



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

DISERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. Pavel Louda

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2019

ABSTRAKT

V teoretické části práce jsou popsány vlastnosti jemnozrnných příměsí a způsoby, jakými tyto příměsí modifikují cementový tmel a vlastnosti betonu. Dále jsou zde popsány způsoby, jak lze sestavovat křivky zrnitosti v rozmezí 0 - 1000 μm . V praktické části jsou popsány vlastnosti všech složek betonu, které byly pro zkoušky použity. Z příměsí a cementu byly sestavovány jednotlivé křivky zrnitosti. 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, objemové hmotnosti a pevnosti 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 CO₂.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton; jemnozrnné příměsí; 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 μm . 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 CO₂ 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;

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Ing. Pavel Louda *Studium vlivu granulometrie jemných částic na fyzikálně-mechanické vlastnosti betonů*. Brno, 2018. 133 s., 142 s. příl. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem disertační práci s názvem Studium vlivu granulometrie jemných částic na fyzikálně-mechanické vlastnosti betonů zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 17. 12. 2018



Ing. Pavel Louda
autor práce

Poděkování

Děkuji svému školiteli prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc. za poskytnuté materiály a podnětné připomínky k této práci. Dále děkuji svým rodičům a své manželce za podporu a trpělivost...

Obsah

1. Úvod.....	5
2. Cíl práce	6
3. Teoretická část	7
3.1 Křemičité úlety	8
3.1.1 Druhy mikrosiliky	8
3.1.2 Fyzikální vlastnosti	9
3.1.3 Chemické složení	10
3.1.4 Proměnlivost vlastností.....	11
3.1.5 Mechanizmy, kterými křemičité úlety modifikují cementový tmel.....	11
3.1.6 Vliv křemičitých úletů na vlastnosti betonu	12
3.2 Metakaolin.....	17
3.2.1 Výroba metakaolinu.....	17
3.2.2 Fyzikální vlastnosti	17
3.2.3 Chemické a technické parametry metakaolinu	18
3.2.4 Vliv metakaolinu na mikrostrukturu betonu	18
3.2.5 Vliv metakaolinu na vlastnosti betonu v čerstvém stavu.....	19
3.2.6 Vliv metakaolinu na vlastnosti zatvrdlého betonu	20
3.3 Popílek	22
3.3.1 Produkce popílku.....	22
3.3.2 Druhy popílků	24
3.3.3 Fyzikální vlastnosti popílků.....	24
3.3.4 Chemické složení popílků.....	25
3.3.4 Vliv popílku na vlastnosti betonu v čerstvém stavu	25
3.3.5 Vliv popílku na vlastnosti zatvrdlého betonu.....	26
3.4 Vysokopeční granulovaná struska	27
3.4.1 Výroba vysokopeční granulované strusky	27

3.4.2 Způsoby chlazení strusky	27
3.4.3 Fyzikální vlastnosti	28
3.4.4 Chemické složení vysokopecní granulované strusky	28
3.4.5 Vliv strusky na vlastnosti čerstvého betonu	29
3.5.6 Vliv strusky na vlastnosti zatvrdlého betonu	30
3.5 Mletý vápenec.....	30
3.5.1 Původ a výroba mletého vápence	30
3.5.2 Vlastnosti mletých vápenců	31
3.5.3 Vliv mletého vápence na vlastnosti čerstvého betonu	32
3.5.4 Vliv mletého vápence na vlastnosti zatvrdlého betonu	32
3.6 Kamenné odprašky	33
3.6.1 Výroba kamenných odprašků	33
3.6.2 Vlastnosti kamenných odprašků	33
3.6.3 Vliv kamenných odprašků na vlastnosti čerstvého betonu	35
3.6.4 Vliv kamenných odprašků na vlastnosti zatvrdlého betonu	35
3.7 Nanosilika	35
3.7.1 Výroba nanosiliky	36
3.7.2 Vlastnosti nano-SiO ₂ vyrobeného olivínovou metodou.....	37
3.7.3 Vliv nano-SiO ₂ na vlastnosti cementového tmele	37
3.8 Nanojíly	38
3.8.1 Příprava nanojílů	38
3.8.2 Vlastnosti nanojílů	39
3.8.3 Vliv nanojílů na vlastnosti cementového tmele	40
3.8.4. Vliv nanojílů na mechanické vlastnosti betonu	40
3.9 Nanovápenec.....	41
3.9.1 Příprava nanovápence	41
3.9.2 Vlastnosti nanovápence	43

3.9.3 Vliv nanovápence na vlastnosti cementového tmele	44
3.9.4 Vliv nanovápence na mechanické vlastnosti betonu	45
4. Komplikace při používání nanočástic	46
4.1 Nutnost dispergace	46
4.2 Reaglomerace částic.....	46
4.3 Toxicita.....	47
4.4 Cena	47
5. Packing – sestavování křivek zrnitosti jemných částic.....	48
5.1 Aplikace známých křivek zrnitosti na jemnozrnné materiály v betonu.....	48
5.2 Aplikace normových postupů na jemnozrnné materiály v betonu	54
5.2.1 Postup optimalizace	55
6. Praktická část	56
6.1 Metodika práce	56
6.2 Rozbor surovin – chemické a fyzikální vlastnosti	58
6.3 Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru	80
6.4 Sestavení křivek zrnitosti	81
6.5 Fyzikálně – mechanické vlastnosti navržených směsí	89
6.6 Optimalizace křivky zrnitosti na betonech	111
6.7 Fyzikálně mechanické vlastnosti betonů	113
6.7.1 Fyzikálně mechanické vlastnosti betonu s optimalizovanou křivkou zrnitosti	120
6.8 Ověření poznatků v praxi	121
6.8.1 Suroviny:	121
6.8.2 Původní receptura	122
6.8.3 Postup optimalizace:	122
6.8.4 Optimalizovaná receptura.....	123
6.8.5 Fyzikálně mechanické vlastnosti betonů	124
6.8.6 Vizuální porovnání povrchů zkoušených receptur	125

6.8.7 Zhodnocení ekonomické výhodnosti optimalizované receptury	126
6.8.8 Zhodnocení ekologické výhodnosti optimalizované receptury	127
6.9 Sestavení výpočetního programu k optimalizaci křivek zrnitosti	128
6.9.1 Vstupní parametry pro výpočet.....	129
6.9.2 Výsledky sestavení křivky zrnitosti výpočetním programem.....	130
7. Přínos pro vědní obor a praxi	131
8. Závěr	132
9. Seznam použitých zdrojů.....	134
9.1 Seznam použité literatury.....	134
9.2 Seznam obrázků	137
9.3 Seznam grafů.....	139
9.4 Seznam tabulek	141

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 CO₂, které se při výrobě betonu uvolňují (nejvíce CO₂ se uvolňuje při výrobě portlandského cementu – na 1 kg cementu se uvolní 0,75 až 1,0 kg CO₂ v závislosti na podmínkách výroby).

2. Cíl práce

Cílem teoretické části práce je shrnout dostupné poznatky o příměsích používaných v současnosti do betonů za účelem získání betonů speciálních vlastností. Dalším úkolem teoretické části je popsat vlastnosti nových druhů příměsí jako jsou nanosilika, nanovápenec a nanojíly a způsoby, jakými jsou tyto příměsí vyráběny a shrnout dosavadní poznatky o jejich dávkování do betonů. Posledním úkolem byla rešerše 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 v laboratoři
- praktické uplatnění navrženého postupu optimalizace při výrobě samozhutitelného betonu – srovnání užitných vlastností, ekonomické a ekologické porovnání receptur
- vytvoření jednoduchého výpočtového programu, který by na základě vstupních podmínek byl schopen sestavit optimální křivku zrnitosti.

3. Teoretická část

V této části práce jsou popsány vlastnosti rozličných příměsí do betonů. Některé jsou do betonů používány běžně (popílky, struska), některé zejména kvůli své vyšší ceně či nižší přidané hodnotě méně (mleté vápence, kamenné odprašky), některé kvůli své vysoké pořizovací ceně pouze ve speciálních případech (mikrosilika, metakaolin) a pak také příměsí, jejichž použití v betonech je zatím spíše v experimentální fázi používání (nanosilika, nanovápenec, nanojíly).

Samotné příměsí do betonu lze rozdělit takto:

Pasivní příměsí – chemicky nereagují, započítávají se k plnivu. Jedná se zejména o kamenné odprašky nebo velmi jemně mleté křemenné a živcové písky.

Aktivní příměsí – chemicky reagují a tvoří podobné minerály, které vznikají hydratací portlandského cementu, při výpočtu složení betonové směsi se počítají k pojivu. Dále se dělí na:

- Látky latentně hydraulické – samy o sobě nehydratují, hydratují až po přidání iniciátoru (alkalický nebo síranový). Mezi tyto látky patří například vysokopecní struska.
- Látky pucolánové – netuhnou ani netvrdnou a to ani po přidání iniciátoru. Obsahují amorfni SiO_2 , který je schopen po kontaktu s vodou částečně přecházet v gely kyseliny křemičité, která je dále schopna reagovat s Ca(OH)_2 za vzniku kalcium - hydrosilikátu obdobné povahy jako při hydrataci portlandských cementů. Mezi tyto látky patří popílek a křemičité úlety.

Ve svých technologických důsledcích je pucolanita i latentní hydraulická totožná, rozdíly jsou pouze v obsahu rozdílných minerálů.

3.1 Křemičité úlety

Křemičité úlety (mikrosilika) jsou druhotným produktem z výroby křemíku a křemíkových slitin v elektrických obloukových pecích. Křemičité úlety kondenzují z plynu unikajících z pece – mají vysoký podíl amorfního SiO_2 a jsou složené z kulových částic s velikostí 0,1 - 0,2 μm .

3.1.1 Druhy mikrosiliky

Neupravovaná – mikrosilika je ve formě velmi jemného prášku sebraného z odprašovacích filtrů přímo určena k dalšímu využití. Kvůli své extrémní jemnosti a nízké objemové hmotnosti dochází k problémům s transportem (tvorba nálepků, ucpávání pneumatických pump, ucpávání šnekových dopravníků) a veliké prašnosti při následném zacházení. Použití mikrosiliky v tomto stavu je z praktického použití v betonech velmi problematické.

Koloidní – mikrosilika je dodávána ve vodním roztoku, tato kaše je lépe transportovatelná snadno zpracovatelná. Většinou tato kaše obsahuje 42 – 60% mikrosiliky. Do roztoku mohou být přidány chemické příměsi (superplastifikátory). V tomto stavu musí před použitím do betonu dojít k homogenizaci směsi. Výhodou použití mikrosiliky v koloidním stavu je přesnost dávkování a snadné rozmíchání v čerstvém betonu.

Kompaktní – mikrosilika je dodávána ve formě aglomerovaných částic, k této aglomeraci dochází v sílech, odkud jsou těžší aglomerované částice periodicky odebírány a dále zpracovávány jako např. portlandský cement. Tento proces výrazně snižuje prašnost. Částice křemičitých úletů jsou mezi sebou vázány jen velmi malými povrchovými silami a k jejich opětovnému rozdělení dochází při míchání betonu. [1] V kompaktním stavu je mikrosilika dávkována pomocí šnekových dopravníků ze síla. Pro lepší homogenitu čerstvého betonu bývá třeba mírně prodloužit dobu míchání.

3.1.2 Fyzikální vlastnosti

Barva – světle až tmavě šedá, samotný SiO_2 je bezbarvý, zbarvení závisí především na obsahu uhlíku a oxidů železa.

Sypná hmotnost – závisí na druhu úpravy mikrosiliky.

Neupravovaná	130 – 430kg/m ³
Koloidní	1300 – 1400kg/m ³
Kompaktní	400 – 700kg/m ³

S větší objemovou hmotností u kompaktní mikrosiliky však dochází k zhoršení rozmíchatelnosti částic, což může negativně ovlivňovat výsledné vlastnosti betonu.

Měrný povrch – křemičité úlety se vyznačují velmi vysokým měrným povrchem a velmi malou velikostí částic. Pro porovnání jsou uvedeny měrné povrchy dalších práškových příměsí do betonu:

Křemičitý úlet	13000 – 30000 m ² /kg
Popílek	280 – 700 m ² /kg
Vysokopeční struska	350 – 600 m ² /kg
Portlandský cement	300 – 400 m ² /kg
Mikromletý vápenec	250 - 500 m ² /kg

Tyto hodnoty však nelze vzájemně zcela dobře porovnat. Měrný povrch u mikrosiliky se měří nejčastěji pomocí dusíkové adsorpce, zatímco u ostatních materiálů je nejpoužívanější metodou zjištění měrného povrchu dle Blaina.

3.1.3 Chemické složení

Chemické složení ve velké míře souvisí s druhem vyráběného primárního produktu (zda je vyráběn křemík, nebo slitina křemíku), jak je vidět v následující tabulce.

Typ vyráběného produktu	Si*		FeSi-75%*		Směs Si a FeSi-75%‡		FeSi-75% ^θ		Si [§]	
poč. vzorků n	42		42		32		6		28	
	Ø obsah	st. odch.	Ø obsah	st. odch.	Ø obsah	st. odch.	Ø obsah	st. odch.	Ø obsah	st. odch.
SiO ₂	93,65	3,84	93,22	1,71	92,10	1,29	91,40	0,92	94,22	0,34
Al ₂ O ₃	0,28	0,13	0,31	0,20	0,25	0,12	0,57	0,03	0,36	0,04
Fe ₂ O ₃	0,58	2,26	1,12	0,86	0,79	0,70	3,86	0,41	0,10	0,01
CaO	0,27	0,07	0,44	0,34	0,38	0,11	0,73	0,08	0,27	0,05
MgO	0,25	0,26	1,08	0,29	0,35	0,10	0,44	0,05	0,20	0,02
Na ₂ O	0,02	0,02	0,10	0,06	0,17	0,04	0,20	0,02	-	-
K ₂ O	0,49	0,24	1,37	0,45	0,96	0,22	1,06	0,05	-	-
S	0,20	0,16	0,22	0,06	-	-	-	-	-	-
SO ₃	-	-	-	-	0,36	0,10	0,36"	0,16"	-	-
C	3,62 [#]	0,96 [#]	1,92 [#]	1,15 [#]	-	-	-	-	3,05	0,25
ztr. žiháním	4,36 [#]	1,48 [#]	3,1 [#]	0,9 [#]	3,20	0,45	2,62"	0,42"	3,60	0,33

Tab. 1 – Chemické složení mikrosiliky v závislosti na druhu vyráběného primárního produktu

Pozn: tabulka převzata z Guide for Use of Silica Fume in Concrete ACI 234R-06 [1]

Vysvětlivky: * Nebesa a Carrete 1986

‡ Pistilli a kol. 1984a

^θ Pistilli a kol 1984b

§ Luther 1989

n = 24

" n = 30

3.1.4 Proměnlivost vlastností

Křemičité úlety z jednoho zdroje mají většinou vyrovnanou kvalitu a stálé chemické složení, což je dáno vysokou kontrolou při výrobě slitin. Vliv na vlastnosti má také věk a stav pece a samozřejmě kvalita vstupní suroviny.

3.1.5 Mechanizmy, kterými křemičité úlety modifikují cementový tmel

Lepší tvorba krystalizačních zárodků – mikrosilika výrazně přispívá k rychlejší hydrataci cementu. Poskytuje krystalizační zárodky, díky nimž se mohou hydratační produkty rychleji vysrážet z roztoků. K dosažení stejného efektu však postačí použít jemné netečné příměsi bez pucolánové aktivity.

Lepší obalení částic – mikrosilika zlepšuje obalení pevného materiálu, zabírá mezery mezi zrny cementu, stejně jako cement zabírá mezery mezi kamenivem, čímž přispívá k vytvoření hutnější mikrostruktury s menším průměrem vzduchových pórů a s menším množstvím pórové vody v struktuře zatvrdlého betonu.

Zvýšení požadavku na množství záměsové vody – díky vysokému měrnému povrchu křemičitých úletů stoupá spotřeba záměsové vody, která je potřeba pro zachování určitého stupně zpracovatelnosti, což vede k degradaci vlastností betonu. Z tohoto důvodu je pro zachování nízkého vodního součinitele nutné použití superplastifikátorů.

Chemický efekt – křemičitý úlet je vysoce reaktivní pucolán. V hydratujícím cementu reaguje s hydroxidem vápenatým za vzniku C-S-H gelu (rychlost této reakce závisí na teplotě). Křemičitý úlet v dostatečné dávce po čase vyváže všechny $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Například dle zkoumání 50% křemičitého úletu z dávky cementu vyváže všechny $\text{Ca}(\text{OH})_2$ do 14 dnů a při dávce 20% do 91 dnů [1]

Modifikace mikrostruktury – hlavním efektem je snížení porozity tranzitní zóny mezi cementovým tmelem a kamenivem, což je nejslabší místo ve většině betonů. Dále mikrosilika zlepšuje pevnost vazby mezi cementovým tmelem a kamenivem, je tak překonán efekt tranzitní zóny jako nejslabšího místa v betonu a díky tomu je dosahováno vysokých pevností.

Pórovitost – mikrosilika činí strukturu cementového tmele více homogenní snížením velikosti pórů. Díky menší velikosti pórů je beton hůře propustný pro vodu, což vede k zvýšení trvanlivosti betonu.

Chemické složení pórové vody – křemičitý úlet mění chemismus hydratovaného portlandského cementu, zvyšuje jeho schopnost vázat alkálie

a snižuje schopnost vázat chloridy. Křemičitý úlet také mírně snižuje pH pórového roztoku, ale ne do takové míry, aby byla vložená výztuž ohrožena korozí.

Teplota hydratace – křemičitý úlet zvyšuje rychlost hydratace, zejména přispívá k rychlejší hydrataci alitu. Počáteční vývin tepla je zesílen přítomností aktivního SiO_2 . [1]

3.1.6 Vliv křemičitých úletů na vlastnosti betonu

Výsledné ovlivnění vlastností betonu velmi závisí na vlastnostech křemičitého úletu, na jeho měrném povrchu a na obsahu SiO_2 . Křemičité úlety se vyznačují vysokou pucolánovou aktivitou a výrazně modifikují vlastnosti betonu a to jak v čerstvém stavu, tak i v zatvrdlém stavu.

Vlastnosti čerstvého betonu s mikrosilikou

Zpracovatelnost – čerstvý beton se díky přidavku křemičitého úletu stává více kohezní a méně náchylný k segregaci, pro zachování dobré zpracovatelnosti za současného zachování nízkého vodního součinitele je třeba použít superplastifikátorů.

Segregace – křemičitý úlet napomáhá zabraňovat segregaci, protože díky velkému měrnému povrchu a veliké jemnosti částic zahušťuje cementový tmel, ten je více kohezní a lépe obaluje kamenivo. K segregaci může docházet u velmi tekutých konzistencí (špatně navržených SCC), nebo při převibrování betonu.

Doba tuhnutí – doba tuhnutí se přidáním křemičitého úletu výrazně nemění.

Krvácení – přidáním křemičitého úletu se výrazně snižuje krvácení (bleeding) čerstvého betonu. Ke krvácení může docházet u betonů řídkých konzistencí (špatně navržené SCC). K výraznému snížení krvácení dochází při vyšší dávce křemičitého úletu, protože díky vysokému měrnému povrchu, který je smáčen, zbývá méně vody na případné krvácení.

Plastické smrštění – beton s přidavkem křemičitého úletu je náchylnější ke vzniku smršťovacích trhlinek. U těchto betonů je důležité zabránit rychlému odpařování vody, hlídat teplotu hydratace, ošetřovat povrch betonu a zabránit přímému vysoušení betonu větrem či slunečním zářením.

Barva betonu – křemičité úlety dělají beton tmavší než je obvyklé zejména při vyšších dávkách. Nicméně barevné rozdíly se časem snižují, zejména je-li beton vystaven přímému slunečnímu svitu.

Objemová hmotnost čerstvého betonu – křemičitý úlet výrazně nemění objemovou hmotnost čerstvého betonu, neboť dávkování mikrosiliky bývá ve velmi malém množství (nejčastěji do 10 % z hmotnosti cementu)

Provzdušňování – betony s křemičitým úletem zpravidla vyžadují vyšší dávku provzdušňovací přísady k provzdušnění na stejnou úroveň, než je tomu u betonů bez křemičitých úletů. Je to dáno velikým měrným povrchem a dále také možným výskytem uhlíku v křemičitých úletech. Zvýšení dávky provzdušňovací přísady se pohybuje okolo 25 – 50%. [1] Nicméně dle ČSN EN 206 a TKP 18 nemusí být betony s mikrosilikou provzdušňovány, pokud v průkazných zkouškách prokážeme dostatečnou odolnost betonu proti působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek.

Vlastnosti zatvrdlého betonu

Dotvarování – přidáním mikrosiliky není výrazně ovlivněno dotvarování konstrukce. Ke snížení dotvarování je třeba beton pečlivě ošetřovat a chránit před rychlým vysoušením větrem či přímým slunečním zářením.

Smrštění – křemičitý úlet výrazně neovlivňuje hodnotu smrštění, dle prováděných pokusů (Carette a Malhotra, Sellevold a Wilsen, Hansen a Luther, a.d.) bylo u betonů s křemičitým úletem zjištěno buď stejné, nebo nepatrně větší smrštění než u betonů se srovnatelnou pevností bez křemičitých úletů.

Pevnost v tlaku – křemičitý úlet má velký vliv na pevnost betonu, jeho přidáním do betonové směsi docílíme homogennějších vlastností cementového tmele a snížíme negativní vlastnosti tranzitní zóny (nejslabší místo většiny betonů). Díky těmto efektům a také díky vysoké reaktivnosti mikrosiliky dochází ke zvýšení pevnosti betonu v tlaku. Vysoký příspěvek ke zvýšení pevností má křemičitý úlet zejména u pevností do 28 dnů. Po 28 dnech bývá zpravidla pevnost v tlaku u betonu s křemičitým úletem výrazně větší než u betonu se stejným složením bez křemičitého úletu. V delším časovém úseku beton dále zvyšuje svou pevnost až o 15%. Výsledná pevnost je rovněž závislá na dalších faktorech jako například dávce pojiva, druhu kameniva, vodním součiniteli, ošetřování, teplotě, atd.

Pevnost v tahu za ohybu – vývoj pevnosti v tahu za ohybu je u betonu s křemičitým úletem podobný jako u betonu bez křemičitého úletu. Pro oba druhy betonu platí, že se zvýšením pevnosti v tlaku dochází ke zvýšení pevnosti v tahu.

Postupně však klesá poměr mezi tlakovou a tahovou pevností. Tento poměr je ovlivněn vlastnostmi použitých materiálů.

Permeabilita – mikrosilika ve velké míře přispívá ke zmenšení průměru pórů, čímž značně ztěžuje přístup vody do konstrukce – beton se tak stává pro vodu téměř nepropustný, čímž se značně snižuje riziko přístupu agresivních látek do betonu a zvyšuje se tak trvanlivost betonu. Dle měření (Hooton) se permeabilita s rostoucí dávkou křemičitého úletu snížila následovně:

Cementový tmel bez mikrosiliky, w/c = 0,25	$3,8 \times 10^{-3}$ m/s
Cementový tmel + 10% mikrosiliky, w/c = 0,25	$0,9 \times 10^{-13}$ m/s
Cementový tmel + 20% mikrosiliky, w/c = 0,25	$0,1 \times 10^{-13}$ m/s

Odolnost proti chloridům – křemičité úlety vysoce zvyšují schopnost betonů odolávat chloridové korozi, výztuž v těchto betonech je dobře chráněna proti chloridům. Proto se betony s přídavkem křemičitých úletů používají například na konstrukce mostů, parkovišť, přístavní konstrukce a další konstrukce vystavené působení chloridů.

Odolnost proti mrazu – i přes snížení velikosti pórů u betonu s křemičitým úletem není pozorováno tak výrazné zvýšení mrazuvzdornosti, jako u provzdušněných betonů. S velmi nízkým vodním součinitelem lze sice připravit beton s uspokojivou mrazuvzdorností, nicméně výsledků, kterých dosahujeme provzdušněním, samotnou mikrosilikou dosáhnout nelze.

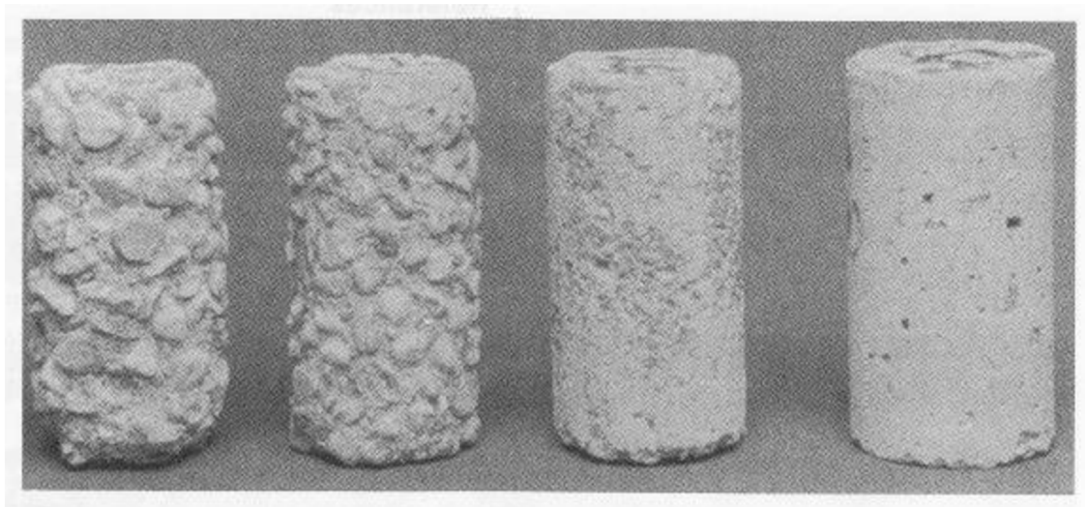
Odolnost proti síranům – odolnost betonu proti síranům je velmi důležitá vlastnost, protože vlivem působení síranů v zatvrdlém betonu může dojít k vzniku sekundárního etringitu, který zvětší svůj původní objem až o 270% a tím dojde k destrukci materiálu. Přídavkem křemičitého úletu do betonu dochází ke značnému zvýšení odolnosti proti síranům a to dvěma způsoby. Struktura cementového tmele je kompaktnější, což znesnadňuje přístup síranových iontů a dále křemičitý úlet reaguje s portlanditem – Ca(OH)_2 za vzniku nových hydratačních fází. Tím křemičitý úlet brání vzniku sekundárního etringitu. [1]

Alkalicko křemičitá reakce – tato reakce probíhá v zatvrdlém betonu mezi SiO_2 obsaženém v kamenivu a alkalickými roztoky v betonu. Vzniká alkalicko – křemičitý gel, který za současného zvětšování svého objemu způsobuje vysoké tlaky a následnou destrukci struktury betonu. Mikrosilika může silně redukovat tuto reakci. Mikrosilika reaguje v časném hydratačním stádiu cementu

intenzivně s alkalickými ionty v záměsové vodě a váže je do hydratačních produktů (C-S-H gelu) dále mikrosilika brání transportu vody v zatvrdlém betonu snížením velikosti kapilár a tím zabraňuje zvyšování koncentrace alkalických iontu potřebných ke spuštění alkalicko – křemičité reakce. Je prokázáno, že 10% mikrosiliky z množství cementu je schopno navázat třikrát více alkálií do C-S-H fáze, než portlandský cement. [2]

Trvanlivost – schopnost odolávat povětrnostním a chemickým vlivům je u betonu s přídavkem křemičitých úletů zvýšena. Díky hutnější struktuře, menšímu průměru pórů a lepšímu obalení kameniva cementovým tmelem se beton stává odolnější vůči degradaci, ale i proti chemickým vlivům než stejný beton bez křemičitých úletů. Na následujících obrázcích je vidět schopnost betonu s přídavkem křemičitého úletu odolávat různým druhům kyselin [3]

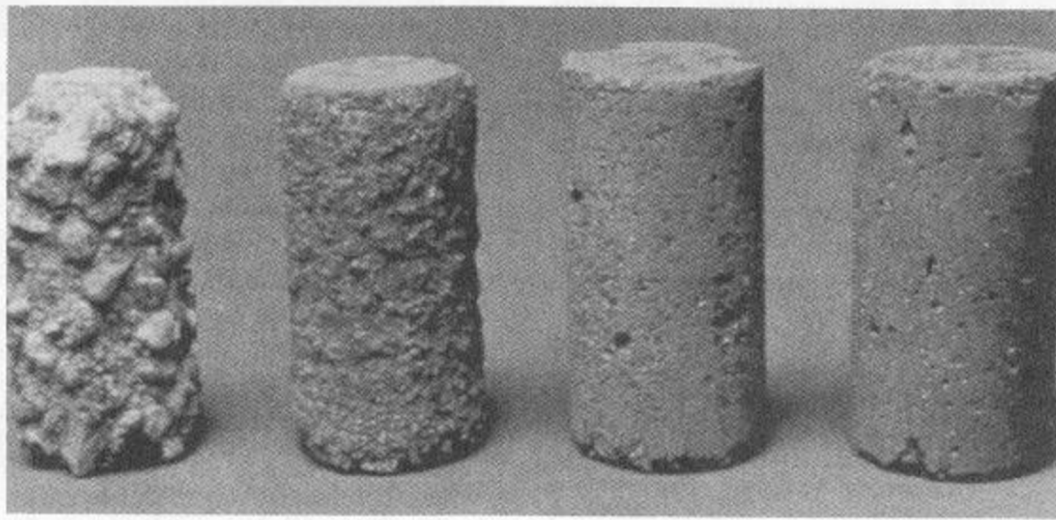
Kyselina octová 5% roztok, doba působení šest měsíců, obsah mikrosiliky v % z hmotnosti cementu zleva doprava 0, 7,5, 15, 30.



Obr. 1 – Vliv kyseliny octové na beton s různým obsahem mikrosiliky

Pozn: fotografie převzata z Mineral Admixtures, Using Microsilica to Increase Concrete's Resistance to Aggressive Chemicals T.A. Dutiny and M.C. Hicks, [3]

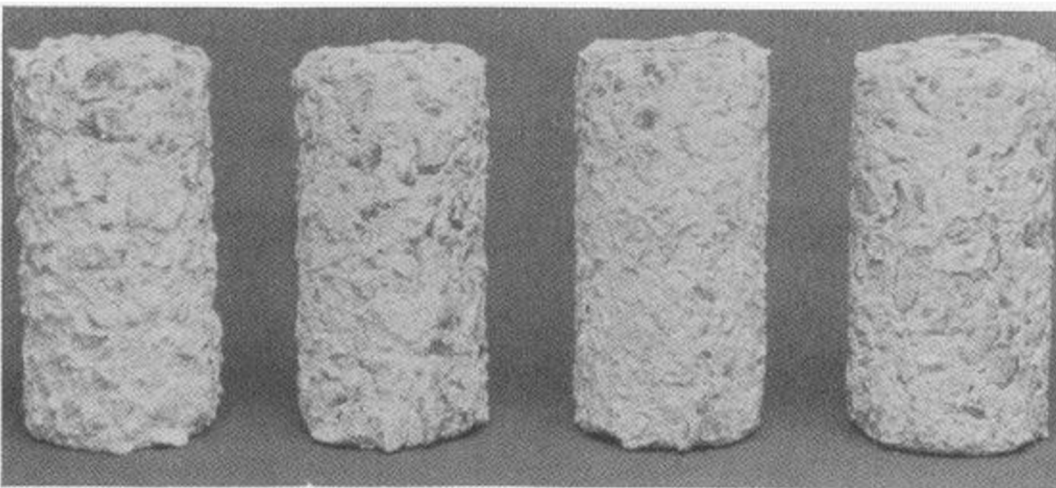
Kyselina mravenčí 5% roztok, doba působení devět měsíců, obsah mikrosiliky v % z hmotnosti cementu zleva doprava 0, 10, 20, 30.



Obr. 2– Vliv kyseliny mravenčí na beton s různým obsahem mikrosiliky

Pozn: fotografie převzata z Mineral Admixtures, Using Microsilica to Increase Concrete's Resistance to Aggressive Chemicals T.A. Dutiny and M.C. Hicks, [3]

Kyselina sírová 1% roztok, doba působení šest měsíců, obsah mikrosiliky v % z hmotnosti cementu zleva doprava 0, 7,5, 15, 30.



Obr. 3 – Vliv kyseliny sírové na beton s různým obsahem mikrosiliky

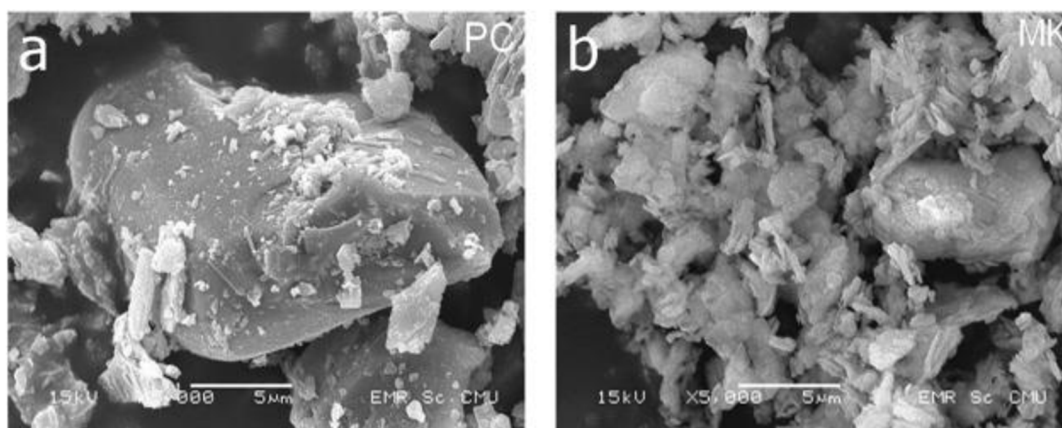
Pozn: fotografie převzata z Mineral Admixtures, Using Microsilica to Increase Concrete's Resistance to Aggressive Chemicals T.A. Dutiny and M.C. Hicks, [3]

3.2 Metakaolin

Metakaolin je materiál, který modifikuje vlastnosti betonu a na rozdíl od ostatních příměsí (např. křemičité úlety, popílky, struska) je vyráběn záměrně. Dále se také používá k výrobě žáruvzdorných materiálů, jako plnivo do pryže a plastů a pro další aplikace

3.2.1 Výroba metakaolinu

Výroba metakaolinu probíhá odvodněním kaolinu při teplotě okolo 700°C, což je asi o 800°C méně než teplota potřebná pro výpal cementu [4].



Obr. 4 - Srovnání velikosti částic portlandského cementu a metakaolinu

Pozn: převzato z Applied Clay Science – Effect of alkali-activated metakaolin cement on compressive strength of mortar, www.sciencedirect.com [5]

3.2.2 Fyzikální vlastnosti

Barva – světle šedá až bílá, v závislosti na obsahu barvicích oxidů. Pro svou světlou barvu se používá do betonů pro dekorační účely.

Měrný povrch – 10000 – 25000 m²/kg (měřeno metodou BET). Je podobný měrnému povrchu mikrosiliky, ale metakaolin má podstatně jiné chemické složení a morfologii.

3.2.3 Chemické a technické parametry metakaolinu

Chemické složení metakaolinu KM 60 vyráběného v ČR firmou Keramost:

Obsah Al_2O_3	min. 40 %
Obsah SiO_2	50 – 55 %
Obsah Fe_2O_3	max 1,45 %
Obsah $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	max 1,5 %
Obsah CaO	0,05 - 0,50 %
Obsah MgO	0,20 - 0,45 %

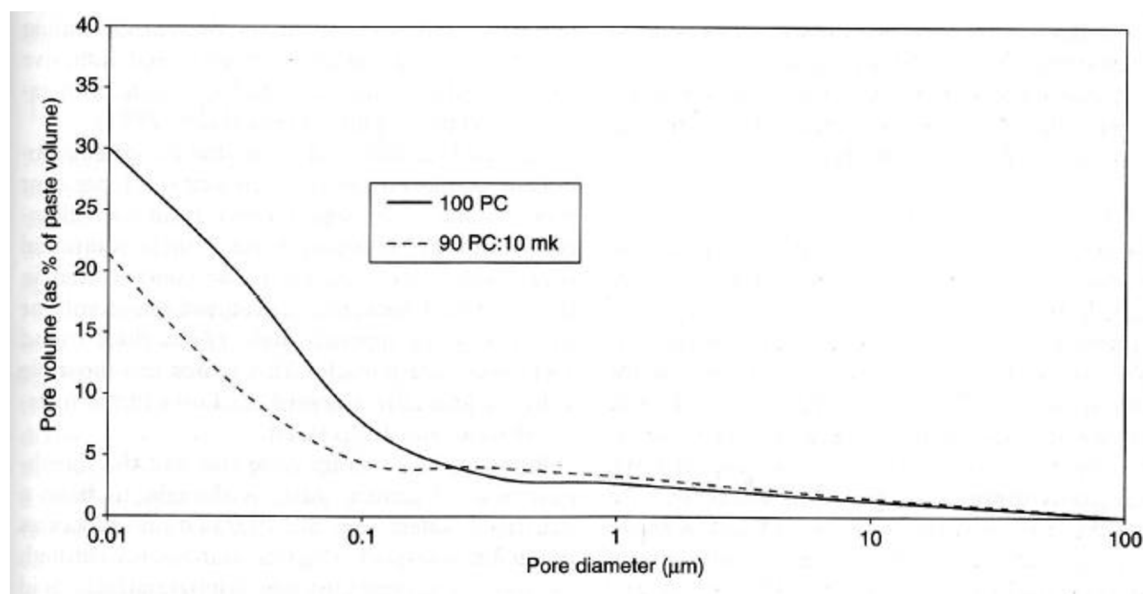
Technické parametry metakaolinu KM 60 vyráběného v ČR firmou Keramost:

Ztráta žíháním 900°C	max 3,5 %
Ztráta žíháním 1100°C	max 3,5 %
Hmot. aktivita Ra226	100 Bq/kg
Zbytek na síť 0,063 μm	max 2 %
Zbytek na síť 0,040 μm	max 3 %

Pozn: zdroj www.keramost.cz [6]

3.2.4 Vliv metakaolinu na mikrostrukturu betonu

Přidaný metakaolin reaguje s krystaly portlanditu – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, které mohou být 1-5 μm veliké a často jsou soustředěny uvnitř tranzitní zóny. Metakaolin vytváří s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nové hydratační produkty a modifikuje pórovou strukturu. Z následujícího grafu je patrné, že metakaolin snižuje obsah pórů o velikosti 0,01 μm a mírně zvyšuje obsah pórů okolo 1 μm . [4] [5] [7]



Graf 1 - Vliv metakaolinu na rozložení pórů v betonu

Pozn: graf převzat z Structure and Performance of Cement, J. Bansted a P. Barnes [7]

Metakaolin reaguje s portlanditem pozvolněji, než křemičitý úlet a pro úplné vyvázání $\text{Ca}(\text{OH})_2$ potřebuje delší čas. Dle měření (Curcio a kol.) bylo zjištěno, že v betonu s 15% náhradou portlandského cementu metakaolinem je původní $\text{Ca}(\text{OH})_2$ redukováno na 6 – 24% hodnoty kontrolního vzorku bez přídavku metakaolinu. Pro zreagování veškerého metakaolinu by bylo potřeba 20 – 25% náhrada cementu metakaolinem. [5]

3.2.5 Vliv metakaolinu na vlastnosti betonu v čerstvém stavu

Zpracovatelnost – s vysokou dávkou metakaolinu jako náhradou pojiva spolu s nízkým vodním součinitelem, může dojít k značnému zhoršení zpracovatelnosti. Pro zachování dobré zpracovatelnosti je do betonu nutno přidat plastifikační nebo superplastifikační přísadu.

Doba zpracovatelnosti – přidáním metakaolinu dochází k mírnému oddálení počátku tuhnutí a k prodloužení doby zpracovatelnosti. Toto prodloužení závisí na množství přidaného metakaolinu.

Vývin hydratačního tepla – přidání metakaolinu nemá velký vliv na změnu hydratačního tepla.

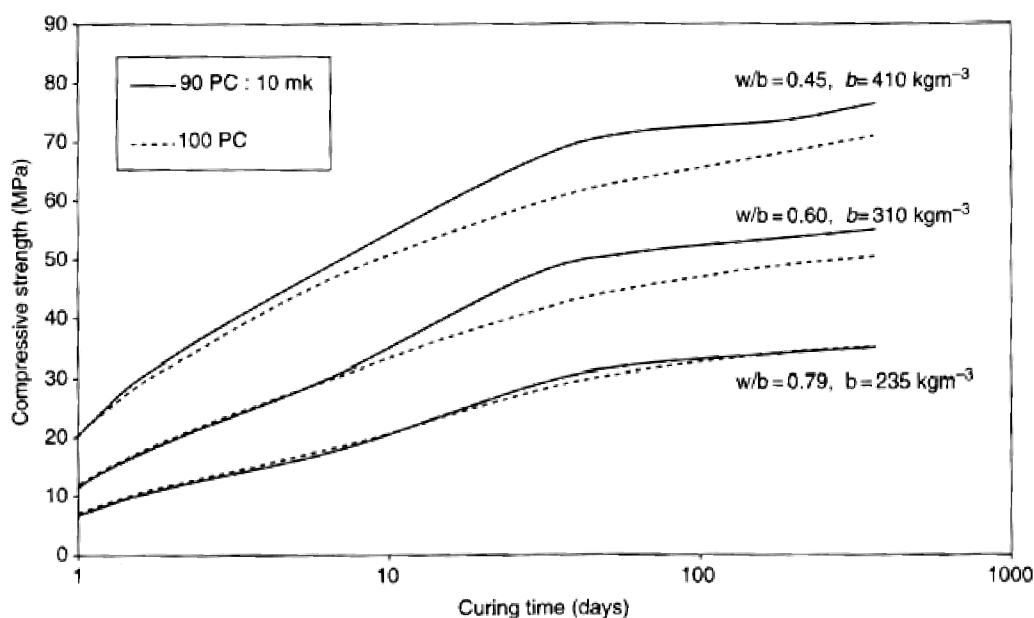
Barva betonu – díky světlému zabarvení metakaolinu je i beton výrazně světlejší.

Krvácení – metakaolin napomáhá k redukci krvácení. Při vysokých dávkách však zhoršuje zpracovatelnost, jak již bylo uvedeno.

Úprava povrchu – beton s metakaolinem má snáze upravitelný povrch, ten se lépe vyrovnává a zahlazuje. [7]

3.2.6 Vliv metakaolinu na vlastnosti zatvrdlého betonu

Pevnost v tlaku – přidání metakaolinu zvyšuje pevnost v tlaku betonu, což bylo potvrzeno mnoha studii (Dhir a kol, Ryle, Sabir,...). Toto zvýšení pevností je díky zvýšení pevnosti tranzitní zóny, jejíž vlastnosti jsou upraveny přidáním metakaolinu (nebo jiné reaktivní příměsi). Na výslednou pevnost má také velký vliv vodní součinitel, jak je vidět na tomto grafu. [4] [5] [7]



Graf 2 - Vliv vodního součinitele na pevnost betonu s metakaolinem

Pozn: graf převzat z Structure and Performance of Cement, J. Bansted and P. Barnes [7]

Výrazných zvýšení pevností betonu s metakaolinem lze dosáhnout přidávkem amonných polymerů (Sales a kol) a amonioaktivních polyakrylátů (Lota a kol). Důvodem je zřejmě to, že tyto kyseliny rozkládají cementová zrna a jednotlivé ionty Ca^{2+} , SiO_4^{4-} a OH^- lépe reagují s metakaolinem za vzniku nových cementových fází s modifikovanou morfologií. [7]

Pevnost v tahu za ohybu – i u betonu s přidávkem metakaolinu dochází, stejně jako u betonu s křemičitým úletem, spolu se zvýšením pevnosti v tlaku ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu. I zde platí, že poměr mezi pevnostmi se se zvyšující pevností v tlaku snižuje.

Chemizmus pórové vody – metakaolin mírně snižuje pH pórového roztoku, nicméně ne do takové míry, aby byla ohrožena ocelová výztuž. Ani při relativně vysokých dávkách metakaolinu (20%) není tento pokles pH nijak zásadní. Metakaolin dále váže chloridy rozpuštěné v pórové vodě za vzniku stabilních chlor-aluminátů, čímž rovněž přispívá k zvýšení trvanlivosti betonu.

Permeabilita - díky těsnější struktuře cementového tmele s metakaolinem, je ztížen transport vody betonem. Beton je více odolný proti působení agresivních látek rozpuštěných ve vodě. Nicméně podmínkou nízké propustnosti je rovněž zachování nízkého vodního součinitele.

Koroze výztuže – normálně je výztuž v betonu dobře chráněna, pokud nejsou přítomny chloridové ionty. Metakaolin tyto chloridové ionty váže za vzniku stabilních sloučenin a přispívá tak k ochraně výztuže v betonu. Metakaolin rovněž snižuje elektrickou vodivost, která může být rovněž příčinou koroze.

Karbonatace – při karbonataci dochází ke snížení pH, což může být problém u vyztužených betonů. Beton s metakaolinem je proti karbonataci odolnější díky snížené permeabilitě.

Alkalicko křemičitá reakce – dle výsledků (Walter a kol.) bylo zjištěno, že již 10 – 15% metakaolinu jako náhrady portlandského cementu úspěšně zabraňuje škodlivému rozpínání, které způsobuje alkalicko křemičitá reakce v betonu.

Odolnost proti síranům – díky přidání metakaolinu se značně snižuje riziko sulfatace a vzniku sekundárního etringitu, který má negativní vliv na mikrostrukturu betonu.

Odolnost proti mrazu – přidání metakaolinu má jen nepatrný vliv na zvýšení mrazuvzdornosti. Betony u nichž požadujeme mrazuvzdornost a odolnost proti působení chl musí být provzdušněny.

Trvanlivost – metakaolin má několik významných vlivů na fyzické a chemické vlastnosti cementového tmele a tranzitní zóny. Trvanlivost betonu s metakaolinem je zvýšena díky stabilnější struktuře cementového tmele, menšímu průměru pórů, vyšší odolnosti proti chloridům a alkáliím a díky nižšímu podílu Ca(OH)_2 a jeho vyvázání do C-S-H gelu.[5]

3.3 Popílek

Elektrárenské popílký jsou používány do směsných cementů a betonů již přes půl století. První stavbou je přehrada Hungry Horse Dam v USA, postavena v roce 1948 [7]. Popílký jsou vyráběny po celém světě. Z této produkce je asi 80% klasických popílků. Protože popílký představují velký objem odpadu, který je třeba zpracovat, jeví se jeho další využití ve stavebnictví jako velice výhodné z ekologického hlediska. [7]

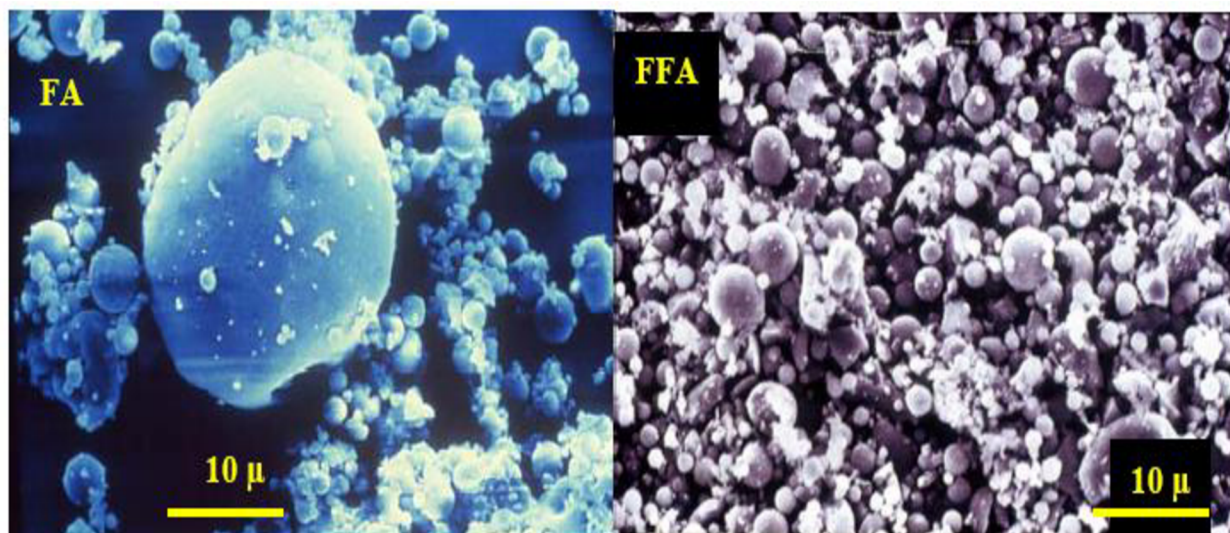
Bohužel nové evropská legislativa, která má za cíl redukovat oxidy dusíku v atmosféře se dnes zaměřuje i na tepelné elektrárny a do procesu spalování jsou přidávány složky (močovina), které použití popílků do betonu jak jej známe dnes, znemožňují. Může se tak stát, že v budoucnu již nebude použití popílků do betonů možné.

3.3.1 Produkce popílků

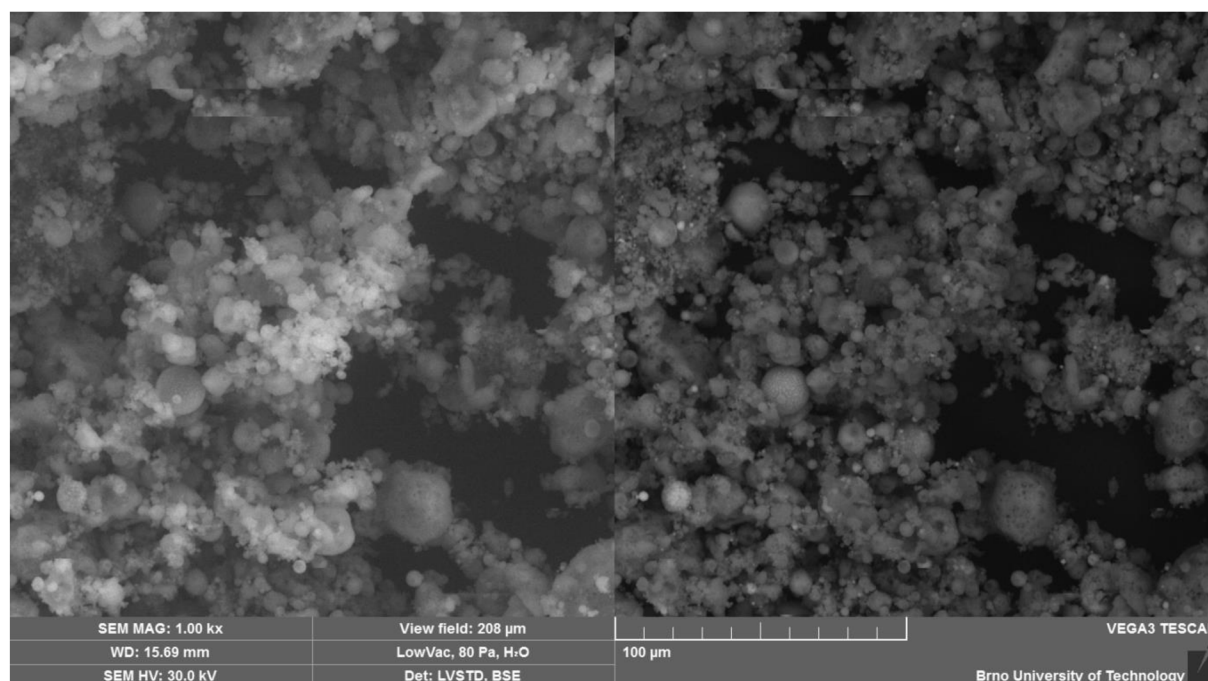
Popílký jsou stejně jako křemičité úlety odpadním produktem, který není vyráběn záměrně. Popílký vznikají spalováním jemně mletého uhlí v tepelných elektrárnách. Jejich vlastnosti značně kolísají v závislosti na druhu a kvalitě uhlí, na teplotě spalování atd. Nej kvalitnějšími popílký jsou ty ze spalování černého uhlí. V české republice drtivá většina elektráren spaluje hnědé uhlí. I tak je však tento popílek velice kvalitní a je nejrozšířenější příměsí do betonů.

