

**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**  
FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A  
DÍLCŮ**  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS  
AND COMPONENTS

**STUDIUM VLIVU GRANULOMETRIE  
JEMNÝCH ČÁSTIC NA FYZIKÁLNĚ-  
MECHANICKÉ VLASTNOSTI BETONŮ**

INFLUENCE OF FINE PARTICLES GRANULOMETRY ON THE PHYSICO-  
MECHANICAL PROPERTIES OF CONCRETE

**TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE**  
DOCTORAL THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Ing. Pavel Louda

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2019

## Obsah

1. Úvod .....	3
2. Cíl práce .....	3
3. Metodika práce .....	4
3.1 Etapa I – zmapování vlastností vstupních surovin .....	4
3.2 Etapa II – vlastnosti maltových směsí .....	4
3.3 Etapa III – vlastnosti betonů .....	5
3.4 Etapa IV – ověření poznatků v praxi .....	5
4. Výsledky .....	5
4.1 Vlastností vstupních surovin .....	5
4.2 Křivky zrnitosti maltových směsí .....	12
4.3 Fyzikálně – mechanické vlastnosti navržených směsí .....	15
4.4 Optimalizace křivek zrnitostí na betonech .....	21
4.5 Ověření poznatků v praxi .....	24
4.6 Sestavení výpočetního programu k optimalizaci křivek zrnitosti .....	27
5. Závěr .....	29
6. Přínos pro vědní obor a praxi .....	31
7. Seznam použité literatury .....	32
8. Curriculum vitae .....	35
9. Abstrakt .....	37

# 1. Úvod

V dnešní době je stále častěji vyvíjen tlak ze strany investorů na snížení ceny staveb. Tento trend je patrný i pro betonové stavitelství, kde investoři tlačí na co možná nejvyšší snížení ceny jak u prefabrikovaných výrobků, tak i u transportbetonu. Zároveň se však objevují i investoři, kteří chtějí svojí stavbou co možná nejméně zatížit životní prostředí a snížit takzvanou uhlíkovou stopu stavby, popřípadě investoři, kteří od betonů požadují speciální vlastnosti a dlouhou životnost a to i za cenu vyšších pořizovacích nákladů stavby. Uspokojit požadavky všech zmiňovaných typů investorů by bylo s běžným betonem velice obtížné, možná i nemožné.

Z těchto důvodů je beton stále častěji modifikován nejrůznějšími příměsemi, které ovlivňují nejen jeho výsledné vlastnosti, ale i cenu. Výslednou cenu betonu, ale i jeho uhlíkovou stopu, nejvíce ovlivňuje dávka cementu. Cement jako nejdražší surovinu v betonu lze částečně nahradit nejrůznějšími druhy mnohem levnějších příměsí. Z ekologického hlediska je použití těchto surovin také velmi výhodné, protože se většinou jedná o druhotné suroviny, které však mají velmi dobré užitné vlastnosti. Navíc nahrazením části cementu těmito surovinami snižujeme celkové emise CO<sub>2</sub>, které se při výrobě betonu uvolňují (nejvíce CO<sub>2</sub> se uvolňuje při výrobě portlandského cementu – na 1 kg cementu se uvolní 0,75 až 1,0 kg CO<sub>2</sub> v závislosti na podmínkách výroby).

## 2. Cíl práce

Úkolem bylo rešerše a ověření možných způsobů optimalizace křivek zrnitosti betonů v rozmezí 0 – 1000 μm za účelem získání betonů vyšších užitných vlastností a finančních úspor.

V praktické části této práce jsou shrnuty výsledky experimentů, jejichž úkolem bylo:

- zmapovat vlastnosti všech vybraných surovin
- sestavit a optimalizovat křivky zrnitostí v oblasti 0 – 1000 μm pomocí vybraných jemnozrnných materiálů
- ověření fyzikálně mechanických vlastností kompozitů s optimalizovanými křivkami zrnitosti v porovnání s referenčním kompozitem

- přenesení získaných poznatků a využití optimalizovaných křivek zrnitosti při výrobě betonu.

### 3. Metodika práce

Pro tuto práci byly zvoleny komerčně běžně dostupné jemnozrné materiály používané pro výrobu betonů v ČR. Kromě těchto materiálů byla pro doplnění křivek zrnitosti použita nanosilika.

- CEM I 42,5 R - lokalita Mokrý, Českomoravský cement, a.s.
- Popílek – hnědouhelný z elektrárny Tušimice, ČEZ, a.s.
- Mikromletý vápenec – frakce 7V a 9V, Carmeuse Czech republic s.r.o.
- Kamenné odprašky – lokality Želešice a Předklášteří, Kámen Zbraslav, a.s.
- Mikrosilika – Oravské ferozliatinářské závody, a.s.
- Nanosilika – SkySpring Nanomaterials, Inc
- Normový písek odpovídající ČSN EN 196-1
- Komerčně dostupné kamenivo z lokalit Jihomoravského kraje

#### 3.1 Etapa I – zmapování vlastností vstupních surovin

- Stanovení měrné hmotnosti
- Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru
- Stanovení zrnitosti materiálu laserovým granulometrem Malvern Mastersizer 2000
- Mikroskopické stanovení tvaru zrn

#### 3.2 Etapa II – vlastnosti maltových směsí

V druhé části byly se zvolenými příměsemi a cementem míchány maltové směsi se zvolenou náhradou cementu 10 a 25 %. Nejprve byly navržené směsi míchány bez plastifikační přísady, pouze s vyšším přídatkem vody, následně byly všechny směsi míchány s plastifikační přísadou a sníženou dávkou vody. Z těchto maltových směsí byly zhotoveny zkušební tělesa 40 x 40 x 160 mm pro zkoušky pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku dle ČSN EN 196 – 1 po 7, 28 a 90 dnech. V čerstvém stavu byla zkoušena zpracovatelnost pomocí Hägemannova kužele a střešacího stolku dle ČSN EN 1015 – 3. Směs cementu a příměsí byla v suchém stavu odebrána a na tomto vzorku byla stanovena zrnitost pomocí laserové granulometrie. Jako další zkouška k ověření vlivu optimalizace křivky zrnitosti



na hutnost cementového tmele byla na vybraných tělesech provedena zkouška pórovitosti cementového tmele za pomoci rtuťové porozimetrie.

### 3.3 Etapa III – vlastnosti betonů

Ve třetí části byly získané poznatky aplikovány na beton. Laboratorně byly namíchány čtyři záměsi betonu s optimalizovanou křivkou zrnitosti, jejichž vlastnosti byly srovnávány s referenční recepturou. V čerstvém stavu byla zkoušena zpracovatelnost betonu dle ČSN EN 12350 – 2 v čase 5, 30 a 60 minut po namíchání, stanoven obsah vzduchu dle ČSN EN 12350 – 7, stanovena objemová hmotnost čerstvého betonu dle ČSN EN 12350 – 6. Dále byla zhotovena zkušební tělesa pro zkoušky pevností betonu v tlaku dle ČSN EN 12390 - 3 po 3, 7, 28 a 90 dnech.

### 3.4 Etapa IV – ověření poznatků v praxi

Jako zajímavá příležitost k ověření výsledků v praxi se naskytla možnost optimalizace křivek zrnitosti pro samozhutnitelný beton vyráběný v jednom ze závodů společnosti Prefa Brno, a.s. Výběr možných surovin byl však limitován surovinami běžně používanými ve výrobním závodě Strážnice. Optimalizovaný samozhutnitelný beton byl srovnáván s neoptimalizovaným betonem z hlediska pevností betonu v tlaku po 7 a 28 dnech, odolnosti proti působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek, vizuální kvality povrchu a ekonomické výhodnosti zvolené receptury.

## 4. Výsledky

### 4.1 Vlastností vstupních surovin

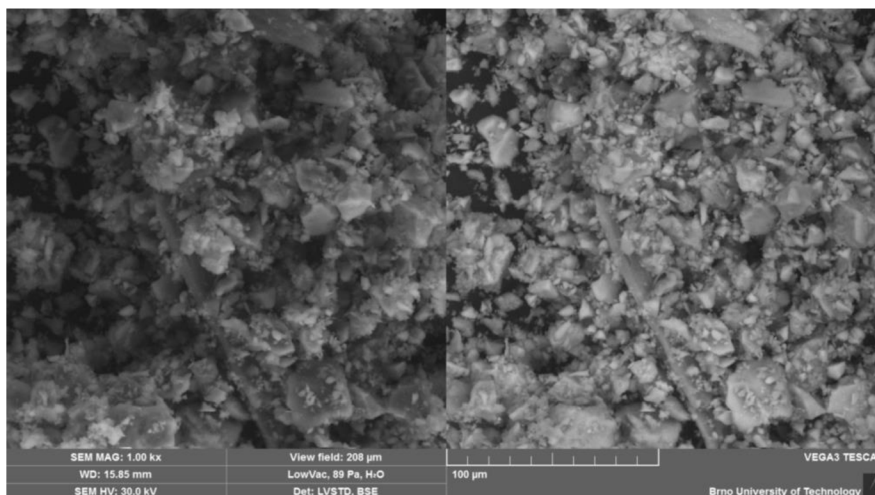
#### Cement CEM I 42,5 R – lokalita Mokrá, Českomoravský cement, a.s.

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	Cl	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	ZŽ
64,2	19,5	4,7	3,2	1,3	3,2	0,047	0,78	0,09	3,2

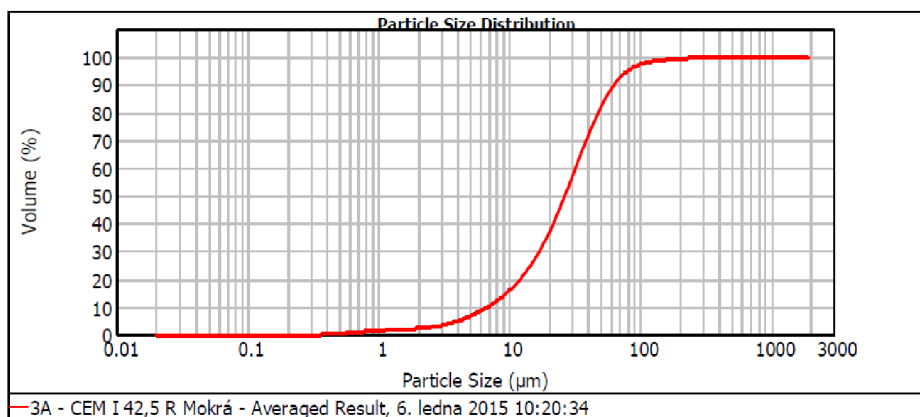
Tab. 1 - Chemické složení cementu v %

Měrný povrch [m <sup>2</sup> /kg]	Měrná hmotnost [kg/m <sup>2</sup> ]	Pevnost v tlaku dle ČSN EN 196 – 1 [MPa]		
		7 d	28 d	90 d
374	3110	53	62	67

Tab. 2 - Mechanické a fyzikální vlastnosti cementu



Obr. 1 - Tvar částic cementu – elektronová mikroskopie. Částice cementu mají výrazně ostrohranný, nepravidelný tvar.



Obr. 2 - Křivka zrnitosti a síťový rozbor cementu. Mírná převahou hrubších částic. Průměr středního zrna  $d(0,5) = 26,407 \mu\text{m}$ .

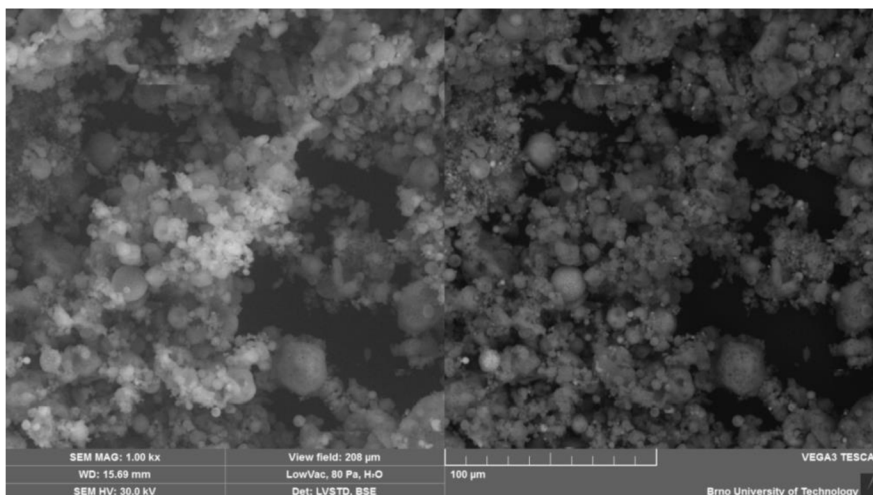
### Popílek – hnědouhelný, elektrárna Tušimice, ČEZ, a.s.

CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
3,42	50,00	23,40	14,50	1,72	0,72	0,10	1,07	0,291

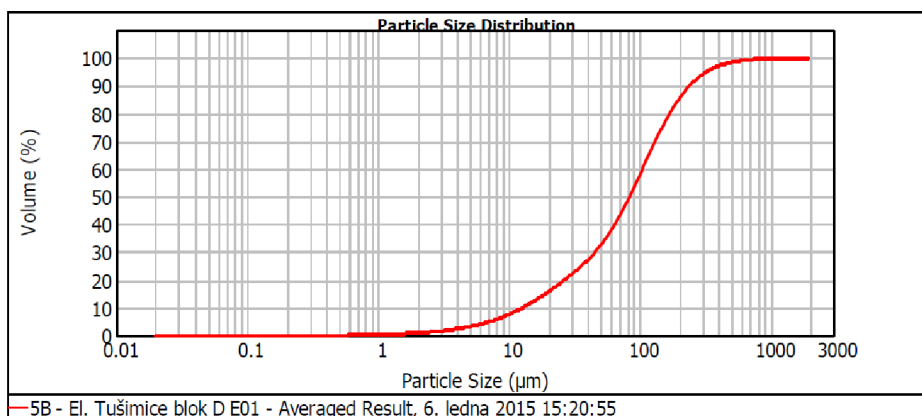
Tab. 3 - Chemické složení popílku v %

	Měrný povrch [m <sup>2</sup> /kg]	Měrná hmotnost [kg/m <sup>2</sup> ]
ETU blok D E01	161	1970
ETU blok D E02	454	2040
ETU blok D E03	730	2120

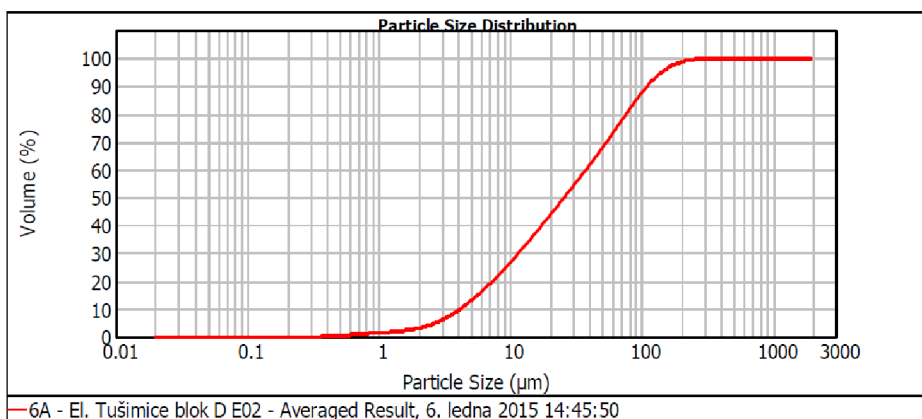
Tab. 4 - Fyzikální vlastnosti popílku z elektrárny Tušimice



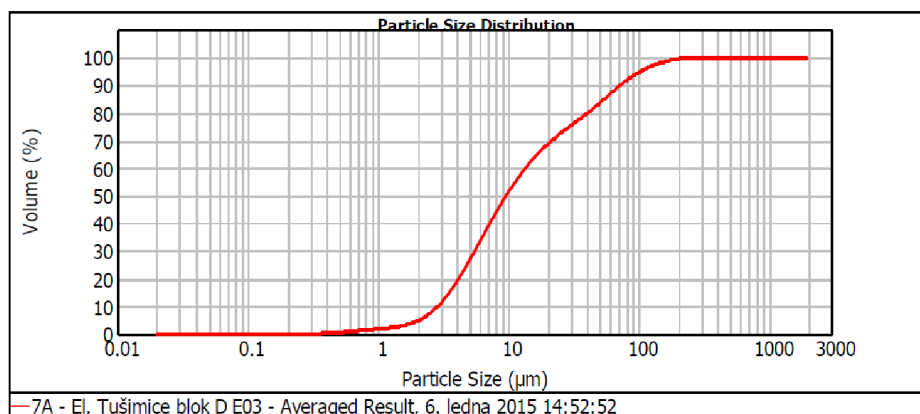
Obr. 3 - Tvar částic popílku – elektronová mikroskopie. Částice popílku mají pravidelný kulový tvar a hladký skelný povrch.



Obr. 4 - Křivka zrnitosti a síťový rozbor – blok D E01. V distribuci částic převažují hrubší zrna, průměr středního zrna  $d(0,5) = 82,312 \mu\text{m}$ .



Obr. 5 - Křivka zrnitosti a síťový rozbor – blok D E02. V distribuci mírně převažují hrubší zrna, průměr středního zrna  $d(0,5) = 25,558 \mu\text{m}$ .



Obr. 6 - Křivka zrnitosti a síťový rozbor – blok D E03. V distribuci částic výrazně převažují hrubší zrna, průměr středního zrna  $d(0,5) = 9,484 \mu\text{m}$ .

### Mikromletý vápenec – lokalita Mokrá, Carmeuse Czech republic, s.r.o.

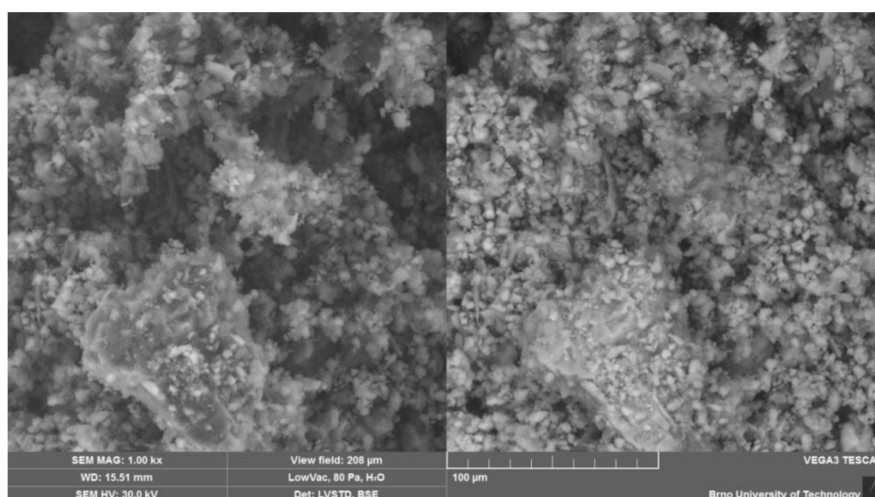
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	MnO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
51,03	4,94	0,90	0,41	1,55	0,08	0,05	0,11	0,07

Tab. 5 - Chemické složení mikromletého vápence v %.

Pozn. Převezato z ELFMARKOVÁ, Veronika. Vliv jemnozrnných příměsí na charakter pórového systému betonu. [28]

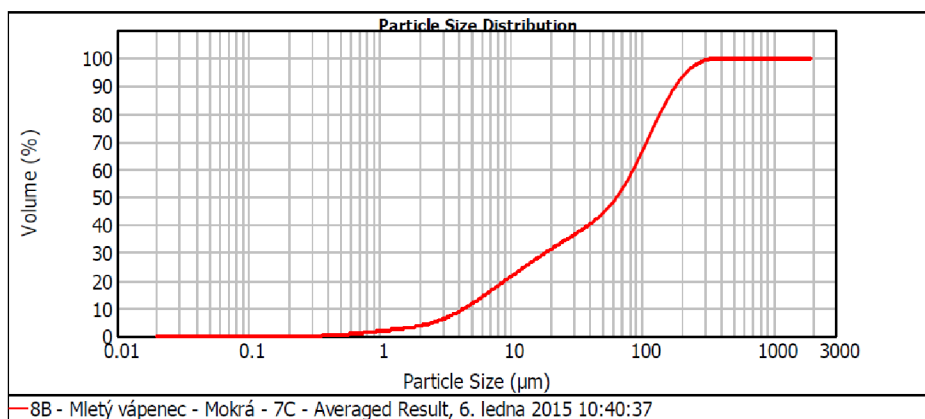
	Měrný povrch [ $\text{m}^2/\text{kg}$ ]	Měrná hmotnost [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
Mletý vápenec 7/V	375	2680
Mletý vápenec 8/V	390	2720
Mletý vápenec 9/V	488	2770

Tab. 6 - Fyzikální vlastnosti vápenců

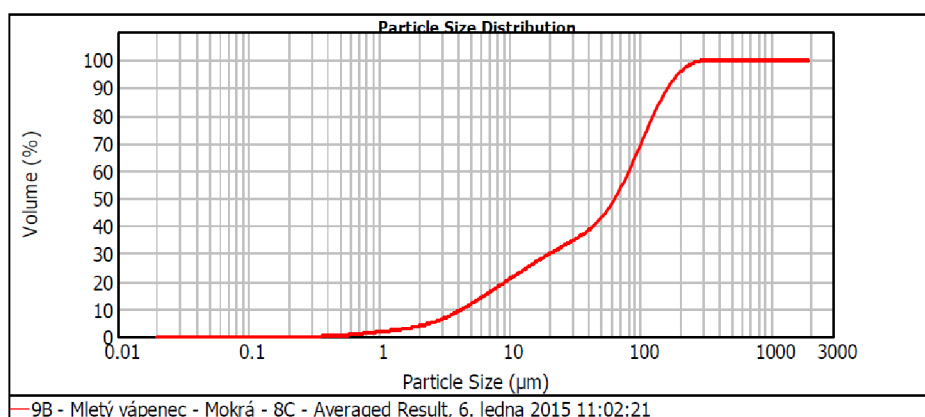


Obr. 7 - Tvar částic vápence – elektronová mikroskopie.

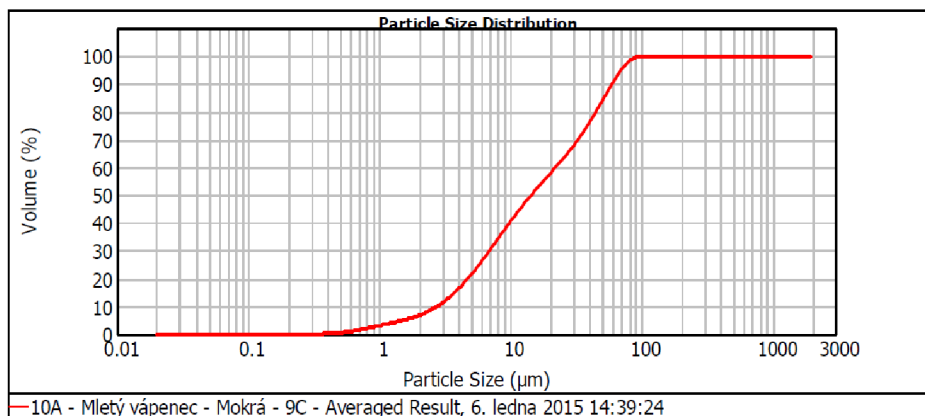
Částice vápence mají hranatý nepravidelný tvar. Hrany nejsou tak výrazně ostré jako je tomu u částic cementu.



Obr. 8 - Křivka zrnitosti a síťový rozbor – druh 7/V. Výrazně převažují hrubší zrna, průměr středního zrna  $d(0,5) = 64,045 \mu\text{m}$ .



Obr. 9 - Křivka zrnitosti a síťový rozbor – druh 8/V. Průměr středního zrna  $d(0,5) = 63,512 \mu\text{m}$ . Distribuce je podobná jako u vápence 7/V.



Obr. 10 - Křivka zrnitosti a síťový rozbor – druh 9/V. Dominuje jemná a hrubá frakce, průměr středního zrna  $d(0,5) = 14,255 \mu\text{m}$ .

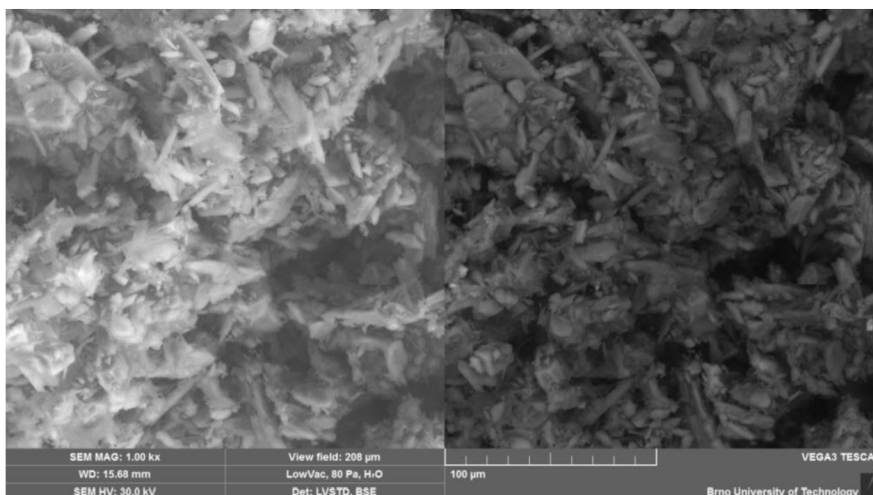
### Kamenné odprašky - lokality Želešice a Předklášteří, Kámen Zbraslav, a.s.

