

# ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI ŽULOVÉHO PRACHU A JEHO VLIV NA PEVNOST BETONU

Luboš Musil, \*

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.  
lubos.musil@fsv.cvut.cz

## ABSTRAKT

Článek řeší využití odpadní suroviny vzniklé při řezání a leštění žulových bloků. Jednou z možností je využití jako náhrada cementu při výrobě betonových kompozitů. Nejprve byly zjištěny základní charakteristiky této příměsi. Výchozí experimenty byly zaměřeny především na velikost a tvar dílčích zm. Důležitou součástí zkoušek byla i chemická analýza rentgenovou spektroskopií.

Dále byl zkoumán vliv příměsi na zatvrdlý beton. Byly zkoušeny pevnosti v tahu za ohybu a tlaku po 3, 28 dnech od betonáže. Pro zhotovení zkušebních těles a následné vyhodnocení byly použity normové postupy pro stanovení indexu účinnosti popílku, křemičitého úletu. Z provedených zkoušek vyplývá použití příměsi jako vhodné alternativy cementu. Další výhodou této druhotné suroviny je ekonomický i ekologický přínos.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Odpadní surovina • Mikroplnivo • Index účinnosti • Pevnost betonu • Příměs

## ABSTRACT

The paper deals with the use of waste material created by the granite block cutting and polishing process. A substitution of cement in concrete composite production is one possibility. The basic characteristics of the addition were found. The initial experiments were focused mainly on the size and shape of the partial grains. An X-ray spectrometer chemical analysis was an important part of the tests.

The influence of the addition on hardened concrete was investigated. Tensile bending and compressive strengths were tested 3, 28 days after concreting. For the production of test specimens and the subsequent evaluation, standard procedures were used to determine efficiency index of fly ash, quartz. The use of the addition as a suitable cement alternative was shown by testing. Economic and ecological benefits are another advantage of this secondary raw material.

## KEYWORDS

Waste raw material • Microfiller • Efficiency index • Concrete Strength • Addition

## 1. ÚVOD

V současnosti je z environmentálních důvodů a udržitelného rozvoje kladen důraz na úsporu nerostných surovin. Jednou z možností u betonových konstrukcí je přidání odpadních nebo recyklovaných surovin do navrhované směsi. V dnešní době je věnována pozornost především alternativním náhradám cementu. Tyto příměsi neslouží pouze jako plnivo, ale zlepšují vlastnosti čerstvého i zatvrdlého betonu. Složky jsou vyráběny převážně z odpadních materiálů. Dnes je jako náhradní surovina nejvíce používán popílek, struska, mikrosilika, mikromleté moučky (vápencové, mramorové). Jednou z málo prozkoumaných možností je aplikace prachu, vzniklého při řezání a leštění žulových bloků, jako latentně hydraulické příměsi. Kamenné kvádry jsou opracovávány pod vodou ve výrobních halách. Voda je z ekologických i ekonomických důvodů filtrována a znovu použita při výrobním procesu. Při tomto koloběhu je sbírán kal tvořený vodou a prachovými částicemi ze žuly (fíleru). Podstatný rozdíl takto vzniklého materiálu je minimální úprava. Například oproti mikromletým moučkám, které jsou vyráběny za náročného mechanického mletí, stačí tento kal pouze usušit a přesát. Dalším rozdílem například vůči obdobně vzniklým mramorovým filerům, které už byly podrobně zkoumány, je chemické složení. To má podstatný vliv na průběh chemické reakce a konečné vlastnosti betonu.



Obrázek 1: Výrobní hala na zpracování kamene.

\* Školitel: doc. Ing. Jan Vodička, CSc.

### 1.1. Množství vznílého kalu a jeho dosavadní využití

Největší množství kalu vzniká při řezání kamenných bloků (katr s diamantovým lanem, diamantovým kotoučem - viz. Obrázek 1), ale velikost odpadních částic je větší. Naopak menší zrna odpadu vznikají při leštění, kterých je však méně. Celkové množství vyprodukovaného kalu je přibližně 1 m<sup>3</sup> za pracovní den (ve společnosti, kde jsou odebírány vzorky). Veškerý kal je vyvážen ven na hromady (viz Obrázek 2). Proschnutý kal, v tomto stádiu již vlhký prach, není následně nijak používán a slouží pouze jako zavážka.



