

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

VLIV JEMNOZRNNÝCH PŘÍMĚSÍ NA CHARAKTER PÓROVÉHO SYSTÉMU BETONU

THE INFLUENCE OF FINES ON PORE SYSTEM OF CONCRETE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. VERONIKA ELFMARKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2013



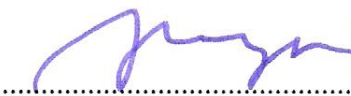
VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Veronika Elfmarková
Název	Vliv jemnozrnných příměsí na charakter pórového systému betonu
Vedoucí diplomové práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	11. 1. 2013

V Brně dne 31. 3. 2012

 prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc. Vedoucí ústavu	  prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc. Děkan Fakulty stavební VUT
--	---

Podklady a literatura

- Mezinárodní odborné časopisy za posledních 5 let
- Sborníky z mezinárodních sympózií z této oblasti
- Internetové zdroje odborných publikací ze světového fóra

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Moderní trendy v navrhování kvalitních, hlavně vysokohodnotných a ultravysoce pevnostních betonů směřují k optimalizaci křivek zrnitosti plniva v oblasti pod 0,25 mm, případně jejich účelná modifikace mikro či nano částicemi ve formě částečně aktivních příměsí, či mikropříměsí. Nejvhodnější možností je aplikace ultrajemných příměsí např. domílanými el. popílky, mikromletými vápenci, křemičitými písky, nanomikrosilikou atd.

Cílem práce bude v teoretické části sběr zásadních informací ze světa z této oblasti výzkumu z renomovaných výzkumných pracovišť. Na základě těchto poznatků vytipovat vhodné typy jemnozrnných příměsí v ČR. U těchto stanovit jejich granulometrie, tvar zrn, měrný povrch atd. Modifikovat křivky zrnitosti v oblasti do 0,25 mm s cílem minimalizovat mezerovitost směsí včetně užitných cementů. Zpracovat metodikou laboratorního stanovení mezerovitosti jemnozrnných směsí pod 0,25 mm. Pro exaktní posouzení různých směsí využít možností optických, environmentálních mikroskopů či rtuťové porozimetrie. Zhodnotit dopady na vodonáročnost a výslednou reologii i případné chování v čase. Na vybraných optimalizovaných křivkách zrnitosti otestovat dopady na fyzikálně-mechanické vlastnosti zatvrdlých kompozitů a jejich nasákavost.

Rozsah práce min. 80 stran.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT V ČESKÉM A ANGLICKÉM JAZYCE

Literatura neposkytuje uspokojivou odpověď na to, jaká je velikost částic hrubé fáze nebo velikost částic v maltové části a to především pro dosažení optimální mezerovitosti betonu. Za účelem překonání nedostatků návrhových metod vznikla myšlenka návrhu nového postupu pro návrh betonové směsi. Tato myšlenka je založena na komplexní analýze jemnozrnných příměsí (stanovení granulometrických vlastností, tvaru jednotlivých částic, pórovitosti, stanovení mezerovitosti) a následné posouzení vlivu na charakter pórového systému betonu a jeho fyzikálně – mechanické vlastnosti. V této práci jsou představeny a analyzovány příměsi elektrárenský popílek a mletý vápenec.

Literature does not provide a satisfactory answer to maximum and minimum particle size or the particle size of the mortar phase especially for optimal porosity of concrete. To overcome the shortcomings of the design methods were thought to design a new method for design of concrete mix. This idea is based on a complex analysis of powder materials (determination of granular properties, shape factor of fillers, porosity, packing of powder materials, surface area, etc.) and subsequently to assess the influence to pore system of concrete and physical and mechanical properties in hardened state of concrete. In this work are presented and analyzed two types of fillers – fly ash and limestone dust.

KLÍČOVÁ SLOVA V ČESKÉM A ANGLICKÉM JAZYCE

Spojité křivky zrnitosti, optimalizace, jemnozrnné příměsi, granulometrie, křivky zrnitosti, tvar zrn, měrný povrch, optimální mezerovitost, zpracovatelnost, nasákavost, pórovitost, mikroskopie, fyzikálně – mechanické vlastnosti.

Target grading, optimalization, fines, granular properties, particle size distribution, shape factor, specific surface area, optimal packing, water demand, absorption, porosity, microscopy, physical and mechanical properties.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

ELFMARKOVÁ, Veronika. *Vliv jemnozrných 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..

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje. Veškerou použitou literaturu a podkladové materiály uvádím v příloženém seznamu literatury.

V Brně, dne 7. ledna 2013

.....
Bc. Veronika Elfmarková

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych ráda poděkovala panu prof. Ing. Rudolfu HELOVI, CSc. za vedení diplomové práce a za jeho odbornou pomoc, cenné rady a připomínky. Rovněž bych chtěla poděkovat všem ostatním za jejich trpělivost a inspiraci.

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	KOMPLEXNÍ ANALÝZA JEMNOZRNÝCH PŘÍMĚSÍ	11
2.1	ZKOUŠENÉ PŘÍMĚSI	11
2.1.1	<i>Nereaktivní příměsi</i>	<i>11</i>
2.1.2	<i>Reaktivní příměsi</i>	<i>12</i>
2.1.3	<i>Cementy</i>	<i>13</i>
2.2	GRANULOMETRICKÉ VLASTNOSTI.....	14
2.2.1	<i>Křivka zrnitosti – PSD.....</i>	<i>14</i>
2.2.2	<i>Měrný povrch</i>	<i>17</i>
2.2.3	<i>Tvarový index.....</i>	<i>19</i>
2.2.4	<i>Vyhodnocení výsledků a závěr.....</i>	<i>22</i>
2.3	FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI	24
2.3.1	<i>Objemová hmotnost.....</i>	<i>24</i>
2.3.2	<i>Stanovení mezerovitosti zhuštěného fileru.....</i>	<i>24</i>
2.4	SHRNUTÍ POZNATKŮ	27
2.5	METODIKA DALŠÍCH VÝZKUMNÝCH PRACÍ.....	28
3	MALTOVÉ SMĚSI	30
3.1	POUŽITÉ MATERIÁLY A GRANULOMETRICKÉ VLASTNOSTI	30
3.2	NAVRŽENÉ A OPTIMALIZOVANÉ MALTOVÉ SMĚSI.....	31
3.2.1	<i>Spojitá křivka zrnitosti a návrh směsi.....</i>	<i>32</i>
4	ZKOUŠENÍ ČERTSVÝCH SMĚSÍ.....	36
4.1	ZKOUŠKA ROZLITÍ MALTOVÉ SMĚSI.....	36
4.2	V – TRYCHTÝŘ	40
4.3	REOLOGICKÉ CHOVÁNÍ PASTY – VISKOZITA SMĚSI.....	42
4.3.1	<i>Vliv rozdílných příměsí v míchané směsi.....</i>	<i>49</i>
4.3.2	<i>Vliv tvarového indexu</i>	<i>50</i>
4.3.3	<i>Vliv rozdílného množství přidávané příměsi</i>	<i>51</i>
4.4	SHRNUTÍ POZNATKŮ	54
5	HYDRATACE A MIKROSTRUKTURA	56
5.1	VÝVOJ MIKROSTRUKTURY MALTOVÝCH SMĚSÍ.....	57
5.1.1	<i>Mikrostruktura a struktura pórů ve ztvrdlé maltové směsi</i>	<i>59</i>

5.1.2	<i>Výpočet porozity – Powersův model.....</i>	61
5.1.3	<i>Distribuce fází v hydratující cementové pastě</i>	63
5.1.4	<i>Kapilární a gelové póry ve hydratované cementové pastě.....</i>	64
5.2	ELEKTRONOVÁ MIKROSKOPIE MÍCHANÝCH SMĚSÍ	66
5.3	RTUŤOVÁ POROZIMETRIE	76
5.4	NASÁKAVOST	83
5.5	SHRnutí VÝSLEDKŮ.....	84
6	MECHANICKÉ VLASTNOSTI ZTVRDLÝCH SMĚSÍ.....	89
6.1	PEVNOST V TAHU ZA OHYBU A PEVNOST V TLAKU	90
6.2	POMĚR NÁRŮSTU PEVNOSTÍ.....	92
6.2.1	<i>Substituce vodního součinitele součinitelem vody ku všem jemným podílům</i>	93
7	ZÁVĚR	99
7.1	PŘEHLED ZÍSKANÝCH VÝSLEDKŮ	99
7.1.1	<i>Přehled optimalizovaných směsí.....</i>	99
7.1.2	<i>Kompletní shrnutí optimalizovaných směsí.....</i>	120
7.2	SHRnutí POZNATKŮ	123
8	PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY	125
9	SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	129
10	SEZNAM PŘÍLOH.....	133
A.	PŘÍLOHA.....	134

1 ÚVOD

Tato práce prezentuje vzájemně několik propojených témat s cílem vylepšení a dosažení požadované mezerovitosti maltových a betonových směsí za pomoci optimalizace křivek zrnitosti především v oblasti pod 0,25 mm. Cílem práce je navržení optimalizovaných směsí založených na komplexní analýze jednotlivých složek maltových směsí, ověření chování čerstvých směsí a stanovení fyzikálně - mechanických vlastností ztvrdlých kompozitů. Z důvodu logické přehlednosti a neobvyklých metod zkoušení představených v této práci nebyl zvolen tradiční způsob dělení práce na část teoretickou a experimentální. Práce je logicky dělena podle na sebe navazujících kapitol, kde je uveden teoretický základ, zkušební metoda a výsledky se shrnutím.

V úvodní kapitole je pozornost věnována komplexní analýze jemnozrnných příměsí (v tomto případě různých frakcí mletého vápence a několika druhů elektrárenských popílků), včetně cementů a ostatních složek maltových směsí. Pozornost je věnována granulometrickému rozboru jednotlivých materiálů, stanovení měrných povrchů, určení tvaru zrn pomocí různých výpočtových metod a mikroskopických měření. Na základě těchto vlastností jsou stanoveny fyzikální vlastnosti jemných podílů v suchém stavu, tj. objemová hmotnost, sypaná hmotnost, mezerovitost zhuštěného fileru, apod..

Kapitola 2 se zabývá optimálním návrhem maltových směsí na základě představené komplexní analýzy. Získáváme teoretický předpoklad chování jednotlivých směsí v závislosti na získaných poznatcích.

Ve třetí kapitole je aplikován model z předchozí kapitoly. Pozornost je věnována chování míchaných směsí v čerstvém stavu. Je zde hodnocen především vliv tvaru zrn na tekutost a viskozitu směsi, vliv rozdílných příměsí a jejich množství v jednotlivých záměsích.

V kapitole 4 se setkáváme s teoretickými předpoklady hydratace a vytváření mikrostruktury míchaných malt a následně jsou tyto předpoklady porovnávány s výsledky dosaženými při jednotlivých měřeních. Malty jsou hodnoceny z hlediska porozity, velikosti a distribuce pórů ve zkoušených kompozitech. Měření probíhala pomocí rtuťové porozimetrie, byla stanovována nasákavost jednotlivých směsí a v neposlední řadě byla mikrostruktura porovnávána a pozorována elektronovým mikroskopem.

V páté kapitole byly ověřeny fyzikálně - mechanické vlastnosti ztvrdlých směsí v závislosti na stanovených vlastnostech a dosažených výsledcích z předchozích kapitol.

Závěrem jsou zhodnoceny teoretické znalosti a praktické zkušenosti při optimalizovaném návrhu maltových směsí a dopad tvaru zrn na chování čerstvých a ztvrdlých maltových směsí. Budou zde prezentovány další návrhy a myšlenky výzkumu této problematiky.

2 KOMPLEXNÍ ANALÝZA JEMNOZRNÝCH PŘÍMĚSÍ

Komplexní analýza jemnozrných podílů je v dnešní době považována za důležitou součást betonářských technologií a výzkumných projektů. Znalost vlastností a možností jejich využití jsou důležitými atributy pro vývoj nových produktů a také cestou, jak správně a vhodně tyto materiály použít. Toto platí i pro výrobu betonu. Výsledné vlastnosti betonu, jako jsou například pevnosti v tlaku, v tahu za ohybu nebo trvanlivost betonových výrobků, jsou dány vlastnostmi matrice, použitým kamenivem a vazbami mezi matricí a kamenivem. Zmiňovaná matrice je zde chápána jako složení cementu, záměsové vody, vzduchových pórů, množství jemných podílů z použitého kameniva, přísady a v neposlední řadě jemnozrné příměsi. Jinými slovy matrice betonu je tvořena cementem, vodou a jemnými příměsemi. V literatuře se můžeme setkat s definicí takto jemných podílů jako složek betonu s velikostí zrna menší než 125 μm . Vlastnosti matrice a vazby mezi matricí a kamenivem jsou závislé na řadě faktorů, z kterých vodní součinitel (součinitel vody ku všem jemným podílům), reaktivita, tvarový index a křivka zrnitosti jsou jedny z nejdůležitějších.

V této práci jsou představeny jemné příměsi – *mletý vápenec* (Carmeuse, Mokrý) a *elektrárenské popílky* (ČEZ – elektrárny Počerady EPC, Mělník EME, Ledvice ELE, Tušimice ETU, Dětmárovice EDE) a jsou charakterizovány s ohledy na jejich objemovou hmotnost, měrný povrch, mezerovitost a distribuci částic (stanovení křivek zrnitosti). Zmíněné materiály představují materiály používané v technologii betonu, včetně různých druhů cementů.

2.1 Zkoušené příměsi

S ohledem na vysoký měrný povrch, který poskytují jemné podíly, je jejich komplexní analýza zásadní pro pochopení a stanovení fyzikálních vlastností, jako je například zpracovatelnost čerstvé betonové směsi nebo pórovitost již ztuhlého betonu. Kromě toho je vývoj pevností a odolnost betonu ovlivňována množstvím a typem použité jemné příměsi. V této kapitole jsou představeny všechny jemné podíly, používané v této práci a jsou představeny jejich vlastnosti.

2.1.1 Nereaktivní příměsi

Mletý vápenec, jedna ze standardních příměsí do betonu, byl zařazen do této práce v návaznosti na již předchozí zkoušení tohoto materiálu v bakalářské práci. V tomto případě byly použity 4 frakce mletého vápence z vápenky z vápenky Carmeuse Mokrý, a to 4 typy mletých vápenců obchodně značených 7/V, 8/V, 9/V a 12/V. V tabulce 2.1 je zobrazena chemická analýza těchto vzorků. V případě mletých vápenců a jejich aplikace do betonu mohou tyto materiály vykazovat omezenou schopnost hydraulické reaktivity. To však především zlepšuje vazby s okolní mikrostrukturou za vzniku reakčních produktů

vytvářených na jednotlivých zrnech vápenců. Mletý vápenec sám o sobě není schopen vytvářet strukturní produkty, nicméně je tedy pozoruhodné, že se zapojuje do procesu nárůstu pevností. Díky této vlastnosti jsou mleté vápence považovány za nereaktivní příměsi.

	EDE	EPC	EME	ETU	Mleté vápence 7/IV – 12/IV
SiO ₂	52,400	50,900	53,710	50,000	4,938
Al ₂ O ₃	24,200	30,200	30,940	23,400	0,895
CaO	4,000	1,810	2,080	3,420	51,033
Fe ₂ O ₃	6,400	5,310	6,000	14,500	0,410
K ₂ O	2,800	1,590	1,670	1,065	0,111
MgO	2,800	1,080	1,280	1,720	1,550
MnO	0,100	0,041	0,020	0,092	0,045
Na ₂ O	0,300	0,205	0,280	0,291	0,074
P ₂ O ₅	0,400	0,134	0,240	0,164	0,027
SO ₃	0,000	0,080	0,270	0,723	0,077
TiO ₂	1,000	1,750	1,950	1,526	0,055

Tabulka 2.1 Chemické složení analyzovaných elektrárenských popílků a mletých vápenců (průměrné hodnoty)

2.1.2 Reaktivní příměsi

Z různých minerálně aktivních příměsí do malt a betonů je elektrárenským popílkům přikládán největší význam. Z tohoto důvodu byly zkoušeny a analyzovány popílký z elektráren Ledvice, Tušimice, Počerady, Mělník a Dětmárovice. V tabulce 2.1 jsou uvedena chemická složení těchto materiálů. Veškeré uvedené popílký jsou produkty procesu spalování uhlí - nejjemnější frakce zbytku ze spalování uhlí. Usazují se v různých typech filtrů. Mezi ně patří především komory, cyklony a mechanické či elektrické filtry. Popílek je heterogenní materiál složený z částic rozdílných fyzikálních, mineralogických a chemických vlastnostech. Popílký obsahují vždy mimo nerostné zbytký ještě zbytký původního nebo do různého stupně přeměněného paliva. Vlastnosti popílků tedy záleží zejména na chemickém složení spalovaného uhlí, typu spalování, jejich teplotách a chemických reakcích probíhajících během spalování. Vlastnosti popílků závisí také na konstrukci topeniště a na postupu spalování.

Označení	Závod	Typ popílku
EDE	elektrárna Dětmárovice	klasický, černouhelný
EPC	elektrárna Počerady	klasický, hnědouhelný
EME	elektrárna Mělník	klasický, hnědouhelný
ETU	elektrárna Tušimice	klasický, hnědouhelný
ELE	elektrárna Ledvice	klasický, hnědouhelný

Tabulka 2.2 Značení, původ a typ popílku

2.1.3 Cementy

V této práci byl pro komplexní analýzu použit portlandský cement CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá splňující požadavky normy ČSN EN 196 - 6. Vzhledem ke své vysoké jemnosti a vysokému měrnému povrchu je nutné počítat s ovlivněním tekutosti čerstvé betonové směsi, ale i dosažení optimální mezerovitosti.

Celý proces měření a komplexní analýzy začal v únoru 2010 a pokračuje do této chvíle, je nadále rozvíjen a jsou zkoušeny a analyzovány další materiály.

Pro zjištění granulometrických a fyzikálních vlastností byly použity následující zkoušky:

- Chemická analýza (XRF) – dle ASTM C114 – 07 (Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement), 5 individuálních měření pro každý vzorek ve 4 opakováních
- Stanovení křivky zrnitosti – pomocí laserové difrakční analýzy (přístroj Malvern Mastersizer 2000), 5 individuálních měření pro každý vzorek ve 4 opakováních
- Stanovení měrného povrchu dle Blaina – dle ČSN EN 196 - 6 (Metody zkoušení cementu, část 6: Stanovení jemnosti mletí), 3 individuální měření pro každý vzorek ve 4 opakováních
- Objemová hmotnost – měření pomocí heliového pyknometru, 5 individuálních měření pro každý zkoušený vzorek ve 4 opakováních a dle ČSN EN 1097 - 7 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva, část 7: Stanovení měrné hmotnosti fileru - Pyknometrická zkouška), 5 individuálních měření pro každý zkoušený vzorek ve 4 opakováních
- Sypná hmotnost - dle ČSN EN 1097 - 6 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva, část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti), 3 individuální měření pro každý zkoušený vzorek ve 4 opakováních
- Stanovení mezerovitosti zhutněného fileru - dle ČSN EN 1097 - 4 (Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva, část 4: Stanovení mezerovitosti

suchého zhuťněného fileru), 3 individuální měření pro každý zkoušený vzorek ve 4 opakováních

- Mikroskopická měření pro stanovení tvaru zrn jednotlivých materiálů (optický a konfokální mikroskop), cca 40 – 60 individuálních měření pro každý zkoušený vzorek

2.2 Granulometrické vlastnosti

Granulometrické vlastnosti popisující fyzikální vlastnosti zrna a následný vliv na pórovitost směsi byly stanoveny při komplexní analýze. Pro toto vyhodnocení využíváme stanovení křivek zrnitosti, tvaru částic a distribuci částic v celém granulometrickém systému. Křivky zrnitosti a tvarový index částic mají zásadní vliv na mezerovitost a tím i pro mikroskopické a makroskopické chování betonových směsí. V následující kapitole je popsán zvolený způsob stanovení křivek zrnitosti, tvarového indexu a měrného povrchu.

2.2.1 Křivka zrnitosti – PSD

Křivky zrnitosti jednotlivých materiálů použitých při přípravě malt a betonů mají dominantní vliv na mezerovitost dané matrice a hydratační proces cementu. Pro zjištění křivky zrnitosti můžeme využít několika metod. Kromě síťového rozboru je mnoho existujících metod založeno na sedimentaci částic ve vhodné tekutině nebo difrakci světla.

Jemné podíly jsou problematickými materiály pro analýzu a určení křivek zrnitosti. Síťový rozbor můžeme použít pouze pro hrubší frakce kameniva. V případě jemných částic je převažující metodou používána laserová difrakční analýza (*LALLS = Low Angle Laser Light Scattering*). Tato technika je založena na skutečnosti, že průměr částic je nepřímo úměrný reakčnímu úhlu laserového světla. Jinými slovy, zrna větších průměru lámou laserové světlo pod malými úhly a zrna menších průměru naopak úhly většími. Distribuce částic podle velikosti je velmi široká a to od 100 mikrometrů až po velikosti menší než 1 mikron.

Pro analýzu všech příměsí bylo použito disperzní prostředí destilované vody, pro cementy bylo použito disperzní prostředí propan - 1 - ol. Veškeré prezentované křivky zrnitosti příměsí a cementů byly měřeny v tekutém disperzním prostředí pomocí přístroje Malvern Mastersizer 2000 používající metodu rozptylu dle Mie (*Mie theory*).

Výsledky měření

Stanovení křivek zrnitosti touto metodou jsou seznamy hodnot, které definují relativní množství přítomných částic v disperzním prostředí, seřazených podle velikosti. Během měření křivek zrnitosti byly změřeny 4 vzorky frakcí mletých vápenců a 52 vzorků elektrárenských popílků, v obou případech měření probíhalo v pěti individuálních měřeních ve třech opakováních.

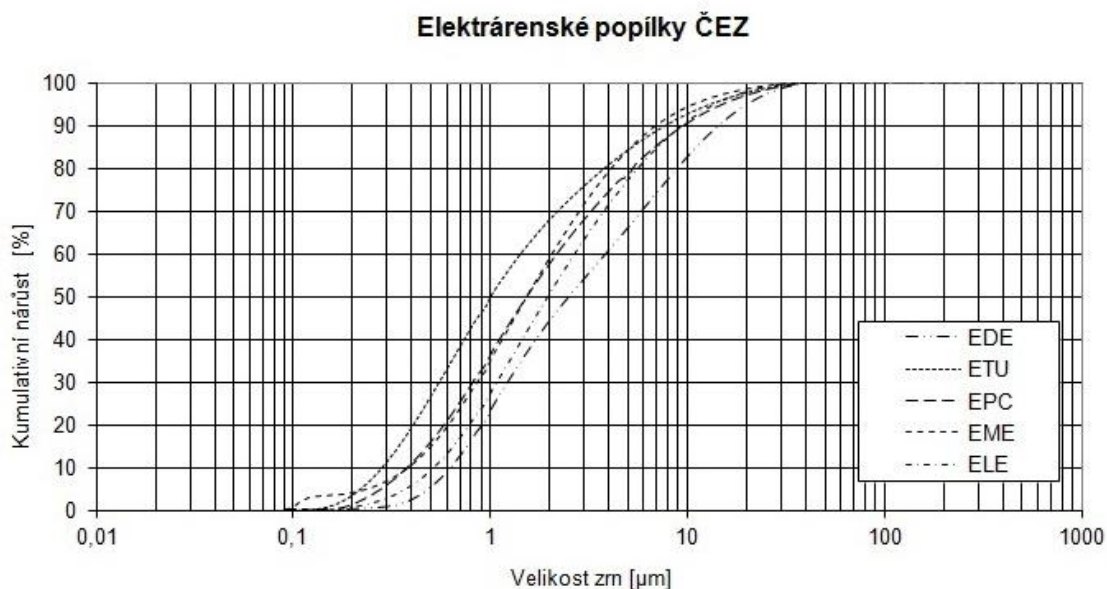
U elektrárenských popílků probíhalo měření pro vzorky odebírané v jednotlivých dnech v průběhu času (v měsíci září 2011) a vytvořen průměr jednotlivých měření. Tato měření byla následně porovnávána s odebranými sesypy jednotlivých druhů popílků. Charakteristické velikosti částic těchto materiálů jsou uvedeny v tabulkách 2.3 a 2.4.

Hodnoty středního zrna [μm]	d [0.1]	d [0.5]	d [0.9]
ETU	1,44	3,97	20,69
EPC	1,81	5,62	24,82
EME	1,86	5,71	18,89
ELE	2,34	6,74	24,44
EDE	2,72	8,21	34,11

Tabulka 2.3 Přehled charakteristických velikostí zrn stanovených z křivek zrnitosti pro el. popílků

Hodnoty středního zrna [μm]	d [0.1]	d [0.5]	d [0.9]
12/V	0,55	2,89	15,01
9/V	1,13	3,99	14,14
8/V	1,37	4,37	15,94
7/V	1,31	4,37	16,43

Tabulka 2.4 Přehled charakteristických velikostí zrn stanovených z křivek zrnitosti pro mleté vápence

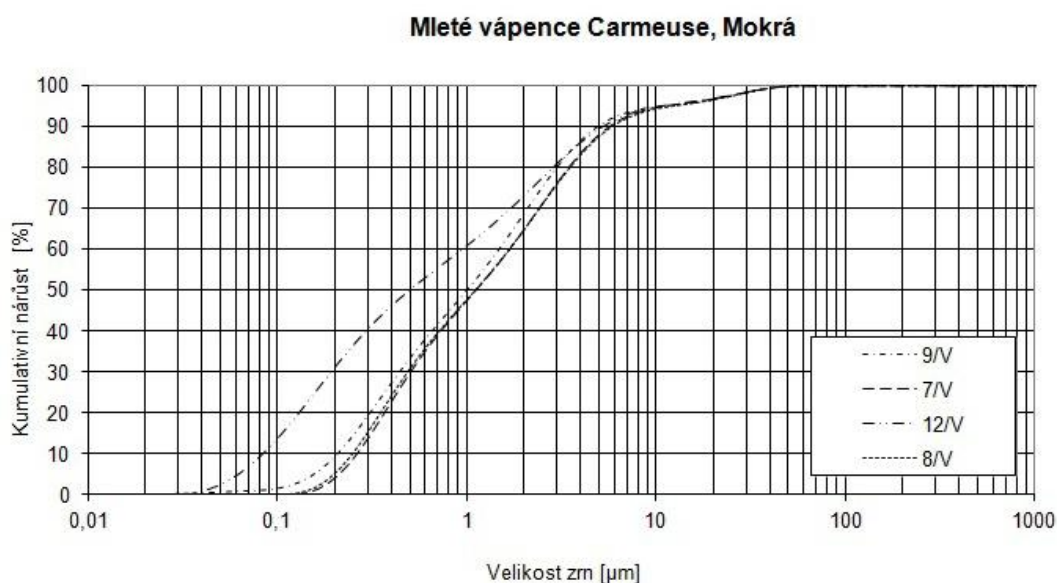


Graf 2.1 Porovnání křivek zrnitosti el. popílků

Vyhodnocení

Grafy a výsledky měření ukazují odlišnou jemnost mletí jednotlivých elektrářenských popílků, tak i mletých vápenců. Pozorovatelné rozdíly jsou především v oblasti hodnot středního zrna. V tabulkách můžeme vidět vzestupné pořadí podle jemnosti mletí obou typů materiálů. Zrnitost elektrářenských popílků je závislá na použitých odlučovačích v jednotlivých elektrárnách. Popílek z mechanických odlučovačů je hrubší zrnitosti. Naproti tomu popílek z elektrostatických odlučovačů je jemnější granulometrie. V případě elektrářenských popílků je nejjemnější popílek z elektrárny Tušimice, u mletých vápenců došlo k potvrzení technických listů pro jednotlivé frakce - obchodním značením 12/V je tato frakce nejjemnější.

