.

V grafu na obr. 2 je znázorněna závislost stanovených dynamických i statických modulů pružnosti na vodním součiniteli betonů. Stejně jako v článku [10] je jako regresní model zvolena křivka exponenciální rovnice. Koeficient determinace R^2 popisuje, do jaké míry se podařilo zvoleným modelem popsat variabilitu experimentálních dat. U všech modulů pružnosti převyšuje koeficient determinace hodnotu 0,90, což obecně značí vysokou míru vhodnosti použitého modelu pro popis experimentálních dat. V grafu na obr. 3 je znázorněna závislost mezi experimentálně stanovenou průměrnou pevností betonu v tlaku f_{cm} a statickým modulem pružnosti $E_{C,S}$. Jak již bylo uvedeno výše, přímá závislost mezi pevností v tlaku a modulem pružnosti betonu neexistuje, zvláště pokud je uvažován beton různého složení. V případě, kdy se v receptuře mění pouze množství cementu, přísady a příp. vody (příčemž ostatní složky zůstávají stále

- 1 Měření statického modulu pružnosti v tlaku
 - 2 Závislost mezi dynamickým i statickým modulem pružnosti betonu a jeho vodním součinitelem
 - 3 Závislost statického modulu pružnosti na pevnosti betonu v tlaku – chybové úsečky znázorňují výběrové směrodatné odchylky
- 1 Measurement of the static modulus of elasticity
 2 Dependence between the dynamic or static modulus of elasticity and the w/c ratio
 3 Dependence of the static modulus of elasticity on compressive strength – the error bars indicate sample standard deviations

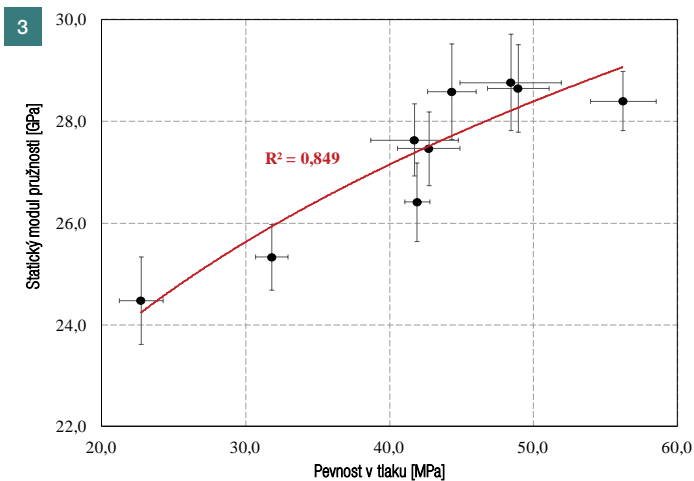
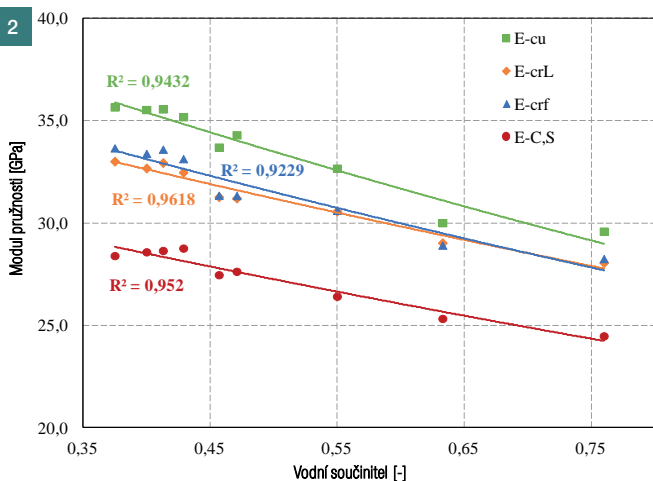


Tab. 3 Výsledky průměrné pevnosti betonu v tlaku f_{cm} včetně určení pevnostních tříd
Tab. 3 Results of the average compressive strength f_{cm} including the strength class division