Obrázek 2: Proschnutý kal.

## 2. POPIS EXPERIMENTŮ

### 2.1. Odběr a příprava vzorku

Pro zkoušky byly odebrány reprezentativní vzorky jak z navezených hromad v areálu, tak z pytlů přímo u filtrace. Vlhkost odebraného materiálu na skládce závisí na počasí a délce vysychání (doby vyvezení). Dle vzorce (1) měly vzorky vlhkost od 7,8 % do 32,1 % v závislosti na místě odebrání. Předcházejících 5 dní před odebráním bylo bez deště, teplota přes den 10-15°C, zataženo. Vzorky odebrané u filtrace byly plně saturované.

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2} * 100 \quad (1)$$

m<sub>1</sub> - hmotnost odebraného vzorku

m<sub>2</sub> - hmotnost odebraného vzorku po vysušení

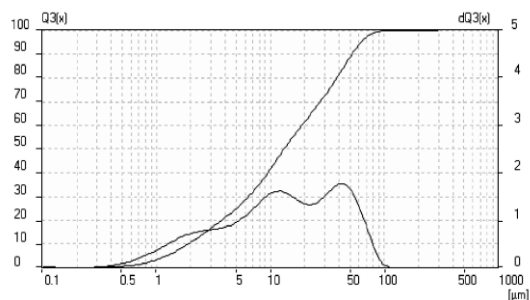
Vysušení vzorků proběhlo v peci při teplotě 105 °C po dobu 72 hodin. Výsledný filer obsahoval jemný prach s hrudkami. Hrudky byly lehce rozmělnitelné a nemuselo proběhnout žádné náročné (např. vysokorychlostní) mletí. Vysušený filer byl proset přes síto s velikostí ok 0,125 mm. Zbylé hrudky na sítu byly ještě jednou rozmělněny a znovu prosety. Následně na sítu zůstaly pouze větší zrna kameniva, která vznikla odšipnutím materiálu například neopatrným zacházením nebo při posledním dořezu. Protože jsou veškeré bloky při řezání položeny na dřevěném stole nebo trámečcích, zbyly na sítu ještě malé chomáčky dřevěných vláken (viz Obrázek 3). U takto připravených vzorků proběhly zkoušky základních charakteristik kameniva (viz. následující odstavec).



Obrázek 3: Zbytky na sítu.

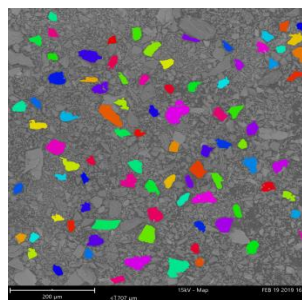
### 2.2. Granulometrie

První zkouškou bylo zjištění objemové hmotnosti vzorků pomocí pyknometru. Vypočtené hodnoty byly přibližně všechny stejné. Aritmetický průměr objemové hmotnosti reprezentativních vzorků byl 2555 kg/m<sup>3</sup>. V následující zkoušce proběhlo měření a výpočet měrného povrchu pomocí Blainova přístroje. Průměrná hodnota 437 m<sup>2</sup>/kg je vyšší než u použitého cementu. Další důležitou charakteristikou, která byla určena, je křivka zrnitosti (viz Obrázek 4). Součástí obrázku je i frekvenční křivka. Měření proběhlo pomocí laserové difrakce na VŠCHT. Rozsah měření velikosti částic byl 0,01 - 2000 μm.



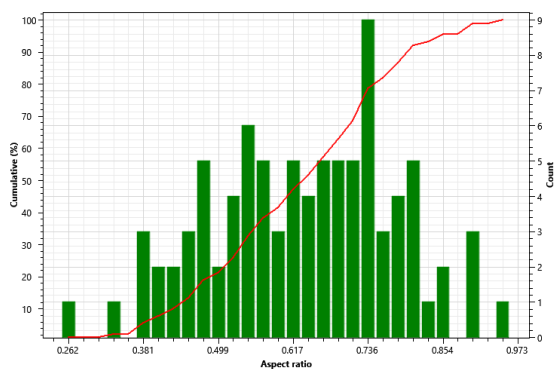
Obrázek 4: Křivka zrnitosti příměsi.

