

# VLIV ČÁSTEČNÉ NÁHRADY CEMENTU LATENTNĚ HYDRAULICKOU PŘÍMĚSÍ NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU ■ THE EFFECT OF PARTIAL REPLACEMENT OF CEMENT BY A SUPPLEMENTARY CEMENTITIOUS MATERIAL ON MECHANICAL PROPERTIES OF HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Josef Fládr, Petr Bílý,  
Vladimír Hrbek, Lukáš Vráblík

V článku je zkoumán vliv částečné náhrady cementu vybranými latentně hydraulickými příměsími na mechanické vlastnosti vysokohodnotných betonů. Porovnáno bylo celkem deset různých receptur: referenční záměs bez příměsí a záměsí s náhradou 10, 20 nebo 30 % hmotnosti cementu mikrosilikou, popílkem nebo metakaolinem. Pro všechny zkoumané receptury byly provedeny zkoušky objemové hmotnosti ztvrdlého betonu, pevnosti v tlaku, pevnosti v příčném tahu, pevnosti v tahu za ohybu, dynamického a statického modulu pružnosti a zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při částečné náhradě cementu popílkem. Celkově však lze konstatovat, že kromě zvýšení odolnosti proti průniku tlakové vody nedošlo vlivem příměsí k zásadnímu ovlivnění sledovaných vlastností.

■ The paper investigates the effect of content of selected supplementary cementitious materials (SCM) on mechanical properties of high performance concrete. In total, 10 different mixtures were compared: reference mixture with no SCM and mixtures where 10, 20 or 30 % of cement weight were replaced by microsilica, fly ash or metakaolin. Tests of bulk density, compressive strength, splitting tensile strength, flexural tensile strength, dynamic and static elastic modulus and depth of penetration of water under pressure

were carried out for all the tested mixtures. The best results were reached when the cement was partially replaced by fly ash. However, it can be generally stated that no significant effect of SCM on the followed properties was observed with the exception of improvement of resistance to penetration of water under pressure.

Záměrem prezentovaného experimentu bylo ověřit vliv podílu náhrady cementu vybranými latentně hydraulickými příměsími – mikrosilikou, popílkem nebo metakaolinem – na mechanické vlastnosti vysokohodnotných betonů (HPC). Důvody pro používání těchto příměsí do betonu jsou obecně známy [9], [13], [15].

Přidáním křemičitých útětů (mikrosiliky) do betonu lze výrazně zlepšit vlastnosti čerstvé směsi. Jejich použitím se dá předejít např. tzv. krvácení betonu a zlepšit čerpatelnost. U ztvrdlého betonu jsou hlavními výhodami odolnost proti smršťování a vzniku mikrotrhlin, agresivním vlivům prostředí a průniku vody vyplývající z vyšší hutnosti matrice. Obvykle dochází i k nárůstu pevnosti v tlaku, což se však v prezentovaném výzkumu nepotvrdilo.

Hlavním účinkem elektrárenského popílku je zpomalení hydratace cementové pasty, a tím i nižší vývin

**Tab. 1** Výsledky výzkumu Megat Johariho a kol. [16] ■ **Tab. 1** Results of research of Megat Johari et al. [16]

Receptura	Pevnost v tlaku [MPa]	Statický modul pružnosti [GPa]	Dynamický modul pružnosti [GPa]
OPC	86,7	44,6	50
SF5	105,7	46,1	53,5
SF10	113,9	47,1	54,2
SF15	117,5	48,3	55
FA10	85,7	43,7	49,6
FA20	84,3	43,1	48,8
FA30	82,1	42,4	48,2
MK5	91,5	45,7	52,9
MK10	103,7	45,5	51,8
MK15	103,4	46,3	52,2

hydratačního tepla a pomalejší počáteční nárůst pevnosti. Nezhidratovaný popílek plní funkci mikroplniva, zlepšuje hutnost cementové matrice a reologické vlastnosti čerstvého betonu a činí beton odolnějším proti chemicky agresivním vlivům prostředí. Mezi přínosy jeho použití patří i snížení ceny betonu a pozitivní vliv na uhlíkovou stopu betonu.

Metakaolin přispívá ke zhuštění

**Tab. 2** Složení směsí ■ **Tab. 2** Composition of the mixtures

Složka	Specifikace	INIT [kg/m <sup>3</sup> ]	REF [kg/m <sup>3</sup> ]	MIC10 [kg/m <sup>3</sup> ]	MIC20 [kg/m <sup>3</sup> ]	MIC30 [kg/m <sup>3</sup> ]	POP10 [kg/m <sup>3</sup> ]	POP20 [kg/m <sup>3</sup> ]	POP30 [kg/m <sup>3</sup> ]	MET10 [kg/m <sup>3</sup> ]	MET20 [kg/m <sup>3</sup> ]	MET30 [kg/m <sup>3</sup> ]
cement	CEM I 42,5 R	650	800	720	640	560	720	640	560	720	640	560
příměs	mikrosilika	120	0	80	160	240	0	0	0	0	0	0
	popílek	0	0	0	0	0	80	160	240	0	0	0
	metakaolin	0	0	0	0	0	0	0	0	80	160	240
voda	-	231	210	231	252	273	197,4	184,8	172,2	210	210	210
w/b	-	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26	0,26
kamenivo (čedič)	frakce 8/16	300	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320
	frakce 4/8	360	390	390	390	390	390	390	390	390	390	390
	frakce 0/4	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730	730
SPF	Stachment	37,6	25	33	33	33	34	32	30	30	30	30
drátky	13 a 25 mm, 1:1	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

struktury, lepší reologii betonu a zvyšuje tlakovou pevnost a odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám.