Vlastnost	Označení betonu								
	A	B	C	D	E	F	G	H	I
pevnost v tlaku [MPa]	22,7	31,8	41,9	41,7	48,9	42,7	44,3	48,4	56,2
výběrová směrodatná odchylka [MPa]	1,52	1,14	0,86	3,06	2,14	2,18	1,68	3,52	2,28
variáční koeficient [%]	6,7	3,6	2,0	7,4	5,0	2,2	3,8	7,3	4,0
pevnostní třída betonu	C12/15	C20/25	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C45/55

Tab. 4 Výsledky průměrných hodnot všech dynamických modulů pružnosti včetně výběrové směrodatné odchylky (v. s. o.) [GPa]
Tab. 4 Results of the average values of all dynamic modulus of elasticity including sample standard deviation (v. s. o.) [GPa]

Vlastnost		Označení betonu								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
E_{cu}	průměrná hodnota	29,6	30	32,7	34,3	35,6	33,7	35,5	35,2	35,7
	v. s. o.	0,75	0,65	0,35	0,68	0,82	0,37	1,04	0,78	0,72
E_{crL}	průměrná hodnota	28,1	29	30,6	31,2	32,9	31,3	32,7	32,5	33
	v. s. o.	0,58	0,51	0,56	0,67	0,67	0,39	1,26	0,81	0,66
E_{crf}	průměrná hodnota	28,3	28,9	30,6	31,3	33,6	31,3	33,4	33,1	33,7
	v. s. o.	0,84	0,67	0,72	1,31	0,78	0,61	1,18	0,77	0,66



Tab. 5 Výsledky zjištěného statického modulu pružnosti $E_{C,S}$ a jeho porovnání s hodnotami E_{cm} uvedenými v Eurokódu 2 [6] ■ **Tab. 5** Results of the static modulus of elasticity $E_{C,S}$ and its comparison to E_{cm} values in Eurocode 2 [6]

Vlastnost	Označení betonu									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
pevnostní třída betonu	C12/15	C20/25	C30/37	C30/37	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45	C45/55	
$E_{C,S}$ [GPa]	průměrná hodnota	24,5	25,3	26,4	27,6	28,6	27,5	28,6	28,8	28,4
	v. s. o.	0,86	0,64	0,77	0,71	0,87	0,73	0,94	0,95	0,58
E_{cm} (Eurokód 2) [GPa]	27	30	33	33	34	33	33	34	36	
rozdíl mezi E_{cm} a $E_{C,S}$ [GPa]	2,5	4,7	6,6	5,4	5,4	5,5	4,4	5,2	7,6	

stejně, mění se tedy v podstatě pouze vodní součinitel betonu), je však možná určitou závislost mezi těmito parametry betonu nalézt. Jako regresní model byl vybrán mocninný model, jehož koeficient determinace dosahoval hodnoty 0,85. Jedná se o hodnotu, kdy je ještě možné považovat použitý

model za vhodný, ovšem s drobnými výhradami.

V tab. 5 je kromě stanovených statických modulů pružnosti betonu v tlaku $E_{C,S}$ uveden také průměrný modul pružnosti E_{cm} tak, jak jej v závislosti na pevnostní třídě betonu uvádí Eurokód 2 [6]. Je zcela zřejmé, že přestože

bylo pro výrobu všech betonů použito silikátové kamenivo, naměřené statické moduly pružnosti dosahovaly výrazně nižších hodnot, než které jsou normativně udávány a podle kterých se běžně navrhuje nové konstrukce. Hodnoty skutečné se lišily od v Eurokódu 2 [6] uvedených o 2,5 až 7,6 GPa (!), přičemž průměrný rozdíl činil 5,3 GPa. Výsledky provedeného experimentu tak potvrdily zkušenosti, které již byly publikovány např. v článkách [8], [9] a [10] a zejména v grafech č. 12 a 13 v článku [7].

ZÁVĚR

Na základě dosažených výsledků provedeného experimentu je možné konstatovat, že skutečné hodnoty statického modulu pružnosti betonu se mohou zásadním způsobem lišit od hodnot uvedených v Eurokódu 2 [6]. Uvažování průměrného modulu pružnosti E_{cm} podle pevnostní třídy betonu může při návrhu konstrukce vést k chybným výstupům. Může totiž dojít k situaci, že skutečná hodnota modulu pružnosti betonu je výrazně nižší než hodnota, která do výpočtu vstupuje, což může mít neblahý vliv na celkovou životnost navrhované konstrukce.