Součástí charakteristiky příměsi je rovněž tvar zrn. Ten má vliv nejen na vlastnosti zatvrdlého betonu, ale především na zpracovatelnost. Jelikož je rozptyl velikostí dílčích zrn poměrně veliký, byla tato zkouška provedena na několika vzorcích dle mikroskopického přiblížení a velikosti zrn. Dva vzorky byly měřeny s větší velikostí zrn a jeden s menší velikostí zrn. Jednotlivé vlastnosti tvaru zrn byly získány graficky pomocí softwaru (viz Obrázek 5).

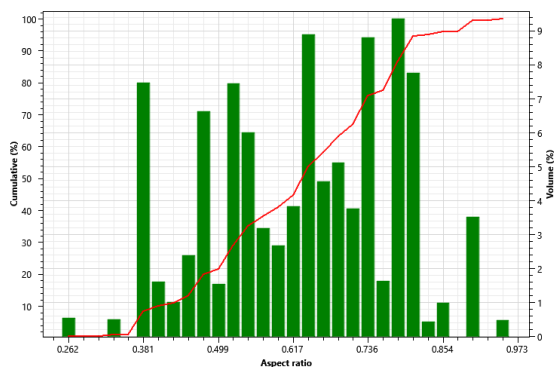


Obrázek 5: Grafický výstup měřených zrn.

Důležitým upozorněním je, že naměřené hodnoty v následujících tabulkách článku jsou určeny pro objemově vážené rozdělení. To je podstatné například pro porovnání s ostatními články, jelikož rozdělení může být i podle počtu kusů nebo hmotnosti. V takovém případě se mohou výstupy pro jednotlivé rozdělení výrazně lišit. Názorný příklad je uveden v obrázku 6 a 7. Zelenými sloupci je naznačena četnost (frekvenční křivka) a červenou barvou je znázorněna distribuční křivka.



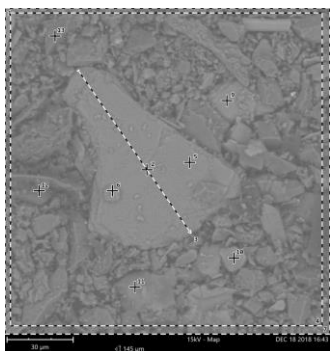
Obrázek 6: Poměr stran - rozdělení dle počtu.



Obrázek 7: Poměr stran - rozdělení dle objemu.

### 2.3. Chemická analýza

Měření proběhlo elektronovým mikroskopem. Bylo zkoušeno více vzorků a bylo třeba zaměřit větší množství menších zrn. V případě většího zrna byla analýza zkrácena. Dále byly změřeny jednotlivé body nebo linie (viz. Obrázek 8).



Obrázek 8: Chemická analýza.

Oblast pro plošné určení chemického složení byla čtvercová o délce hrany 639 - 815 μm. Obecně žulové horniny obsahují velké množství křemene (SiO<sub>2</sub>), což potvrdila i analýza.

### 2.4. Pevnostní charakteristiky

Pro návrh byly použity normové postupy pro index účinnosti křemičitého úletu (ČSN EN 13263-1+A1: Křemičitý úlet do betonu - část 1) a popílku (ČSN EN 450-1+A1 (722064) Popílek do betonu - Část 1). Dle norem byly navrženy 3 maltové směsi s normovým křemičitým pískem pro zkoušky pevnosti cementů. V prvním případě byl navržen referenční vzorek pouze s pískem a cementem. V druhém případě byl návrh směsi dle normy pro křemičité úlety a bylo nahrazeno 10% hmotnosti cementu zkoumanou příměsí. Poslední směs byla navržena dle postupu pro stanovené indexu účinnosti pro popílky a hmotnostní náhrada cementu byla 25%. Pro zkoušky pevnosti v tahu za ohybu byly použity trámečky o rozměru 40 x 40 x 160 mm. Experiment byl řešen čtyřbodovým ohybem. Pevnost v tlaku byla zkoušena na zlomených trámečcích se zatěžovací plochou lisu 40 x 40 mm. Zkoušky probíhaly po 3 a 28 dnech od betonáže. V tabulce 1 je vidět, že poslední vzorek měl nižší objemovou hmotnost. Bylo to dáno větším množstvím pórů, které byly především po obvodě zkušební trámečku.