Cílem výzkumu bylo určit, jak se budou vlastnosti vysokohodnotného betonu měnit se vzrůstající náhradou cementu latentně hydraulickou příměsí a jaké budou rozdíly při použití různých příměsí.

### SOUVISEJÍCÍ VÝZKUMNÉ PRÁCE

V domácí ani zahraniční literatuře se nepodařilo dohledat srovnatelnou komplexní práci, která by se zabývala vlivem náhrady cementu různými příměsí v různých dávkách na různé mechanické vlastnosti vysokohodnotných betonů. Z existujících prací však lze vybrat některé dílčí závěry využitelné pro naši studii. Voleny byly výzkumy zaměřené na vysokohodnotné betony s příměsí bez drátků s pevností v tlaku okolo 100 MPa a vodním součinitelem mezi 0,2 až 0,3. Citovány jsou ve všech případech 28denní hodnoty daných charakteristik.

Nejucelenější nalezenou studií je práce Megat Johariho a kol. [16], kteří zkoumali vliv příměsí na pevnost v tlaku a modul pružnosti pro směsi s vodním součinitelem 0,28. Použili poměrně nízkou dávku cementu 450 kg/m<sup>3</sup> (směs OPC), který dále částečně nahradili 5 až 15 % mikrosiliky (směsi SF5 až SF15) nebo metakaolinu (směsi MK5 až MK15) anebo 10 až 30 % popílku (směsi FA10 až FA30). Dosažené výsledky shrnuje tab. 1. V součtu lze říci, že mikrosilika a metakaolin při všech úrovních mírně zlepšily sledované vlastnosti, použití popílku vedlo k mírnému zhoršení bez jasné závislosti na množství náhrady.

Zhang a kol. [22] při vývoji modelu umělé neuronové sítě pro odhad pevnosti ultra vysokohodnotného betonu s příměsí prováděli sérii doprovodných experimentů. Zaměřili se na betony s vodním součinitelem 0,22, které obsahovaly cement, popílek a mikrosiliky. Referenční záměs obsahovala 875 kg/m<sup>3</sup> cementu a 44 kg/m<sup>3</sup> mikrosiliky bez popílku. Další záměsi obsahovaly 263 kg/m<sup>3</sup> popílku, cementu a mikrosiliky v nich bylo v součtu 656 kg/m<sup>3</sup>, přičemž poměr těchto dvou složek se lišil od přibližně 14 : 1 do 3 : 1. Pro referenční beton byla stanovena pevnost v tlaku 98 MPa, pro betony s popílkem mezi 85 a 108 MPa, přičemž pevnost téměř lineárně rostla s rostoucím podílem mikrosiliky.

Shi a kol. [19] sledovali vliv dávky popílku a vodního součinitele na pevnost v tlaku, dusíkovou propustnost a hloubku karbonatice HPC. Jimi studované

receptury obsahovaly 550 kg/m<sup>3</sup> cementu při náhradách popílkem od 0 do 60 % hmotnosti. Při vodním součiniteli 0,25 pevnost v tlaku rostla z počátečních 81 MPa na 90 MPa při 30% náhradě, následně klesla až na 42 MPa. Pro vodní součinitel 0,3 pak monotónně klesala ze 76 MPa na 40 MPa.

Poon a kol. [18] vyvíjeli vysokohodnotný beton s vysokým obsahem popílku, přičemž vyšli z referenční receptury obsahující 637 kg/m<sup>3</sup> cementu, kde příměsí následně nahradili 25 a 45 % cementu při konstantním vodním součiniteli 0,24. Referenční receptura dosáhla pevnosti 97 MPa, při 25% náhradě pevnost stoupla na 106 MPa, při 45% náhradě pak klesla na 89 MPa.

Muhd Norhasri a kol. [17] se zabývali vlivem běžného metakaolinu a nanometakaolinu na vlastnosti UHPC. U směsí bez nanometakaolinu (tj. srovnatelných s naší studií) použili při vodním součiniteli 0,2 nejprve 800 kg/m<sup>3</sup> cementu bez metakaolinu a poté 720 kg/m<sup>3</sup> cementu spolu s 80 kg/m<sup>3</sup> metakaolinu (10% náhrada). Dosažené pevnosti v tlaku byly 164 MPa, resp. 168 MPa, vliv příměsí byl tedy zanedbatelný.