	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	ZŽ
Želešice	9,69	47,25	3,72	10,75	8,75	2,08	4,46
Předklášteří	3,05	61,31	16,49	3,64	3,54	1,2	2,20

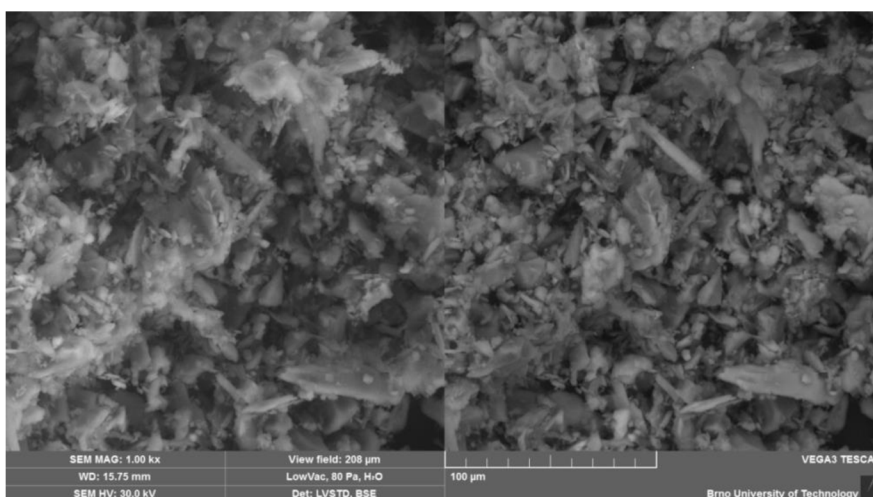
Tab. 7 - Chemické složení kamenných odprašků v %

	Měrný povrch [m <sup>2</sup> /kg]	Měrná hmotnost [kg/m <sup>2</sup> ]
Želešice	418	2890
Předklášteří	492	2720

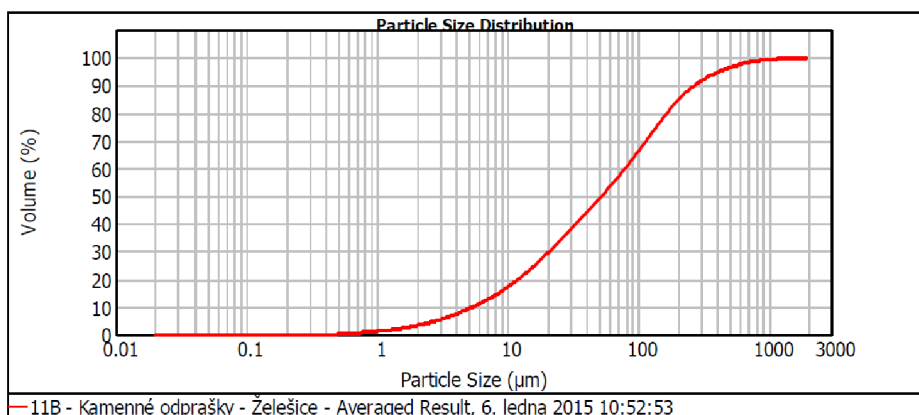
Tab. 8 - Fyzikální vlastnosti kamenných odprašků



Obr. 11 – Tvar částic odprašků Želešice – elektronová mikroskopie. Částice ostrohranné, jehlicovité

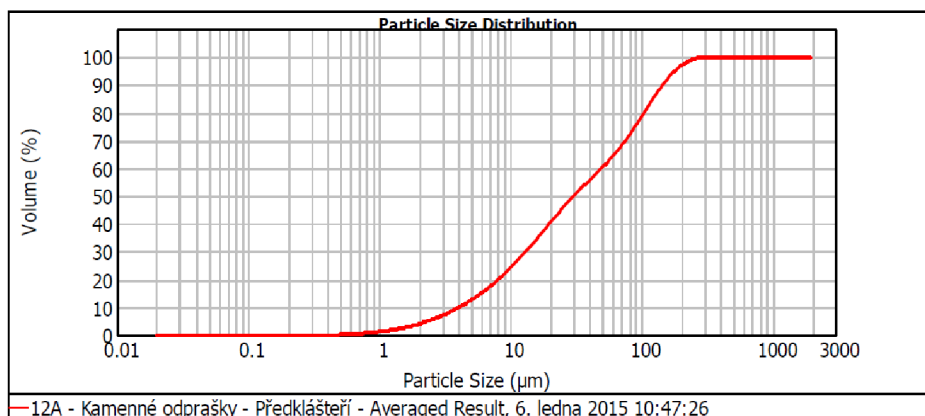


Obr. 12 – Tvar částic odprašků Předklášteří – elektronová mikroskopie. Částice ostrohranné, jehlicovité



Obr. 13 - Křivka zrnitosti a síťový rozbor – odprašky Želešice. Dominuje hrubá frakce, průměr středního zrna  $d(0,5) = 51,623 \mu\text{m}$ .

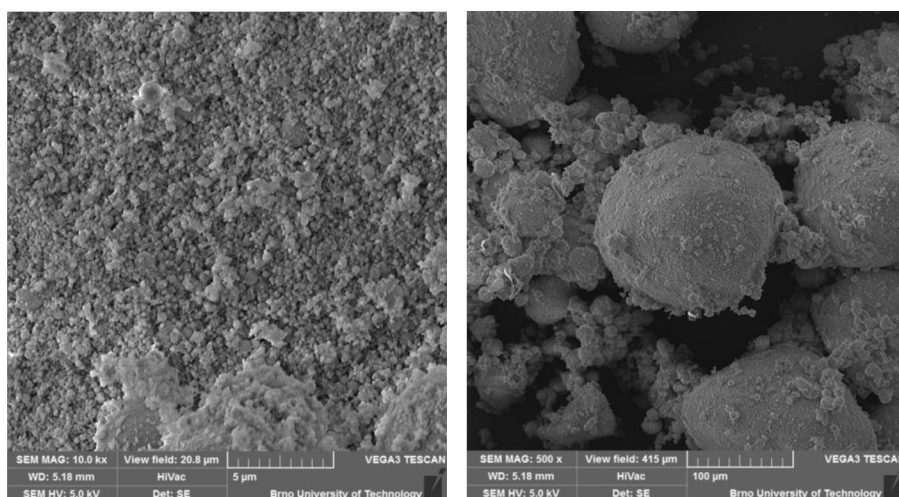




Obr. 14 - Křivka zrnitosti a síťový rozbor – odprašky Předklášteří. Dominuje jemná a hrubá frakce, průměr středního zrna  $d(0,5) = 30,018 \mu\text{m}$ .

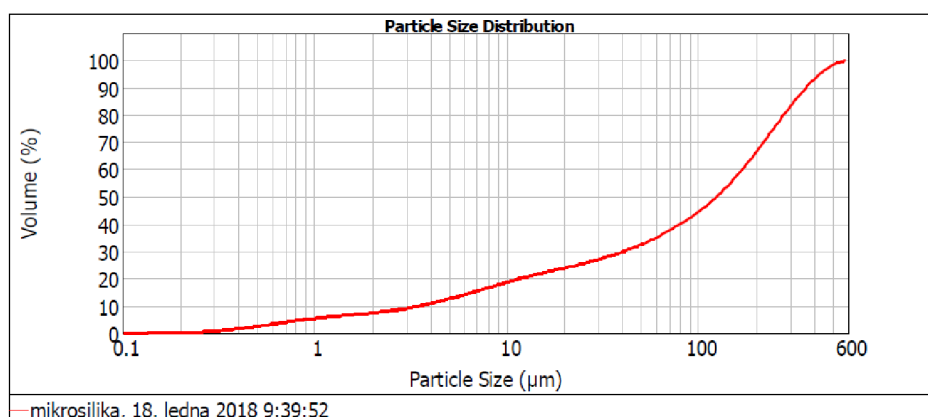
### Mikrosilika – Oravské ferozliatinárské závody, a.s.

Obsah  $\text{SiO}_2 > 95 \%$ , měrný povrch -  $23000 \text{ m}^2/\text{kg}$ , měrná hmotnost -  $2200 \text{ kg/m}^3$



Obr. 15 – Mikrosilika – vlevo pohled na menší zrna, vpravo detail většího zrna

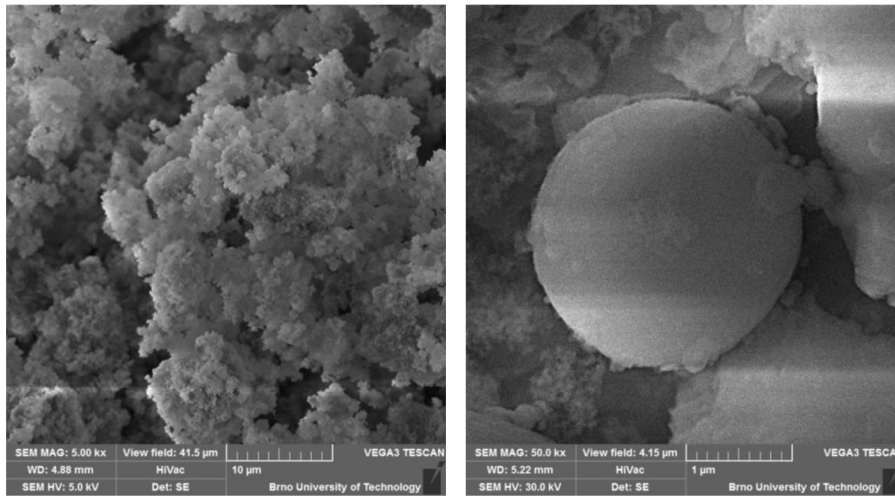
Částice mají kulovitý tvar, povrch je členitý a hrubý. Velikost částic je od jednotek po stovky  $\mu\text{m}$ .



Obr. 16 - Křivka zrnitosti a síťový rozbor – mikrosilika. Dominuje hrubá frakce, zastoupení velikosti částic je velmi široké, průměr středního zrna  $d(0,5) = 124,428 \mu\text{m}$ . Na mikrosilika se jedná dle rozboru o poměrně hrubozrný materiál.

## Nanosilika – SkySpring Nanomaterials, Inc

Obsah SiO<sub>2</sub> - 98,7%, měrný povrch – 160000 m<sup>2</sup>/kg, měrná hmotnost – 2160 kg/m<sup>3</sup>



Obr. 17 – Nanosilika – vlevo pohled na aglomerované částice, vpravo detail částice

Částice mají pravidelný kulovitý tvar a hladký povrch. Vlivem vysoké povrchové energie jsou částice sdruženy do větších aglomerátů, které je před použitím nutno rozdružit.

### 4.2 Křivky zrnitosti maltových směsí

Podle Fullera je dosaženo optimální hustoty, pokud se výsledná křivka zrnitosti co nejvíce blíží parabolickému tvaru. Tento tvar je dán známou rovnicí

$$P = (d / D)^q$$

Kde P je procentuální propad sítem, d je průměr síta a D je maximální zrno kameniva. Maximálního zhuštění je dosaženo, pokud q je 0,5. Tento vztah však není zcela vhodný pro návrh křivky zrnitosti jemných částic. Proto byla tato křivka dále zdokonalována a v pracích Fullera a Thompsona lze najít podmínky, jak křivku zrnitosti optimalizovat i v jemnozrnné části. Celkem byly na základě experimentů stanoveny tři podmínky, které by měly zajistit co možná nejvyšší hustotu betonu.

1. Nejméně 7% pevného materiálu bude jemnější než 0,07 mm.
2. Křivka je v jemnozrnné části tvořena elipsou začínající na 0,07 mm
3. Elipsa pokračuje k bodu  $x = D/10$ , odtud navazuje přímka.

Tyto podmínky lze matematicky vyjádřit následovně:

$$\frac{(y - 7)^2}{b^2} + \frac{(x - a)^2}{a^2} = 1$$

pro eliptickou část křivky

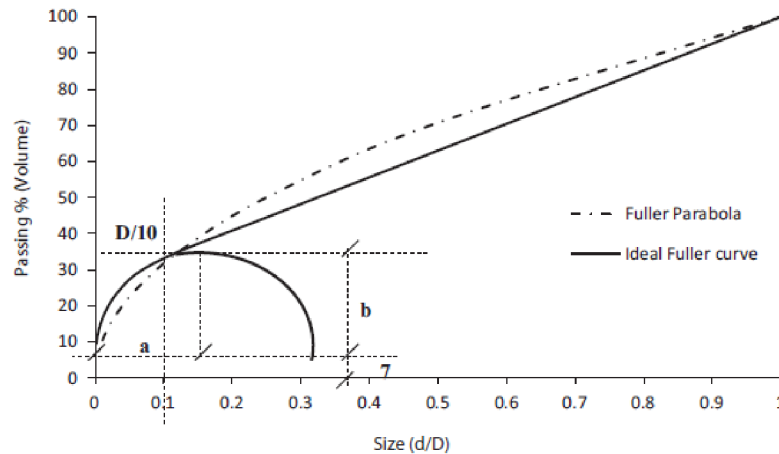
$$y = \frac{100 - y_1}{D - x_1}(x_0 - x_1) + y_1$$



pro přímou část křivky,

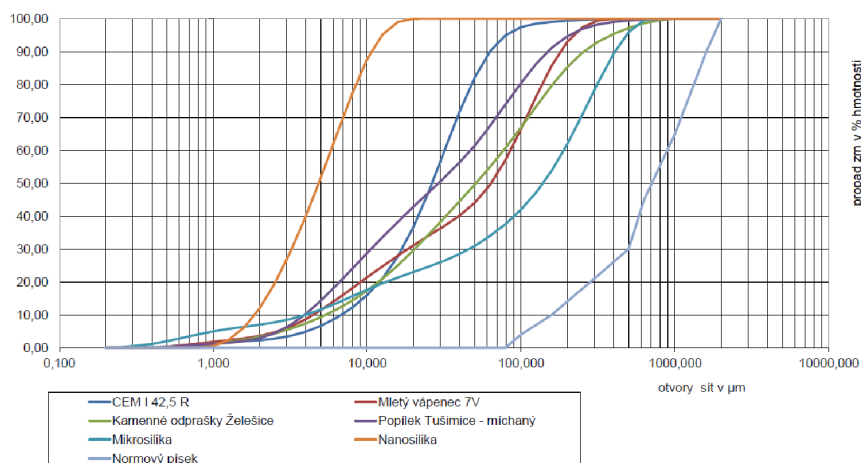
a, b jsou osy elipsy (hodnota závisí na tvaru částic a maximální dávce kameniva);

$$x_0 = D/10 \text{ až } D; y_1 = y \text{ v bodě } D/10 \text{ a } x_1 = D/10.$$