Tabulka 1: Charakteristika trámečků při zkouškách pevnosti po 3 dnech.

Vzorek (množství cementu)	Rozměry tělesa			Hmotnost tělesa g	Objem. hmotnost kg/m <sup>3</sup>
	Délka mm	Šířka mm	Výška mm		
100%	40,12	40,03	159,21	569,97	2229,08
90%	40,50	40,06	159,96	589,05	2269,33
75%	40,45	40,11	161,46	548,63	2094,23

### 3. VÝSLEDKY

Po odběru a úpravě vzorku byla změřena objemová hmotnost (2555 kg/m<sup>3</sup>) a následně proběhla zkouška měrného povrchu. Zjištěné průměrné hodnoty (437 m<sup>2</sup>/kg) jsou vyšší než u použitého cementu CEM I 42,5 R (408 m<sup>2</sup>/kg). U vzorku odebraného s pravděpodobnou sedimentací, který nebyl zařazen do průměrovaných hodnot, vyšel měrný povrch 535 m<sup>2</sup>/kg.

Důležitou zkouškou bylo rovněž určení křivky zrnitosti (viz. Obrázek 4). Kromě grafického zobrazení bylo v tabulce 2 vyzdvíženo několik základních hodnot celkového propadu. Součástí granulometrické zkoušky bylo i statistické vyhodnocení (viz. Tabulka 3). Zajímavý je například medián 13,2 μm nebo aritmetický průměr zrna 20,9 μm. Vhodné porovnání je třeba s průměrnou velikostí zrna (34 μm) použitého cementu CEM 42,5 R - Mokrý.

\* Školitel: doc. Ing. Jan Vodička, CSc.

Tabulka 2: Vybrané celkové propady příměsí.

	1%	5%	25%	50%	75%	95%	98%
	0,608	1,229	5,002	13,202	23,832	62,317	73,528 $\mu\text{m}$

Tabulka 3: Statistické údaje velikosti zrn příměsí.

Statistický údaj	Hodnota
Aritmetický průměr	20,945 $\mu\text{m}$
Rozptyl	411,884 $\mu\text{m}^2$
Směrodatná odchylka	20,295 $\mu\text{m}$
Průměrná odchylka	16,419 $\mu\text{m}$
Modus	36,038 $\mu\text{m}$
Medián	13,202 $\mu\text{m}$

Jak již bylo zmíněno, podstatný vliv na čerstvý i zatvrdlý beton má tvar částic příměsí. Materiály s jemnějšími zrny, které se přibližují kulovitému tvaru (popílký) mají lepší reologické chování. Měření proběhlo na více vzorcích s rozdílnou velikostí (viz Tabulka 4). Z daných údajů vyplývá, že poměr stran je přibližně stejný jak u malých, tak u velkých částic. Průměrná hodnota je přibližně 0,62. Naopak z naměřených výsledků u kruhovitosti platí, že s klesající velikostí zrna klesá i kruhovitosť. Kruhovitost může nabývat hodnot od 0 do 1, přičemž dokonalý kruhový tvar bude mít hodnota 1 a dlouhé, protáhlé tvary budou mít hodnoty blízké 0.

Tabulka 4: Vlastnosti tvaru zrn.

Vzorek	1	2	3	Průměr	
Počet měřených zrn	73	89	58	<b>73</b>	ks
Ekvivalentní kruhový průměr	38,0	33,1	12,9	<b>28,0</b>	$\mu\text{m}$
Aspectratio - poměr stran	0,595	0,642	0,631	<b>0,623</b>	[-]
Kruhovitost	0,703	0,638	0,582	<b>0,641</b>	[-]