Taфраoui a kol. [20] zkoumali UHPC s náhradou 20 % cementu mikrosilikou a metakaolinem. Při 828 kg/m<sup>3</sup> cementu, 207 kg/m<sup>3</sup> příměsí a vodním součiniteli 0,22 získali pevnosti bez drátků 98 MPa (mikrosilika) a 109 MPa (metakaolin), při použití 164 kg/m<sup>3</sup> drátků (2 % objemu) pak 192 MPa (mikrosilika) a 161 MPa (metakaolin).

### ZKOUMANÉ MATERIÁLY

Výzkum byl prováděn pro celkem deset různých receptur vysokohodnotného betonu. Vyrobena byla referenční záměs bez příměsí (v tab. 2 označena jako REF) a záměsi s náhradou 10, 20 nebo 30 % hmotnosti cementu třemi různými typy latentně hydraulických příměsí – mikrosilikou, popílkem nebo metakaolinem (v tab. 2 označeny jako MIC, POP a MET s číslem označujícím procentuální náhradu cementu příměsí). Volba procentuálních náhrad vyplynula z předchozí studie provedené na cementových pastách [14], která uvažovala náhrady cementu v rozmezí 0 až 80 % hm. a ukázala, že při náhradě vyšší než 30 % je prakticky nemožné dosáhnout mechanických parametrů vysokohodnotného betonu, velmi problematická byla i zpracovatelnost takových směsí. Složení jednotlivých receptur je uvedeno v tab. 2. Ve všech případech byl zachován jednotný vodní součinitel 0,26 (dále označovaný jako *w/b* – water-to-binder ratio – z důvodu započítání latentně hydraulických příměsí do množství pojiva). Pro stanovení potřebného množství záměsové vody byla použita koncepce *k*-hodnoty:

$$w/b = \frac{m_w}{m_c + k \cdot m_p} \quad (1)$$

Ve vzorci značí  $m_w$  množství záměsové vody,  $m_c$  je množství cementu a  $m_p$  množství příměsí [kg/m<sup>3</sup>]. Hodnota *k* byla uvažována 2,0 pro mikrosiliky,

Tab. 3 Chemické složení cementu a příměsí [%]

Složka	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>
cement	64,2	19,5	4,7	3,2	3,2	1,3	-	-
mikrosilika	1,5	92,1	-	0,4	-	0,3	0,7	-
popílek	4,2	48,8	24,2	12,5	1,2	0,7	1,4	1,4
metakaolin	-	54,1	40,1	1,1	-	-	0,8	1,8

Tab. 3 Chemical composition

of the cementitious materials [%]

Tab. 4 Další charakteristiky cementu a příměsí;  $x_{50}$  je medián velikosti částic,  $x_{90}$  je 90% kvantil

Tab. 4 Additional characteristics of the cementitious materials;  $x_{50}$  is median particle,  $x_{90}$  is 90% quantile

Složka	Měrný povrch [m <sup>2</sup> /g]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	$x_{50}$ [mm]	$x_{90}$ [mm]	Ztráta žháním [% hm. suš.]
cement	0,37	3100	9,11	34,06	3,2
mikrosilika	15	2400	2,92	6,74	-
popílek P1	-	-	40,41	183,84	-
popílek P2	-	-	2,1	6,82	-
popílek P1+P2 2:1	0,25	2000	5,89	124,35	1,72
metakaolin	12,7	2300	2,15	7,5	2,2

Tab. 5 Výsledky provedených zkoušek ■ Tab. 5 Results of the executed tests

Receptura	Objemová hmotnost		Pevnost v tlaku		Pevnost v tahu za ohybu		Pevnost v příčném tahu		Poměr $f_{ct,sp} / f_{ct,fl}$	Dynamický modul pružnosti		Statický modul pružnosti		Poměr $E_s / E_d$	Hloubka průsaku	
	Hodnota [kg/m <sup>3</sup> ]	Směr. odchylka [kg/m <sup>3</sup> ]	Hodnota [MPa]	Směr. odchylka [MPa]	$f_{ct,fl}$ [MPa]	Směr. odchylka [MPa]	$f_{ct,sp}$ [MPa]	Směr. odchylka [MPa]		$E_d$ [GPa]	Směr. odchylka [GPa]	$E_s$ [GPa]	Směr. odchylka [GPa]		Hodnota [mm]	Směr. odchylka [mm]
REF	2490	13	105,9	1,98	7,8	0,36	9,6	1,4	0,81	54	1,24	51,3	2,51	0,95	17,5	4,04
MIC10	2420	7,9	109,3	2,84	6,7	0,43	7,5	1,22	0,89	51,3	2,57	42,2	3,12	0,82	10,5	1,73
MIC20	2380	15,8	101,3	4,25	7,6	0,2	5,9	0,27	1,28	55	4,13	46,8	2,15	0,85	10,5	4,04
MIC30	2340	17,8	97,7	6,77	6,5	0,29	5,8	0,68	1,12	55,9	1,23	48,1	3,56	0,86	17	1,15
POP10	2490	26,4	106,6	7,85	8,6	0,18	8,2	0,7	1,04	51,3	3,65	46,2	2,08	0,9	9	5,77
POP20	2490	12,5	120,8	1,25	8,5	0,36	8,8	0,96	0,96	55	2,97	49,5	1,34	0,9	3	1,15
POP30	2470	9,5	125,3	2,39	9,1	0,43	8,6	0,16	1,06	55,9	1,73	49,8	3,39	0,89	0,8	0,29
MET10	2480	10,2	108,9	2,92	7,5	0,59	7,3	0,52	1,03	48,7	3,46	39	2,03	0,8	6	1,15
MET20	2510	18	110,3	4,5	6,5	0,91	9,1	0,45	0,71	51,2	1,94	41,9	2,22	0,82	7	2,31
MET30	2470	25,2	96,7	4,04	7,9	0,38	7,9	0,34	1,01	47,9	1,87	39,7	1,31	0,83	10	1,15