Pomocí křivek zrnitosti může být řečeno, že tento materiál vyplní pomyslnou mezeru mezi jednotlivými složkami maltové nebo betonové směsi – to znamená, že se minimalizuje nežádoucí pórovitost, především se minimalizuje obsah kapilárních pórů betonu a může tak být dosaženo požadované mezerovitosti. Použitím tohoto materiálu je možné zlepšit vlastnosti čerstvé směsi (např. zpracovatelnost, schopnost vyplňovat bednění, pohledovost, tekutost, apod.) a ztvrdlé směsi (např. pevnost v tlaku).



Graf 2.2 Porovnání křivek zrnitosti frakcí mletých vápenců

Ze zjištěných křivek zrnitosti je dále možné vypočítat měrný povrch materiálu. Tato nepřímá metoda zjišťování měrného povrchu je založena na předpokladu, že jsou všechna zrna ideálního tvaru, tedy koule. K dosažení spolehlivého výpočtu měrného povrchu určitého materiálu by měl být zvolen také vhodný tvarový index. Tento výpočet je však pouze

přibližný, avšak udává přesnější výsledky v porovnání s běžnými zkouškami jako je měření pomocí Blainova přístroje nebo B.E.T. analýzy.

2.2.2 Měrný povrch

Měrný povrch, neboli zkráceně SSA, je podíl dané plochy částice včetně všech otevřených vnitřních ploch pórů dělené hmotností $[\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$. Pro návrh betonových směsí nás zajímají pouze vnější povrchy částic, které se dostávají do kontaktu s vodou. Pro stanovení měrného povrchu jsou k dispozici různá přímá a nepřímá měření. Pravděpodobně nejvíce známou metodou je měření měrného povrchu pomocí Blainova přístroje. Tato metoda je založena na tlakovém rozdílu suchého a zhuštěného fileru, který je ovlivněn průtokem a kinetickou viskozitou vzduchu, rozměrem zkoušeného vzorku a jeho pórovitostí. Touto metodou avšak získáváme spíše hodnoty relativní, než hodnoty absolutní.

Pro uvedené materiály byla pro stanovení měrného povrchu použita zkouška dle Blainova měření. Toto měření je však bráno jako komparativní a v případě velmi jemných příměsí nebo naopak hrubších příměsí, není Blainovo měření příliš přesné a můžeme získávat velmi vysoké odchylky měření.

Pro měření měrného povrchu dle Blaina byla použita Blainova aparatura a měření probíhalo dle ČSN EN 196 - 6. Vyhodnocení měření je zobrazeno v tabulce 2.5.

Materiál		Blaine a_{Blaine} $[\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}]$	SSA S_{sph}^* $[\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}]$	Tvarový index ξ_{Reschke}	Vypočítaný SSA S $[\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}]$
Cement CEM I 42,5R Mokrá		3100	-	1,68	-
Mletý vápenec Carmeuse	7/V	3590	13,473	1,26	16,976
	8/V	4680			
	9/V	4910			
	12/V	4920			
Elektrárenský popílek ČEZ	EDE	3960	23,797	v rozmezí 1,20 - 1,66	39,503
	ETU	2470	28,177		46,774
	EPC	2970	25,627		42,541
	EME	2420	27,099		44,984
	ELE	2950	26,590		44,139

Tabulka 2.5 Přehled měrných povrchů a vlastností jemnozrnných podílů

Nepřímé stanovení měrného povrchu

Nepřímou možností zjišťování měrného povrchu může být odvození výpočtu z křivky zrnitosti (McCabe and Smith, 1956). V tomto případě se předpokládá, že jsou všechny částice ideálního tvaru, tedy koule. Odvození je následující:

$$V_{koule} = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \text{ a } a_{koule} = \pi \cdot d^2,$$

Rovnice 2.1

kde je pro d zvolený průměr koule. Poměr plochy k/ke objemu můžeme vyjádřit následovně:

$$\frac{a_{koule}}{V_{koule}} = \frac{6}{d}.$$

Rovnice 2.2

Nyní předpokládejme částici se stále stejným průměrem d , poté objem částice bude m / ρ_s , kde m a ρ_s je celková hmotnost vzorku a měrná hmotnost částic. Rovnice pro výpočet objemu koule nám udává objem jedné částice, pro n částic bude rovnice vypadat takto:

$$n = \frac{m_{vzorku}}{\frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot \rho_s}.$$

Rovnice 2.3 Celkové množství částic ve vzorku

Následně můžeme vyjádřit celkový měrný povrch vzorku se stejnou velikostí částic (hmotnostní výpočet):

$$a = n \cdot a_{koule} = \frac{6 \cdot m_{vzorku}}{d \cdot \rho_s}.$$

Rovnice 2.4 Celkový měrný povrch vzorku s jednou velikostí částic

Vzhledem k tomu, že je odvozena rovnice pro výpočet měrného povrchu jedné frakce, může být nyní vypočítán celkový měrný povrch zrnitého materiálu se známou křivkou zrnitosti. Jakmile známe hmotnostní výpočet měrného povrchu a , můžeme vypočítat tento měrný povrch i objemově – vynásobením měrného povrchu a měrnou hmotností ρ_s vzorku [m^2/m^3]. K dosažení spolehlivého výpočtu měrného povrchu určitého materiálu by měl být zvolen také vhodný tvarový index, který není závislý na velikosti zrna, ale je pouze funkcí tvaru. Tento výpočet je však pouze přibližný. Upravený výpočet se zahrnutým tvarovým indexem je poté následující:

$$a = 6 \cdot \xi \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{d_{i,aritm} \cdot \rho_s},$$

Rovnice 2.5 Měrný povrch upravený vhodným tvarovým indexem

kdy ω_i je hmotnostním zlomkem zrna frakce i ; $\overline{d_{i,aritm}}$ je aritmetický průměr daný rovnicí

$$\overline{d_i} = \frac{d_i + d_{i+1}}{2} \text{ (kdy } i = \{1; \dots; n\} \text{) a } \xi \text{ je tvarový index zkoušeného materiálu vypočítaný dle}$$

Reschkeho (2000).

Vyhodnocení

Výsledky z měření pomocí Blainovy aparatury a stanovení měrného povrchu nepřímou metodou potvrdily v případě mletých vápenců stejný trend jemnosti mletí jako v případě stanovených křivek zrnitosti. U elektrárenských popílků se toto přesně nepotvrdilo, což může být způsobeno heterogenitou materiálu a nepříliš vhodné volby stanovení měrného povrchu těchto materiálů. Abychom dostali přesnější představu o jemnosti mletí a granulometrickém složení těchto materiálů, je nutné vyzkoušet více vzorků s pravidelným odběrem a následně průměrně a statisticky tato měření vyhodnotit. V případě takto jemných materiálů je měření pomocí Blaina pouze komparativním. Veškeré stanovené výsledky zkoušených materiálů jsou zobrazeny v tabulce 2.5.

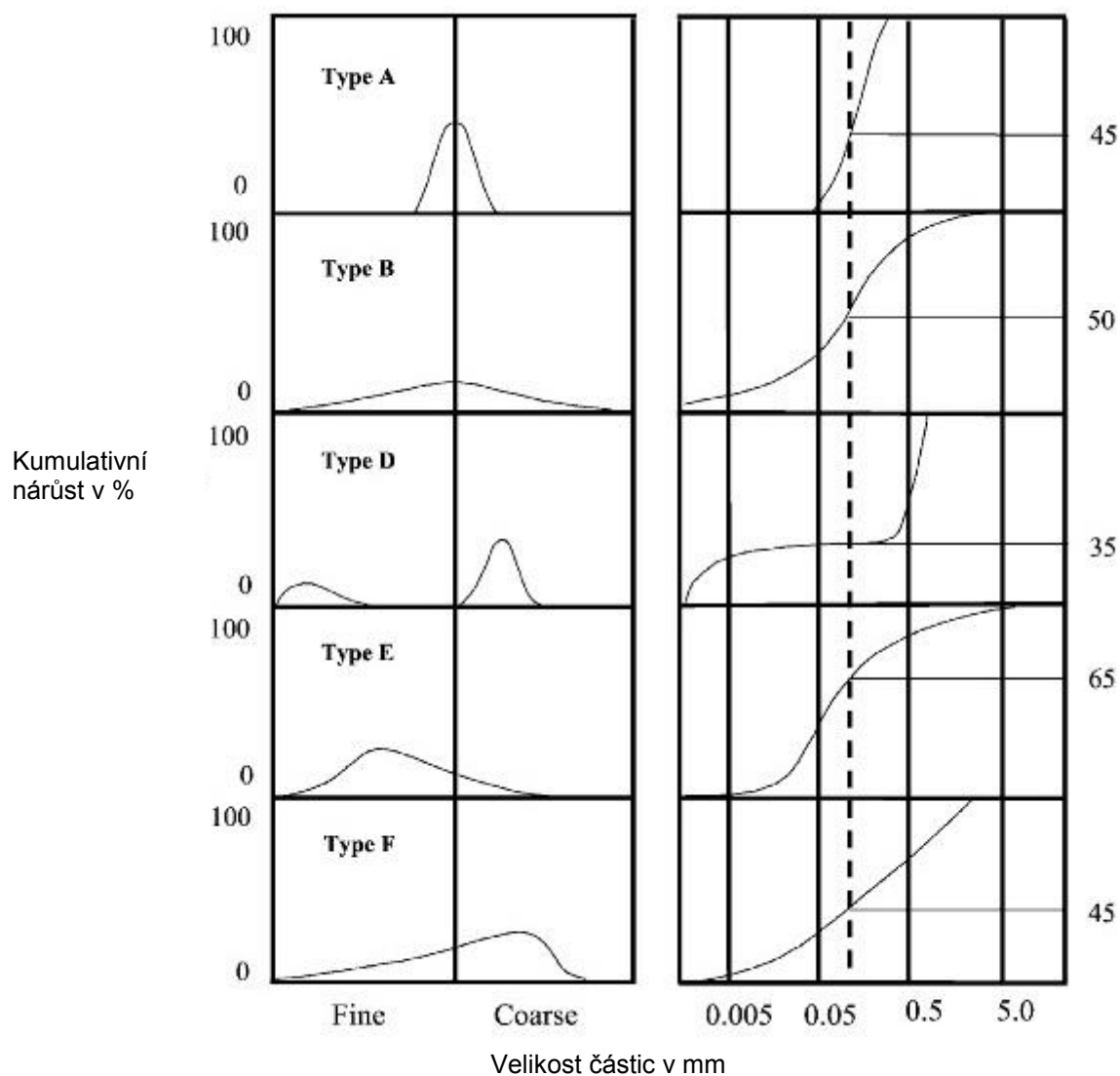
2.2.3 Tvarový index

Zhutnitelnost a tok částic je považován za důležité vlastnosti v oblasti fyziky a inženýrských aplikacích. Technologie výzkumu jemnozrnných podílů má rychle rostoucí význam ve světové ekonomice a je často spojována s chemickým inženýrstvím, kde mají Van der Waalsovy síly převládající význam před silou gravitační a kde jsou materiálové vlastnosti částic důležitější v průběhu jednotlivých etap přípravy betonu.

Výzkumné práce Fullera a Thomsona dávají teoreticky ideální příklady křivek zrnitosti a dávají předpoklad pro návrh betonu a minimalizaci obsahu pórů ve struktuře matrice. Společným cílem technologů je minimalizovat pórovitost ve směsích a v dnešní době se můžeme v literatuře setkat s myšlenkami návrhů na základě spojitě křivky zrnitosti. Kvalifikace vlivu různých velikostí částic s vlivem na pórovitost vyžaduje rozsáhlou teoretickou a experimentální studii s různými druhy částic. Burminster na základě svých výzkumů se zaměřením na porozitu jako funkci křivky zrnitosti prezentoval pět distribučních typů zrn, zobrazených níže (obrázek 2.1).

Každá z těchto distribucí (viz obrázek 2.1) byla analyzována tak, aby byl prokázán vliv na pórovitost směsi. Tyto výsledky byly shrnuty v literatuře Peroniuse a Sweetinga a závěry jsou následující. Měření ukázala, že distribuční model směsi typu A má nejvyšší pórovitost, zatímco distribuční model typ F ukázal nejnižší pórovitost zkoušených směsí.

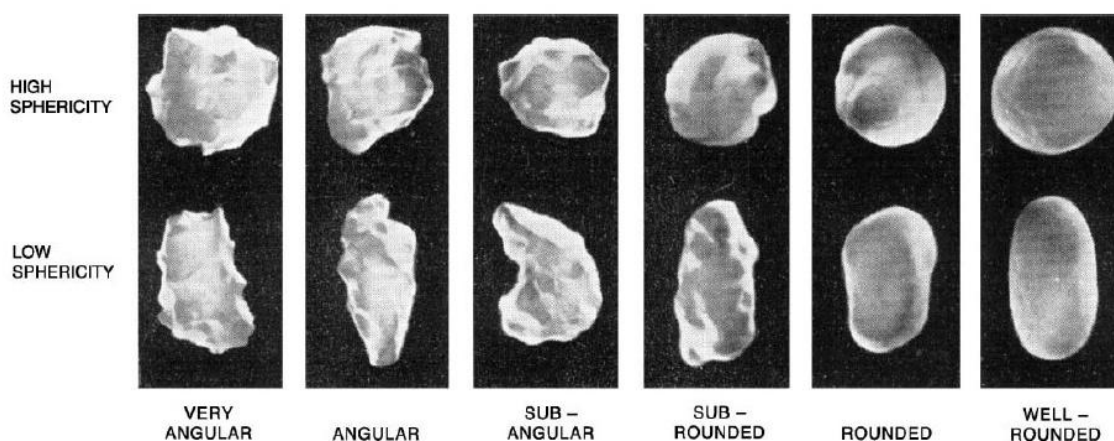
Materiály aplikovatelné na tento modul mají distribuční rozdělení podobné Fullerovým křivkám. V případě určení pórovitosti je také nutné stanovit podmínky "Powersovy kulatosti" (1935) částic (viz. obrázek 2.2), tzv. tvarového indexu částic.



Obrázek 2.1 Pět typů distribučních křivek a křivek zrnitosti prezentovaných Burminsterem [20]

Vysvětlení k obrázku 2.1:

- Typ A - velmi úzký rozsah částic. Většinou písky nebo štěrky.
- Typ B - velmi široká a rovnoměrná distribuce částic.
- Typ D - dominující jemná a hrubá frakce distribuce částic. Patří sem písek nebo naopak jemnější / hrubší kamenivo.
- Typ E - převažující obsah jemnějších částic.
- Typ F - převažující obsah hrubších částic.



Obrázek 2.2 Dělení jemnozrnných částic dle Powerse [20]

Nepřímá stanovení tvarového indexu

Kromě klasických metod přímého měření částic a stanovení jejich rozměrů, existují i nepřímé metody, kterými můžeme tvarový index jemnozrnných podílů stanovit. Výše uvedená měření pomocí mikroskopů poskytují poměrně přesné popisy částic a získání jejich detailů. Nicméně, stanovení tvarového indexu takto jemných zrn pomocí této metody je obtížné. Proto se v literatuře můžeme setkat s obecnějšími metodami, jinými slovy hledáme korelaci mezi jednotlivě naměřenými hodnotami a prováděnými zkouškami. Jednou z možností je například stanovení tvarového indexu dle Reschkeho (2000), který je uváděn jako poměr měrného povrchu stanoveného pomocí Blainova měření a vypočítaným měrným povrchem ze stanovených křivek zrnitosti:

$$\zeta_{\text{Reschke}} = \frac{a_{\text{Blaine}}}{a}.$$

Rovnice 2.6 Stanovení měrného povrchu dle Reschkeho (2000)

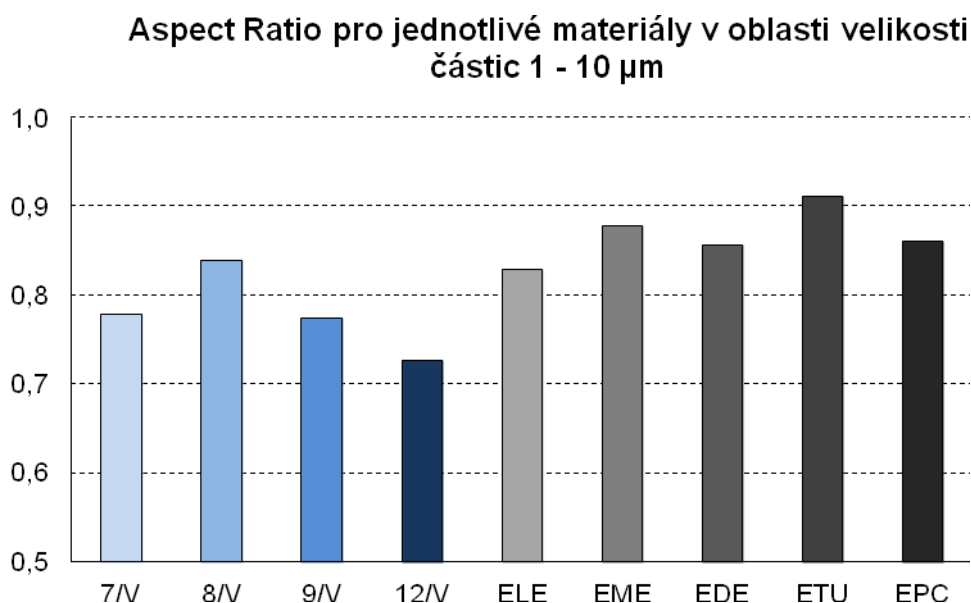
Takto získané tvarové indexy však mohou obsahovat systematické chyby spojené s Blainovým měřením. Tyto výsledky jsou porovnávány s mikroskopickými měřeními vybraných materiálů. V tabulce 2.5 můžeme vidět hodnoty tvarových indexů vypočítaných touto metodou.

Morfologie

Tvary částic měřených mletých vápenců a elektrárenských popílků byly získány prostřednictvím optického a konfokálního mikroskopu s vybavením automatického systému charakterizace částic. Každý vzorek byl měřen v pěti individuálních měřeních, obraz byl snímán dvojrozměrně a mohly být stanoveny různé parametry. Při měření konfokálním

mikroskopem došlo k přesnému stanovení délky a šířky částic - u částic středního zrna. Z různých studií víme, že k definování tvarového indexu je třeba zahrnout ještě prodloužení tvaru částice a drsnost povrchu. Prodloužení bylo charakterizováno poměrem stran (šířka částice kladena kolmo na podélnou stranu dělená délkou částice, definovaná jako nejdelší rozměr měřené částice) - *Aspect Ratio*, zatímco drsnost částice je dána faktorem, který je definován poměrem druhé mocniny obvodu kruhové částice a skutečného obvodu zrna - *Form Factor*. Obě zmíněné hodnoty přibližující se číslu 1 odpovídají kulatým a hladkým částicím.

Průměrné hodnoty zmíněných hodnot (*Aspect Ratio* – poměr stran) pro velikosti středního zrna jsou vyneseny v grafu 2.3. Z tohoto grafu a z promítání mikroskopu můžeme říci, že částice mletých vápenců jsou v oblasti středních hodnot nepravidelné a mírně protáhlého tvaru, elektrárenské popílký mají téměř kulovitý tvar s hodnotami přibližujícími se k hodnotě 1. Z mikroskopického snímání bylo u hrubších částic zřejmé, že jsou protáhlejšího tvaru než částice v oblasti středních hodnot u obou materiálů. Pro jemnější a hrubší zrna nebyla provedena měření šířek a délek částic, nedošlo ke stejnému vyhodnocení jako je uvedeno v grafu 2.3.



Graf 2.3 *Aspect Ratio* elektrárenských popílků a mletých vápenců v oblasti hodnot středního zrna 1 – 10 μm

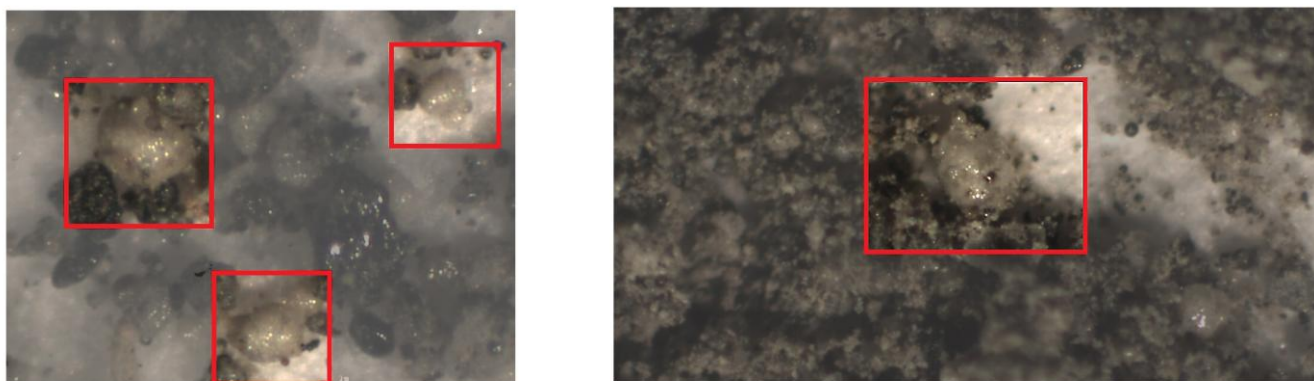
2.2.4 Vyhodnocení výsledků a závěr

V případě zkoušených materiálů docházelo zejména při vysokém zvětšení ke ztrátě ostroty a nebylo příliš možné zřetelně vyhodnotit povrch částic. I přes zmiňované nedostatky

je však tato metoda užitečnou pro odhad a porovnání tvaru a povrchové charakteristiky částic.

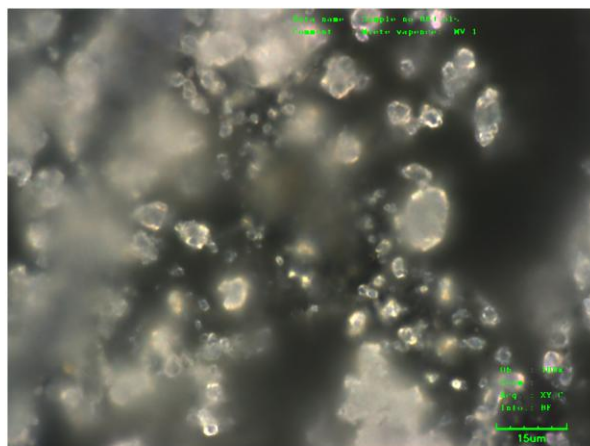
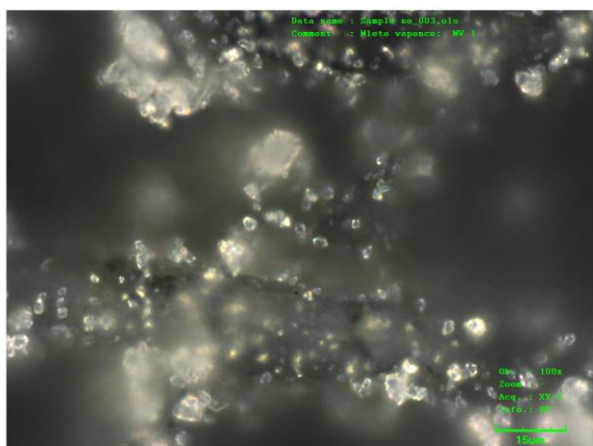
Teoreticky můžeme říci, že jemnější materiály budou mít větší schopnost vyplňovat mezery mezi hrubšími částicemi v dané matici. Ovšem tvar částic a povrchová struktura částic musí být brána také v úvahu. Jakákoliv odchylka od kulového zrna znamená změnu viskozity pro stejnou objemovou část. Z různých teoretických předpokladů můžeme říci, že čím jemnější jsou materiály a jejich tvar se přibližuje kulovitému tvaru, bude vykazovat lepší reologické chování, avšak chování v průběhu zhutňování a dosahování požadované mezerovitosti bude horší. V porovnání mletého vápence s elektrárenským popílkem výsledky ukázaly, že částice jsou u mletých vápenců hranatější a podlouhlejší v porovnání s podobnými křivkami zrnitosti obou materiálů. Nicméně pórovitost zrn vápenců byla extrémně vyšší než u popílků. Avšak pomocí měření uvedených výše nebylo možné přesně rozlišit a stanovit tvarové charakteristiky a povrchovou morfologii jednotlivých částic.

Z grafu 2.3 můžeme vidět, že hodnoty poměrů stran částic v oblasti hodnot středního zrna elektrárenských popílků jsou poměrně vysoké a na základě toho můžeme usuzovat o poměrně kulovitém tvaru částic, což potvrdila i mikroskopická měření. Naopak u mletých vápenců nejsou tyto hodnoty příliš vysoké a mikroskopická měření potvrdila částice protáhlých tvarů, s různou drsností povrchu.