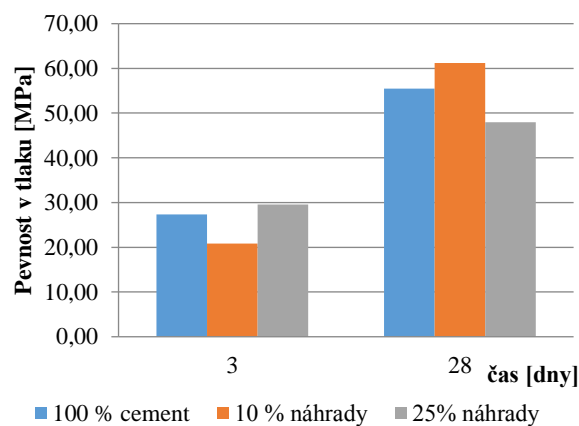
Chemické složení materiálu bylo měřeno především plošně. Výsledná tabulka (5) průměrných hodnot potvrzuje velké množství oxidu křemíku - nadpoloviční většinu. V tabulce bylo procentuálně popsáno zastoupení jednotlivých prvků v materiálu (sloupce 1-3) a jejich oxidů (sloupce 4-5). Dále byly zkoumány samostatné body (zaměřené na jednotlivá zrna), z nichž některé byly tvořeny téměř čistým křemíkem. V ostatních případech byla zrna složena také z hořčíku, draslíku, hliníku, železa. Vždy však byl nejvíce zastoupen křemík. Obdobné hodnoty vyšly i pro liniové měření, které bylo prováděno skrz celá jednotlivá zrna.

Poslední zkouška příměsí proběhla přímo na maltových trámečcích. Pevnost v tahu za ohybu po třech dnech od betonáže vycházela nejlépe u první směsi, tvořené pouze

pískem a cementem. S rostoucí náhradou cementu byly pevnosti menší. Naopak pevnost v tlaku po třech dnech byla nejvyšší u směsi s 25% náhradou cementu, ačkoliv obsahoval póry a objemová hmotnost byla nižší než u ostatních vzorků. Podrobné výsledky včetně procentuálního vyčíslení jsou v tabulce 6. Při zkouškách po 28 dnech byly nejvyšší průměrné hodnoty v tahu za ohybu i tlaku naměřeny u směsi s 10% náhradou cementu. Vyšší pevnosti v tlaku byly zřejmě zapříčiněny lepším vyplněním cementového tmelu příměsí a hutnější strukturou (viz. Obrázek 9, Tabulka 7).

Tabulka 5: Chemické složení příměsí [%].

Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wtConc.
O	65,91	52,62		
Si	17,65	24,73	Si	52,26
Al	5,06	6,81	Al	14,37
K	2,04	3,97	K	8,37
Fe	1,23	3,42	Fe	7,19
Mg	1,87	2,26	Mg	4,76
Na	1,54	1,76	Na	3,73
N	2,46	1,71	N	3,60
F	1,51	1,66	F	3,47
Ca	0,68	0,96	Ca	2,03
P	0,06	0,10	P	0,21



Obrázek 9: Pevnost v tlaku.

Tabulka 6: Pevnosti betonu po 3 dnech od betonáže.

Vzorek	Tah za ohybu průměrná pevnost		Tlak průměrná pevnost	
	MPa	%	MPa	%
100% cementu	5,46	100,00	27,37	100,00
90% cementu	4,96	90,87	20,86	76,20
75% cementu	4,70	86,06	29,54	107,94

\* Školitel: doc. Ing. Jan Vodička, CSc.

Tabulka 7: Pevnosti betonu po 28 dnech od betonáže.

Vzorek	Tah za ohybu		Tlak	
	průměrná pevnost		průměrná pevnost	
	MPa	%	MPa	%
100 % cementu	5,09	100,00	55,50	100,00
90% cementu	5,53	108,70	61,19	110,26
75% cementu	4,71	92,43	47,96	86,43

#### 4. VYHODNOCENÍ

V příspěvku byly popsány vlastnosti odpadní suroviny, která dosud není využívána. Obdobným materiálem je například mramorový odpad, který je produkován především ve východních zemích, kde je mramor rovněž těžen a zpracováván. Tento odpad byl již několikrát zkoumán. V suchých zemích, kde je těžen mramor, velice šetří s vodou a vzniklý kal lisují. Z těchto důvodů musí být mramorová moučka často náročně upravována kupříkladu vysokorychlostním mletím. Výhodou zkoumané odpadní suroviny, například vůči jemně mletým moučkám, je minimální úprava tvořená pouze sušením a prosátím.