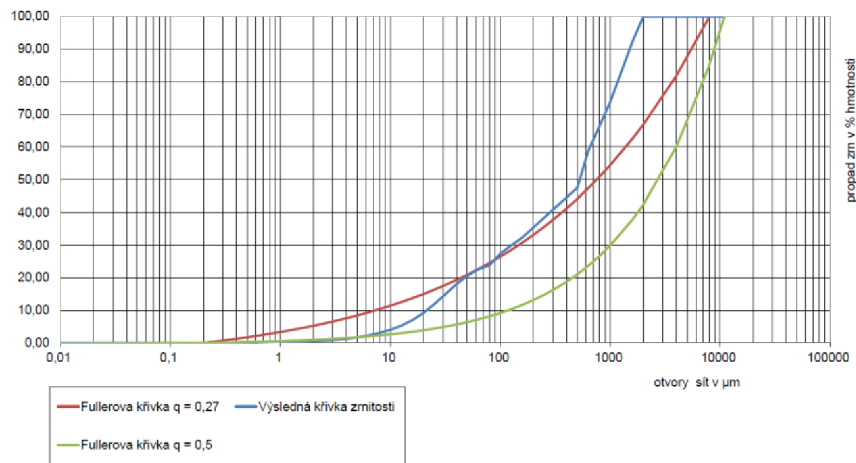


Graf 1 - Porovnání křivek zrnitosti - Fullerova parabola a ideální Fullerova křivka pro kamenivo a jemnozrný materiál [25]

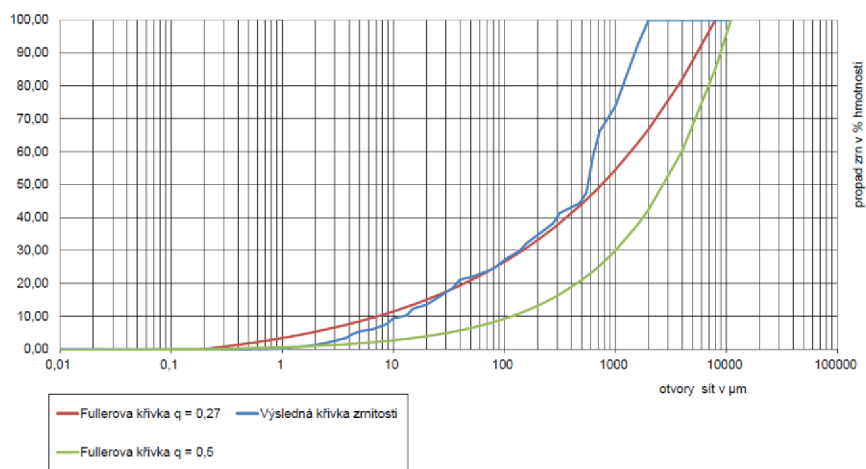
Cement byl jemnozrnými materiály nahrazován v objemu 10 a 25%. Z jednotlivých grafů je patrný výsledný vliv na optimalizaci křivky zrnitosti. Pro výslednou křivku bylo navíc použito přidání mikrosiliky a nanosiliky. Tyto materiály umožnily optimalizaci křivky i v oblasti 1 – 10  $\mu\text{m}$



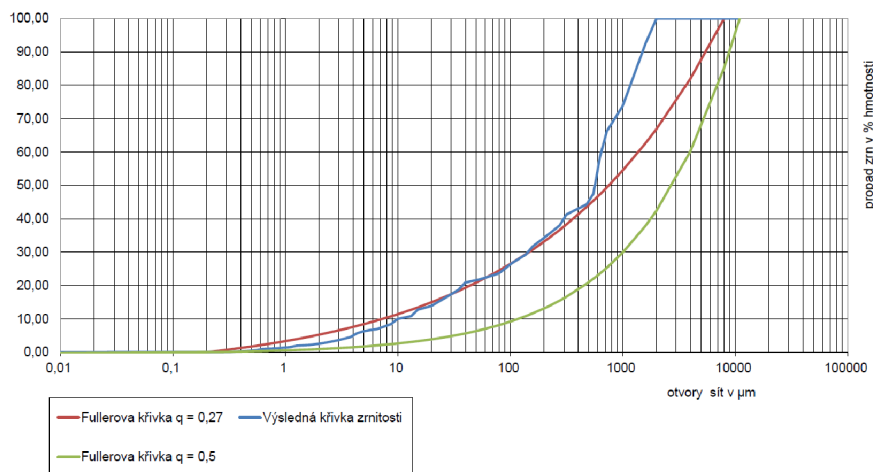
Graf 2 – Křivky zrnitostí použitých materiálů



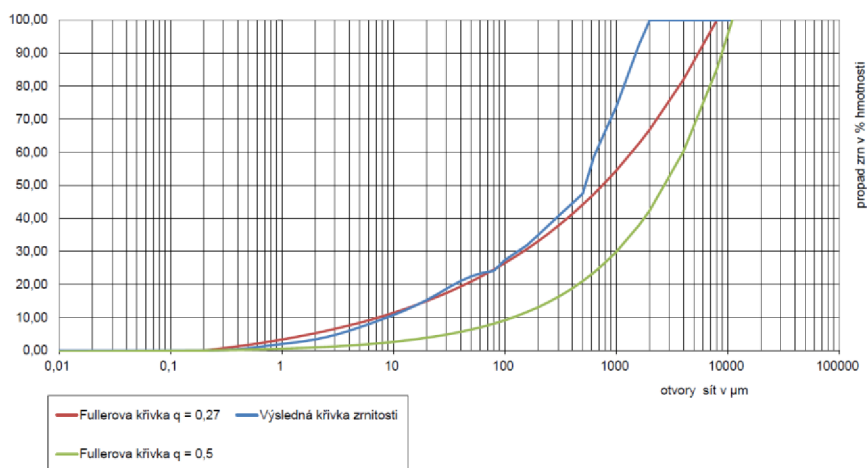
Graf 3 – Křivka zrnitosti cementu s normovým pískem



Graf 4 – Křivka zrnitosti cementu a 10% mletého vápence MV9, normový písek



Graf 5 – Křivka zrnitosti cementu a 25% popílku, normový písek



Graf 6 – Křivka zrnitosti cementu s 20% kamenných odprašků Želešice, 4% mikrosiliky a 1% nanosiliky, normový písek

### 4.3 Fyzikálně – mechanické vlastnosti navržených směsí

V první části experimentu byla použita záměs pouze s pojivem, příměsí, normovým pískem a vodou bez jakéhokoliv plastifikátoru.

#### Složení referenční receptury

CEM I 42,5 R – 450 g

Normový písek – 1350 g

Voda – 300 g       $w/c = 0,67$

V druhé části bylo použito prakticky stejné složení záměsi, s tím rozdílem, že vodní součinitel byl redukován na 0,33 a pro zlepšení konzistence byly použity plastifikátory. Konkrétně se jednalo o přísady označené jako Dynamon SX 14 a Dynamon RC 730 od firmy Mapei. Dávka přísady byla určena tak, aby výsledná konzistence byla u referenční receptury přibližně stejná jako u malty bez použití plastifikační přísady. U přísady Dynamon SX 14 byla tato dávka 3% z hmotnosti cementu, u přísady Dynamon RC 730 pak 2,6% z hmotnosti cementu.

Označení receptury	Konzistence rozliti [mm]	Objemová hmotnost 7d [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost 28d [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost 90d [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tahu za ohybu 7d [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu 28d [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu 90d [MPa]	Pevnost v tlaku 7d [MPa]	Pevnost v tlaku 28d [MPa]	Pevnost v tlaku 90d [MPa]
Ref	250	2190	2250	2240	5,04	8,42	9,26	19,7	35,2	36,9
KOŽ 10%	260	2230	2230	2230	4,93	7,11	7,40	16,2	28,5	31,7
KOŽ 25%	275	2240	2230	2240	4,07	6,20	6,85	14,0	21,8	25,7
KOP 10%	255	2210	2320	2280	5,93	8,51	9,27	21,4	33,4	38,0
KOP 25%	270	2320	2320	2310	5,27	6,91	7,58	16,7	25,6	29,9
MV7 10%	275	2220	2290	2280	6,39	8,02	9,62	21,3	33,0	37,1
MV7 25%	290	2240	2320	2300	5,57	7,78	9,23	16,9	31,5	34,2
MV9 10%	280	2320	2280	2290	6,67	8,65	9,64	22,4	34,4	37,2
MV9 25%	285	2270	2250	2260	4,80	7,31	8,53	16,9	27,0	31,4
ETU mix 10%	255	2230	2210	2220	6,35	8,36	9,02	27,4	33,6	39,8
ETU mix 25%	265	2200	2200	2200	4,48	7,07	8,16	16,5	27,0	31,5
MV9+KOŽ 10%	260	2210	2220	2240	5,88	7,90	9,02	19,5	29,5	38,1
MV9+KOŽ 25%	270	2200	2180	2200	5,25	6,29	7,52	18,0	21,4	25,4
CEM+10%MSI+1%NSI	240	2210	2210	2220	4,87	7,91	9,42	17,6	34,0	38,3
CEM+20%KOŽ +4%MSI +1%NSI	235	2230	2270	2260	5,16	7,85	8,54	15,3	27,5	32,1
CEM+20%ETU mix+4%MSI +1%NSI	235	2250	2290	2230	4,96	7,81	8,62	14,8	26,9	34,3
CEM+20%MV7 +4%MSI +1%NSI	230	2220	2260	2220	4,57	6,58	8,49	16,0	29,2	33,8

Tab. 9 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti navržených malt bez plastifikátoru

Vlastnosti malt s plastifikátorem Mapei SX14										
Označení receptury	Konzistence rozliti [mm]	Objemová hmotnost 7d [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost 28d [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost 90d [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tahu za ohybu 7d [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu 28d [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu 90d [MPa]	Pevnost v tlaku 7d [MPa]	Pevnost v tlaku 28d [MPa]	Pevnost v tlaku 90d [MPa]
Ref	245	2280	2240	2260	9,42	10,01	10,15	45,0	63,1	64,7
KOŽ 10%	265	2250	2240	2270	8,52	9,65	9,87	38,6	53,1	57,6
KOŽ 25%	260	2240	2240	2220	7,95	8,75	9,01	36,4	50,4	53,7
KOP 10%	255	2270	2260	2280	8,20	9,82	10,17	44,7	62,7	66,4
KOP 25%	265	2260	2240	2250	7,98	8,58	9,14	37,2	51,9	57,5
MV7 10%	265	2270	2270	2250	9,51	9,98	10,35	46,2	63,1	66,1
MV7 25%	275	2250	2270	2250	9,60	9,92	10,45	42,4	61,0	62,9
MV9 10%	270	2240	2270	2260	9,71	10,27	10,46	45,9	64,8	67,2
MV9 25%	270	2230	2220	2240	8,91	9,60	9,82	40,4	58,9	61,5
ETU mix 10%	255	2240	2240	2230	9,28	9,90	10,32	36,1	60,9	68,2
ETU mix 25%	260	2210	2210	2230	7,75	8,42	8,94	32,7	50,4	59,4
MV9+KOŽ 10%	250	2220	2210	2210	8,54	9,49	9,94	45,9	62,1	65,3
MV9+KOŽ 25%	260	2190	2200	2190	7,21	8,04	8,35	42,6	47,2	51,8
CEM+10%MSI+1%NSI	230	2250	2260	2260	8,45	9,34	10,72	43,2	61,8	65,3
CEM+20%KOŽ +4%MSI +1%NSI	230	2260	2230	2250	8,38	9,25	11,19	41,6	51,3	62,8
CEM+20%ETU mix +4%MSI +1%NSI	240	2210	2200	2200	7,84	9,68	10,37	44,4	61,3	66,6
CEM+20%MV7 +4%MSI +1%NSI	240	2270	2240	2240	8,37	9,70	9,24	40,0	53,4	60,6

Tab. 10 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti navržených malt s plastifikátorem Dynamon SX 14

Vlastnosti malt s plastifikátorem Mapei Dynamon RC 730										
Označení receptury	Konzistence rozliti [mm]	Objemová hmotnost 7d [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost 28d [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost 90d [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tahu za ohybu 7d [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu 28d [MPa]	Pevnost v tahu za ohybu 90d [MPa]	Pevnost v tlaku 7d [MPa]	Pevnost v tlaku 28d [MPa]	Pevnost v tlaku 90d [MPa]
Ref	250	2340	2320	2310	11,12	11,38	11,93	59,7	69,4	72,5
KOŽ 10%	265	2310	2300	2310	8,86	9,75	10,50	50,1	58,6	66,4
KOŽ 25%	265	2290	2300	2280	8,28	8,96	9,42	48,4	53,4	61,1
KOP 10%	260	2290	2310	2290	10,14	10,93	11,61	58,4	68,4	73,2
KOP 25%	270	2300	2310	2310	8,45	9,01	10,25	50,4	53,9	61,7
MV7 10%	275	2290	2300	2300	9,94	10,54	11,75	57,1	67,2	73,8
MV7 25%	280	2280	2290	2280	9,71	10,35	10,78	54,9	65,7	70,0
MV9 10%	270	2310	2320	2320	10,71	11,25	11,70	56,7	68,0	73,1
MV9 25%	275	2290	2300	2270	9,05	9,84	10,09	52,5	64,9	71,6
ETU mix 10%	265	2290	2300	2300	9,00	9,75	10,87	49,1	55,3	75,9
ETU mix 25%	270	2280	2270	2250	8,12	8,64	9,11	36,5	51,8	66,7
MV9+KOŽ 10%	265	2290	2290	2270	8,94	9,75	10,36	59,9	67,2	73,6
MV9+KOŽ 25%	270	2270	2270	2280	8,26	8,91	9,57	56,3	61,7	64,9
CEM+10%MSI +1%NSI	235	2290	2270	2280	10,64	11,42	12,05	56,7	69,1	75,5
CEM+20%KOŽ +4%MSI +1%NSI	240	2300	2330	2340	9,83	11,45	12,06	55,3	67,5	74,7
CEM+20%ETU mix+4%MSI +1%NSI	240	2300	2270	2280	9,28	11,58	12,54	58,8	72,2	84,7
CEM+20%MV7 +4%MSI +1%NSI	235	2300	2300	2280	10,05	11,73	12,33	57,8	69,7	75,3