Obrázek 2.3 Elektrárenský popílek Počerady a zobrazení kulových částic pomocí konfokálního mikroskopu

V závěru je potřeba říci, že tvar a morfologické vlastnosti takto jemných částic hrají významnou roli v cementových kompozitech. Nicméně je nutné poznamenat, že výsledky mohou být ovlivněny způsobem přípravy a vybranou metodou měření. Srovnání různých druhů materiálů může poskytnout cenné informace například pro stanovení mechanického chování těchto podílů v cementové pastě a následně v kompozitu s hrubým kamenivem.



Obrázek 2.4 Mleté vápence – frakce 8/V a zobrazení částic pomocí konfokálního mikroskopu

2.3 Fyzikální vlastnosti

V následující části byly pro uvedené materiály prováděny zkoušky pro stanovení fyzikálních vlastností.

2.3.1 Objemová hmotnost

Literatura udává mnoho definic pro objemovou hmotnost a obdobně najdeme i mnoho dostupných zkušebních metod. Použité materiály byly zkoušeny podle normy ČSN EN 1097 - 7 - pyknometrickou metodou. V případě nereaktivních příměsí byla použita destilovaná voda, v případě popílků propan - 1 - ol. Výsledky z jednotlivých měření pro dané materiály jsou zobrazeny v tabulce 2.6.

Zkoušený materiál	Objemová hmotnost D [g·cm ⁻³]
ETU	2,01
EPC	2,21
EME	2,09
ELE	2,13
EDE	2,38
7/V – 12/V	2,73

Tabulka 2.6 Přehled objemových hmotností elektrárenských popílků a mletých vápenců

2.3.2 Stanovení mezerovitosti zhuťného fileru

Stanovení mezerovitosti zhuťného fileru bylo provedeno pomocí Rigdenovy aparatury dle ČSN EN 1097 – 4 (obrázek 2.3). Výsledky z tohoto měření jsou zobrazeny v

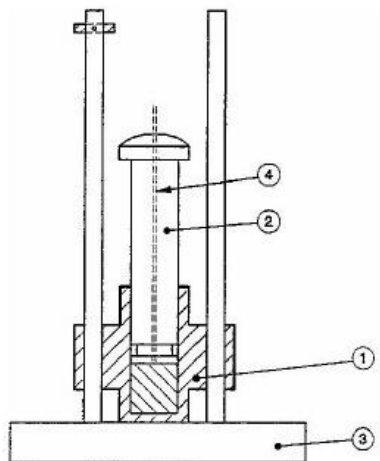
tabulce 2.7. K zamyšlení vedla také otázka toho, zda průměr nádoby a uzavřená nádoba negativním způsobem neovlivňuje zhutnění fileru. Literatura v této souvislosti odkazuje na kontejner o takovém průměru, který by měl být nejméně o řád větší než je velikost zkoušených částic. V tomto případě bylo tedy dosaženo maximálního zhutnění.

Materiál	Objemová hmotnost fileru ve zhutněném stavu $\rho_{\text{comp}} [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	Objemová hmotnost D $[\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$	Sypná hmotnost $\rho_s [\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}]$
EDE	1,562	2,38	0,831
EPC	1,400	2,21	0,653
ELE	1,460	2,13	0,722
ETU	1,495	2,01	0,764
EME	1,250	2,09	0,507
12/V	1,751	2,73	0,753
9/V	1,673		0,670
8/V	1,645		0,649
7/V	1,581		0,585

Tabulka 2.7 Přehled objemových a sypných hmotností zkoušených materiálů

Všechny zrnité materiály mají určité procento pórů svého objemu, které definujeme jako podíl celkových mezer v jednotce objemu, a proto můžeme říci, že je nekonečně malý. Takovéto mezery jsou závislé na křivkách zrnitosti, tvaru částic, aplikované síle zhutnění a vlhkosti zkoušené frakce.

Objemová hmotnost daného materiálu tedy závisí na způsobu zhutnitelnosti částic. V technologii zabývající se jemnozrnnými podíly je běžné rozlišovat míru zhutnitelnosti v setřeseném i nesetřeseném stavu. Musíme však zvážit, jak nám výsledky při stanovení mezerovitosti suchým příměsí mohou pomoci při vyhodnocení zkoušek a následném návrhu betonu. Je třeba však poznamenat, že nám pomáhají pochopit chování při vyplňování mezer v dané matici.

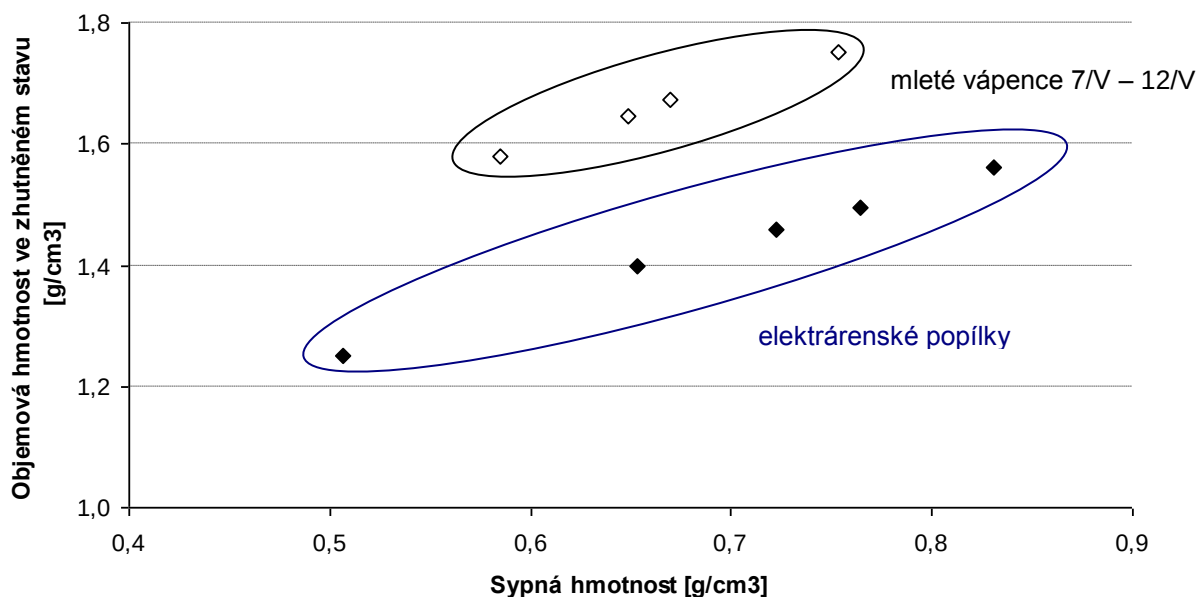


Obrázek 2.2 Rigdenova aparatura podle ČSN EN 1097 – 4. Popis aparatury: č. 1 beran, č. 2 píst, č. 3 základová deska, č. 4 odvětrávací otvor. [44]

Vyhodnocení

Kromě objemové hmotnosti materiálu jsou důležité pro zrnité materiály také sypaná hmotnost a objemová hmotnost stanovená pomocí zhutnění fileru. Objemová hmotnost je hmotnost částic dělená objemem, který zaujímají. Tento objem se může měnit v závislosti na stupni zhutnitelnosti daného materiálu a na použité metodě pro stanovení. Z geometrických úvah je známo, že částice tvaru ideální koule dosahují nejhorších výsledků dosažení mezerovitosti pomocí zhutňování.

V této práci byl použit vztah pro porovnání závislosti sypané hmotnosti a objemové hmotnosti zhutněného fileru pomocí Rigdenovy aparatury. Z grafu 2.4 a výsledků je patrné, že největší mezerovitosti bude dosahovat elektrárenský popílek Tušimice. Tyto hodnoty jsou opět pouze orientačními, avšak pomohou nám předpovědět chování těchto příměsí v čerstvé směsi a následný předpoklad pórovitosti ztvrdlého betonu. Toto chování je však závislé na mnoha dalších faktorech.



Graf 2.2.3 Vztah mezi sypnou hmotností a objemovou hmotností ve zhutněném stavu zkoušených elektrárenských popílků a mletých vápenců

2.4 Shrnutí poznatků

Počátkem 60. let představil Powers myšlenku, že beton může být považován za směs částic kameniva a cementové pasty. Dále představil názor, že pasta uvězněná uvnitř dutin kameniva není účinná pro zpracovatelnost betonové směsi.

Dále byla představena myšlenka pro dosažení lepších reologických vlastností a snížení pórovitosti betonové směsi - přidavkem například mletých vápenců nebo elektrárenských popílků s cílem zaplnění dutin a pórů tak, aby nedocházelo ke snížení zpracovatelnosti směsi a aby nedocházelo k vyšší potřebě vody a tím ke zhoršování fyzikálních vlastností. Aby tomu tak nebylo, je nutné provést komplexní analýzu jemnozrnných podílů, která je zde představena.

Z dosažených výsledků můžeme vyvodit následující závěry:

- V případě mletých vápenců (homogenních materiálů) výsledky ukazují, že čím jemnější materiál, tím je dosahováno lepší mezerovitosti zhutněného fileru, tzn. nižší pórovitosti zhutňované směsi.
- Lepší mezerovitost potvrzují také mikroskopická stanovení – Aspect Ratio (poměr stran částic), kdy vidíme, že čím vzdálenější je hodnota od čísla 1 (tzn. částice kulovitěho tvaru) mají tyto částice schopnost dosažení lepší mezerovitosti zhutněného fileru v suchém stavu.

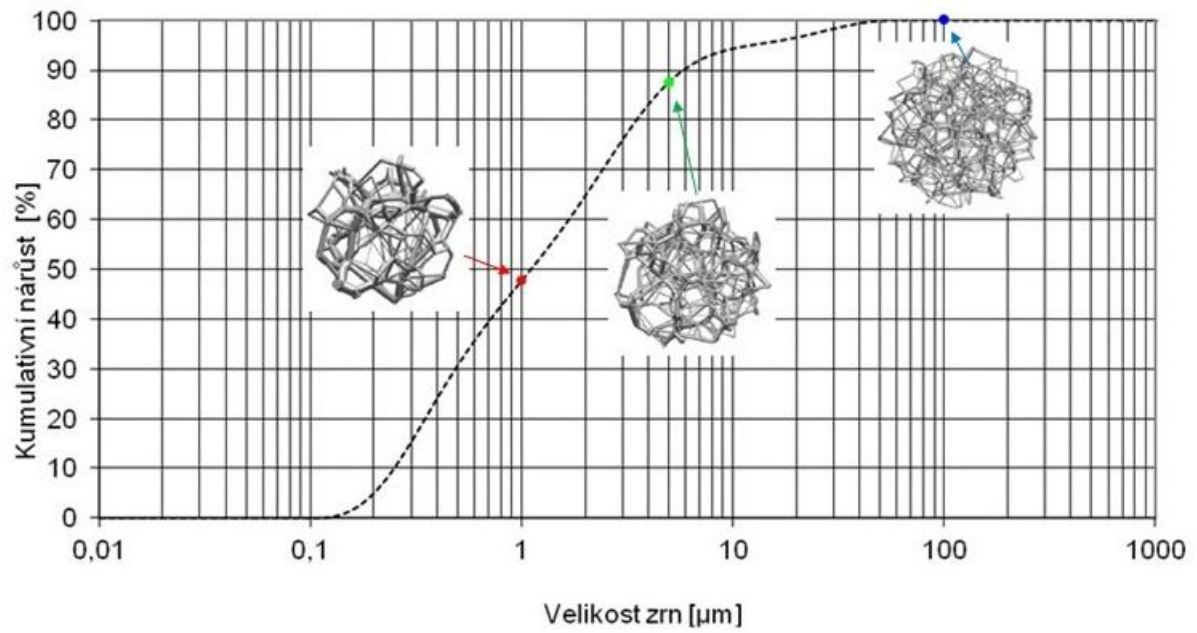
- Mikroskopická měření ukázala podstatně vyšší pórovitost a drsnost zrn mletých vápenců než elektrárenských popílků, z toho můžeme usuzovat na horší reologické chování pasty. Elektrárenské popílků jsou jemnější a jejich tvar se přibližuje kulovitému tvaru, proto usuzujeme na lepší reologické vlastnosti.
- Avšak příliš velké množství kulových částic a vysoká hodnota poměrů stran (Aspect Ratio) v elektrárenských popílcích způsobuje větší pórovitost zhutněného fileru v suchém stavu.

2.5 Metodika dalších výzkumných prací

V dalším kroku této práce je nutné ověřit předpokládané chování představených příměsí. V první řadě budou stanovovány konkrétní hodnoty tvarových indexů a to z prováděných zkoušek reologického chování pasty – pomocí rotačního viskozimetru, zkoušky rozlití připravené směsi a stanovení vodonáročnosti příměsí. Následně budou namíchány maltové směsi, kdy bude opět prováděna mikroskopie, rtuťová porozimetrie a nasákavost vzorků. Cílem těchto zkoušek a poznatků bude vytipování vhodných jemnozrnných příměsí pro betony s cílem dosažení optimální mezerovitosti.

V závěru můžeme poznamenat, že důležitou roli hraje soudržnost mezi jednotlivými částicemi, která je způsobena v důsledku působení van der Waalových sil a kapilární strukturou. Tyto vlastnosti mohou být efektivně studovány například pomocí metody DEM (*Discrete Element Method*). To znamená, že každá částice může být definována translačním a rotačním pohybem a mohou být popsány II. Newtonových zákonem. Tato metoda je založena na výpočtu metodou sítí a metodou konečných prvků a může být použita pro simulaci zhutnitelnosti jemných částic v suchém stavu, ale také pro pasty a směsi. Výsledné informace jsou užitečné pro pochopení chování částic, vzniku výsledné struktury a působení základních mechanismů. V následném grafu 2.5 je zobrazena simulace mletého vápence 8/V pomocí této metody a jsou zobrazeny Delaunayovy struktury pro oblast částic o velikosti 1 μm , 5 μm a 100 μm . V neposlední řadě je zde otázka, zda příliš vysoká množství kulových částic v příměsi nebudou negativním způsobem ovlivňovat chování především čerstvých směsí.

Mletý vápenec Carmeuse, frakce 8/V



Graf 2.5 Simulace zhutnitelnosti mletého vápence (frakce 8/V) pomocí DEM se zobrazením Delaunayových struktur v oblasti částic o velikosti $1\mu\text{m}$, $5\mu\text{m}$ a $100\mu\text{m}$

3 MALTOVÉ SMĚSI

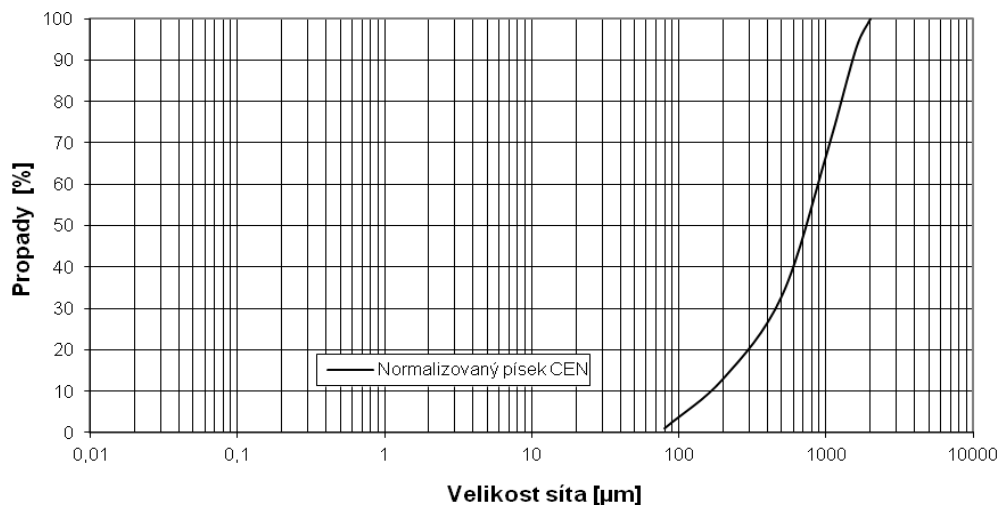
V průběhu této práce byly navrženy samozhutnitelné maltové směsi a to především proto, abychom mohli prokázat chování čerstvé směsi s ohledem na jemnost mletí jednotlivých složek a to, jak nám chování jednotlivých směsí ovlivňuje tvarový index jednotlivých materiálů. Návrh maltových směsí představených v této práci je založen na návrhu pomocí křivek zrnitosti a modifikované teorie Andreasena a Andersena, kdy máme k dispozici měrný povrch jednotlivých materiálů a měrný povrch namíchané směsi. S ohledem na měrný povrch, zhutnitelnost jednotlivých frakcí a provedenou komplexní analýzu můžeme předpovědět chování čerstvé směsi. Tato kapitola představuje další krok, který navazuje na předchozí představenou kapitolu.

3.1 Použité materiály a granulometrické vlastnosti

V předchozí kapitole bylo zmíněno, jak je důležité stanovit vlastnosti jemných podílů a jednotlivých složek maltové směsi. Pokud máme provedenou komplexní analýzu jednotlivých složek můžeme vhodně navrhnout maltovou směs tak, abych docílili požadované mezerovitosti. Návrh aplikovaný v této práci je založen na minimálním požadavku pasty k obalení zrn kameniva a k dosažení požadované zpracovatelnosti směsi v čerstvém stavu. V této práci byl použit cement CEM I 42,5 R z Mokré a vhodně zvolené příměsi – elektrárenské popílky a frakce mletého vápence (materiály představené v předchozí kapitole). Směsi s elektrárenskými popílkami byly navrženy podle granulometrických vlastností a nahrazovaly částečné množství cementu v rozmezí od 30 – 45% z jeho hmotnosti, frakce mletých vápenců byly použity stejným způsobem, nahrazení cementu bylo v rozmezí 15 – 30% z hmotnosti referenční směsi. Jako hrubá frakce byl použit normalizovaný písek CEN certifikovaný podle CEN o granulometrickém složení, které je prezentováno v grafu níže (graf 3.1). Tento písek byl použit proto, aby se zabránilo vzniku velkého množství chyb, zachování konstantních podmínek a následně nespolehlivým výsledkům měření. Maximální velikost zrna byla do 4 mm, ta má pouze malý dopad na chování a zpracovatelnost čerstvé směsi.

Referenční směr	
Cement CEM I 42,5R Mokrá	450 g
Normalizovaný písek	1350 g
Voda	311 g

Tabulka 3.1 Návrh referenční směsi; směsi s příměsami byly navrženy s procentuelní náhradou cementu zmíněnou výše



Graf 3.3.1 Granulometrie normalizovaného písku CEN

V tomto případě nebyly směsi navrženy pomocí metody „pokus – omyl“, ale byly navrženy pomocí stanovených granulometrických a fyzikálních vlastností jednotlivých materiálů. V případě namíchaných směsí byl stanoven konstantní součinitel vody ku všem jemným podílům (w/p) a to tak, aby bylo dosaženo požadované zpracovatelnosti směsi. Viskozita směsí nebyla upravována žádnými přísadami, aby se zabránilo dalšímu zkreslení výsledků a případným chybám. Navíc vzhledem k velké rozmanitosti výrobků (plastifikátorů, viskozitu modifikujících přísad) na trhu by bylo obtížné definovat konkrétní dávkování. Každý typ takové přísady se může lišit především v účinnosti, na množství jemných podílů a jemnosti mletí jednotlivých složek. Praxe ukázala, že směsi s představenou dávkou vody mají dostatečnou viskozitu, ale v dalším výzkumu by bylo vhodné snížit množství použité vody a nahradit ji tak například viskozitou modifikujícími přísadami. Tato myšlenka je však předmětem dalšího výzkumu. V této práci je důraz kladen na optimální kombinace cementu a zvolené příměsi a jejich následný vliv na mikrostrukturu ztvrdlé malty. V závěru jsou tyto hodnoty analyzovány a je vyhodnoceno, jakým způsobem tvar zrn jemných podílů ovlivňuje fyzikální vlastnosti ztvrdlé směsi.

3.2 Navržené a optimalizované maltové směsi

Jak bylo zmíněno výše, směsi byly navrženy pomocí optimalizovaného návrhu pomocí křivek zrnitosti a komplexní analýzy jednotlivých složek maltových směsí. Kamenivo tvoří největší část objemu betonu (v tomto případě malty), proto můžeme očekávat, že bude

mít největší vliv na jeho vlastnosti. Tato práce používá přírodní křemičitý písek sestávající převážně ze zaoblených částic s obsahem oxidu křemičitého nejméně 98% hmotnostních a se zrnitostí, která je uváděna pro mezinárodní standard – referenční písek CEN (graf 3.1). Vlivy kameniva na mechanické a fyzikální vlastnosti malt a betonů jsou různé. Jednou z hlavních vlastností je celková trvanlivost betonu, tzn. fyzikální (odolnost proti zmrazování a rozmrazování, zvlhčování a vysoušení, odolnost vůči oděru, apod.) a chemická odolnost (například odolnost vůči alkalicko – křemičité reakci a působení chemicky agresivních prostředí XA). V neposlední řadě má kamenivo vliv na pevnosti betonu, smrštění a dotvarování, Youngův modul, ale také vliv na finanční stránku. V této práci jsou řešeny pouze následující vlastnosti potřebné pro návrh maltových směsí:

- Křivky zrnitosti PSD a měrný povrch
- Tvarový index zrn a jejich morfologie
- Objemová hmotnost
- Stanovení mezerovitosti zhutněného fileru.

3.2.1 Spojitá křivka zrnitosti a návrh směsi

V literatuře se můžeme setkat s názory, že Fullerova křivka zrnitosti neposkytuje optimální rozdělení jednotlivých frakcí zkoušeného materiálu a že je nutné zohlednit tvarový index jednotlivých částic těchto materiálů. Z tohoto důvodu byla Fuller – Thompsonova teorie modifikována tak, aby byl zohledněn tvar částic. V této práci proto byla zvolena modifikovaná teorie Andeasena a Andersena, která má následující tvar:

$$P'(d) = \frac{d^q - d_{\min}^q}{d_{\max}^q - d_{\min}^q} \quad q \neq 0.$$

Rovnice 3.1 *Rovnice pro stanovení zrnitosti jednotlivých materiálů*

Tato teorie je považována za prakticky aplikovatelnou a pro dosažení požadované mezerovitosti byly stanoveny hodnoty q v rozmezí 0 – 0,28 (Brouwers, 2006). Na základě této teorie (rovnice 3.1) byly navrženy jednotlivé směsi s vybranými materiály. V posledním kroku byl stanoven distribuční koeficient, který určuje charakter směsi, tzn. poměr mezi jemnými a hrubými částicemi. Pro namíchané směsi byl navržen distribuční modul v rozmezí hodnot 0,21 až 0,25, který se zdá být vhodný z hlediska tvaru částic jednotlivých materiálů (především jemných podílů) a jejich morfologie, jak bylo stanoveno v předchozích měřeních. Na základě stanovených předpokladů byly stanoveny spojitě křivky zrnitosti pomocí metody nejmenších čtverců následovně:

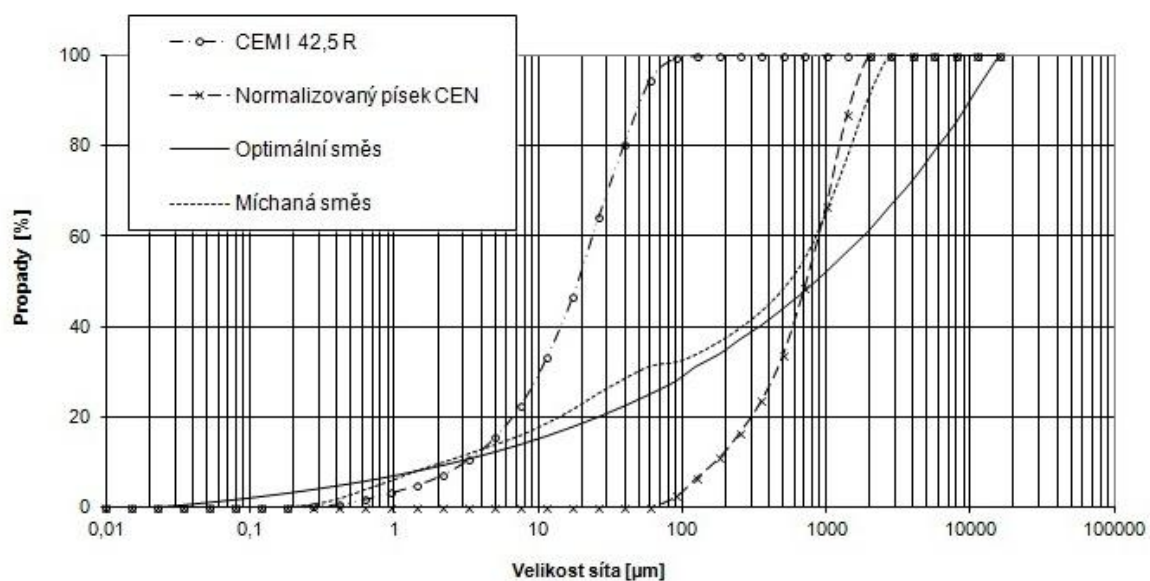
$$RSS = \sum_{i=1}^n \left(P'_{mix}(d_i^{i+1}) - P'_{tar}(d_i^{i+1}) \right)^2$$

Rovnice 3.2 Rovnice pro stanovení spojité křivky zrnitosti směsi s vybranými materiály

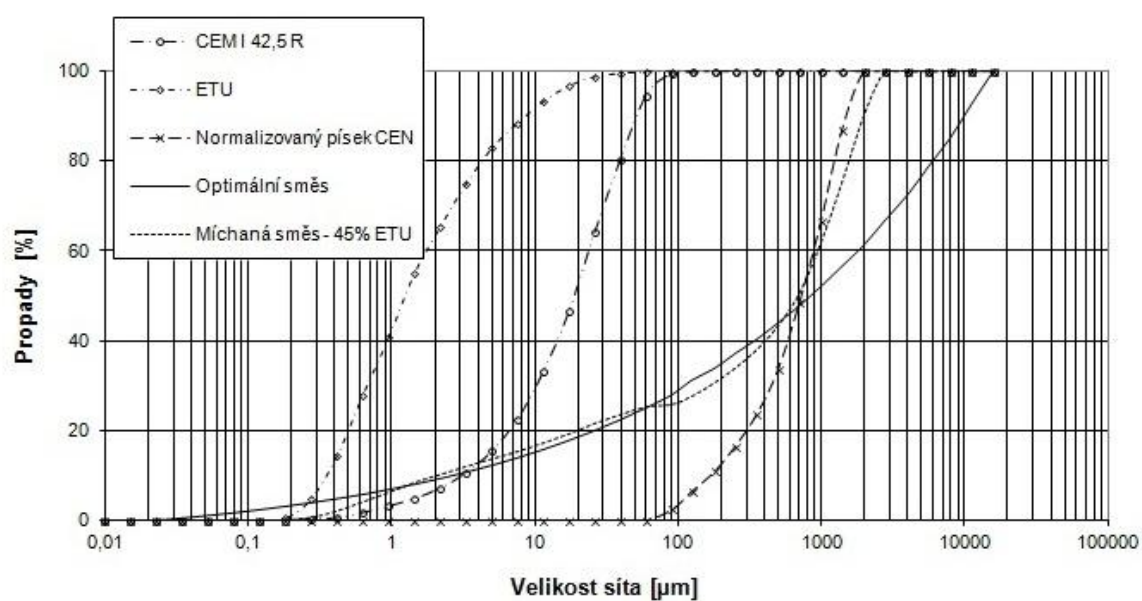
V následující části jsou představeny jednotlivé navržené směsi, kde bylo cílem namíchat takovou směs, aby se její spojitá křivka zrnitosti blížila optimální, tzn. abychom dosáhli požadované mezerovitosti směsi se zohledněným tvarovým indexem jemných podílů. V grafu jsou zobrazeny křivky zrnitosti jednotlivých složek, kde je proti propadům na jednotlivých sítích položena velikost částic v logaritmickém měřítku.