Pro další použití může být popílek upravován, avšak každá úprava zvyšuje jeho cenu. Velmi jemných popílků dosáhneme, pokud pomeleme obyčejný popílek za mokra. Mletí a následné sušení jsou však velmi nákladné a proto je většinou popílek používán v neupravovaném stavu. Další možností úpravy je třídění popílků

do frakcí a jeho následovné mísení v co nejlepším poměru vzhledem k výsledné křivce zrnitosti.



Obr. 5 - Velikost částic popílku neupraveného a popílku pomletého za mokra
Pozn: fotografie převzata z Influence of nano-sized mineral additions on performance of SCC, S.Collepari, A. Borsio, J. Olagot, R. Troli, M. Collepari, A. Curzio), [9]



Obr. 6 – Popílek z elektrárny Tušimice – směs částic z různých filtrů smíchaná v daném poměru

3.3.2 Druhy popílků

Dle použitého uhlí:

- Černouhelný – má lepší a méně proměnlivé vlastnosti, obsahuje skelné kuličky.
- Hnědouhelný – v ČR asi 80% produkce, obsahuje více CaO a méně SiO₂, částice mají nepravidelný tvar

Dle druhu spalování

- Klasické – jemné částice jsou unášeny kouřovými plyny a zachycovány v odlučovačích.
- Fluidní – vzniká směs popela, anhydritu vápenatého, volného vápna a uhličitanu vápenatého. Tyto popílků jsou pro beton nepoužitelné pro svůj vysoký obsah volného CaO a SO³⁻.

Dle chemického složení

- Bazické popílků – vysoký obsah CaO (až 30%), obsahují Ca-silikáty a Ca-alumináty vykazují latentně hydraulické vlastnosti
- Kyselé popílků – vysoký obsah SiO₂ (nad 50%) a průměrný obsah Al₂O₃ a Fe₂O₃ (cca 10%) vykazují pucolánové vlastnosti
- Hlinitokřemičité popílků – obsah 50% SiO₂ a 30% Al₂O₃

3.3.3 Fyzikální vlastnosti popílků

Vlastnosti popílků mohou být značně proměnlivé a ve velké míře závisí na složení spalovaného uhlí, jemnosti jeho pomletí, teplotě spalování, druhu odlučovacího zařízení.

Měrná hmotnost – obvykle menší než u cementu většinou 1600 – 2800 kg/m³, ale u popílků s vyšším obsahem CaO je tato hodnota spíše u horní hranice a pohybuje se v rozmezí 2400 – 2800 kg/m³. Tuto vyšší hodnotu způsobuje větší podíl malých kuliček a malý podíl neshořelých zbytků uhlí. [7]

Měrný povrch – měrný povrch se u popílků pohybuje od 200 do 1000 m²/kg a velikost částic se pohybuje v rozmezí 1 – 150 μm. Velikost částic závisí na druhu použitých odlučovačů. Velikost částic může být upravena dodatečným pomletím popílků.

Mineralogické složení – z větší části je popílek tvořen z kulatých amorfních kuliček, které mohou být duté nebo plné. Nicméně analýza vzorku pomocí RTD

analýzy ukázala, že vysoko-vápenaté popílky mohou dále obsahovat křemen, monticellit, anhydrit, C₂S, merwinit, dolomit, C₃S, zatímco nízko-vápenaté popílky mohou obsahovat mullit, křemen, hematit, magnetit.

3.3.4 Chemické složení popílků

	Francie	Německo	VB	Japonsko	USA	ČR hnědé uhlí	ČR černé uhlí
SiO ₂	29,9-54,0	34,1-49,5	48,1-53,1	51,0-62,5	36,9-52,5	43,0-60,0	50,0-57,0
Al ₂ O ₃	10,8-33,4	21,0-29,4	29,6-38,5	21,8-30,7	17,6-22,8	19,0-34,0	25,0-30,0
Fe ₂ O ₃	5,8-15,3	8,4-28,9	5,3-11,9	3,2-7,3	6,2-7,5	-	-
CaO	1,5-38,8	2,2-11,8	1,6-2,8	0,8-5,9	4,9-25,2	4,0-6,0	2,0-4,0
MgO	1,1-4,45	0,75-4,26	1,31-1,61	0,53-1,71	1,3-5,1	0,5-2,0	1,5-3,0
SO ₃	0,1-7	0,1-2,1	0,5-0,7	0,17-0,54	0,6-2,9	0,1-5,0	0,5-1,2
Na ₂ O	0,75-0,85	-	0,24-1,57	0,30-1,81	1,0-1,7	0,1-1,0	0,2-2,0
K ₂ O	0,7-6	-	1,3-4,3	0,46-1,34	0,6-1,3	0,1-2,0	2,5-5,0
z.ž.	0,3-15,2	1,7-20,1	-	1,3-3,7	0,4-2,6	-	-

Tab. 2 - Chemické složení popílků z různých států vyjádřeno v %

Pozn: tabulka převzata z Structure and Performance of Cements, J. Bansted and P. Barnes [7], hodnoty pro ČR převzaty z FEČKO, Peter. *Popílky*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2003 [8]

3.3.4 Vliv popílku na vlastnosti betonu v čerstvém stavu

Zpracovatelnost – popílek zlepšuje zpracovatelnost betonu, pomáhá k lepší čerpatelnosti betonu, zlepšuje soudržnost a zabraňuje tak segregaci.

Vývin hydratačního tepla – nízkovápenatý popílek použitý jako náhrada cementu snižuje vývin hydratačního tepla, proto jsou betony s popílky dobře použitelné pro betonáž masivních konstrukcí a betonáže v letním období.

Smršťování – beton s přídavkem popílku snižuje smrštění, protože díky nižšímu vývinu hydratačního tepla se voda z betonu neodpařuje tak rychle.

Krvácení – popílek díky svému měrnému povrchu zvyšuje potřebu záměsové vody. Při použití plastifikátorů bez zvýšení dávky záměsové vody zpravidla problém s krvácením nenastane, ale pokud zvýšíme dávku vody, může dojít k jejímu odlučování na povrchu betonu. Obecně jsou tedy betony s popílkou více náchylné ke krvácení. Voda navíc může vynášet lehčí popílek na povrch. Z tohoto důvodu nejsou betony s popílkou vhodné pro architektonické účely. [7]

3.3.5 Vliv popílku na vlastnosti zatvrdlého betonu

Permeabilita – díky malé velikosti částic popílku je mikrostruktura betonu hutnější s menší velikostí pórů. Beton s popínkem je hůře prostupný pro vodu a agresivní látky.

Odolnost proti síranům – podobně jako křemičité úlety i popílek zvyšuje odolnost proti síranům tak, že zabraňuje přístupu síranových iontů do betonu (menší propustnost) a rovněž reaguje s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za vzniku nových hydratačních fází. Tato reakce je však pomalejší, protože popílek není tak reaktivní jako křemičité úlety. U popílku rovněž musí být kontrolován obsah případného SO_3 , které může popílek obsahovat, protože se jedná o odpad ze spalování uhlí. Pokud by byl použit popílek s vysokým obsahem SO_3 do betonu, mohlo by časem dojít ke vzniku sekundárního etringitu a k destrukci struktury betonu.

Alkalicko křemičitá reakce – popílkou zvyšují odolnost betonu proti alkalicko křemičité reakci. Díky snížené propustnosti je redukován přístup alkalických iontů do betonu.

Pevnost v tlaku – betony s popínkem jako náhradou části cementu vykazují zpravidla vyšší pevnost v tlaku, protože popílek napomáhá k lepšímu obalení částic, k vytvoření homogennější mikrostruktury a k zlepšení vlastností tranzitní zóny. Samotný vývin pevností však závisí na druhu použitého popílku u nízkovápenatých popílků dochází k zpomalení hydratačních reakcí a to vede k nižším počátečním, ale k vysokým dlouhodobým pevnostem. Naopak u popílků s vyšším obsahem CaO dochází k urychlení hydratace, což vede k zřetelně rychlejšímu nárůstu pevností. [7]

V ČR platí ČSN EN 450, která definuje základní požadované vlastnosti popílků pro použití do betonu.

3.4 Vysokopecní granulovaná struska

3.4.1 Výroba vysokopecní granulované strusky

Vysokopecní granulovaná struska je druhotným produktem z výroby surového železa ve vysoké peci. Nečistoty obsaženy v železné rudě a v koksu přechází do vysokopecní strusky. Tyto nečistoty by mohly při výrobě železa zvyšovat teplotu tavení, což je neekonomické, a proto jsou do směsi přidávány korigující příměsy, takže chemické složení nečistot zůstává ve velmi dobře definované oblasti na $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ fázovém diagramu. Po chemické stránce má tedy struska konstantní složení, protože jakákoliv odchylka od něj znamená zvýšení spotřeby energie a tedy i zvýšení ceny. [11]

3.4.2 Způsoby chlazení strusky

Struska může být chlazena dvěma způsoby. Pokud je ponechána, aby pomalu chladla na vzduchu, krystalizuje zejména ve formě menilitu a pevných roztoků ackermanitu a gehlenitu. Tak vzniká krystalická vysokopecní struska, která nemá ani po rozemletí na jemný prášek prakticky žádné hydraulické vlastnosti a může být do betonu použita pouze jako kamenivo, nikoliv však jako náhrada za cement. Pokud je struska po vypuštění z pece skrápěna vodou, tuhne ve skelném stavu a poté se mohou vyvinout její hydraulické vlastnosti. Chlazení strusky vodou může být prováděno třemi způsoby.

- Struska je vypuštěna do velkého vodního bazénu, kde se dezintegruje do drobných částic jako hrubý písek, označuje se pak jako granulovaná struska.
- Struska je chlazena přímo tekoucí vodou, jakmile vytéká ven z vysoké pece do metalurgické stoky. Získává rovněž podobu hrubého písku a je rovněž označována jako granulovaná struska
- Zvláštním kotoučem je struska vymrštěna do vzduchu a k chlazení dochází působením vody a vzduchu. Struska má v tomto případě podobu sférických sbalků (pelet) a je označována jako peletizovaná struska. Sbalky mohou být použity jako lehké kamenivo k výrobě betonových tvárnic, nebo pomlety na hydraulický prášek. [10]

3.4.3 Fyzikální vlastnosti

Barva – dobře vyhašená struska má světle žlutou, béžovou nebo šedou barvu, zatímco pomalu chlazená struska je mnohem tmavší.

Měrný povrch – zrna strusky mají po chlazení velikost hrubého písku a pro získání hydraulických vlastností jsou proto dále domílána. Běžně na měrný povrch okolo 350 – 600m²/kg.

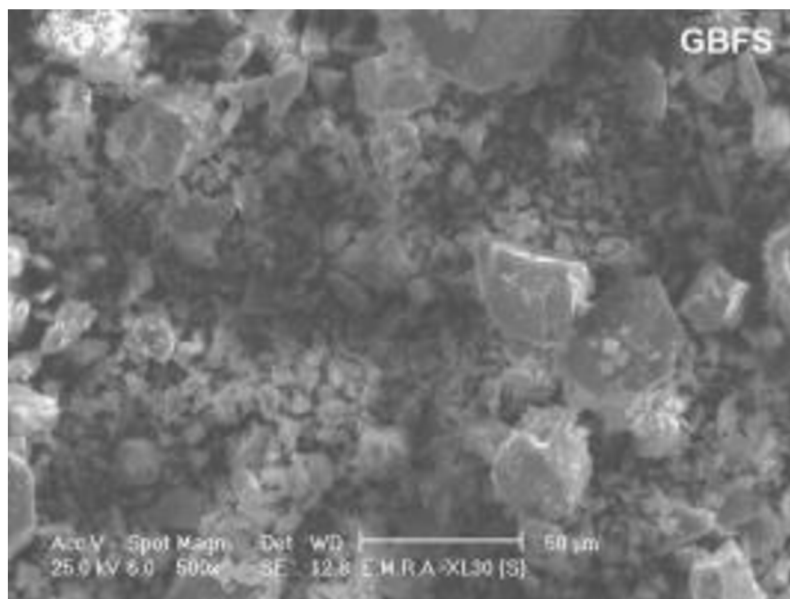
3.4.4 Chemické složení vysokopecní granulované strusky

	Francie	Severní Amerika	ČR*
SiO ₂	29 - 36 %	33 - 42 %	25 - 45 %
Al ₂ O ₃	13 - 19 %	10 - 16 %	4 - 15 %
CaO	40 - 43 %	36 - 45 %	26 - 45 %
Fe ₂ O ₃	< 4 %	0,3 - 20 %	< 1,5 %
MgO	< 6 %	3 - 12 %	4 - 15 %
S ⁻	< 1,5 %	-	< 3,6 %

Tab. 3 - Chemické složení vysokopecní granulované strusky z různých států

Pozn: tabulka převzata z Vysokohodnotný beton, Aitcin Pierre - Claude [10]

Vysvětlivky: * dle materiálů Kotouč Štramberk, s. r. o.



Obr. 7 - Vysokopecní granulovaná struska – velikost a tvar částic

Pozn. Fotografie převzata z Construction and building materials – Microstructure of composite cement containing blast-furnace slag and silica nano-particles subjected to elevated thermal treatment temperature, www.sciencedirect.com [11]

3.4.5 Vliv strusky na vlastnosti čerstvého betonu

Použití samotné vysokopecní strusky přímo do betonů je typické spíše pro Severní Ameriku, zatímco v Evropě se struska míchá s cementem po odděleném mletí. V České republice je prakticky veškerá produkce vysokopecní granulované strusky použita přímo v cementářském průmyslu na výrobu směsných cementů.

Zpracovatelnost - použití strusky nebo směsných cementů obsahujících strusku obvykle zlepšuje zpracovatelnost a prodlužuje dobu tuhnutí.

Krvácení – přidání strusky napomáhá snižovat krvácení vlivem vyšší jemnosti mletí strusky, ale jen tehdy pokud zároveň s přidáním strusky nezvýšíme dávku záměsové vody, ale použijeme plastifikátor. V takovém případě problém s krvácením betonu nenastane. [10]

Množství záměsové vody - kvůli vyšší jemnosti mletí je zpravidla u betonů s přídavkem strusky nutná vyšší dávka záměsové vody, nebo použití plastifikační či superplastifikační přísady.

3.5.6 Vliv strusky na vlastnosti zatvrdlého betonu

Permeabilita – struska stejně jako ostatní příměsi napomáhá díky malé velikosti částic k tvorbě hutnější mikrostruktury betonu a ke snížení propustnosti betonu. [10]

Odolnost proti zmrazování a rozmrazování – dle DIN 1045-2 je použití portlandských směsných cementů s obsahem strusky a vysokopecních cementů CEM III/A a CEM III/B (pro prostředí XF4 je pro tento cement maximální obsah strusky snížen na 50%) schváleno pro všechny prvky vystaveny mrazu.[13]

Odolnost proti chloridům – odolnost proti chloridům je u betonů s přídavkem strusky a u betonů vyrobených z cementů s přídavkem strusky, vyšší díky zvýšené nepropustnosti betonu. V souladu s německými směrnici lze proto použít cementy CEM III/A a CEM III/B v masivních betonových konstrukcích a při stupních vlivu prostředí XD3 a XS3 lze zvýšit maximální vodní součinitel z 0,45 na 0,50. [10] [11]

Pevnost v tlaku – hydratace strusky je zpočátku mnohem pomalejší než u portlandského cementu, struskové produkty hydratace jsou však více „gelovité“ v porovnání s cementem a vyplňují prázdná místa v cementové pastě. Tato schopnost zajišťuje zvýšení tlakových pevností betonu.

Pevnost v tahu za ohybu – zvýšení ohybových pevností u betonů s přídavkem vysokopecní strusky je výsledkem silnějšího pouta mezi cementovým tmelem a kamenivem, čímž je překonán vliv tranzitní zóny jako nejslabšího místa v betonu. [11] [12]

3.5 Mletý vápenec

Mleté vápence nalézají řadu uplatnění i mimo stavebnictví. Uplatňují se například v chemickém průmyslu, hutnictví, zemědělství či energetice. Jejich použití ve stavebnictví je při výrobě asphaltových směsí, výrobě omítek a pak samozřejmě jako příměs do betonu.

3.5.1 Původ a výroba mletého vápence

Vápence jsou horniny tvořené hlavně nerostem kalcitem. Jedná se o celistvé až zrnité sedimentární horniny. Mohou být organického či chemického původu. Většina vápenců vznikla sedimentací vápnitých schránek živočichů. Tyto vápence nazýváme organogenní.

Přeměnou vápenců za vysoké teploty a tlaku vznikly vápence krystalické – mramory. V těchto vápencích kalcit překrystalizoval a tedy se v nich schránky živočichů nevyskytují.

Výroba probíhá natěžením vápence a jeho následným drcením a mletím. Obsah samotného CaCO_3 v surovině je různý dle lokality těžby.

Název	Obsah minerálů [%]		Chemické složení [%]	
	Kalcit	Dolomit	CaCO_3	MgCO_3
Vápenec	100 – 90	0 – 10	10 – 95,4	0 – 4,6
Dolomitický vápenec	90 – 50	10 – 50	95,4 – 77,1	4,6 – 22,9
Vápnitý dolomit	50 – 10	50 – 90	77,1 – 58,8	22,9 – 41,2
Dolomit	10 – 0	90 - 100	58,8 – 54,3	41,2 – 45,7

Tab. 4 - Dělení suroviny dle obsahu vápence a dolomitu dle ČSN 72 1210

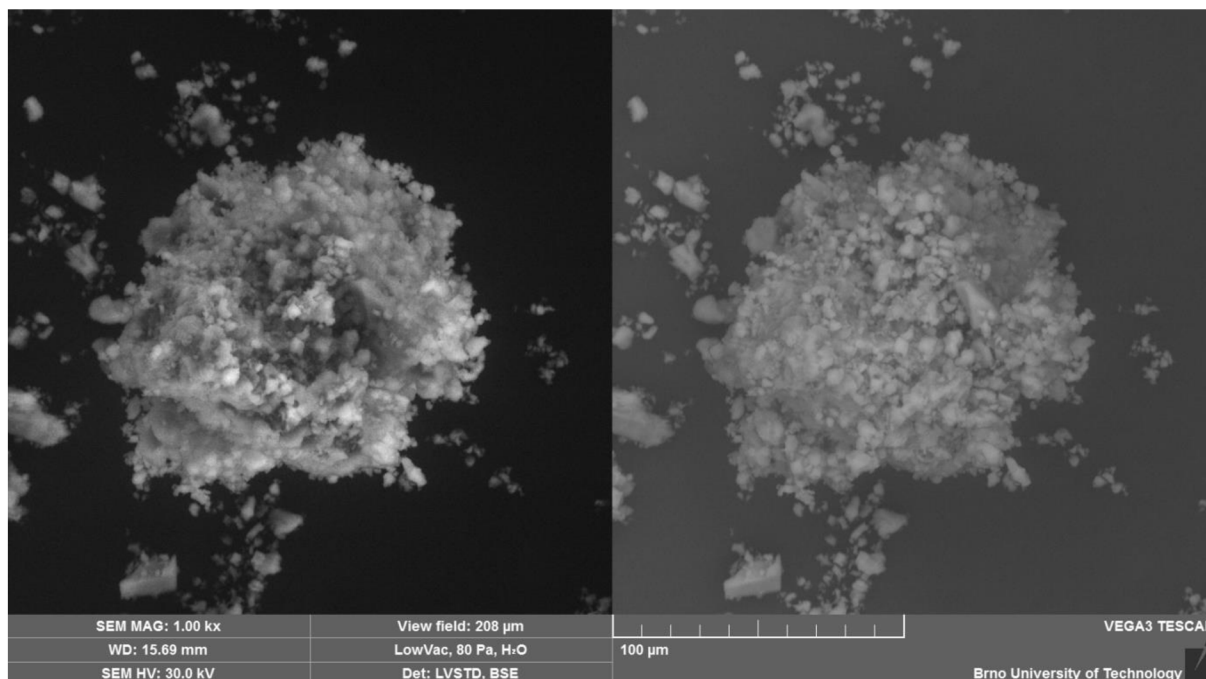
3.5.2 Vlastnosti mletých vápenců

Měrný povrch – závisí na jemnosti pomletí vstupní suroviny. Většinou se pohybuje od 250 do 500 m^2/kg .

Měrná hmotnost – 2400 až 2900 kg/m^3

Mineralogické složení – jak již bylo uvedeno, mineralogické složení se liší dle lokality těžby vstupní suroviny. Surovina může být „znečištěna“ řadou dalších minerálů. Zejména se v surovině mohou vyskytovat oxidy železa, oxid křemičitý, jílové minerály a zejména u hornin organogenního původu pak zkamenělé zbytky rostlin a živočichů.

Tvar zrn – kalcit krystalizuje v klencové (trigonální) soustavě. Při drcení a mletí se pak rozpadá na zrna výrazně hranatých tvarů s ostrými hranami.



Obr. 8 - Mletý vápenec – velikost a tvar částic

3.5.3 Vliv mletého vápence na vlastnosti čerstvého betonu

Zpracovatelnost – mleté vápence pomáhají k zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu a k jeho lepší čerpatelnosti.

Množství záměsové vody – z důvodu vyššího měrného povrchu a nasákavost je zpravidla nutné u betonů s mletým vápencem zvýšit množství záměsové vody nebo plastifikační přísady. [10]

3.5.4 Vliv mletého vápence na vlastnosti zatvrdlého betonu

Pevnost v tlaku – přidání mletého vápence způsobuje urychlení tvrdnutí betonu a vyšší krátkodobé pevnosti betonu. Tento jev je způsoben tím, že vápenec jednak poskytuje nukleační zárodky pro krystaly portlanditu. Ukazuje se však, že vápenec se nechová pouze jako inertní příměs, ale že se aktivně účastní hydratace trikalciualuminátu (C_3A) ze slinku za vzniku kalciumkarbonátaluminát hydrátu ($3Ca \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaCO_3 \cdot 32H_2O$). Rychlost hydratace je v počáteční fázi urychlena, ale dlouhodobě probíhá pomaleji.

Pohledovost – betony s přidavkem vápence mívají při správném zpracování a s použitím kvalitního bednění velmi dobré pohledové vlastnosti. Je proto v poslední době možné se stále častěji setkat s požadavkem architektů na použití betonu s přidavkem vápence. Samotné použití vápence však pohledovost betonu

nezaručuje a receptura směsi musí být navržena komplexně s ohledem na místo použití a požadavky stavby.

Permeabilita – použití mletého vápence, stejně jako dalších jemnozrnných příměsí, zvyšuje hutnost matrice betonu a tím snižuje propustnost betonu pro vodu. Díky nízkému smršťování u betonu s mletým vápencem je navíc tento beton vhodný i pro betonáže masivních konstrukcí a větších dilatačních celku, aniž by došlo k potrhání konstrukce.

3.6 Kamenné odprašky

Kamenné odprašky mohou být používány jako inertní příměs do asfaltů či betonu. Jejich dalším uplatněním je zejména využití v zemědělství. Jejich využití závisí na druhu horniny, ze které jsou získávány.

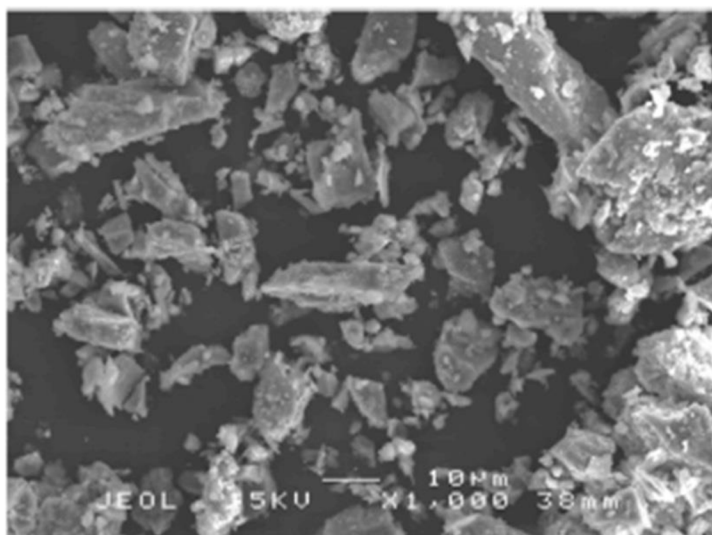
3.6.1 Výroba kamenných odprašků

Kamenné odprašky jsou odpadem při drcení a řezání kameniva v kamenolomech. Jedná se o velice jemné částice zachycené při zpracovávání kamene ve filtrech zamezujících prašnosti linek. V podstatě se jedná o samotnou horninu s velikostí zrn do 0,2 mm. Jelikož se jedná o odpadní materiál, který by jinak znečišťoval životní prostředí, je jeho další využívání z ekologického hlediska velice žádoucí.

3.6.2 Vlastnosti kamenných odprašků

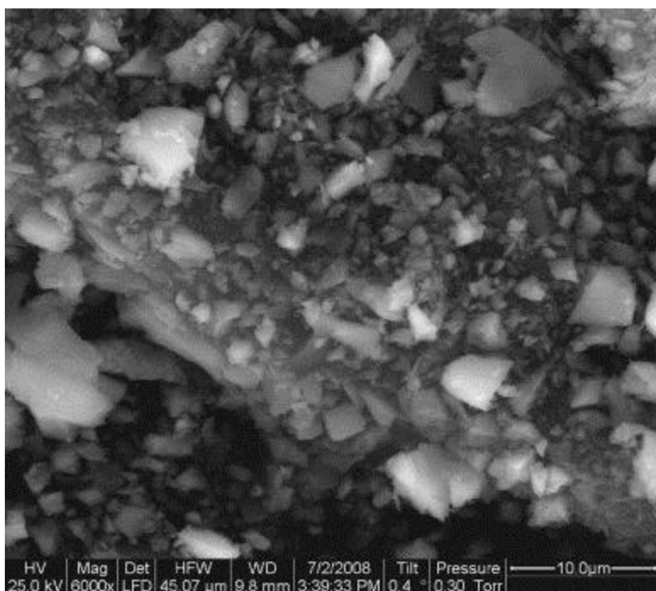
Měrný povrch – závisí na druhu vstupní suroviny a na filtru, ve kterém jsou odprašky zachycovány. Většinou se pohybuje od 150 do 300 m²/kg. Odprašky však mohou být dále domílané, což jejich měrný povrch zvyšuje.

Tvar zrn – záleží na hornině, ze které jsou odprašky získávány a na tom, v jaké soustavě hornina krystalovala. Může se tedy jednat o tvary šupinek, jehlic či kubických zrn. Vždy se však jedná o ostrohranná zrna.



Obr. 9 – Tvar a velikost zrn kamenných odprašků - žula

Pozn. Převzato z A review on Properties of Sustainable Concrete using granite dust as replacement for river sand [14]



Obr. 10 - Tvar a velikost zrn kamenných odprašků

Pozn. Převzato z Microstructural and magnetic characterization of dusts from a stone crushing industry in Birbhum, India [15]

3.6.3 Vliv kamenných odprašků na vlastnosti čerstvého betonu

Zpracovatelnost – kamenné odprašky, zejména pokud mají jejich částice vhodný tvar, napomáhají ke zlepšení zpracovatelnosti a čerpatelnosti betonů.

Množství záměsové vody – vzhledem k velice podobnému měrnému povrchu nemusí použití kamenných odprašků nutně zvyšovat množství záměsové vody. Množství vody pro dosažení správných reologických vlastností závisí na tvaru, distribuci, velikosti a hladkosti povrchu zrn kamenného fileru.

Pokud je však kamenný filer dále upravován mletím, dochází k nutnosti množství záměsové vody zvýšit.

3.6.4 Vliv kamenných odprašků na vlastnosti zatvrdlého betonu

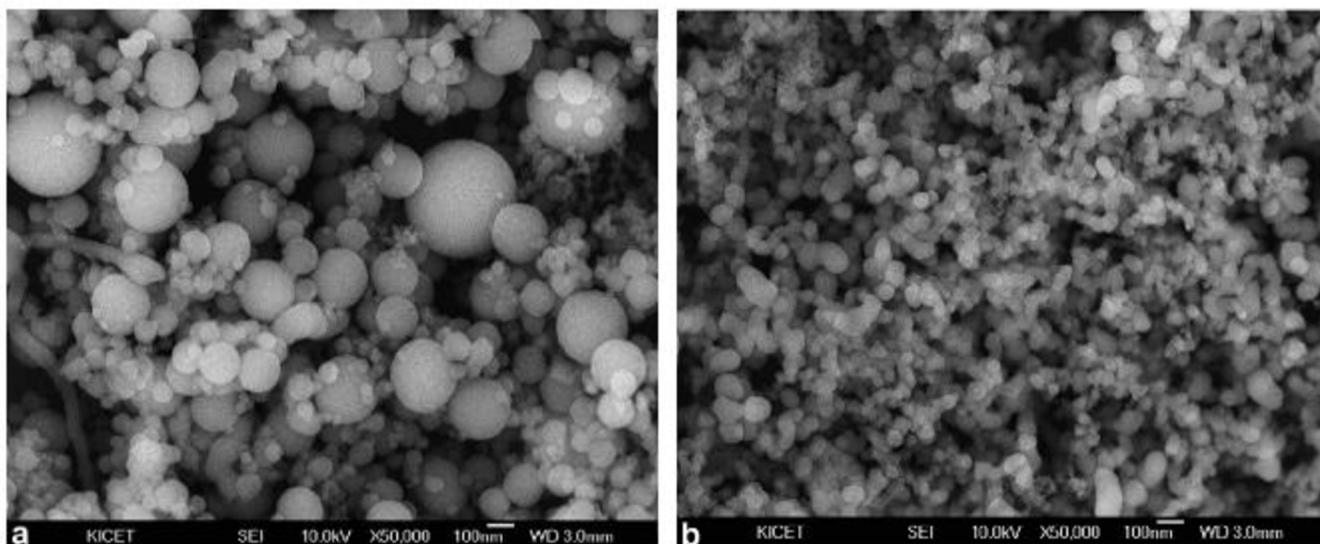
Pevnost v tlaku – kamenné odprašky působí jako inertní výplňový materiál. V počáteční fázi hydratace napomáhají, obzvláště pokud mají vyšší měrný povrch, k rychlejšímu vysrážení cementových minerálů z roztoku. Počáteční pevnosti tak mohou být mírně vyšší, ale postupně se tato rychlost zpomaluje a pevnosti v tlaku

po 28 až 90 dnech bývají nižší, než u betonů s portlandským cementem.

Permeabilita – použití kamenných odprašků, stejně jako jiných jemnozrnných příměsí, má příznivý vliv na nepropustnost betonu pro vodu.

3.7 Nanosilika

Tento materiál s velmi vysokým měrným povrchem a vysokým podílem velmi jemných částic skládajících se prakticky z čistého SiO₂ (až 99,8%) je dalším krokem jak modifikovat vlastnosti cementového tmele a celého betonu a získat tak beton vysokých užitných vlastností. Vlastnosti tohoto materiálu jsou podobné, jako vlastnosti křemičitých úletu, avšak jsou umocněny vyšším měrným povrchem – vyšší reaktivita.



Obr. 11 - Srovnání velikosti částic Křemičitého úletu a nano-SiO₂

Pozn: fotografie převzaty z Characteristic of cement mortar with nano-SiO₂ particles, Byung-Wan Jo, Chang-Hyun Kim, Ghi-ho, Jong-Bin Park,[16]

A) Křemičitý úlet B) Nano-SiO₂

3.7.1 Výroba nanosiliky

Pro výrobu nanosiliky lze použít tři metody. Každá z metod poskytuje nanosiliku trochu odlišné kvality:

Mokrý metoda – využívá sol-gel proces. Výchozí látkou je například křemičitan sodný (vodní sklo), který se hydrotermálně převede na koloidní suspenzi (sol) a poté přidáním kyseliny na pevnou látku (gel). Následuje odfiltrování a vysušení, čímž získáme křemičitý xerogel, jehož kalcinací vytvoříme práškovou nanosiliku. Pokud xerogel rozplavíme ve vodě, získáme disperzní nanosiliku. Takto vyrobená nanosilika má velikost částic do 70 nm.

Termální metoda - je založena na disociaci chloridu křemičitého ve vodíko - kyslíkovém plameni. Teplota nutná k disociaci je 1000 až 1200°C. Částice nanosiliky jsou následně separovány od plynných zbytků v cyklonových separátorech. Nanosilika vyrobená tímto procesem je velice jemná, s velikostí částic nepřesahujícími 30 nm. Nevýhodou této metody jsou vysoké finanční nároky.

Olivínová metoda – nanosilika je vyráběna rozpuštěním olivínu v silné kyselině za zvýšené teploty (max. 95°C). Rozpuštěním vznikají amorfni částice nanosiliky, které je však z roztoku nutné oddělit postupnou filtrací. Nanosilika získaná tímto postupem je kvalitní a samotný postup je poměrně levný.

3.7.2 Vlastnosti nano-SiO₂ vyrobeného olivínovou metodou

Měrný povrch – měrný povrch se u nano-SiO₂ pohybuje v rozmezí 100.000 – 500.000 m²/kg, což je mnohonásobně větší měrný povrch než u křemičitých úletů (13.000 – 30.000m²/kg). Díky tomuto velmi vysokému měrnému povrchu je nano-SiO₂ velmi reaktivní pucolán. [17]

Velikost částic – velikost částic nano-SiO₂ získaného olivínovou metodou se pohybuje okolo 5 až 100nm. Oproti částicím křemičitých úletů s průměrnou velikostí částic 180nm jsou tedy tyto částice výrazně menší. Částice se díky svému povrchovému napětí sdružují do clusterů. Velikost částic i měrný povrch závisí na způsobu přípravy nano SiO₂. [17]

Chemické složení – nano-SiO₂ je prakticky čistý amorfni oxid křemičitý, zastoupení čistého SiO₂ bývá až 99,9%. [9]. Při olivínové metodě bývá obsah nečistot vyšší a z roztoku je nutné odstranit síran hořečnatý. Jeho obsah v roztoku je do 5% a lze jej odstranit opakovaným proplachováním demineralizovanou vodou. [16]

Druh nanosiliky dle způsobu výroby	Termální metoda	Mokrý metoda	Olivínová metoda
Čistota (obsah SiO ₂) v %	≥99,8	≥95,0	≥95,0
Měrný povrch v m ² /g	50 - 400	30 - 500	100 – 300
Velikost částic v nm	5 - 50	5 - 100	10 - 25

Tab. 5 - Porovnání vlastností nano SiO₂ dle způsobu výroby

Pozn. Tabulka převzata z Chemical Engineering Journal - The properties of amorphous nano-silica synthesized by the dissolution of olivine, www.sciencedirect.com

[17]

3.7.3 Vliv nano-SiO₂ na vlastnosti cementového tmele

Nano-SiO₂ má na vlastnosti cementového tmele podobné účinky, jako křemičitý úlet, ale pucolánové účinky nano-SiO₂ jsou umocněny vyšším měrným povrchem a vyšším obsahem oxidu křemičitého.

Pevnost vazby mezi cementovým tmelem a kamenivem – k zlepšení pevnosti vazby mezi kamenivem a cementovým tmelem velmi dobře přispívá křemičitý úlet díky lepšímu obalení částic kameniva cementovým tmelem a díky modifikaci tranzitní zóny. Nano-SiO₂ tento účinek ještě více umocňuje. Tvoří ještě hutnější strukturu cementového tmele s ještě menšími průměry pórů, rychleji reaguje s krystaly portlanditu – Ca(OH)₂ za vzniku C-S-H gelu. [18]

Permeabilita – nano-SiO₂, ještě více než mikrosilika, zmenšuje velikost pórů, a proto lze očekávat, že prostupnost betonu s nano-SiO₂ bude pro vodu a další látky extrémně nízká.

3.8 Nanojíly

Jedná se příměsi, které mohou být přírodního původu či synteticky připravené. V přírodě se jedná o procesy zvětrávání aluminosilikátů. Při zvětrávání má pak každý materiál určitý podíl nanočástic. Pokud bychom chtěli materiál použít vyloženě jako nano – příměs, musely bychom tyto částice od zbytku zvětrané horniny oddělit.

3.8.1 Příprava nanojílů

Přírodní nanojíly

Z jílové zeminy je pomocí sít odstraněna nejhrubější frakce. Za pomoci chemikálií (peroxid vodíku) jsou odstraněny organické zbytky. V další části procesu jsou plavením odseparovány částice větší než 2 μm.

Aglomerované částice, které nepodléhají gravitaci, jsou v roztoku rozduženy ultrazvukem. Roztok je následně odstředován, při čemž dojde k odseparování dalších větších částic.

Ty nejjemnější částice je možné z roztoku vyseparovat dialýzou přes polopropustnou membránu.

Syntetické nanojíly

Většinou jsou připravovány takzvanou řízenou krystalizací kaolinity z nasyceného roztoku aluminosilikátu. Pro celkový výsledek je velmi důležitý poměr Al₂O₃ a SiO₂, pH roztoku, jeho teplota a délka krystalizace. Reakce probíhá za zvýšené teploty a tlaku (hydrotermální metoda).

3.8.2 Vlastnosti nanojílů

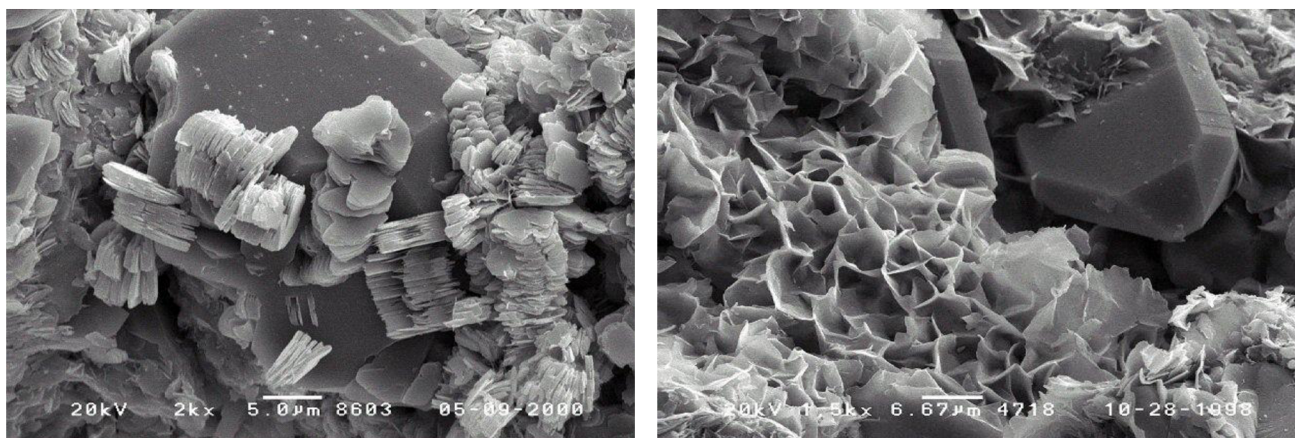
Vlastnosti zejména přírodních nanojílů z velké části závisí na původní surovině. Zejména chemické složení nanojílů je vysoce proměnlivé dle různých lokalit. Rozdělit jíly lze dle chemizmu a morfologie montmorillonit, bentonit, hectorit, halloisit a kalolinit. Všechny tyto jílové minerály v sobě obsahují vázanou vodu. Odvodnění těchto jílů za teploty 700 až 800 °C vzniknou nanojíly s pucolánovými vlastnostmi podobnými metakaolinu, ale navíc umocněny násobně vyšším měrným povrchem.

Barva – barva nanojílů bývá bílá až šedobílá. Barvu ovlivňuje složení vstupní suroviny a obsah barvicích oxidů.

Měrná hmotnost – zpravidla se pohybuje mezi 1900 – 2100 kg/m³

Měrný povrch – 400 až 600 m²/g

Velikost částic – do 10 nm



Obr. 12 – Jílové minerály kaolinit a montmorillonit

Pozn. Fotografie převzaty z www.webmineral.com [19]

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	ZŽ
NC1	47,05	16,24	0,39	3,42	1,75	0,19	0,08	0,01	30,61
NC2	62,10	21,10	0,06	4,57	2,24	0,38	0,13	0,05	7,40

Tab. 6 - Chemické složení nanojílu z různých zdrojů v %

Pozn: hodnoty pro NC1 převzaty z Journal of Asian Ceramic Societies – Effects of nanoclay on durability and mechanical properties of flax fabric reinforced geopolymer composites, [20]

Hodnoty pro NC2 převzaty z Materials & Design – Effect of calcined nanoclay on the durability of NaOH treated hemp fabric-reinforced cement nanocomposites, [21]

3.8.3 Vliv nanojílu na vlastnosti cementového tmele

Tvorba krystalizačních zárodků - nanojíly poskytují podobně jako nanosilika krystalizační zárodky. Krystalizační produkty se tak mohou lépe vysrážet z roztoku, čímž nanojíly napomáhají hydrataci cementu.

Modifikace mikrostruktury – díky vysoké jemnosti částic je snížena porozita tranzitní zóny. Nanojíly tak podobně jako ostatní jemné materiály příznivě ovlivňují mechanické vlastnosti betonů, protože jejich použitím dojde k překonání tranzitní zóny coby nejslabšího místa v betonu. [22]

3.8.4. Vliv nanojílu na mechanické vlastnosti betonu

Pevnost v tlaku – studie prováděné na cementových pastách prokázaly zvýšení pevnosti v tlaku po přidání 1% nanojílu z hmotnosti cementu až o 40%. Při použití vyššího obsahu nanojílu již dochází dle studie k poklesu nárůstu pevností. U přídatku 3% nanojílu byl nárůst pevností pouze 26%. Tento jev je vysvětlen tendencí nanočástic aglomerovat. Aglomerace částic následně vytváří v kompozitu slabá místa. [23]

Pevnost v tahu za ohybu – nanojíly lépe vyplňují mikrostrukturu kompozitu. Tím dochází u cementového tmele ke zlepšení soudržnosti matrice. Přidání 1% nanojílu zlepšilo pevnost v tahu za ohybu o cca 30%. Zvýšení objemu nanojílu v kompozitu pak vedlo podobně jako u pevnosti v tlaku ke snížení nárůstu pevností. [22]

3.9 Nanovápeneč

Synteticky připravovaný materiál, jehož výroba je poměrně jednoduchá a levná. Tento materiál nedosahuje tak vysokých měrných povrchů jako nanosilika či nanojíly.

3.9.1 Příprava nanovápence

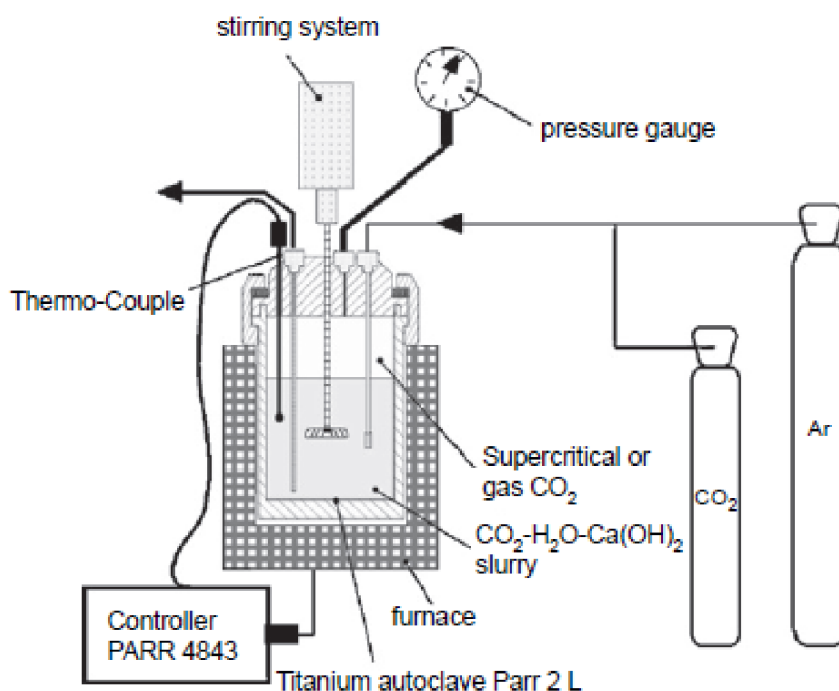
Nejznámější metodou výroby syntetického nanovápence je tzv. karbonatační metoda. Princip je podobný karbonataci betonu, kdy Ca(OH)_2 reaguje se vzdušným CO_2 za vzniku CaCO_3 . Rozdíl je v tom, že reakce probíhá cíleně a oxid uhličitý je do reaktoru, který obsahuje hydroxid vápenatý vháněn záměrně.

Reakce probíhá dle rovnice $\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$. Rychlostí reakce a reakčními podmínkami lze významně ovlivnit výsledný produkt (viz Obr. 14 a Obr. 15) z hlediska velikosti krystalů a měrného povrchu. Na následujícím obrázku (Obr. 13) je možno vidět zkušební zařízení pro přípravu nanovápence a graf, podle kterého výroba nanovápence probíhala.

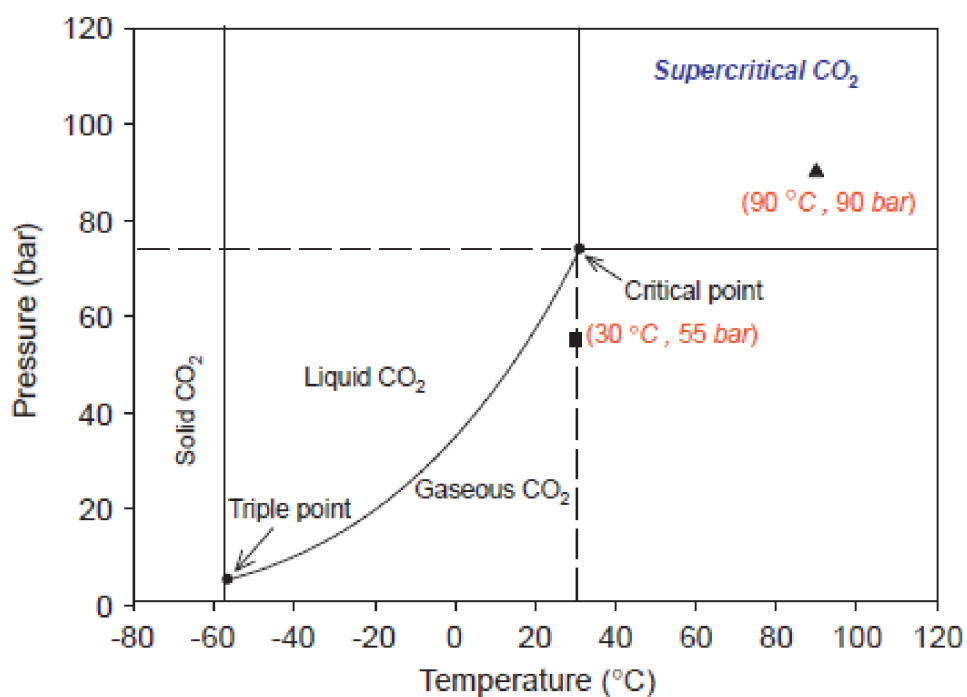
V první části pokusu bylo v jednom litru vysoce čisté vody rozpuštěno 74,1 g komerčně dostupného hydroxidu vápenatého (čistota 96 %). Částice byly dispergovány mechanickým míchadlem rychlostí 400 ot/min a celá disperze byla zahřáta v autoklávu na 90°C. Po dosažení této teploty bylo do autoklávu vháněno 80,18 g CO_2 . Tlak v autoklávu byl nastaven na 90 barů.

Pro porovnání vlivu reakčních podmínek na výsledný produkt byla ve druhém případě nastavena teplota disperze 30°C a tlak v autoklávu 55 barů. Množství použitého CO_2 bylo v tomto případě 96,05 g. [23]

a



b



Obr. 13 – Výroba nanovápence – (a) schéma výrobního zařízení; (b) graf skupenství CO₂ v závislosti na teplotě a tlaku

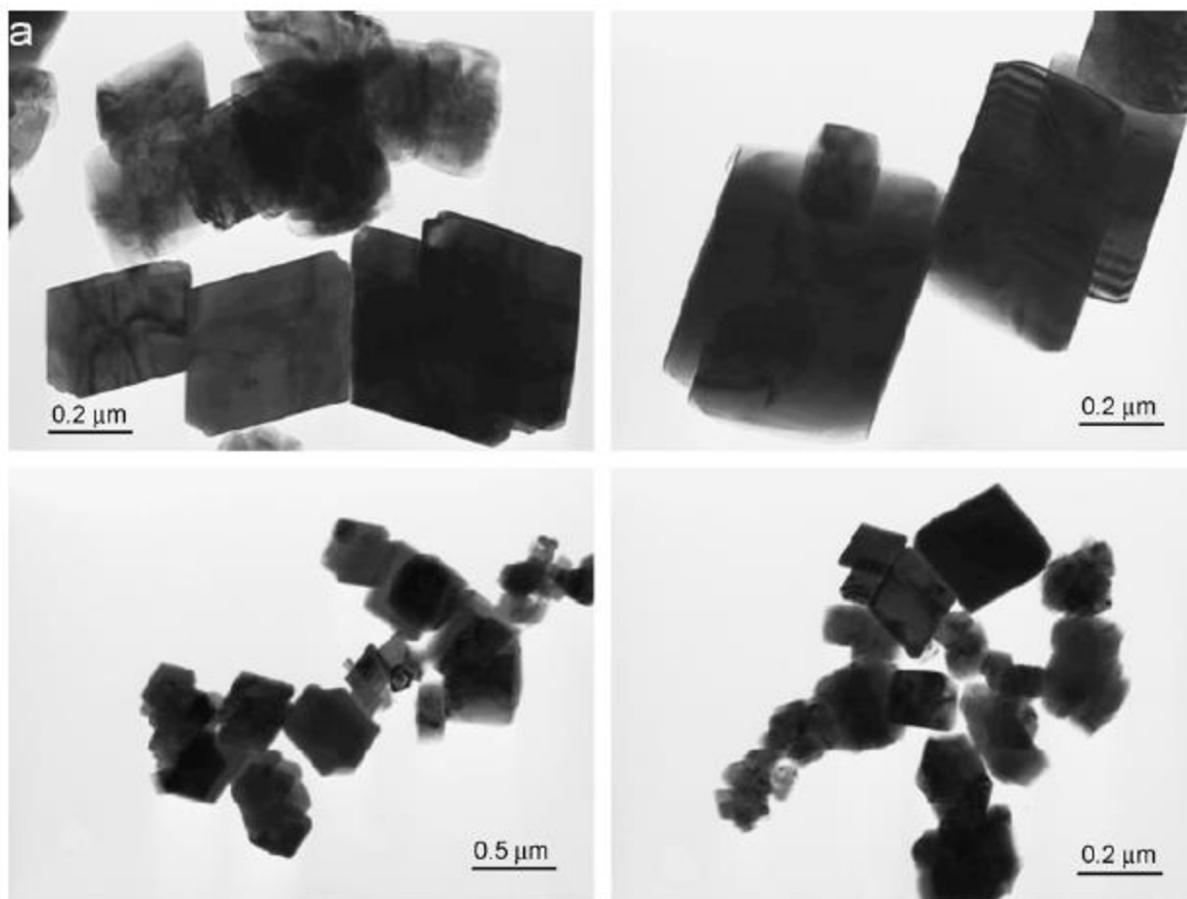
Pozn. Převzato z Journal of Crystal Growth – Textural properties of synthetic nano-calcite produced by hydrothermal carbonation of calcium hydroxide [23]

3.9.2 Vlastnosti nanovápence

Tvar a velikost krystalů nanovápence lze ovlivnit rychlostí reakce, skupenstvím látek, tlaku v reaktoru, atd. Při rychlejším vysrážení částic lze pozorovat změnu velikosti krystalů a měrného povrchu částic nanovápence (Obr.14 a Obr.15).