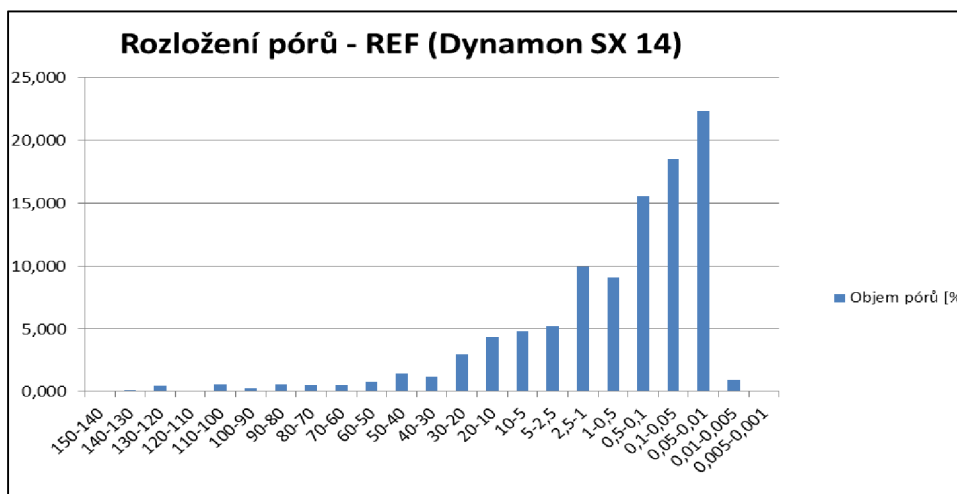
Tab. 11 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti navržených malt s plastifikátorem Dynamon RC 730

## Rtuťová porozimetrie

Na vzorcích s přísávkem nanosiliky a plastifikátory SX 14 a RC 730 byla provedena zkouška na stanovení porozity cementového tmele. Zkouška byla provedena na vzorcích starších 90 dnů.

### REF (DYNAMON SX 14)

- Průměrná velikost póru: 0,070131  $\mu\text{m}$
- Celková porozita: 8,7868 %
- Měrná hmotnost: 2,3129  $\text{g}/\text{cm}^3$
- Zdánlivá hustota: 2,5351  $\text{g}/\text{cm}^3$

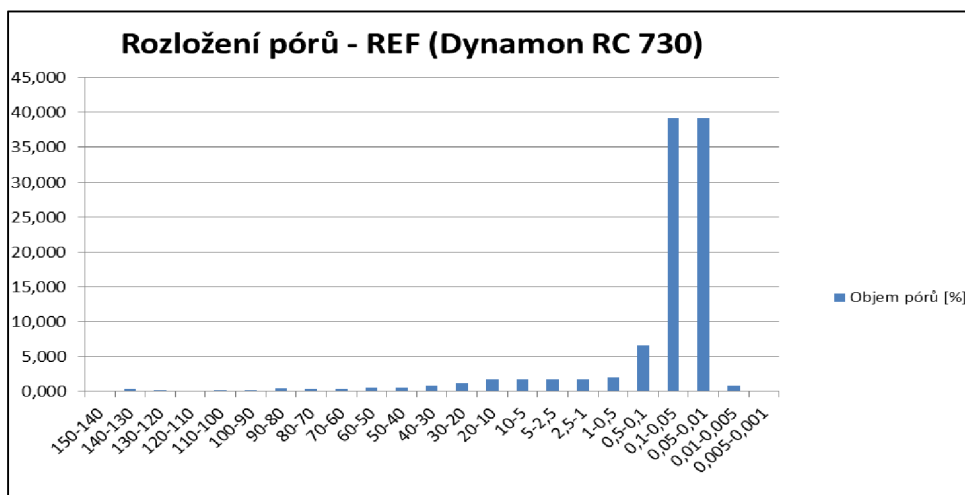


Graf 7 – Rozložení velikosti pórů referenční receptury s plastifikátorem SX 14

Z grafu je patrný postupný nárůst objemu pórů od velikosti 50  $\mu\text{m}$ . Póry o velikosti větší než 2,5  $\mu\text{m}$  jsou zastoupeny přibližně 25%, póry velikosti 0,1 až 2,5  $\mu\text{m}$  přibližně 34% a póry menší než 0,1  $\mu\text{m}$  přibližně 41%.

### REF (DYNAMON RC 730)

- Průměrná velikost póru: 0,05804  $\mu\text{m}$
- Celková porozita: 7,5486 %
- Měrná hmotnost: 2,3517  $\text{g}/\text{cm}^3$
- Zdánlivá hustota: 2,5437  $\text{g}/\text{cm}^3$

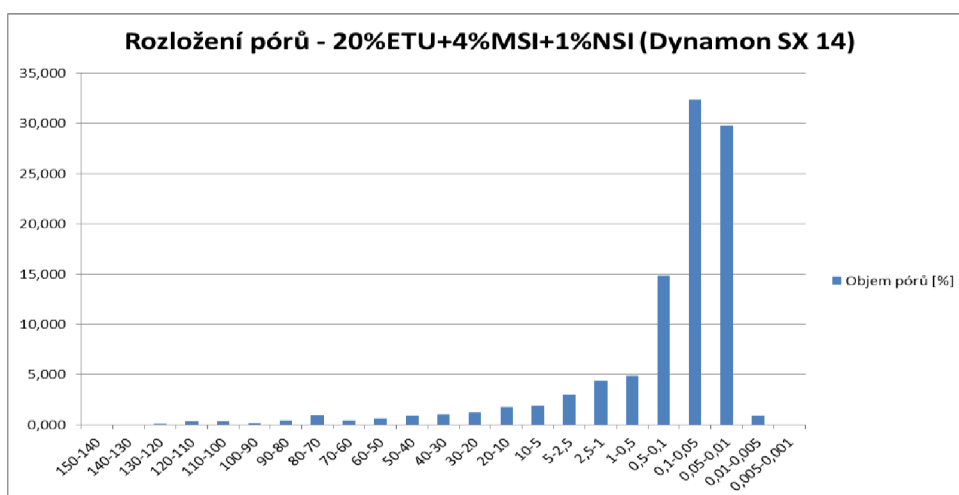


Graf 8 – Rozložení velikosti pórů referenční receptury s plastifikátorem RC 730

V porovnání se stejnou recepturou s plastifikátorem SX 14 je na první pohled patrné daleko vyšší zastoupení mikropórů velikosti pod 0,1 μm. U tohoto vzorku byla rovněž naměřena nižší celková porozita ve srovnání se vzorkem s plastifikátorem SX 14.

#### 20%ETU+4%MSI+1%NSI (DYNAMON SX 14)

- Průměrná velikost pórů: 0,056702 μm
- Celková porozita: 10,1994 %
- Měrná hmotnost: 2,2925 g/cm<sup>3</sup>
- Zdánlivá hustota: 2,5528 g/cm<sup>3</sup>



Graf 9 – Rozložení velikosti pórů receptury s popílkem a plastifikátorem SX 14

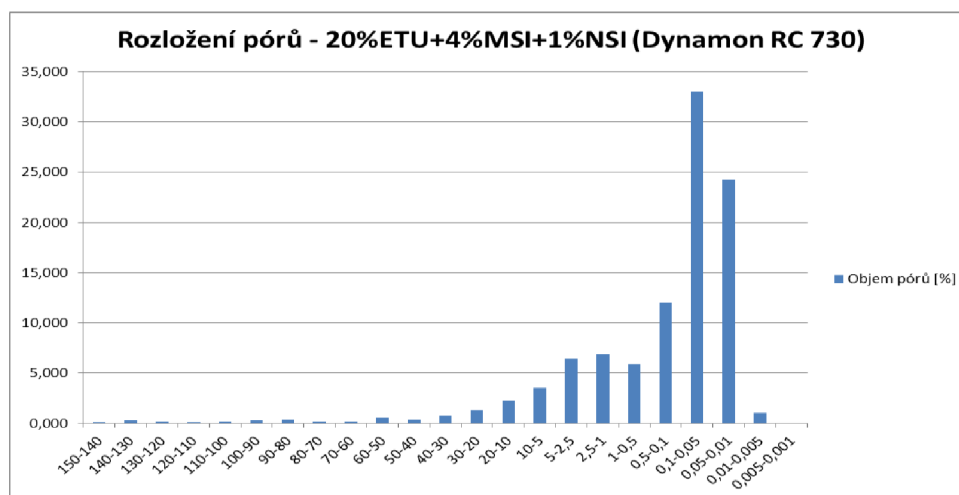
V porovnání s referenční recepturou s plastifikátorem SX 14 je celková porozita vzorku vyšší o 1,4%, ale je zde rovněž patrné snížení objemu pórů větších než 0,1 μm a daleko vyšší zastoupení mikropórů menších než 0,1 μm.



Z porovnávaných receptur s plastifikátorem SX 14 vykazovala tato receptura nejlepší mechanické vlastnosti.

### 20%ETU+4%MSI+1%NSI (DYNAMON RC 730)

- Průměrná velikost póru: 0,058096  $\mu\text{m}$
- Celková porozita: 8,2305 %
- Měrná hmotnost: 2,3129  $\text{g}/\text{cm}^3$
- Zdánlivá hustota: 2,5204  $\text{g}/\text{cm}^3$



Graf 10 – Rozložení velikosti pórů receptury s popílkem a plastifikátorem RC 730

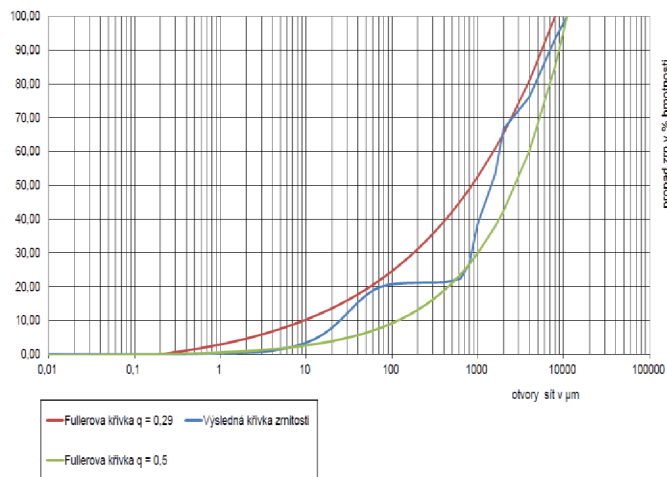
V porovnání s referenční recepturou s plastifikátorem RC 730 je celková porozita vzorku vyšší o 0,7%, zastoupení pórů větších než 0,1  $\mu\text{m}$  je také vyšší a naopak objem pórů menších než 0,1  $\mu\text{m}$  se snížil. I přes tyto ukazatele však receptura vykazovala nejlepší mechanické vlastnosti.

## 4.4 Optimalizace křivek zrnitostí na betonech

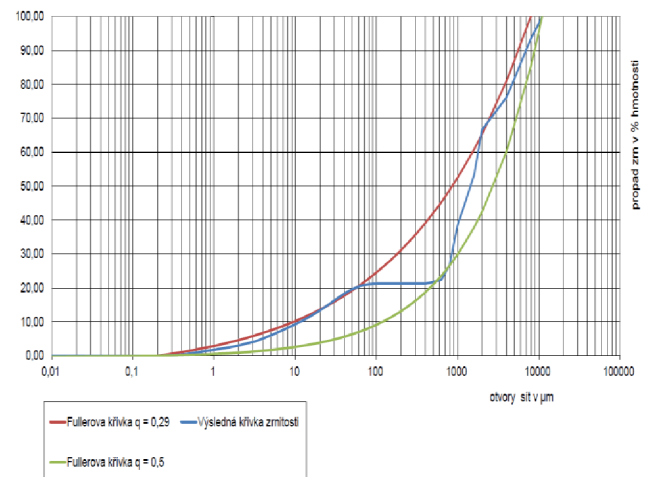
S vybranými surovinami, které byly použity k optimalizaci křivek zrnitostí při zkouškách na maltách, byly namíchány i betony. U betonů byla stanovena maximální náhrada cementu příměsemi na 30%. Na betonech byl používán pouze plastifikátor Dynamon RC 730, který při použití na maltách vykazoval lepší výsledky.