Na grafu 3.2 můžeme vidět spojitou křivku zrnitosti pro referenční směs, která byla namíchána bez přídavku příměsi. Je patrné, že v oblasti zrn menších než 1000 µm by bylo vhodné směs optimalizovat pomocí příměsi – v tomto případě byly použity již zmíněné popílky a mleté vápence. Tyto příměsi ve správném objemovém poměru napomáhají dosažení příznivější spojité křivky zrnitosti a z toho vyplývajícího dosažení nižší mezerovitosti míchané směsi. Jak je však vidět, je téměř nemožné namodelovat spojitou křivku zrnitosti, která by kopírovala křivku optimální směsi. V příloze A můžeme vidět, jakým způsobem se měnily spojitě křivky zrnitosti s postupnou procentuelní náhradou příměsí v jednotlivých směsích.

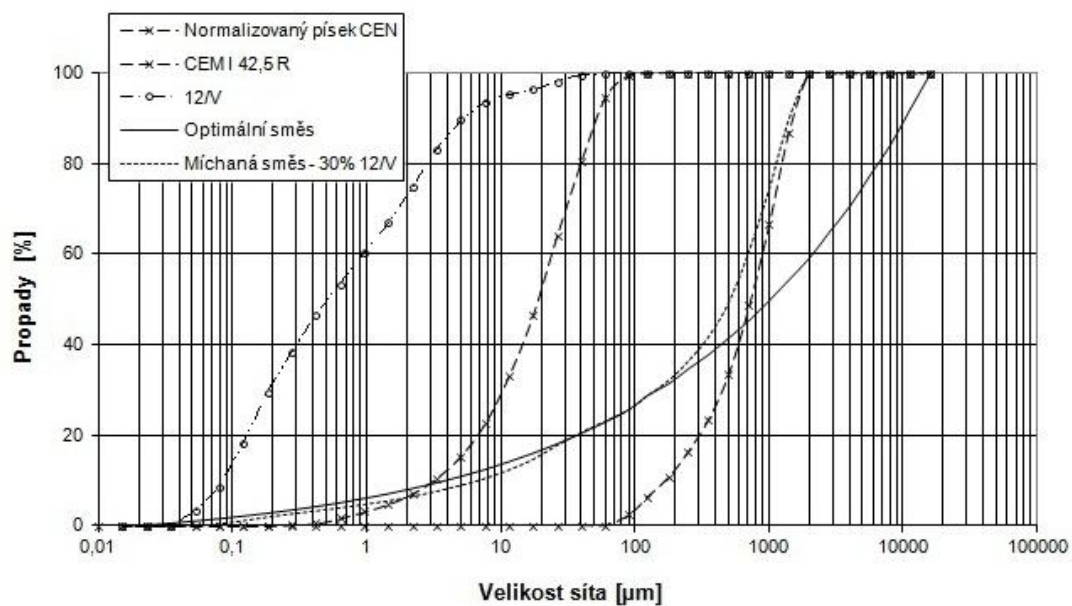
Následující grafy č. 3.3 a 3.4 zobrazují příklady takto navržených směsí, a to se 45% nahrazením hmotnosti cementu elektrárenským popílkem Tušimice (graf 3.3) a 30% nahrazením hmotnosti cementu mletým vápencem - frakcí 12/V (graf 3.4) a jsou porovnávány s referenční směsí (všechny grafy namíchaných směsí s komentářem můžeme najít v Příloze A). Z grafů je patrné, že náhrada určitého množství cementu vede k dosažení kontinuálnější křivky zrnitosti podobající se optimální křivce. K optimalizaci směsí došlo především v oblasti zrn do 0,25 mm. Také se změnil bod zlomu, který je patrný v oblasti přechodu jemných podílů a pískových částic. Proto můžeme usuzovat, že by tyto příměsi mohly překlenout jakousi pomyslnou mezeru mezi jednotlivými materiály ve směsi a mohly tak napomoci k dosažení požadované mezerovitosti a požadovaných vlastností směsi. Další možností dosažení příznivější spojité křivky zrnitosti by byla možnost zvýšení maximální velikosti částic v použité směsi, toho docílíme především v betonových směsích. V závěru této práce budou všechny směsi porovnány s výsledky stanovenými ze zkoušek ztvrdlé směsi a budou vyhodnocena optimální složení.



Graf 3.3.2 Referenční směs (REF) – z grafu je patrný nedostatek materiálu v oblasti částic do 250 μm



Graf 3.3.3 Maltová směs se 45% náhradou cementu elektrárenským popílkem Tušimice – došlo k vyplnění směsi v oblasti velikosti částic především do 250 μm



Graf 3.3.4 Maltová směs s 30% náhradou cementu mletým vápencem frakcí 12/V – došlo opět k vyplnění směsi v oblasti velikosti částic především do 250 μm

4 ZKOUŠENÍ ČERTSVÝCH SMĚSÍ

Pro dosažení požadované hutnosti připravovaných směsí je nutné znát nejen granulometrické vlastnosti jednotlivých složek, ale také síly vzájemně působící mezi jednotlivými zrny. S ohledem na vysoký podíl jemných podílů ve směsi bude mít množství záměsové vody velký vliv na dosažení požadované mezerovitosti a stupeň zhutnění. Během postupného nasycení pórového systému vodou dochází současně k vytváření vodního filmu okolo jednotlivých částic. Přebývajícím množstvím vody způsobuje oddalování jednotlivých zrn. V případě velkého množství jemnozrnných částic nedochází k dokonalé adsorpci vody na povrchu částic a dochází k segregaci směsi. Z tohoto důvodu jsou zkoušky čerstvé směsi, množství záměsové vody a jemných podílů důležité pro stanovení vhodné zpracovatelnosti směsi. Celkem bylo vytvořeno několik směsí – jedna referenční, 4 směsí s mletými vápenci s různým procentuelním nahrazením cementu (tzn. celkem 16 směsí) a 5 směsí s různými druhy elektrérenských popílků, opět s rozdílnou procentuelní náhradou cementu (tzn. celkem 20 směsí). Tyto vytvořené směsi byly provedeny ve čtyřech opakováních, abych bylo docíleno měření s co nejmenší chybou a byly prokázány konstantní vlastnosti. V případě získání vysokých odchylek je nutné přípravu těchto směsí opakovat.

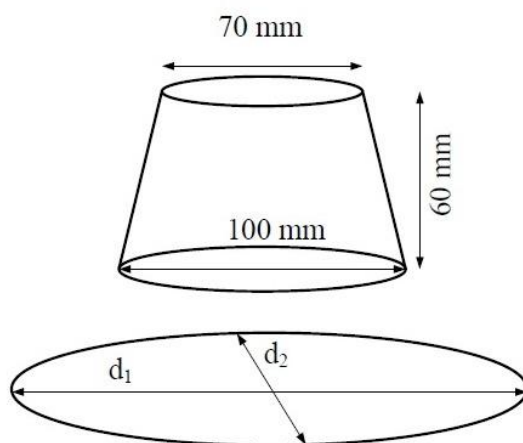
4.1 Zkouška rozliti maltové směsi

Zkouška rozliti dle Okamury a Ouchiho (1999) se zdá být klasickou metodou pro zjištění potřebné vody jemných příměsí spojených se samozhutnitelným betonem (SCC). Směsi jsou složeny z materiálu s jemnými zrny a měnícím se množstvím vody. Poté následuje definovaný proces míchání, připravenou směsí je vyplněn Hägermannův kužel (dle EN 1015 – 3, obr. 4.1), který je zvedán kolmo k povrchu tak, aby bylo dovoleno volnému rozliti směsi bez jakéhokoliv setřesení. Z takto rozlitého koláče jsou změřeny dva navzájem kolmé rozměry d_1 a d_2 . Tyto rozměry jsou dále použity pro výpočet relativního rozliti (Γ_p):

$$\Gamma_p = \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 - 1 \text{ s } d = \frac{d_1 + d_2}{2},$$

Rovnice 4.1 Výpočet relativního rozliti

kde d_0 je rozměr použitého kužele (v případě Hägermannova kužele je tento rozměr 100 mm). Relativní rozliti Γ_p je míra deformovatelnosti směsi, která byla původně představena Okamurou a Ouchim (1995) jako relativní plocha rozliti R . [11] Obrázek 4.1 zobrazuje příklad rozliti kužele zkoušeného materiálu a graf 4.1 analýzu výsledků této zkoušky.



Obrázek 4.1 Schematické zobrazení zkoušky rozlití pomocí Hägermannova kužele [17]

Zkouška rozlití je nejběžnější zkušební metodou pro hodnocení tekutosti a deformaci samozhutnitelnosti směsi. V této práci byly malty navrženy s konstantním součinitelem vody ku všem jemným podílům (w/p) s cílem dosažení rozlití v rozmezí 190 – 220 mm bez použití plastifikátoru (s použitím plastifikátoru 240 – 260 mm (EFNARC, 2002)), což by v plném měřítku použitých materiálů odpovídalo rozlití betonové směsi 700 mm. Malty byly navrženy tak, aby byl prokázán vliv jemnosti mletí a tvarového indexu jemných podílů na zpracovatelnost směsi.

Postup zkoušky

Pro vytvoření maltové směsi byla použita laboratorní míchačka pro maltové směsi dle normy EN 196 – 1 (1994). Použitý proces míchání je následující:

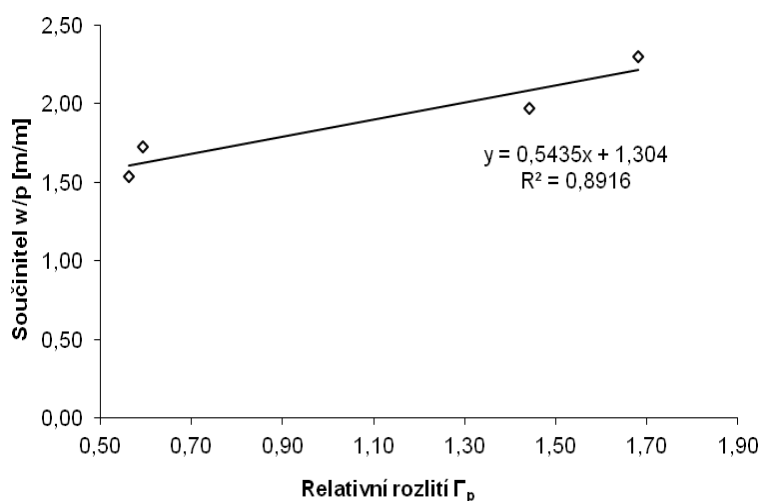
- Do navlhčené míchací nádoby vlijeme požadované množství vody,
- Pokračujeme s přidáním celkového množství zkoušeného vzorku – cement s příměsí,
- Zahájíme míchací proces – 30 s rychlostí 1 (140 ± 5 rpm), dosypáváme normalizovaný písek,
- Zastavíme míchání na dobu 60 s, kdy využijeme prvních 30 s k setření směsi ze stěn míchací nádoby a míchací lopatky
- Pokračujeme dalších 90 s v míchání rychlostí 1.

Takto připravená směs vyplní vysušený Hägermannův kužel a provedeme zkoušku rozlití. Po první zkoušce kužel vyčistíme a test je ihned opakován, tzn. že získáme čtyři individuální rozměry pro jeden w/p součinitel. Dále jsou provedena nejméně čtyři rozdílná měření s rozdílným w/p součinitelem, abychom dostali spolehlivou rovnici trendu. V normě DAfStb (2001) je ještě doporučeno zaměřit se především na rozlití v rozmezí 140 – 230 mm, které

odpovídá relativnímu rozliti Γ_p v rozmezí 0,96 – 4,29 při použití Hägermannova kužele. Další literatura se odkazuje na hodnoty 0,2 – 15 (Domone and HsiWen, 1997). [11]

Vyhodnocení výsledků

Pomocí grafického vyhodnocení (graf 4.1) jsou všechna měření relativního rozliti Γ_p položena proti jejich příslušným w/p součinitelům (součinitelům vody – ku – obsahu jemných podílů, vyjádřených objemově V_w/V_p) zahrnující příslušné objemové hmotnosti materiálu. Přímka je proložena vypočítanými body relativního rozliti. Průsečík této lineární funkce s osou y v hodnotě relativního rozliti $\Gamma_p = 0$ zobrazuje takové množství vody, kdy je obsah vody právě dostačující pro optimální rozliti (Okamura and Ouchi, 2003). Jinými slovy, znamená to maximální množství vody, které může být udrženo jednotlivými částicemi materiálu. Překročení množství této zbytkové vody přetváří soudržný celek v koncentrovanou suspenzi. Tento bod se nazývá vázaný vodní součinitel, který byl představen jako β_p v oblasti této problematiky. [11]



Graf 4.4.1 Příklad závislosti relativního rozliti a součinitele vody – ku – obsahu všech jemných podílů [v/v] v maltové směsi s použitým elektrárenským popínkem Tušimice

Z měření může být vypočítána lineární závislost každého materiálu s pomocí lineární regrese. Výsledek této analýzy je funkcí typu:

$$\frac{V_w}{V_p} = E_p \cdot \Gamma_p + \beta_p.$$

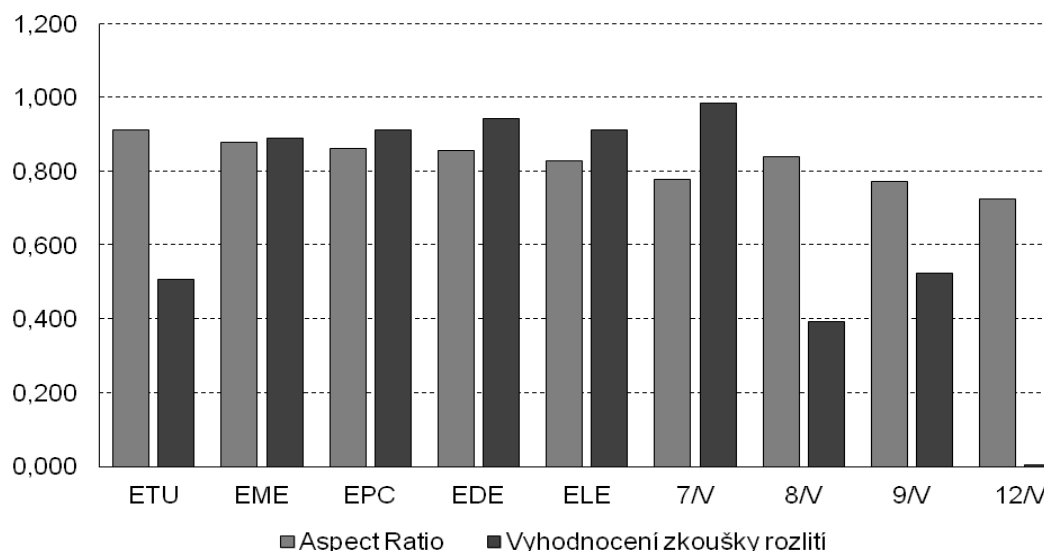
Rovnice 4.2 Lineární rovnice pro výpočet vázaného vodního součinitele a hodnoty deformačního koeficientu

Kromě vázaného vodního součinitele β_p , najdeme v této rovnici hodnotu E_p nebo – li deformační koeficient, který je úhlem této funkce. Touto hodnotou může být rozuměno měření sensitivity potřeby vody pro danou tekutost směsi. To znamená, že materiál s nižší hodnotou E_p má tudíž menší úhel této funkce a odpovídá větší míře přetvárnosti při dané změně množství vody než u materiálů s větší strmostí úhlu. Tyto malé změny v množství vody mají silnější vliv na relativní rozlití. Pomocí tohoto vyhodnocení můžeme říci, které materiály mají tendenci k tzv. krvácení (bleeding) nebo segregaci dříve než ostatní materiály použité při míchání betonové směsi. Pravděpodobnost tohoto negativního chování roste se snižujícím se množstvím cementu a vysokým obsahem jemných částic v důsledku změn množství vody (nízká hodnota E_p). [11]

Tato zkouška umožňuje vyhodnotit a prokázat, zda je skutečně celková vodonáročnost součtem požadavků potřeby vody jednotlivých složek. Vzhledem ke zlepšení a dosažení požadované mezerovitosti se očekává, že celková potřeba vody bude nižší než součet vodonáročností jednotlivých složek. Na základě výsledků můžeme říci, že zkouška rozlití pomocí Hägermannova kužele (případně některá z dalších zkoušek) je důležitým měřením pro praktické aplikace.

Materiál	Aspect Ratio [-]	Vyhodnocení zkoušky rozlití	
		[-] (rozlití v mm)	V - trychtýř [s]
ETU	0,912	0,5067 (125,0)	7,8
EME	0,878	0,8916 (143,8)	7,0
EPC	0,861	0,9138 (197,5)	5,0
EDE	0,856	0,9442 (215,0)	5,5
ELE	0,830	0,9127 (196,3)	5,3
7/V	0,779	0,9842 (188,8)	4,9
8/V	0,840	0,3943 (191,3)	5,2
9/V	0,774	0,5232 (197,5)	5,6
12/V	0,726	0,0038 (193,8)	6,5

Tabulka 4.1 Vyhodnocení zkoušek čerstvé směsi a vliv na vlastnosti čerstvé směsi



Graf 4.4.2 Porovnání hodnot Aspect Ratio a výsledků ze zkoušek rozlití a jejich vliv na zpracovatelnost čerstvé maltové směsi

Zkoušky rozlití byly prováděny na maltových směsích připravených s příměsemi představenými výše. Pro jednotlivé materiály byla provedena komplexní analýza a bylo nutné prokázat vliv tvaru částic jemných podílů na tekutost a zpracovatelnost směsi, následně na fyzikální vlastnosti. V případě elektrárenských popílků bylo prokázáno, že čím vyšší je hodnota Aspect Ratio, tzn. zrna se přibližovala kulatému tvaru částic s nižší pórovitostí, tím nižší byla tekutost připravovaných směsí. To znamená, že byla zvýšena potřeba vody k dosažení stejné zpracovatelnosti. Tento předpoklad byl potvrzen u elektrárenského popílku Tušimice, což bylo prokázáno i při mikroskopických měřeních. V tomto případě bylo stanoveno velké množství kulových částic s hladkým povrchem v oblasti středních zrn této příměsi. Vzhledem k malé velikosti částic a vazeb, které mezi nimi existují, jsou mleté vápence velmi soudržné a vyžadují velkou energii pro dosažení požadované tekutosti. Mleté vápence s protáhlým tvarem částic, podstatně vyšší pórovitostí a drsností zrn dosahovaly srovnatelné zpracovatelnosti jako směsi s elektrárenskými popílkami. Nejstabilnější směsí s nejvyšší hodnotou rozlití byla v tomto případě směs s mletým vápencem značeným 8/V. Tento vápenec obsahuje poměrně vysoké procento částic přibližujících se kulovitému tvaru.

4.2V – trychtýř

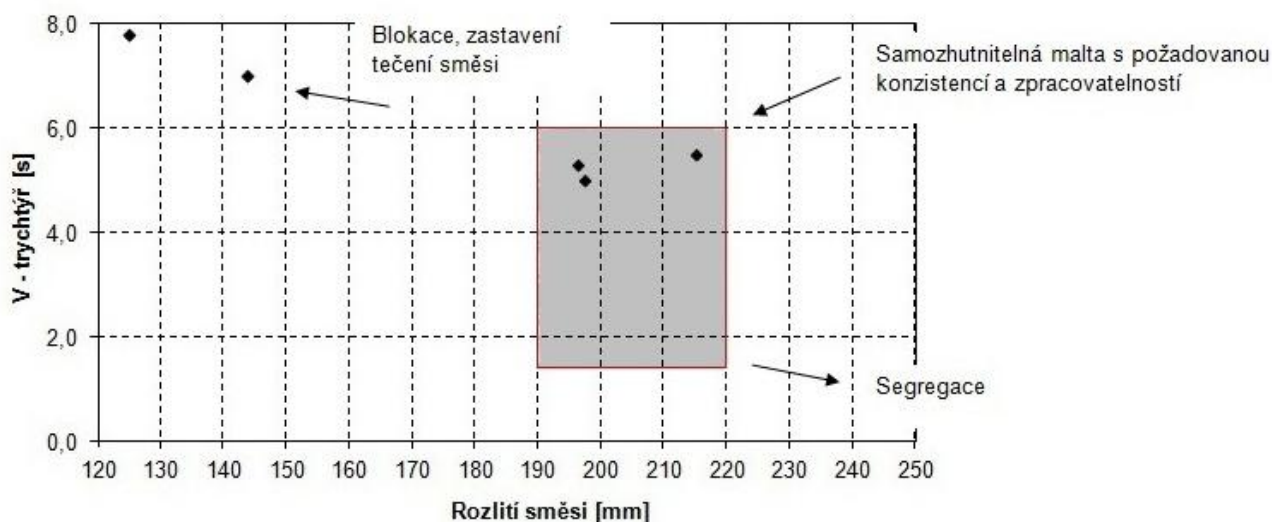
Touto zkouškou je možné měřit parametry relativní viskozity a chování malty při případné blokaci. Avšak absolutní hodnoty viskozity pasty můžeme získat pouze pomocí rotačního viskozimetru. Průměrný výtokový čas, který byl měřen pomocí V – trychtýře na maltových směsích, byl sledován ve dvou po sobě jdoucích měřeních. Měření času začíná

po otevření propadliště v ústí trychtýře a končí tehdy, je – li vidět vertikálně skrz V – trychtýř. Původní zkušební metoda byla vyvinuta v Japonsku a formulována Ozawou et al. (1995). V tomto případě je čas měření inverzním k naměřenému a zní následovně:

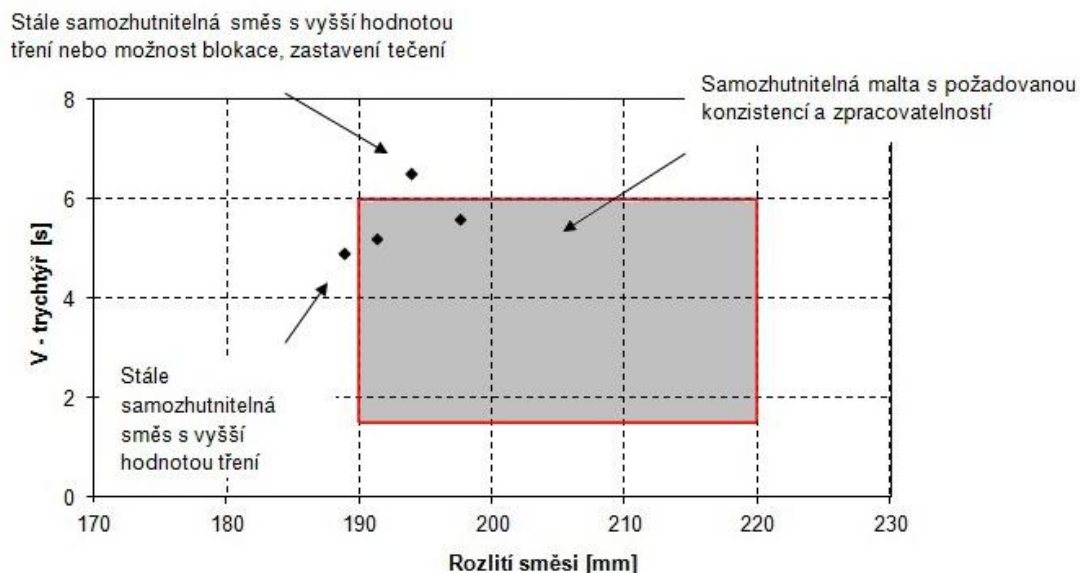
$$t_{v,rel} = \frac{10}{t_v} \quad [s]$$

Rovnice 4.3

Pokud není uváděno jinak, literatura se odkazuje na V – trychtýře, jaké jsou používané v případě samozhutnitelných betonů. V tomto případě byl použit menší V – trychtýř, avšak ve zmenšené verzi, postup zůstává stejný. Zkušební pomůcky i zkušební postup jsou navrženy podle návrhu normy EN 12350 – 9, která je první představenou společnou evropskou normou v oblasti zkoušení samozhutnitelných betonů.