Rychlost srážení 4,3 mol/hod; tlak 90 barů; teplota 90 °C; superkritické CO₂

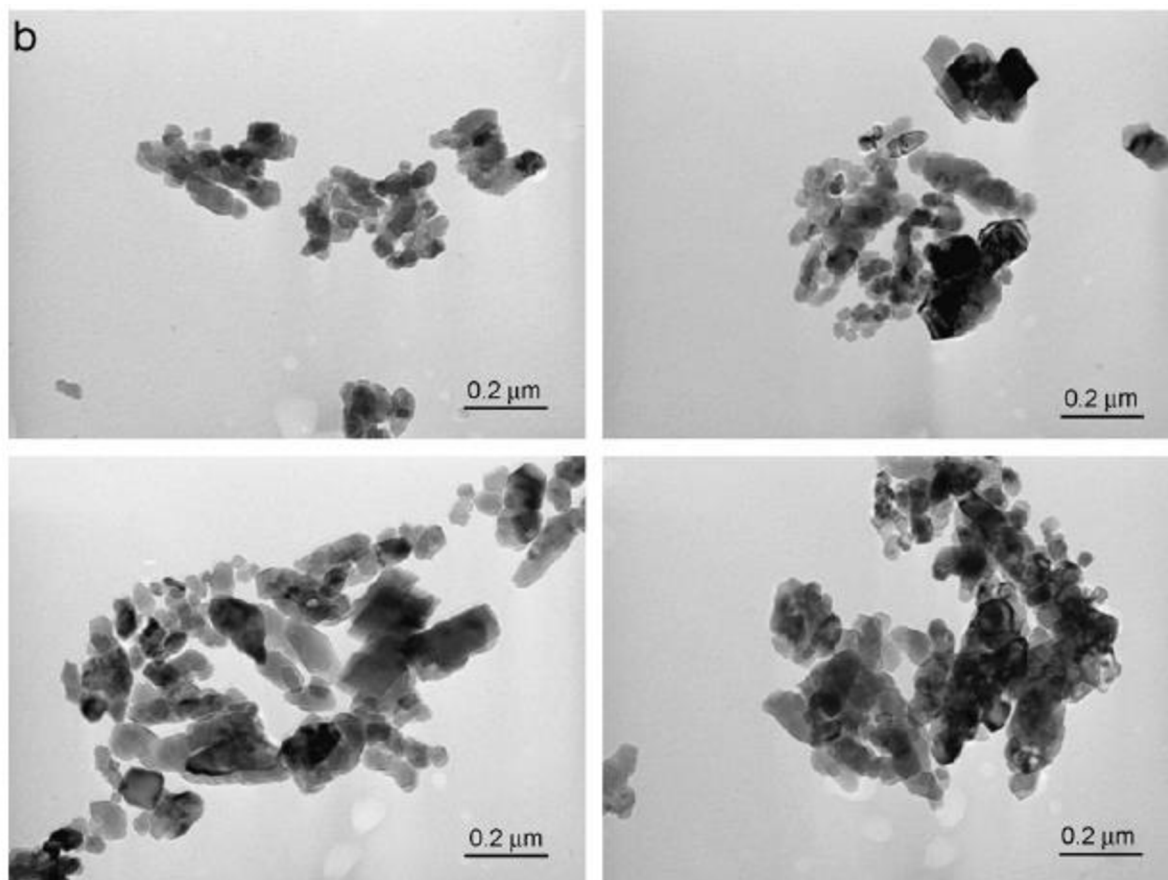
Tvar krystalů – krychlový tvar; velikost částic ≤ 0,36 μm; měrný povrch 6,0 m²/g



Obr. 14 – Tvar a velikost částic nanovápence při rychlosti srážení 4,3 mol/hod [23]

Rychlost srážení 15,9 mol/hod; tlak 55 barů; teplota 30°C; plynné CO₂

Tvar krystalů – dvojitý jehlan; velikost částic ≤ 0,2 μm; měrný povrch 9,7 m²/g



Obr. 15 - Tvar a velikost částic nanovápence při rychlosti srážení 15,9 mol/hod

Pozn. Převzato z Journal of Crystal Growth – Textural properties of synthetic nano-calcite produced by hydrothermal carbonation of calcium hydroxide; [23]

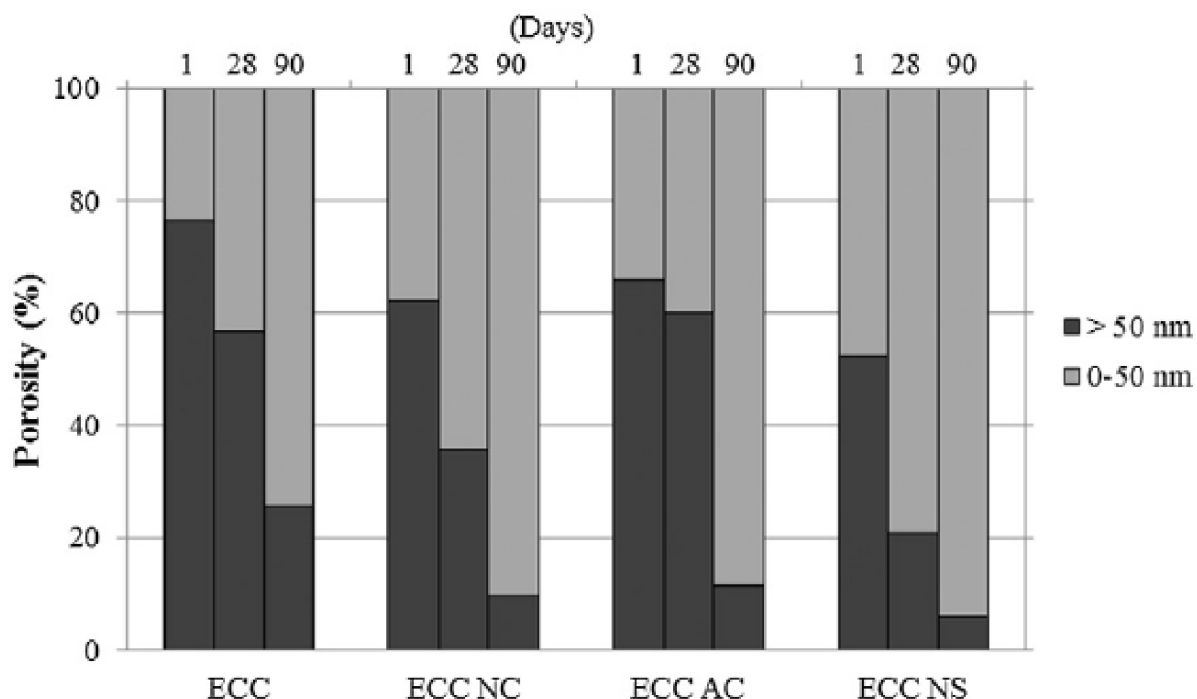
3.9.3 Vliv nanovápence na vlastnosti cementového tmele

Nanovápence reagují se slinkovými minerály a podporují tvorbu C – S – H gelu. Dle několika studií reaguje nanovápenec zejména s C3A a C3S, což urychluje hydratační reakci. Reakce CaCO₃ a C3A má na vlastnosti cementové pasty omezený vliv, protože obsah C3A bývá v běžných portlandských cementech poměrně nízká. Pro využití plného potenciálu reakce je vhodné spolu s vápencem použít další příměs bohatou na alumináty (například popílek).

Pokud je pojivový systém vhodně složený, napomáhá nanovápenec k vyšším počátečním pevnostem v tlaku i v tahu za ohybu.

Permeabilita – i u betonů s nanovápenecem je propustnost velice nízká. Betony s nanopříměsmi mají obecně ve srovnání s běžnými betony snížený maximální průměr pórů a stávají se tak méně propustnými.

Poměrné zastoupení velikosti pórů u cementových kompozitů s různými nanopříměsmi v čase zrání kompozitu lze porovnat v grafu níže,



Graf 3 – Poměrné zastoupení pórů v kompozitech s různými nanopříměsmi v stáří 1, 28 a 90 dnů

ECC – referenční směs, ECC NC a ECC AC – směsi s nanovápenci z různých zdrojů, ECC NC – směs s nanosilikou

Pozn. Převzato z Cement and concrete research – Nano-modification to improve the ductility of cementitious composite [24]

3.9.4 Vliv nanovápence na mechanické vlastnosti betonu

Pevnost v tlaku – vyšších pevností v tlaku dosahují kompozity s nanovápenci zejména při zkoušení krátkodobých pevností. U jednodenních pevností v tlaku je dle několika studií nárůst hodnot až o cca 30 % v porovnání s kompozitem z portlandského cementu. [24]. Dle této studie dochází postupně k zpomalení nárůstu pevností a pevnosti po 28 dnech jsou již vyšší „pouze“ o 12%.

Pevnost v tahu za ohybu – k nárůstu pevností v tahu za ohybu dochází také zejména u krátkodobých měření. Na rozdíl od tlakových pevností jsou však rozdíly u dlouhodobých pevností v porovnání s kompozitem bez nanovápence pouze v řádech jednotek procent a po 90 dnech měření jsou již prakticky zanedbatelné. [24]

4. Komplikace při používání nanočástic

Ačkoli by se použití nanopříměsí mohlo na první pohled jevit jako velice výhodné a přinášející pozitivní vliv na vlastnosti cementových kompozitům, přináší s sebou jejich použití řadu komplikací, kvůli nimž není jejich používání v masovém měřítku prozatím možné.

4.1 Nutnost dispergace

Všechny nanočástice mají tendenci shlukovat se do větších clusterů. Tyto shluky je nutné před použitím nanopříměsí v kompozitu rozrušit a částice dispergovat. Bez dispergace působí nanočástice v kompozitu jako „slabina“ a namísto zlepšování zejména mechanických vlastností kompozitu, je zhoršují.

Způsoby dispergace:

- **Mletí** – metoda použitelná pro práškové nanomateriály a nanomateriály ve vodní disperzi. Metoda je málo účinná a při použití může dojít k poškození struktury mletého materiálu.
- **Míchání** – pomocí magnetických nebo hřídelových míchadel. Metoda je použitelná pouze pro materiály v tekuté fázi. Účinnost této metody je velice nízká.
- **Vysokorychlostní homogenizace** – pomocí mechanických homogenizátorů. Metoda je použitelná pouze pro materiály v tekuté fázi. Výhodou je možnost dispergace poměrně velkého množství částic. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady homogenizátoru.
- **Vysokotlaká homogenizace** – i tato metoda je použitelná pouze pro nanomateriály v tekuté fázi. Metoda je rychlá a účinná. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady a nebezpečí znehodnocení nanočástic vysokou teplotou a tlakem.
- **Sonická metoda** – pomocí ultrazvuku pro nanočástice v tekuté fázi. Efektivita metody záleží na kvalitě vybavení. Vzhledem k vysokému zahřívání směsi je nutné systém chladit, aby nedocházelo k degradaci nanočástic.

4.2 Reaglomerace částic

Po ukončení dispergace je nutné zabránit částicím, aby se opět začaly shlukovat. Jako vhodná metoda se jeví snížení povrchového napětí částic jejich hydrofilizací. Toho lze dosáhnout pomocí použití vhodných povrchově aktivních látek,

jimiž mohou být například dnes komerčně běžně používané superplastifikátory na bázi polymerů kyseliny akrylové.

Vhodnost použití, dávku a druh povrchově aktivní látky je nutno vždy ověřit s ohledem na použitý nanomateriál, dobu a způsob dispergace a na budoucí použití ve výsledném kompozitu.

4.3 Toxicita

U každého materiálu, který je použit ve stavebnictví je nutné prokázat jejich zdravotní a ekologická rizika vyplývající z jeho použití. Zejména se jedná o následující rizika:

- **toxicita způsobená chemickým složením**
- **toxicita způsobená velikostí částic**
- **toxicit vlivem tvaru částic**
- **toxicita vlivem vysokého povrchového napětí**
- **toxicita způsobená snadným přenosem částic do krevního oběhu**
- **toxicita z velikosti dávky**

[30]

4.4 Cena

Jedná se o asi největší překážku při použití moderních materiálů ve stavebnictví. Vysoká cena nanočástic v porovnání s cementem a běžně používanými příměsemi v kombinaci s vysokými pořizovacími náklady na dispergační zařízení činí tyto materiály v současnosti komerčně těžko využitelné.

5. Packing – sestavování křivek zrnitosti jemných částic

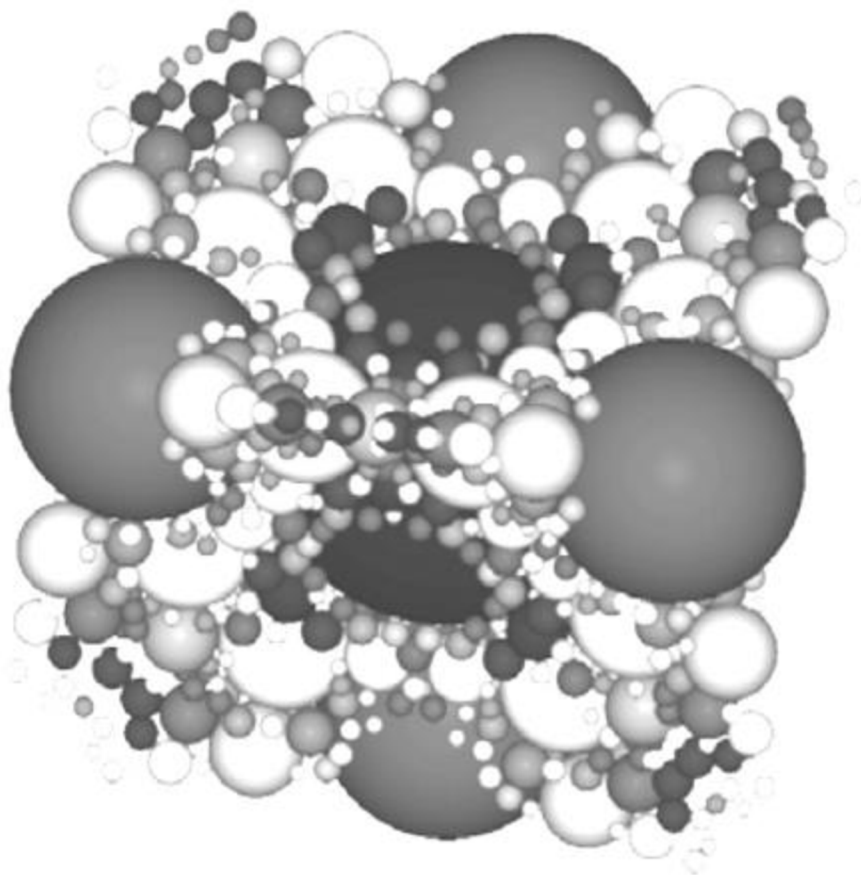
Sestavování křivek zrnitosti kameniva v betonu je známé již poměrně dlouhou dobu a uplatňuje se jak v běžných, tak i ve vysokohodnotných betonech. Nicméně dávkování cementu a jeho částečné nahrazování aktivními i pasivními příměsemi probíhá spíše na základě zkušeností.

Zejména vysokohodnotné betony obsahují vysoké množství cementu, které může být z ekonomického, ale i ekologického hlediska překážkou k jeho používání. Při použití optimální křivky zrnitosti jemných částic pod 0,125 mm lze významně snížit množství cementu. Snížení množství cementu dále napomáhá ke snížení hydratačního tepla a ke zlepšení trvanlivostních vlastností betonů.

Vzhledem k tomu, že cement a příměsi nelze z praktického hlediska třídit podobně jako kamenivo do specifických „frakcí“, je třeba k sestavování křivek zrnitosti pojivové fáze betonu přistoupit jinak. Pro sestavení optimální křivky zrnitosti je nutné důkladně zanalyzovat všechny použité materiály zejména z hlediska jejich granulometrie a tvaru částic. Při znalosti křivek zrnitostí jednotlivých materiálů pak lze výslednou křivku zrnitosti sestavit tak, aby se co nejvíce přiblížila zvolené „ideální“ křivce zrnitosti.

5.1 Aplikace známých křivek zrnitosti na jemnozrnné materiály v betonu

Dle výzkumu publikovaného M. A. Elrahmanem a B. Hillemeierem, kteří se zabývali vlivy jemného popílku a „zhuštění“ struktury na výsledné vlastnosti vysokohodnotného betonu, lze hustotu struktury definovat jako objem, který zaujmají pevné částice k objemu, který není vyplněn. Menší částice vyplňují prostor mezi většími a dochází ke „zhušťování“ struktury betonu. Pro dokonale „zhuštěnou“ strukturu betonu bychom tedy museli přidávat menší a menší částice schopné vyplňovat menší a menší prostor mezi jednotlivými zrny. [25] [26]



Obr. 16 - Zhuštění struktury částicemi různé velikosti

Pozn. Evaluation of modified-graphite nanomaterials in concrete nanocomposite based on packing density principles [26]

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:

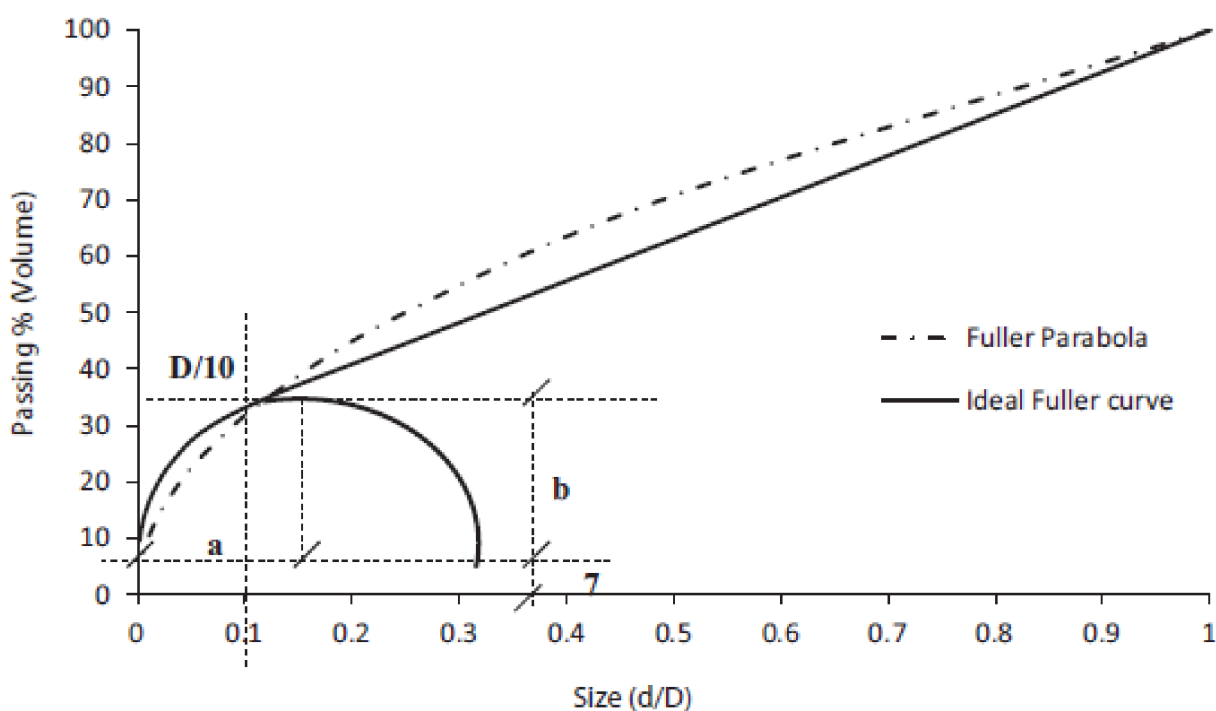
$$\frac{(y - 7)^2}{b^2} + \frac{(x - a)^2}{a^2} = 1$$

pro eliptickou část křivky

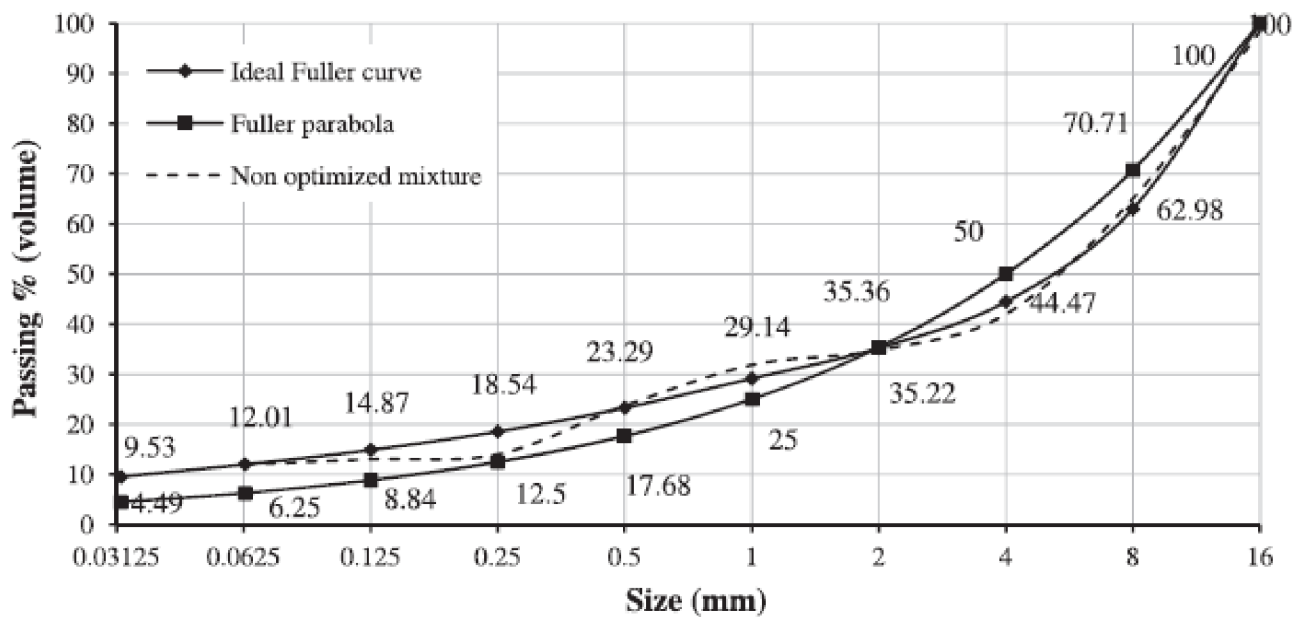
$$y = \frac{100 - y_1}{D - x_1}(x_0 - x_1) + y_1$$

pro přímou část křivky,

a, b jsou osy elipsy (hodnota závisí na tvaru částic a maximální dávce kameniva); $x_0 = D/10$ až D ; $y_1 = y$ v bodě $D/10$ a $x_1 = D/10$.



Graf 4 - Porovnání křivek zrnitosti – Fullerova parabola a ideální Fullerova křivka pro kamenivo a jemnozrný materiál [25]



Graf 5 - Fullerova parabola a ideální Fullerova křivka v semilogaritmicmém měřítku pozn.Graf 4 a 5 převzaty z Construction and Building Materials; Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach. [25]

Dle této metodiky byl navržen beton s maximální frakcí kameniva 16 mm s poměrem jemných částic a kameniva 14,87 : 85,13. Jako jemnozrnné materiály byly použity CEM I 32,5 R; CEM III B 32,5 N-LH/HS/NA s obsahem strusky okolo 68%; elektrárenský popílek; jemný elektrárenský popílek, mikrosilika. Jako korekční materiály byl použit křemenný písek a křemenná moučka. Vodní součinitel byl stanoven 0,42 a 0,27. Fyzikální a chemické vlastnosti použitých jemnozrnných materiálů jsou v následující tabulce (Tab 7).

Materiál	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cl	Obj. hmotnost [kg/ m ³]	Specifický povrch [cm ² /g]
CEM I	63,25	20,80	4,61	2,59	4,17	0,16	0,50	2,70	-	3170	3450
CEM III B	48,00	29,70	6,50	1,20	8,00	0,31	0,65	2,49	0,02	2960	4156
Popílek	3,1	49,20	27,60	7,60	2,10	0,90	5,00	5,00	-	2290	2877
Jemný popílek	5,00	52,00	25,00	6,00	1,00	1,50	1,90	1,90	-	2450	6000
Mikrosilika	0,20	98,40	0,20	0,01	0,10	0,15	0,20	1,10	0,01	2200	20000
Křemenná moučka	-	98,50	0,70	0,06	-	-	-	0,10	-	2690	2683
Křemenný písek	0,013	99,60	0,11	0,012	0,004	0,006	0,024	-	-	2670	760

Tab. 7 - Fyzikální a chemické vlastnosti jemnozrnných materiálů

Pozn. Převzato z Construction and Building Materials; Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach. [25]

Z uvedených materiálů bylo namícháno celkem devět záměsí s náhradou cementu příměsími od 10 do 35 procent. Složení jednotlivých záměsí je uvedeno v tabulce (Tab. 8).

Záměs	Druh cementu	Cem [%]	FA [%]	FFA [%]	SF [%]	Plast. [kg/m ³]	Kamenivo [kg/m ³]	QS [kg/m ³]	QP [kg/m ³]	w/b	Rozliti [mm]	Vzduch [%]	Obj. hm. [kg/m ³]
1	CEM I	100	-	-	-	2,8	1854	46	84	0,42	520	1,5	2450
2	CEM I	65	-	25	10	3,0	1854	46	84	0,42	460	1,0	2460
3	CEM III	100	-	-	-	2,2	1854	46	84	0,42	530	1,5	2430
4	CEM III	70	30	-	-	3,3	1854	46	84	0,42	520	1,3	2450
5	CEM III	70	-	30	-	3,0	1854	46	84	0,42	510	1,3	2440
6	CEM III	90	-	-	10	2,5	1854	46	84	0,42	480	2,3	2420
7	CEM III	65	-	25	10	3,0	1854	46	84	0,42	500	2,0	2440
8	CEM III	67	-	25	8	8,8	1947	48	88	0,27	440	1,5	2500
9	CEM III	70	-	30	-	6,6	1947	48	88	0,27	480	1,4	2490

Tab. 8 - Složení záměsí betonu

Pozn. Převzato z Construction and Building Materials; Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach. [25]

U takto sestavených záměsí byly sledovány zejména mechanické vlastnosti – pevnost v tlaku po 28 a 91 dnech, hloubka průsaku tlakovou vodou a modul pružnosti. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 9).

Záměs	Pevnost v tlaku [MPa]		Modul pružnosti [GPa]	Hloubka průsaku [mm]
	28 dnů	91 dnů		
1	62	72	43,1	18
2	78	82	44,5	14
3	52	68	43,5	15
4	56	64	40,2	18
5	68	72	42,9	8
6	66	78	45,2	11
7	66	71	40,8	13
8	82	99	50,2	3
9	80	91	46,9	5

Tab. 9 - Složení záměsí betonu

Pozn. Převzato z Construction and Building Materials; Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high performance concrete: An experimental approach. [25]

Z uvedených výsledků lze vyvozovat, že je možné připravit vysokohodnotný beton s poměrně nízkým množstvím cementu, pokud jsou použity vhodné příměsi a z nich je spolu s cementem sestavena křivka zrnitosti tak, aby vyplnění pórů v betonu bylo co možná nejvyšší. Na mechanické vlastnosti má samozřejmě velký vliv i vodní součinitel, jak je možno vidět u receptur 8 a 9. [25]

5.2 Aplikace normových postupů na jemnozrné materiály v betonu

Druhou možností, jak zajistit co nejlepší hustotu jemnozrné fáze betonu je pomocí aplikace některých známých normových postupů, které se však nepoužívají pro výrobu betonů.

Jednou z těchto možností je aplikovat na jemnozrné materiály zkušební postup dle ČSN EN 1097 – 4 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 4: Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru. Při využití tohoto zkušebního postupu vycházíme z předpokladu, že pokud se nám podaří dosáhnout nižší mezerovitosti u zhutněné jemnozrné směsi v suchém stavu (cement v kombinaci s příměsí), bude mít takto použitá směs v betonu lepší nebo minimálně stejné mechanické vlastnosti, než kdybychom použili pouze cement ve stejném množství.

Tento předpoklad samozřejmě může platit pouze do určité míry. Pokud bychom nahradily příliš velké množství cementu, nelze očekávat zlepšení mechanických vlastností ani při výrazném snížení mezerovitosti. Složení a vzájemný poměr cementu a příměsí je tedy nutné odzkoušet pro ověření mechanických vlastností.

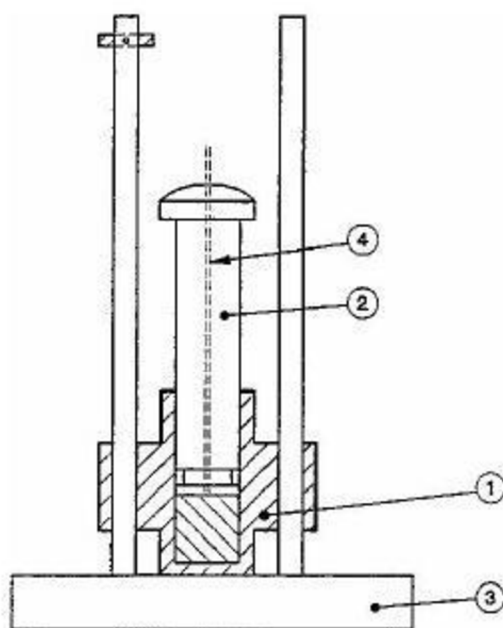
5.2.1 Postup optimalizace

Stejně jako při jakémkoliv jiném postupu, jak sestavit optimální složení směsi, je i v tomto případě nejprve nutné základní materiály podrobit zkouškám. V tomto případě je nutné znát měrnou hmotnost materiálů. Tu lze u jemnozrnných materiálů stanovit pyknometricky dle ČSN EN 1097 – 7. Po zhutnění fileru ve zkušebním zařízení lze mezerovitost směsi vypočítat dle vztahu:

$$V = \left(\frac{4 * 10^3 * m_2}{\pi * \alpha^2 * \rho_f * h} \right) * 100$$

Kde V je mezerovitost fileru v %; m_2 je hmotnost zhutněného fileru v gramech; α je vnitřní průměr válce beranu v mm; ρ_f je měrná hmotnost fileru v mg/m^3 ; h je výška zhutněného fileru.

Výsledná mezerovitost se stanoví jako průměr ze tří měření a zaokrouhlí se na 1%.



Obr. 17 – Rigdenerův přístroj dle ČSN EN 1097 – 4; popis: 1 – beran, 2 – píst, 3 – základová deska, 4 – odvětrávací otvor. [27]

6. Praktická část

6.1 Metodika práce

Pro tuto práci byly zvoleny komerčně běžně dostupné jemnozrnné 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

Pro sestavení a optimalizaci křivek zrnitosti je nutné dokonale zmapovat vlastnosti vstupních materiálů. V první fázi práce tedy byly všechny použité materiály podrobeny následujícím zkouškám:

- Stanovení měrné hmotnosti
- Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru
- Stanovení zrnitosti materiálu laserovým granulometrem Malvern Mastersizer 2000
- Mikroskopické stanovení tvaru zrn
- Síťový rozbor kameniva a jeho tvarový index

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 střešovacího 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.

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.

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.

6.2 Rozbor surovin – chemické a fyzikální vlastnosti

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

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

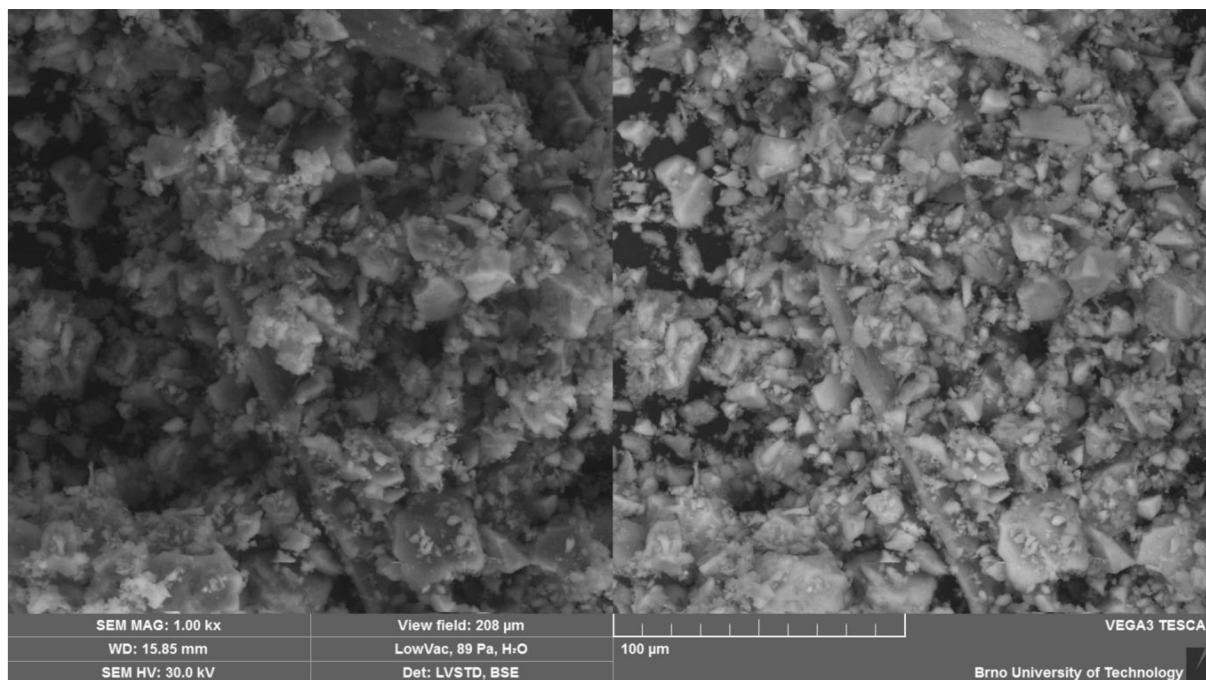
Tab. 10 - Chemické složení cementu v %

Pozn. Převzato z www.heidelbergcement.cz; technický list [28]

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

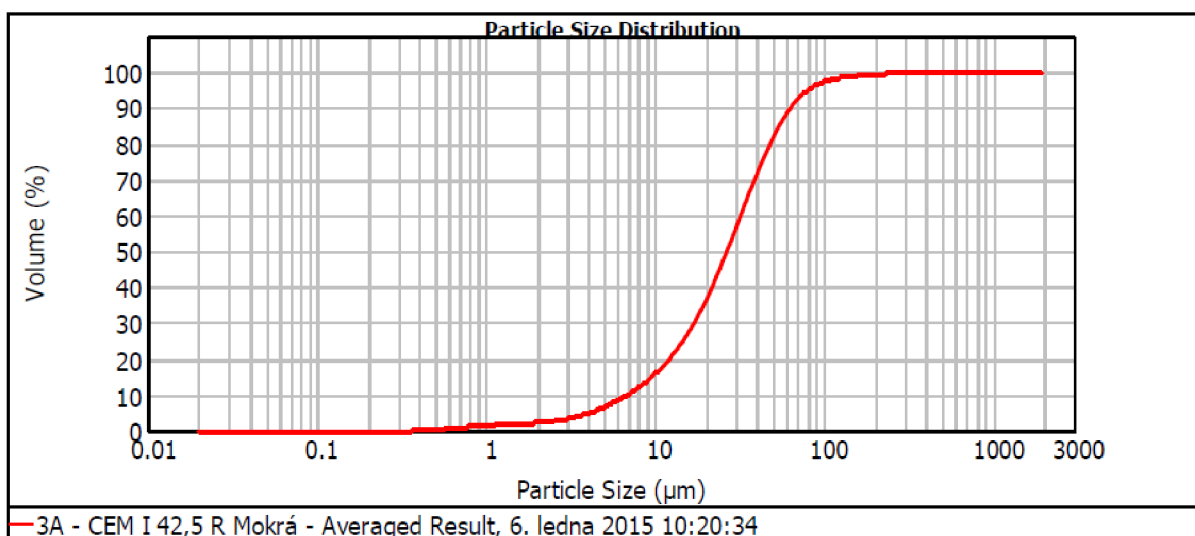
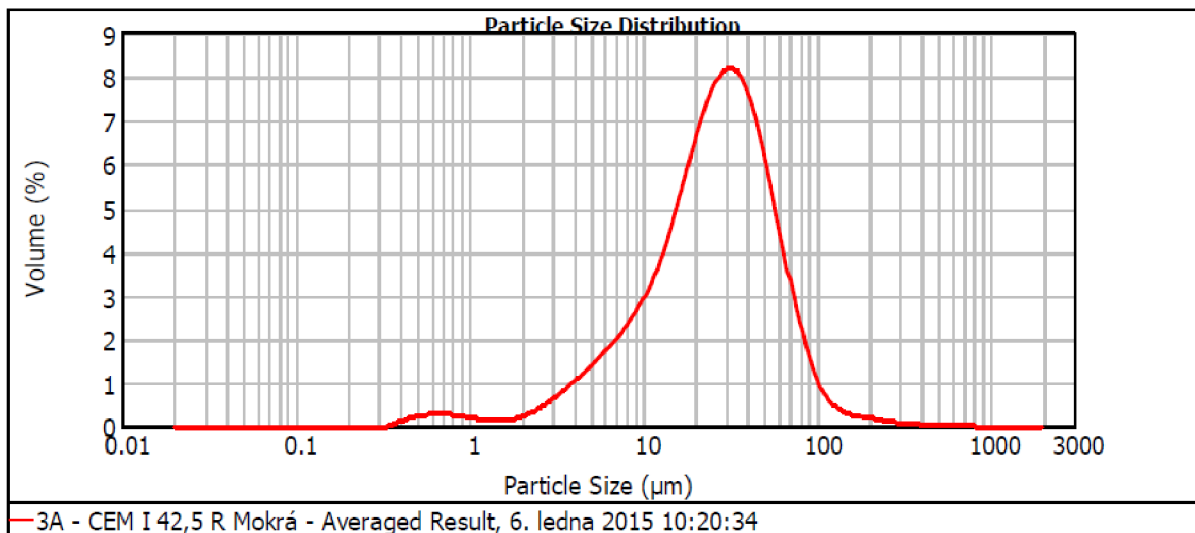
Tab. 11 - Mechanické a fyzikální vlastnosti cementu

Pozn. Převzato z www.heidelbergcement.cz; technický list [28]



Obr. 18 - Tvar částic cementu – elektronová mikroskopie

Ze snímků je patrné, že částice cementu mají výrazně ostrohranný, nepravidelný tvar.



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.079	0.00	0.631	0.43	5.012	2.41	39.811	10.53	316.228	0.09
0.013	0.00	0.100	0.00	0.794	0.36	6.310	2.41	50.119	7.84	398.107	0.06
0.016	0.00	0.126	0.00	1.000	0.26	7.943	3.05	63.096	4.88	501.187	0.05
0.020	0.00	0.158	0.00	1.259	0.21	10.000	5.06	79.433	2.48	630.957	0.03
0.025	0.00	0.200	0.00	1.585	0.21	12.589	5.06	100.000	1.07	794.328	0.03
0.032	0.00	0.251	0.00	1.995	0.27	15.849	6.73	125.893	0.53	1000.000	0.00
0.040	0.00	0.316	0.00	2.512	0.47	19.953	8.81	158.489	0.35		
0.050	0.00	0.398	0.06	3.162	0.82	25.119	10.84	199.526	0.24		
0.063	0.00	0.501	0.26	3.981	1.29	31.623	12.16	251.189	0.24		
0.079	0.00	0.631	0.40	5.012	1.83	39.811	12.12	316.228	0.14		

Obr. 19 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor cementu

Distribuce částic cementu je víceméně rovnoměrná s mírnou převahou hrubších částic. Průměr středního zrna $d(0,5) = 26,407 \mu\text{m}$.

Popílek – hnědohelný, elektrárna Tušimice, ČEZ, a.s.

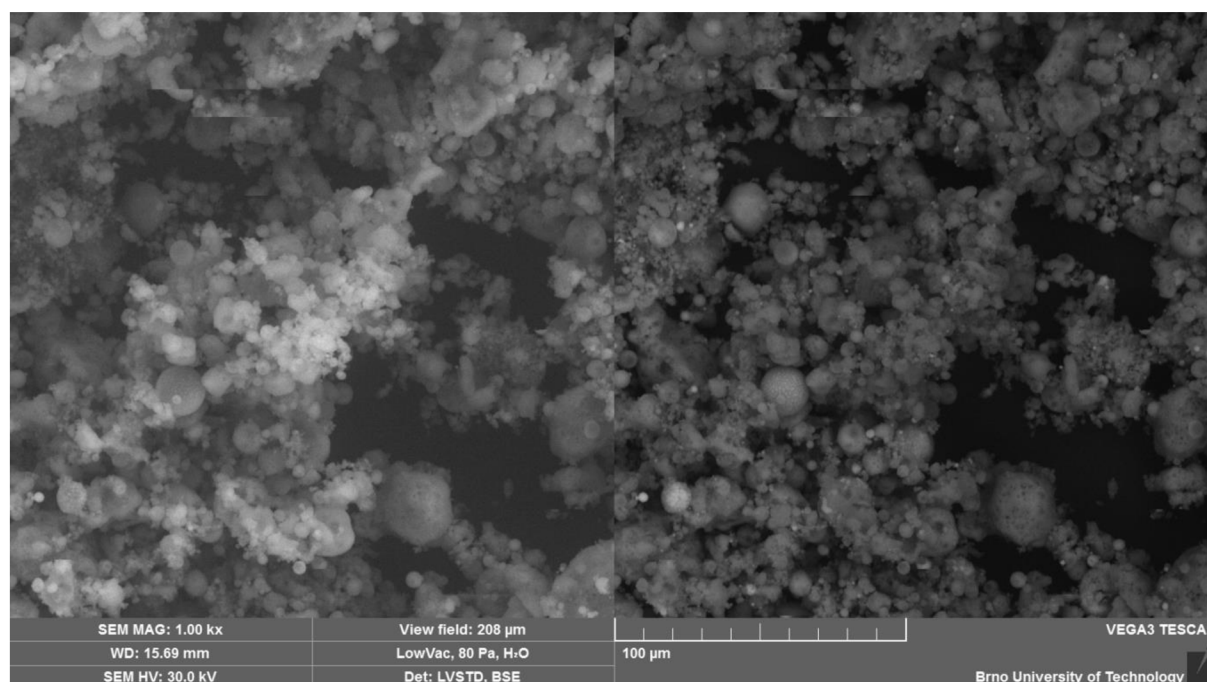
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	MnO	K ₂ O	Na ₂ O
3,42	50,00	23,40	14,50	1,72	0,72	0,10	1,07	0,291

Tab. 12 - Chemické složení popílku v %

Pozn. Převzato z ELFMARKOVÁ, Veronika. Vliv jemnozrnných příměsí na charakter pórového systému betonu. [29]

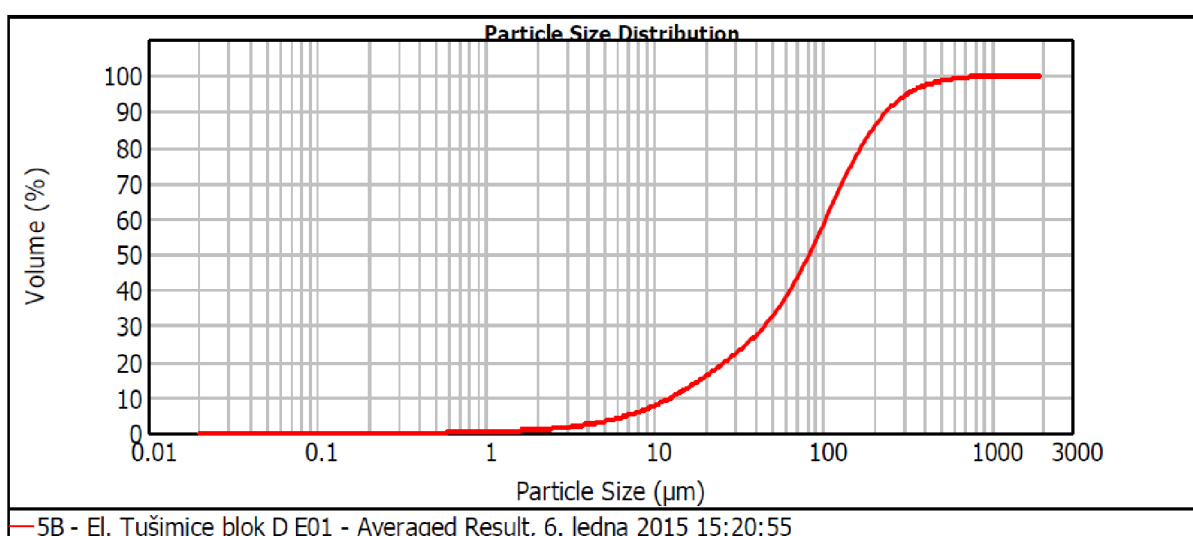
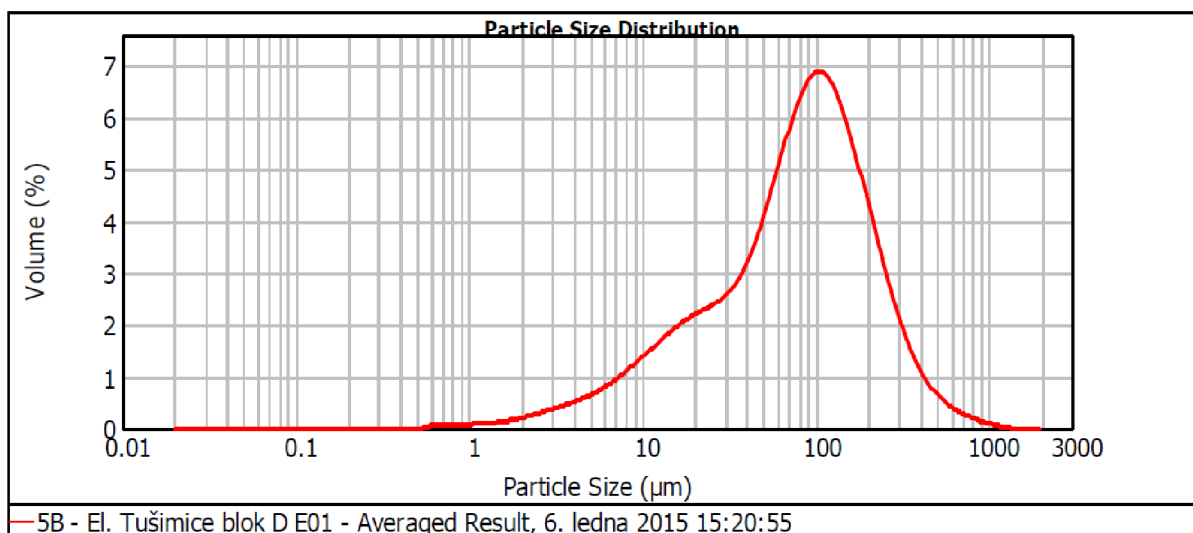
	Měrný povrch [m ² /kg]	Měrná hmotnost [kg/m ²]
ETU blok D E01	161	1970
ETU blok D E02	454	2040
ETU blok D E03	730	2120

Tab. 13 - Fyzikální vlastnosti popílku z elektrárny Tušimice



Obr. 20 - Tvar částic popílku – elektronová mikroskopie

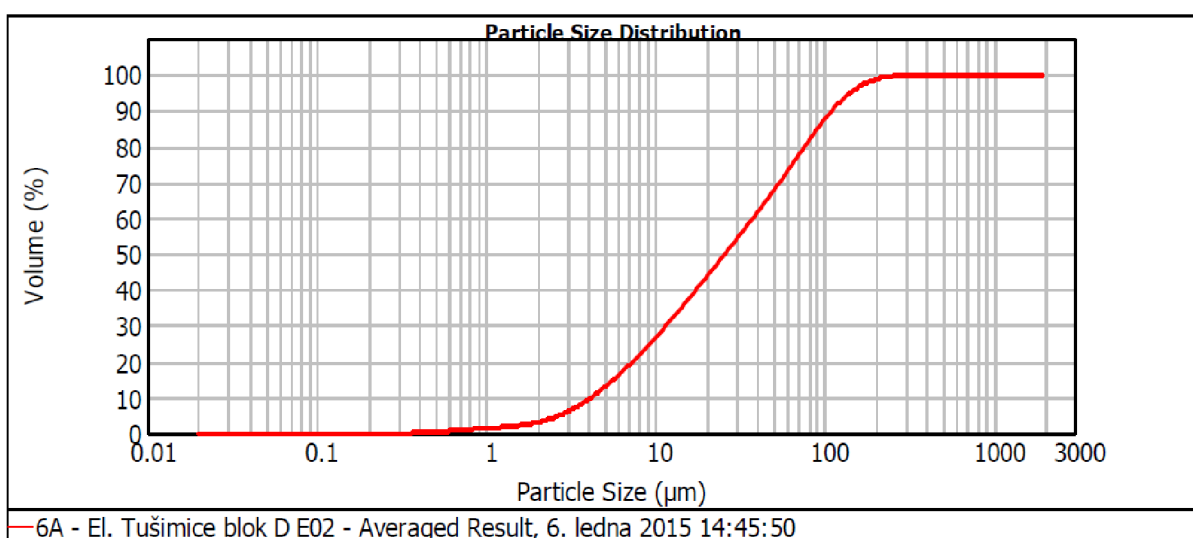
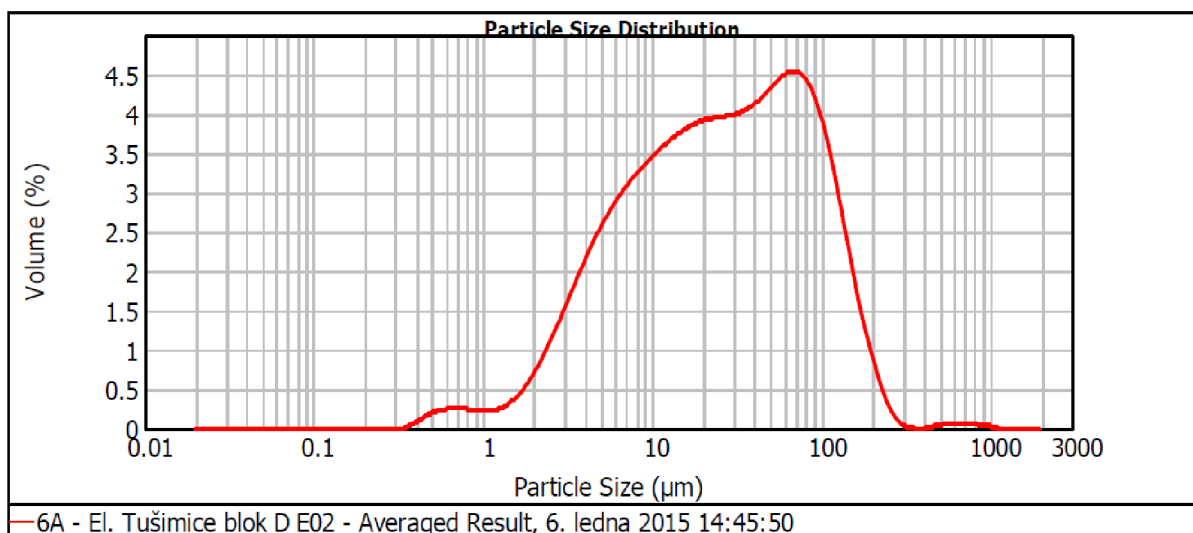
Částice popílku mají pravidelný kulový tvar a hladký skelný povrch.