### Složení referenční receptury:

CEM I 42,5 R	500 kg/m <sup>3</sup>
0/4 Hrušovany	1308 kg/m <sup>3</sup>
4/8 Olbramovice	542 kg/m <sup>3</sup>
Voda	125 kg/m <sup>3</sup>
Dynamon RC 730	20 kg/m <sup>3</sup>
W/C = 0,25	



Graf 11 – Křivka zrnitosti referenční receptury



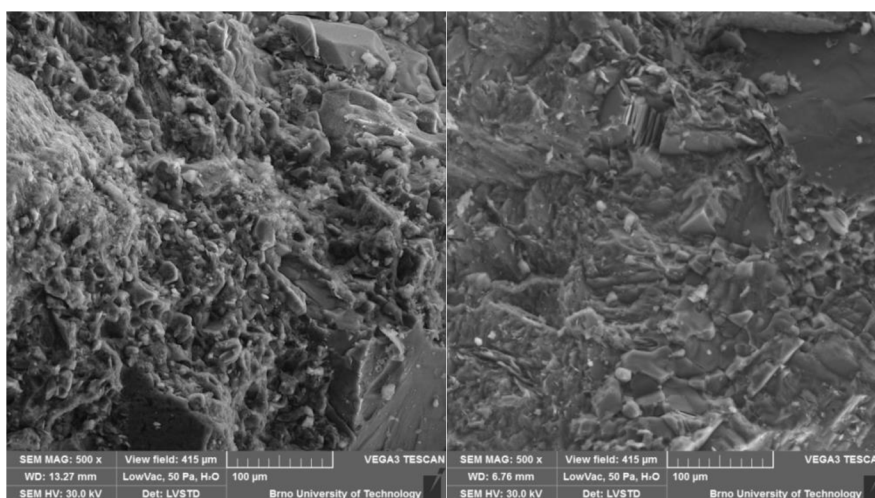
Graf 12 – Křivka zrnitosti optimalizované receptury č. 2 – 23% popílek Tušimice, 6% mikrosilika, 1% nanosilika

Vlastnosti čerstvého betonu						
Označení receptury	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Obsah vzduchu [%]	Sednutí kužele v čase [mm]			
			T <sub>0</sub>	T <sub>15</sub>	T <sub>30</sub>	T <sub>60</sub>
REF	2470	1,8	130	130	120	110
REC 1	2430	1,4	100	80	50	20
REC 2	2450	1,2	110	100	60	30
REC 3	2420	1,3	90	80	50	20

Tab. 12 – Vlastnosti čerstvého betonu

Označení receptury	Objemová hmotnost 3d [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost 7d [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost 28d [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost 90d [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tlaku 3d [MPa]	Pevnost v tlaku 7d [MPa]	Pevnost v tlaku 28d [MPa]	Pevnost v tlaku 90d [MPa]
REF	2420	2410	2390	2390	31,6	49,2	74,4	85,7
REC 1	2410	2400	2370	2360	48,7	69,2	77,1	92,5
REC 2	2390	2360	2350	2350	42,3	66,6	90,4	98,6
REC 3	2400	2360	2360	2350	51,6	64,8	82,6	90,3

Tab. 13 – Vývin objemové hmotnosti a pevnosti betonu v tlaku

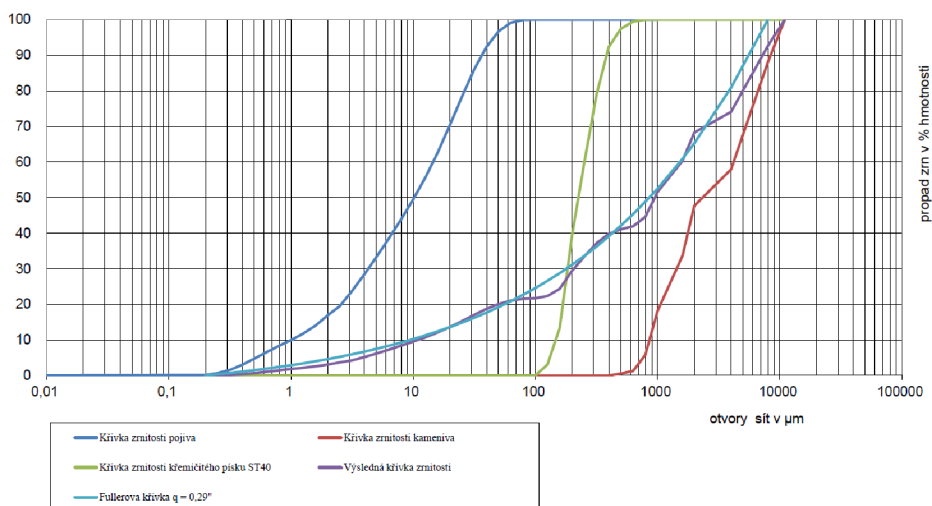


Obr. 18 – Mikrostruktura referenční záměsi a záměsi s popílkem po 90 dnech

Dalším krokem k dosažení optimální receptury je doplnění chybějících částic velikosti 100 – 500 µm. Receptura, označená jako REC 2.2 doplněna jemným křemičitým pískem označeným jako ST40 z lokality Střeleč. Jedná se o velmi jemný křemičitý písek se zrnitostí 10 – 630 µm.

### Výsledná receptura:

CEM I 42,5 R	350 kg/m <sup>3</sup>	
Popílek ETU <sub>mix</sub>	115 kg/m <sup>3</sup>	
Mikrosilika	30 kg/m <sup>3</sup>	
Nanosilika	5 kg/m <sup>3</sup>	
Písek ST40	450 kg/m <sup>3</sup>	
0/4 Hrušovany	758 kg/m <sup>3</sup>	
4/8 Olbramovice	592 kg/m <sup>3</sup>	
Voda	125 kg/m <sup>3</sup>	
Dynamon RC 730	20 kg/m <sup>3</sup>	W/C = 0,36 W/B = 0,25



Graf 12 – Složení optimální křivky zrnitosti

Vlastnosti čerstvého betonu						
Označení receptury	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Obsah vzduchu [%]	Sednutí kužele v čase [mm]			
			T <sub>0</sub>	T <sub>15</sub>	T <sub>30</sub>	T <sub>60</sub>
REC 2.2	2440	1,4	100	90	50	20

Tab. 14 – Vlastnosti čerstvého betonu

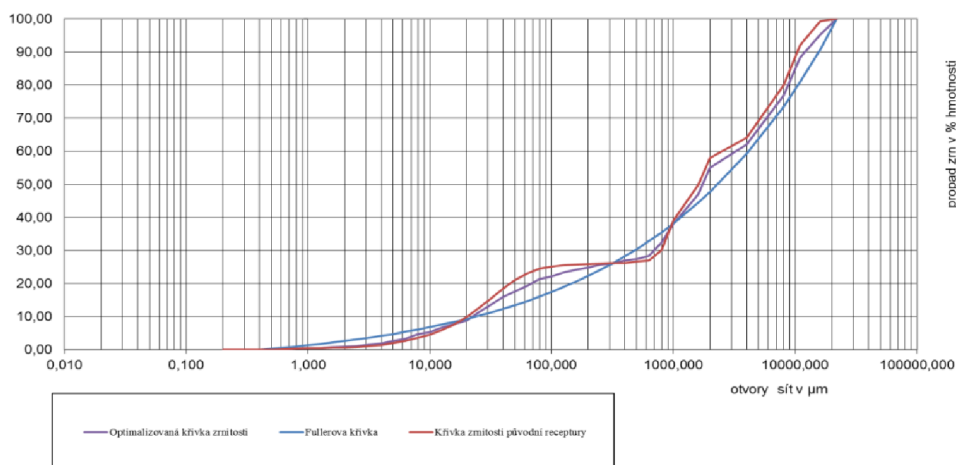
Označení receptury	Objemová hmotnost 3d [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost 7d [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost 28d [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost 90d [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tlaku 3d [MPa]	Pevnost v tlaku 7d [MPa]	Pevnost v tlaku 28d [MPa]	Pevnost v tlaku 90d [MPa]
REC 2	2380	2370	2370	2360	44,7	70,1	96,7	103,8

Tab. 15 – vývin objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku betonu s optimální křivkou zrnitosti

## 4.5 Ověření poznatků v praxi

Jako možnost ověření získaných poznatků v praxi byla namíchána receptura samozhutnitelného betonu v jednom ze závodů společnosti Prefa Brno, a.s. V tomto případě bylo cílem namíchat samozhutnitelný beton pevnostní třídy C 40/50 XF4, a to ze surovin, které jsou běžně používány v místě výroby. Porovnávány byly zejména fyzikálně – mechanické vlastnosti obou receptur, ale i finanční úspora a úspora množství CO<sub>2</sub> u optimalizované receptury.

	<b>Původní receptura</b>	<b>Optimalizovaná receptura</b>
CEM I 42,5 R	440 kg/m <sup>3</sup>	430 kg/m <sup>3</sup>
Mikromletý vápenec	60 kg/m <sup>3</sup>	65 kg/m <sup>3</sup>
Kamenné odprašky	40 kg/m <sup>3</sup>	35 kg/m <sup>3</sup>
0/4 Hrušovany	380 kg/m <sup>3</sup>	390 kg/m <sup>3</sup>
0/4 Mistřín	380 kg/m <sup>3</sup>	450 kg/m <sup>3</sup>
4/8 Kočovce	310 kg/m <sup>3</sup>	265 kg/m <sup>3</sup>
8/16 Kočovce	270 kg/m <sup>3</sup>	215 kg/m <sup>3</sup>
8/16 Želešice	215 kg/m <sup>3</sup>	255 kg/m <sup>3</sup>
Voda	195 kg/m <sup>3</sup>	185 kg/m <sup>3</sup>
MC Power Flow 2695	5,4 kg/m <sup>3</sup>	5,38 kg/m <sup>3</sup>
Centrament AIR 202	1,4 kg/m <sup>3</sup>	1,4 kg/m <sup>3</sup>
	W/C = 0,44    W/B = 0,36	W/C = 0,43    W/B = 0,35
	OH = 2300 kg/m <sup>3</sup>	OH = 2300 kg/m <sup>3</sup>



Graf 13 – Křivky zrnitostí optimalizované a neoptimalizované receptury

Označení receptury	Objemová hmotnost čb [kg/m <sup>3</sup> ]	Obsah vzduchu [%]	Objemová hmotnost 7d [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tlaku 7d [MPa]	Objemová hmotnost 28d [kg/m <sup>3</sup> ]	Pevnost v tlaku 28d [MPa]	Odpad po 100 cyklech [g/m <sup>2</sup> ]
REF	2370	5,7	2300	49,6	2310	57,3	187,3
OPT	2370	5,5	2310	48,3	2320	56,9	163,9

Tab. 16 - Porovnání výsledků zkoušek optimalizované a neoptimalizované receptury

Pozn. pevnost betonu v tlaku po 7 dnech je výsledkem jednoho měření, pevnost v tlaku po 28 dnech je průměrem tří hodnot, hodnota odpadu po 100 cyklech je průměrem tří hodnot

	Původní receptura	Optimalizovaná receptura
CEM I 42,5 R	688,60 Kč	673,00 Kč
Mikromletý vápenec	39,30 Kč	42,60 Kč
Kamenné odprašky	10,20 Kč	9,00 Kč
0/4 Mistřín	68,80 Kč	81,50 Kč
0/4 Hrušovany	66,10 Kč	67,90 Kč
4/8 Kočovce	74,40 Kč	63,60 Kč
8/16 Kočovce	73,20 Kč	58,30 Kč
8/16 Želešice	61,30 Kč	72,70 Kč
MC Power Flow 2695	27,30 Kč	27,30 Kč
Centrament AIR 202	48,30 Kč	48,30 Kč
<b>Celkové náklady</b>	<b>1157,50 Kč</b>	<b>1143,90 Kč</b>

Tab. 17 – Porovnání materiálových nákladů původní a optimalizované receptury

Ze srovnání vyplývá, že optimalizací bylo ušetřeno 13,60 Kč/m<sup>3</sup> betonu. Toto je však pouze materiálová úspora, která se týká přímo výroby betonu. Další úsporou může být úspora na správkových hmotách a čase, který by bylo nutné strávit na opravách povrchových nedokonalostí u prvků z pohledových betonů.

Druh materiálu	Lokalita	Vzdálenost [km]	Emise z dopravy [kg CO <sub>2</sub> ]	Emise z dopravy [kg CO <sub>2</sub> /kg]	Emise z výroby [kg CO <sub>2</sub> /kg]	Uhlíková stopa materiálu [kg CO <sub>2</sub> /kg]
CEM I 42,5 R	Mokrá	138	103,6	0,0035	0,750	0,7535
Mikromletý vápenec	Mokrá	138	103,6	0,0035	0,005	0,0085
Kamenné odprašky	Želešice	178	133,7	0,0045	0,005	0,0095
0/4 Hrušovany	Hrušovany u Brna	164	123,2	0,0041	0,002	0,0061
0/4 Mistřín	Mistřín	68	51,1	0,0017	0,002	0,0037
4/8 Kočovce	Kočovce	108	81,1	0,0027	0,002	0,0047
8/16 Kočovce	Kočovce	108	81,1	0,0027	0,002	0,0047
8/16 Želešice	Želešice	178	133,7	0,0045	0,005	0,0095

Tab. 18 – Celková uhlíková stopa materiálu dopraveného z lomu / cementárny do výrobního závodu Strážnice

Pozn.: emise z dopravy jsou započítány včetně zpáteční cesty, průměrná spotřeba pohonných hmot 28 l/100 km; vytížení nákladního auta 30.000 kg materiálu.

Druh materiálu	Složení receptury [kg/m <sup>3</sup> ]	Uhlíková stopa [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> betonu]	Složení receptury [kg/m <sup>3</sup> ]	Uhlíková stopa [kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> betonu]
CEM I 42,5 R	440	331,52	430	323,99
Mikromletý vápenec	60	0,51	60	0,51
Kamenné odprašky	40	0,38	40	0,38
0/4 Hrušovany	380	2,32	380	2,32
0/4 Mistřín	380	1,41	380	1,41
4/8 Kočovce	310	1,46	310	1,46
8/16 Kočovce	270	1,27	270	1,27
8/16 Želešice	215	2,03	215	2,03
<b>Celkové emise CO<sub>2</sub></b>		<b>340,89</b>		<b>333,36</b>

Tab. 19 – Uhlíková stopa receptur závodu Strážnice

Z výsledků je patrné, že optimalizací receptury došlo k úspoře 7,53 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> betonu. Při roční výrobě cca 2.000 m<sup>3</sup> této konkrétní receptury tedy dojde k celkové úspoře více než 15.000 kg CO<sub>2</sub>, což je stejně jako vyprodukuje osobní automobil za 100.000 km jízdy.