0,4 pro popílek a 1,0 pro metakaolin [1]. Použity byly následující složky pojiva:

- portlandský cement CEM I 42,5 R Mokrý od výrobce Českomoravský cement,
- mikrosilika Stachesil S od výrobce Stachema CZ,
- elektrárenský popílek ETU EN 450 od společnosti ČEZ, elektrárna Tušimice II; popílek byl míchán ze dvou frakcí P1 a P2 v poměru 2:1 (charakteristiky frakcí jsou uvedeny v tab. 4 a na obr. 1),
- metakaolin Mefisto L05 od výrobce České lupkové závody.

Podrobnější specifikace materiálů je uvedena v tab. 3 a 4 a na obr. 1. Zrntostní křivky a hodnoty  $x_{50}$  a  $x_{90}$  byly stanoveny pro všechny materiály granulometrickou analýzou provedenou v Centru materiálového

výzkumu Fakulty chemické VUT v Brně. Chemické složení a další parametry byly převzaty z technických listů výrobců pro cement [23] a pro metakaolin [24]. Pro mikrosiliku byly poskytnuty na vyžádání dodavatelem materiálu. Chemické složení popílku bylo převzato z analýzy provedené firmou Gematest pro dodavatele popílku. Měrný povrch popílku ETU byl převzat z práce [25].

Širší výzkumný program realizovaný aktuálně na Fakultě stavební ČVUT v Praze se zaměřuje na vztahy mezi makroskopickými a mikroskopickými vlastnostmi ultra vysokohodnotných betonů (UHPC). Receptury navržené pro studii vycházejí z patentované [11] receptury ultra vysokohodnotného betonu vyztuženého drátky označené v tab. 2 jako INIT, pro kterou bylo dosaženo krychelné

pevnosti v tlaku 154 MPa. Zkoumány však byly receptury bez drátků kvůli porovnatelnosti výsledků analýzy makromechanických vlastností se současně probíhající mikroskopickou analýzou (viz článek na str. 50), pro kterou použití směsí s rozptýlenou výztuží nebylo možné s ohledem na proces leštění vzorků. To mělo za následek, že dosažené pevnosti v tlaku (tab. 5) byly nižší, než odpovídá obecně uznávanému kritériu pro UHPC.

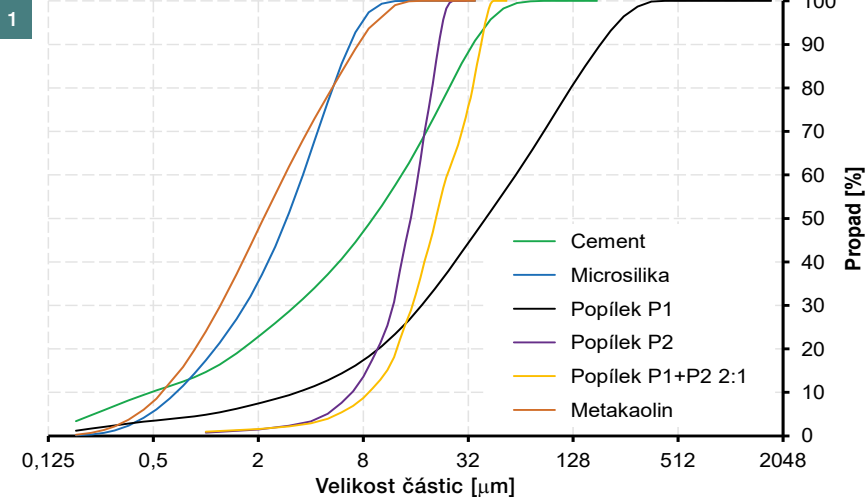
#### PROVEDENÉ ZKOUŠKY, JEJICH VÝSLEDKY A DISKuze