Graf 4.4.3 Závislost rozlití směsi [mm] na rychlosti tečení [s] směsi s elektrárenskými popílky (40% náhrady z hmotnosti cementu) a zobrazení oblasti, ve které se vyskytují směsi s požadovanou konzistencí a zhutnitelností podle určených požadavků



Graf 4.4.4 Závislost rozlití směsi [mm] na rychlosti tečení [s] směsí s frakcemi mletého vápence (25% náhrady z hmotnosti cementu) a zobrazení oblasti, ve které se vyskytují směsi s požadovanou konzistencí a zhutnitelností podle určených požadavků

Vyhodnocení výsledků

Pro ilustraci byly vytvořeny grafy (graf 4.3 a 4.4) se znázorněním zpracovatelnosti a tekutosti směsi s aplikací jednotlivých příměsí. V grafu je vidět závislost doby tečení pomocí V – trychtýře a hodnoty rozlití maltové směsi, které byly získány pomocí Hägermannova kužele. Dále je zvýrazněna oblast pro takzvané SCC malty, kde jsou přidány horní a dolní meze jednotlivých parametrů pro samozhutnitelnou a dobře zpracovatelnou směs. Toto okno bylo vytvořeno podle předem zvolených požadavků. Směsi zobrazené ve zmíněném okně byly vyhodnoceny jako stabilní, s dostatečnou tekutostí a vhodnou zpracovatelností bez známek segregace. Na druhou stranu, ne všechny směsi, které jsou mimo vyznačenou oblast jsou nevhodné. Například v grafu 4.4 vlevo od zobrazené oblasti – tato konkrétní malta (s mletým vápencem 7/V) prokazuje vhodný průtokový čas, avšak hodnota rozlití je poměrně nízká. V závěru však můžeme vyhodnotit většinu směsí jako vysoce viskózní, které mají dostatečnou plnicí schopnost. Velmi krátké doby průtoku však značí nízkou viskozitu směsi, nicméně tyto směsi mají stále dobrou stabilitu. Toto zjištění můžeme připsat návrhu směsi pomocí komplexní analýzy a předpokladu na základě chování jednotlivých materiálů v suchém stavu.

4.3 Reologické chování pasty – viskozita směsi

Pro tuto práci byla vybrána práce s maltovými směsmi s konstantním w/p, tzn. součinitelem vody ku všem jemným podílům. Složení maltové směsi je zobrazeno v tabulce

3.1. V každé následně namíchané směsi byl zvyšován podíl jednotlivých příměsí a to ve 4 krocích, v případě elektrárenských popílků v rozmezí 30 – 45% a u frakcí mletého vápence 15 – 30%. Proto můžeme říci, že byly připraveny směsi s rozdílným vodním součinitelem (w/c). Cementová pasta a cementová pasta s příměsemi, kterou řadíme mezi kompozitní materiál, obaluje a odděluje zrna kameniva a vytváří „lubrikační“ vrstvu, která snižuje tření mezi jednotlivými zrny a usnadňuje pohyb. Složité děje mezi pastou a kamenivem potom řídí tečení čerstvé směsi a zajišťují určitou míru zpracovatelnosti (konzistence).

Reologická odezva, deformace a tečení čerstvé směsi, závisí na velikosti smykového napětí. Obecně můžeme říci, že u vícefázového materiálu, jakým na například beton nebo malta, budou výsledky měření při velmi malých hodnotách napětí (deformacích) implikovat jiné reologické parametry, než výsledky naměřené při velkých hodnotách. Základní reologické charakteristiky, jako je namáhání na mezi kluzu a viskozita, umožňují předpovědět hodnotu deformace nebo tečení v důsledku daného smykového napětí. Z výsledků měření deformací a tečení materiálu lze naopak vypočítat velikost napětí. [31]

Reometry je v dnešní době možné naprogramovat na různé režimy testování, při nichž se deformační rychlost mění podle předem určeného vzorce. Tím se podmínky testování přibližují realitě, nicméně stále jsou dost vzdálené deformačním rychlostem, které se vyskytují při manipulaci a ukládání čerstvého betonu v praxi. Metody měření základních reologických charakteristik čerstvého betonu se stále zlepšují, nesmíme však zapomínat na to, že každý z testů je při aplikaci na takto komplexní a variabilní materiál nějak omezen. Aplikace reologie na čerstvou směs je obtížná jak po technické stránce při vlastním testování čerstvých směsí, tak i při výběru vhodných testovacích metod, ale i povahou svých základních předpokladů. Reologické vlastnosti čerstvého betonu se neustále a nelineárně mění v důsledku progresivních fyzikálně – chemických změn. Rychlost a rozsah změn nezávisí pouze na složení směsi, ale také na okolních podmínkách.

Vztahy mezi základními reologickými charakteristikami, které jsou často používány při aplikaci praktické reologie na čerstvý beton, odrážejí dva typy chování: Newtonské a nenewtonské. [31]

Newtonské tečení

„Newtonovská“ kapalina se chová podobně jako ideální pevné těleso vystavené smykovému napětí. Smykové napětí τ vytváří smykové přetvoření (deformaci) γ přímo úměrné velikosti smykového napětí. Koeficient přímé úměry je smykový modul G a vztah lze vyjádřit následovně:

$$\tau = G \cdot \gamma.$$

Rovnice 4.4

Je – li Newtonovská kapalina vystavena smykovému napětí, deformuje se přímo úměrně velikosti napětí, ale na rozdíl od ideálního tuhého tělesa pokračuje deformace kapaliny po dobu působení napětí.

Tečení u kapalin se obvykle popisuje jako relativní pohyb dvou paralelních „vrstev“ a u pomalých deformačních rychlostí se předpokládá tečení laminární. Neustálé smykové napětí vyvolává pohyb, který má rychlost v . Newtonovské laminární tečení je vyvoláno tehdy, je – li smykové napětí přímo úměrné gradientu rychlosti D , který představuje změnu rychlosti v vrstvy pohybující se o jednotkovou délku y vzdálenosti mezi pohybujícími se vrstvami. Vztah lze vyjádřit následovně:

$$\tau = \frac{\eta \cdot dv}{dy} = \eta \cdot D .$$

Rovnice 4.5

Rychlostní gradient D je roven rychlosti změny smykové deformace v čase a rovnice zní následovně:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \text{ pro smykové napětí (viz. výše)}$$

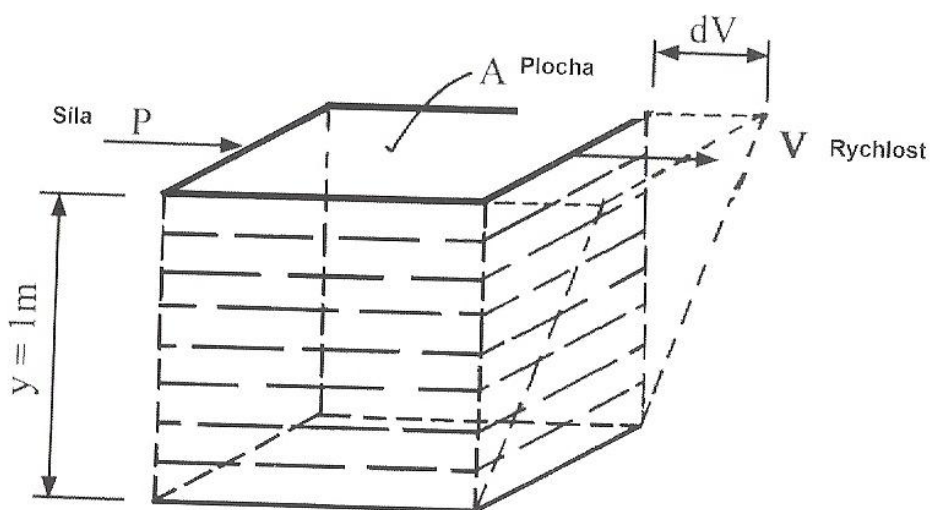
Rovnice 4.6

nebo

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \text{smykové napětí / deformační rychlost.}$$

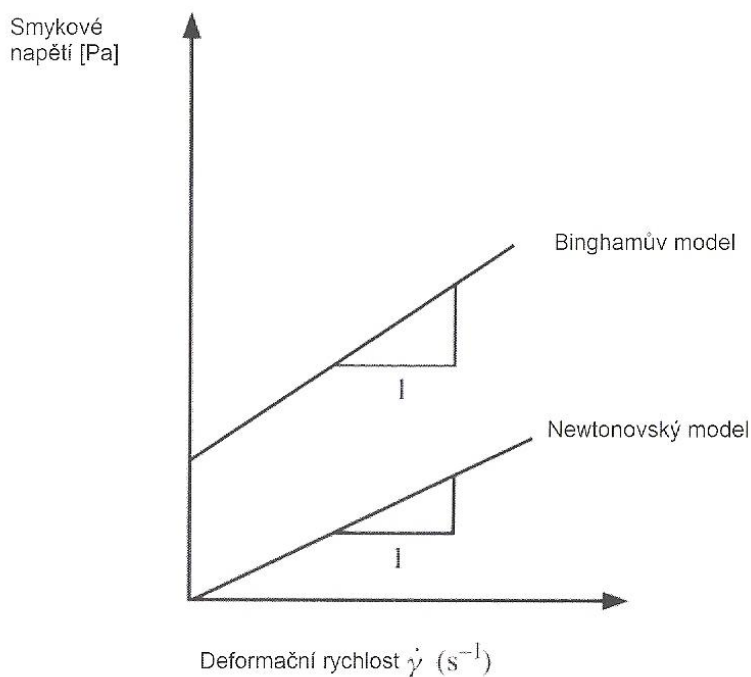
Rovnice 4.7

V základních jednotkách SI je proto viskozita měřena v $\text{N/m}^2/\text{s} = \text{Pa} \cdot \text{s}$ (Pascal sekunda, kde $1 \text{ Pascal} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$).



Obrázek 4.2 Laminární viskózní tok Newtonovské kapaliny [31]

Viskozita newtonovských kapalin je potom určena měřením smykového napětí vyvolaného smýkáním kapaliny danou deformační rychlostí $\dot{\gamma}$. Vztah mezi smykovým napětím a deformační rychlostí je lineární. Křivky toku všech newtonovských kapalin jsou přímky procházející počátkem (obrázek 4.3). Viskozitu newtonovské kapaliny (tzn. gradient křivky) lze určit z jediného měření odpovídajícího páru hodnot smykového napětí a deformační rychlosti. Viskozita je nezávislá na smykovém napětí a deformační rychlosti. [30]



Obrázek 4.3 Diagram tečení Newtonovské kapaliny a Binghamovské viskózní kapaliny [31]

Nenewtonské tečení

Existuje mnoho kapalin, které nevykazují „ideální“ newtonovské chování. Viskozita takových kapalin není nezávislá na smykovém napětí nebo smykové rychlosti. Jejich chování se navíc často mění v závislosti na době působení konstantního smykového napětí a v závislosti na jeho změnách. Některé nenewtonské kapaliny mohou vykazovat lineární vztah mezi smykovým napětím a deformační rychlostí, který však začíná až po dosažení určité minimální úrovně smykového napětí. Hodnota tohoto minimálního napětí potřebného k tomu, aby započalo tečení, se nazývá napětí na mezi toku τ_0 .

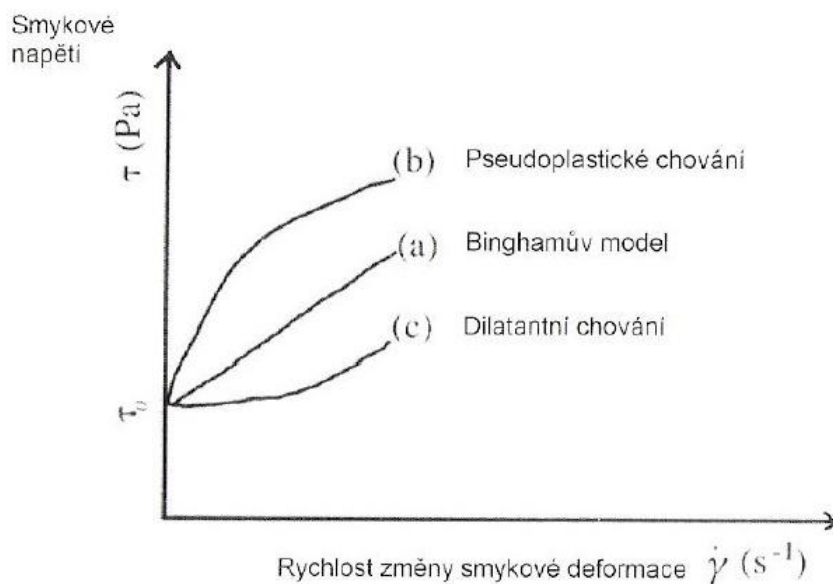
Nenewtonské kapaliny, které vykazují nulovou hodnotu napětí na mezi toku se obecně nazývají kapaliny pseudoplastické. Křivka tečení (b) zobrazená na obrázku 4.4 vykazuje s rostoucí hodnotou smykového napětí snížení viskozity, což je projevem pseudoplastického chování a je v protikladu k chování dilatantnímu znázorněného křivkou

(c). Chování většiny pseudoplastických kapalin se řídí přibližně exponenciálním vztahem vyjádřeného následovně:

$$\tau = a \cdot \dot{\gamma}^n,$$

Rovnice 4.8

kde a je konstanta vztahující se ke konzistenci kapaliny, $n < 1$ je pro pseudoplastické chování nebo $n > 1$ pro dilatantní chování.



Obrázek 4.4 Diagramy toku různých typů nenewtonských kapalin [31]

Mnohé nenewtonovské kapaliny vykazují změnu viskozity poté, co bylo dosaženo určité rychlosti změny smykového napětí, která byla dále udržována jako konstantní. Rychlost snižování viskozity může v průběhu trvání deformace klesnout a ustálit se. Kapaliny mohou vykazovat „obnovu původního stavu“ poté, co smykové (deformační) napětí poklesne a ustane. Může dojít k obnovení původní nebo jiné hodnoty napětí na mezi kluzu a celý proces může být opakovatelný. Takovéto kapaliny nazýváme tixotropní (obrázek 4.5), zatímco reopexní kapaliny mají chování opačné. [31]

Čerstvý beton je složitý kompozitní materiál, k němuž lze po stránce reologie přistupovat různě. Chování čerstvé směsi lze považovat za chování zrnité formy pevné fáze s velkým rozsahem oddělených částic, z nichž každá je lubrikována různým množstvím kapalné fáze (pasta nebo voda), přičemž v malém množství může být přítomna i plynná fáze (vzduch). Deformace takového materiálu závisí na vzájemné interakci jednotlivých částic ve

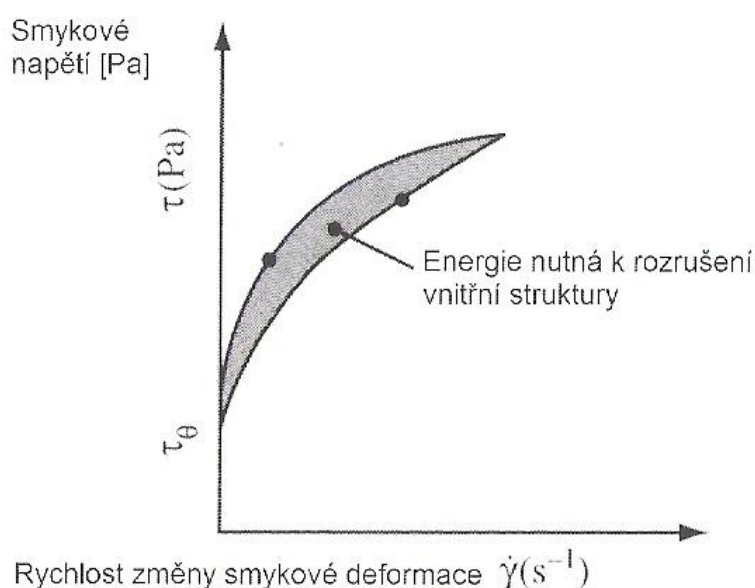
směsi. Obalení částic je značně závislé na jejich velikosti, tvaru a charakteristikách povrchu a také na tom, jakým způsobem se částice během míchání rozmísí.

Deformační rychlosti, jímž je namíchaná směs vystavena při tečení, se těžko odhaduje, protože relativní polohy, vzdálenosti a tloušťka obalení částic kameniva jsou nepravidelné a v průběhu deformace nebo toku směsi se taktéž mění. V této kapitole je představen přehled metod posuzování základních reologických vlastností čerstvé směsi, zejména napětí na mezi kluzu a plastické viskozity. Tato zkoušení byla měřena pomocí rotačního viskozimetru Viskomat NT. Chování čerstvého betonu je podobné chování několika typu neneutonských kapalin. V případě těchto směsí je konzistence nižší, proto můžeme usuzovat na Binghamovskou kapalinu (křivka (a) v obrázku 3.4), kde hodnota napětí na mezi kluzu klesá se vzrůstající konzistencí (tzn. například hodnotou rozlití). Toto chování je dáno vztahem:

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma},$$

Rovnice 4.9 Výpočet smykového napětí

kde τ_0 je napětí na mezi kluzu a μ je plastická viskozita, což ukazuje na typickou Binghamovskou kapalinu. Teoreticky můžeme říci, že malty s nízkou zpracovatelností se nejčastěji chovají jako Binghamovské kapaliny s relativně vysokou hodnotou napětí na mezi kluzu, zatímco směsi s vysokou tekutostí vykazují nulové nebo velmi nízké napětí na mezi kluzu a často se chovají jako Newtonské kapaliny. [31]



Obrázek 4.5 Neneutonské kapaliny vykazující tixotropní chování [31]

Pasty a příměsi

Normální cement reaguje s vodou, tuhne a tvrdne v průběhu času. V důsledku toho, se reologie malty s časem mění vzhledem hydrataci cementu. Pro tato zkoušení byla vytvořena řada cementových kaší s příměsemi různých elektrárenských popílků a různými frakcemi mletého vápence. Aplikované příměsi jsou považovány jak za inertní (mleté vápence), tak za aktivní (elektrárenské popílků), chemicky stabilní s rozdílnými fyzikálně – mechanickými a fyzikálně – chemickými vlastnostmi (tabulka 4.2). Pasty byly navrženy a připraveny stejným způsobem jako následně namíchané maltové směsi a to – bez přídavku plastifikátoru, se stejným procentuelním zastoupením příměsí. Reologické vlastnosti byly měřeny pomocí rotačního viskozimetru s definovanou sekvencí smyku (Viskomat NT) k ověření chování past s rozdílným obsahem příměsí a s rozdílnou příměsí.

V pastách byl použit součinitel vody ku všem jemným podílům, stejně jako v případě maltových směsí. Návrh složení byl na základě normové malty, tzn. ve směsi bylo použito 450 g cementu, a součinitel vody ku všem jemným podílům $w/p = 0,691$. Namíchané pasty měly procentuelní náhradu cementu a to v případě frakcí mletého vápence v rozmezí 15 – 30% a u elektrárenských popílků bylo toto rozmezí 30 – 45%. Mez kluzu popisuje smykové napětí, které je potřebné k zahájení toku malty, zatímco plastická viskozita popisuje, jak snadno mohou malty téci. Malta s nízkou hodnotou sednutí může být popsána jako malta s vysokou hodnotou meze kluzu, zatímco samozhutnitelné malty lze považovat za pravý opak.

Připravená pasta	Měrný povrch příměsí [$\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$]	Hodnota Aspect Ratio [-]
7/V	360	0,779
8/V	490	0,840
9/V	470	0,774
12/V	490	0,726
EDE	400	0,856
EME	240	0,878
ELE	300	0,830
EPC	300	0,861
ETU	250	0,912

Tabulka 4.2 Příklady cementových past s frakcemi mletého vápence a elektrárenskými popílků a jejich fyzikálně – mechanické vlastnosti

Viskozita je důležitou materiálovou vlastností, která popisuje odpor malty proti schopnosti tečení – tato schopnost může být považována za vnitřní tření malty. Pomocí rotačního viskozimetru můžeme vyhodnotit řadu výše zmíněných parametrů čerstvé směsi v průběhu jednoho měření.

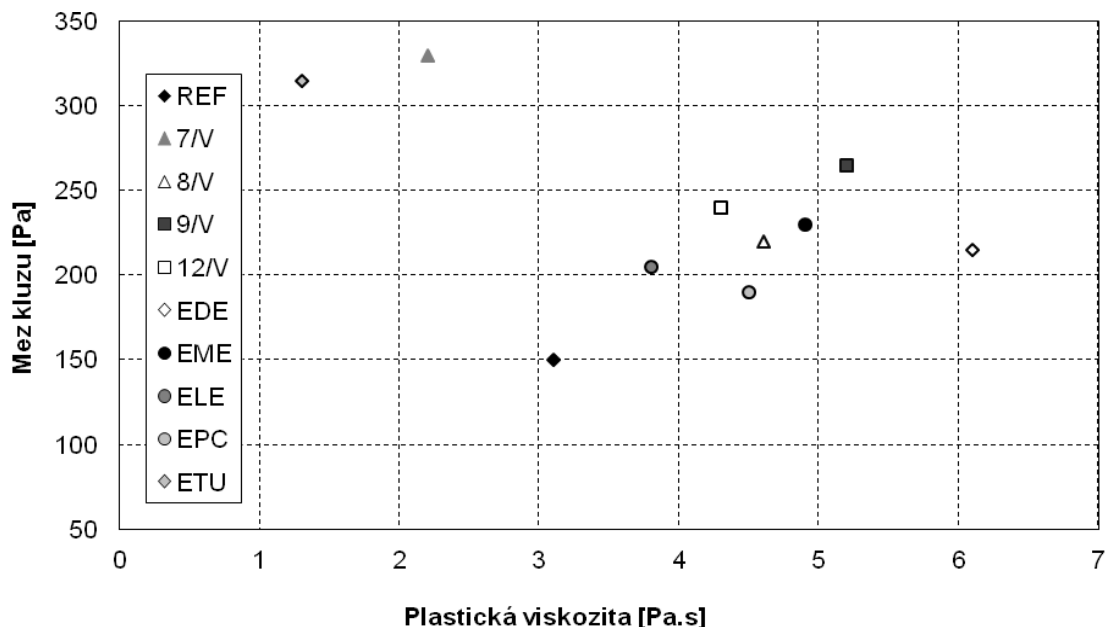
4.3.1 Vliv rozdílných příměsí v míchané směsi

Výsledky jasně ukazují (graf 4.5), že vlastnosti jemných podílů výrazně ovlivňují mez kluzu a plastickou viskozitu připravených cementových past. Všechny cementové pasty obsahovaly poměrně velké množství jemných podílů a tudíž vysoké hodnoty měrných povrchů, které potřebují dostatek vody k tomu, aby byla vytvořena pasta a následně maltová směs s dobrou zpracovatelností. Zvýšená jemnost mletí se odráží ve výsledné vyšší mezi kluzu a plastické viskozitě připravené pasty. Z výsledků však můžeme vidět nelineární závislost mezi rostoucím měrným povrchem příměsí a plastickou viskozitou směsi. Pro návrh a dosažení námi požadované mezerovitosti maltové směsi je ideální použít takovou příměs, která ve směsi dosahuje relativně nízkou hodnotu nízkého napětí na mezi kluzu.

Vzhledem k tomu, že jemné příměsi použité v této práci ukazují poměrně velké rozdíly jak v křivkách zrnitosti, tak v měrném povrchu a tvarovém indexu, je velmi nesnadné nalézt jasné vztahy mezi jednotlivými parametry a reologickými vlastnostmi. Velké množství nepříznivě tvarovaných částic jsou považovány za hlavní důvod vyšší potřeby vody pro požadovanou tekutost směsí, tzn. vyšší napětí na mezi kluzu a plastickou viskozitu. To je zřejmé pro frakci mletého vápence 12/V, která obsahuje poměrně vysoké procento velmi jemných frakcí pod 0,125 mm. Cementová pasta obsahující elektrárenský popílek Tušimice byla příliš tuhá, aby bylo možné změřit ji na viskozimetru požadovanou dobu. Výsledky této práce postupně ukazují, že jednotlivé částice mají velký vliv na plastickou viskozitu pasty. Do grafu byly položeny hodnoty s nejmenší procentuelní náhradou cementu jednotlivých příměsí, jelikož výsledky fyzikálně – mechanických vlastností těchto směsí vykazují nejlepší výsledky, jak je představeno v následujících kapitolách.

Nicméně, v některých literaturách se můžeme setkat s náznaky, že tvarový index takto jemných částic ovlivňuje i mez kluzu pasty. Cementová pasta a následně namíchaná maltová směs s příměsemi 7/V a el. popílkem ETU vykazuje vysokou mez kluzu a poměrně nízkou plastickou viskozitu. Což je rozdíl od obecného předpokladu, kde se setkáváme s vysokou mezí kluzu doprovázenou vysokou plastickou viskozitou. To znamená, že zpočátku tyto směsi mají vysokou počáteční odolnost vůči pohybu, ale tekutost směsi je snadnější než směs s odpovídající mezí kluzu a vyšší plastickou viskozitou. Existence meze kluzu ve vodních suspenzích a maltách jsou jednotlivé částice propojeny Van der

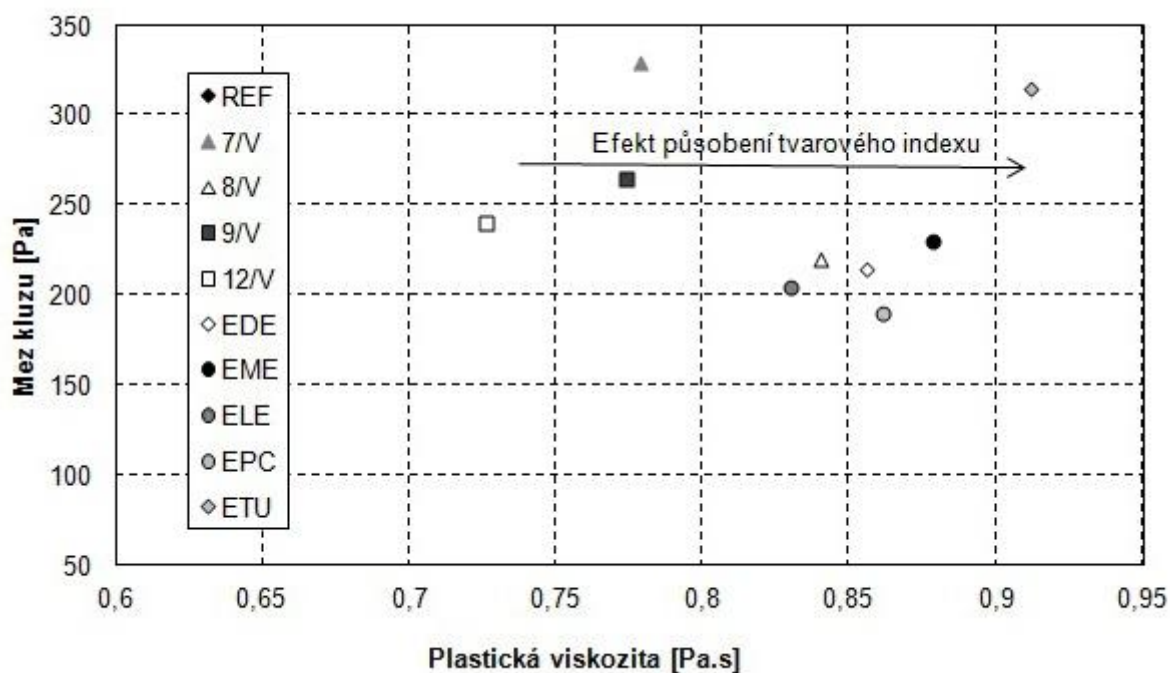
Waalsovými silami více než elektrostatickými. V důsledku vyšší jemnosti mletí je usuzováno na silnější Van der Waalsovy síly mezi aglomerovanými částicemi. Bez ohledu na objem fileru a pevnou složku suspenze.