Další důležitou vlastností příměsi je její měrný povrch, který je větší než u použitého cementu. Rovněž velikost zrn, která jsou relativně malá, naznačuje vhodné použití do betonové směsi. Vzniká tak hutnější struktura a lepší vyplnění betonových kompozitů. Dalším podstatným rozdílem vůči mramorovým a vápencovým moučkám je chemické složení. Přes polovinu odpadního materiálu je tvořeno oxidem křemíku. To může mít kladný vliv na pevnosti betonu, které dle zkoušek pro stanovení indexu účinnosti vycházejí pozitivně. Je tak nepřímou metodou určena možná pucolánová aktivita tohoto materiálu. Dle některých studií nezávisí reaktivita křemíku pouze na struktuře (amorfní křemík), ale i na velikosti zrn a měrném povrchu materiálu.

#### 5. ZÁVĚR

V článku byl charakterizován odpadní materiál (příměs) vznikající při opracování žuly a jeho následné využití do betonových kompozitů. Hlavní výhodou této suroviny je minimální úprava. Granulometrické vlastnosti (měrný povrch, velikost zrn) ukazují na vhodné použití do betonových směsí. Nevýhodou je tvar zrn, který má podstatný vliv na zpracovatelnost, mezerovitost, atd. Poměr stran (0,623) a kruhovitost (0,641) naznačují, že zrna jsou nepravidelná, spíše protáhlá. Dále byla určena chemická analýza, kde je přes 50 % odpadní suroviny tvořeno oxidy křemíku. V amorfní struktuře je často přidáván do betonů a vykazuje pucolánové vlastnosti. Dle výsledků pevnosti betonu a indexu účinnosti má pozitivní vliv i jemně mletý prach (krystalický křemík). Ačkoliv dle některých výzkumů vykazuje pucolánovou aktivitu i krystalický křemík, vyšší pevnosti betonových vzorků jsou zde způsobeny spíše větším měrným povrchem příměsi a menší

velikostí zrn než u cementu. To vede k lepšímu vyplnění struktury a zároveň tak ke zlepšení vlastností betonu. Velký vliv na pevnosti výsledných kompozitů má také technologie a postup výroby. V některých případech může mít vliv na pevnosti až o desítky procent.

Dle normy pro křemičité úlety je index účinnosti 110,26 %, což splňuje požadavky. Minimální hodnota po 28 dnech je 100%. Zároveň vyhovuje index účinnosti (86,43%) dle normy pro popílky, kde byla splněna minimální hodnota 75% referenční pevnosti v tlaku. Druhotná surovina je dle požadavků vhodnou alternativou části cementu.

Jelikož byly provedeny pouze prvotní výzkumy, je nutné vhodnost odpadního materiálu ještě pověřit. Nejen na vlastnostech zatvrdělého betonu, ale i čerstvého. Případně určit optimální náhradu cementu. Jelikož je materiál z větší části tvořen křemíkem, je nutné prověřit alkalicko-křemičitou reakci.

#### PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl za finanční podpory ČVUT v Praze v rámci projektu SGS18/115/OHK1/2T/11.

#### Reference

- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (2009), *ČSN EN 13263-1+AI (722095) A Křemičitý úlet do betonu. Část 1, Definice, požadavky a kritéria shody = Silica fume for concrete. Part 1, Definition, requirements and conformity criteria*, Praha.
- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (2013), *ČSN EN 450-1 (722064) A Popílek do betonu. Část 1, Definice, specifikace a kritéria shody = Fly ash for concrete. Part 1, Definition, specifications and conformity criteria*, Praha.
- Chylík, R. & Šeps, K. (2018), Influence of cement replacement by admixture on mechanical properties of concrete, in 'Proceedings of the 12th fib International PhD Symposium in Civil Engineering', pp. 1267-1274.
- Plachý, T., Tesárek, P., Hlubocký, L., Hruza, J., Fládr, J., Trejbal & J., Prošek, Z. (2017), Effect of Microfillers on selected destructive and nondestructive mechanical properties of cement mortars: Different types of recycled materials, in 'Key Engineering Materials', Vol. 722, pp. 195200.
- Benezet, J.C. & Benhassaine, A. (1999), Grinding and pozzolanic reactivity of quartz powders, in 'Powder Technology', Vol. 105, pp. 167-171.
- Hrbek, V., Prošek, Z., Chylík, R. & Vráblík, L. (2018), Vliv mikrosiliky a popílku z pohledu mikrostruktury amikromechanických vlastností hpc, in 'BETON-technologie, konstrukce, sanace', Vol. 5, pp. 50 - 55.

\* Školitel: doc. Ing. Jan Vodička, CSc.