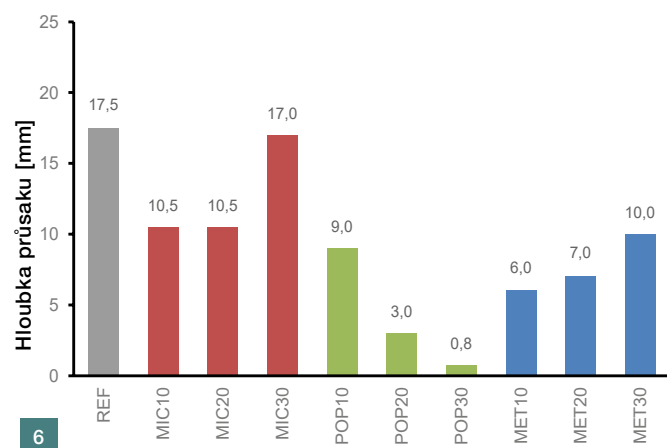
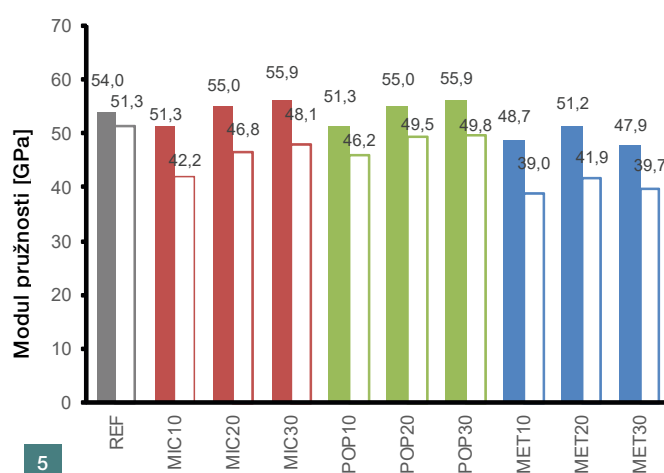
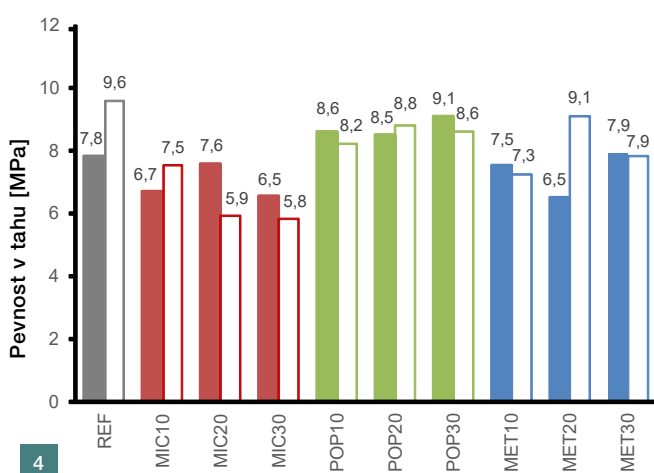
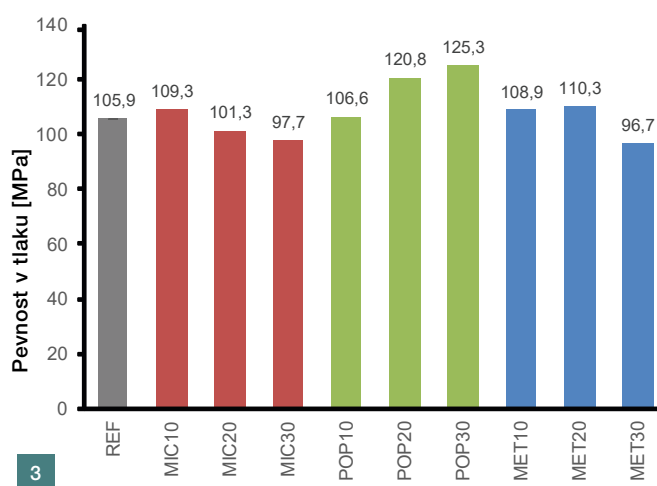
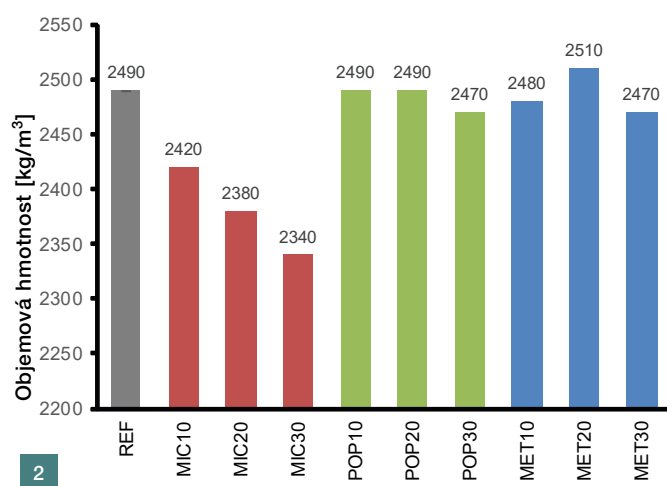
Pro všechny zkoumané receptury byly provedeny zkoušky objemové hmotnosti ztvrdlého betonu, pevnosti v tlaku, pevnosti v příčném tahu, pevnosti v tahu za ohybu, dynamického a statického modulu pružnosti a zkouška hloubky průsaku tlakovou vodou ve stáří  $28 \pm 2$  dny.

#### Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla stanovena dle ČSN EN 12390-7 [5] na krychlicích o hraně 100 mm výpočtem ze změřených skutečných rozměrů a změřené hmotnosti přirozeně vlhkého vzorku. Pro každou recepturu byly stanoveny tři hodnoty, které byly zprůměrovány.

Výsledky jsou uvedeny v tab. 5 a na obr. 2. S ohledem na velký podíl jemných složek jsou dosažené hodnoty poměrně vysoké, pohybují se kolem hranice 2 500 kg/m<sup>3</sup>. Nižších hodnot bylo dosaženo u směsí obsahujících mikrosiliku, přičemž v jejich případě objemová hmotnost monotónně





1 Křivky zrnitosti cementu a příměsí  
 2 Objemová hmotnost – výsledky 3 Pevnost v tlaku – výsledky 4 Pevnost v tahu – výsledky (plné sloupce – pevnost v tahu za ohybu, prázdné sloupce – pevnost v příčném tahu)  
 5 Modul pružnosti – výsledky (plné sloupce – modul dynamický, prázdné sloupce – modul statický) 6 Hloubka průsaku tlakovou vodou – výsledky

1 Particle size distribution curves of the cementitious materials 2 Bulk density – results 3 Compressive strength – results (solid columns – dynamic modulus, empty columns – static modulus) 4 Tensile strength – results (solid columns – flexural tensile strength, empty columns – splitting tensile strength) 5 Elastic modulus – results (solid columns – dynamic modulus, empty columns – static modulus) 6 Depth of penetration of water under pressure – results

klesala se vzrůstajícím podílem příměsí. Nižší objemové hmotnosti by bylo možné vysvětlit např. vyšším obsahem vzduchu v čerstvém betonu, tento parametr však nebyl měřen, a domněnku proto nelze potvrdit. Vyšší použité dávky mikrosiliky (20% a 30% náhrada) jsou z pohledu běžně vyráběných betonů vysoké, cílem práce však bylo ověřit vliv mikrosiliky i mimo rozsah běžně používaných

náhrad. U ostatních směsí byla objemová hmotnost v zásadě shodná a prakticky nezávislá na procentu náhrady cementu příměsí.

#### Pevnost v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena dle ČSN EN 12390-3 [2] na krychlích o velikosti hrany 100 mm. Pro každou recepturu bylo stanoveno šest hodnot, které byly zprůměrovány.

Výsledky jsou uvedeny v tab. 5 a na obr. 3. Referenční záměs dosáhla hodnoty 105,9 MPa. V případě mikrosiliky měla pevnost v tlaku se vzrůstající náhradou cementu klesající tendenci, naměřené hodnoty však byly velmi blízké hodnotě pro referenční záměs. Pokles pevností mohl být opět způsoben vyšším obsahem vzduchu v betonu při nezvykle vysokých náhradách cementu mikrosilikou, obsah vzduchu však nebyl měřen.

Při náhradě popílkem byl zaznamenán nárůst pevností nad hodnotu referenční záměsi až na 125,3 MPa v případě receptury POP30. Náhrada metakaolinem do 20 % pevnost v tlaku téměř neovlivnila, při 30% náhradě byl pozorován pokles oproti referenčnímu betonu. Pevnosti v tlaku dosažené pro zkoumané receptury, které byly bez drátků, dosahovaly přibližně 100 až 120 MPa. V případě, že by se do stejných receptur přidaly drátky, pevnosti by přesahovaly 150 MPa a jednalo by se o UHPC. Toto konstatování samozřejmě nelze považovat za obecně platné, pro zkoumání betony však vyplývá ze srovnání pevnosti výchozí receptury s drátky INIT (154 MPa) s obdobnou recepturou bez drátků MIC20 (101,3 MPa). Potvrzují jej také výsledky jiných výzkumných prací. Příkladem mohou být články Tafrouiho a kol. [20] (viz kapitola o souvisejících výzkumných pracích), Wu a kol. [21] (dosaženo 98 MPa bez drátků, 144 MPa pro identickou recepturu s 2 obj. % drátků) nebo Hassana a kol. [12] (dosaženo 121 MPa bez drátků a 151 MPa s 2 obj. % drátků). Naproti tomu jiné práce docházejí k menším rozdílům, viz např. Fehling a kol. [10] (dosaženo 182 MPa s 2 obj. % drátků, 165 MPa bez drátků).

### Pevnosti v tahu

Pro všechny receptury byla stanovena pevnost v tahu za ohybu čtyřbodovou zkouškou dle ČSN EN 12390-5 [3] na trámčích o rozměrech 100 x 100 x 400 mm a pevnost v příčném tahu dle ČSN EN 12390-6 [4] na krychlích o hraně 100 mm. Při obou zkouškách byly stanoveny tři hodnoty pro každou recepturu, které byly zprůměrovány.