Graf 4.4.5 Mez kluzu ku plastické viskozitě připravených cementových past o obsahem elektrérenských popílků (náhrada cementu 30% z hmotnosti cementu) a frakcemi mletých vápenců (náhrada cementu 15% z hmotnosti cementu)

4.3.2 Vliv tvarového indexu

Aby bylo možné posoudit vliv tvaru částic na reologické vlastnosti cementových past a připravených maltových směsí, měly by být některé křivky zrnitosti standardizovány. To bylo provedeno tak, že se provedla kombinace jednotlivých materiálů pro návrh maltových směsí. Výsledky ukazují, že hlavní rozdíl v maltách s příměsemi s kulovitými částicemi a malty s příměsemi s nepravidelnými tvary částic, je viděn na plastické viskozitě směsí. Vyšší viskozita malt s částicemi nepravidelného tvaru je zapříčiněna rostoucím spolupůsobením mezi jednotlivými částicemi. Je dobře známo, že jakákoliv odchylka od kulovitého tvaru částic způsobí zvýšení viskozity směsi, ovšem za předpokladu, že pracujeme se stejným množstvím jednotlivých příměsí. V níže uvedeném grafu 4.6 a tabulce 4.3 můžeme vidět závislost plastické viskozity a meze kluzu v závislosti na tvaru zrn jemnozrnných příměsí.



Graf 4.4.6 Efekt působení tvarového indexu jemnozrnných částic na plastickou viskozitu směsi v závislosti na mezi kluzu připravené směsi (u elektrárenských popílků 30% náhrada z hmotnosti cementu, u frakcí mletého vápence 15% náhrada z hmotnosti cementu)

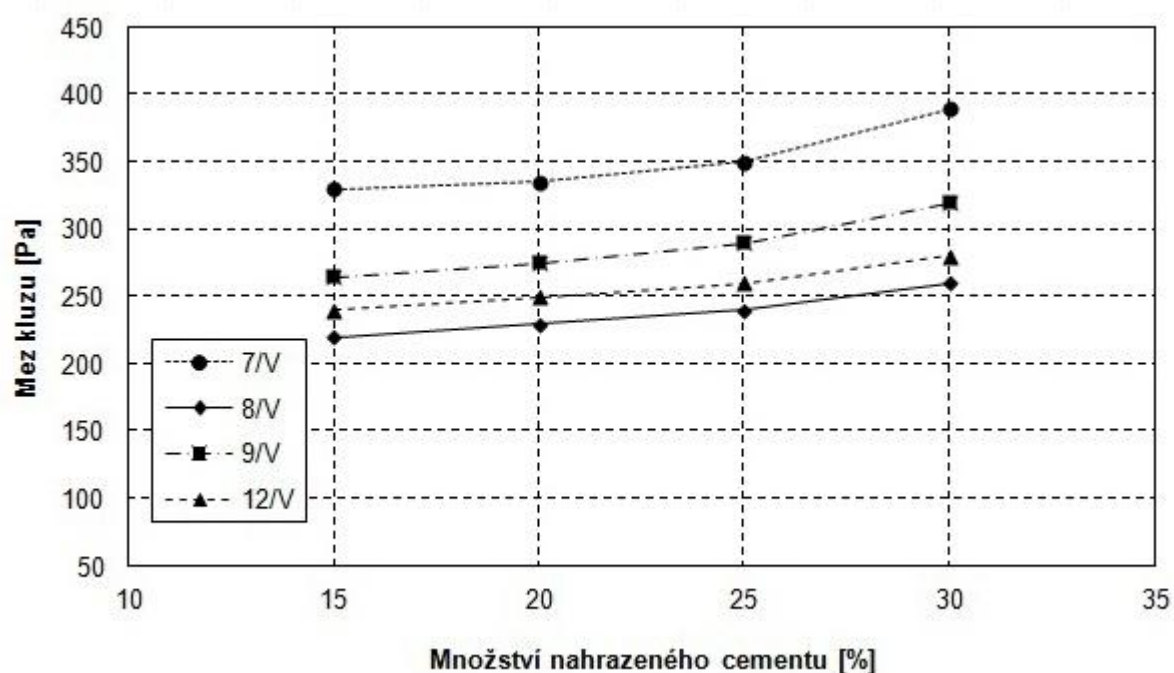
	Mez kluzu [Pa]	Plastická viskozita [Pa·s]	Hodnota Aspect Ratio [-]
7/V	330	2,2	0,779
8/V	220	4,6	0,840
9/V	265	5,2	0,774
12/V	240	4,3	0,726
EDE	215	6,1	0,856
EME	230	4,9	0,878
ELE	205	3,8	0,830
EPC	190	4,5	0,861
ETU	315	1,3	0,912

Tabulka 4.3 Hodnoty naměřených veličin pro posouzení efektu působení tvarového indexu na plastickou viskozitu směsi v závislosti na mezi kluzu (u elektrárenských popílků 30% náhrada z hmotnosti cementu, u frakcí mletého vápence 15% náhrada z hmotnosti cementu)

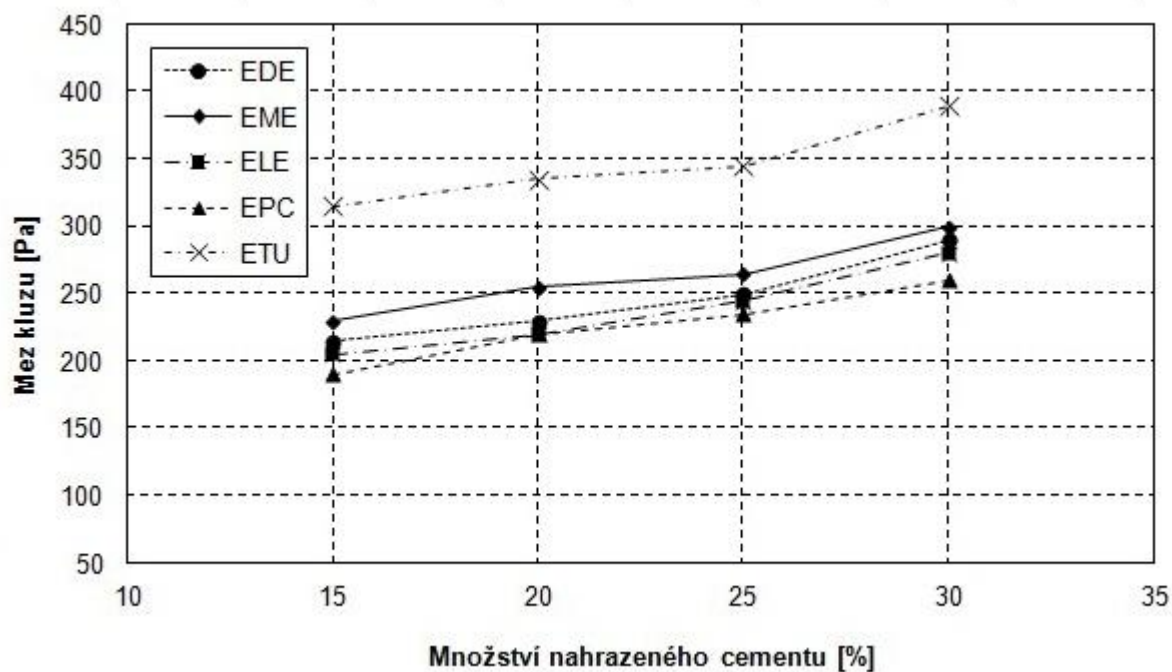
4.3.3 Vliv rozdílného množství přidávané příměsi

Upravená množství jemnozrnných podílů v maltových směsích mají ve většině případů pozitivní efekt na vlastnosti připravené směsi, především na konzistenci a

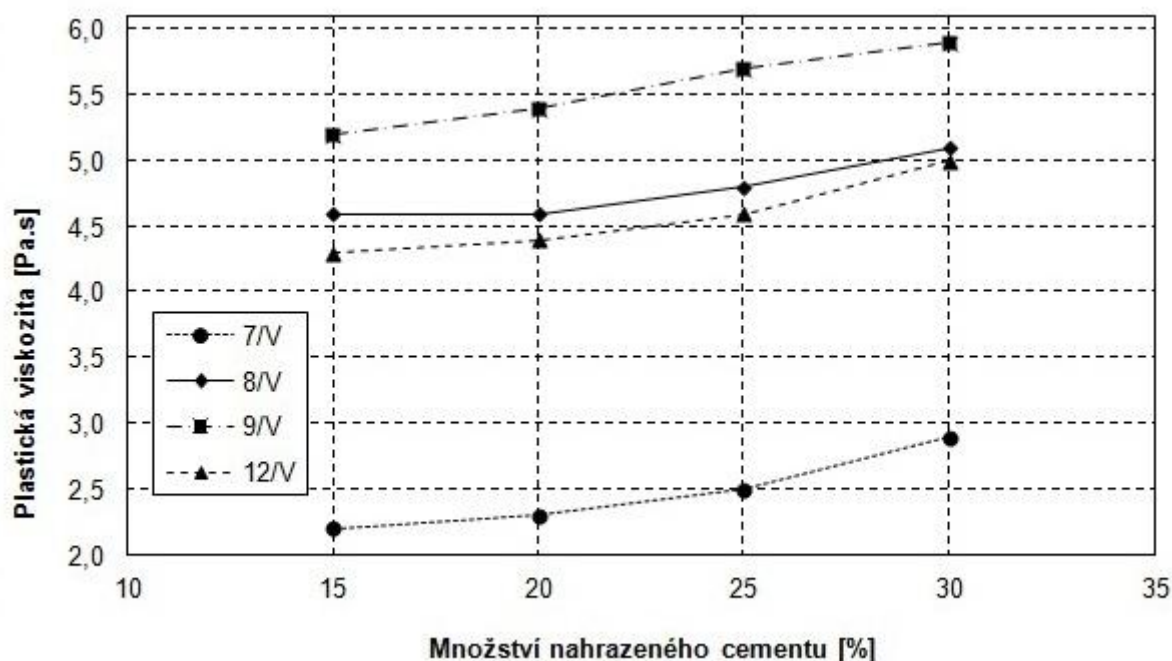
zpracovatelnost čerstvé směsi. Zvyšující se množství jemných podílů zvyšuje potřebu vody na obalení všech částic a s tím související dosažení požadované zpracovatelnosti směsi. Efekt rozdílného množství jemných podílů je zobrazen v grafu 4.7 a 4.8.



Graf 4.4.7 Mez kluzu jako funkce množství přidané frakce mletého vápence do daných směsí

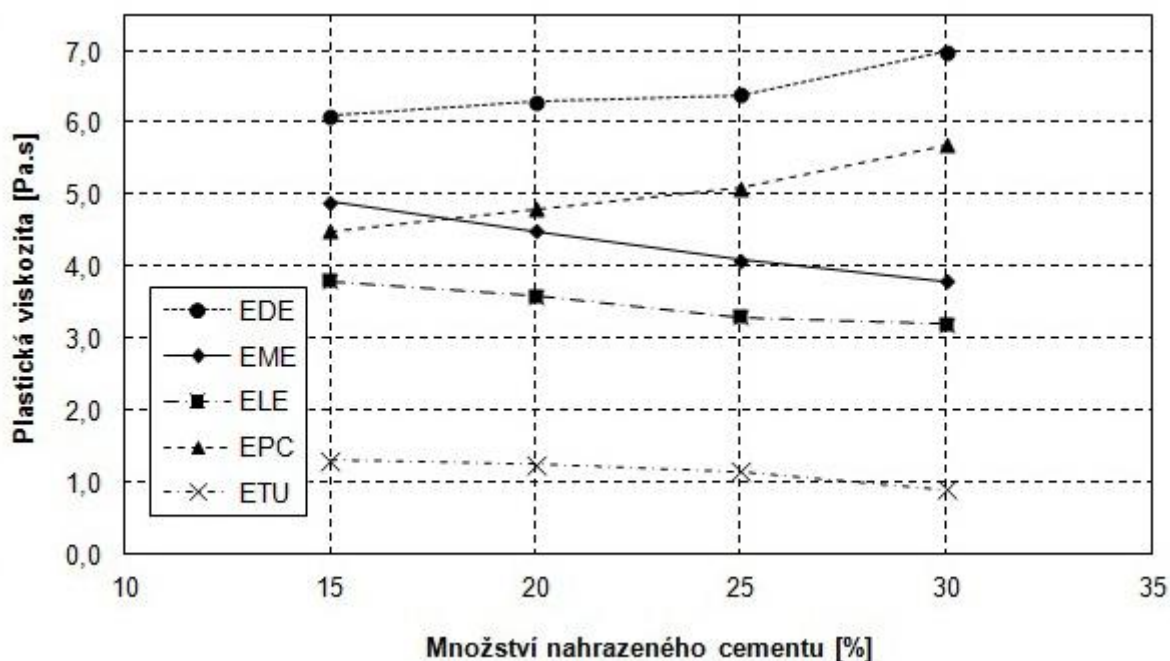


Graf 4.4.8 Mez kluzu jako funkce množství přidaných elektrérenských popílků do daných směsí



Graf 4.4.9 *Plastická viskozita jako funkce množství přidávaných frakcí mletého vápence do daných směsí*

Účinek množství jemných podílů na plastickou viskozitu bude složitějším než účinek množství jemných podílů na mez kluzu těchto směsí. Tento jev může být vysvětlen třením jednotlivých částic v připravené pastě. V případě nejmenšího procentuelního nahrazení cementu jemnými podíly můžeme říci, že není dostatečné množství na vyplnění mezer mezi většími zrny, což má za následek vysoké vnitřní tření a tím vysokou viskozitu směsi. Zvyšující se množství jemných podílů zvyšuje tření mezi většími částicemi směsi, zároveň však mohou snižovat plastickou viskozitu. Pokud dojde ke zvýšení plastické viskozity můžeme usuzovat na zvětšení celkového měrného povrchu směsi, což může být závislé na tvarovém indexu takto jemných příměsí.



Graf 4.4.10 Plastická viskozita jako funkce množství přidávaných elektrérenských popílků do daných směsí

4.4 Shrnutí poznatků

Z této kapitoly vyplývá, že reologické vlastnosti jsou závislé na komplexní analýze suchých příměsí, a že je množství vody v míchaných směsích silně závislé na vlastnostech jemných podílů. V závěru můžeme říci, že velké množství jemných podílů ve směsi přispívá ke zvyšování plastické viskozity v důsledku vysokého tření mezi jednotlivými částicemi. Výsledky však také ukazují, že v případě drcených jemných částic (tzn. frakcí mletého vápence) je viskozita směsi ovlivněna jejich tvarovým indexem. V tomto případě bylo opět potvrzeno, že částice frakce mletého vápence 8/V odpovídají předpokládané viskozitě směsi s tím účelem, abychom dosáhli požadované tekutosti směsi a následně došlo k vyplnění mezer mezi velkými zrny kameniva a cementu v připravené směsi.

Dále je nutné říci, že ať už nízká nebo vysoká mez kluzu a plastická viskozita směsi vyplývající z poměrně vysokého množství jemných příměsí může být efektivně ovlivněna použitím superplastifikátorů nebo viskozitou modifikující přísadou. V tomto případě nebyl prokázán přímý vliv tvarového indexu na tekutost směsi. V tomto případě nebyl prokázán přímý vliv tvarového indexu na tekutost směsi. Avšak spolu se stanovenou jemností mletí, morfologií zrn a ostatními vlastnostmi se dá obecný předpoklad chování čerstvých směsí ze stanovených výsledků definovat.

Z výsledků a předpokladů vztahujících se k plastické viskozitě a mezi kluzu můžeme také odvodit odolnost proti rozměšování směsi a dosažení požadované mezerovitosti směsi.

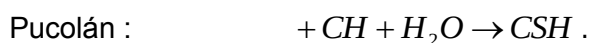
Z pohledu k rozměšování můžeme říci, že čím vyšší je hustota kameniva použitého ve směsi než hustota cementové pasty a viskozita této směsi je nízká, je pravděpodobné, že bude docházet k jejímu rozměšování. Tento předpoklad je však nutné ještě ověřit a prokázat.

5 HYDRATACE A MIKROSTRUKTURA

Samozhutnitelnost maltové nebo betonové směsi je dosažitelná pouze na základě významných změn ve složení směsi a využití dominantních vlastností jednotlivých složek a především jemných příměsí pod velikost zrna 125 μm . Podíl těchto příměsí má významný vliv na základní chování a vlastnosti připravovaných směsí. V počátečních fázích této práce vznikla otázka, jak tyto jemnozrnné podíly ovlivňují mikrostrukturu směsi v porovnání se směsí referenční, tedy bez použití příměsí. V první části této kapitoly je představen teoretický předpoklad vývoje mikrostruktury tradiční cementové pasty a malty. Je zde popsán výpočet porozity podle Powersova modelu. Tento parametr se používá při zkoumání transportních mechanismů a trvanlivosti. Na základě rozdílného složení jednotlivých směsí a odlišných příměsí, které jsou v této práci použity, jsou zde rozebrány faktory, které ovlivňují mikrostrukturu a proces hydratace.

Často se předpokládá, že vliv jemnozrnných příměsí, a zejména pak **mikromletého vápence**, se omezuje pouze na změnu rychlosti reakcí. Podle mnohých autorů je tato příměs považována za inertní a proto se chemických reakcí neúčastní. Druhá teorie říká, že mikromletý vápenec inertní není a proto se reakcí účastní aktivně. Několik vědců dospělo k závěru, že v mladém betonu dochází ke zvýšené hydrataci cementového slínku (zejména C_3S), vyšší hustotě kompozitu, většímu vývinu CH díky novým nukleačním místům a tvorbě kalcium karboaluminát hydrátu v důsledku reakce mezi CaCO_3 z vápence a C_3A z portlandského slínku. Použijeme – li příměsi ve větším objemu se zrny menšími než 2 μm existuje vysoká pravděpodobnost, že se nedistribuuji rovnoměrně v celé cementové matici a že na určitých místech budou flokulovat. Tento jev může zapříčinit větší množství pórovitých zón v kompozitu.

Elektrárenský popílek. Chemické složení popílků je velmi podobné přírodním pucolánům. Chemické a fyzikální vlastnosti popílku do značné míry závisí na druhu použitého uhlí a typu kotlů. Jedná se o jemný prášek, který sestává zejména ze sklovitých dutých kulových částíček. Důležitým rozdílem mezi cementem a popílkem je mnohem nižší obsah CaO v popílků, což znamená, že vlastnosti popílku jsou pucolánové namísto hydraulických. Pucolán se skládá zejména z SiO_2 nebo SiO_2 a Al_2O_3 , které za přítomnosti vody reagují s Ca(OH)_2 a tvoří sloučeniny, které mají cementové, pojivové vlastnosti. Princip je znázorněn na následujících reakcích:



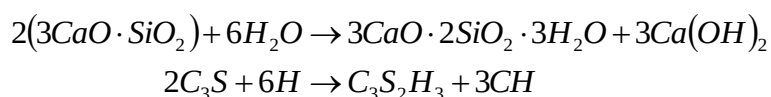
Zásaditost pórového roztoku se příliš nemění v důsledku chemické vazby CH. Cementový slínek a popílek reagují různě. Je obecně uznávaným faktem, že pucolánová reakce začíná být zjevná po 3 – 14 dnech po zamíchání s vodou, což znamená že 70 – 80% alitu obsaženého v běžném portlandském cementu zreagovalo. Někteří vědci dokonce uvádějí, že reakce se rozbíhají až po 28 dnech od zamíchání. Rychlost pucolánové reakce závisí na vlastnostech popílku a konkrétní směsi. [31]

5.1 Vývoj mikrostruktury maltových směsí

Portlandský cement se skládá z ostrohranných částic o velikosti 1 až 50 μm a vzniká drcením slínku a malého množství síranu vápenatého (CaSO_4). Slínek se skládá z několika látek, které se vytvářejí při vysoké teplotě v reakcích mezi oxidem vápenatým CaO a oxidem křemičitým SiO_2 , oxidem hlinitým Al_2O_3 a oxidem železitým Fe_2O_3 . V chemickém složení minerálů slínku nebo složek portlandského cementu převažují křemičitany vápníku (C_3S a C_2S), hlinitan vápenatý (C_3A) a aluminoforit vápenatý (C_4AF).

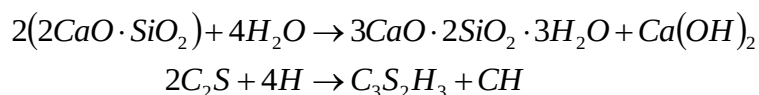
Hydratační reakce čtyř nejdůležitějších složek portlandského cementu při kontaktu s vodou jsou popsány v níže uváděných rovnicích. Slínkové minerály C_3S a C_2S nejsou při kontaktu s vodou stabilní a reagují podle rovnic 5.1 a 5.2. Výsledné produkty reakce jsou hydráty křemičitanu vápenatého (CSH) a hydroxid vápenatý (CH). Konečné produkty CSH se skládají z pevné látky, která má gelovité vlastnosti. Jejich celkový objem tvoří 50 až 60% celkového objemu pevných látek zcela ztvrdlého portlandského cementu. Jako takové jsou tedy nejdůležitějšími složkami hydratované cementové pasty.

Proces úplné hydratace C_3S :



Rovnice 5.1

Proces úplné hydratace C_2S :



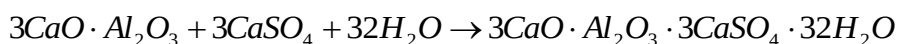
Rovnice 5.2

Krystalické jsou jen ve velmi omezené míře a můžeme je považovat za malé jehličkovité krystaly. Přesná struktura CSH není známa. V průběhu hydratace C_3S se většina CH vyvíjí jako hexagonální prismatické krystaly. Ty představují 20 až 25% celkového objemu pevných látek v cementové matici. Roztok v pórech zatvrdlé malty vykazuje díky přítomnosti CH silně

alkalickou reakci. Produkt reakce CH je snadno rozpustný a hladce se transformuje na jiné sloučeniny.

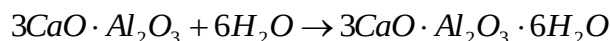
Slínkový minerál C_3A se při styku s vodou okamžitě váže a způsobuje značný vývin tepla a nižší konečné pevnosti. Proces reakce je tedy zpomalován přidavkem sádrovce, který negativní účinky zmírňuje. Je – li přítomen sádrovec $CaSO_4$, dochází k reakci, která má zobrazený průběh v rovnici 5.3. V první fázi se vytváří etringit (krystalizuje v podobě krátkých prismatických jehliček), což přispívá k prvotnímu nárůstu pevností. Není – li přítomen sádrovec, dochází k reakci 5.4 a vytváří se C_3AH_6 , který dále reaguje s dříve vzniklým etringitem a reakce dle rovnice 5.3. V této reakci vzniká monosulfát ($C_3A \cdot CaSO_4 \cdot H_{12}$) ve formě tenkých hexagonálních lamel.

Hydratace C_3A (za přítomnosti sádrovce):



Rovnice 5.3

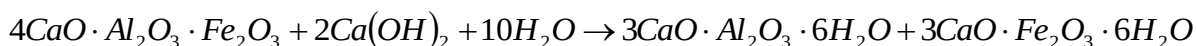
Hydratace C_3A (v nepřítomnosti sádrovce):



Rovnice 5.4

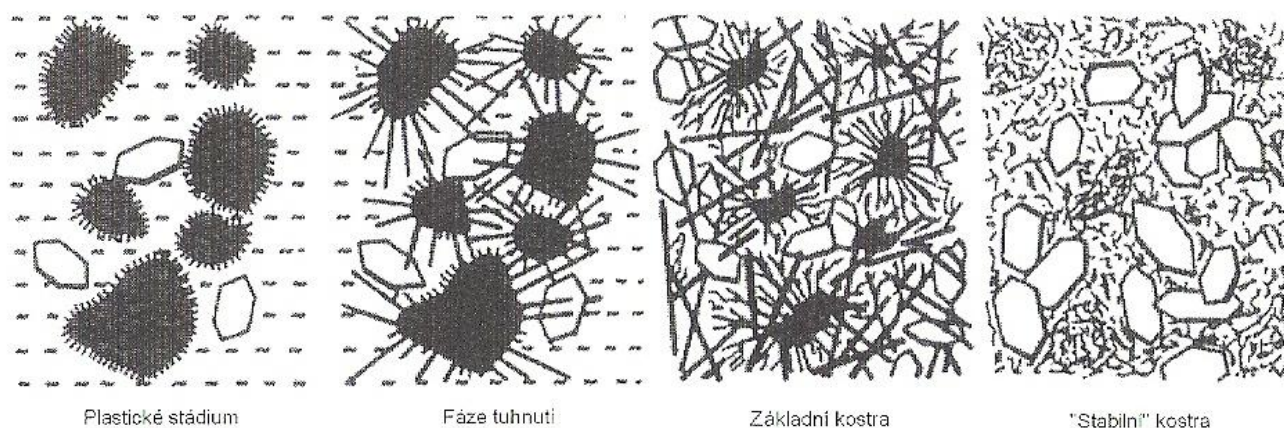
Předpokládá se, že slínkový minerál C_4AF reaguje s vodou a částí CH, která vzniká při hydrataci C_3S a C_2S . V reakci 4.5 vznikají dvě složky C_3AH_6 a C_3FH_6 .