#### 4.6 Sestavení výpočetního programu k optimalizaci křivek zrnitosti

Na základě získaných poznatků byl sestaven jednoduchý výpočtový program, který je schopný na základě zadaných kritérií sestavit z jednotlivých materiálů optimální křivku zrnitosti. Programování bylo provedeno ve volně dostupném programovacím jazyku Python. Kompletní program s návodem je přílohou této disertační práce.

```

NAME,VALUES
info_file,info_jemno.csv
output_graph,graf_jemno.png
material,350,Cement
material,50,ETU
material,10,Mikrosilika
material,1,Nanosilika
material,1350,Pisek

```

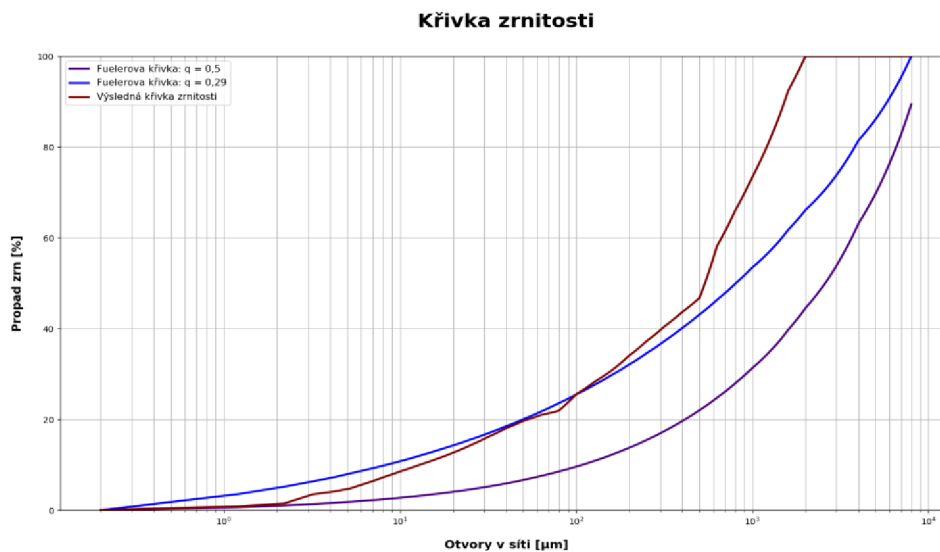
Obr. 19 – Zadání vstupních parametrů



	A	B	C	D	E	F	L	M	N	O	P	Q	R
1	holes	sample1 fall	sample2 fall	sample3 fall	sample4 fall	sample5 fall	Dmin_modif	Dmax_modif	q_modif	Dmin_F	Dmax_F	q_F	sum_kg
2	11000.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	1	2000	0.27	1	4000	0.5	1800
3	8000.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00							
4	4000.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00							
5	2000.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00							
6	1600.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00							
7	1000.0	100.00	100.00	100.00	100.00	65.00							
8	794.328	100.00	99.9033107725	100.00	100.00	55.00							
9	630.957	99.97	99.7299369853	99.5401379586	100.00	45.00							
10	501.187	99.92	99.453205748	95.9412176347	100.00	30.00							
11	398.107	99.86	99.0031007235	89.2832150355	100.00	26.00							
12	316.228	99.77	98.2395892375	80.55583325	100.00	22.00							
13	251.189	99.63	96.9292834995	71.0186943917	100.00	18.00							
14	199.526	99.39	94.6720901544	61.8614415675	100.00	14.00							
15	150.409	99.04	91.1079430536	53.0630400477	100.00	10.00							
16	125.893	98.51	86.3701530357	47.2858142557	100.00	7.00							
17	100.0	97.44	80.4387690461	41.9674097771	100.00	4.00							
18	79.433	94.96	73.9505884706	37.6187143857	100.00	0.00							
19	63.096	90.08	67.4690761178	33.99980006	100.00	0.00							
20	50.119	82.24	61.5210215717	30.9807057883	100.00	0.00							
21	39.811	71.71	56.3131397326	28.4914525642	100.00	0.00							
22	31.623	59.59	51.6620544794	26.422073378	100.00	0.00							
23	25.119	47.43	47.2376887941	24.6526042187	100.00	0.00							

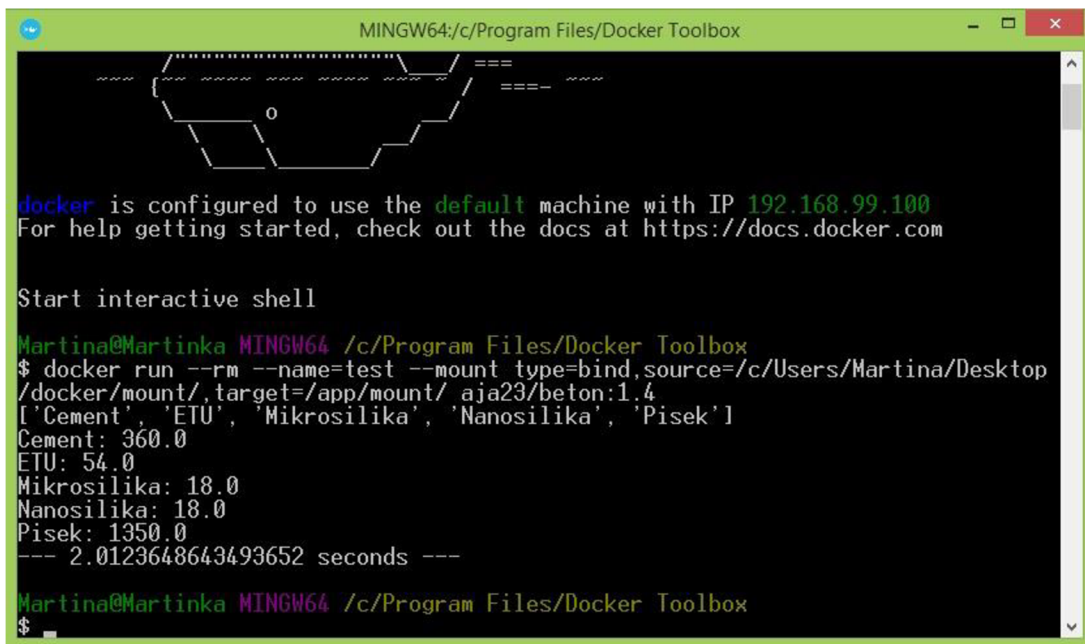
Obr. 20 – Zadání výpočtových charakteristik

Výsledkem optimalizace je přímo množství jednotlivých složek materiálů, které jsou pro sestavení křivky potřeba a grafické znázornění křivky sestavené křivky zrnitosti a její srovnání s Fullerovou křivkou.



Graf 14 – Výsledný graf zrnitosti sestavený výpočtním programem





```
MINGW64:/c/Program Files/Docker Toolbox
=====
docker is configured to use the default machine with IP 192.168.99.100
For help getting started, check out the docs at https://docs.docker.com

Start interactive shell

Martina@Martinka MINGW64 /c/Program Files/Docker Toolbox
$ docker run --rm --name=test --mount type=bind,source=/c/Users/Martina/Desktop
/docker/mount/,target=/app/mount/ aja23/beton:1.4
['Cement', 'ETU', 'Mikrosilika', 'Nanosilika', 'Pisek']
Cement: 360.0
ETU: 54.0
Mikrosilika: 18.0
Nanosilika: 18.0
Pisek: 1350.0
--- 2.0123648643493652 seconds ---

Martina@Martinka MINGW64 /c/Program Files/Docker Toolbox
$
```

Obr. 21 – Výpočet složení optimální záměsi

Pro ukázkou byly kombinovány materiály cement, popílek Tušimice, mikrosilika, nanosilika a normový písek. Pro sestavení optimální křivky zrnitosti je možné použít i více materiálů, ale s každým přidaným materiálem pochopitelně roste čas potřebný k výpočtu.

Z vypočteného množství nanosiliky (18 kg), je patrné, že pro lepší použitelnost v praxi by bylo vhodné program doplnit o možnost zadat i maximální možné množství materiálu, které má být ve směsi použito.

## 5. Závěr

Stavebnictví je stále velmi rychle se rozvíjející odvětví. I když se může zdát, že výroba betonu je v zásadě jednoduchou a téměř neměnnou disciplínou, požadavky investorů na snižování cenových nákladů, snížení uhlíkové stopy stavby, či na použití betonů speciálních vlastností a vysokých trvanlivostí nutí výrobce k prakticky neustálému zdokonalování a vývoji svých receptur.

Aby bylo možné dále vylepšovat a zvyšovat vlastnosti vyráběných betonů, je také nutné důkladně znát vstupní suroviny a jejich synergické účinky v betonu. V případě příměsí, které jsou často druhotnými surovinami, je toto poznání zásadní, abychom vyloučili možnou proměnlivost vlastností a případný negativní vliv na výsledné vlastnosti betonu.

V teoretické části práce jsou tedy popsány veškeré běžně používané příměsi do betonu (popílek, struska, filery), příměsi používané ve speciálních případech (metakaolin, mikrosilika) a příměsi nové, používané zatím pouze experimentálně (nanosilika, nanofíly, nanovápence). Pro všechny příměsi jsou uvedeny jejich vlastnosti a způsoby, jakými ovlivňují výsledné vlastnosti betonu. Dále je v teoretické části rozebrán možný způsob navrhování betonové směsi s ohledem na optimalizaci křivky zrnitosti v intervalu 0 – 1000  $\mu\text{m}$ , aby bylo možné co nejvíce snížit pórovitost cementového tmele a tím zvýšit užité vlastnosti betonu a snížit množství cementu v betonu.

V praktické části byly nejprve pečlivě prozkoumány vlastnosti vybraných vstupních surovin, ze kterých byla následně skládána a optimalizována křivka zrnitosti. Při použití běžných příměsí (popílek, mletý vápenec, kamenné odprašky) nebylo možné optimalizovat křivku zrnitosti v plném rozsahu. Optimalizace bylo u těchto kompozitů dosaženo „pouze“ v rozmezí 20 – 500  $\mu\text{m}$ . Pro optimalizaci křivky zrnitosti v celém rozsahu byly do systému přidány mikrosilika a nanosilika. Tyto příměsi umožnili optimalizaci křivky zrnitosti v rozsahu 0 – 500  $\mu\text{m}$ .

U kompozitů s optimalizovanými křivkami zrnitosti byly následně zkoušeny jejich fyzikálně mechanické vlastnosti po 7, 28 a 90 dnech. Velmi dobrých výsledků bylo dosaženo u kompozitů s částečnou náhradou 10 % cementu popílkem Tušimice, kamenných odprašků Předklášteří a mletých vápenců MV7 a MV9. Při náhradě cementu těmito příměsemi došlo u všech kompozitů ke zvýšení pevností v tlaku

po 90 dnech. Při náhradě 25 % z hmotnosti cementu nebylo dosaženo vyšších pevností u žádného z kompozitů. Mírně nižších (pokles pevnosti v tlaku do 10 %) bylo dosaženo pouze u kompozitu s přídavkem mletého vápence MV7.

Při dávkování nanosiliky bylo nutné vyzkoušet efektivitu zvoleného způsobu rozduřování. Jako naprosto neefektivní se jevílo pouhé prodloužení doby míchání kompozitu „na sucho“. Takovéto kompozity nevykazovaly ani po 90 dnech vyšší pevnosti v tlaku. Druhým zvoleným způsobem rozduřování nanosiliky byla sonická metoda. Při tomto rozduřování byly vyzkoušeny dva plastifikátory na různé chemické bázi. Kompozity s plastifikátorem na akrylové bázi s přídavkem nanosiliky s celkovou náhradou 25 % cementu příměsemi vykazovaly „pouze“ srovnatelné pevnosti s referenční recepturou. Naproti tomu kompozity s plastifikátorem na polykarboxylátéterové bázi vykazovaly při přidání nanosiliky se stejnou celkovou

náhradou ve všech případech pevnosti v tlaku vyšší. Plastifikátor na této bázi se tedy jeví pro použití v kombinaci s nanosilikou jako lepší.

Získané poznatky byly aplikovány na výrobu betonů. Při dávkování nanosiliky se u betonů projevila významná ztráta konzistence a zpracovatelnosti betonů v čase. Betony s nanosilikou byly již po 30 minutách velmi obtížně zpracovatelné. Pevnosti betonů byly již od počátku vyšší než u referenční receptury. U betonů s optimalizovanou křivkou zrnitosti bylo při použití nanosiliky v kombinaci s nízkým vodním součinitelem dosaženo pevnosti v tlaku blížícím se 100 MPa.

To, že je možné získané poznatky přenést do praktického využití (byť v omezeném rozsahu), bylo potvrzeno v poslední části práce. Zde byla vyzkoušena částečná optimalizace křivky zrnitosti u samozhutnitelného betonu třídy C 40/50 XF4. Se surovinami běžně používanými v závodu Strážnice firmy Prefa Brno, a.s. byl namíchán beton s optimalizovanou křivkou zrnitosti, který byl svými fyzikálně mechanickými vlastnostmi srovnatelný s původní recepturou. Oproti původní receptuře však došlo k zlepšení vizuální kvality povrchu betonového výrobku a k mírnému snížení materiálové ceny betonu.

Pro optimalizaci křivky zrnitosti byl sestaven jednoduchý výpočtový program, který dokáže sestavit křivku zrnitosti z více materiálů. Díky zadání minimálního množství jednotlivých materiálů, které má být ve směsi použito, je tento program použitelný pro sestavení křivky zrnitosti betonů prakticky všech pevnostních tříd. Pro další vylepšení programu by bylo vhodné doprogramovat i možnost zadání maximálního možného množství jednotlivých materiálů.