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.079	0.00	0.631	0.10	5.012	1.12	39.811	5.40	316.228	2.29
0.013	0.00	0.100	0.00	0.794	0.11	6.310	1.44	50.119	7.00	398.107	1.32
0.016	0.00	0.126	0.00	1.000	0.12	7.943	1.85	63.096	8.76	501.187	0.74
0.020	0.00	0.158	0.00	1.259	0.17	10.000	2.32	79.433	10.05	630.957	0.42
0.025	0.00	0.200	0.00	1.585	0.25	12.589	2.77	100.000	10.28	794.328	0.23
0.032	0.00	0.251	0.00	1.995	0.37	15.849	3.14	125.893	9.31	1000.000	
0.040	0.00	0.316	0.00	2.512	0.51	19.953	3.43	158.489	7.54		
0.050	0.00	0.398	0.00	3.162	0.68	25.119	3.74	199.526	5.53		
0.063	0.00	0.501	0.00	3.981	0.87	31.623	4.33	251.189	3.71		
0.079	0.00	0.631	0.03	5.012	0.87	39.811	4.33	316.228	3.71		

Obr. 21 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a sítový rozbor – blok D E01

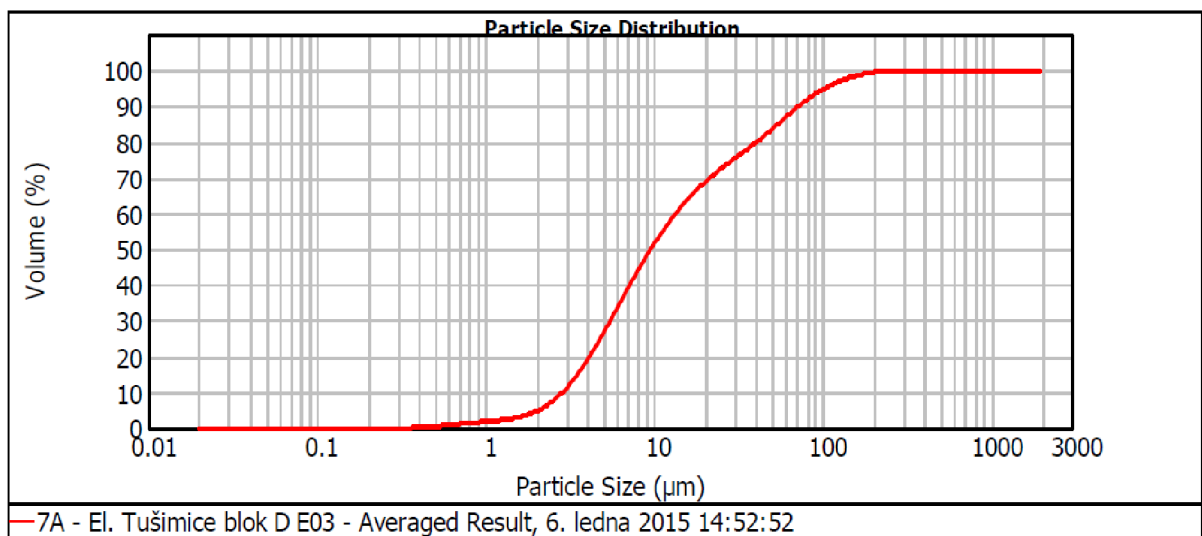
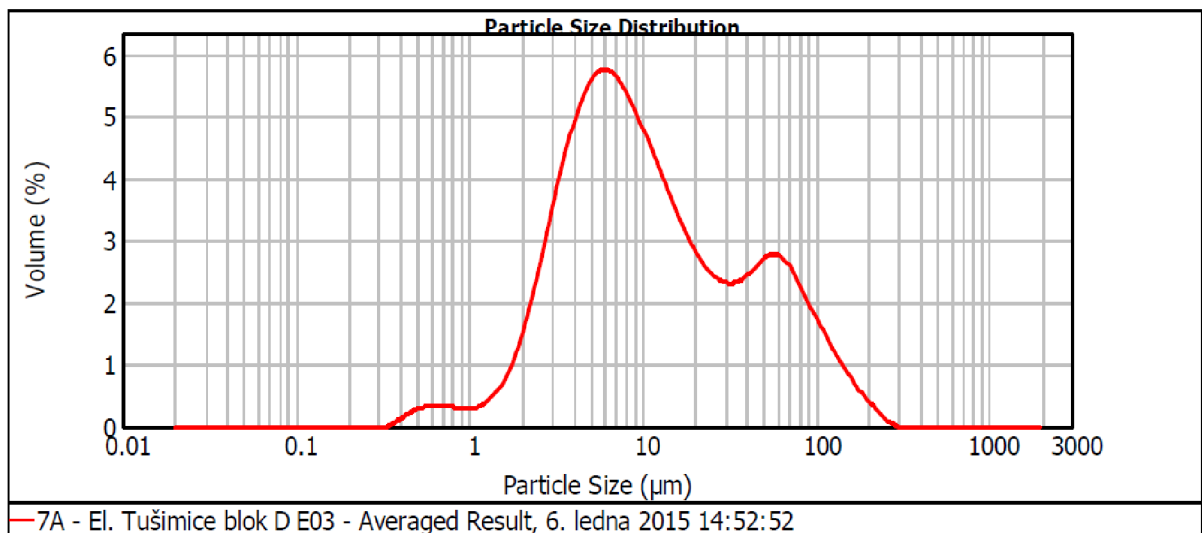
V distribuci částic popílku z bloku označeného jako D E01 převažují hrubší zrna, průměr středního zrna $d(0,5) = 82,312 \mu\text{m}$.



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.079	0.00	0.631	0.39	5.012	4.18	39.811	6.35	316.228	0.00
0.013	0.00	0.100	0.00	0.794	0.36	6.310	4.66	50.119	6.67	398.107	0.03
0.016	0.00	0.126	0.00	1.000	0.36	7.943	5.04	63.096	6.81	501.187	0.09
0.020	0.00	0.158	0.00	1.259	0.49	10.000	5.36	79.433	6.39	630.957	0.10
0.025	0.00	0.200	0.00	1.585	0.83	12.589	5.63	100.000	5.25	794.328	0.10
0.032	0.00	0.251	0.00	1.995	1.38	15.849	5.83	125.893	3.60	1000.000	0.06
0.040	0.00	0.316	0.04	2.512	2.08	19.953	5.93	158.489	2.01		
0.050	0.00	0.398	0.22	3.162	2.85	25.119	5.98	199.526	0.84		
0.063	0.00	0.501	0.36	3.981	3.58	31.623	6.09	251.189	0.16		
0.079	0.00	0.631	0.36	5.012	3.58	39.811	6.09	316.228	0.16		

Obr. 22 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – blok D E02

V distribuci částic popílku z bloku označeného jako D E02 mírně převažují hrubší zrna, průměr středního zrna $d(0,5) = 25,558 \mu\text{m}$.



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.079	0.00	0.631	0.50	5.012	8.62	39.811	3.87	316.228	0.00
0.013	0.00	0.100	0.00	0.794	0.45	6.310	8.48	50.119	4.17	398.107	0.00
0.016	0.00	0.126	0.00	1.000	0.49	7.943	7.75	63.096	3.87	501.187	0.00
0.020	0.00	0.158	0.00	1.259	0.81	10.000	6.74	79.433	3.02	630.957	0.00
0.025	0.00	0.200	0.00	1.585	1.60	12.589	5.68	100.000	2.26	794.328	0.00
0.032	0.00	0.251	0.00	1.995	2.95	15.849	4.73	125.893	1.54	1000.000	0.00
0.040	0.00	0.316	0.07	2.512	4.71	19.953	3.98	158.489	0.90		
0.050	0.00	0.398	0.31	3.162	6.53	25.119	3.55	199.526	0.40		
0.063	0.00	0.501	0.48	3.981	7.95	31.623	3.53	251.189	0.06		
0.079	0.00	0.631		5.012		39.811		316.228			

Obr. 23 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a sítový rozbor – blok D E03

V distribuci částic popílku z bloku označeného jako D E03 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.

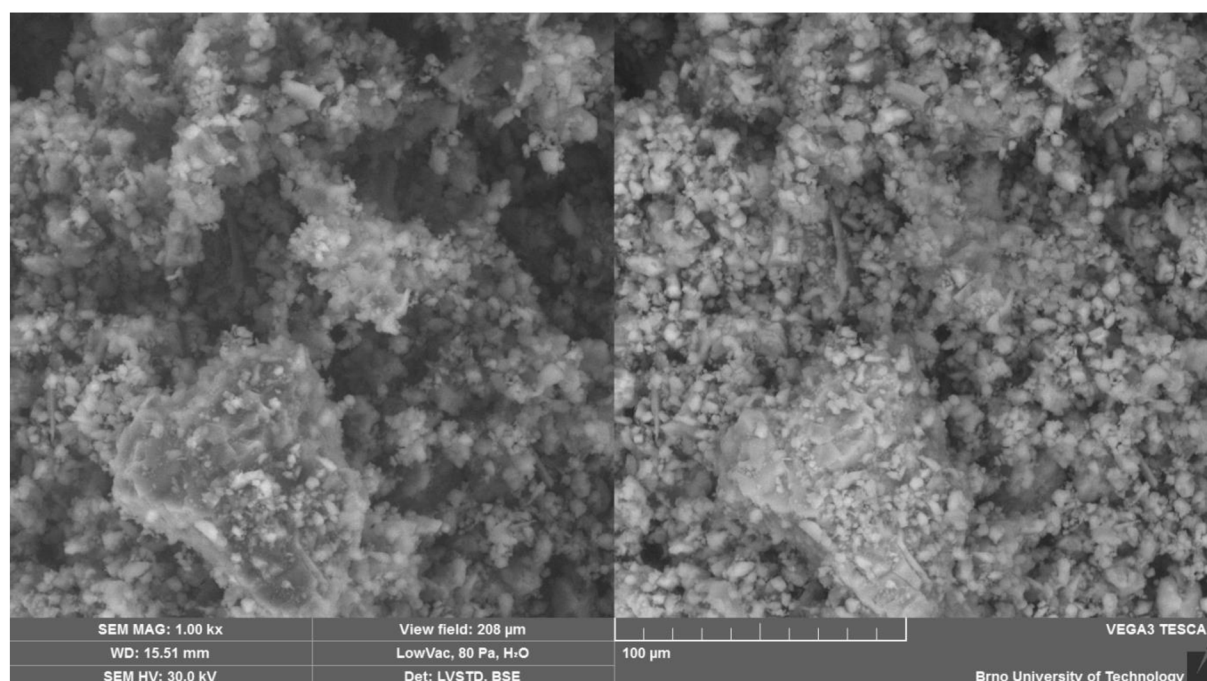
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	MnO	K ₂ O	Na ₂ O
51,03	4,94	0,90	0,41	1,55	0,08	0,05	0,11	0,07

Tab. 14 - Chemické složení mikromletého vápence v %

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

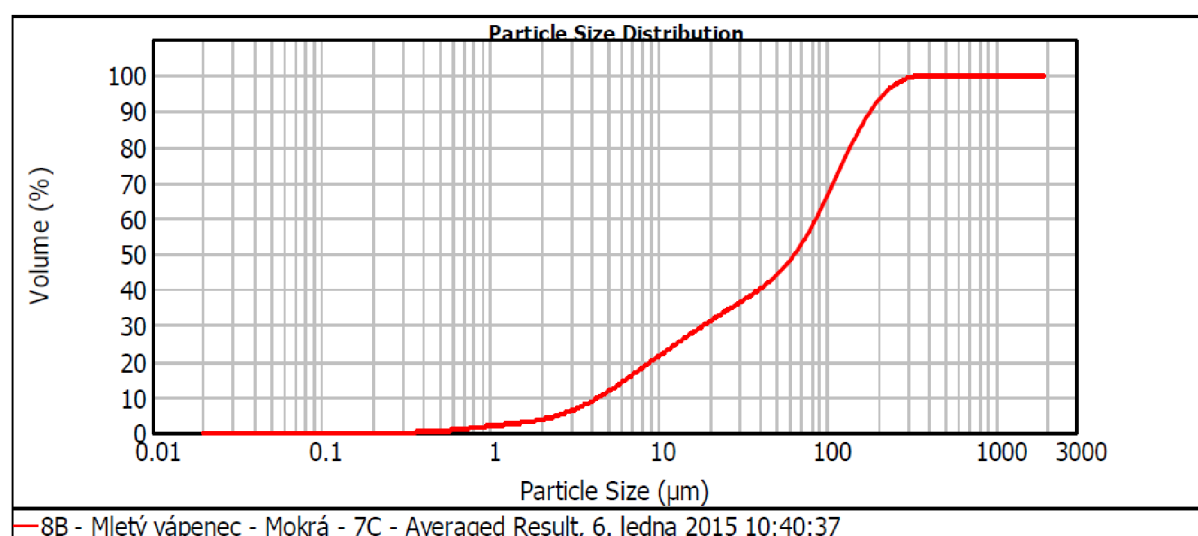
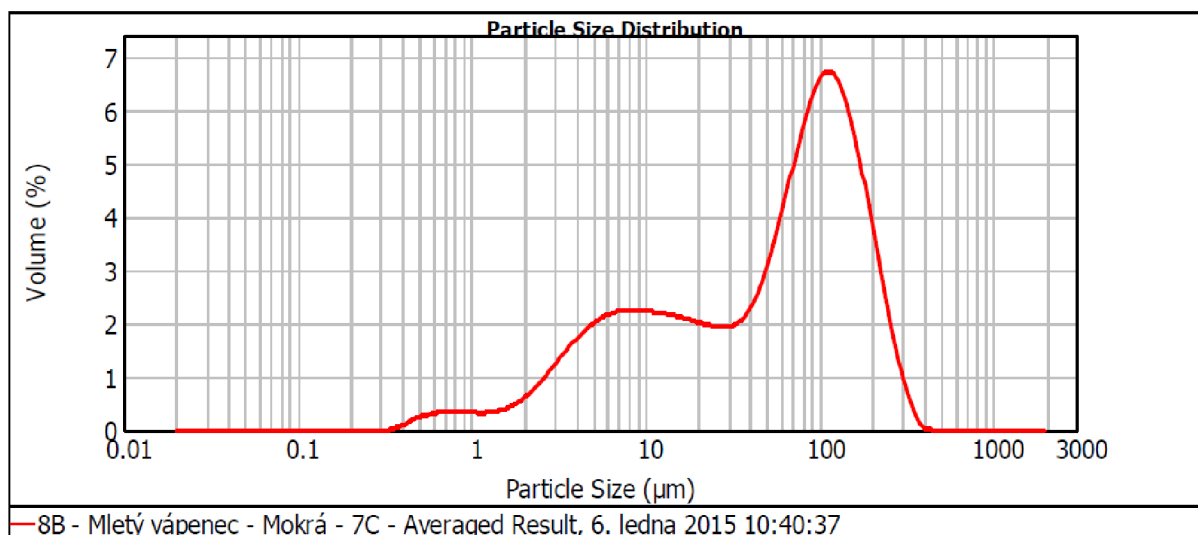
	Měrný povrch [m ² /kg]	Měrná hmotnost [kg/m ²]
Mletý vápenec 7/V	375	2680
Mletý vápenec 8/V	390	2720
Mletý vápenec 9/V	488	2770

Tab. 15 - Fyzikální vlastnosti vápenců



Obr. 24 - Tvar částic vápence – elektronová mikroskopie

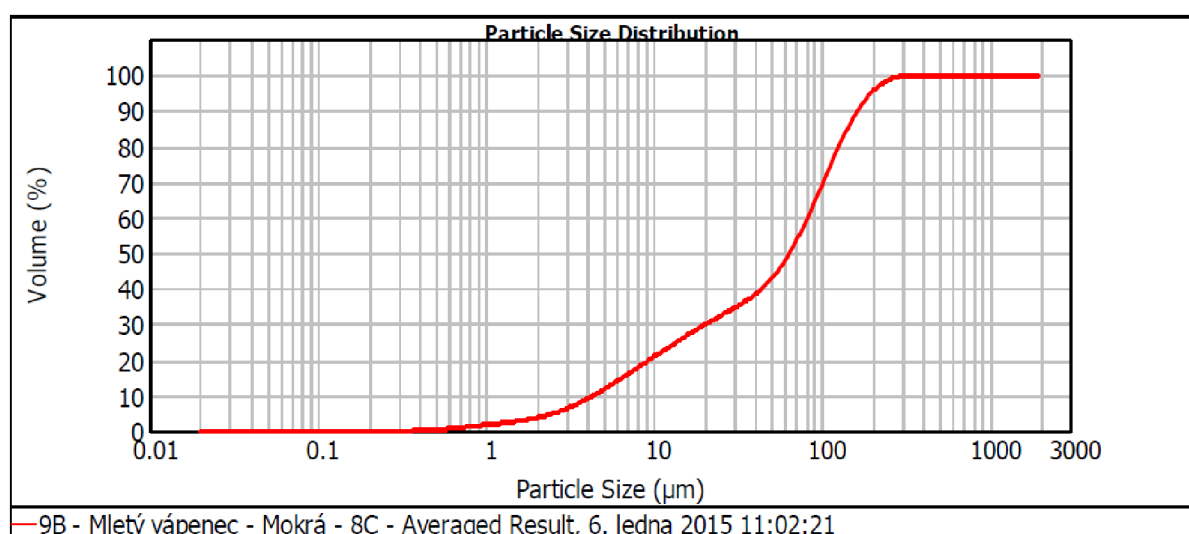
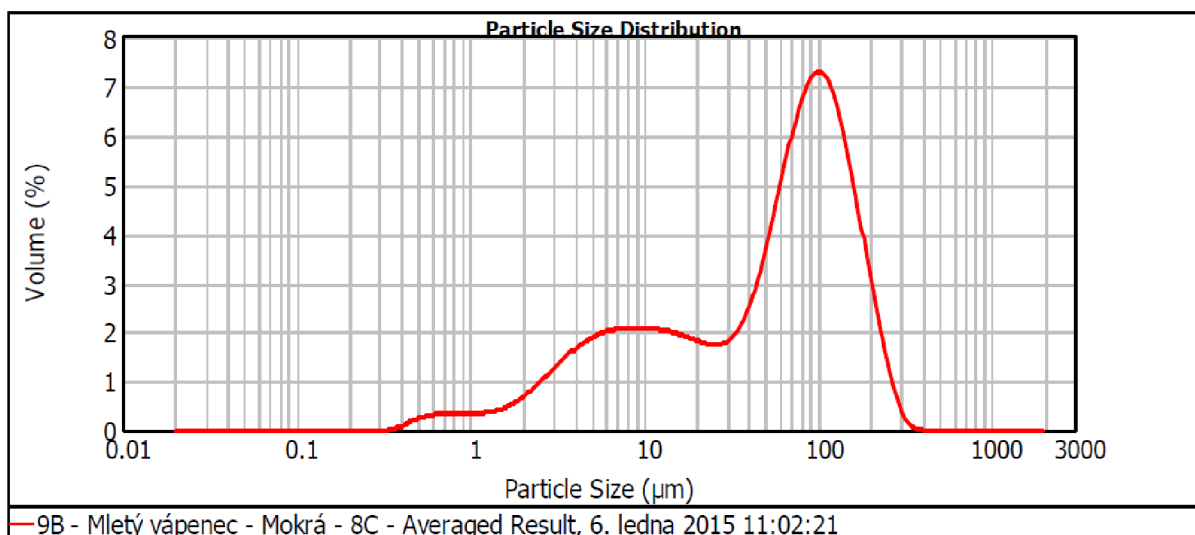
Částice vápence mají hranatý nepravidelný tvar. Hrany nejsou tak výrazně ostré jako je tomu u částic cementu.



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.079	0.00	0.631	0.52	5.012	3.18	39.811	3.95	316.228	0.50
0.013	0.00	0.100	0.00	0.794	0.52	6.310	3.36	50.119	5.49	398.107	0.01
0.016	0.00	0.126	0.00	1.000	0.50	7.943	3.39	63.096	7.52	501.187	0.00
0.020	0.00	0.158	0.00	1.259	0.55	10.000	3.33	79.433	9.33	630.957	0.00
0.025	0.00	0.200	0.00	1.585	0.75	12.589	3.25	100.000	10.08	794.328	0.00
0.032	0.00	0.251	0.00	1.995	1.13	15.849	3.13	125.893	9.29	1000.000	0.00
0.040	0.00	0.316	0.04	2.512	1.67	19.953	2.98	158.489	7.16		
0.050	0.00	0.398	0.25	3.162	2.27	25.119	2.91	199.326	4.46		
0.063	0.00	0.501	0.44	3.981	2.81	31.623	3.14	251.189	2.06		
0.079	0.00	0.631		5.012		39.811		316.228			

Obr. 25 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a sítový rozbor – druh 7/V

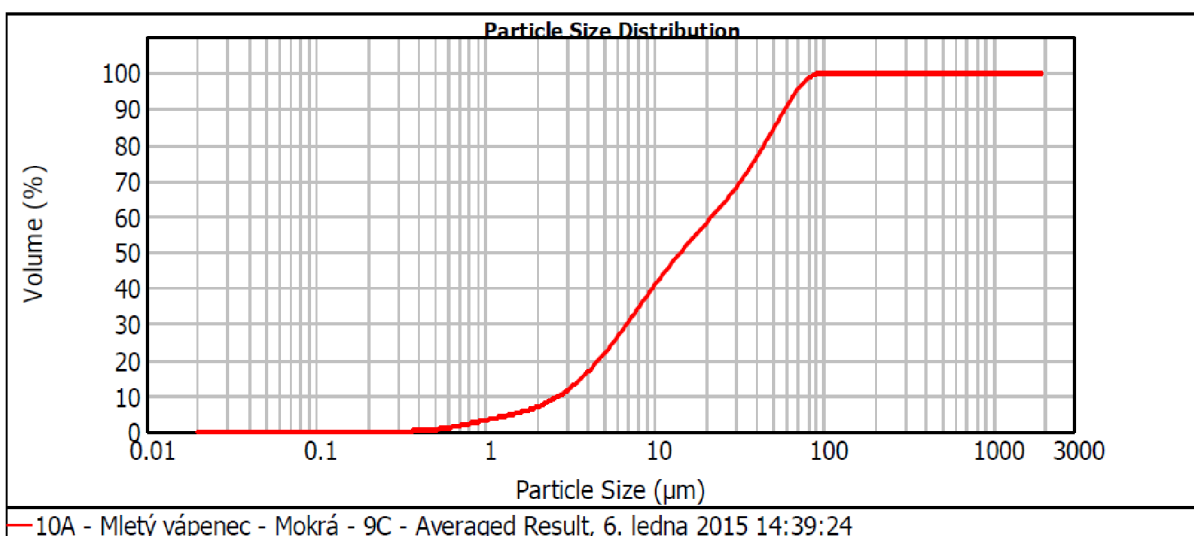
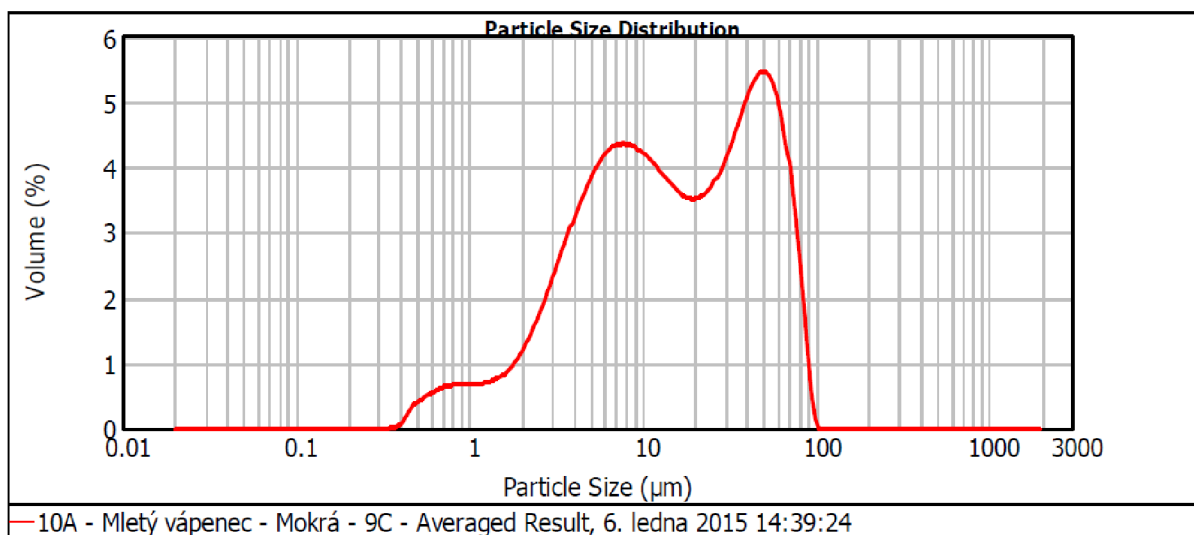
V distribuci částic mletého vápence označeného jako 7/V výrazně převažují hrubší zrna, průměr středního zrna $d(0,5) = 64,045 \mu\text{m}$.



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.079	0.00	0.631	0.52	5.012	2.98	39.811	4.57	316.228	0.10
0.013	0.00	0.100	0.00	0.794	0.53	6.310	3.11	50.119	6.72	398.107	0.00
0.016	0.00	0.126	0.00	1.000	0.53	7.943	3.13	63.096	9.10	501.187	0.00
0.020	0.00	0.158	0.00	1.269	0.62	10.000	3.11	79.433	10.73	630.957	0.00
0.025	0.00	0.200	0.00	1.585	0.85	12.589	3.02	100.000	10.76	794.328	0.00
0.032	0.00	0.251	0.00	1.995	1.24	15.849	2.86	125.893	9.03	1000.000	0.00
0.040	0.00	0.316	0.03	2.512	1.74	19.953	2.68	158.489	6.19		
0.050	0.00	0.398	0.24	3.162	2.26	25.119	2.68	199.526	3.26		
0.063	0.00	0.501	0.43	3.981	2.69	31.623	3.21	251.189	1.07		
0.079	0.00	0.631	0.43	5.012	2.69	39.811	3.21	316.228	1.07		

Obr. 26 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – druh 8/V

V distribuci částic mletého vápence označeného jako 8/V výrazně převažují hrubší zrna, průměr středního zrna $d(0,5) = 63,512 \mu\text{m}$. Distribuce je velice podobná distribuci částic vápence 7/V.



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.079	0.00	0.631	0.95	5.012	6.13	39.811	8.04	316.228	0.00
0.013	0.00	0.100	0.00	0.794	1.02	6.310	6.53	50.119	7.96	398.107	0.00
0.016	0.00	0.126	0.00	1.000	1.03	7.943	6.50	63.096	5.87	501.187	0.00
0.020	0.00	0.158	0.00	1.259	1.13	10.000	6.15	79.433	1.78	630.957	0.00
0.025	0.00	0.200	0.00	1.585	1.48	12.589	5.69	100.000	0.00	794.328	0.00
0.032	0.00	0.251	0.00	1.995	2.15	15.849	5.35	125.893	0.00	1000.000	0.00
0.040	0.00	0.316	0.02	2.512	3.12	19.953	5.40	158.489	0.00		
0.050	0.00	0.398	0.36	3.162	4.24	25.119	5.99	199.526	0.00		
0.063	0.00	0.501	0.74	3.981	5.32	31.623	7.05	251.189	0.00		
0.079	0.00	0.631		5.012		39.811		316.228	0.00		

Obr. 27 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – druh 9/V

V distribuci částic mletého vápence označeného jako 9/V dominuje jemná a hrubá frakce, průměr středního zrna $d(0,5) = 14,255 \mu\text{m}$.

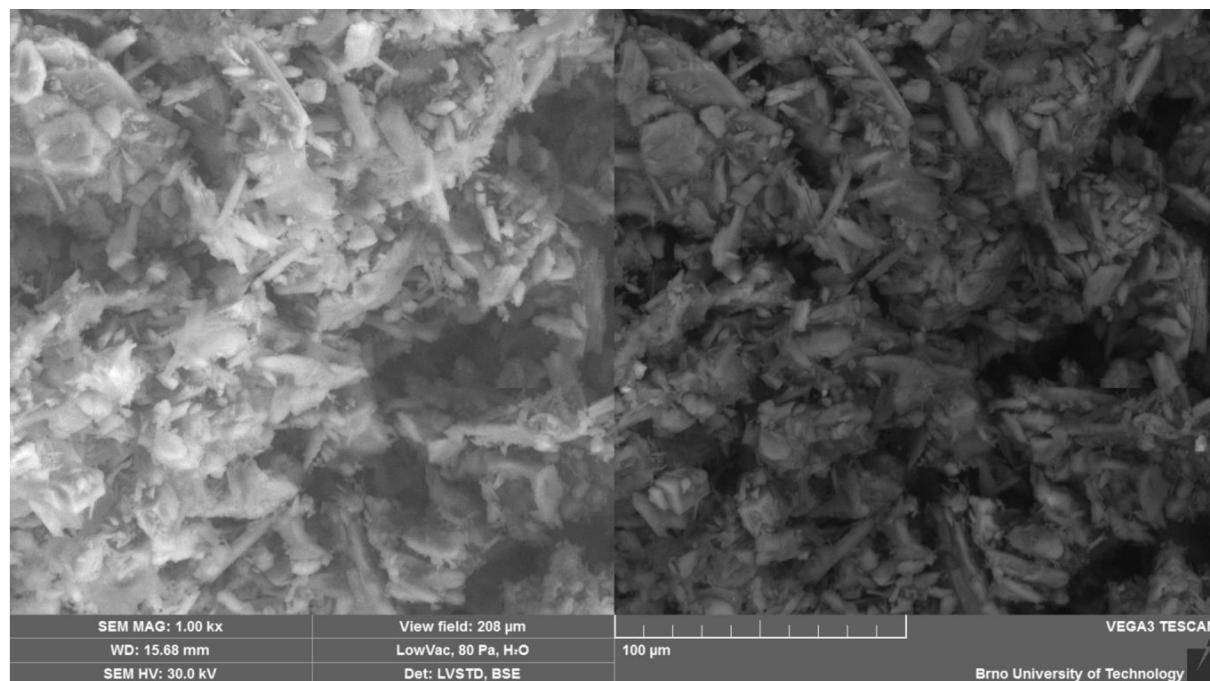
Kamenné odprašky - lokality Želešice a Předklášteří, Kámen Zbraslav, a.s.

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ 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. 16 - Chemické složení kamenných odprašků v %

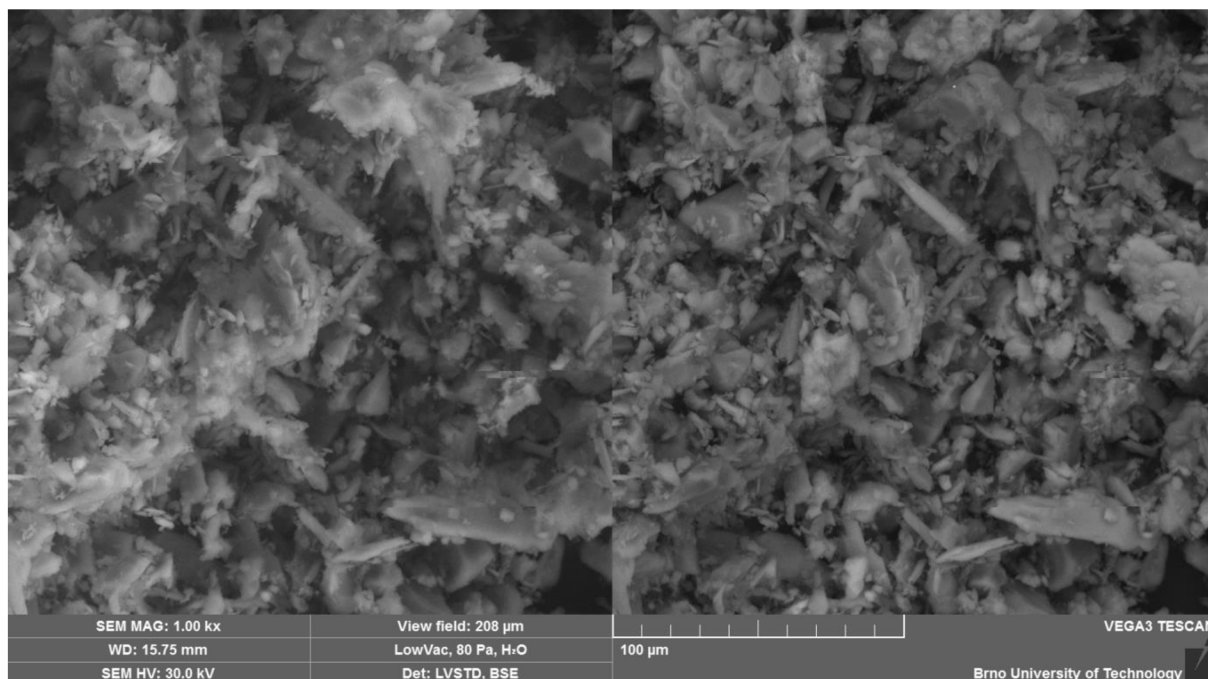
	Měrný povrch [m ² /kg]	Měrná hmotnost [kg/m ²]
Želešice	418	2890
Předklášteří	492	2720

Tab. 17 - Fyzikální vlastnosti kamenných odprašků



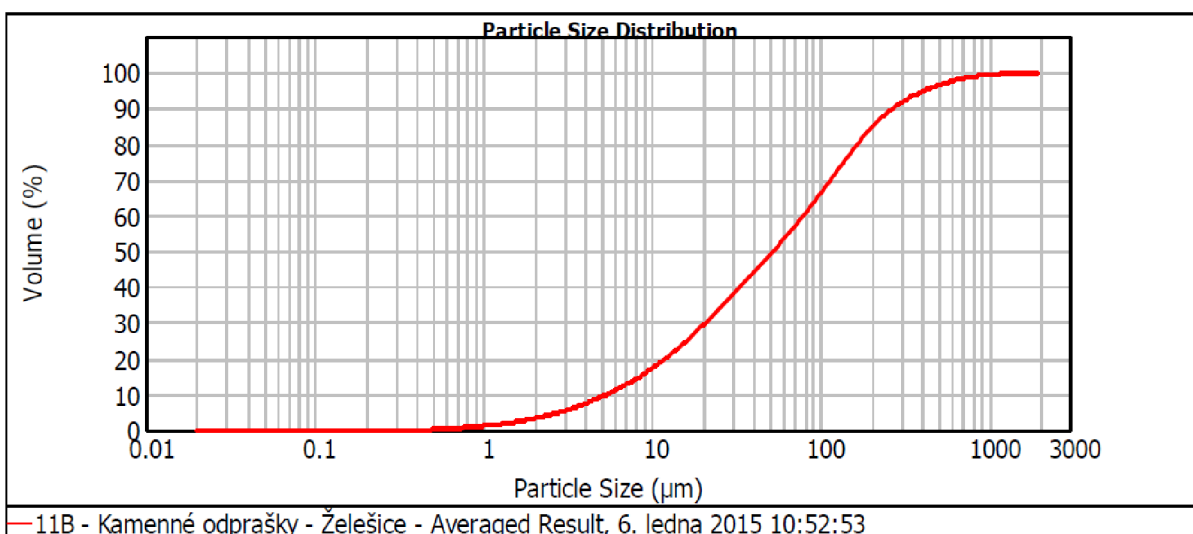
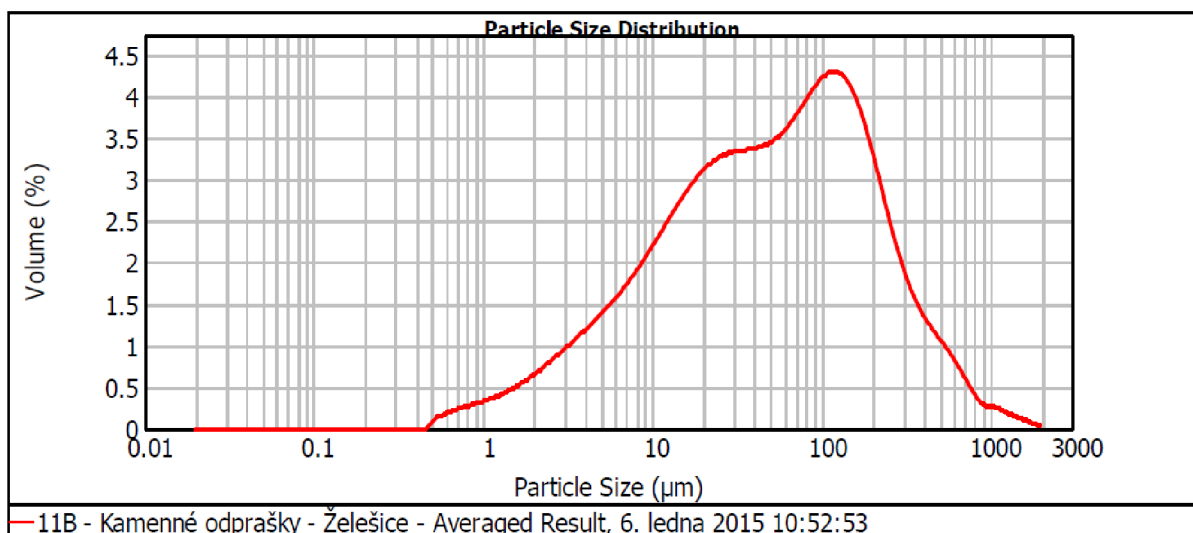
Obr. 28 – Tvar částic odprašků Želešice – elektronová mikroskopie

Částice mají ostrohranný, výrazně jehlicovitý tvar, kdy délka částic výrazně převažuje nad ostatními rozměry částic.



Obr. 29 – Tvar částic odprašků Předklášteří – elektronová mikroskopie

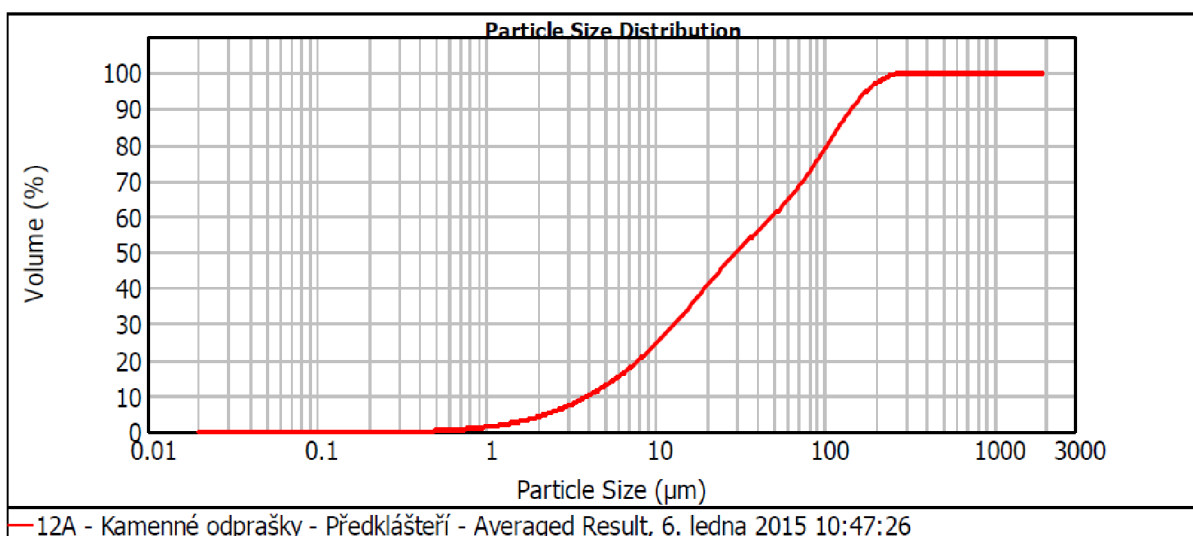
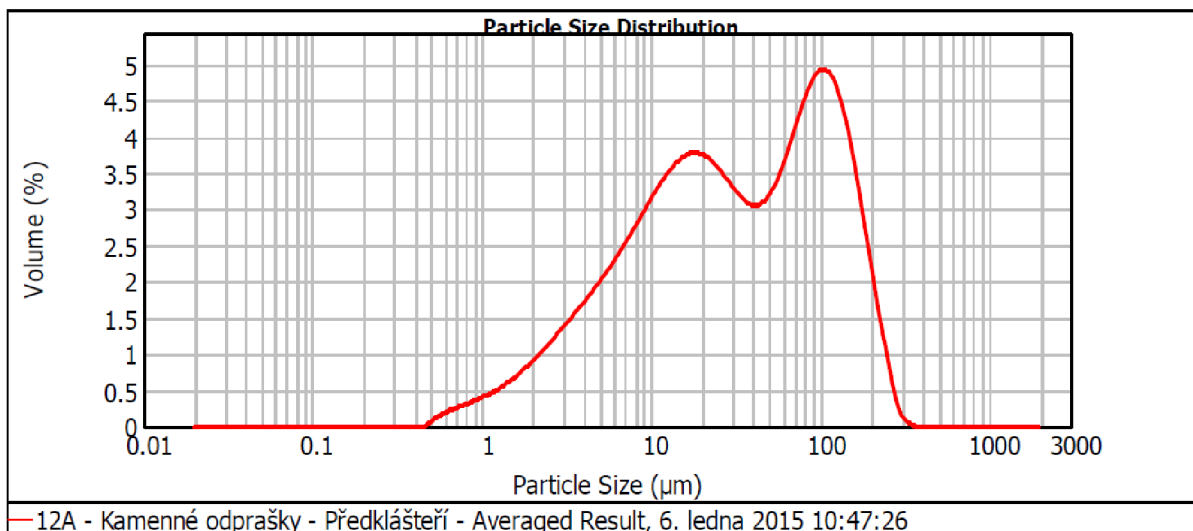
Částice mají ostrohranný, výrazně jehlicovitý tvar, kdy délka částic výrazně převažuje nad ostatními rozměry částic.



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.079	0.00	0.631	0.36	5.012	2.26	39.811	5.12	316.228	2.36
0.013	0.00	0.100	0.00	0.794	0.46	6.310	2.63	50.119	5.31	398.107	1.83
0.016	0.00	0.126	0.00	1.000	0.55	7.943	3.07	63.096	5.69	501.187	1.40
0.020	0.00	0.158	0.00	1.259	0.69	10.000	3.56	79.433	6.15	630.957	0.91
0.025	0.00	0.200	0.00	1.585	0.88	12.589	4.06	100.000	6.44	794.328	0.47
0.032	0.00	0.251	0.00	1.995	1.11	15.849	4.50	125.893	6.28	1000.000	
0.040	0.00	0.316	0.00	2.512	1.37	19.953	4.82	158.489	5.54		
0.050	0.00	0.398	0.02	3.162	1.65	25.119	4.98	199.526	4.39		
0.063	0.00	0.501	0.24	3.981	1.94	31.623	5.05	251.189	3.23		
0.079	0.00	0.631		5.012		39.811		316.228			

Obr. 30 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – odprašky Želešice

V distribuci částic kamenných odprašků z lokality Želešice dominuje hrubá frakce, průměr středního zrna $d(0,5) = 51,623 \mu\text{m}$.



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.010	0.00	0.079	0.00	0.631	0.40	5.012	3.30	39.811	4.65	316.228	0.03
0.013	0.00	0.100	0.00	0.794	0.54	6.310	3.84	50.119	5.19	398.107	0.00
0.016	0.00	0.126	0.00	1.000	0.69	7.943	4.45	63.096	6.21	501.187	0.00
0.020	0.00	0.158	0.00	1.269	0.91	10.000	5.03	79.433	7.16	630.957	0.00
0.025	0.00	0.200	0.00	1.585	1.21	12.589	5.49	100.000	7.32	794.328	0.00
0.032	0.00	0.251	0.00	1.995	1.56	15.849	5.67	125.893	6.33	1000.000	0.00
0.040	0.00	0.316	0.00	2.512	1.95	19.953	5.52	158.489	4.42		
0.050	0.00	0.398	0.02	3.162	2.37	25.119	5.11	199.526	2.29		
0.063	0.00	0.501	0.23	3.981	2.81	31.623	4.70	251.189	0.58		
0.079	0.00	0.631		5.012		39.811		316.228			

Obr. 31 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – odprašky Předklášteří

V distribuci částic kamenných odprašků z lokality Předklášteří dominuje jemná a hrubá frakce, průměr středního zrna $d(0,5) = 30,018 \mu\text{m}$.

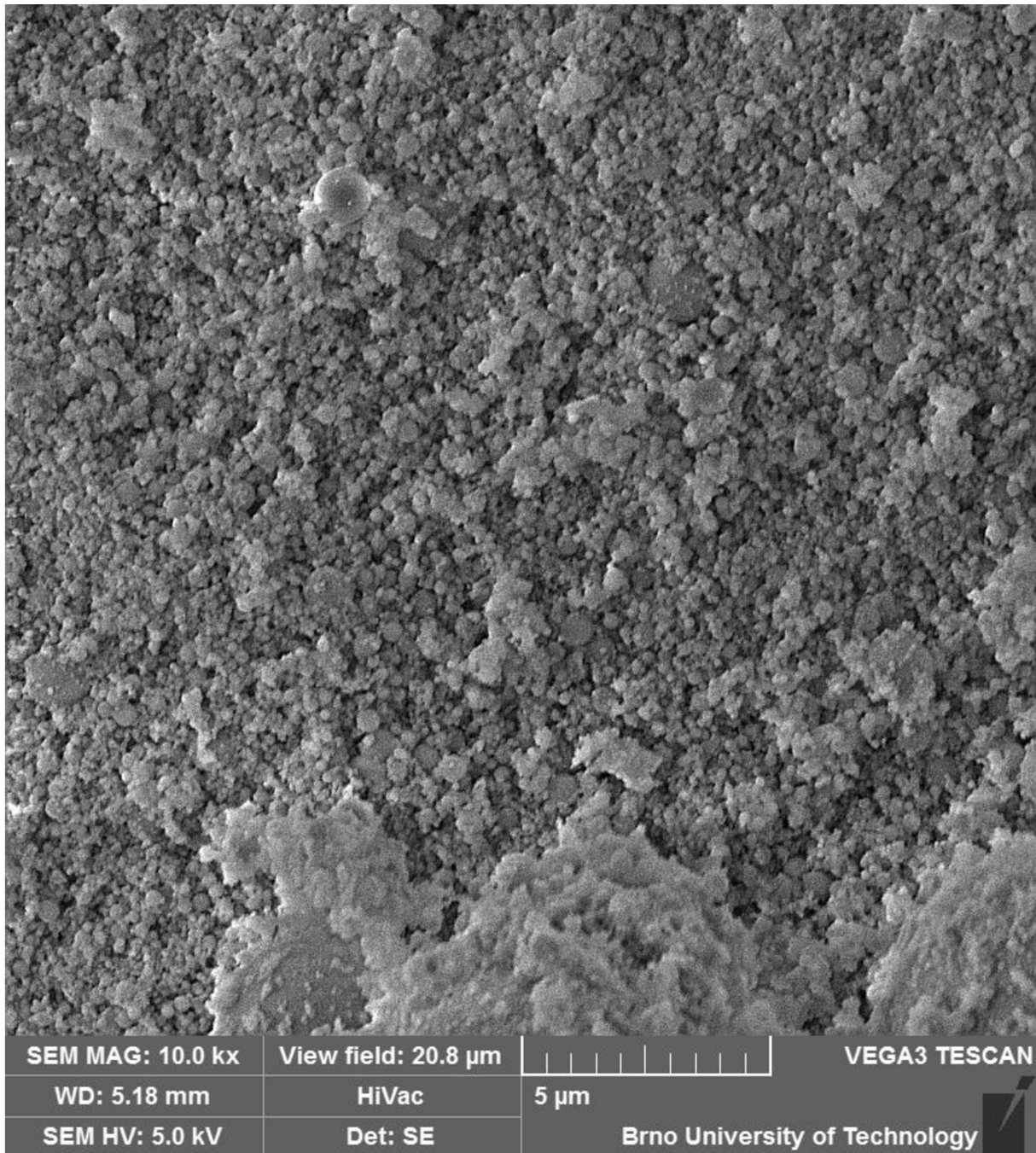
Mikrosilika – Oravské ferozliatinárské závody, a.s.