Hydratace C_4AF :



Rovnice 5.5

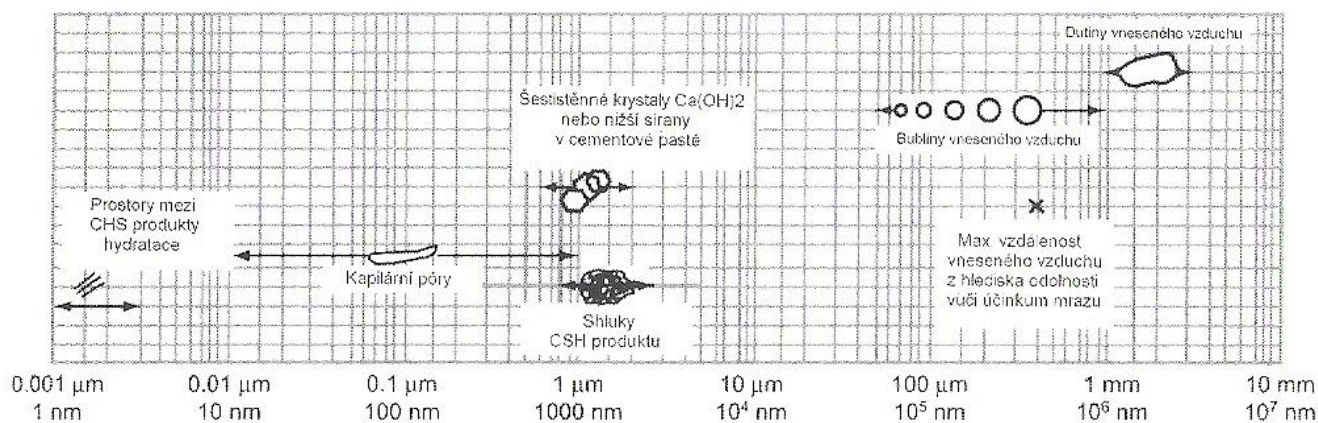
Mezi produkty výše uvedených reakcí se mohou objevit i další látky. Ty jsou však méně důležité. Reaktivita hydratačních reakcí nezávisí pouze na obsahu jednotlivých složek, ale taktéž na jemnosti mletí cementu a případně přidaných jemných příměsí do směsi. Vyšší jemnost reakce urychluje. Změny v mikrostruktuře v průběhu hydratace jsou schematicky znázorněny na obrázku 5.1. [31]



Obrázek 5.1 Schematické znázornění hydratačního procesu [31]

5.1.1 Mikrostruktura a struktura pórů ve ztvrdlé maltové směsi

Pevné složky zatvrdlé maltové směsi se skládají ze tří hlavních fází: nehydratovaného cementu, povrchových produktů jako jsou CSH, které jsou amorfni a mikroporézní a pórových produktů, jako je CH, které tvoří krystaly. Ztvrdlá malta obsahuje kromě pevných složek i póry a dutiny. Přehled typických velikostí pevných složek a pórů je zobrazen na obrázku 5.2.



Obrázek 5.2 Typické rozměry částic různých fází ve ztvrdlé cementové maltě [31]

Tvar pórů porézní látky je nepříliš dobře definovaný pojem. Protože póry jsou velmi malé, existuje jediná možnost jejich přímého pozorování – elektronová mikroskopie. Musíme si ovšem uvědomit, že čím větší zvětšení elektronový mikroskop má, tím menší plochu s ním pozorujeme. Prozkoumání větší plochy pak vyžaduje neúměrně vysoký počet snímků. Další nepříjemnou vlastností elektronové mikroskopie je, že poskytuje pouze dvourozměrný obraz, přitom to, co zkoumáme je trojrozměrné. V poslední době dochází v této oblasti k pokroku a

jsou k dispozici konfokální mikroskopy, které poskytují alespoň částečně obraz zasahující do jisté hloubky. Jistý obraz o tvaru pórů se však přímým pozorováním získá. Na paměti je však třeba mít, že všechny póry v dané látce nemají stejný tvar a rozměr. Má proto smysl hovořit pouze o jakémsi převládajícím tvaru a rozměru pórů.

Na rozdíl od skutečného tvaru a rozměru pórů je modelový tvar a rozměr podstatně lépe definován. Modelovým pórem rozumíme tvar pórů, který používáme při vyhodnocování fyzikálních a fyzikálně – chemických měření prováděných s porézní látkou s cílem získat informace o jejich porézní struktuře. [31]

Klasifikace pórů

Základem klasifikace pórů podle rozměru je skutečnost, že některé fyzikální procesy probíhají v pórech různého rozměru odlišným mechanismem. V dnešní době se používá Dubininova klasifikace vyplývající z odlišnosti průběhu fyzikální adsorpce plynů v porézních látkách. Podle Dubinina rozlišujeme:

- *Mikropóry* – jejich rozměr je menší než 2 nm. Prostory mezi produkty hydratace (CSH) jsou známy jako gelové póry. Podle Powerse je střední volná vzdálenost ve struktuře CSH kolem 1,8 nm a zahrnuje 28% struktury CSH. Tyto rozměry se považují za příliš malé na to, aby měly nějaký vliv na pevnost a propustnost ztvrdlé maltové směsi.
- *Mezopóry* – rozměr těchto pórů je v rozmezí 2 nm a 50 nm. Prostor, který zpočátku zabírá voda a cement, se v průběhu hydratace vyplní produkty hydratace s mezivrstvou vody. Kapilární póry se vytvářejí proto, že pevné produkty hydratace zabírají méně místa než původní objem vody a cementu. Kapilární mezery spolu se zbývajícím kapilárním vodou nazývají kapilární póry. Jejich objem a velikost závisí na obsahu cementu, hodnotě vodního součinitele a stupni hydratace. Jejich tvar je nepravidelný. V dobře hydratovaných cementových pastách s nízkou hodnotou vodního součinitele se jejich velikost pohybuje mezi 10 až 50 nm. Vyšší vodní součinitel zvyšuje množství a velikost kapilárních pórů.
- *Makropóry* – póry s rozměrem větší než 50 nm. Vzduchové dutiny mají na rozdíl od kapilárních pórů většinou kulový tvar. Dutiny tvořené vneseným a zachyceným vzduchem jsou mnohem větší, než póry kapilární a jejich velikost je od 10 μm do 200 μm . Dutiny tvořené zachyceným vzduchem mohou mít značný vliv na pevnost a propustnost kompozitu.

Toto dělení je však jen formální, nezakládá se na fyzikálních nebo chemických vlastnostech materiálu. V tabulce 5.1 je uvedena klasifikace, kterou navrhli Mindess a Young, a se kterou se setkáme i v jiné literatuře.

Póry	Průměr	Popis	Ovlivněné vlastnosti
gelové póry	0,5 nm 0,5 až 2,5 nm	mikropóry "mezivrstvy" mikropóry	smršťování a dotvarování smršťování a dotvarování
gelové a kapilární póry	2,5 až 10 nm	malé kapiláry	smršťování mezi 50% a 80% vlhkosti
kapilární póry	10 až 50 nm 0,05 až 10 nm	střední kapiláry velké kapiláry	pevnost, propustnost, smršťování při vysoké vlhkosti pevnost, prostupnost
vzdušné póry	0,005 až 1,0 mm 0,010 mm až velké 0,25 až 2 mm	vnesené vzduchové póry zachycené vzduchové póry napěněné struktury	pevnost pevnost pevnost a hustota

Tabulka 5.1 Klasifikace pórů

Distribuce velikosti pórů

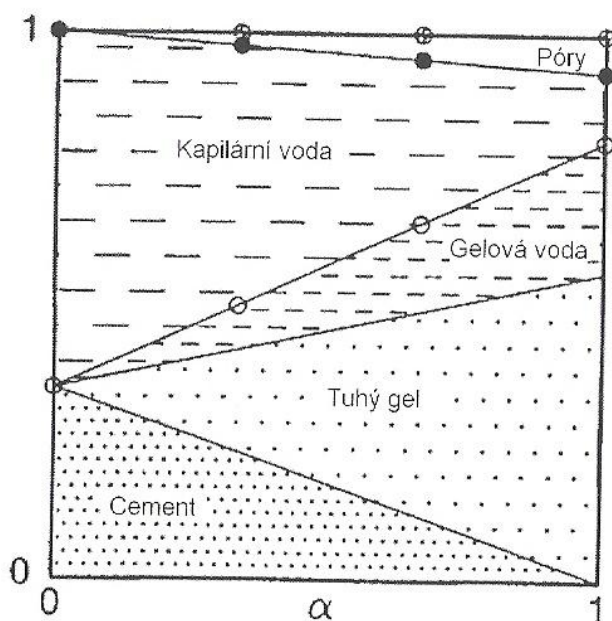
U porézních látek je často třeba znát nejen celkový objem pórů, ale i rozdělení tohoto objemu podle velikosti pórů, tzn. určit jaký objem pórů přísluší pórům různé velikosti (pórům, jejichž velikost leží v určitém úzkém intervalu velikostí). To bývá složitý problém, neboť póry jsou co do tvaru, velikosti i délky značně rozdílné a navíc jsou vzájemně propojené. Je proto zřejmé, že detailní a kvantitativní popis porézní struktury lze jenom těžko získat. Z tohoto důvodu se vychází z velmi zjednodušených modelových představ o tvaru, velikosti a uspořádání pórů. Prakticky všechny používané modely pracující s představou přímých válcových pórů s kruhovým průřezem. Navíc se obvykle předpokládá, že se póry vzájemně neprotínají a liší se pouze poloměrem. Úkolem je zjistit, jaký objem mají póry s poloměry ležícími v určitém intervalu poloměrů v modelovém porézním prostředí, kterým se reálná porézní látka nahrazuje.

Existují dvě standardní, obecně používané metody – vyhodnocení distribuce pórů z adsorpční nebo desorpční větve izotermy fyzikální adsorpce dusíku a tlaková rtuťová porozimetrie.

5.1.2 Výpočet porozity – Powersův model

Powers a Brownyard navrhli v roce 1948 empirický model pro distribuci několika fází v ztvrdlé cementové pastě. Model je založen zejména na rozsáhlém výzkumu izoterm adsorpce vodních výparů a chemicky vázané vody v ztvrdlých cementových pastách. Následujícího roku Powers model ještě upravil. Tento model zůstává vhodný k určení objemového složení ztvrdlé cementové pasty. Obrázek 5.3 znázorňuje volumetrickou distribuci fází čerstvé tvrdnoucí cementové pasty s vodním součinitelem 0,6 jako funkci

hydratace α . Předpokládá se, že nedochází k žádné externí výměně vody, a že je dostatek vody k procesu hydratace. V systému se nepředpokládá žádný vzduch. V částečně hydratovaném systému ($0 < \alpha < 1$) rozeznáváme následující fáze: nehydratovaný cement V_{nhc} , pevné hydratované produkty V_{sph} , gelovou vodu V_{gw} , kapilární nebo volnou vodu V_{cw} a vytvořené kapilární póry V_{cv} . [31]



Obrázek 5.3 Distribuce fází v tvrdnoucí cementové pastě ($w/c = 0,6$) v závislosti na stupni hydratace [31]

Z výše uváděných předpokladů plyne, že může být porozita maltové směsi (gelová, kapilární a celková) vypočítána jako vztah objemu pórů k celkovému objemu směsi, jak je uvedeno v rovnicích níže. Tento model lze následně aplikovat i na směsi betonové. Aby bylo možné vypočítat celkový objem směsi, musíme započítat i zachycený vzduch. Celková porozita zahrnuje kapilární a gelové póry.

$$V_{směs} = V_{cement} + V_{voda} + V_{písek} + V_{přímě} + V_{vzduch}$$

$$V_{směs} = \frac{C}{\rho_c} + \frac{W}{\rho_w} + \frac{G}{\rho_g} + \frac{S}{\rho_s} + \frac{F}{\rho_f} + V_{vzduch}$$

Rovnice 5.6 a Rovnice 5.7

Kde C , W , G , S , F jsou počáteční hmotnosti cementu, vody, hrubého kameniva, písku a plniva. Hmotnosti jsou děleny odpovídajícími objemovými hmotnostmi za účelem určení jejich objemů v surovinách. [31]

5.1.3 Distribuce fází v hydratující cementové pastě

Kapilární póry se vytvářejí proto, že pevné produkty hydratace potřebují méně místa než původní objem cementu a vody. Při úplné hydrataci a při přidání množství vody přesně odpovídající potřebám hydratace činí objem volného prostoru 18,5% původního objemu cementu. Kapilární mezery mohou být prázdné nebo vyplněné vodou v závislosti na objemu záměsové vody a vnějších zdrojích vody.

Experimenty vedené Powersem ukázaly, že v 1 g cementu je při hydrataci chemicky vázáno přibližně 0,23 g vody. Objem tuhých produktů hydratace je určen jako součet hydratovaného cementu a chemicky vázané vody mínus objem kapilárních mezer a lze jej vypočítat jako:

$$V_{shp} = \alpha C \cdot \left(\frac{0,815}{\rho_c} + \frac{0,23}{\rho_w} \right).$$

Rovnice 5.8

Objem gelové vody je 28% objemu cementového gelu, který se skládá z celkového součtu pevných produktů hydratace a gelové vody.

$$V_{gw} = \alpha C \cdot \left(\frac{0,317}{\rho_c} + \frac{0,089}{\rho_w} \right)$$

Rovnice 5.9

Objem nehydratovaného cementu lze vypočítat podle rovnice:

$$V_{nhc} = \frac{(1-\alpha)C}{\rho_c}.$$

Rovnice 5.10

Objem volné vody můžeme určit odečtením množství vázané vody a gelové vody od objemu záměsové vody.

$$V_{cw} = \frac{W - 0,319\alpha C}{\rho_w} - \frac{0,317\alpha C}{\rho_c}$$

Rovnice 5.11

Objem cementového tmele bude vypočítán následovně:

$$V_{cementgel} = \alpha C \left(\frac{1,132}{\rho_c} + \frac{0,319}{\rho_w} \right)$$

Rovnice 5.12

5.1.4 Kapilární a gelové póry ve hydratované cementové pastě

Kapilární póry se skládají z vody a kapilárních pórů. Objem kapilárních pórů lze vypočítat podle:

$$V_{kappor} = \frac{W - 0,319\alpha C}{\rho_w} - \frac{0,312\alpha C}{\rho_c}.$$

Rovnice 5.13

Objem gelových pórů odpovídá objemu z rovnice gelové vody 4.11. Z toho vyplývá, že celkový objem pórů $V_{celkpor}$ lze vypočítat podle:

$$V_{celkpor} = \alpha C \cdot \left(\frac{0,185}{\rho_c} + \frac{\frac{W}{\alpha C} - 0,23}{\rho_w} \right).$$

Rovnice 5.14

Chceme – li vypočítat objemy kapilár, gelu a celkový objem pórů, musíme vydělit V_{kappor} , V_{gw} a $V_{celkpor}$ součtem počátečních objemů cementu a vody, V_{celk} . [30]

$$V_{celk} = \frac{W}{\rho_w} + \frac{C}{\rho_c}.$$

Rovnice 5.15

Voda ve hydratované cementové pastě

Zatvrdlá cementová pasta může obsahovat určité množství vody, závislé na okolních podmínkách a porositě ztvrdlého cementového kamene.

Kapilární nebo volná voda

Kapilární nebo volná voda se nachází v mezerách větších než 5 nm. Tato voda je využitelná při pokračující hydrataci cementu. Odstraněním volné vody se nijak nezmění objem. Avšak odstranění vody v malých kapilárách, v nichž je kapilární napětí, může mít za následek smrštění. Množství kapilární vody lze určit vysušením materiálu při teplotě $105 \pm 5^\circ\text{C}$. [31]

Adsorbovaná voda

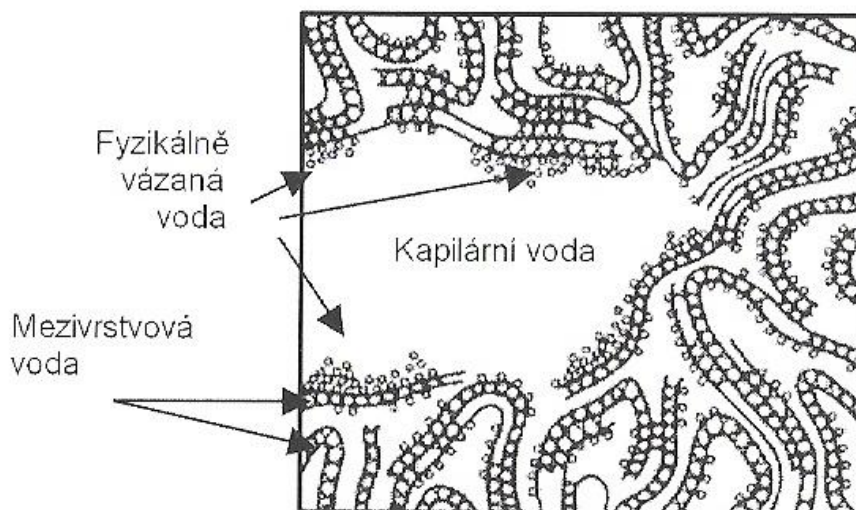
Molekuly vody jsou fyzicky adsorbovány na povrch produktů hydratace. Vrstva vody se může skládat až ze šesti vrstev molekul vody. Část této vody může zmizet při vysychání betonu a způsobit smrštění. [31]

Mezivrstvová voda

Tento typ vody je spojován se strukturou CSH a tvoří jej monomolekulární vodní film zachycený mezi krystalickými produkty. Tato vrstva zmizí pouze při intenzivním vysušování, které pak způsobí smrštění. Adsorbovaná voda a mezivrstvou voda se nacházejí v gelových pórech a nazývají se gelová voda nebo voda fyzikálně vázaná. [31]

Chemicky vázaná voda

Tato voda je součástí hydratace a nezmizí při vysoušení při teplotách nižších než 105°C. Od 110°C výše dochází k rozkladu produktů hydratace a voda strukturu postupně opouští. Abychom zjistili celkové množství chemicky vázané vody, musíme beton zahřát až na teplotu 1000°C. [31]



Obrázek 5.4 Typy vody spojené s CSH [31]

Odpařitelná voda

Podle odpařitelnosti vody v ztvrdlé cementové pastě můžeme definovat dvě skupiny. Odpařitelnou vodu tvoří kapilární voda a část vody adsorbované. Zbývající voda se považuje za odpařitelnou. [31]

Musíme se také zmínit o vlivu mezifázové tranzitní zóny na porozitu. V případě malt i betonů je porozita v této vrstvě obvykle vyšší, než v zbývající hmotě cementové matrice, což odpovídá hodnotě vyššího vodního součinitele v této oblasti. Často se zde vyskytuje i větší množství trhlinek. V literatuře se můžeme setkat, že bylo výzkumem zjištěno, že na povrchu kameniva se vytváří tenká vrstva hydratačních produktů s tloušťkou asi 1 μm . Za normálních okolností neprobíhá mezi kamenivem a produkty hydratace žádná reakce a kamenivo slouží jako nukleační místo. Kromě této vrstvy vzniká ještě vrstva s vyšší porozitou - **tranzitní zóna**.

Tato zóna vzniká v důsledku nedostatečně těsného uspořádání v těsné blízkosti povrchu zrn kameniva a tudíž následkem jednostranného růstu produktů hydratace. Kamenivo má při procesu míchání určitou potřebu vody a kolem zrn se vytváří vodní film. Ten také přispívá k pórovitější struktuře v tranzitní mezivrstvě mezi cementovou matricí a kamenivem. Zvýšenou porozitu můžeme spíše připsat na vrub vyššímu krvácení (bleedingu) v okolí kameniva, čemuž lze předejít patřičným procesem při míchání surovin. V důsledku vyšší porozity je i větší prostor pro vznik většího množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Je nutno poznamenat, že tranzitní zóna má značný vliv na konečné vlastnosti maltových směsí. Je tomu tak v důsledku její vyšší porozity, vyššímu objemu CH a vyšší náchylnosti k trhlinkám. V mnoha případech nehraje porozita samotného kameniva žádnou roli.

S ohledem na proces zmrazování a tání je důležité charakterizovat systém vzduchových pórů ve směsích. Nejdůležitější typy vzduchových pórů jsou následující:

- *Vnesené vzduchové póry* – tyto dutiny jsou obvykle kulovitěho tvaru a větších rozměrů, než póry kapilární a jsou vytvořeny přidavkem provzdušňující přísady během procesu míchání. Při správné distribuci a dostatečným množstvím přispívají k odolnosti betonu proti cyklickému působení mrazu a vlhkosti. Současně však snižují pevnost míchaných směsí.
- *Vzduchové póry jsou tvořeny zachyceným vzduchem* – tyto dutiny jsou větší než póry tvořené vneseným vzduchem a jejich tvar může být kulovitý i nepravidelný. Jejich vnitřní povrch je hladký, někdy i lesklý, což naznačuje, že byly původně vytvořeny ze vzduchových bublin nebo kapsiček.
- *Póry vytvořené vodou* – Jejich tvar, umístění a vnitřní povrch ukazují na původní přítomnost vody. Mohou být způsobeny vodou z bleedingu, která nevystoupala na povrch. Jejich tvar je nepravidelný a vnitřní povrch hrubý. Ve většině případech jsou také větší, než póry vytvořené zachyceným vzduchem.

Póry vytvořené zachyceným vzduchem a póry vytvořené vodou nijak nepřispívají k dobrým vlastnostem míchaných směsí, pouze je zhoršují. Vytváření těchto pórů a jejich výskyt zčásti závisí na způsobech ukládání a zhutňování maltových směsí nebo betonů. [31]

5.2 Elektronová mikroskopie míchaných směsí

Mikrostruktura maltových směsí závisí na čase, vlhkosti a teplotě. Proces hydratace se v čase mění. Vlhkost prostředí má vliv na objem vody, která je k dispozici pro hydrataci. Tělesa připravená z představených směsí jsou uložena po celou dobu zrání ve vlhkém prostředí s konstantní teplotou a vlhkostí. Vyšší teplota nemění pouze rychlost hydratace, ale také stupeň tvorby krystalů CSH. Nepřesáhne – li teplota 50°C nedochází k žádným

zásadním změnám hydratačních produktů, zvyšuje se pouze rychlost hydratace. To znamená, že nedochází k žádným změnám rozmístění a objemu kapilárních pórů. Pro porovnání s referenční směsí, tedy směsí bez příměsí, byly namíchány směsi s příměsemi. Tyto příměsi byly použity s cílem zlepšení granulometrického složení plniva a fyzikálně - mechanických vlastností malt (zpracovatelnost, zadržení vody, mezerovitosti a pevností). Podle teoretických předpokladů by mělo být dosaženo hustoty uspořádání částic větší a potřeba vody nižší se zachováním vhodné zpracovatelnosti směsi. Tento předpoklad je založen na schopnosti malých částic vyplnit intersticiální prostory mezi hrubšími částicemi, jako jsou například i hrubší zrna cementu. Je nutné říci, že nejen jemnost částic má vliv na výše uváděné vlastnosti, ale také morfologické vlastnosti, jako je tvar zrna a textura povrchu, jak jsme se již setkali v předcházejících kapitolách.

Mikrostruktura vzorků byla v této práci sledována pomocí elektronového mikroskopu a snímky z těchto měření byly porovnávány s výsledky rtuťové porozimetrie a nasákavosti jednotlivých směsí. Snímky a vyhodnocení některých vzorků jsou zobrazeny níže. Měření byla prováděna po 28 a 90 dnech zrání připravených směsí.

Mikromletý vápenec se všeobecně chová jako inertní plnivo, proto jeho přidavek může zvýšit hustotu mikrostruktury v počátečních fázích hydratace. Porozita a vývoj mikrostruktury jsou lepší ve srovnání se vzorky referenčních směsí, které jsou namíchány bez přídavku mletých vápenců se stejným součinitelem vody ku všem jemným podílům. Z teoretických předpokladů a z literatury můžeme říci, že s pokračující hydratací má však mletý vápenec vliv na zpomalení vývoje mikrostruktury, protože cementové částice expandují a vytvářejí síť. Z výsledků ztvrdlých maltových směsí plyne, že směsi s přídavkem mletých vápenců mají hustější strukturu ve srovnání se směsí referenční a to v případě 15%, maximálně 20% nahrazení cementu touto příměsí. Tento výsledek byl dosažen především u frakce mletého vápence 8/V a 12/V v případě především 15% nahrazení cementu. Hustější strukturu a sníženou porozitu můžeme vysvětlit fyzikální přítomností minerálních příměsí.

Pokud nahradíme určitou část cementu určitým množstvím popílku dojde ke zpomalení vývoje pevností. Produkty reakcí vyplní hrubé kapilární póry a zvýší se tak pevnost maltové směsi. Závěrem vyplývajícího z použitím tohoto materiálu je, že přítomnost popílků „zlepšuje“ mikrostrukturu. Struktura, která se vyvíjí je mnohem hustší, avšak vývoj pomalejší než u referenční směsi. V porovnání s výsledky z měření nasákavosti a rtuťové porozimetrie můžeme říci, že se mikrostruktura připravených směsí stává jednotnější v průběhu času a že jsou produkty reakcí v kompozitním systému rovnoměrněji

distribučovány. Porézní oblast v okolí kulových částic popílku je zahuštěna, avšak v určitých oblastech je vyšší porozita stále k nalezení.