Výsledky jsou uvedeny v tab. 5 a na obr. 4. Tahové pevnosti získané z obou zkoušek jsou pro většínu receptur (s výjimkou REF, MIC20 a MET20) obdobné, rozdíl průměrných hodnot nepřesahují velikost směrodatné odchylky měření. Lze konstatovat, že náhrada části cementu mikrosilikou či metakaolinem vedla celkově k snížení tahových pevností oproti referenční receptuře, v případě popílků byly hodnoty přibližně stejné jako u referenční receptury. V případě popílků pevnost se vzrůstajícím podílem náhrady mírně rostla, u zbylých příměsí nelze vysledovat jasné tendence.

### Modul pružnosti

Stanoven byl jednak dynamický modul pružnosti ultrazvukovou impulzovou metodou dle ČSN 73 1371 [7], jednak statický modul pružnosti dle ČSN ISO 1920-10 [8]. Pro obě zkoušky byly použity válce průměru 100 mm a výšky 200 mm. Při obou zkouškách byly stanoveny tři hodnoty pro každou recepturu, které byly zprůměrovány.

Výsledky jsou uvedeny v tab. 5 a na obr. 5. Poměr statického ku dynamickému modulu pružnosti byl pro všechny receptury v rozmezí 0,8 až 0,9, výjimkou byla referenční receptura, kde poměr dosáhl hodnoty 0,95. V případě statického modulu došlo u všech receptur s příměsí k poklesu oproti referenční receptuře. V případě dynamického modulu byl u metakaolinu zaznamenán pokles, receptury s mikrosilikou a popílkem dosáhly hodnot v zásadě shodných s referenčním betonem. U mikrosiliky a popílků moduly při nárůstu náhrady cementu příměsí mírně stoupaly, u metakaolinu zůstaly prakticky beze změn.

### Hloubka průsaku tlakovou vodou

Zkouška byla provedena podle ČSN EN 12390-8 [6], a to pro každou recepturu na trojici krychlí o hraně 100 mm. Výsledné hodnoty představují průměry z jednotlivých měření. U některých receptur byl zaznamenán poměrně velký rozptyl naměřených hodnot.

Výsledky jsou uvedeny v tab. 5 a na obr. 6. U všech směsí s příměsí došlo k redukci hloubky průsaku tlakové vody ve srovnání s referenční recepturou, byť v případě MIC30 zanedbatelnému s ohledem na velikost směrodatné odchylky. V případě mikrosiliky a metakaolinu hloubka průsaku stoupala se stoupajícím podílem příměsí. Jako nejefektivnější z hlediska redukce průsaku se ukázal popílek, v jehož případě hloubka průsaku s rostoucí dávkou příměsí výrazně klesala.

### ZÁVĚR

U sledovaných receptur bylo celkově dosaženo nejlepších výsledků při náhradě cementu popílkem, který zlepšil pevnost v tlaku (až o 18 % oproti referenčnímu betonu), v tahu za ohybu (až o 16 %) a zejména přinesl výrazné zvýšení odolnosti proti průniku tlakové vody (až o 95 %). Jeho přínos navíc rostl s rostoucí dávkou příměsí.

K nejvýraznějšímu negativnímu ovlivnění vlastností došlo v případě hodnot pevnosti v příčném tahu u směsí s mikrosilikou, kde pokles dosáhl až 40 % oproti referenčnímu betonu. Tento výsledek však nebyl plně potvrzen měřeními pevností v tahu za ohybu, kde pokles dosáhl pouze 16 %. Při náhradě metakaolinem pak klesl statický modul pružnosti až o 24 %, což ovšem opět nebylo potvrzeno měřeními dynamického modulu, kde pokles činil pouze 11 %.

Oproti výsledkům běžně dosahovaným v literatuře je poměrně překvapující, že nedošlo ke zlepšení mechanických vlastností u směsí obsahujících mikrosilikou. To by mohlo být zejména při vyšší procentuální náhradě způsobeno vyšším obsahem vzduchu v betonu. Tato charakteristika však nebyla měřena a hypotézu tedy nelze potvrdit ani vyvrátit.

V součtu lze konstatovat, že při náhradě cementu latentně hydraulickými příměsími do 30 % hmotnosti cementu vesměs nedošlo k zásadnímu ovlivnění sledovaných vlastností betonu s výjimkou odolnosti proti průniku tlakové vody, která byla ve všech případech kromě jednoho (receptura MIC30) nejméně o 40 % zlepšena.

Článek byl připraven za podpory grantu GAČR č. 17-19463S „Analýza závislosti mezi mikrostrukturou a makroskopickými vlastnostmi ultravysokohodnotných betonů“.

Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Katedra betonových a zděných konstrukcí  
josef.fladr@fsv.cvut.cz



Ing. Petr Bílý, Ph.D.

Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Katedra betonových a zděných konstrukcí  
petr.bily@fsv.cvut.cz



Ing. Vladimír Hrbek

Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Katedra mechaniky  
vladimir.hrbek@fsv.cvut.cz



doc. Ing. Lukáš Vráblik, Ph.D.