Obsah SiO₂ > 95 %

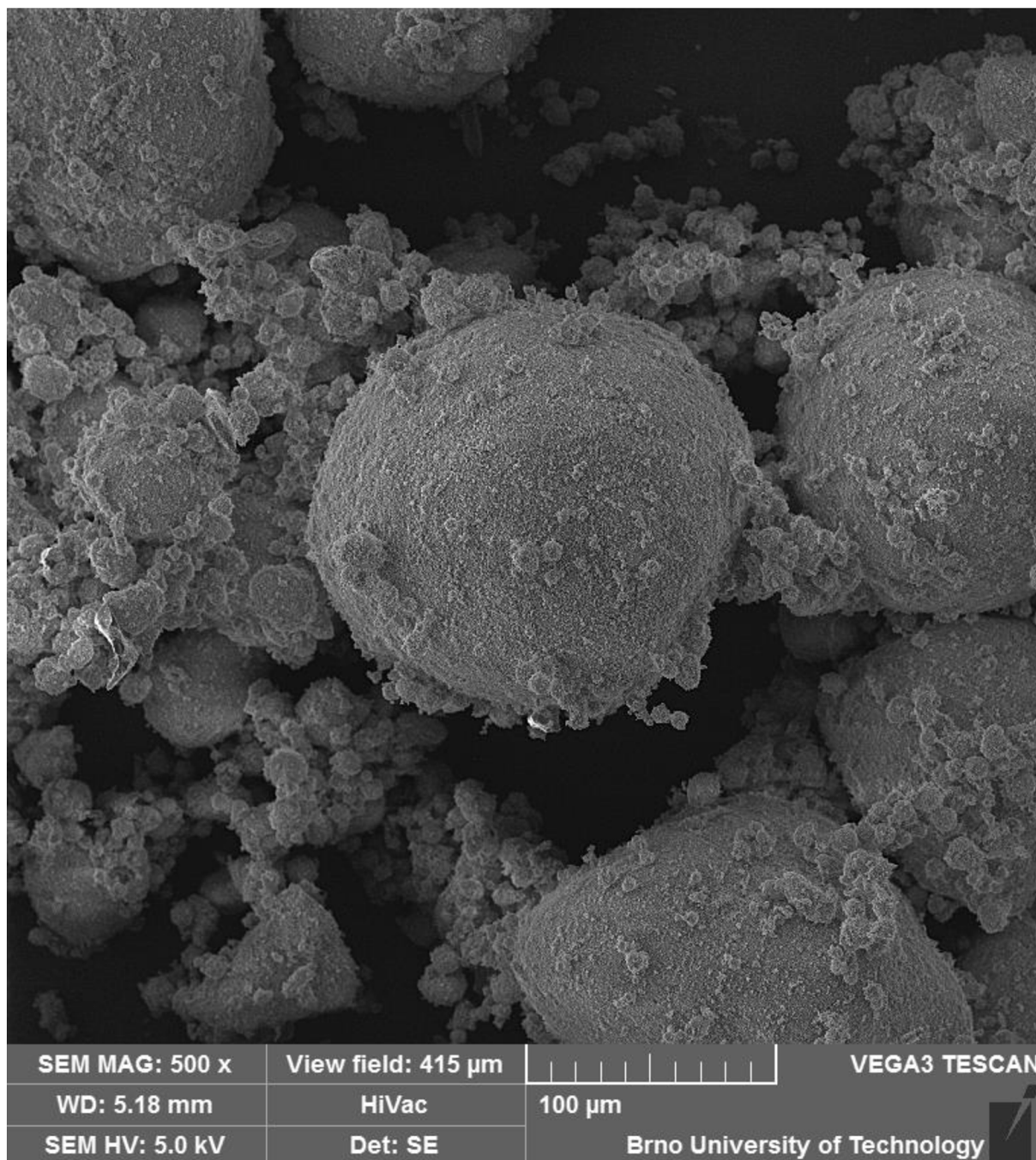
Měrný povrch - 23000 m²/kg

Měrná hmotnost - 2200 kg/m³

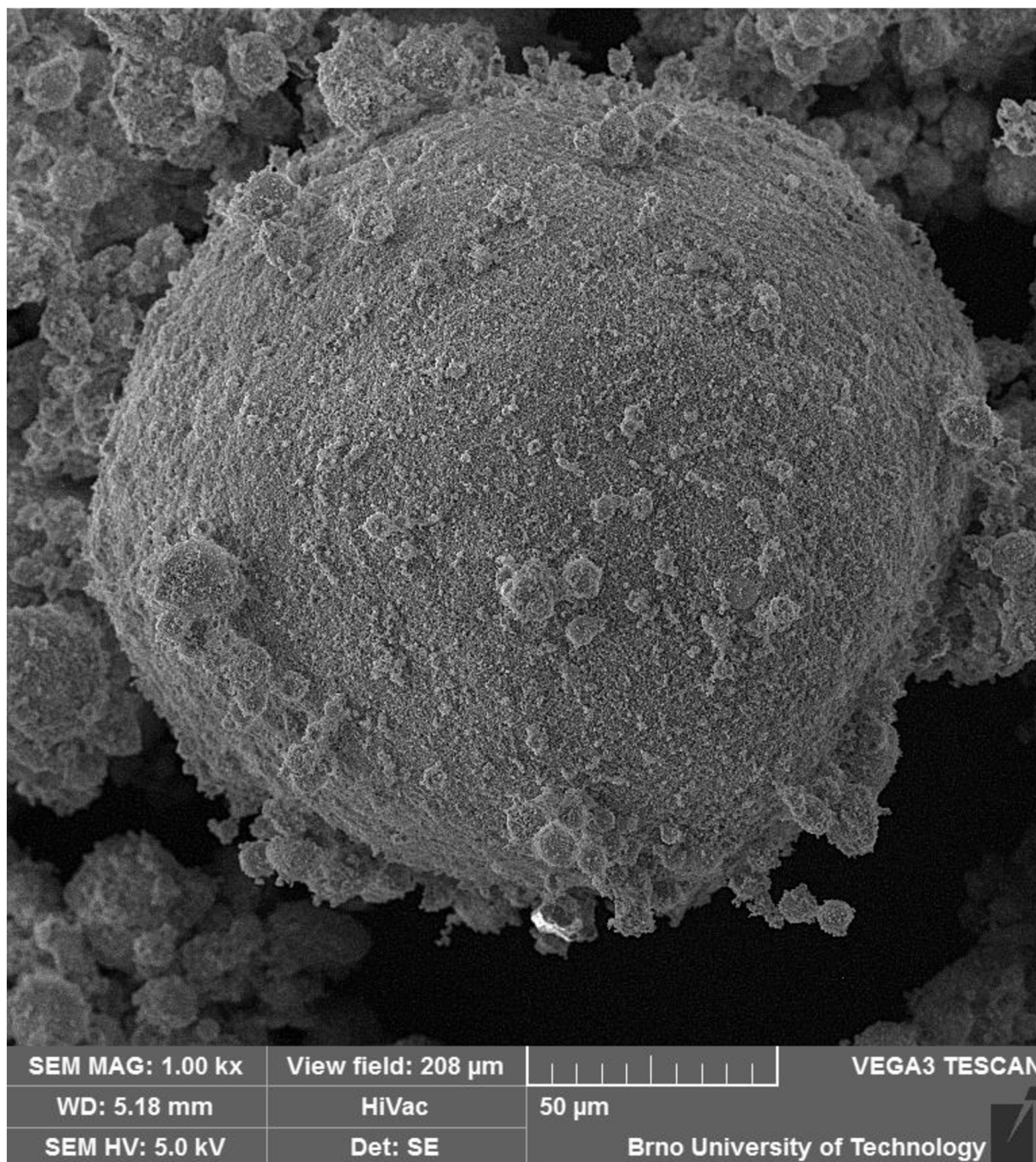
Tvar částic – elektronová mikroskopie



Obr. 32 – Mikrosilika – pohled na nejmenší zrna

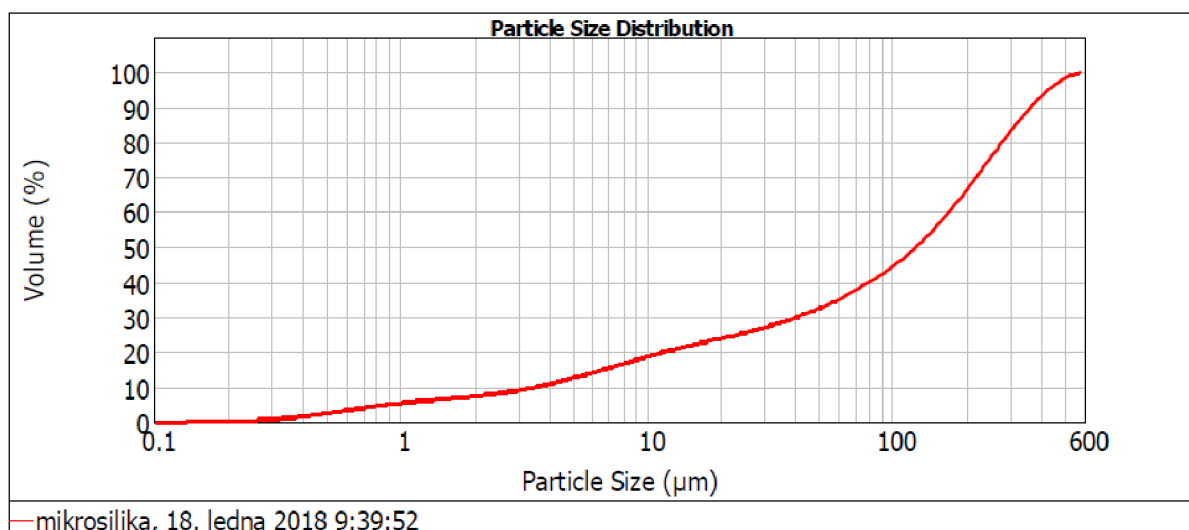
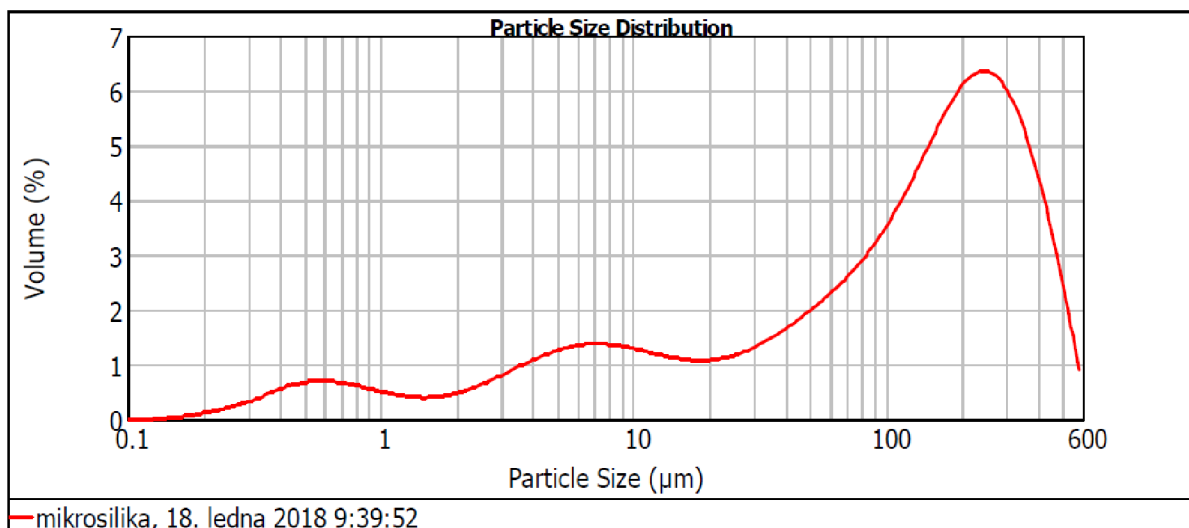


Obr. 33 – Mikrosilika – pohled na větší částice



Obr. 34 – Mikrosilika – detail povrchu větší částice mikrosiliky

Částice mikrosilika mají většinou pravidelný kulovitý tvar, povrch částic je členitý a hrubý. Velikost částic je dle snímku z elektronového mikroskopu od jednotek po stovky µm.



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.02	1.002	0.37	7.096	1.04	50.238	1.58	355.656	3.65
0.022	0.00	0.159	0.04	1.125	0.33	7.962	1.02	56.368	1.73	399.052	3.01
0.025	0.00	0.178	0.07	1.262	0.31	8.934	1.02	63.246	1.73	447.744	2.26
0.028	0.00	0.200	0.11	1.416	0.30	10.024	0.99	70.963	2.07	502.377	1.34
0.032	0.00	0.224	0.14	1.589	0.31	11.247	0.91	79.621	2.28	563.677	0.46
0.036	0.00	0.252	0.19	1.783	0.34	12.619	0.87	89.337	2.52	632.456	0.00
0.040	0.00	0.283	0.24	2.000	0.39	14.159	0.84	100.237	2.80	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.31	2.244	0.45	15.887	0.82	112.468	3.12	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.39	2.518	0.52	17.825	0.81	126.191	3.46	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.45	2.825	0.61	20.000	0.83	141.589	3.83	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.50	3.170	0.69	22.440	0.86	158.866	4.17	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.52	3.557	0.77	25.179	0.91	178.250	4.47	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.53	3.991	0.85	28.251	0.99	200.000	4.69	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.51	4.477	0.92	31.698	1.08	224.404	4.79	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.49	5.024	0.98	35.566	1.18	251.785	4.75	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.45	5.637	1.02	39.905	1.31	282.508	4.55	2000.000	0.00
0.126	0.01	0.893	0.41	6.325	1.04	44.774	1.44	316.979	4.18		
0.142	0.01	1.002	0.41	7.096	1.04	50.238	1.44	355.656	4.18		

Obr. 35 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – mikrosilika

V distribuci částic mikrosiliky 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.

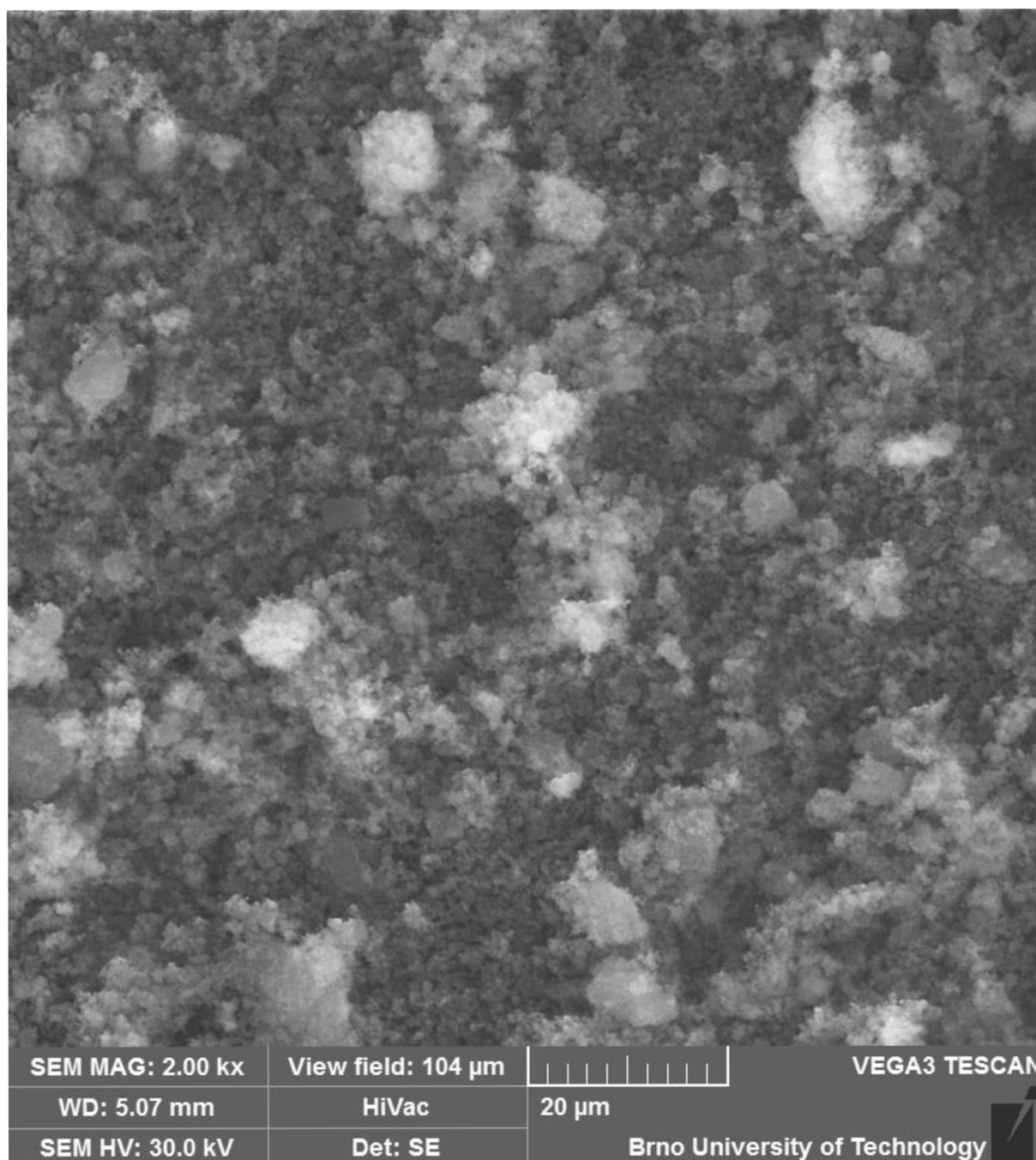
Nanosilika – SkySpring Nanomaterials, Inc

Obsah SiO₂ - 98,7%

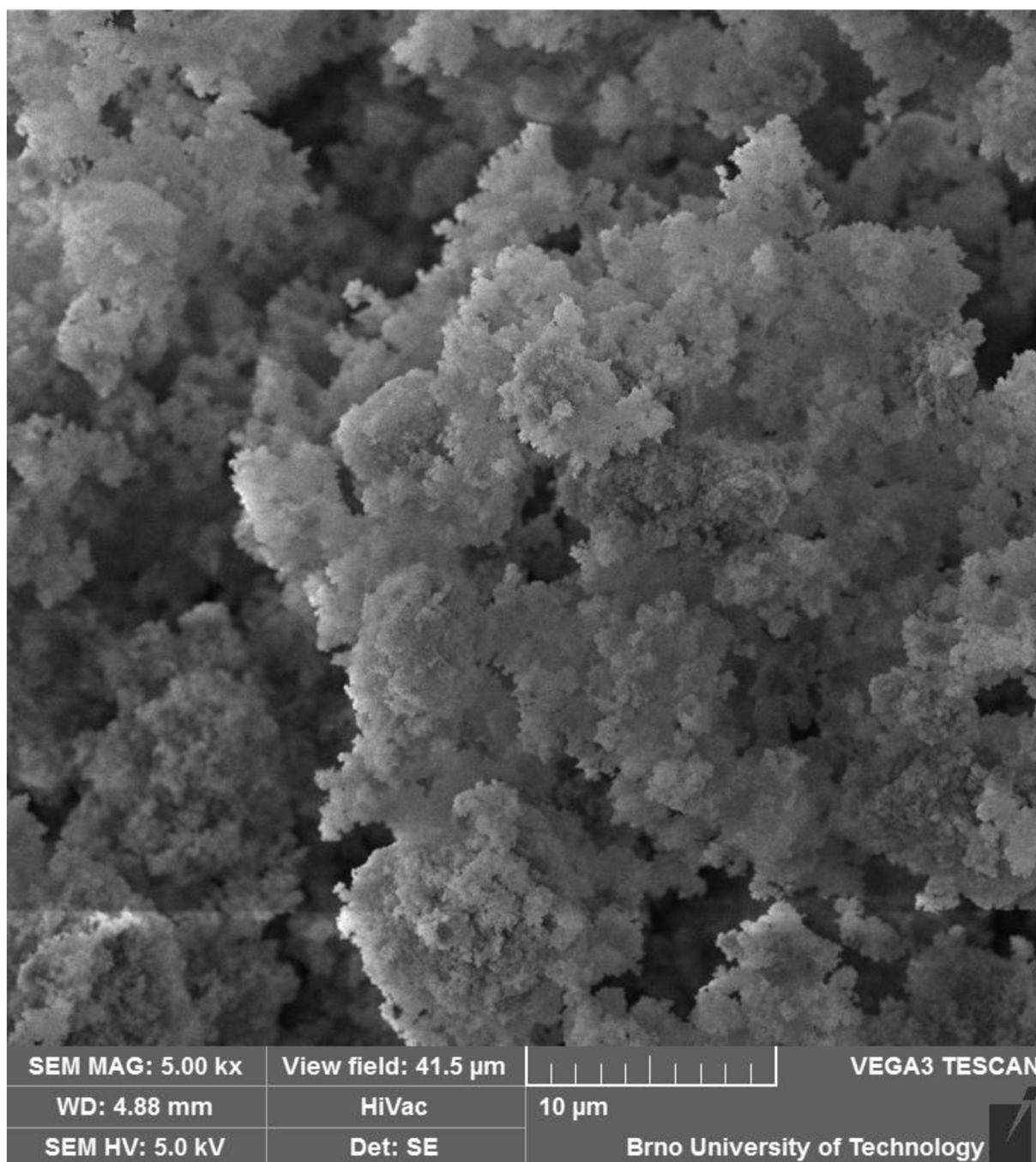
Měrný povrch – 160000 m²/kg

Měrná hmotnost – 2160 kg/m³

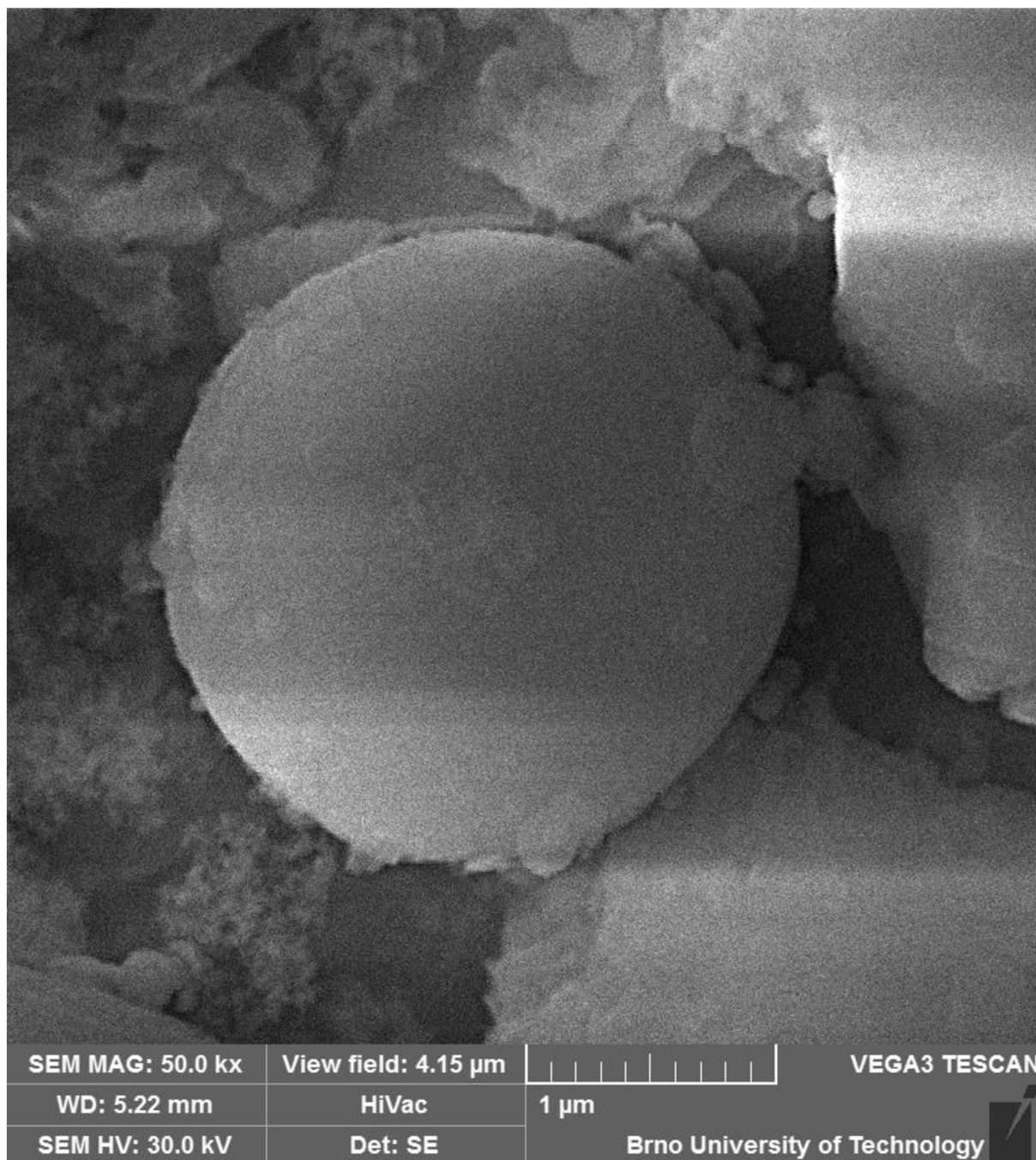
Tvar částic – elektronová mikroskopie



Obr. 36 – Nanosilika – pohled na aglomerované částice.

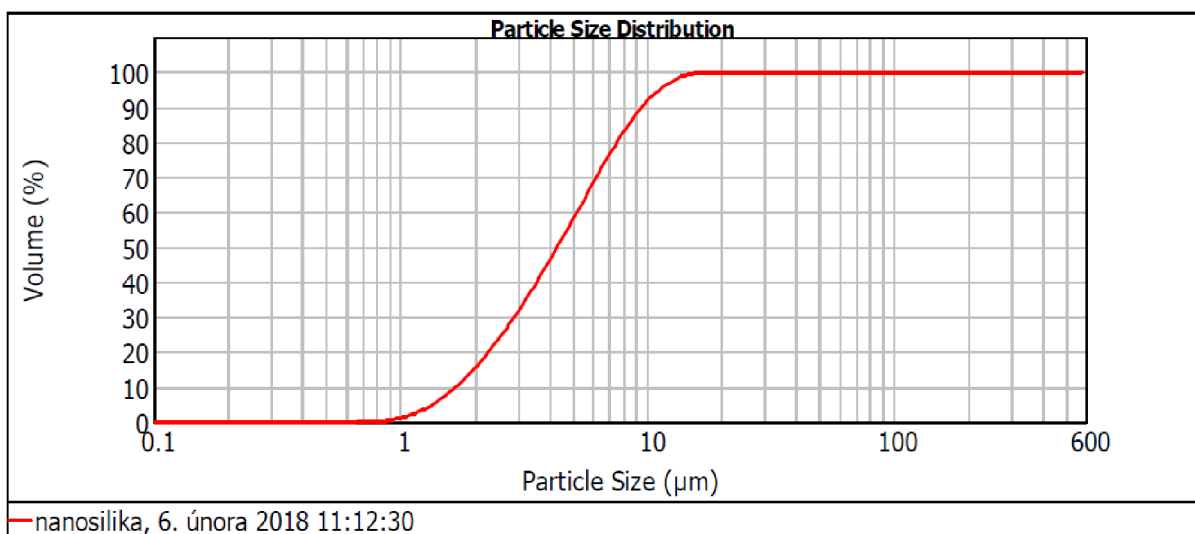
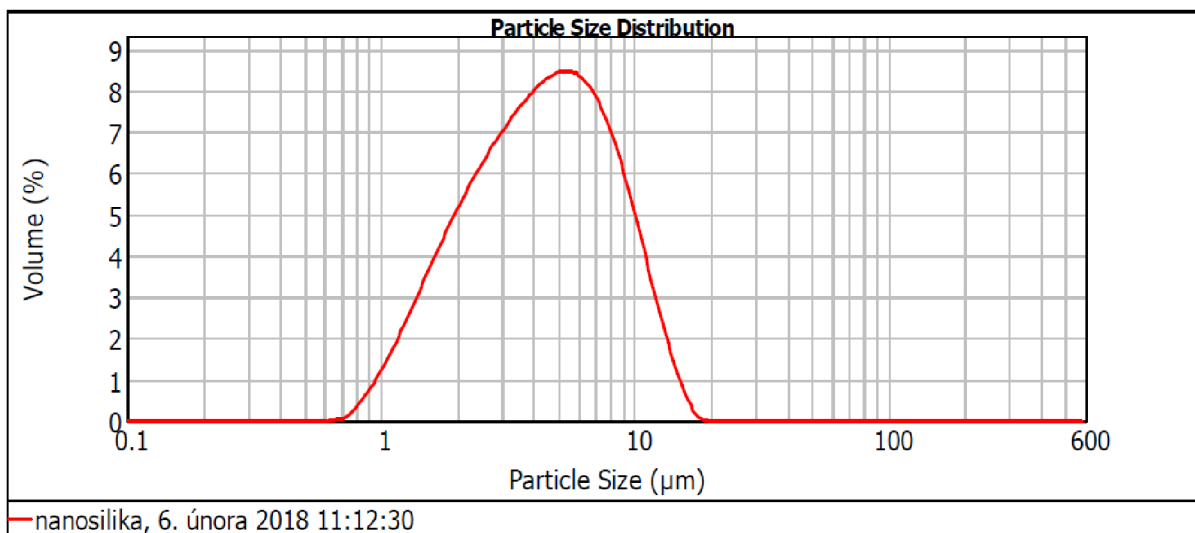


Obr. 37 – Nanosilika – detailní pohled na aglomerované částice.



Obr. 38 – Nanosilika – detailní pohled na částice nanosiliky

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



Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %	Size (µm)	Volume In %
0.020	0.00	0.142	0.00	1.002	1.13	7.096	5.65	50.238	0.00	355.656	0.00
0.022	0.00	0.159	0.00	1.125	1.60	7.962	5.02	56.368	0.00	399.052	0.00
0.025	0.00	0.178	0.00	1.262	2.11	8.934	4.22	63.246	0.00	447.744	0.00
0.028	0.00	0.200	0.00	1.416	2.62	10.024	3.31	70.963	0.00	502.377	0.00
0.032	0.00	0.224	0.00	1.589	3.14	11.247	2.37	79.621	0.00	563.677	0.00
0.036	0.00	0.252	0.00	1.783	3.63	12.619	1.50	89.337	0.00	632.456	0.00
0.040	0.00	0.283	0.00	2.000	4.09	14.159	0.77	100.237	0.00	709.627	0.00
0.045	0.00	0.317	0.00	2.244	4.52	15.887	0.22	112.468	0.00	796.214	0.00
0.050	0.00	0.356	0.00	2.518	4.90	17.825	0.01	126.191	0.00	893.367	0.00
0.056	0.00	0.399	0.00	2.825	5.26	20.000	0.00	141.589	0.00	1002.374	0.00
0.063	0.00	0.448	0.00	3.170	5.59	22.440	0.00	158.866	0.00	1124.683	0.00
0.071	0.00	0.502	0.00	3.557	5.89	25.179	0.00	178.250	0.00	1261.915	0.00
0.080	0.00	0.564	0.00	3.991	6.13	28.251	0.00	200.000	0.00	1415.892	0.00
0.089	0.00	0.632	0.03	4.477	6.31	31.698	0.00	224.404	0.00	1588.656	0.00
0.100	0.00	0.710	0.11	5.024	6.38	35.566	0.00	251.785	0.00	1782.502	0.00
0.112	0.00	0.796	0.39	5.637	6.31	39.905	0.00	282.508	0.00	2000.000	0.00
0.126	0.00	0.893	0.72	6.325	6.08	44.774	0.00	316.979	0.00		
0.142	0.00	1.002		7.096		50.238		355.656			

Obr. 39 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – nanosilika

Měření velikosti nanočástic přístrojem Metersizer 2000 již bohužel naráží na limity přístroje z hlediska minimální velikosti částic. Navíc bylo možno měřit velikosti částic pouze v nerozdružené formě. Jedná se tedy spíše o měření velikosti

shluků aglomerovaných částic. V tomto případě je střední velikost shluku částic $(0,5) = 4,326 \mu\text{m}$.

6.3 Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru

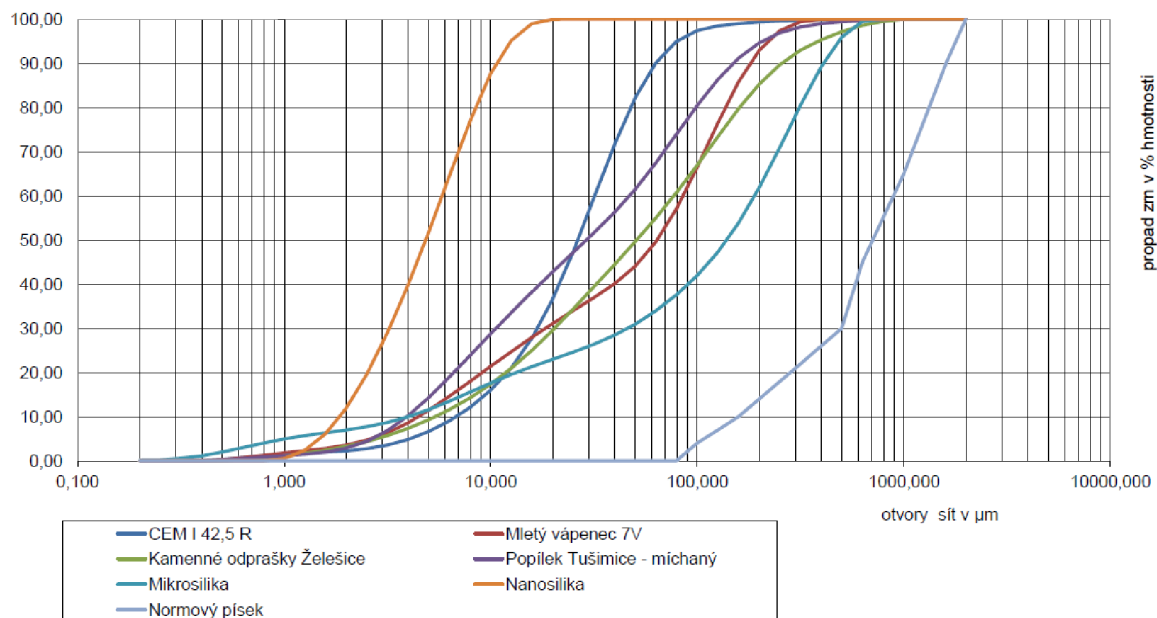
Zkoušení mezerovitosti suchého zhutněného fileru bylo stanoveno dle ČSN EN 1097 - 4 Pro kombinace cementu s jednotlivými příměsemi je možné pozorovat snížení mezerovitosti systému. Výsledky měření jsou shrnuty v následující tabulce.

Poměr složek	Mezerovitost systému [%]
CEM I 42,5 R	39,91
CEM I 42,5 R + 10% MV7	31,39
CEM I 42,5 R + 10% MV9	30,95
CEM I 42,5 R + 10% KOŽ	34,58
CEM I 42,5 R + 10% KOP	33,22
CEM I 42,5 R + 10% ETU mix	32,55
CEM I 42,5 R + 25% MV7	27,59
CEM I 42,5 R + 25% MV9	27,95
CEM I 42,5 R + 25% KOŽ	30,79
CEM I 42,5 R + 25% KOP	32,55
CEM I 42,5 R + 25% ETU mix	36,03
CEM I 42,5 R + 20%MV7 + 4% MS + 1% NS	26,48
CEM I 42,5 R + 20%ETUmix+ 4% MS + 1% NS	29,13
CEM I 42,5 R + 20%KOŽ+ 4% MS + 1% NS	28,91

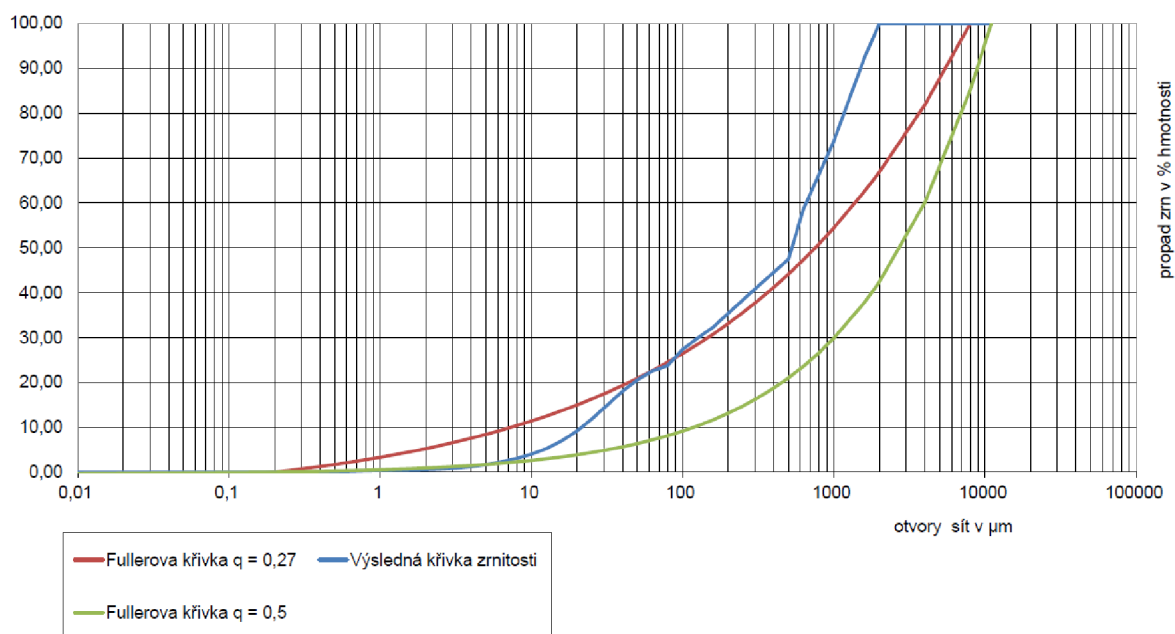
Tab. 18 – Mezerovitost suchého zhutněného fileru

6.4 Sestavení křivek zrnitosti

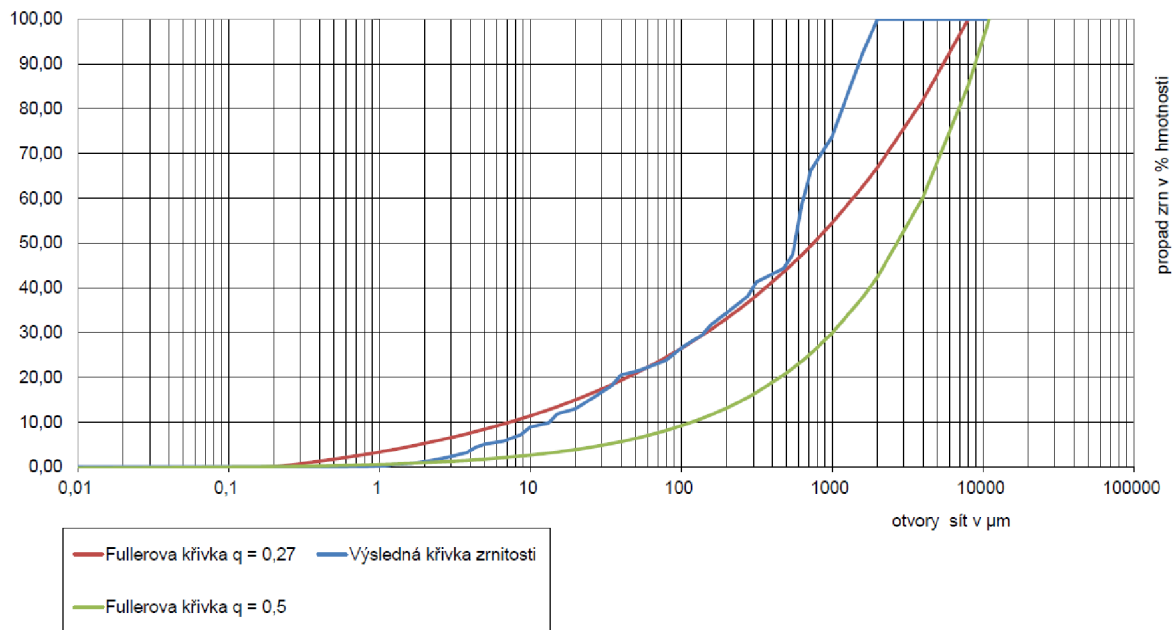
K sestavování křivek zrnitosti receptury tak, aby co nejvíce odpovídala zvolené ideální křivce zrnitosti, byl použit program MS Excell.



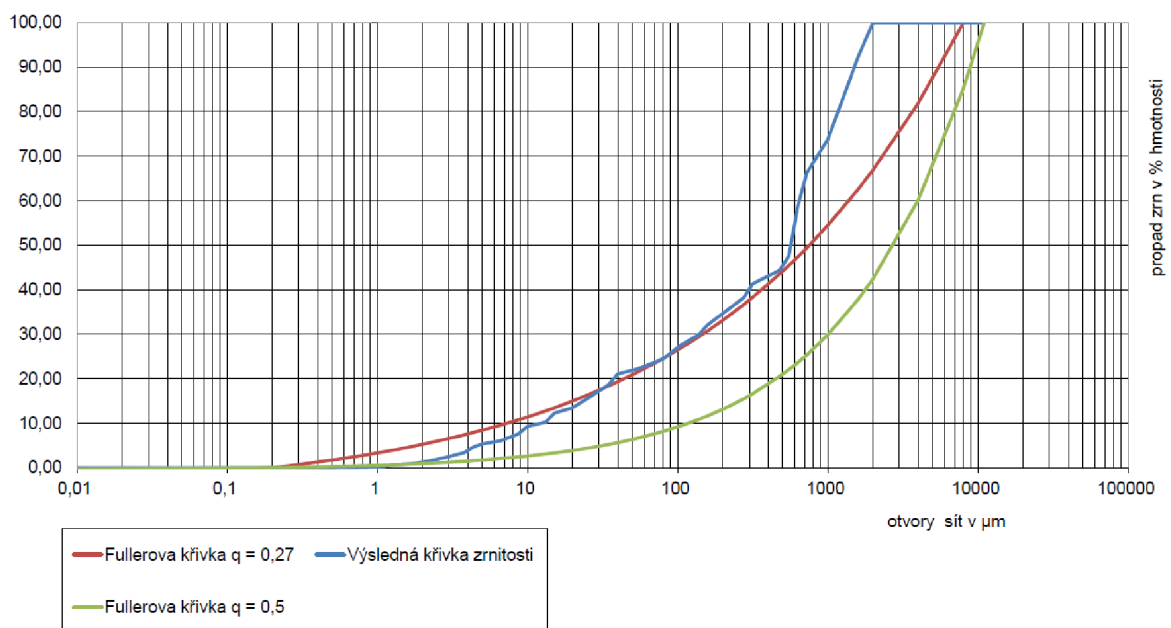
Graf 6 – Křivky zrnitosti použitých materiálů



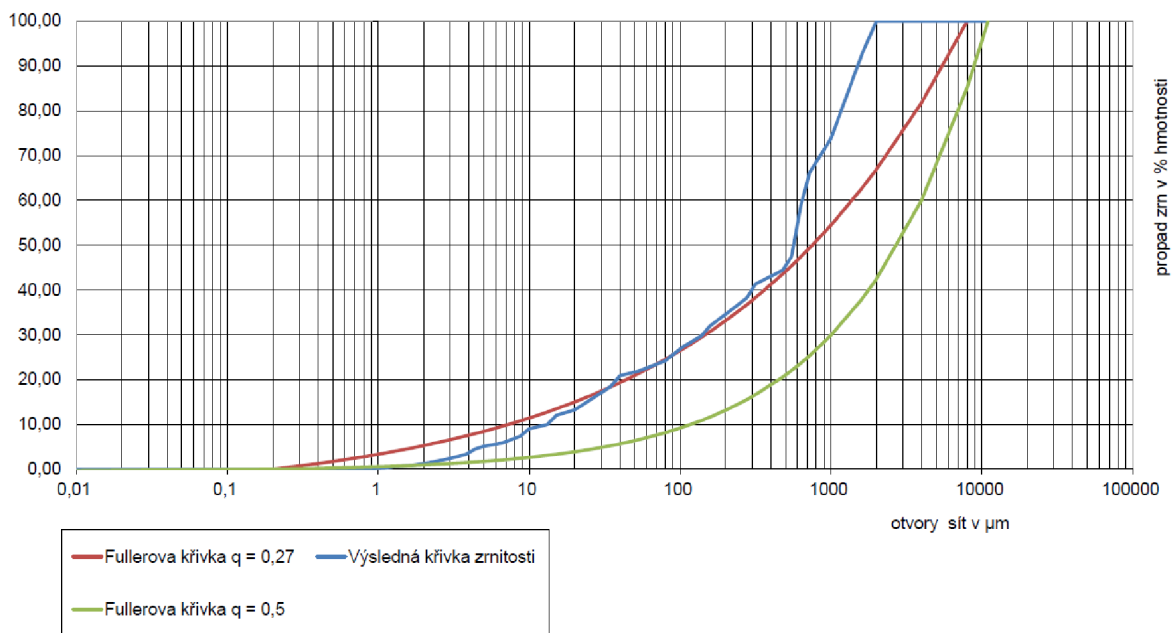
Graf 7 – Křivka zrnitosti cementu s normovým pískem



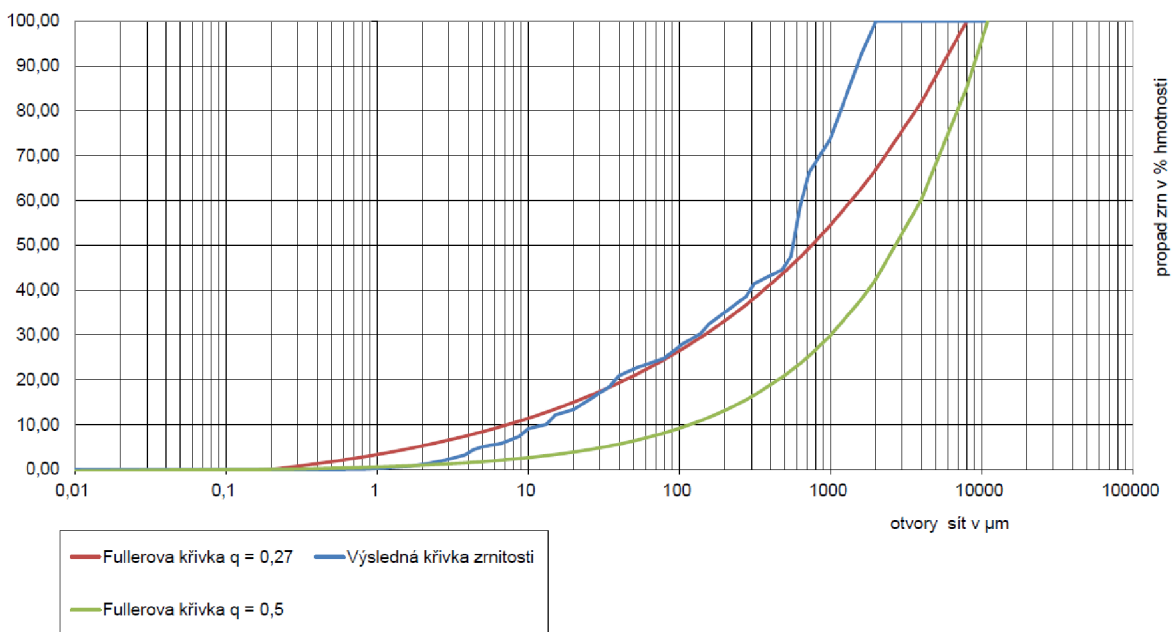
Graf 8 – Křivka zrnitosti cementu a 10% mletého vápence MV7, normový písek



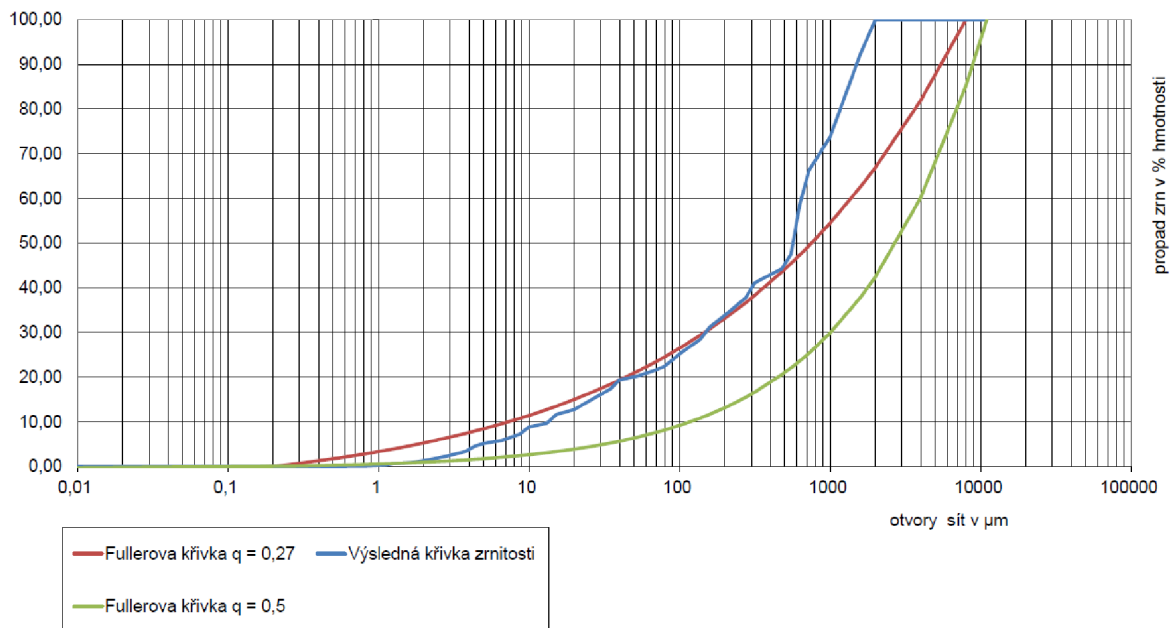
Graf 9 – Křivka zrnitosti cementu a 10% mletého vápence MV9, normový písek



Graf 10 – Křivka zrnitosti cementu a 10% kamenných odprašků Želešice, normový písek

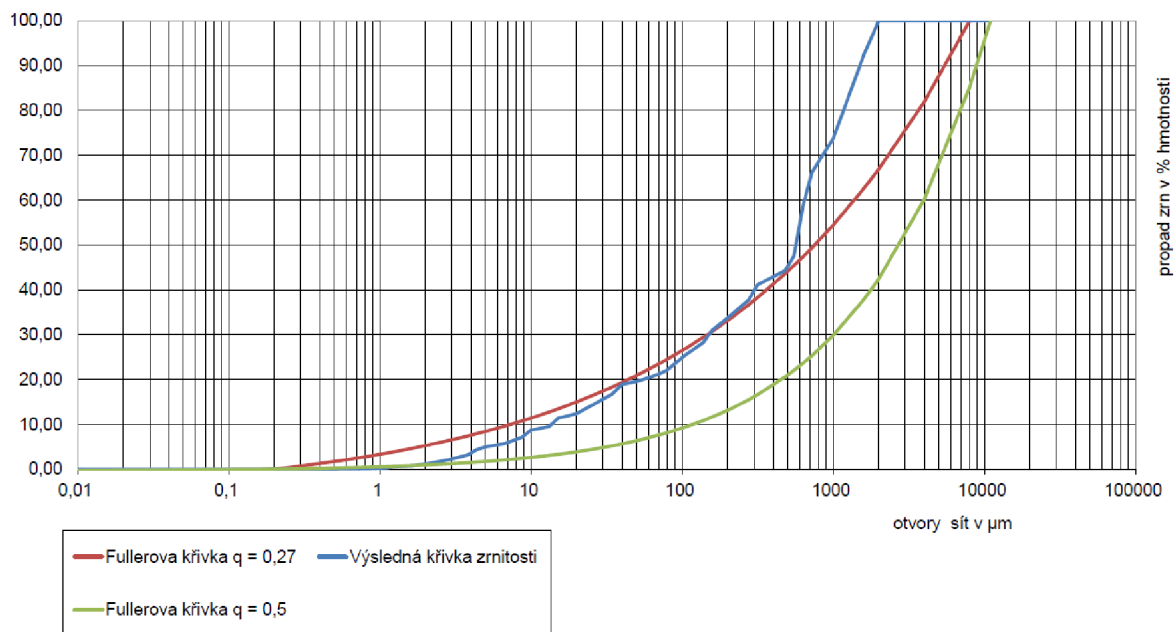


Graf 11 – Křivka zrnitosti cementu a 10% kamenných odprašků Předklášteří, normový písek.

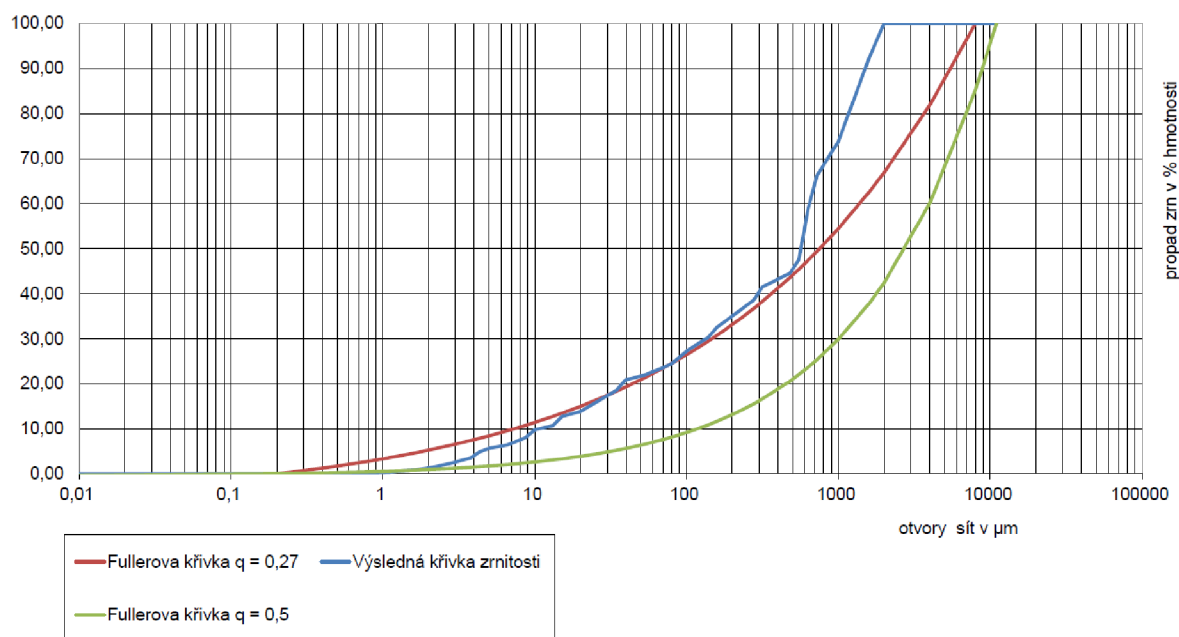


Graf 12 – Křivka zrnitosti cementu a 10% popílku Tušimice, normový písek

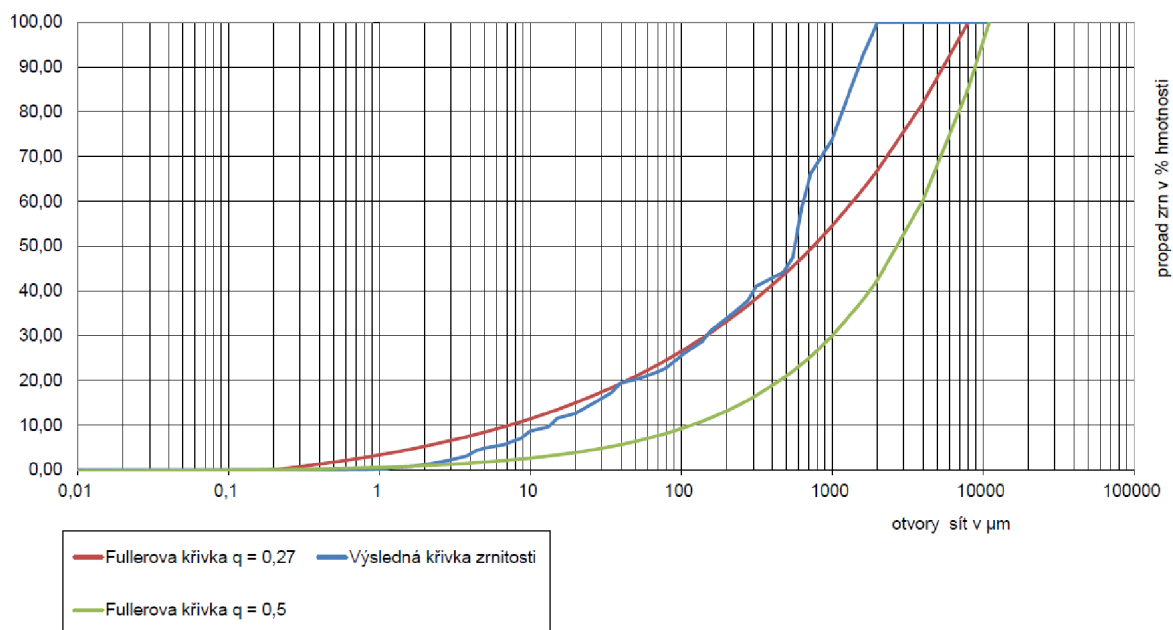
Z grafů je patrné, že náhrada 10% cementu libovolnou běžnou příměsí má pozorovatelný vliv na výsledné křivky zrnitosti. Ve všech zkoumaných směsích lze pozorovat optimalizaci křivky v rozmezí 40 – 500 μm .