## **6. Přínos pro vědní obor a praxi**

Z dosažených výsledků lze pro vědeckou i praktickou část oboru vyvodit následující přínosy:

- Práce shrnuje poznatky o různých druzích příměsí do betonu a uvádí způsoby, jakými tyto příměsi modifikují mikrostrukturu betonu a jaký mají vliv na jeho vlastnosti. V přehledu jsou uvedeny jak příměsi běžně používané, tak i příměsi nové, které zatím v praxi používány nejsou.
- Práce přináší nový pohled na způsob návrhu složení čerstvého betonu, kdy je sestavována křivka zrnitosti nejen u kameniva, ale i u pojiva tak, aby bylo dosaženo co možná nejhutnější matrice.

- Práce detailně mapuje vlastnosti několik vytipovaných příměsí. Vlastnosti kompozitu s těmito příměsemi byly následně ověřeny na cementových maltách.
- Byla vyvinuta metodika, jak sestavit křivku zrnitosti betonu ze známých křivek zrnitosti jednotlivých materiálů (cementu, příměsí a kameniva).
- Byla ověřena účinná metodika dávkování nanosiliky do betonů.
- Byl ověřen příznivý vliv dávkování nanosiliky na mechanické vlastnosti betonu.
- Při praktické zkoušce bylo ověřeno, že optimalizací křivky zrnitosti lze účinně snížit materiálové náklady receptury při současném zachování vysokých užitečných vlastností betonu.
- Bylo prokázáno, že optimalizací křivky zrnitosti lze docílit snížení uhlíkové stopy betonu.
- Byl sestaven jednoduchý výpočetní program k sestavení optimální křivky zrnitosti dle zadaných parametrů

## 7. Seznam použité literatury

- [1] ACI Committee 234, Guide for the Use of Silica Fume in Concrete 1<sup>st</sup> ed, Farmington Hills, 2006, 63 p
- [2] J. Lukáš, Současné trendy ve stavebnictví betony speciálních vlastností, Brno 2007, 98 p
- [3] Mineral Admixtures, Using Microsilica to Increase Concrete's Resistance to Aggressive Chemicals T.A. Dutiny and M.C. Hicks, 1991,
- [4] Taфраoui A. et al., Metakaolin in the formulation of UHPC, Constr Build Mater 2008, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [5], Kornnika Wianglor, Sakprayut Sinthupinyo, Manow Piyaworapaiboon, Arnon Chaipanich, Effect of alkali-activated metakaolin cement on compressive strength of mortar, 2017, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [6] [www.keramost.cz](http://www.keramost.cz)
- [7] Bensted J., Barnes P., Structure and Performance of Cements
- [8] FEČKO, Peter. *Popílky*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2003, 187 s. ISBN 80-248-0327-5.
- [9] Collepardi S., Borsio A., Olagot J., Troli R., Collepardi M., Curzio A., Influence of nano-sized mineral additions on performance of SCC, S.Collepardi, A. Borsio, J. Olagot, R. Troli, M. Collepardi, A. Curzio), [www.encosrl.it](http://www.encosrl.it)

- [10] Aitcin Pierre – Claude, Vysokohodnotný beton 1. české vydání, EBS, 2005, 320s
- [11] Construction and building materials – Microstructure of composite cement containing blast-furnace slag and silica nano-particles subjected to elevated thermally treatment temperature, 2015, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [12] Hela R, Technologie betonu II, studijní opora, VUT FAST Brno
- [13] Muller Ch; Performance of portland – composite cements, přepracovaný text přednášky z Technické a vědecké cementářské konference 2005 pořádané 27. a 28. října 2005 v Norinberku Německou cementářskou asociací., [www.svcement.cz](http://www.svcement.cz)
- [14] Sarbjeed Singh, Ravindra Nagar, Vinay Agrawal; A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand, 2016, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [15] A. Bhattacharjee, H. Mandal, M. Roy, J. Kusz, M. Zubko, P. Gütlich; Microstructural and magnetic characterization of dusts from a stone crushing industry in Birbhum, India; [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [16] Byung-Wan Jo, Chang-Hyun Kim, Ghi-ho , Jong-Bin Park Characteristic of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles, 2005, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [17] A. Lazaro, H. J. H. Brouwers, G. Quercia, J. W. Geus; The properties of amorphous nano-silica synthesized by the dissolution of olivine; 2012; [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [18] Ye Qing, Zhan Zenan, Kong Deyu, Chen Rongshen, Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste, 2005, [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [19] [www.webmineral.com](http://www.webmineral.com)
- [20] H. Assaedi, F. U. A. Shaikh, I. M. Low; Journal of Asian Ceramic Societies – Effects of nanoclay on durability and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites; 2017; [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [21] A. Hamaky, F. U. A. Shaikh, I. M. Low; Effect of calcined nanoclay on the durability of NaOH treated hemp fabric-reinforced cement nanocomposites; 2016; [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [22] A. Hamaky, F. U. A. Shaikh, I. M. Low; Characteristics of nanoclay and calcined nanoclay-cement nanocomposites; 2015; [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [23] G. Montes-Hernandez, A. Fernández-Martínez, L. Charlet, D. Tisserand, F. Renard; Textural properties of synthetic nano-calcite produced by hydrothermal carbonation of calcium hydroxide; 2008; [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

- [24] Seda Yesilmen, Yazim Al-Najjar, Mohammad Hatam Balav, Mustafa Sahmaran, Gürkan Yildirim, Mohamad Lachemi; Cement and concrete research – Nano-modification to improve the ductility of cementitious composite; 2015; [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [25] Mohamed Abd Elrahman, Bernd Hillemeier; Construction and Building Materials; Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach; 2014; [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [26] Libya Ahmed Sbia, Amirpasha Peyvandi, Parviz Soroushian, Anagi M. Balachandra, Konstantin Sobolev; Evaluation of modified-graphite nanomaterials in concrete nanocomposite based on packing density principles; 2015; [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [27] ČSN EN 1097 – 4; Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 4: Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru; 2008
- [28] [www.heidelbergcement.cz](http://www.heidelbergcement.cz)
- [29] ELFMARKOVÁ, Veronika. Vliv jemnozrnných příměsí na charakter pórového systému betonu. Brno, 2013. 133 s., 4 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavení, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [30] LABAJ Martin. Betony s vysokoteplotními popílkami aktivovanými nanočásticemi.. Brno, 2016. 127 s. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavení, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [31] Centrum dopravního výzkumu, Studie o vývoji dopravy z hlediska životního prostředí v české republice za rok 2016, Brno, září 2017
- [32] M. Ö. A. Akan, D. G. Dhavale, J. Sarkis; Greenhouse gas emissions in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete supply chain; 2017; [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [33] S. C. Bostanci, M. Limbachiya, H. Kew; Use of recycled aggregates for low carbon and cost effective concrete construction; 2018; [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)
- [34] [www.cemex.cz](http://www.cemex.cz)

## 8. Curriculum vitae

### Osobní údaje:

Jméno a příjmení: Pavel Louda  
Datum narození: 23. 4. 1985  
Stav: ženatý  
Bydliště: Voroněžská 1, 616 00 Brno – Žabovřesky

### Dosažené vzdělání:

2012 – dosud: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, doktorský studijní program, Obor: Fyzikální a stavebně materiálové inženýrství, Státní doktorandská zkouška absolvována  
6. 2. 2014.  
2004 – 2010: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Obor: Stavebně materiálové inženýrství, získán titul inženýr.  
2000 – 2004: Střední průmyslová škola stavební Hradec Králové

### Pracovní zkušenosti:

06/2010 – 12/2011: Pracovník AZL, Skanska transbeton, s. r. o.  
01/2012 – 12/2013: technolog závodu Oslavany, Prefa Brno, a. s.  
01/2014 – 12/2016: technolog regionu Morava, Skanska transbeton, s. r. o.  
01/2017 – dosud: hlavní technolog, Prefa Brno, a. s.

### Publikační činnost:

LOUDA, P.; PŘIKRYL, J.; NOVOSAD, P.; SVORA, P.; HOLÁK, M.; HELA, R.; Funkční vibrolisovaná dlažba s ekologickým benefitem, *Technologie betonu 2013*, ČBS Servis s. r. o., Jihlava, str. 105 – 115, ISBN 978-80-87158-33-3

NOVOSAD, P.; VÁLEK, J.; PŘIKRYL, J.; LOUDA, P.; HOLÁK, M.; SVORA, P.; HELA, R.; Functional Vibro Pressed Pavement with Ecological Benefits, 2013; p. 328 – 332, Trans Tech Publication Ltd, Switzerland,

JELÍNEK. J.; LOUDA. P.; Tři příklady stínících betonů, 12. *Konference Speciální betony 2015*, SEKURKON s. r. o., 2015, ISBN 978-80-86604-67-1

ZBOŘILOVÁ, LOUDA; Obloukové betonové trouby, Městské vody 2018, Ardec, s.r.o.; ISBN 978-80-86020-87-7

HELA, JANČAŘÍKOVÁ, LOUDA, JOBÁNEK; Optimization of heavy weight concrete composition and process of prefabrication for prefabricated shielding cladding tiles, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 10.1088/1757-899X/385/1/012016

TERZIJSKI, KOCÁB, STRNAD, ZLÁMAL, LOUDA; Srovnání korozní odolnosti betonů vůči působení síranů, 25. Betonářské dny, Česká betonářská společnost ČSSI; 2018, ISBN 978-80-906759-6-4

#### **Výzkumné projekty:**

TA01011030 – Fotokatalytické betonové prefabrikáty na bázi TiO<sub>2</sub> se samočisticími účinky

TA02010680 – Využití recyklovatelných odpadů pro výrobu prefabrikovaných stavebních dílců

FV 10680 – Vývoj prefabrikovaných dílců z HWC a HPC pro speciální aplikace v přesném strojírenství a radiační ochraně

FV 10304 – Využití teplárenské strusky při výrobě betonového zboží

TH02020871 – Obloukové prefabrikované trouby se zvýšenou trvanlivostí a odolností vůči vysokým teplotám

FV 10588 – Nová generace prostorových prefabrikátů z vysokohodnotných betonů se zvýšenou mechanickou odolností a trvanlivostí

TH03020067 – FRP výztuž se zvýšenou spolehlivostí a trvanlivostí při vysoko-cyklickém zatížení



## 9. Abstrakt

### ABSTRAKT

V teoretické části práce jsou popsány vlastnosti jemnozrnných příměsí a způsoby, jakými tyto příměsi modifikují cementový tmel a vlastnosti betonu. Dále jsou zde popsány způsoby, jak lze sestavovat křivky zrnitostí v rozmezí 0 - 1000  $\mu\text{m}$ . V praktické části jsou popsány vlastnosti všech složek betonu, které byly pro zkoušky použity. Z příměsí a cementu byly sestavovány jednotlivé křivky zrnitostí. Sestavování křivek zrnitosti bylo prováděno v první fázi manuálně za pomoci programu MS Excel. Následně byl na základě poznatků ze skládání křivek zrnitosti vyvinut jednoduchý program, který dle zadaných limitů složí křivku zrnitosti automaticky. Maximální náhrada cementu byla stanovena na 25% hmotnosti. Fyzikálně - mechanické vlastnosti takto sestavených křivek zrnitosti byly nejprve ověřeny na maltových směsích, kde byly ověřovány zejména zpracovatelnost, objemová hmotnost a pevnost v čase 7, 28 a 90 dní. U vybraných receptur byla navíc ověřena pórovitost cementového tmele pomocí rtuťové porozimetrie. Získané poznatky byly následně v laboratoři aplikovány na beton. Zde byla maximální náhrada cementu stanovena na 30%. Ověřovány byly zejména konzistence betonu v čase, obsah vzduchu v betonu a pevnost betonu v tlaku po 3, 7, 28 a 90 dnech. Ověření bylo provedeno i v praxi při optimalizaci samozhutnitelného betonu. U optimalizované receptury byly zachovány mechanické vlastnosti, ale oproti původní receptuře došlo k finanční úspoře a ke snížení emisí CO<sub>2</sub>.

### KLÍČOVÁ SLOVA

Beton; jemnozrnné příměsi; křivky zrnitosti; Fullerova křivka zrnitosti; pevnost v tlaku; objemová hmotnost; samozhutnitelný beton; konzistence; pórovitost;

### ABSTRACT

The theoretical part describes the properties of fine-grained admixtures and the ways how these admixtures modify concrete properties. There are also described ways to assemble grain curves in the range 0-1000  $\mu\text{m}$ . The practical part describes the properties of all the concrete components used for the tests. From the admixtures and cement, the individual grain curves were compiled. Curves were assembled in the first stage manually by using MS Excel. Subsequently, a simple program was developed based on the knowledge of composing grain curves, which automatically compiles the grain curve according to the given limits. The maximum cement replacement was set at 25% by weight. The physical and mechanical properties of the graded curves thus established were first verified on mortar mixtures where the workability, bulk density and strength were verified at the age 7, 28 and 90 days. In addition, the porosity of cement cement with mercury porosimetry has been verified for selected recipes. The acquired knowledge was subsequently applied to the concrete in the laboratory. Here the maximum cement compensation was set at 30%. In particular, concrete consistency over time, air content in the concrete and compressive strength of concrete at the age 3, 7, 28 and 90 days were verified. Verification was also carried out in practice on the optimization of self-compacting concrete. Mechanical properties have been retained for optimized recipe but there were financial savings and CO<sub>2</sub> emissions reductions compare with the original recipe.

### KEYWORDS

Concrete; fine-grained admixtures; grain curves; Fuller grain curve; compressive strength; density; self-compacting concrete; consistency; porosity;