Z prezentovaných výsledků také vyplývá, že u betonu známého složení je modul pružnosti značně závislý na jeho vodním součiniteli, což dává možnost poměrně přesně predikovat hodnotu modulu pružnosti, pokud se v receptuře betonu mění pouze množství cementu nebo vody či příp. přísad.

Tento příspěvek vznikl za podpory projektu GAČR č. GA17-14302S a vnitřního projektu VUT č. FAST-J-18-5516.

Ing. Dalibor Kocáb, Ph.D.
Fakulta stavební VUT
dalibor.kocab@vutbr.cz



Ing. Romana Halamová
Fakulta stavební VUT
romana.halamova@vutbr.cz



doc. Ing. Tomáš Vymazal, Ph.D.
Fakulta stavební VUT
tomas.vymazal@vutbr.cz



Ing. Oldřich Žalud
Betotech, s. r. o.
oldrich.zalud@betotech.cz



Článek byl posouzen odborným lektorem.
The article was reviewed.

Literatura:

- [1] NEVILLE, A. *Properties of Concrete*. Harlow: Prentice Hall, 2010.
- [2] COLLEPARDI, M. *The New Concrete*. Villorba: Grafiche Tintoretto, 2006.
- [3] AÏTCIN, P.-C. *High-Performance Concrete*. Boca Raton: CRC Press, 1998.
- [4] ALEXANDER, M., BENTUR, A., MINDESS, S. *Durability of Concrete: Design and Construction*. Boca Raton: CRC Press, 2017.
- [5] HUŇKA, P., KOLÍSKO, J., VOKÁČ, M., ŘEHÁČEK, S. Test and Technological Influences on Modulus of Elasticity of Concrete – Recapitulation. *Procedia Engineering*. 2013, Vol. 65, s. 266–272.
- [6] ČSN EN 1992-1-1 ed. 2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2011.
- [7] SILVA, R. V., DE BRITO, J., DHIR, R. K. Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2016, Vol. 112, s. 2171–2186.
- [8] HELA, R., KRÍŽOVÁ, K. Evaluation of static modulus of elasticity depending on concrete compressive strength. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. 2015, Vol. 9, s. 654–657.
- [9] ZHOU, Y., GAO, J., SUN, Z., QU, W. A fundamental study on compressive strength, static and dynamic elastic moduli of young concrete. *Construction and Building Materials*. 2015, Vol. 98, s. 138–145.
- [10] YILDIRIM, H., SENGUL, O. Modulus of elasticity of substandard and normal concretes. *Construction and Building Materials*. 2011, Vol. 25, s. 1645–1652.
- [11] ČSN EN 12350. *Zkoušení čerstvého betonu*. Praha: ČNI, 2009.
- [12] MISÁK, P., STAVAR, T., ROZSYPALOVÁ, I., KOCÁB, D., PÓSSL, P. Statistical view of evaluating concrete-surface-layer permeability tests in connection with changes in concrete formula. *Materiali in Tehnologije*. 2017, Vol. 51, s. 379–385.
- [13] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [14] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: ČNI, 2011.
- [15] ČSN 73 1372. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Praha: ČNI, 2012.
- [16] KOCÁB, D., KRÁLÍKOVÁ, M., CIKRLÉ, P., MISÁK, P., KUCHARCZYKOVÁ, B. Experimental Analysis of the Influence of Concrete Curing on the Development of its Elastic Modulus over Time. *Materiali in tehnologije*. 2017, Vol. 51, s. 657–665.
- [17] ČSN EN 12390-13. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 13: Stanovení sečnového modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ÚNMZ, 2014.
- [18] ČSN ISO 1920-10. *Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [19] KOCÁB, D., MISÁK, P., CIKRLÉ, P., KOMÁRKOVÁ, T., MORAVCOVÁ, B. Statický modul pružnosti betonu v tlaku dle ČSN ISO 6784 a ČSN EN 12390-13. *Beton TKS*. 2014, roč. 14, č. 3, s. 74–79.
- [20] ČSN EN 13791. *Posuzování pevnosti betonu v tlaku v konstrukcích a v prefabrikovaných betonových dílcích*. Praha: ČNI, 2007.