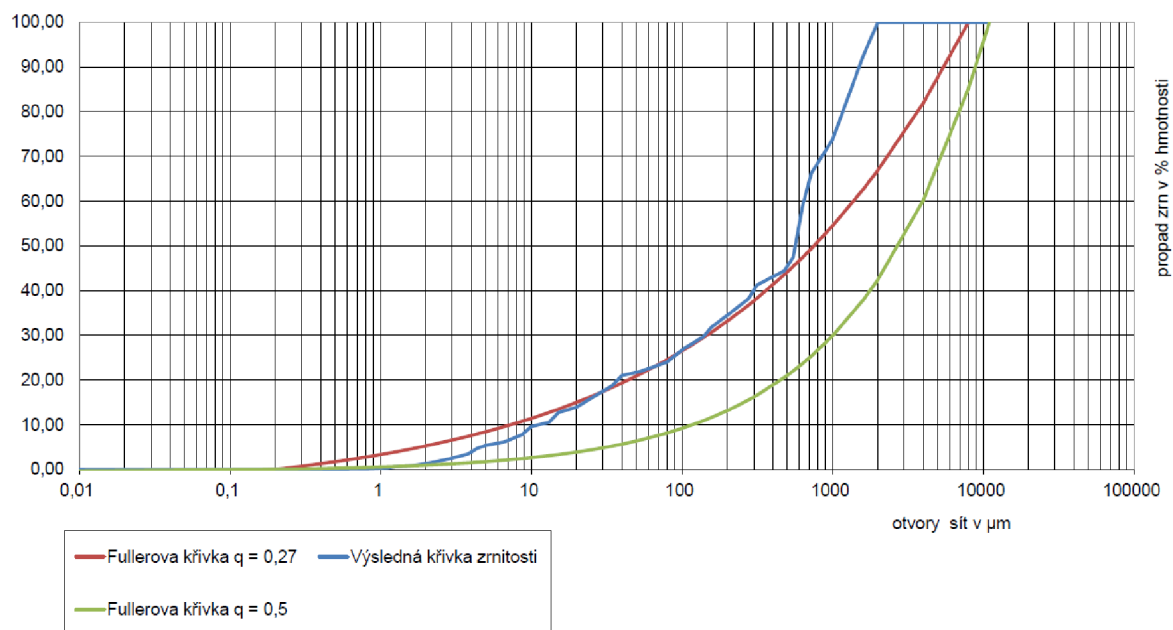
Graf 13 – Křivka zrnitosti cementu a 25% mletého vápence MV7, normový písek



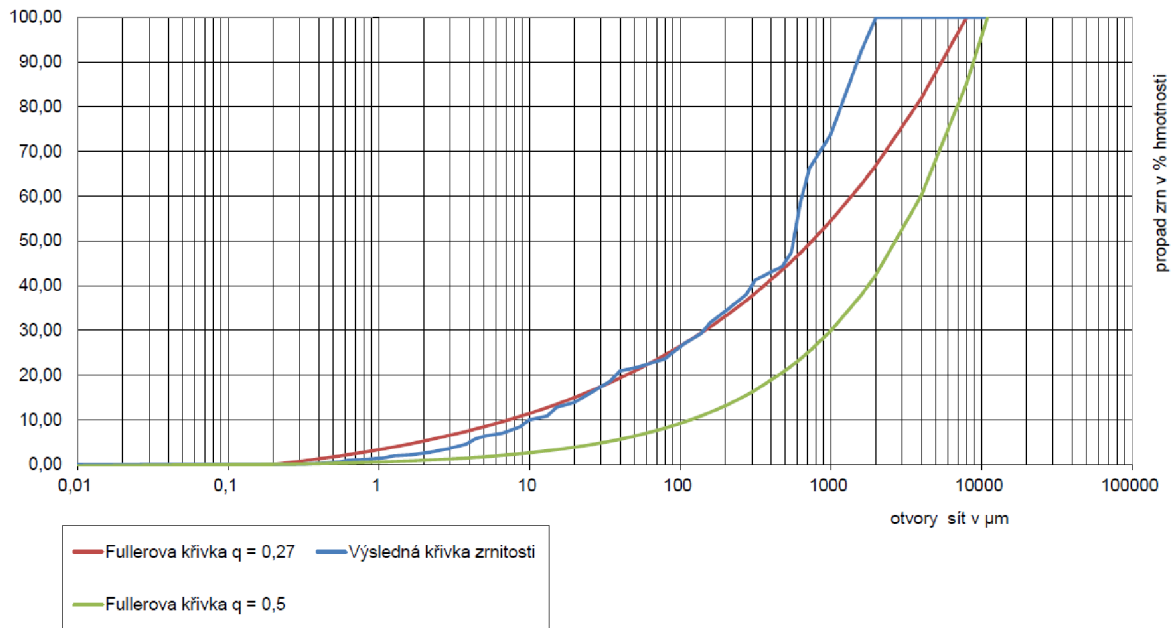
Graf 14 – Křivka zrnitosti cementu a 25% mletého vápence MV9, normový písek



Graf 15 – Křivka zrnitosti cementu a 25% kamenných odprašků Želešice, normový písek



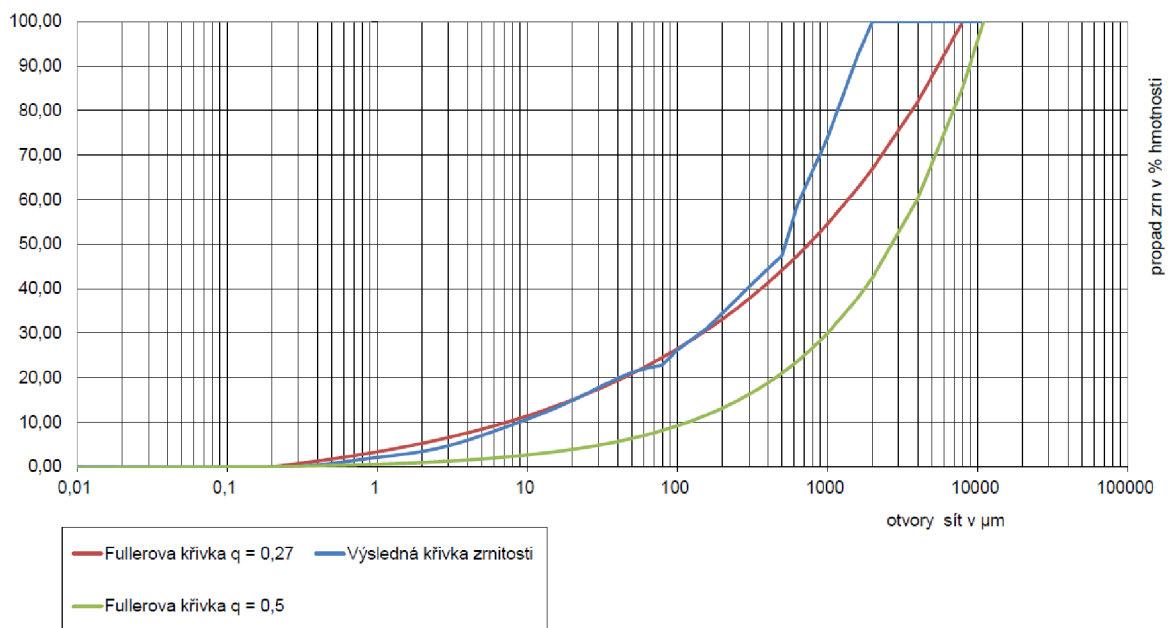
Graf 16 - Křivka zrnitosti cementu a 25% kamenných odprašků Předklášteří, normový písek



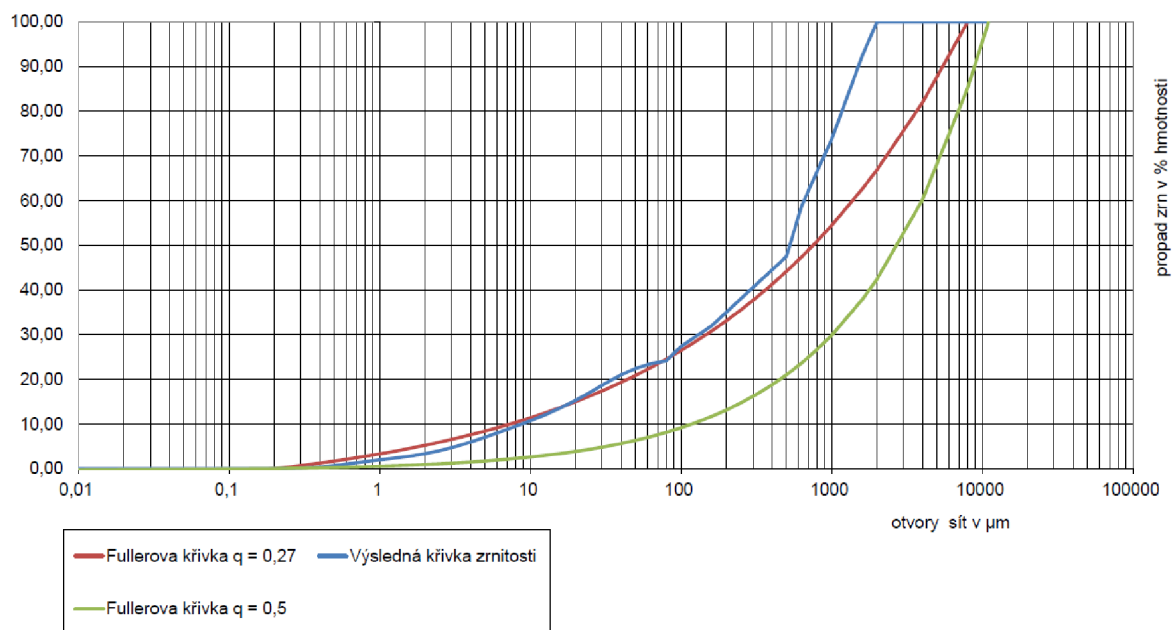
Graf 17 – Křivka zrnitosti cementu a 25% popílku, normový písek

Náhrada cementu příměsí v množství 25% má výraznější vliv na křivku zrnitosti. Nicméně i zde můžeme pozorovat, že k dosažení optimální křivky je do systému nutné dodat zejména velmi jemné částice o velikosti 1 – 20 μm . Nedostatek těchto částic je dán tím, že žádné z použitých příměsí neobsahuje více než 40% takto malých částic.

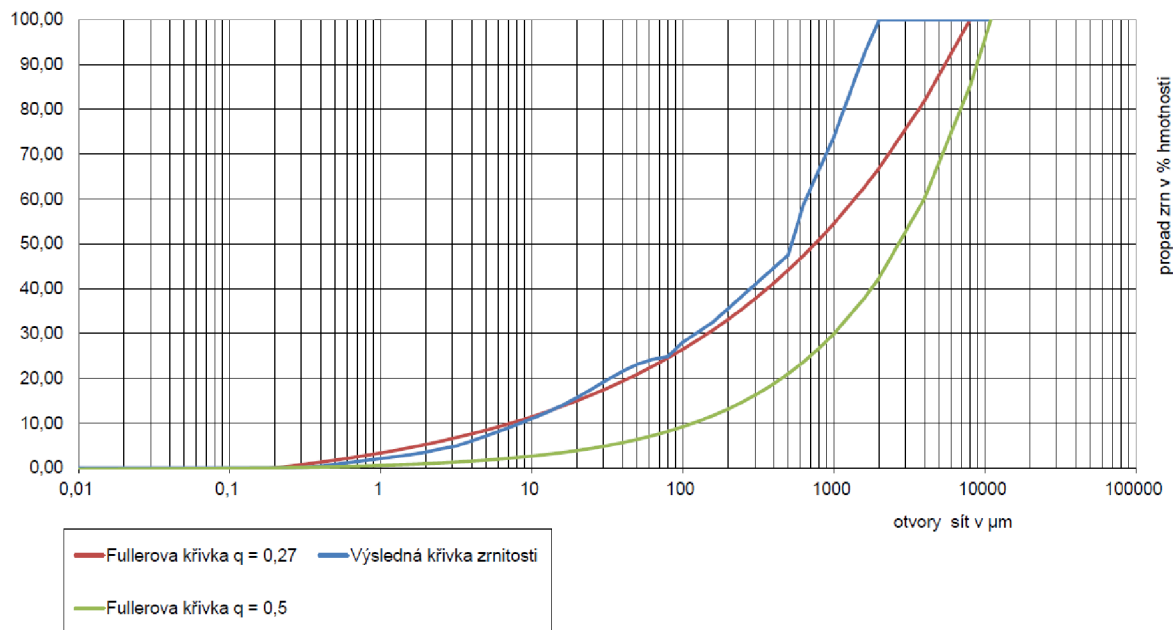
Z tohoto důvodu byl pojivový systém doplněn o další příměsí. Těmito příměsemi byly mikrosilika a nanosilika. Aby bylo doplnění tohoto systému těmito jinak velice nákladnými materiály smysluplné z ekonomického hlediska, bylo dávkování mikrosiliky omezeno na 10% a dávkování nanosiliky na 1% z hmotnosti cementu.



Graf 18 – Křivka zrnitosti cementu s 20% mletého vápence MV7, 4% mikrosiliky a 1% nanosiliky, normový písek



Graf 19 – Křivka zrnitosti cementu s 20% kamenných odprašků Želešice, 4% mikrosiliky a 1% nanosiliky, normový písek



Graf 20 – Křivka zrnitosti cementu s 20% popílku Tušimice, 4% mikrosiliky a 1% nanosiliky, normový písek

U všech křivek zrnitosti je patrná optimalizace v rozmezí 1 – 500 µm. V tomto intervalu křivka zrnitosti téměř kopíruje zvolenou ideální křivku zrnitosti.

6.5 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 $w/c = 0,67$

Postup výroby a zkušební vzorků cementových malt

Náhrada pojiva byla zvolena v množství 10 a 25% z hmotnosti cementu. Pojivo a kamenivo byly vzájemně promíchány „na sucho“ po dobu 3 minut. Poté byla přidána záměsová voda a směs byla míchána další 2 minuty. U směsí s přídavkem nanosiliky byl čas míchání pojiva a kameniva prodloužen na 6 minut a čas po přidání záměsové vody na 4 minuty.

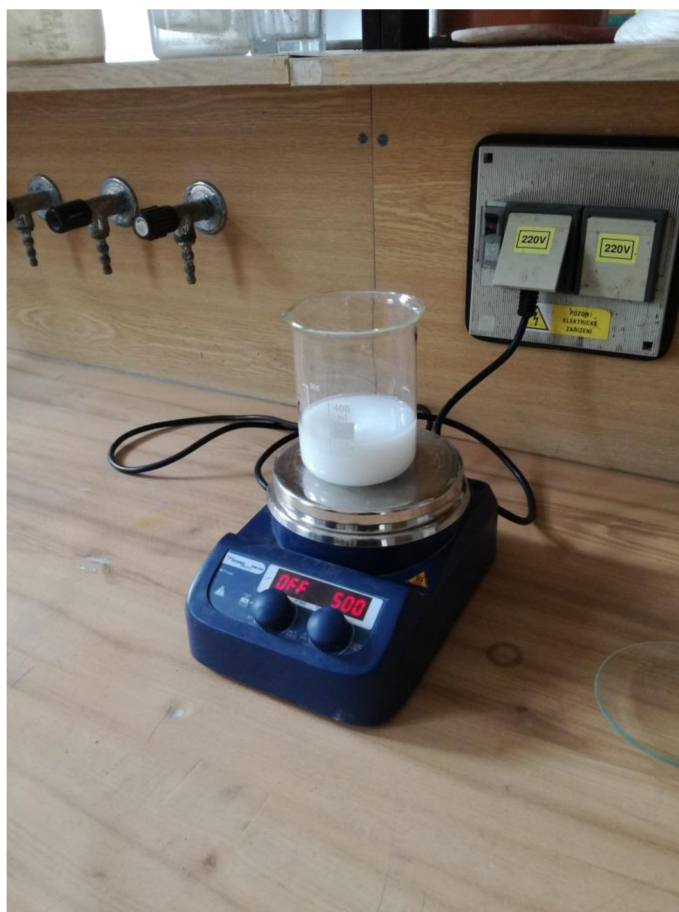
Na čerstvé maltě byla provedena zkouška konzistence na střešacím stolku dle **ČSN EN 1015-3** - Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku). Poté byla cementová malta ukládána do forem 40 x 40 x 160 mm a hutněna na vibračním stole. Po 24 hodinách byly vzorky odformovány, pečlivě označeny a uloženy do vody o teplotě 20°C. Na vzorcích byly zkoušeny pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku dle **ČSN EN 1015-11** - Zkušební metody malt pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdělých malt v tahu za ohybu a v tlaku. Pevnosti byly stanovovány vždy po 7, 28 a 90 dnech.

Výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti jsou shrnuty v tabulce č. 19 a grafech č. 18, 19, 20 a 21.

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.

Dalším rozdílem bylo použití ultrazvuku pro dispergaci nanosiliky. Dispergace probíhala dle metody navržené v diplomové práci ing. Labaje [30]. Nanosilika byla nejprve míchána magnetickým míchadlem rychlostí 500 otáček za minuty po dobu deseti minut. Poté byl do nádoby přidán plastifikátor a celý objem byl míchán dalších deset minut stejnou rychlostí. Po magnetickém míchání následovala ultrazvuková dispergace směsi. Celková energie dodaná ultrazvukem byla 80 kJ, doba dispergace se pohybovala v rozmezí 25 až 26 minut. Po ukončení ultrazvukové dispergace následovalo opět magnetické míchání rychlostí 500 otáček za minutu v délce 5 minut.

Výsledné fyzikálně-mechanické vlastnosti jsou shrnuty v tabulkách č. 20, 21 a grafech č. 22 až 29. Výsledky objemových hmotností a pevností v tahu za ohybu jsou vždy průměrem tří měření, pevnost v tlaku průměrem šesti hodnot.



Obr. 40 – Magnetické míchání nanosiliky



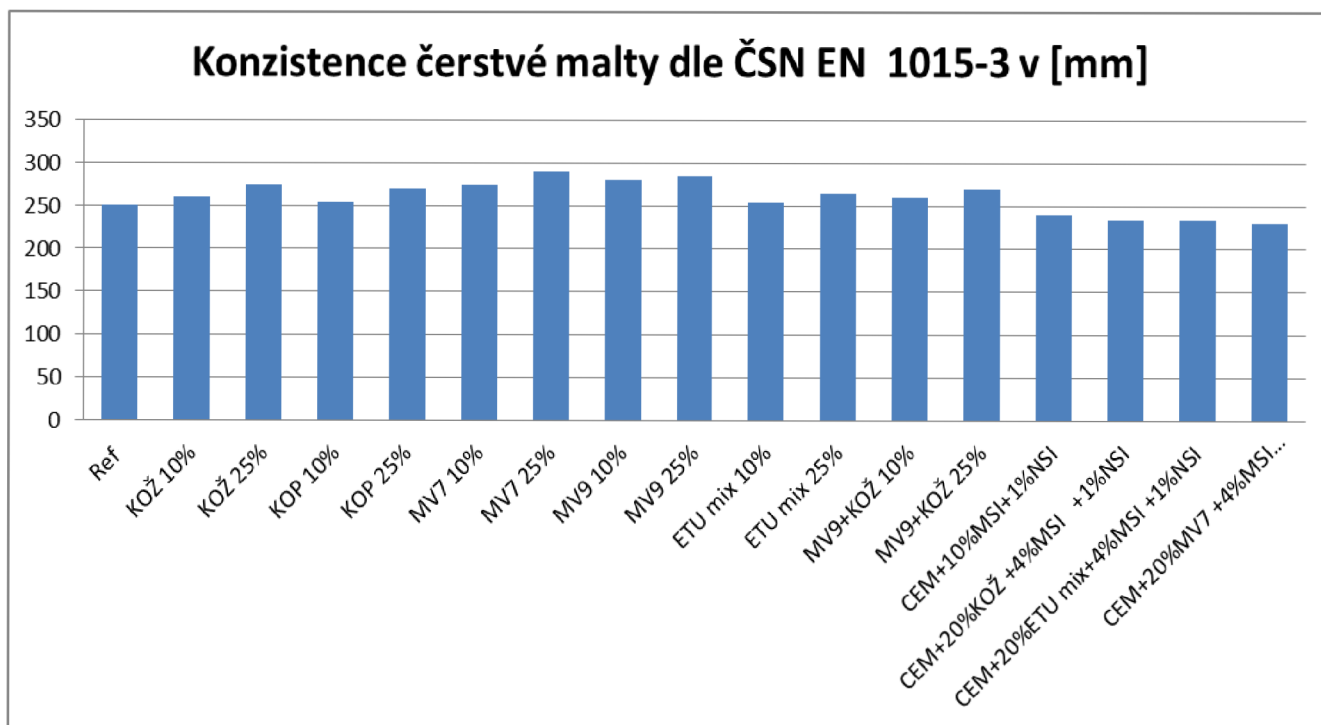
Obr. 41 – Ultrazvuková dispergace nanosiliky



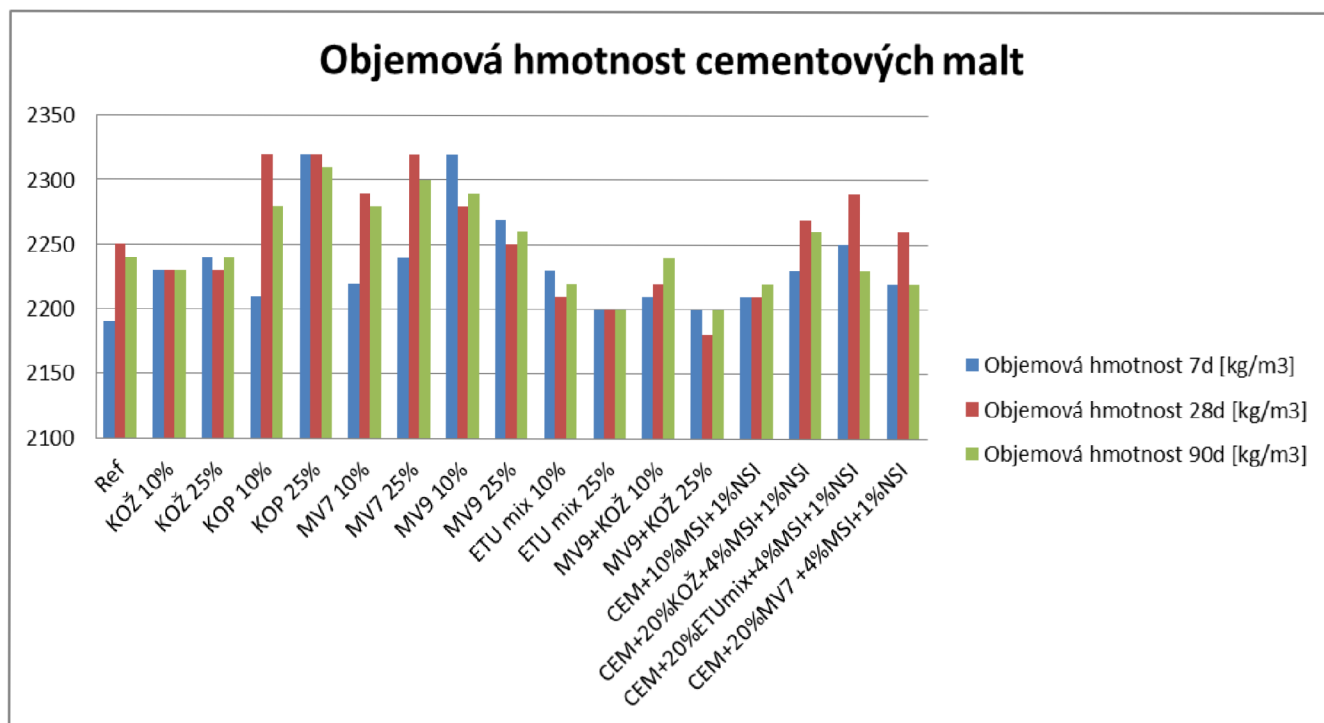
Obr. 42 – Ultrazvukové míchání nanosiliky - hodnoty

Označení receptury	Konzistence rozliti [mm]	Objemová hmotnost 7d [kg/m ³]	Objemová hmotnost 28d [kg/m ³]	Objemová hmotnost 90d [kg/m ³]	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

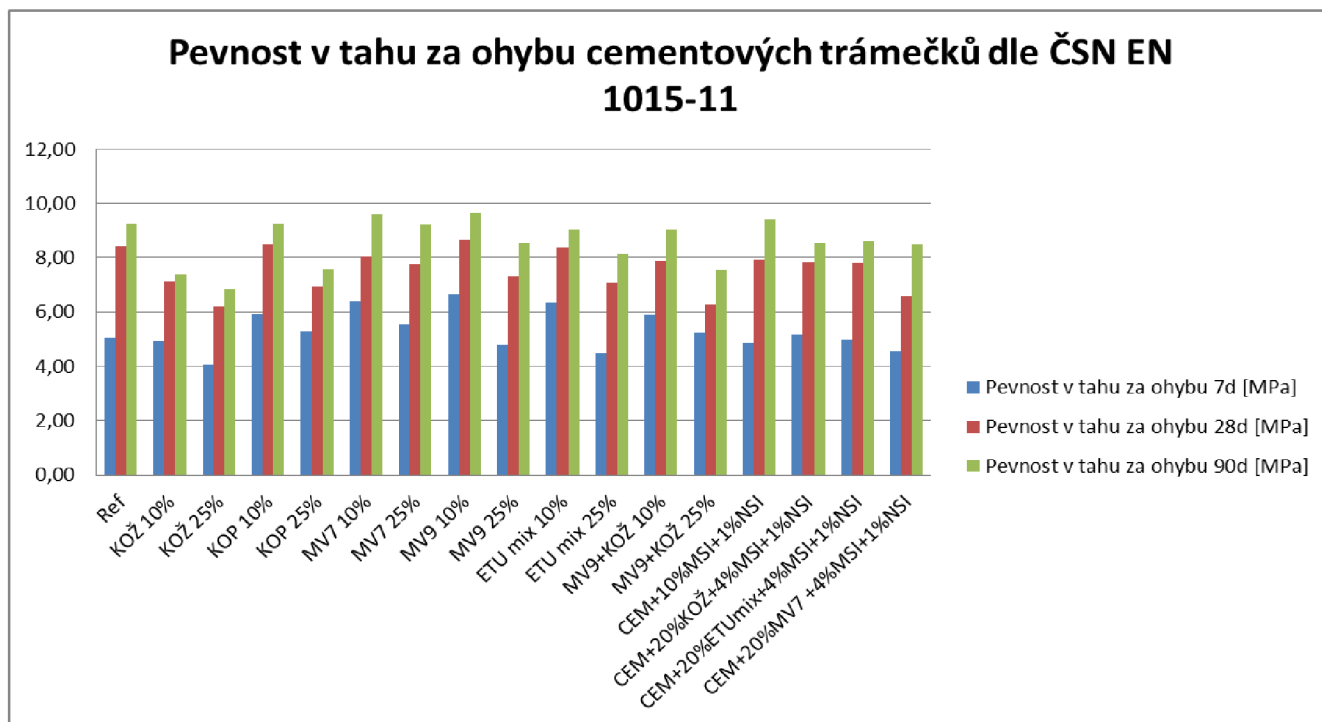
Tab. 19 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti navržených malt bez plastifikátoru



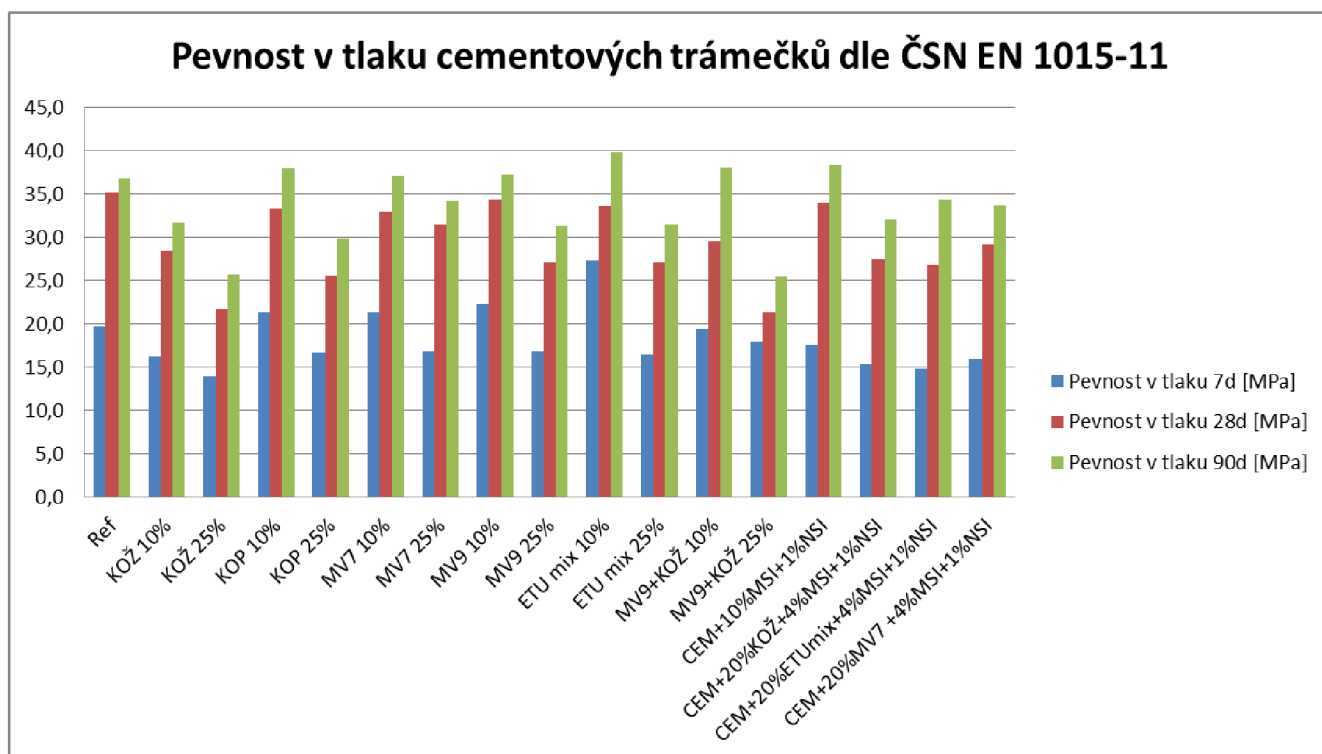
Graf 21 – Konzistence čerstvé malty dle ČSN EN 1015-3



Graf 22 – Objemová hmotnost cementových malt v čase



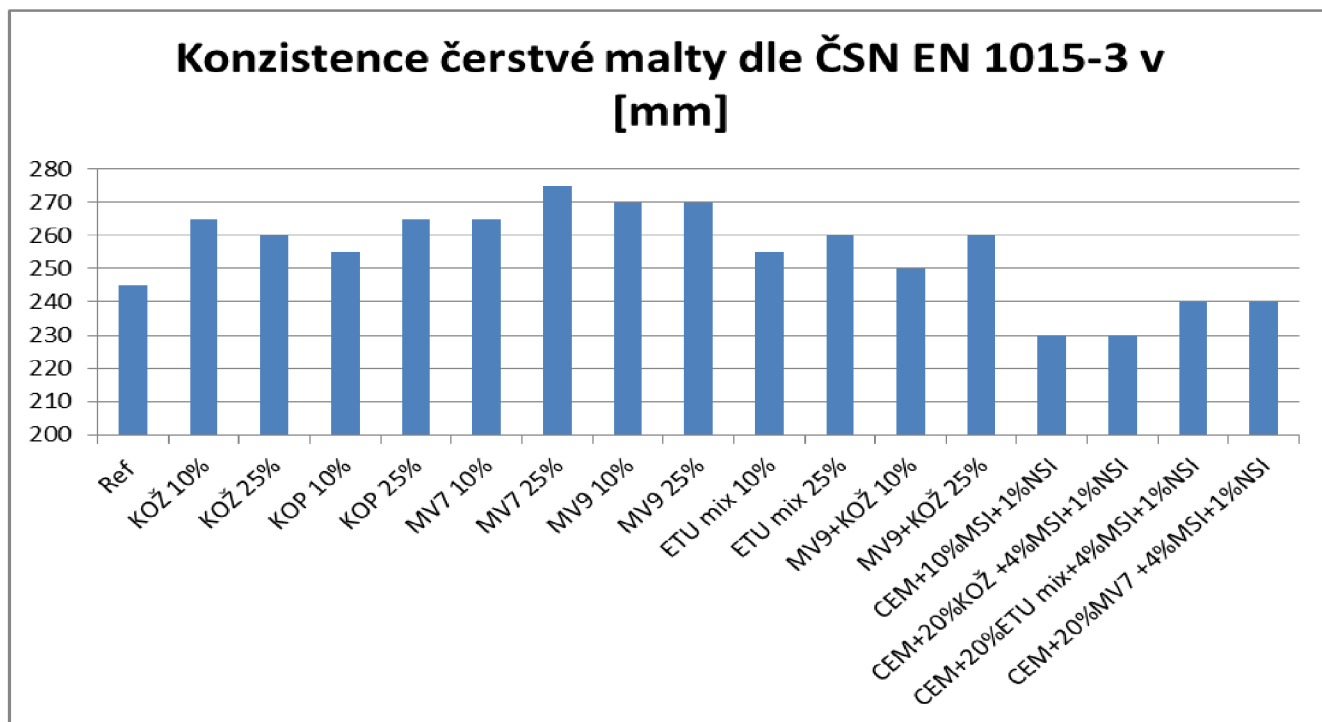
Graf 23 – Pevnost v tahu za ohybu cementových trámečků v čase



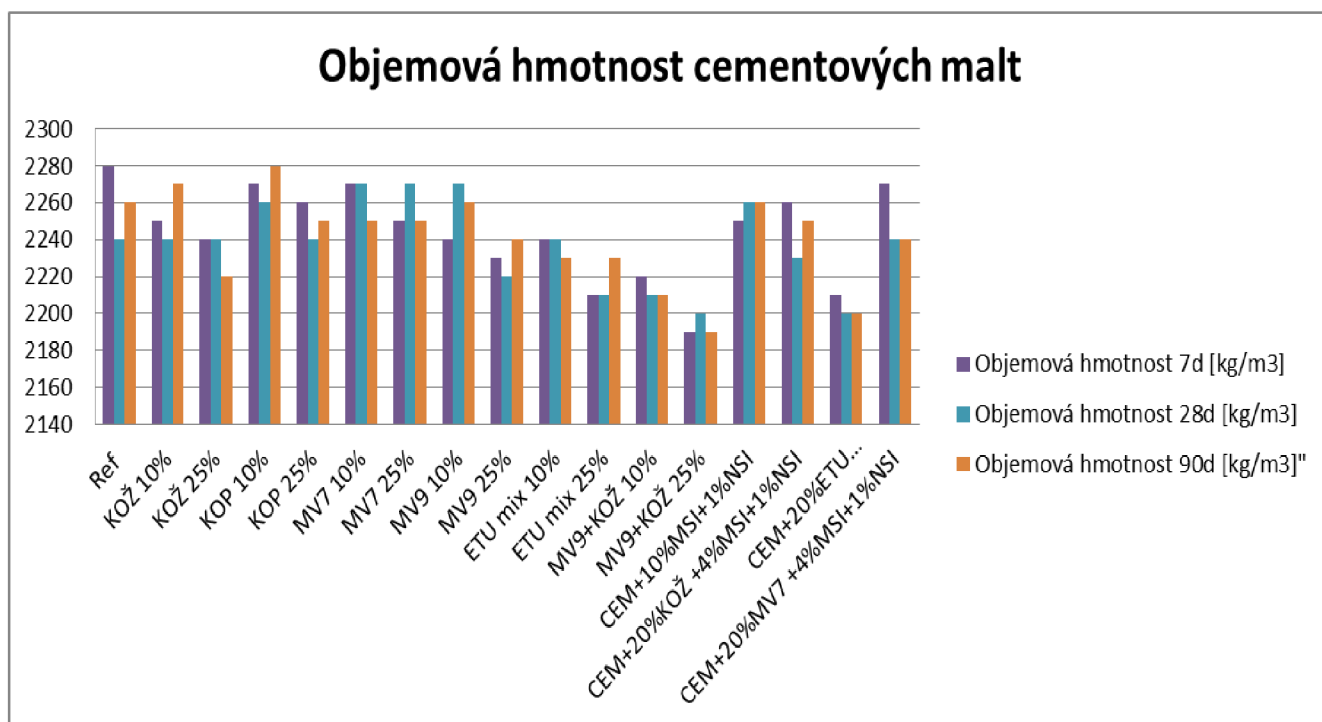
Graf 24 – Pevnost v tlaku cementových trámečků v čase

Vlastnosti malt s plastifikátorem Mapei SX14										
Označení receptury	Konzistence rozlití [mm]	Objemová hmotnost 7d [kg/m ³]	Objemová hmotnost 28d [kg/m ³]	Objemová hmotnost 90d [kg/m ³]	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

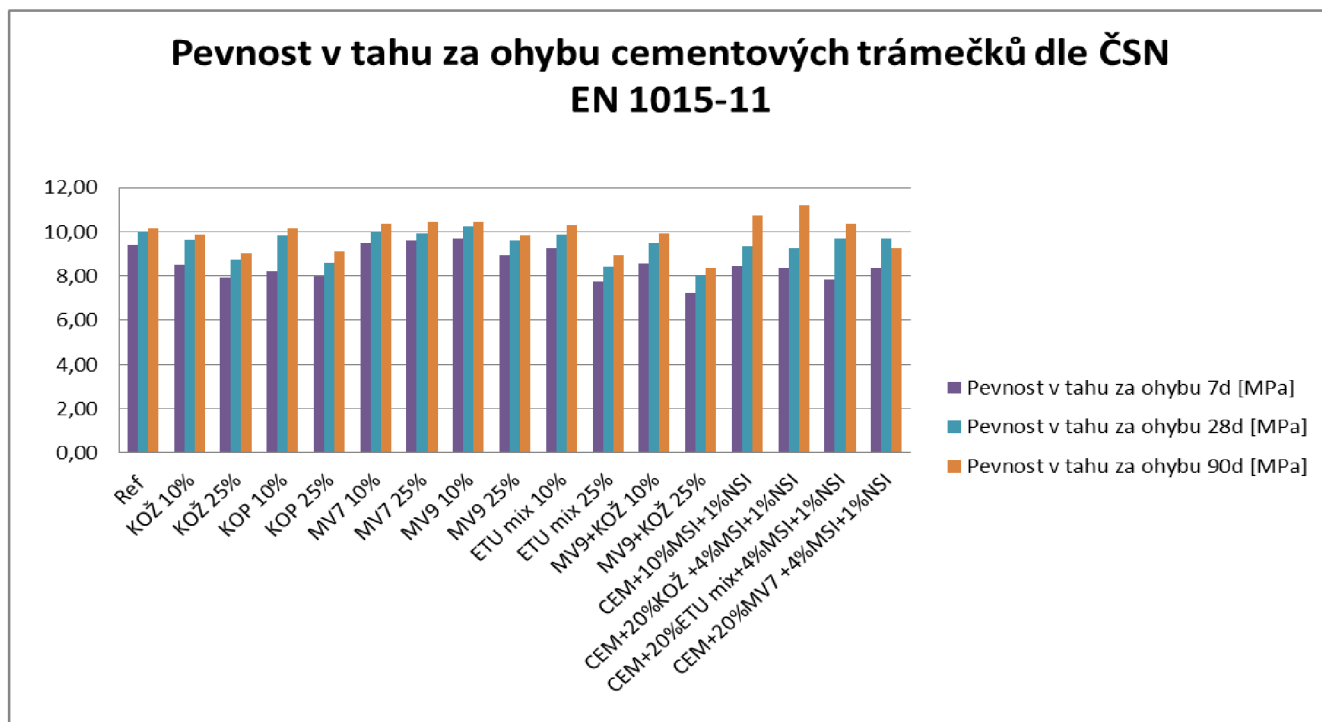
Tab. 20 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti navržených malt s plastifikátorem Dynamon SX 14



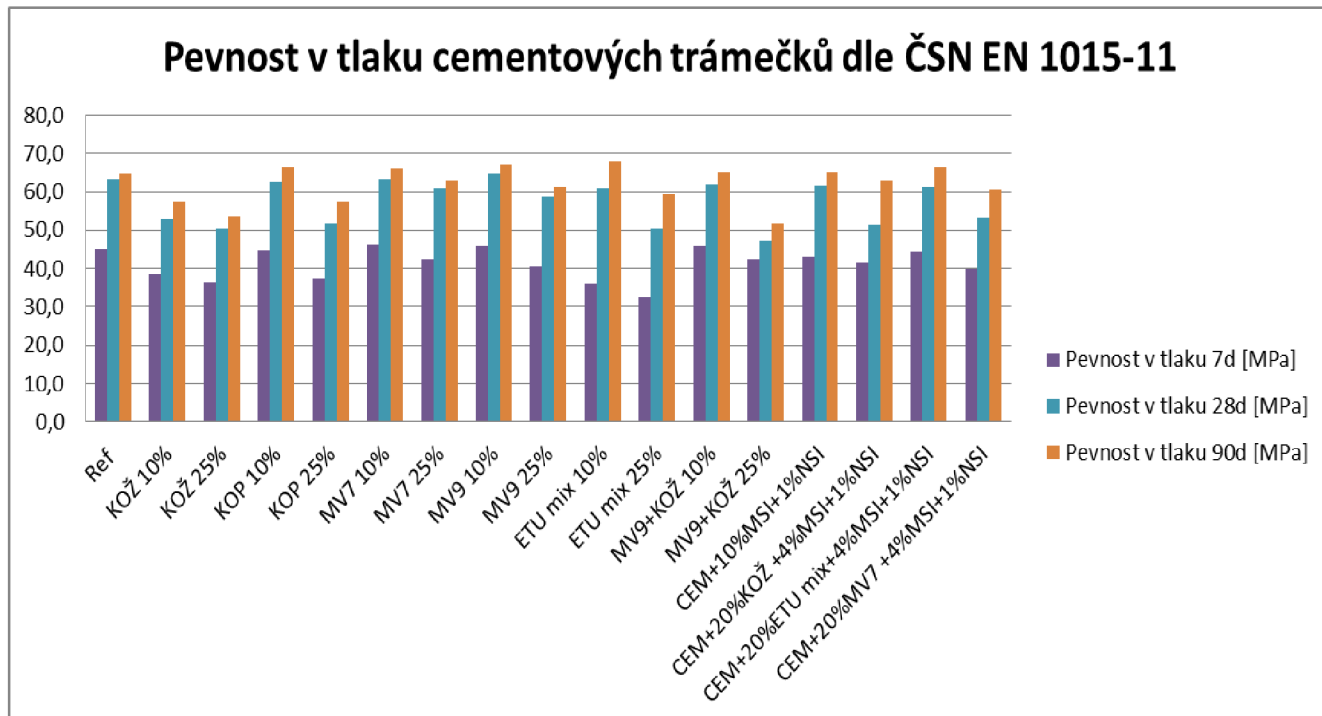
Graf 25 – Konzistence čerstvé malty s plastifikátorem SX 14 dle ČSN EN 1015-3



Graf 26 – Objemová hmotnost cementových malt s plastifikátorem SX 14 v čase



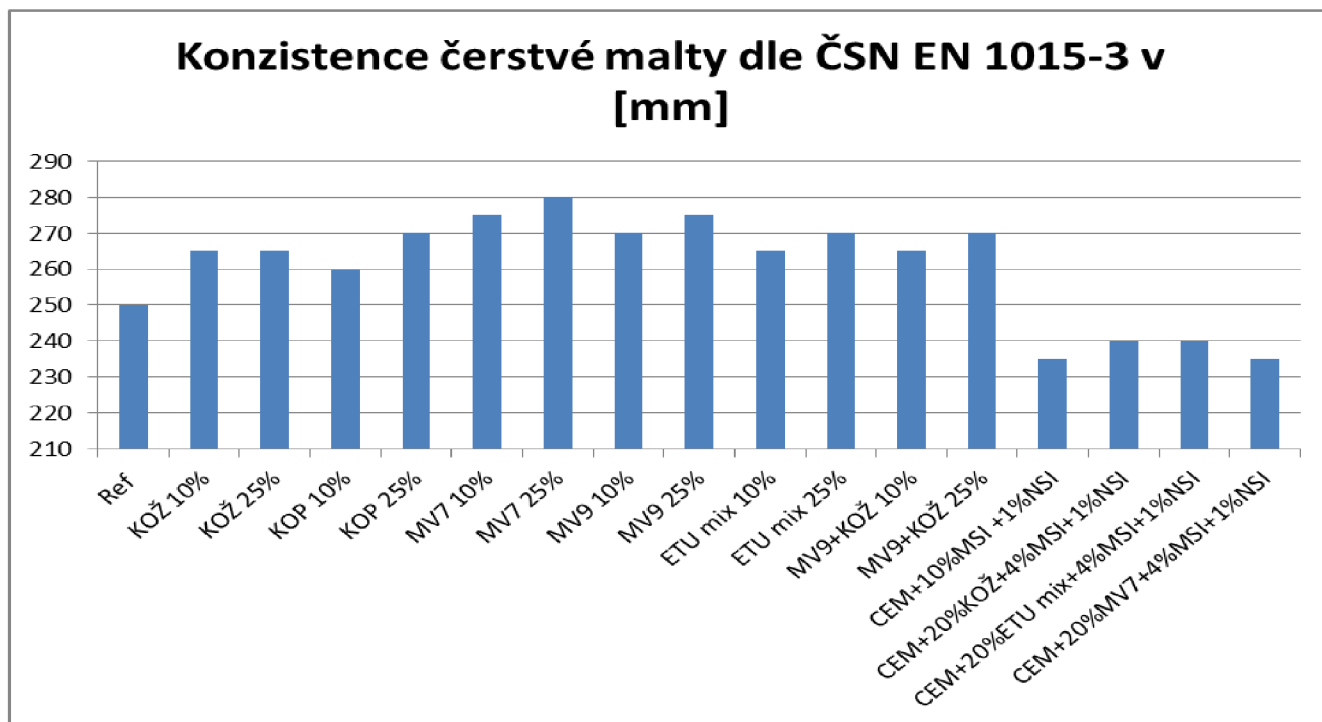
Graf 27 – Pevnost v tahu za ohybu cementových trámečků s plastifikátorem SX 14 v čase



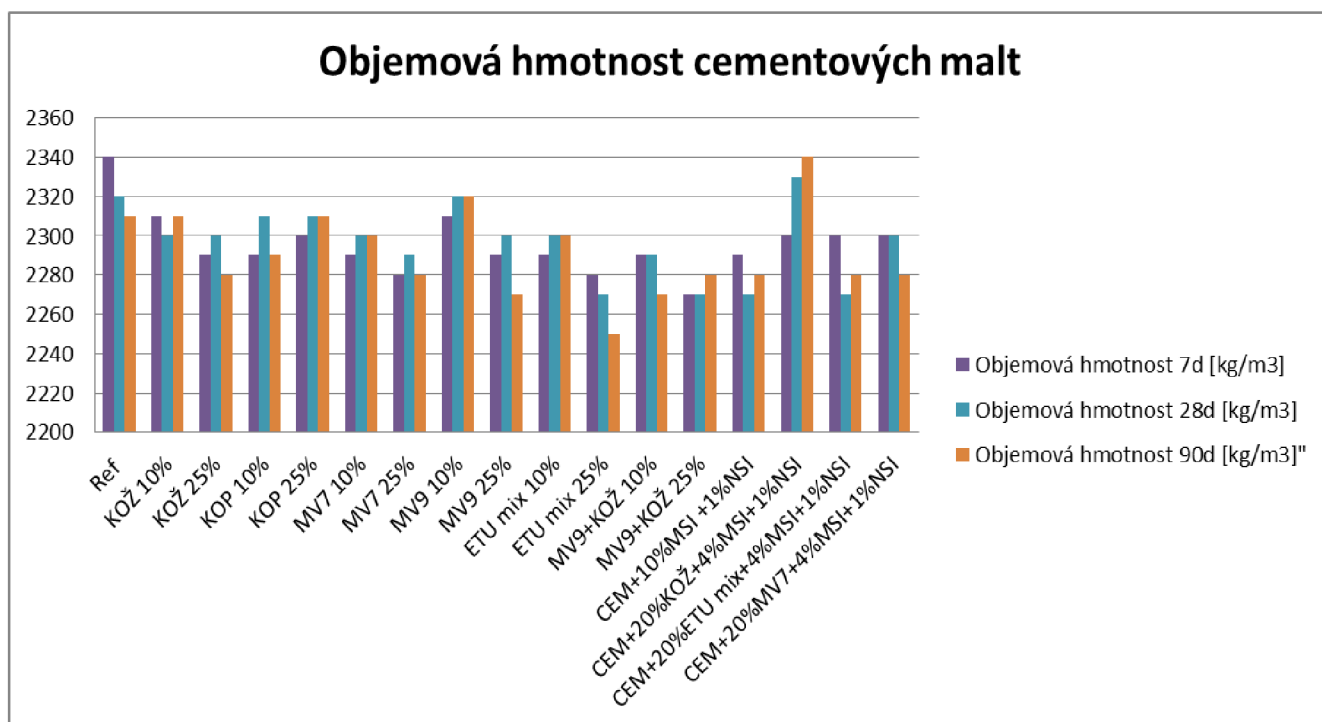
Graf 28 – Pevnost v tlaku cementových trámečků s plastifikátorem SX 14 v čase

Vlastnosti malt s plastifikátorem Mapei Dynamon RC 730										
Označení receptury	Konzistence rozliti [mm]	Objemová hmotnost 7d [kg/m ³]	Objemová hmotnost 28d [kg/m ³]	Objemová hmotnost 90d [kg/m ³]	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