Fakulta stavební ČVUT v Praze  
Katedra betonových a zděných konstrukcí  
a Novák & Partner, s. r. o.  
lukas.vrablik@fsv.cvut.cz



Text článku byl posouzen odborným lektorem

The text was reviewed.

## Literatura:

- [1] ČSN EN 206+A1. *Beton – specifikace, vlastnosti, výroba, shoda*. Praha: ÚNMZ, 2018.
- [2] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [3] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [4] ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: ÚNMZ, 2010.
- [5] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [6] ČSN EN 12390-8. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha: ÚNMZ, 2009.
- [7] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: ÚNMZ, 2011.
- [8] ČSN ISO 1920-10. *Zkoušení betonu - Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: ÚNMZ, 2016.
- [9] AÍTCIN, P.-C. *Vysokohodnotný beton*. Praha: IC ČKAIT, 2005.
- [10] FEHLING, E., KUSUMAWARDANINGSIH, Y., ISMAIL, M. UHPC compressive strength test specimens: Cylinder or cube? *Procedia Engineering*. 2015, No. 125, p. 1076–1080.
- [11] FLÁDR, J., VODIČKA, J., KOHOUTKOVÁ, A., BROUKALOVÁ, I. *Drátkobeton ultravysokých pevností*. Patent CZ 304478. Praha, 2014.
- [12] HASSAN, A. M. T., JONES, S. W., MAHMUD, G. H. Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*. 2012, No. 37, p. 874–882.
- [13] HELA, R. Příměsí do betonu. *Beton TKS*. 2015, roč. 15, č. 2, s. 4–10.
- [14] CHYLÍK, R., ŠEPS, K. Influence of cement replacement by admixture on mechanical properties of concrete. In: *Proceedings of the 12th fib PhD Symposium in Civil Engineering*. Praha, 2018. p. 1267–1274.
- [15] LOTHENBACH, B., SCRIVENER, K., HOOTON, R. D. Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*. 2011, No. 41, p. 1244–1256.
- [16] MEGAT JOHARI, M. A., BROOKS, J. J., KABIR, S., RIVARD, P. Influence of supplementary cementitious materials on engineering properties of high strength concrete. *Construction and Building Materials*. 2011, No. 25, p. 2639–2648.
- [17] MUHD NORHASRI, M. S., HAMIDAH, M. S., MOHD FADZIL, A., MEGAWATI, O. Inclusion of nano metakaolin as additive in ultra high performance concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*. 2016, No. 127, p. 167–175.
- [18] POON, C. S., LAM, L., WONG, Y. L. A study on high strength concrete prepared with large volumes of low calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*. 2000, No. 30, p. 447–455.
- [19] SHI, H., XU, B., ZHOU, X. Influence of mineral admixtures on compressive strength, gas permeability and carbonation of high performance concrete. *Construction and Building Materials*. 2009, No. 23, p. 1980–1985.
- [20] TAFRAOUI, A., ESCADEILLAS, G., LEBAILI, S., VIDAL, T. Metakaolin in the formulation of UHPC. *Construction and Building Materials*. 2009, No. 23, p. 669–674.
- [21] WU, Z., SHI, C., HE, W., WANG, D. Static and dynamic compressive properties of ultra-high performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements. *Cement and Concrete Composites*. 2017, No. 79, p. 148–157.
- [22] ZHANG, J., ZHAO, Y., LI, H. Experimental Investigation and Prediction of Compressive Strength of Ultra-High Performance Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials. *Advances in Materials Science and Engineering*. Vol. 2017. Article ID 4563164.
- [23] *CEM I 42,5 R Portlandský cement EN 197-1* [online]. Technický list. Českomoravský cement, a. s. – Závod Mokrá. 2017. Dostupný z: [https://www.heidelbergcement.cz/system/files\\_force/assets/document/tlportlandskycementcemi425rmokra.pdf?download=1](https://www.heidelbergcement.cz/system/files_force/assets/document/tlportlandskycementcemi425rmokra.pdf?download=1)
- [24] *Mefisto L05* [online]. Technický list. ČLUZ, a. s. Dostupný z: <http://www.cluz.cz/cz/mefisto-l05>
- [25] ELFMARKOVÁ, V. *Vliv jemnozrných příměsí na charakter pórového systému betonu*. Brno, 2012. Diplomová práce. VUT v Brně.



# TEKLA STRUCTURES

## nejmodernější BIM řešení pro prefabrikované konstrukce



## Poznejte tu pravou sílu BIM projektování



Program Tekla Structures je nejmodernějším řešením ocelových, železobetonových, dřevěných

a hliníkových konstrukcí všech typů. Tekla nabízí propojení se statickými programy, automaticky generovanou výrobní dokumentací, výkazy materiálu, otevřenost jiným softwarům, referenční modely a podporu řady formátů.

Kontaktujte nás pro více informací a testování zdarma na: [info@construsoft.cz](mailto:info@construsoft.cz) nebo na tel.: +420 581 702 457.

[www.construsoft.cz](http://www.construsoft.cz)