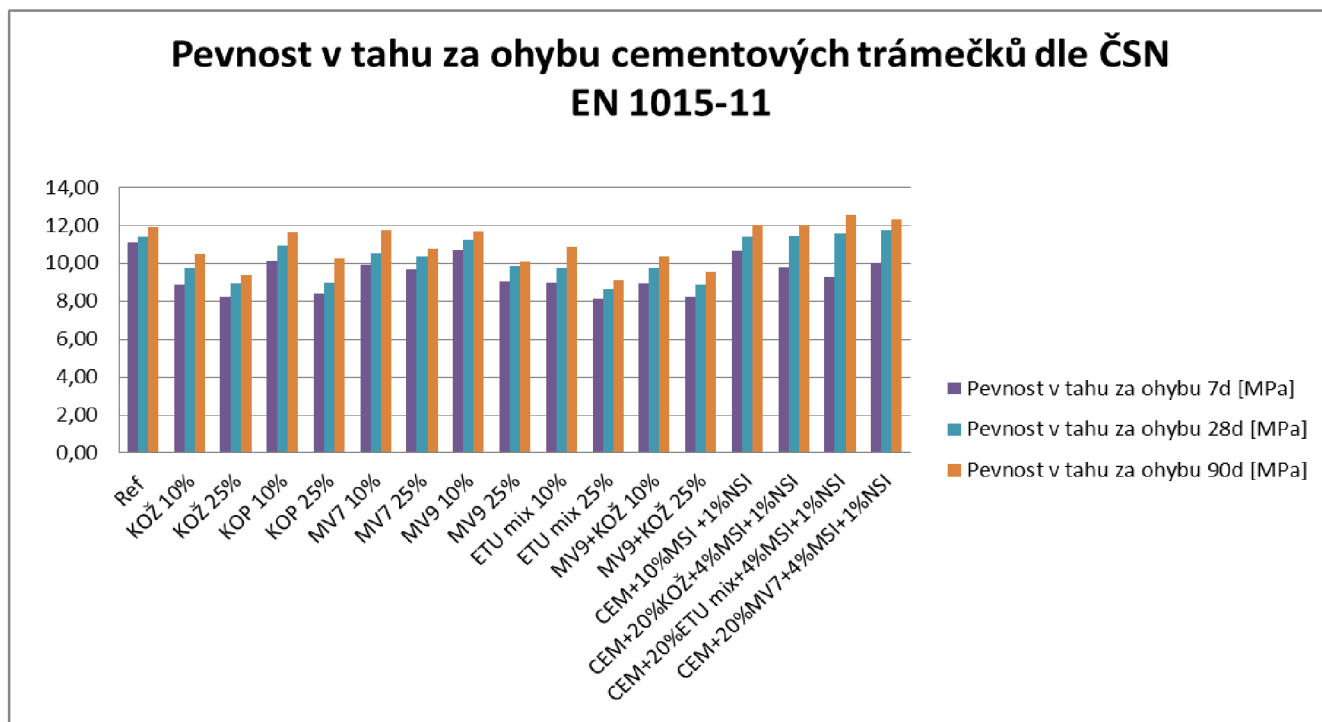
Tab. 21 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti navržených malt s plastifikátorem Dynamon RC 730



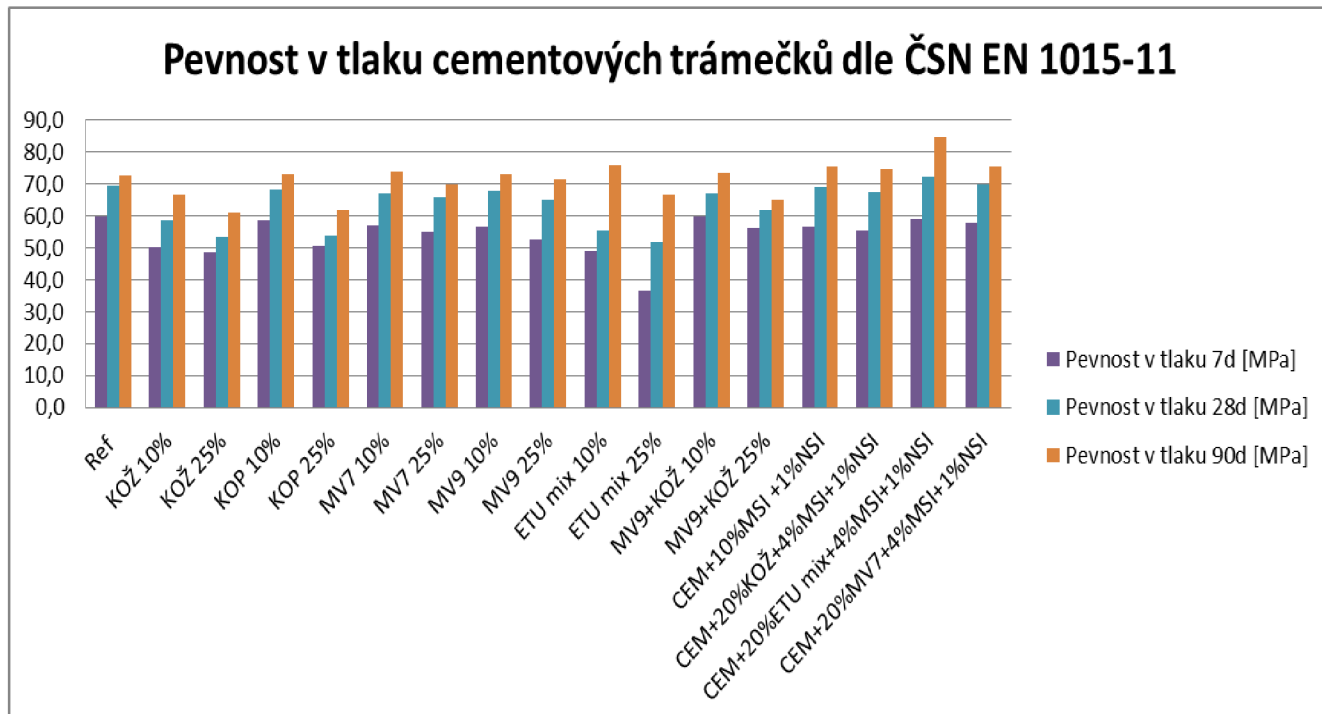
Graf 29 – Konzistence čerstvé malty s plastifikátorem RC 730 dle ČSN EN 1015-3



Graf 30 – Objemová hmotnost cementových malt s plastifikátorem RC 730 v čase



Graf 31 – Pevnost v tahu za ohybu cementových trámečků s plastifikátorem RC 730 v čase



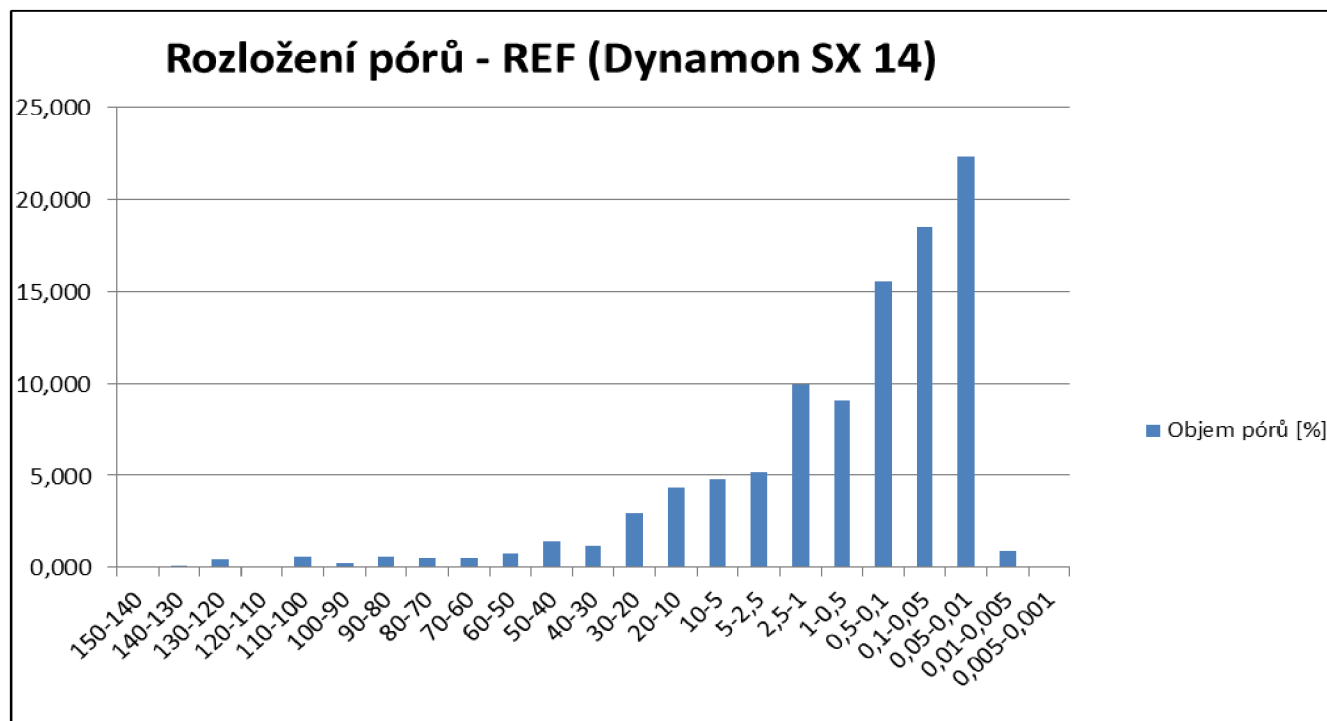
Graf 32 – Pevnost v tlaku cementových trámečků s plastifikátorem RC 730 v čase

Rtuťová porozimetrie

Na vzorcích s přidavkem 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 μm
- Celková porozita: 8,7868 %
- Měrná hmotnost: 2,3129 g/cm^3
- Zdánlivá hustota: 2,5351 g/cm^3

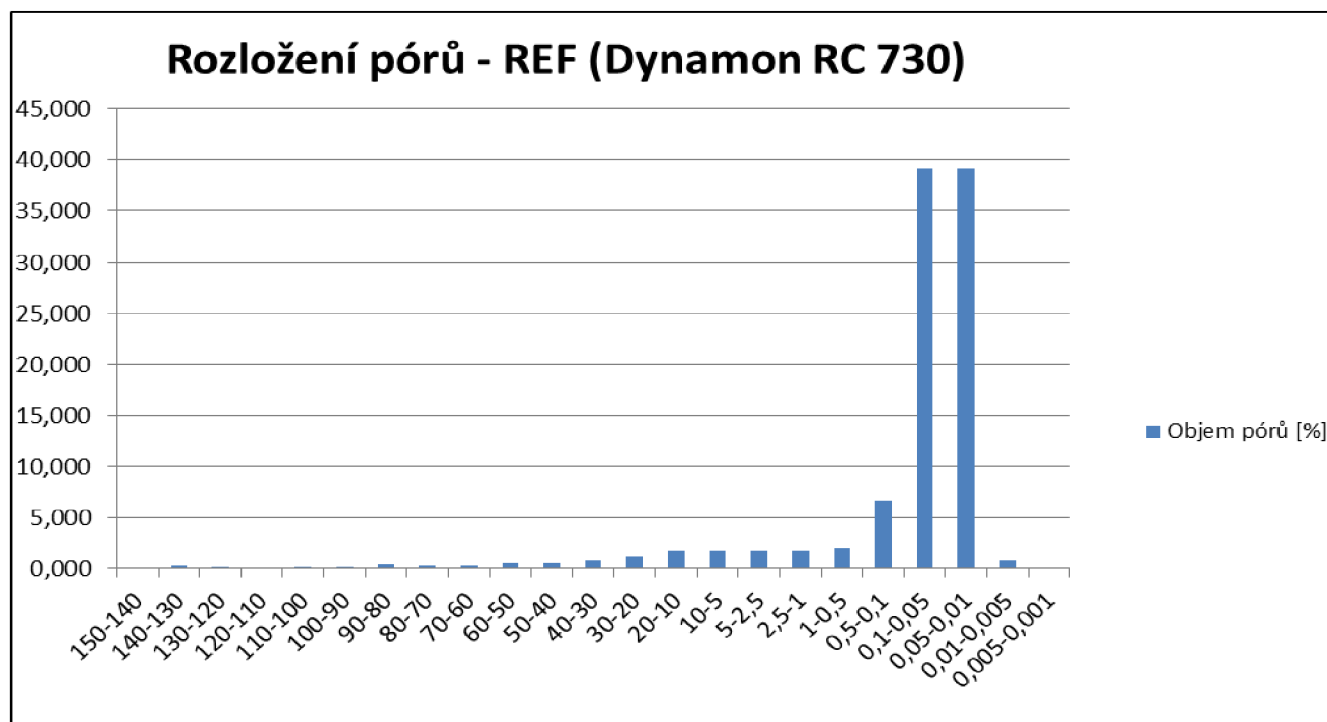


Graf 33 – Rozložení velikosti pórů referenční receptury s plastifikátorem SX 14

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

REF (DYNAMON RC 730)

- Průměrná velikost póru: 0,05804 μm
- Celková porozita: 7,5486 %
- Měrná hmotnost: 2,3517 g/cm^3
- Zdánlivá hustota: 2,5437 g/cm^3

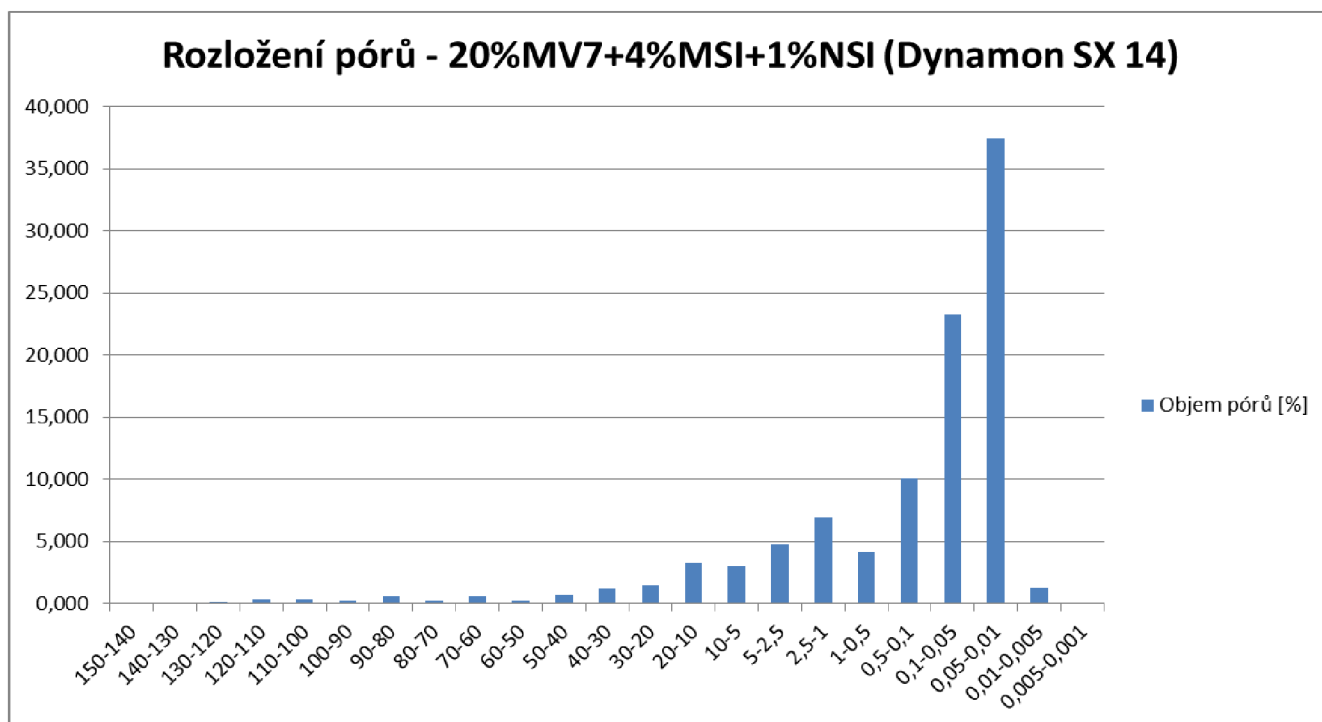


Graf 34 – Rozložení velikosti pórů referenční receptury s plastifikátorem RC 730

Z grafu je patrné velké zastoupení pórů od velikosti 0,1 po 0,01 μm . Póry o velikosti větší než 2,5 μm jsou zastoupeny v relativně malém množství 9%, póry velikosti 0,1 až 2,5 μm přibližně 11% a póry menší než 0,1 μm přibližně 80%. 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%MV7+4%MSI+1%NSI (DYNAMON SX 14)

- Průměrná velikost póru: 0,049052 μm
- Celková porozita: 9,6843 %
- Měrná hmotnost: 2,2585 g/cm^3
- Zdánlivá hustota: 2,5007 g/cm^3

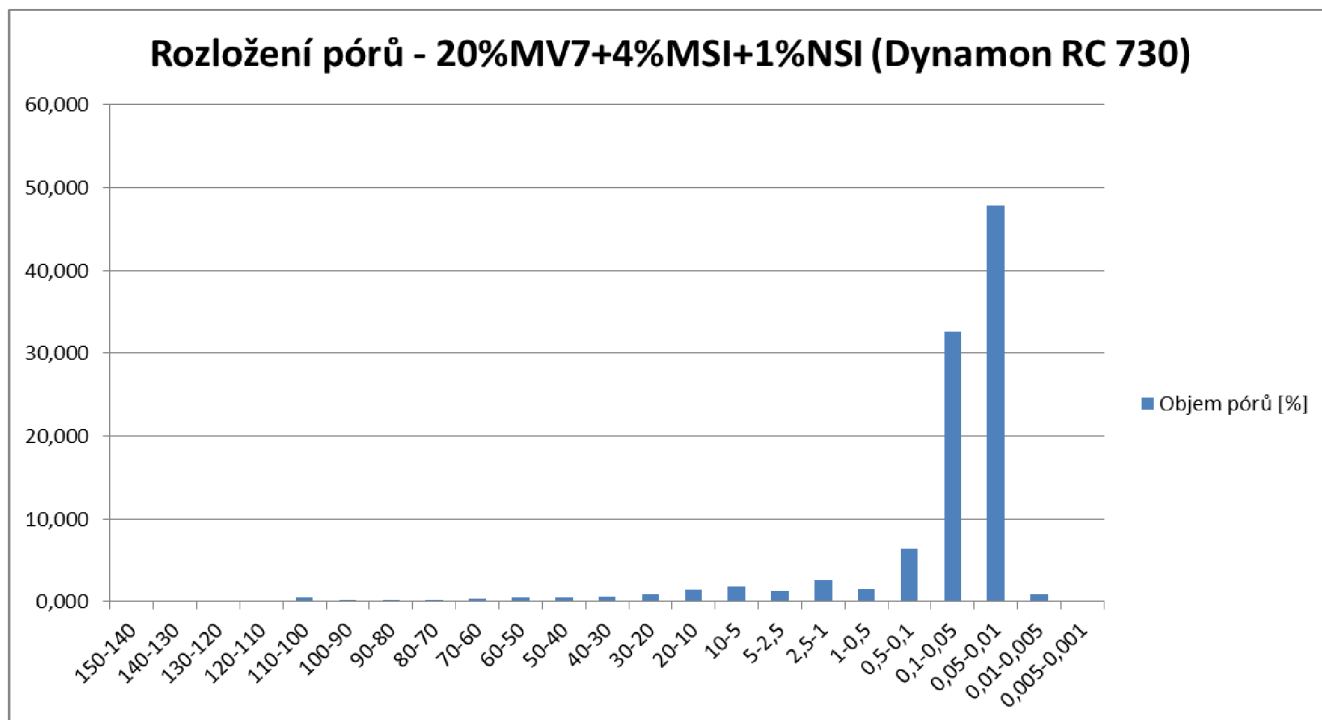


Graf 35 – Rozložení velikosti pórů receptury s vápencem a plastifikátorem SX 14

Póry o velikosti větší než 2,5 μm jsou zastoupeny v množství přibližně 17%, póry velikosti 0,1 až 2,5 μm přibližně 21% a póry menší než 0,1 μm přibližně 62%. V porovnání s referenční recepturou s plastifikátorem SX 14 je sice celková porozita vzorku vyšší o 0,9%, ale je zde rovněž patrné snížení objemu pórů větších než 0,1 μm a daleko vyšší zastoupení mikropórů menších než 0,1 μm .

20%MV7+4%MSI+1%NSI (DYNAMON RC 730)

- Průměrná velikost póru: 0,045913 μm
- Celková porozita: 7,8639 %
- Měrná hmotnost: 2,2546 g/cm^3
- Zdánlivá hustota: 2,4470 g/cm^3

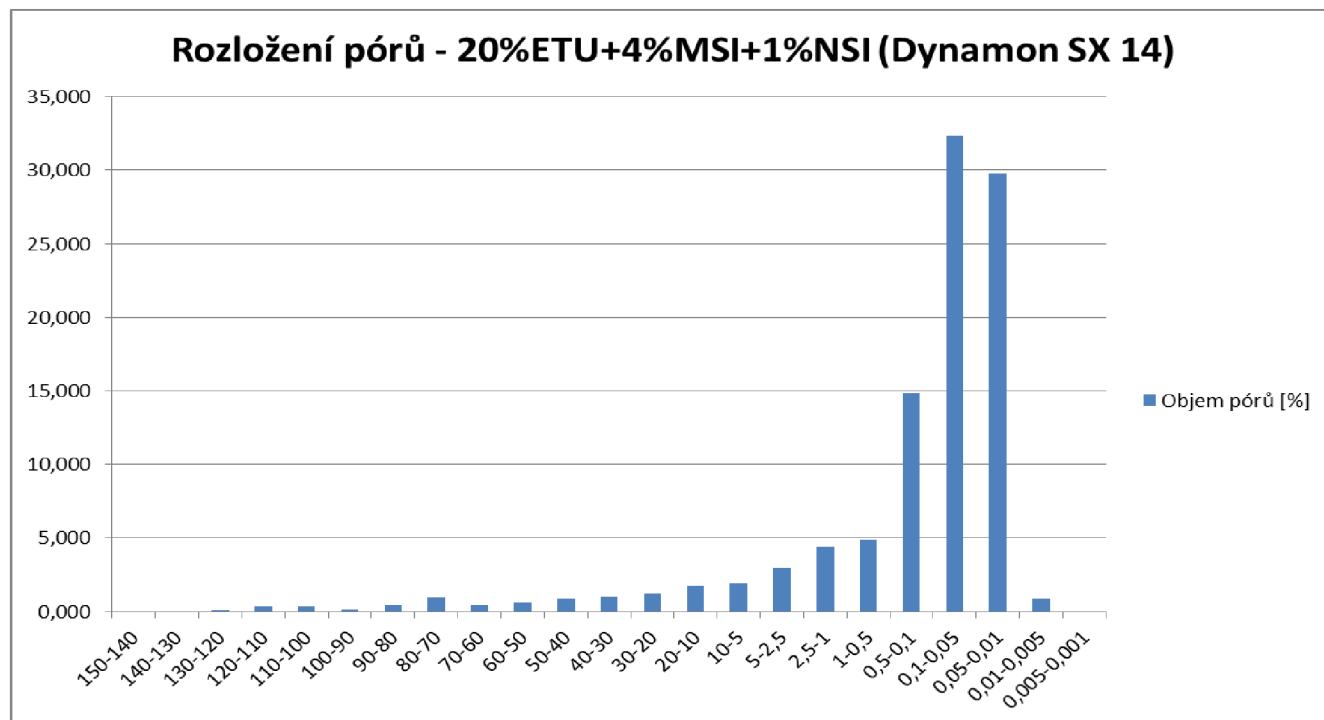


Graf 36 – Rozložení velikosti pórů receptury s vápencem a plastifikátorem RC 730

Póry o velikosti větší než 2,5 μm jsou zastoupeny v množství přibližně 8%, póry velikosti 0,1 až 2,5 μm přibližně 11% a póry menší než 0,1 μm přibližně 81%. Při porovnání s referenční recepturou s plastifikátorem RC 730 je celková porozita vzorku vyšší o 0,3%, ale objem pórů větších než 0,1 μm je nižší a dále zde můžeme pozorovat výrazně vyšší objem pórů menších než 0,05 μm .

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

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

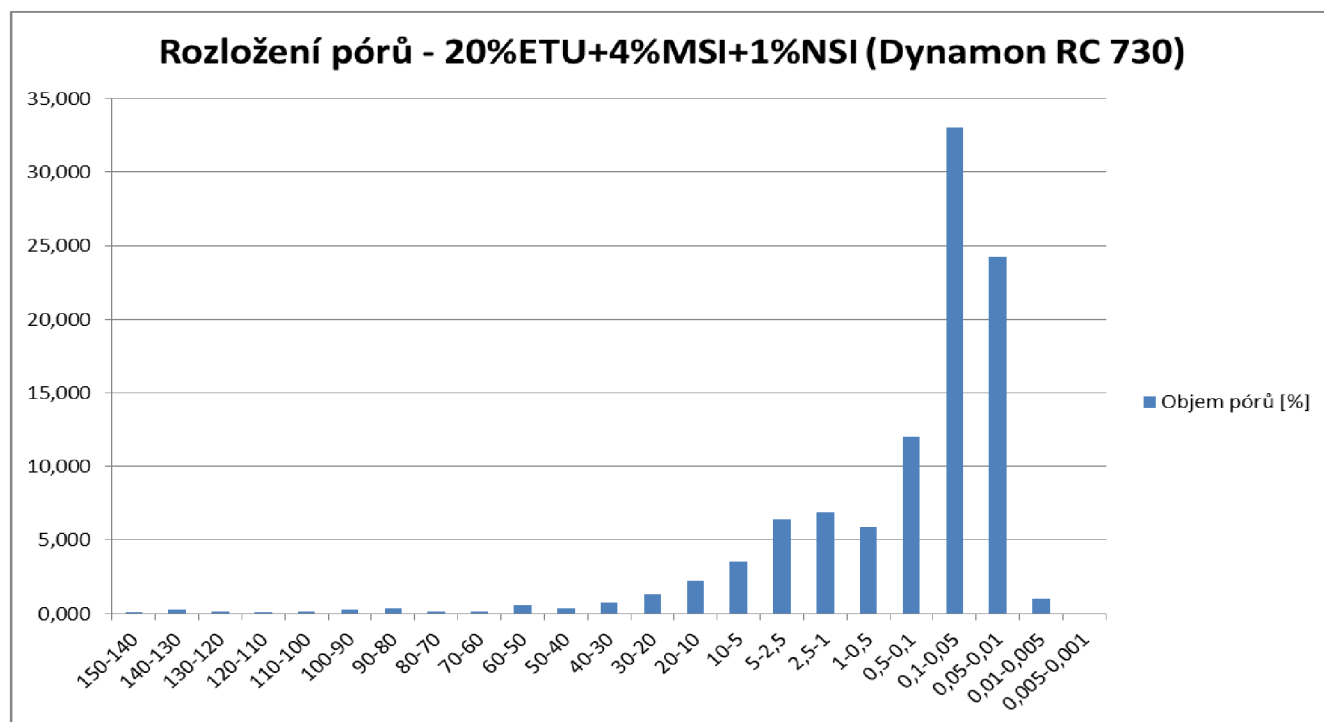


Graf 37 – Rozložení velikosti pórů receptury s popílkem a plastifikátorem SX 14

Póry o velikosti větší než 2,5 μm jsou zastoupeny v množství přibližně 13%, póry velikosti 0,1 až 2,5 μm přibližně 24% a póry menší než 0,1 μm přibližně 63%. 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 μm
- Celková porozita: 8,2305 %
- Měrná hmotnost: 2,3129 g/cm^3
- Zdánlivá hustota: 2,5204 g/cm^3

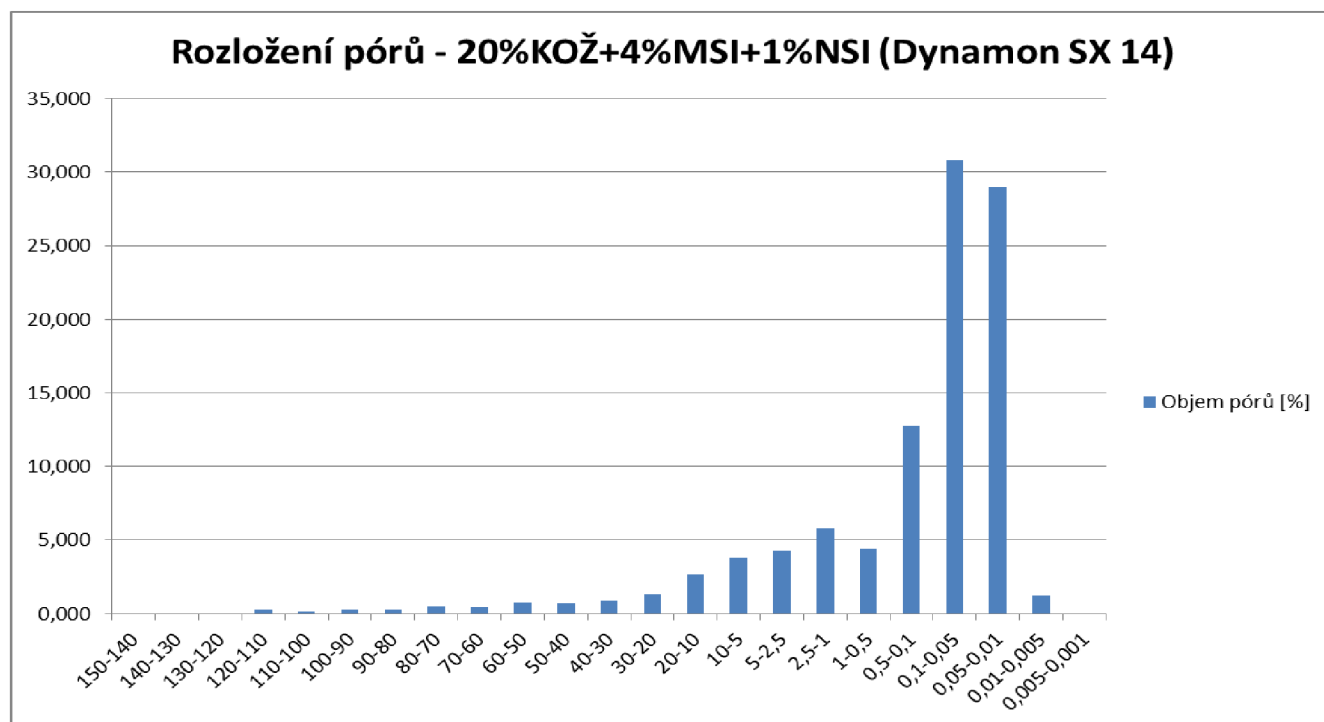


Graf 38 – Rozložení velikosti pórů receptury s popílkem a plastifikátorem RC 730

Póry o velikosti větší než 2,5 μm jsou zastoupeny v množství přibližně 17%, póry velikosti 0,1 až 2,5 μm přibližně 25% a póry menší než 0,1 μm přibližně 58%. V porovnání s referenční recepturou s plastifikátorem RC 730 je celková porozita vzorku vyšší o 0,7%, zastoupení pórů větších než 0,1 μm je také vyšší a naopak objem pórů menších než 0,1 μm se snížil. I přes tyto ukazatele však receptura vykazovala nejlepší mechanické vlastnosti.

20%KOŽ+4%MSI+1%NSI (DYNAMON SX 14)

- Průměrná velikost póru: 0,067232 μm
- Celková porozita: 9,4885 %
- Měrná hmotnost: 2,2940 g/cm^3
- Zdánlivá hustota: 2,5345 g/cm^3

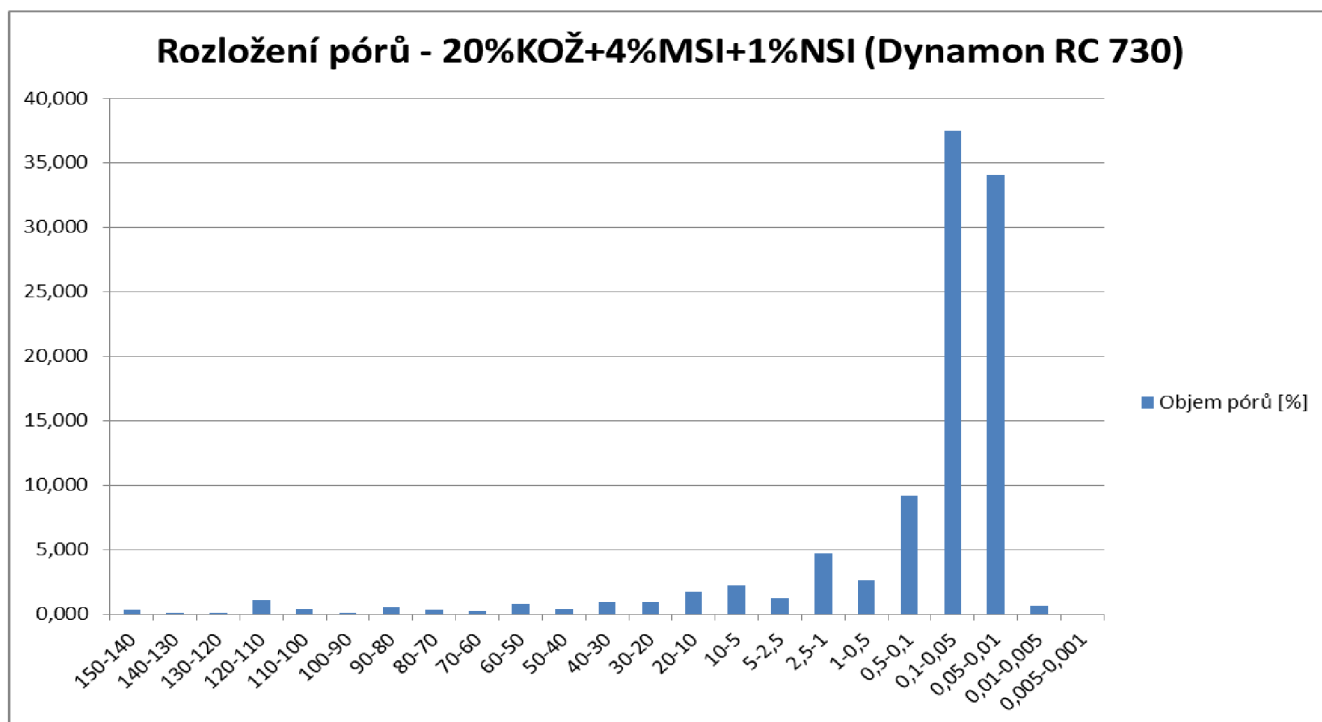


Graf 39 – Rozložení velikosti pórů receptury s kamennými odprašky Želešice a plastifikátorem SX 14

Póry o velikosti větší než 2,5 μm jsou zastoupeny v množství přibližně 16%, póry velikosti 0,1 až 2,5 μm přibližně 23% a póry menší než 0,1 μm přibližně 61%. V porovnání s referenční recepturou s plastifikátorem SX 14 je celková porozita vzorku vyšší o 0,7%, ale zastoupení pórů větších než 0,1 se snížilo a naopak procentuální zastoupení pórů velikosti menší než 0,1 μm bylo výrazně vyšší.

20%KOŽ+4%MSI+1%NSI (DYNAMON RC 730)

- Průměrná velikost póru: 0,058109 μm
- Celková porozita: 7,8646 %
- Měrná hmotnost: 2,3763 g/cm^3
- Zdánlivá hustota: 2,5792 g/cm^3



Graf 40 – Rozložení velikosti pórů receptury s kamennými odprašky Želešice a plastifikátorem RC 730

Póry o velikosti větší než 2,5 μm jsou zastoupeny v množství přibližně 11%, póry velikosti 0,1 až 2,5 μm přibližně 16% a póry menší než 0,1 μm přibližně 73%. V porovnání s referenční recepturou s plastifikátorem RC 730 je celková porozita vzorku vyšší pouze o 0,3%. Zastoupení pórů větších než 0,1 se zvýšilo a naopak procentuální zastoupení pórů velikosti menší než 0,1 μm bylo nižší.

Zhodnocení výsledků:

V první části, kde byly záměsi míchány bez přídavku plastifikátoru došlo k zachování či mírnému zlepšení konzistence u všech malt bez přidání nanosiliky. U malt s touto příměsí došlo i přes delší dobu míchání k poklesu konzistence a tedy zhoršení zpracovatelnosti. Pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu nebyla po 28 dnech vyšší u žádného vzorku s 10% ani 25% náhradou. Po 90 dnech však byla pevnost v tlaku i tahu za ohybu vyšší u vzorků s kamennými odprašky Předklášteří (náhrada 10%), mletého vápence 7/V a 9/V (náhrada 10%), popílku Tušimice (náhrada 10%), směsi odprašků Želešice a mletého vápence 9/V (náhrada 10%) a směsi s mikrosilikou a nanosilikou (náhrada 10 + 1%). Ze směsí s náhradou 25% se k pevnostem referenční receptury přiblížila pouze směs s mletým vápencem 7/V.

Záměsi s přídavkem nanosiliky vykazovaly ve všech případech pevnosti nižší, než byly u referenční záměsi. Tento jev je dán zřejmě tím, že pouhé prodloužení míchání na dvojnásobný čas, není schopno zajistit dispergaci nanosiliky. Nezreagované shluky nanosiliky pak mohou v betonu působit jako slabá místa.

U záměsí s přídavkem plastifikátorů je patrný značný nárůst pevností v tlaku i tahu za ohybu. Toto zvýšení je dáno zejména snížením vodního součinitele na poloviční hodnotu. Z hlediska pevností se zde potvrzuje trend, který byl patrný i u záměsí bez plastifikátoru, kdy pevností po 90 dnech, srovnatelných či vyšších oproti referenčním tělesům dosahují záměsí stejného složení.

Receptury s nanosilikou vykazovaly v případě použití plastifikátoru Dynamon SX 14 pevnosti „pouze“ srovnatelné s referenční záměsí, což naznačuje, že plastifikátor SX 14 nemusí být zcela vhodný k dispergaci nanosiliky, nebo by bylo k účinnější dispergaci nutné dodat vyšší energii.

Oproti tomu všechny receptury s plastifikátorem RC 730 a nanosilikou vykazovaly vyšší pevnosti ve srovnání s referenční recepturou. Směs s 20 % popílku Tušimice měla nárůst pevností v tlaku po 90 dnech v průměru vyšší o 12 MPa proti referenční záměsi.

Zkouška stanovení velikosti a objemu pórů pomocí rtuťové porozimetrie ukázala, že u žádného vzorku s nanosilikou nebyla snížena celková pórovitost, ale u většiny vzorků došlo k zvýšení objemu mikropórů menších než 0,1 μm .

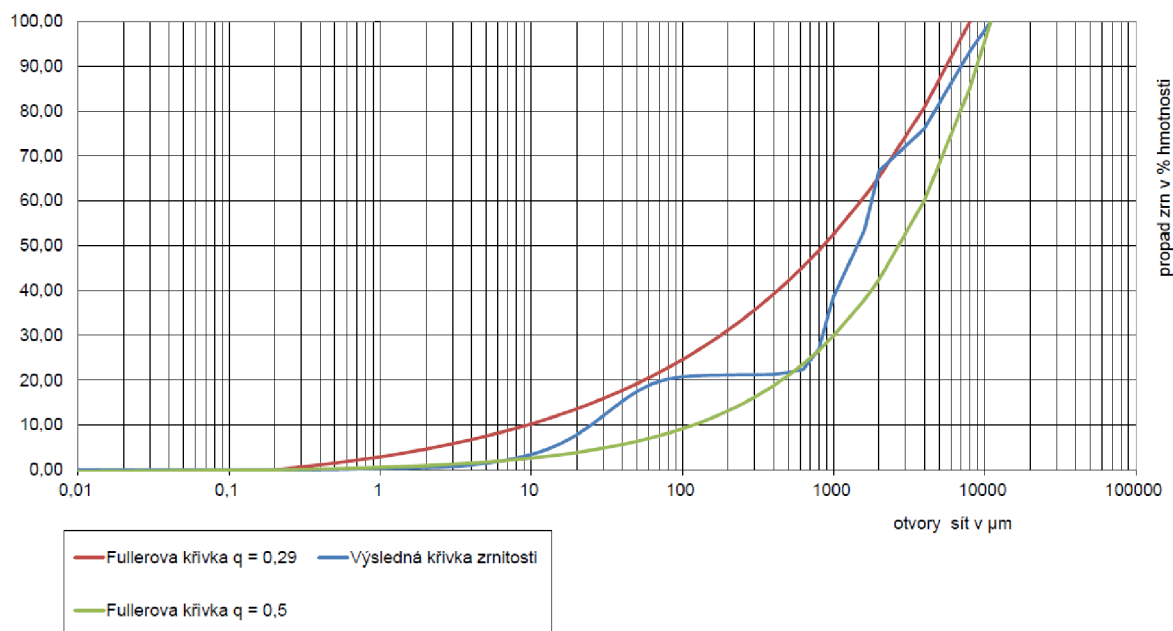
6.6 Optimalizace křivky zrnitosti na betonech

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 příměsími na 30%. Pro rozdužení nanosiliky byl použit postup popsáný v předešlé kapitole. Na betonech byl používán pouze plastifikátor Dynamon RC 730, který při použití na maltách vykazoval lepší výsledky.

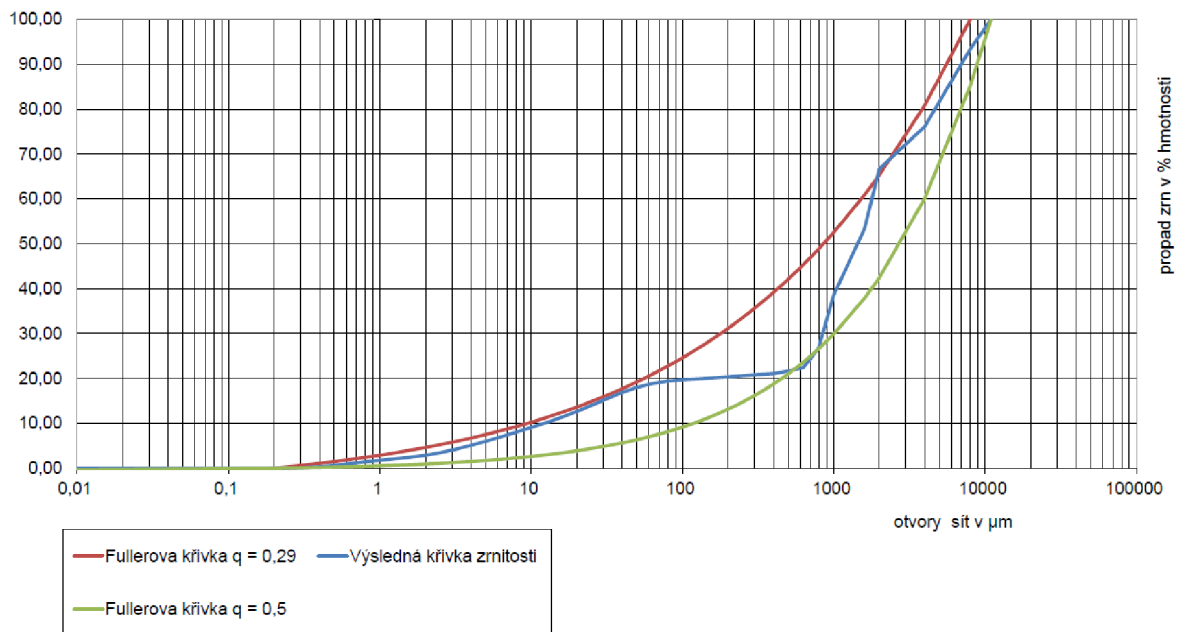
Složení referenční receptury:

CEM I 42,5 R	500 kg/m ³
0/4 Hrušovany	1308 kg/m ³
4/8 Olbramovice	542 kg/m ³
Voda	125 kg/m ³
Dynamon RC 730	20 kg/m ³

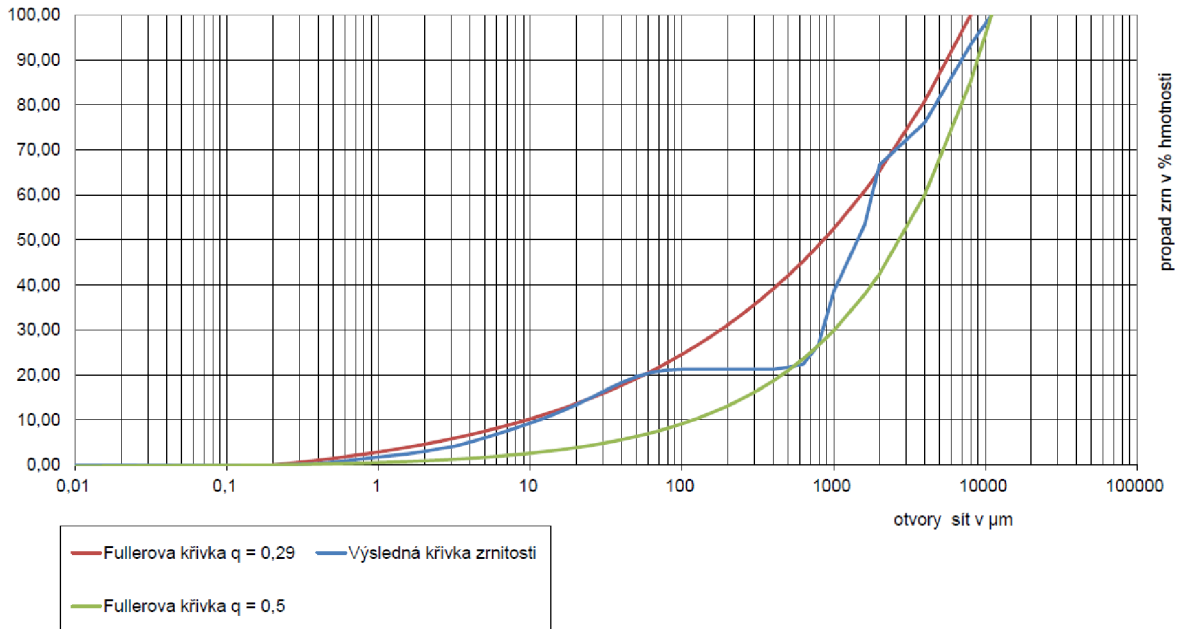
W/C = 0,25



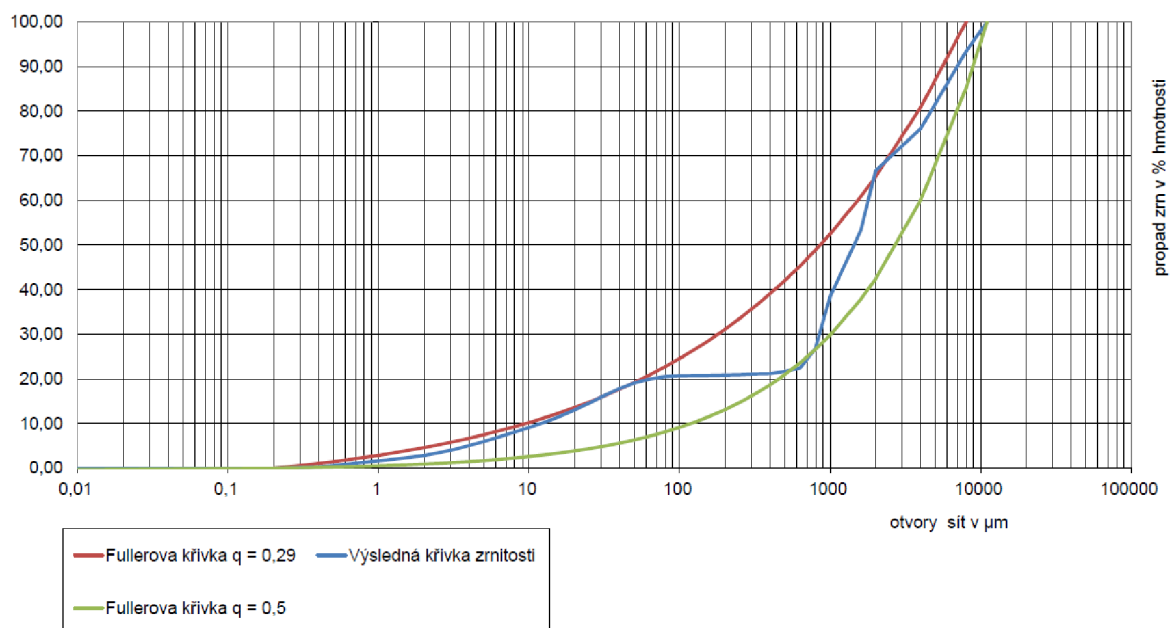
Graf 41 – Křivka zrnitosti referenční receptury



Graf 42 – Křivka zrnitosti optimalizované receptury č. 1 – 23% mletý vápenec 7N, 6% mikrosilika, 1% nanosilika



Graf 43 – Křivka zrnitosti optimalizované receptury č. 2 – 23% popílek Tušimice, 6% mikrosilika, 1% nanosilika



Graf 44 – Křivka zrnitosti optimalizované receptury č. 3 – 23% odprašky Želešice, 6% mikrosilika, 1% nanosilika

Ze všech grafů je patrna optimalizace křivky zrnitosti v oblasti do 60 µm. Vzhledem k použití běžného, nijak dále neupravovaného kameniva, je v grafech ve všech případech pozorovatelný nedostatek částic o velikosti 100 až 500 µm.

6.7 Fyzikálně mechanické vlastnosti betonů

Na všech recepturách byla zkoušena jejich konzistence v čase dle ČSN EN 12350-2, objemová hmotnost čerstvého betonu a obsah vzduchu v čerstvém betonu dle ČSN EN 12350-7. Z betonu byly zhotoveny tělesa pro zkoušku pevnosti betonu v tlaku dle ČSN EN 12390-3 po 3, 7, 28 a 90 dnech. Po odformování byla tělesa uložena do prostředí s teplotou 20 °C a vlhkostí 60 %. Výsledky zkoušek jsou shrnuty v následujících tabulkách a grafech.

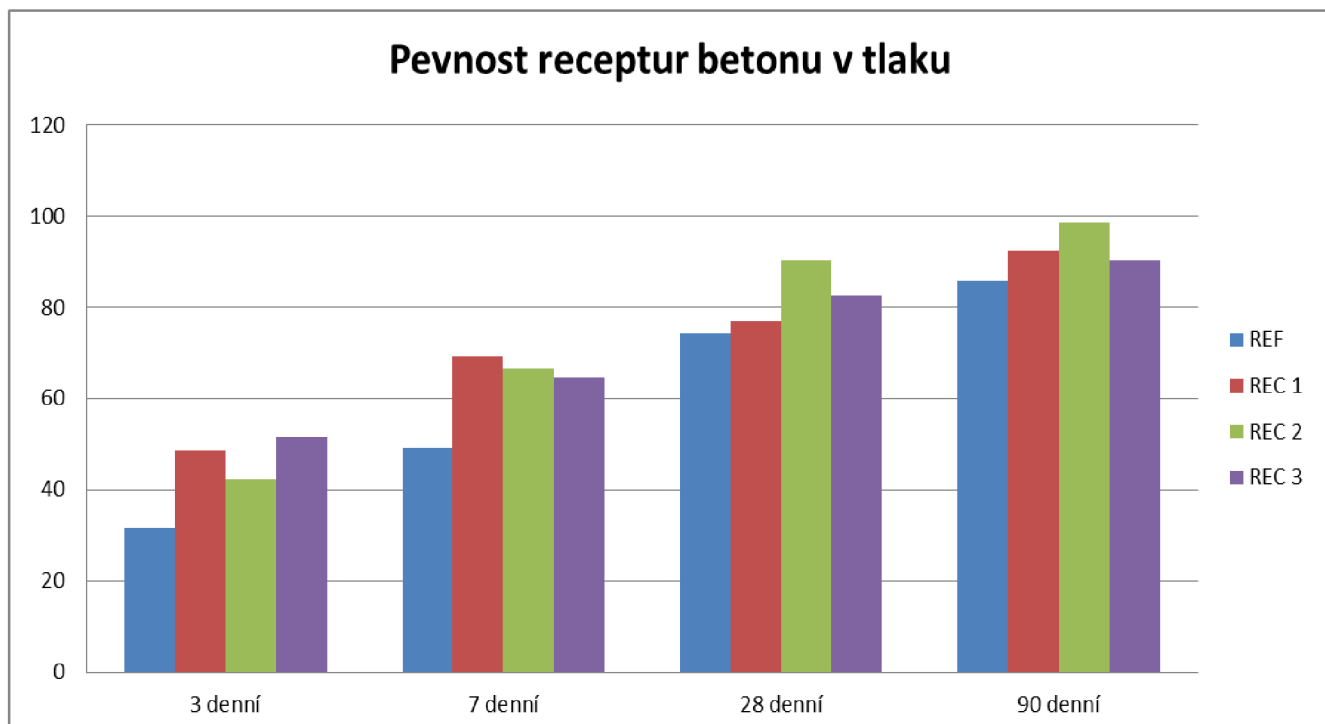
Vlastnosti čerstvého betonu						
Označení receptury	Objemová hmotnost [kg/m ³]	Obsah vzduchu [%]	Sednutí kužele v čase [mm]			
			T ₀	T ₁₅	T ₃₀	T ₆₀
REF	2470	1,8	130	130	120	110
REC 1	2430	1,4	100	80	50	20
REC 2	2450	1,2	110	100	60	30
REC 3	2420	1,3	90	80	50	20

Tab. 22 – Vlastnosti čerstvého betonu

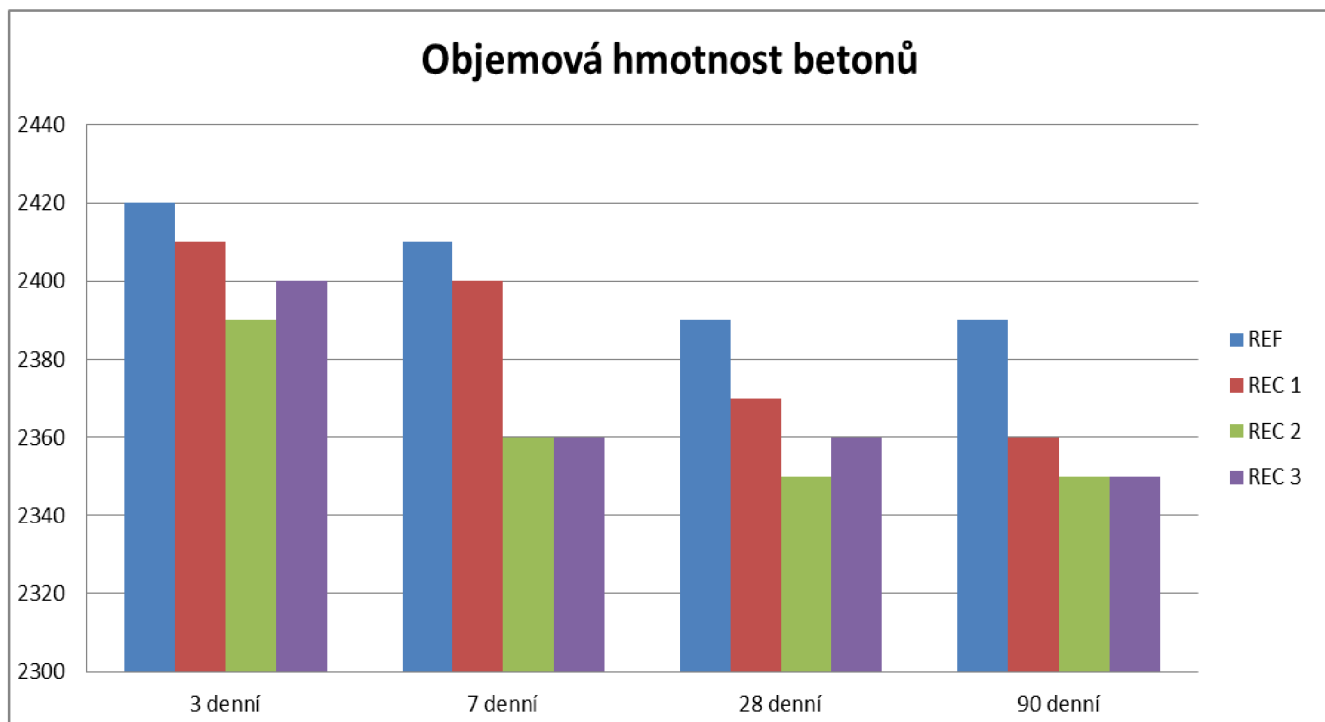
Označení receptury	Objemová hmotnost 3d [kg/m ³]	Objemová hmotnost 7d [kg/m ³]	Objemová hmotnost 28d [kg/m ³]	Objemová hmotnost 90d [kg/m ³]	Pevnost v tlaku 3d [MPa]	Pevnost v tlaku 7d [MPa]	Pevnost v tlaku 28d [MPa]	Pevnost v tlaku 90d [MPa]
REF	2420	2410	2390	2390	31,6	49,2	74,4	85,7
REC 1	2410	2400	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. 23 – Vývin objemové hmotnosti a pevnosti betonu v tlaku

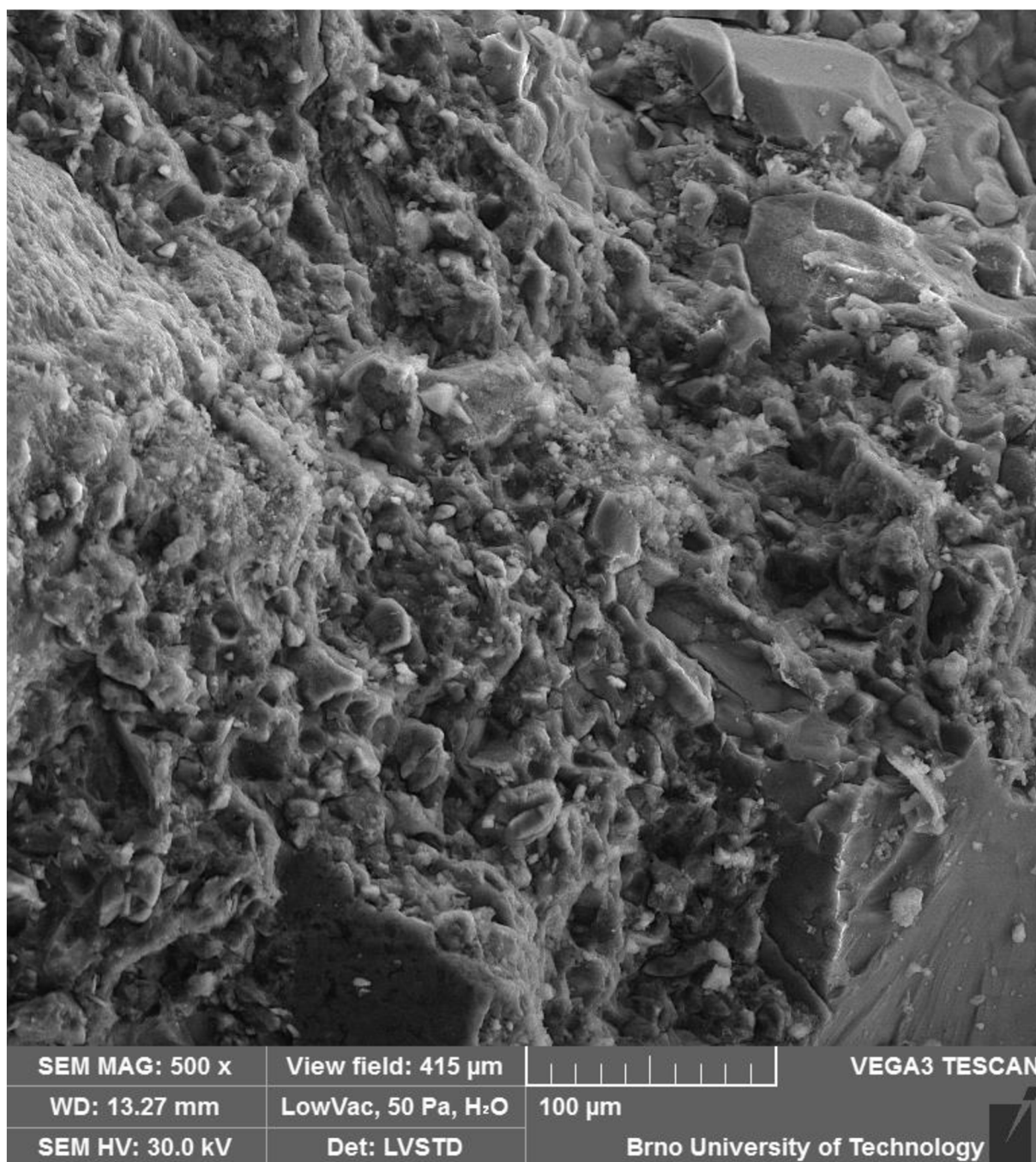
Pozn.: hodnoty v čase 3 a 7 dnů jsou průměrem 2 měření, hodnoty v čase 28 a 90 dnů jsou průměrem 3 měření.



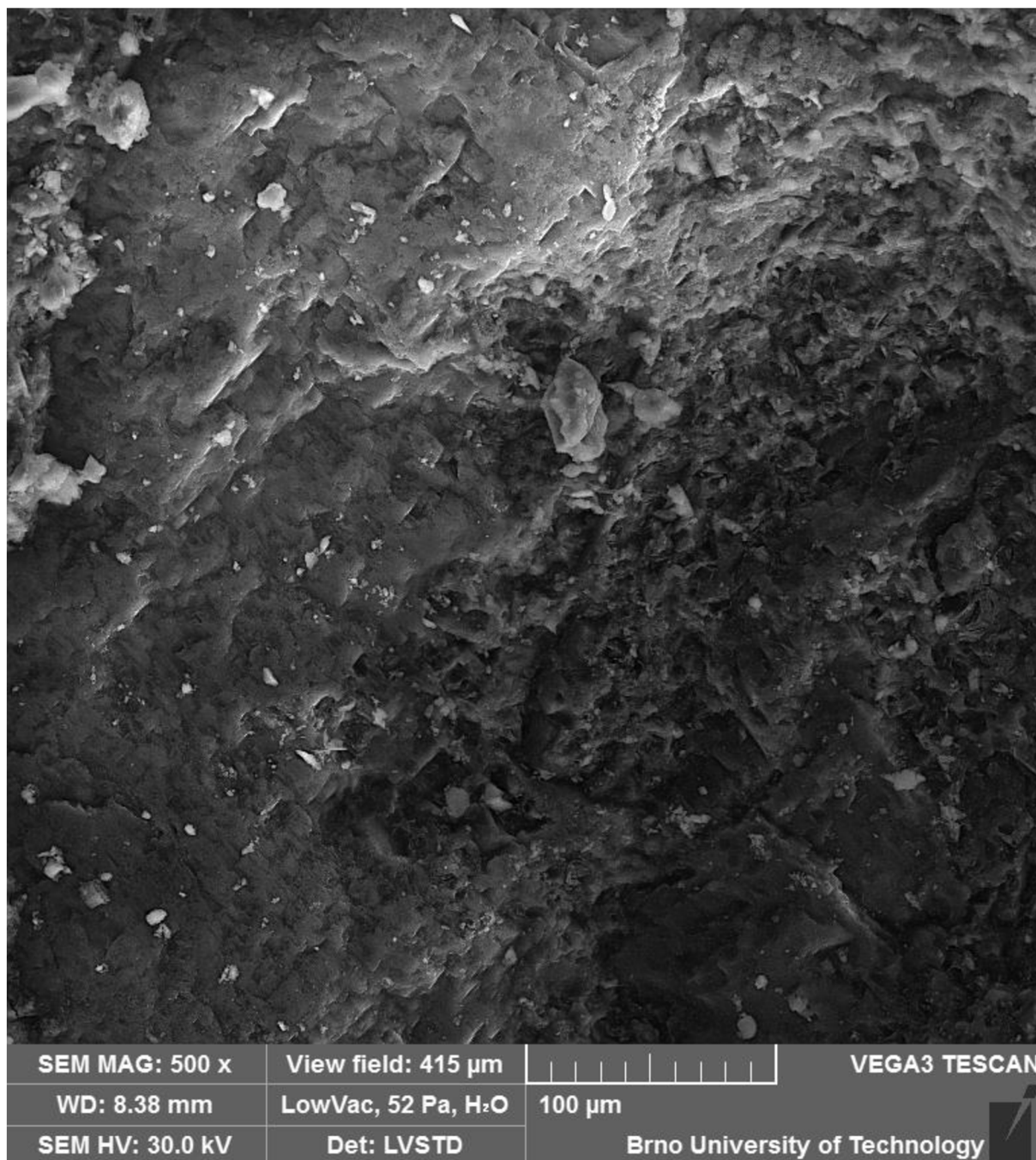
Graf 45 – Porovnání vývinu pevností v tlaku jednotlivých receptorů v čase



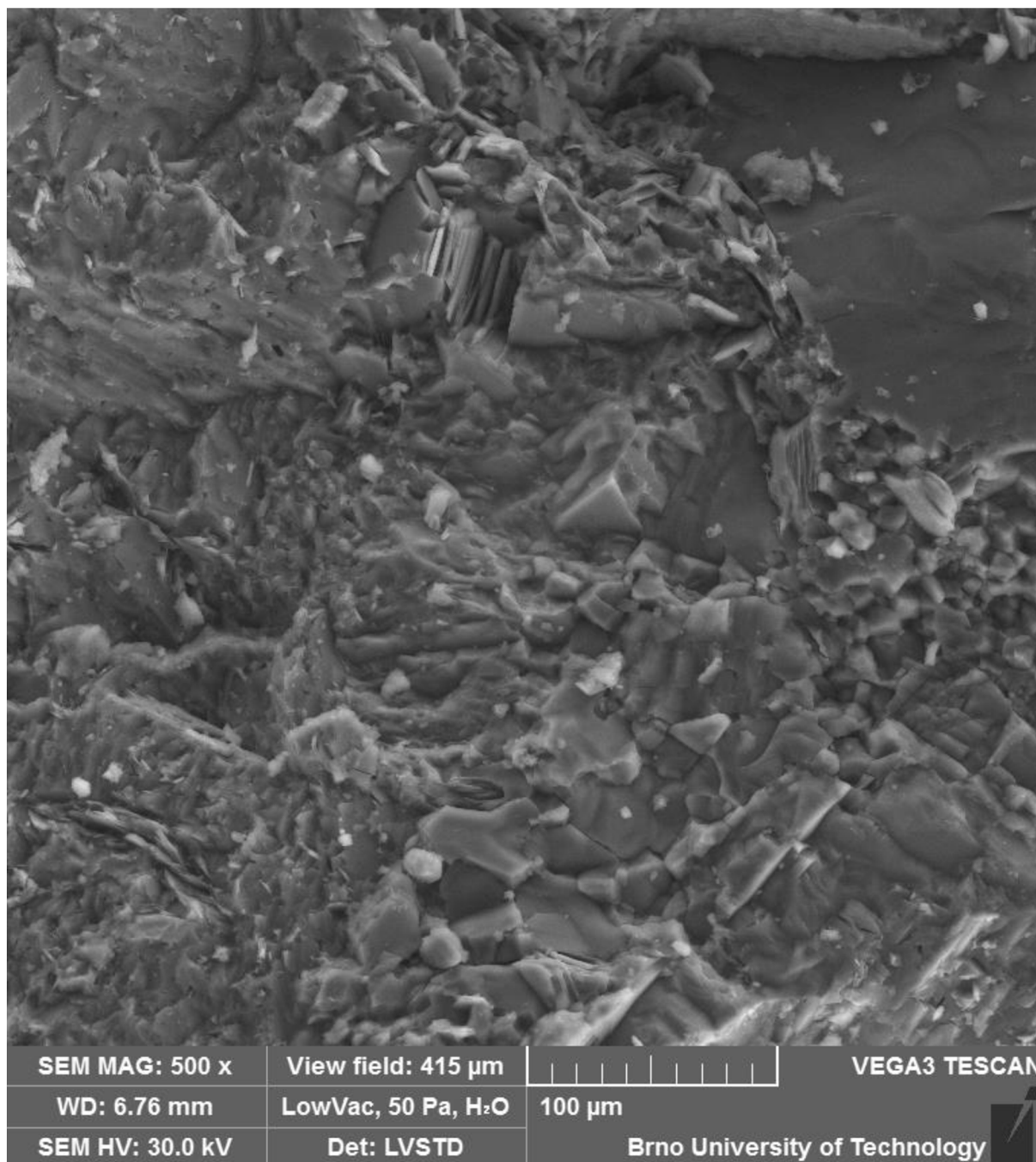
Graf 46 – Porovnání objemových hmotností jednotlivých receptorů v čase



Obr. 43 – Mikrostruktura referenční záměsi po 90 dnech



Obr. 44 – Mikrostruktura záměsi s mletým vápencem po 90 dnech



Obr. 45 – Mikrostruktura záměsi s popílkem po 90 dnech

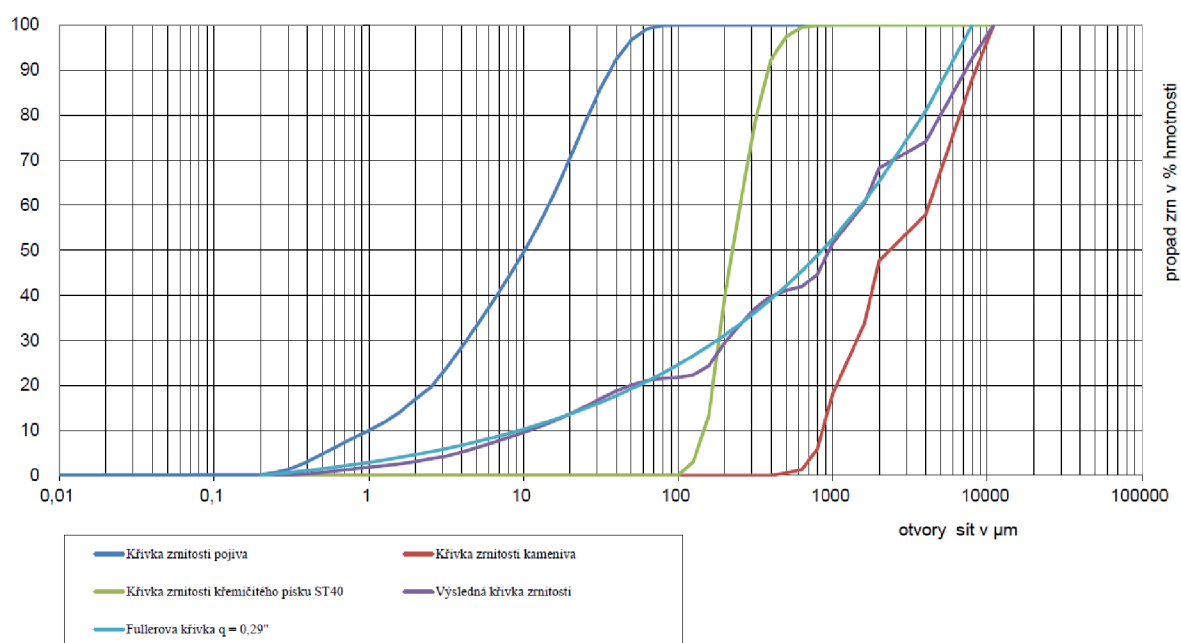
Všechny směsi s optimalizovanou křivkou zrnitosti v oblasti 0 – 100 μm vykazovaly lepší pevnosti v tlaku po 3, 7, 28 i 90 dnech. Nárůst je dán vysokou reaktivností mikrosilika a zejména nanosiliky.

Dalším krokem k dosažení optimální receptury je doplnění chybějících částic velikosti 100 – 500 μm. Pro tento účel byla vybraná 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 100 – 630 μm.

Výsledná receptura:

CEM I 42,5 R	350 kg/m ³
Popílek ETU _{mix}	115 kg/m ³
Mikrosilika	30 kg/m ³
Nanosilika	5 kg/m ³
Křemičitý písek ST40	450 kg/m ³
0/4 Hrušovany	758 kg/m ³
4/8 Olbramovice	592 kg/m ³
Voda	125 kg/m ³
Dynamon RC 730	20 kg/m ³

W/C = 0,36 W/B = 0,25



Graf 47 – Složení optimální křivky zrnitosti

6.7.1 Fyzikálně mechanické vlastnosti betonu s optimalizovanou křivkou zrnitosti

U receptury s optimalizovanou křivkou zrnitosti byly provedeny stejné zkoušky jako u předešlých receptur betonu. Byla zkoušena konzistence v čase dle ČSN EN 12350-2, objemová hmotnost čerstvého betonu a obsah vzduchu v čerstvém betonu dle ČSN EN 12350-7. Z betonu byly zhotoveny tělesa pro zkoušku pevnosti betonu v tlaku dle ČSN EN 12390-3 po 3, 7, 28 a 90 dnech. Výsledky zkoušek jsou shrnuty v následujících tabulkách.

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

Tab. 24 – Vlastnosti čerstvého betonu

Označení receptury	Objemová hmotnost 3d [kg/m ³]	Objemová hmotnost 7d [kg/m ³]	Objemová hmotnost 28d [kg/m ³]	Objemová hmotnost 90d [kg/m ³]	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. 25 – Vývin objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku betonu s optimální křivkou zrnitosti

Pozn.: hodnoty v čase 3 a 7 dnů jsou průměrem 2 měření, hodnoty v čase 28 a 90 dnů jsou průměrem 3 měření.

Zhodnocení výsledků:

Pro dosažení optimální křivky zrnitosti bylo nutné podobně jako u maltových směsí, použít mikrosiliku a nanosiliku. S těmito příměsemi bylo u všech receptur dosaženo vyšších pevností v tlaku, než tomu bylo u referenční receptury. Na druhou stranu tyto příměsi bohužel způsobily zhoršení konzistence čerstvého betonu a výrazné zkrácení doby zpracovatelnosti.

Nejlepších mechanických vlastností bylo dosaženo u receptury označené jako REC 2.2. V této receptuře bylo kromě mikrosilika a nanosiliky, které pomohly optimalizovat křivku zrnitosti v oblasti 1 – 20 μm , použit jemný křemičitý písek zrnitosti 10 – 630 μm , který optimalizoval křivku zrnitosti v oblasti 100 – 500 μm .

Díky těmto výše zmíněným surovinám bylo dosaženo křivky zrnitosti, která téměř kopíruje zvolenou optimální křivku zrnitosti dle Fullera. Na druhou stranu je však nutné podotknout, že tyto suroviny beton prodražují a je tedy nutné zvážit, zda vyšší pevnostní a trvanlivostní vlastnosti vyváží vyšší pořizovací náklady.

Pro použití nanosiliky by na stávajících výrobnách betonu navíc bylo nutné nainstalovat zařízení k rozduřování a dávkování nanosiliky. Dále by bylo nutné mít v provozovnách k dispozici zařízení k stanovení křivek zrnitosti vstupních materiálů (zejména cementu a příměsí), aby bylo možné optimalizovat křivky zrnitosti s ohledem na proměnlivost vlastností vstupních surovin. Náklady na pořízení těchto zařízení a na jejich obsluhu by rovněž prodražily výrobu samotného betonu.

6.8 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.

6.8.1 Suroviny:

- CEM I 42,5 R - lokalita Mokrý, Českomoravský cement, a.s.
- Mikromletý vápenec – 9V, Carmeuse Czech republic s.r.o.
- Kamenné odprašky – lokalita Želešice, Kámen Zbraslav, a.s.
- Komerčně dostupné kamenivo z lokalit Hrušovany, Mistřín, Kočovce a Želešice

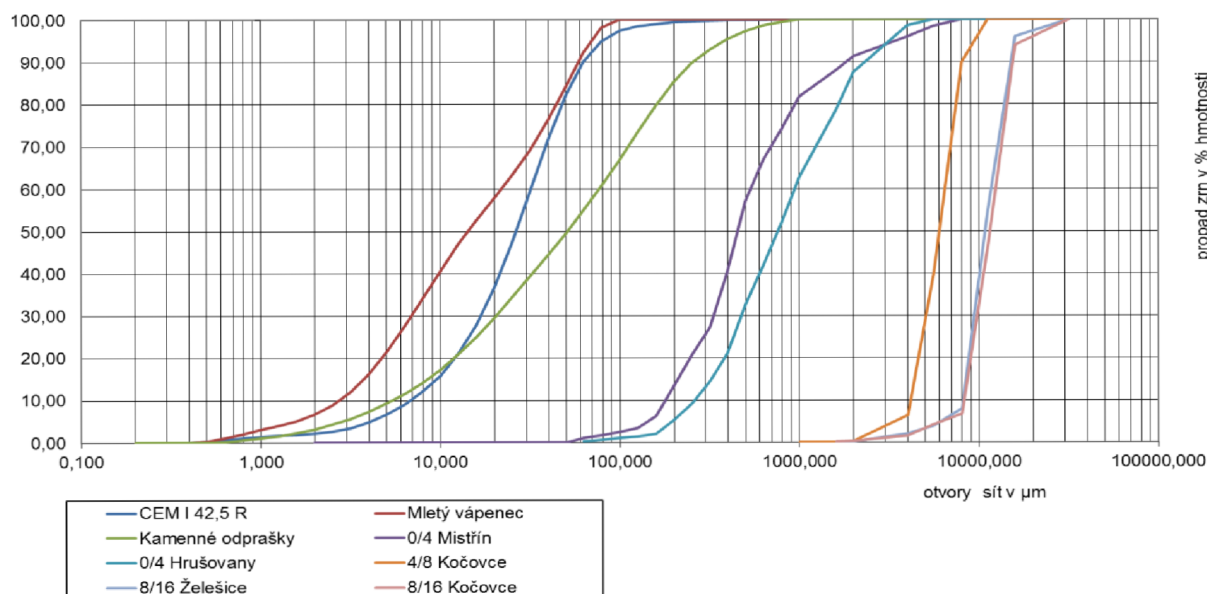
6.8.2 Původní receptura

CEM I 42,5 R	440 kg/m ³
Mikromletý vápenec	60 kg/m ³
Kamenné odprašky	40 kg/m ³
0/4 Hrušovany	380 kg/m ³
0/4 Mistřín	380 kg/m ³
4/8 Kočovce	310 kg/m ³
8/16 Kočovce	270 kg/m ³
8/16 Želešice	215 kg/m ³
Voda	195 kg/m ³
MC Power Flow 2695	5,4 kg/m ³
Centrament AIR 202	1,4 kg/m ³

W/C = 0,44 W/B = 0,36 OH = 2300 kg/m³

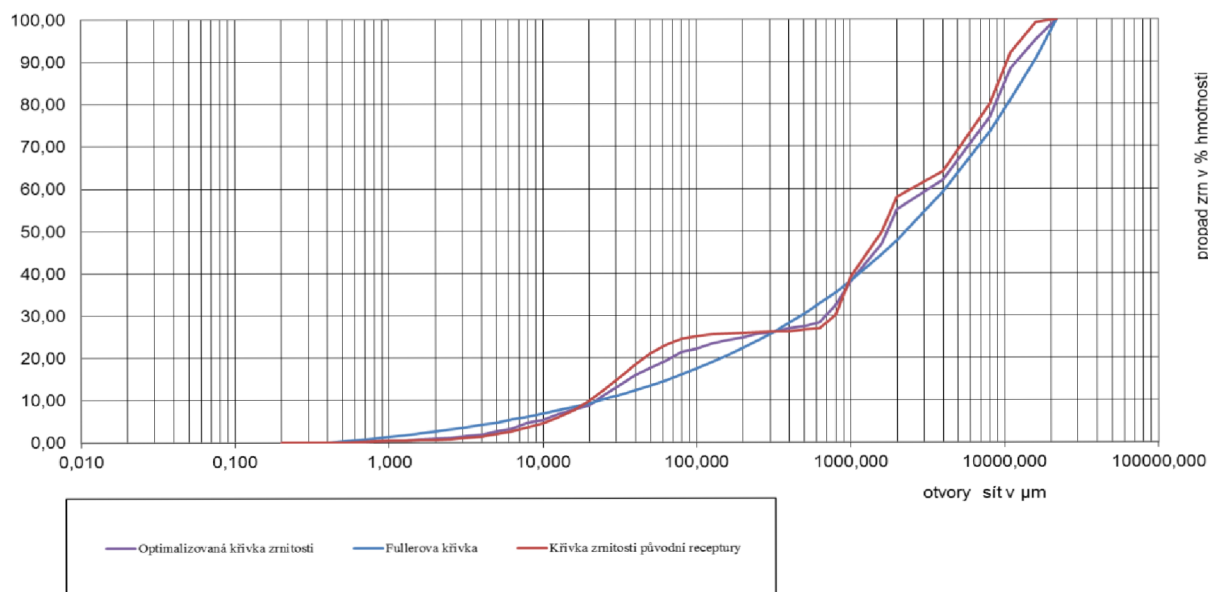
6.8.3 Postup optimalizace:

Nejprve byla stanovena zrnitost všech použitých materiálů, které jsou používány pro výrobu betonu.



Graf 48 – Křivka zrnitostí jednotlivých materiálů

Díky známosti křivek zrnitosti bylo možné sestavit dané materiály tak, aby se výsledná křivka zrnitosti co nejvíce blížila optimální křivce zrnitosti.



Graf 49 – Křivky zrnitosti optimalizované a neoptimalizované receptury

6.8.4 Optimalizovaná receptura

CEM I 42,5 R	430 kg/m ³
Mikromletý vápenec	65 kg/m ³
Kamenné odprašky	35 kg/m ³
0/4 Hrušovany	390 kg/m ³
0/4 Mistřín	450 kg/m ³
4/8 Kočovce	265 kg/m ³
8/16 Kočovce	215 kg/m ³
8/16 Želešice	255 kg/m ³
Voda	185 kg/m ³
MC Power Flow 2695	5,38 kg/m ³
Centrament AIR 202	1,4 kg/m ³

W/C = 0,43 W/B = 0,35 OH = 2300 kg/m³

1/0,27

Z grafu zrnitostí optimalizované a neoptimalizované receptury je patrné, že optimalizovaná receptura se více přibližuje zvolené ideální křivce zrnitosti. U obou receptur je patrný nedostatek částic o velikosti do 20 μm a poté v rozmezí 300 až 900 μm .

6.8.5 Fyzikálně mechanické vlastnosti betonů

V následující tabulce jsou porovnány obsah vzduchu v čerstvém betonu, objemová hmotnost, pevnosti zkoušených betonů v tlaku po 7 a 28 dnech a odolnost betonu proti působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek dle ČSN 73 1326. Všechny zkoušky proběhly v podnikové zkušebně Prefa Brno, a.s.

Označení receptury	Objemová hmotnost čb [kg/m ³]	Obsah vzduchu [%]	Objemová hmotnost 7d [kg/m ³]	Pevnost v tlaku 7d [MPa]	Objemová hmotnost 28d [kg/m ³]	Pevnost v tlaku 28d [MPa]	Odpad po 100 cyklech [g/m ²]
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. 26 - 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

Optimalizovaná receptura je ve všech zkoušených fyzikálně mechanických vlastnostech srovnatelná s původní recepturou. Pokles pevností po 28 dnech je pouze nepatrný. Dle ČSN EN 206 oba betony splňují pevnostní třídu C 40/50. Výsledná hodnota odpadu betonu při zkoušce působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek je u optimalizované receptury mírně nižší než u receptury původní. Z hlediska ČSN EN 206 oba betony vyhovují vystavení účinkům prostředí XF4.

6.8.6 Vizuální porovnání povrchů zkoušených receptur



Obr. 46 – Betonový prvek odlitý ze standardní (neoptimalizované) receptury



Obr. 47 – Betonový prvek odlitý z receptury s optimalizovanou křivkou zrnitosti

Při porovnání je patrné, že oba prvky jsou zhotoveny z betonu, který by se dal nazvat pohledovým. Prvek ze standardního betonu má na povrchu několik kaveren a to zejména ve spodní části. Naproti tomu prvek z optimalizované receptury nemá

na povrchu téměř žádnou viditelnou nedokonalost. Nutno však dodat, že na výsledný povrch betonu má vliv více faktorů, jako jsou například stáří a kvalita povrchu bednění nebo kvalita a dobré rozprostření odformovacího přípravku.

6.8.7 Zhodnocení ekonomické výhodnosti optimalizované receptury

Jelikož při míchání optimalizované receptury nebyl použit žádný materiál, který by nebyl běžně používán na provozovně Prefa Brno, a.s. závod Strážnice, je výsledná cenová hladina optimalizovaného betonu zcela srovnatelná s cenovou hladinou původní receptury. Detailní rozbor porovnání materiálových nákladů je znázorněn v tabulce č. 27.

	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
Celkové náklady	1157,50 Kč	1143,90 Kč

Tab. 27 – Porovnání materiálových nákladů původní a optimalizované receptury

Ze srovnání vyplývá, že optimalizací bylo ušetřeno 13,60 Kč/m³ 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.

6.8.8 Zhodnocení ekologické výhodnosti optimalizované receptury

Jak již bylo zmíněno v úvodu této práce, objevují se stále častěji požadavky, aby výsledná stavba co možná nejméně zatěžovala životní prostředí. Optimalizací receptury betonu lze účinně snížit uhlíkovou stopu betonu, aniž by došlo ke snížení jeho užitných vlastností. Pro výpočet uhlíkové stopy byla použita data Centra dopravního výzkumu – Studie o vývoji životního prostředí v české republice za rok 2016 [31].

Jelikož menší dodavatelé kameniva nejsou schopni poskytnout přesná data týkající se uhlíkové stopy, byla pro těžené kamenivo zvolena hodnota 0,002 kg CO₂/kg vytěženého kameniva, kterou lze nalézt v odborné literatuře [32, 33] a na webových stránkách společnosti CEMEX [34]. Pro drcené kamenivo, mletý vápenec a kamenné odprašky byla tato hodnota rovněž stanovena z dostupných hodnot v odborné literatuře [33].

Druh materiálu	Lokalita	Vzdálenost [km]	Emise z dopravy [kg CO ₂]	Emise z dopravy [kg CO ₂ /kg]	Emise z výroby [kg CO ₂ /kg]	Uhlíková stopa materiálu [kg CO ₂ /kg]
CEMI 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 Místřín	Místřín	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. 28 – 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; vyřízení nákladního auta 30.000 kg materiálu.

Druh materiálu	Složení receptury [kg/m ³]	Uhlíková stopa [kg CO ₂ /m ³ betonu]	Složení receptury [kg/m ³]	Uhlíková stopa [kg CO ₂ /m ³ 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
Celkové emise CO₂		340,89		333,36

Tab. 29 – Porovnání uhlíkové stopy původní a optimalizované receptury

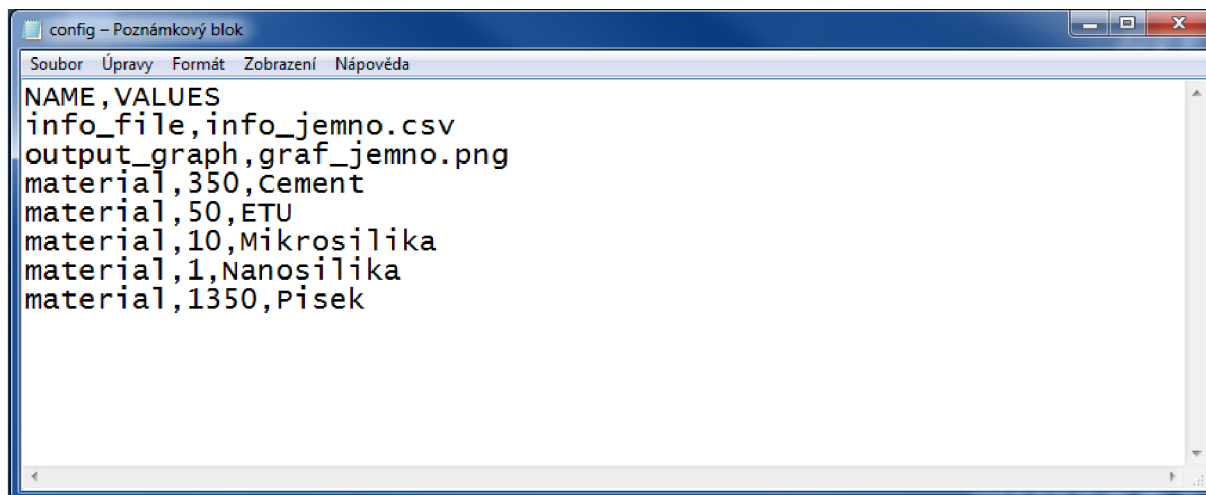
Z výsledků je patrné, že optimalizací receptury došlo k úspoře 7,53 kg CO₂/m³ betonu. Při roční výrobě cca 2.000 m³ této konkrétní receptury tedy dojde k celkové úspoře více než 15.000 kg CO₂, což je stejně jako vyprodukuje osobní automobil za 100.000 km jízdy.

6.9 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.

6.9.1 Vstupní parametry pro výpočet

V souboru Config.csv lze zadávat názvy jednotlivých materiálů, jejich minimální množství k sestavení křivky zrnitosti, název souboru se vstupními daty a název výstupního grafu.



Obr. 48 – Zadání vstupních parametrů

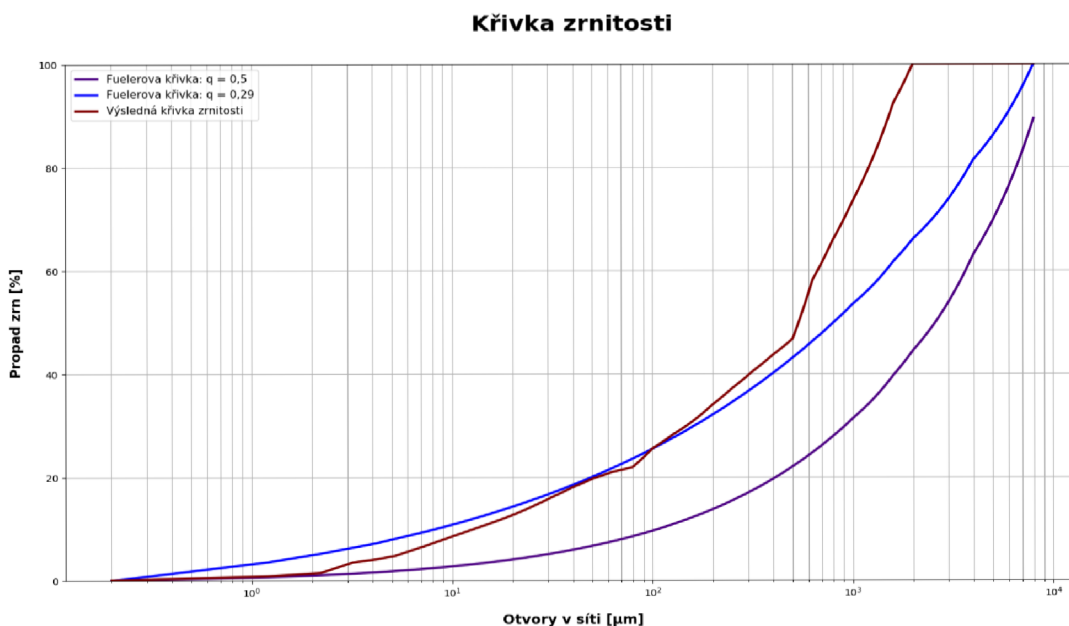
Pro samotný výpočet je nutné zadat křivky zrnitostí jednotlivých materiálů, tedy procentuální propad na jednotlivých sítích v souboru info_jemno.csv. Dalšími parametry v tomto souboru jsou parametry křivek zrnitosti dle Fullera (q), minimální a maximální zrno materiálu (D_{min} ; D_{max}) a celkové množství materiálů.

	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						90.00	
7	1000.0	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00						65.00	
8	794.328	100.00	99.9033107725	100.00	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. 49 – Zadání výpočtových charakteristik

6.9.2 Výsledky sestavení křivky zrnitosti výpočetním programem

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 50 – Výsledný graf zrnitosti sestavený výpočetním 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. 50 – 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.

7. 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 užitných 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.

8. 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, nanojíly, 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 μm , 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 μm . Pro optimalizaci křivky zrnitosti v celém rozsahu byly do systému přidány mikrosilika a nanosilika. Tyto příměsi umožnily optimalizaci křivky zrnitosti v rozsahu 0 – 500 μm .

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 blízcím 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.

9. Seznam použitých zdrojů

9.1 Seznam použité literatury

- [1] ACI Committee 234, Guide for the Use of Silica Fume in Concrete 1st 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] Tafraoui A. et al., Metakaolin in the formulation of UHPC, Constr Build Mater 2008, 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
- [6] 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
- [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
- [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
- [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

- [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
- [16] Byung-Wan Jo, Chang-Hyun Kim, Ghi-ho , Jong-Bin Park Characteristic of cement mortar with nano-SiO₂ particles, 2005, 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
- [18] Ye Qing, Zhan Zenan, Kong Deyu, Chen Rongshen, Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste, 2005, www.sciencedirect.com
- [19] 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
- [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
- [22] A. Hamaky, F. U. A. Shaikh, I. M. Low; Characteristics of nanoclay and calcined nanoclay-cement nanocomposites; 2015; 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
- [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
- [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
- [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

- [27] ČSN EN 1097 – 4; Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 4: Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru; 2008
- [28] 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 popílky 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 emissios in the construction industry: An analysis and evaluation of a concrete suply chain; 2017; www.sciencedirect.com
- [33] S. C. Bostanci, M. Limbachiya, H. Kew; Use of recycled aggregates for low carbon and cost effective concrete conctruction; 2018; www.sciencedirect.com
- [34] www.cemex.cz

9.2 Seznam obrázků

- Obr. 1 – Vliv kyseliny octové na beton s různým obsahem mikrosiliky
- Obr. 2– Vliv kyseliny mravenčí na beton s různým obsahem mikrosiliky
- Obr. 3 – Vliv kyseliny sírové na beton s různým obsahem mikrosiliky
- Obr. 4 - Srovnání velikosti částic portlandského cementu a metakaolinu
- Obr. 5 - Velikost částic popílků neupraveného a popílků pomletého za mokra
- Obr. 6 – Popílek z elektrárny Tušimice
- Obr. 7 - Vysokopeční granulovaná struska – velikost a tvar částic
- Obr. 8 - Mletý vápenec – velikost a tvar částic
- Obr. 9 – Tvar a velikost zrn kamenných odprašků - žula
- Obr. 10 - Tvar a velikost zrn kamenných odprašků
- Obr. 11 - Srovnání velikosti částic Křemičitého úletu a nano-SiO₂
- Obr. 12 – Jílové minerály kaolinit a montmorillonit
- Obr. 13 – Výroba nanovápence – (a) schéma výrobního zařízení; (b) graf skupenství CO₂ v závislosti na teplotě a tlaku
- Obr. 14 – Tvar a velikost částic nanovápence při rychlosti srážení 4,3 mol/hod
- Obr. 15 - Tvar a velikost částic nanovápence při rychlosti srážení 15,9 mol/hod
- Obr. 16 - Zhuštění struktury částicemi různé velikosti
- Obr. 17 – Rigdenerův přístroj dle ČSN EN 1097 – 4;
- Obr. 18 - Tvar částic cementu – elektronová mikroskopie
- Obr. 19 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor cementu
- Obr. 20 - Tvar částic popílků – elektronová mikroskopie
- Obr. 21 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – blok D E01
- Obr. 22 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – blok D E02
- Obr. 23 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – blok D E03
- Obr. 24 - Tvar částic vápence – elektronová mikroskopie
- Obr. 25 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – druh 7/V
- Obr. 26 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – druh 8/V
- Obr. 27 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – druh 9/V
- Obr. 28 – Tvar částic odprašků Želešice – elektronová mikroskopie
- Obr. 29 – Tvar částic odprašků Předklášteří – elektronová mikroskopie
- Obr. 30 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – odprašky Želešice

Obr. 31 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – odprašky
Předklášteří

Obr. 32 – Mikrosilika – pohled na nejmenší zrna

Obr. 33 – Mikrosilika – pohled na větší částice

Obr. 34 – Mikrosilika – detail povrchu větší částice mikrosiliky

Obr. 35 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – mikrosilika

Obr. 36 – Nanosilika – pohled na aglomerované částice.

Obr. 37 – Nanosilika – detailní pohled na aglomerované částice.

Obr. 38 – Nanosilika – detailní pohled na částice nanosiliky

Obr. 39 - Distribuce částic, stanovení křivky zrnitosti a síťový rozbor – nanosilika

Obr. 40 – Magnetické míchání nanosiliky

Obr. 41 – Ultrazvuková dispergace nanosiliky

Obr. 42 – Ultrazvukové míchání nanosiliky - hodnoty

Obr. 43 – Mikrostruktura referenční záměsi po 90 dnech

Obr. 44 – Mikrostruktura záměsi s mletým vápencem po 90 dnech

Obr. 45 – Mikrostruktura záměsi s popílkem po 90 dnech

Obr. 46 – Betonový prvek odlitý ze standardní (neoptimalizované) receptury

Obr. 47 – Betonový prvek odlitý z receptury s optimalizovanou křivkou zrnitosti

Obr. 48 – Zadání vstupních parametrů

Obr. 49 – Zadání výpočtových charakteristik

Obr. 50 – Výpočet složení optimální záměsi

9.3 Seznam grafů

Graf 1 - Vliv metakaolinu na rozložení pórů v betonu

Graf 2 - Vliv vodního součinitele na pevnost betonu s metakaolinem

Graf 3 – Poměrné zastoupení pórů v kompozitech s různými nanopříměsmi v stáří 1, 28 a 90 dnů

Graf 4 - Porovnání křivek zrnitosti – Fullerova parabola a ideální Fullerova křivka pro kamenivo a jemnozrnný materiál []

Graf 5 - Fullerova parabola a ideální Fullerova křivka v semilogaritmickém měřítku

Graf 6 – Křivky zrnitostí použitých materiálů

Graf 7 – Křivka zrnitosti cementu s normovým pískem

Graf 8 – Křivka zrnitosti cementu a 10% mletého vápence MV7, normový písek

Graf 9 – Křivka zrnitosti cementu a 10% mletého vápence MV9, normový písek

Graf 10 – Křivka zrnitosti cementu a 10% kamenných odprašků Želešice, normový písek

Graf 11 – Křivka zrnitosti cementu a 10% kamenných odprašků Předklášteří, normový písek.

Graf 12 – Křivka zrnitosti cementu a 10% popílku Tušimice, normový písek

Graf 13 – Křivka zrnitosti cementu a 25% mletého vápence MV7, normový písek

Graf 14 – Křivka zrnitosti cementu a 25% mletého vápence MV9, normový písek

Graf 15 – Křivka zrnitosti cementu a 25% kamenných odprašků Želešice, normový písek

Graf 16 - Křivka zrnitosti cementu a 25% kamenných odprašků Předklášteří, normový písek

Graf 17 – Křivka zrnitosti cementu a 25% popílku, normový písek

Graf 18 – Křivka zrnitosti cementu s 20% mletého vápence MV7, 4% mikrosiliky a 1% nanosiliky, normový písek

Graf 19 – Křivka zrnitosti cementu s 20% kamenných odprašků Želešice, 4% mikrosiliky a 1% nanosiliky, normový písek

Graf 20 – Křivka zrnitosti cementu s 20% popílku Tušimice, 4% mikrosiliky a 1% nanosiliky, normový písek

Graf 21 – Konzistence čerstvé malty dle ČSN EN 1015-3

Graf 22 – Objemová hmotnost cementových malt v čase

Graf 23 – Pevnost v tahu za ohybu cementových trámečků v čase

Graf 24 – Pevnost v tlaku cementových trámečků v čase

Graf 25 – Konzistence čerstvé malty s plastifikátorem SX 14 dle ČSN EN 1015-3

Graf 26 – Objemová hmotnost cementových malt s plastifikátorem SX 14 v čase

Graf 27 – Pevnost v tahu za ohybu cementových trámečků s plastifikátorem SX 14 v čase

Graf 28 – Pevnost v tlaku cementových trámečků s plastifikátorem SX 14 v čase

Graf 29 – Konzistence čerstvé malty s plastifikátorem RC 730 dle ČSN EN 1015-3

Graf 30 – Objemová hmotnost cementových malt s plastifikátorem RC 730 v čase

Graf 31 – Pevnost v tahu za ohybu cementových trámečků s plastifikátorem RC 730 v čase

Graf 32 – Pevnost v tlaku cementových trámečků s plastifikátorem RC 730 v čase

Graf 33 – Rozložení velikosti pórů referenční receptury s plastifikátorem SX 14

Graf 34 – Rozložení velikosti pórů referenční receptury s plastifikátorem RC 730

Graf 35 – Rozložení velikosti pórů receptury s vápencem a plastifikátorem SX 14

Graf 36 – Rozložení velikosti pórů receptury s vápencem a plastifikátorem RC 730

Graf 37 – Rozložení velikosti pórů receptury s popílkem a plastifikátorem SX 14

Graf 38 – Rozložení velikosti pórů receptury s popílkem a plastifikátorem RC 730

Graf 39 – Rozložení velikosti pórů receptury s kamennými odprašky Želešice a plastifikátorem SX 14

Graf 40 – Rozložení velikosti pórů receptury s kamennými odprašky Želešice a plastifikátorem RC 730

Graf 41 – Křivka zrnitosti referenční receptury

Graf 42 – Křivka zrnitosti optimalizované receptury č. 1 – 23% mletý vápenec 7N, 6% mikrosilika, 1% nanosilika

Graf 43 – Křivka zrnitosti optimalizované receptury č. 2 – 23% popílek Tušimice, 6% mikrosilika, 1% nanosilika

Graf 44 – Křivka zrnitosti optimalizované receptury č. 3 – 23% odprašky Želešice, 6% mikrosilika, 1% nanosilika

Graf 45 – Porovnání vývinu pevností v tlaku jednotlivých receptur v čase

Graf 46 – Porovnání objemových hmotností jednotlivých receptur v čase

Graf 47 – Složení optimální křivky zrnitosti

Graf 48 – Křivka zrnitostí jednotlivých materiálů

Graf 49 – Křivky zrnitostí optimalizované a neoptimalizované receptury

Graf 50 – Výsledný graf zrnitosti sestavený výpočetním programem

9.4 Seznam tabulek

- Tab. 1 – Chemické složení mikrosiliky v závislosti na druhu vyráběného primárního produktu
- Tab. 2 - Chemické složení popílků z různých států vyjádřeno v %
- Tab. 3 - Chemické složení vysokopecní granulované strusky z různých států
- Tab. 4 - Dělení suroviny dle obsahu vápence a dolomitu dle ČSN 72 1210
- Tab. 5 - Porovnání vlastností nano SiO₂ dle způsobu výroby
- Tab. 6 - Chemické složení nanojílů z různých zdrojů v %
- Tab. 7 - Fyzikální a chemické vlastnosti jemnozrnných materiálů
- Tab. 8 - Složení záměsí betonu
- Tab. 9 - Složení záměsí betonu
- Tab. 10 - Chemické složení cementu v %
- Tab. 11 - Mechanické a fyzikální vlastnosti cementu
- Tab. 12 - Chemické složení popílku v %
- Tab. 13 - Fyzikální vlastnosti popílku z elektrárny Tušimice
- Tab. 14 - Chemické složení mikromletého vápence v %
- Tab. 15 - Fyzikální vlastnosti vápenců
- Tab. 16 - Chemické složení kamenných odprašků v %
- Tab. 17 - Fyzikální vlastnosti kamenných odprašků
- Tab. 18 – Mezerovitost suchého zhutněného fileru
- Tab. 19 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti navržených malt bez plastifikátoru
- Tab. 20 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti navržených malt s plastifikátorem Dynamon SX 14
- Tab. 21 – Fyzikálně-mechanické vlastnosti navržených malt s plastifikátorem Dynamon RC 730
- Tab. 22 – Vlastnosti čerstvého betonu
- Tab. 23 – Vývin objemové hmotnosti a pevnosti betonu v tlaku
- Tab. 24 – Vlastnosti čerstvého betonu
- Tab. 25 – Vývin objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku betonu s optimální křivkou zrnitosti
- Tab. 26 - Porovnání výsledků zkoušek optimalizované a neoptimalizované receptury
- Tab. 27 - Porovnání materiálových nákladů původní a optimalizované receptury
- Tab. 28 - Celková uhlíková stopa materiálu dopraveného do výrobního závodu Strážnice

Tab. 29 - Porovnání uhlíkové stopy původní a optimalizované receptury