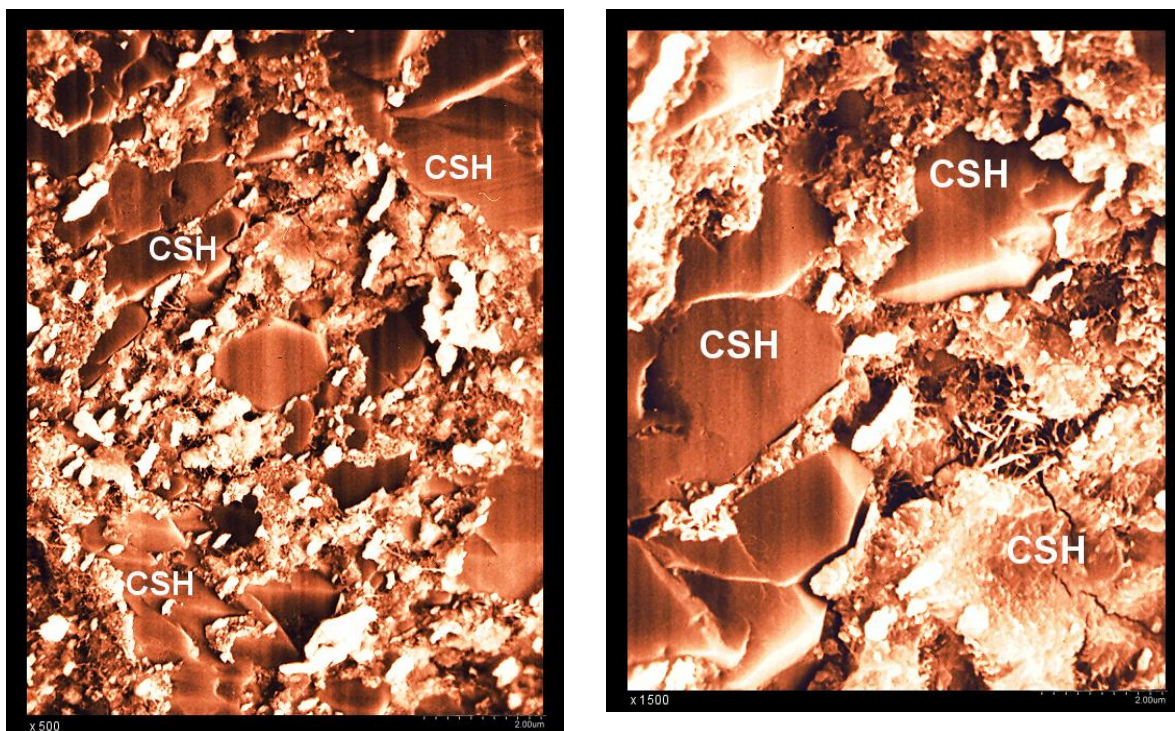
Z celkových výsledků těchto studií plyne, že směsi s přídavkem příměsí mají celkovou porozitu sníženu a vedou k hustější struktuře ztvrdlých malt. Pro dosažení optimální mezerovitosti s požadavkem na dosažení vyšších hodnot při zkoušení mechanických vlastností by bylo vhodné namíchat takové směsi, kde by byl snížen součinitel vody ku všem jemným podílům, byla by zachována množství jednotlivých příměsí a plniva, avšak s použitím plastifikátorů (superplastifikátorů), které jsou nezbytné pro zajištění uspokojivých vlastností čerstvých směsí. Takto namíchané směsi by vedly k hustější struktuře a snížení porozity ztvrdlého betonu ve srovnání s referenční směsí.

Vyhodnocení výsledků z elektronové mikroskopie

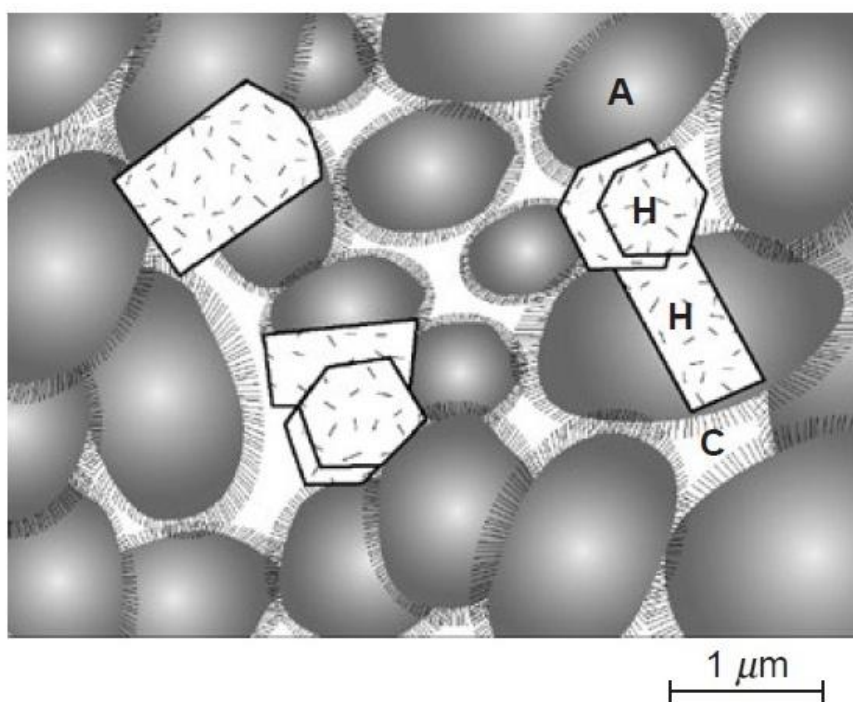
Elektronovou mikroskopií byly pozorovány vzorky maltových směsí po 28 a 90 dnech zrání. Na snímcích 4.5 je zobrazena referenční maltová směs a to při zvětšení 1000x a 3000x. Na snímcích jsou dobře zřetelné struktury C – S – H krystalů s kapilárními póry. Mikrostruktura referenční směsi je poměrně dobře zhutněna a méně porézní ve srovnání s některými maltovými směsmi s přidanými příměsemi, což se projevuje vyššími pevnostmi v tlaku než většina namíchaných směsí a poměrně nízkou nasákavostí směsí.

Podle teoretických modelů by měla být hustota uspořádání částic větší a potřeba vody nižší, je – li směs složena alespoň ze dvou materiálů různé zrnitosti a s odlišnou granulometrií. Je tomu tak v důsledku schopnosti malých částic vyplnit intersticiální prostory mezi hrubšími částicemi, jak již bylo zmíněno výše. Vliv přídavku příměsí na hustotu uspořádání a potřebu vody byl také představen v předchozích kapitolách. Čím jemnější je jemnost mletí příměsí, tím vyšší je teoreticky potřeba vody na jejich ovlhčení. Tento předpoklad je však také závislý na jejich morfologii a kulatosti částic.

SEM byla prováděna současně na vzorcích maltových směsí, kde došlo částečně k nahrazení cementu příměsí – mletými vápenci a elektrárenskými popílky. Nejmenší pórovitost byla prokázána vždy u vzorků s nejnižším nahrazením cementu příměsí, tzn. v případě mletých vápenců 15% dávka a v případě elektrárenských popílků 30% dávka. Pouze v některých případech byly však fyzikálně – mechanické vlastnosti zlepšeny v porovnání s referenční směsí. Stejný trend snižování pórovitosti byl pozorován během zkoušení po 28 dnech, tak i při stanovení po 90 denním zrání směsí. V tomto případě docházelo současně ke snižování pórovitosti ve všech případech. Na zobrazených vzorcích jsou především vzorky s 30% náhradou mletých vápenců a 35% a 45% náhradou cementu elektrárenskými popílky, kde je nejlépe pozorovatelná porozimetrie a hydratační produkty v jednotlivých směsích.



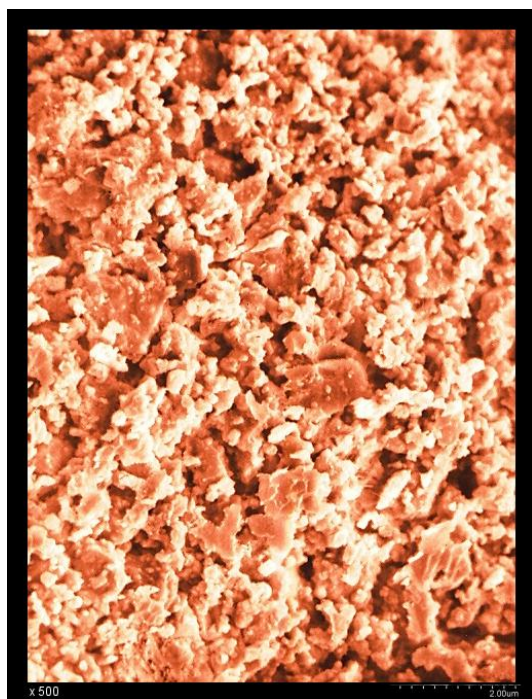
Obrázek 5.5 SEM referenční maltové směsi při zobrazení 1000x a 3000x



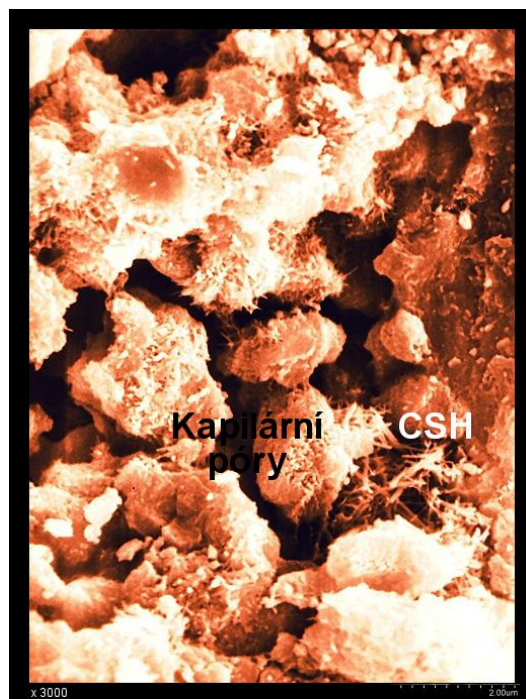
Obrázek 5.6 Model dobře hydratované cementové pasty, kdy A je kamenivo obklopené produkty C – S – H, H jsou hexagonální produkty jako jsou produkty $CH = C_4AH_{19} = C_4ASH_{18}$, C reprezentuje kapilární systém a póry mezi hydratovanými produkty, které byly původně vyplněny záměsovou vodou [21]

Maltové směsi s náhradou cementu frakcemi mletého vápence

a)



b)

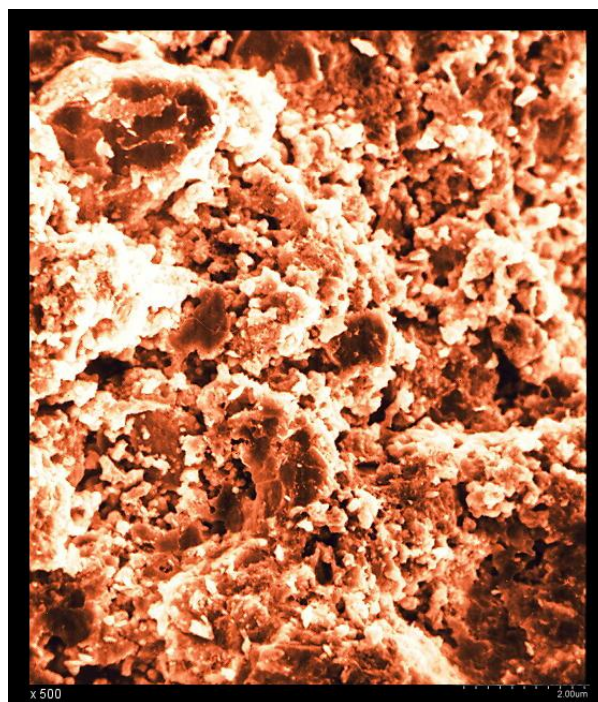


Obrázek 5.7 Maltové směsi s náhradou frakce mletého vápencem 7/V v dávce 30% po 28 dnech ráni - a) zvětšeno 500x, b) zvětšeno 3000x; můžeme vidět poměrně vysokou kapilární pórovitost, což koresponduje s výsledky z vysokotlaké rtuťové porozimetrie a stanovení nasákavosti

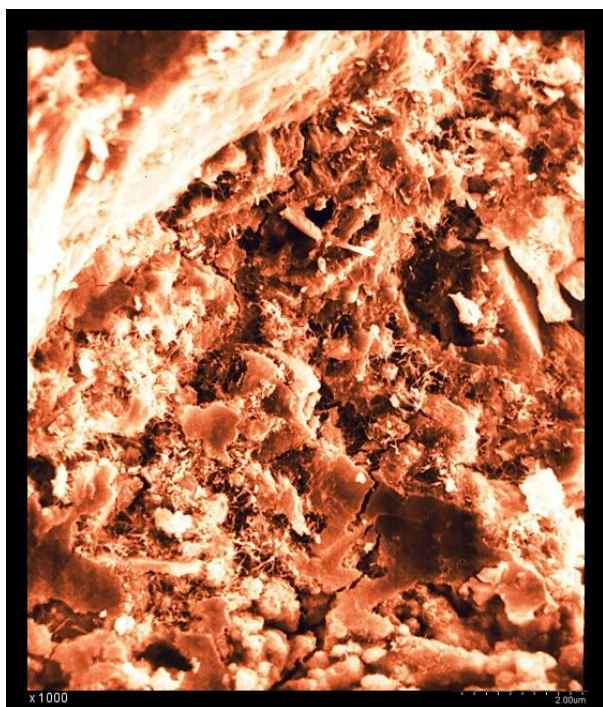
c)



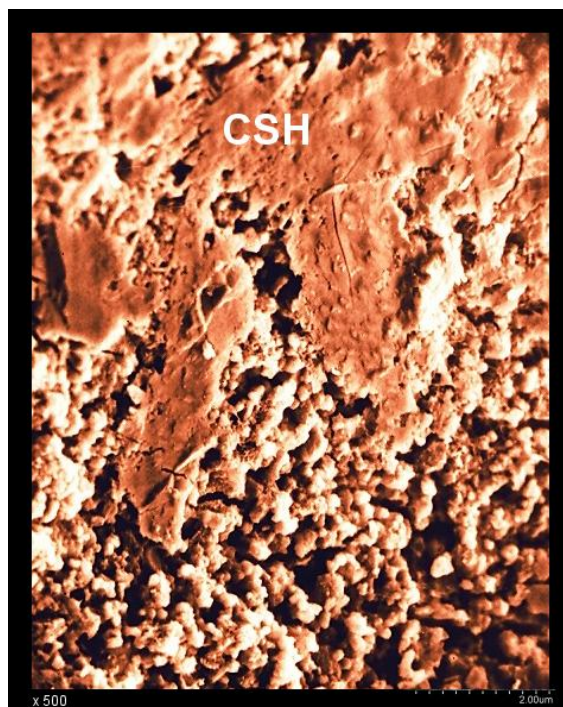
d)



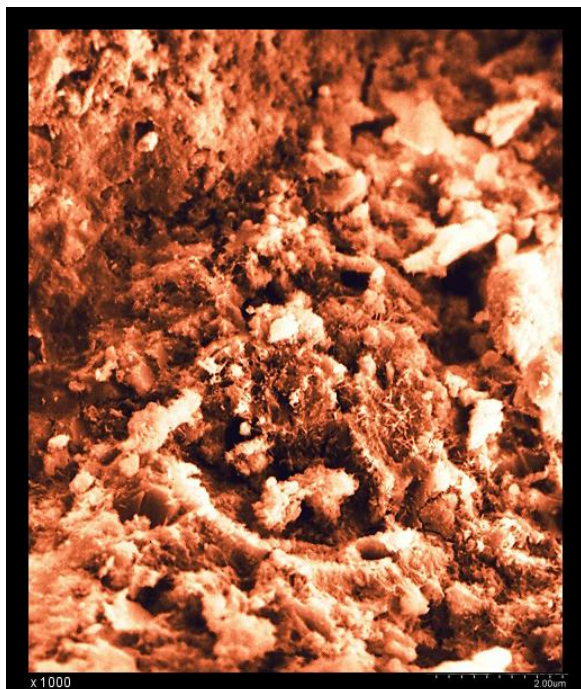
e)



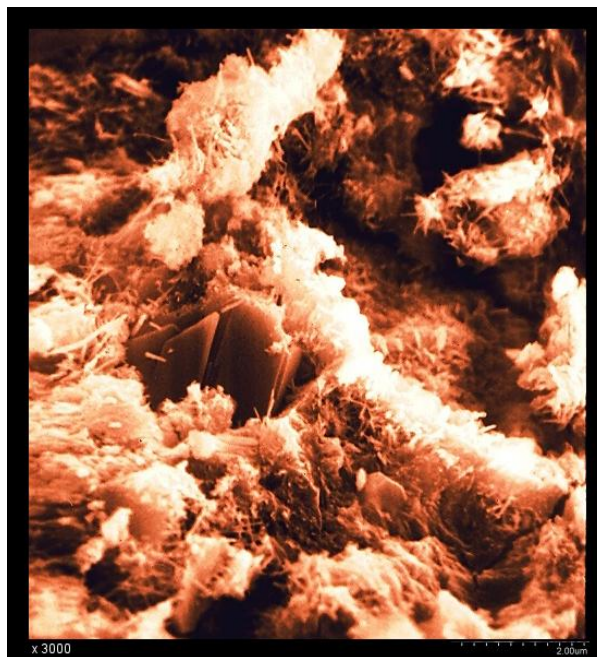
f)



g)



h)

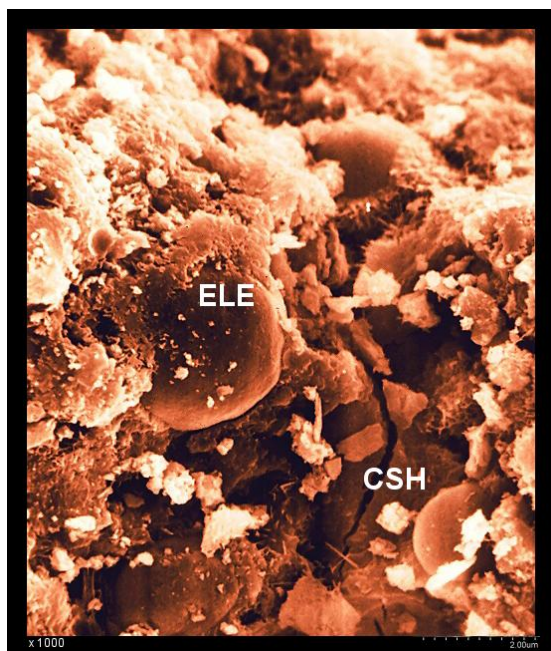


Obrázek 5.8 Maltové směsi s náhradou cementu mletými vápenci – **c)** 30% náhrada cementu frakcí 9/V, pozorování po 28 dnech zrání, zvětšeno 3000x, **d)** 30% náhrada cementu frakcí 8/V, pozorování po 28 dnech zrání, mikrostruktura má převážně gelový charakter, bez výraznějších kapilárních pórů v porovnání s ostatními záměsemi, zvětšeno 500x, **e)** 30% náhrada cementu frakcí 8/V, pozorování po 28 dnech zrání, zvětšeno 1000x, **f)** 15% náhrada cementu frakcí 12/V, pozorování po 90 dnech zrání, mikrostruktura má převážně gelový charakter

s větším množstvím C – S – H produktů, zvětšeno 500x, g) 30% náhrada cementu frakcí 12/V, pozorování po 28 dnech zrání, zvětšeno 1000x, h) 30% náhrada cementu frakcí 12/V, pozorování po 28 dnech, zvětšeno 3000x

Maltové směsi s náhradou cementu elektrárenskými popílky

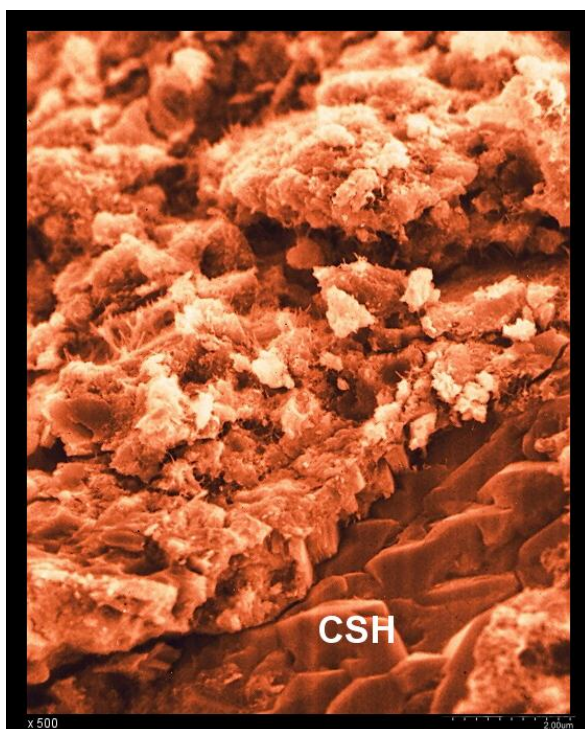
a)



b)



c)

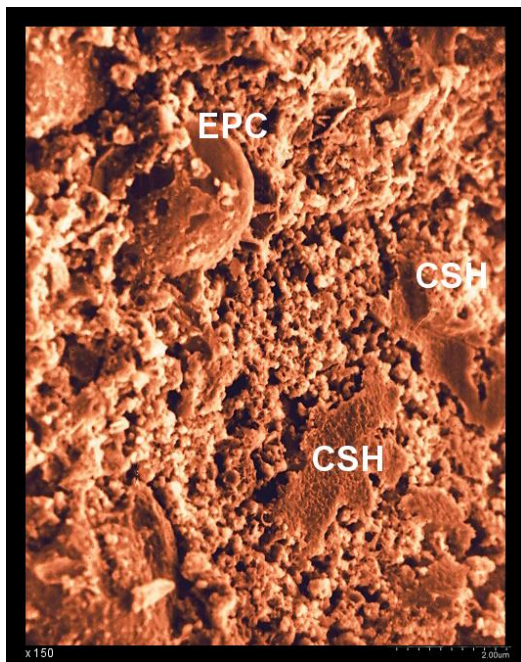


d)

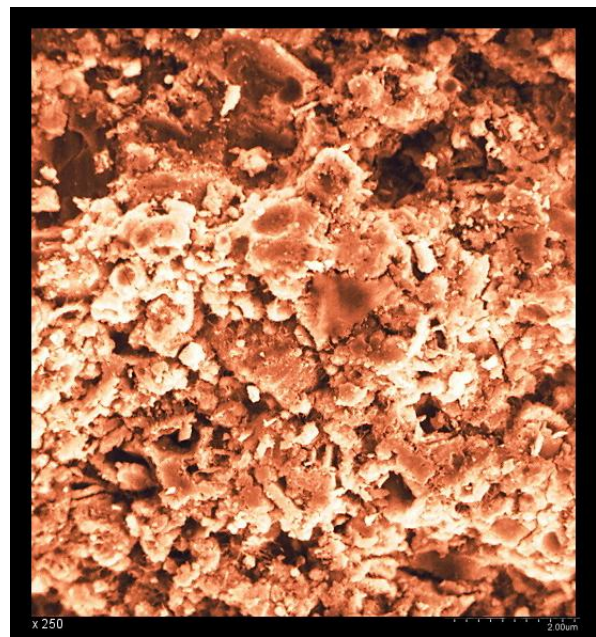


Obrázek 5.9 Maltové směsi s náhradou cementu elektrárenskými popílky Ledvice (a), Dětmárovice (b) a Mělník (c, d) – a) 35% náhrada cementu ELE, pozorování po 28 dnech zrání, pozorována kulová zrna popílku s hydratačními produkty C – S – H, zvětšeno 2000x, b) 35% náhrada cementu ELE, pozorování po 90 dnech zrání, pozorována nespojitost systému pórů, zvětšeno 3000x, c) a d) 35% náhrada cementu ELE, pozorování po 28 dnech zrání, poměrně velké množství hydratačních produktů C – S – H

e)



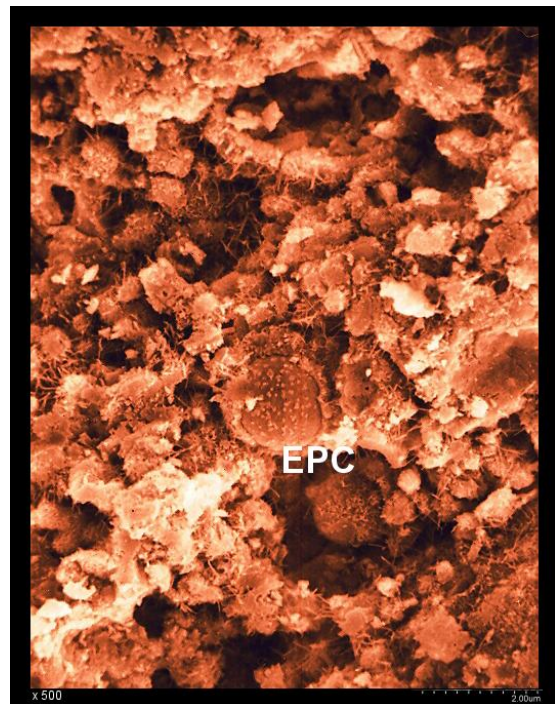
f)



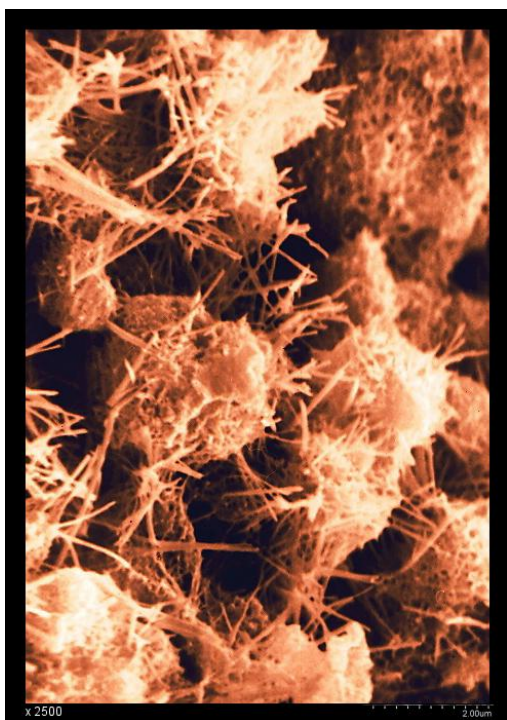
g)



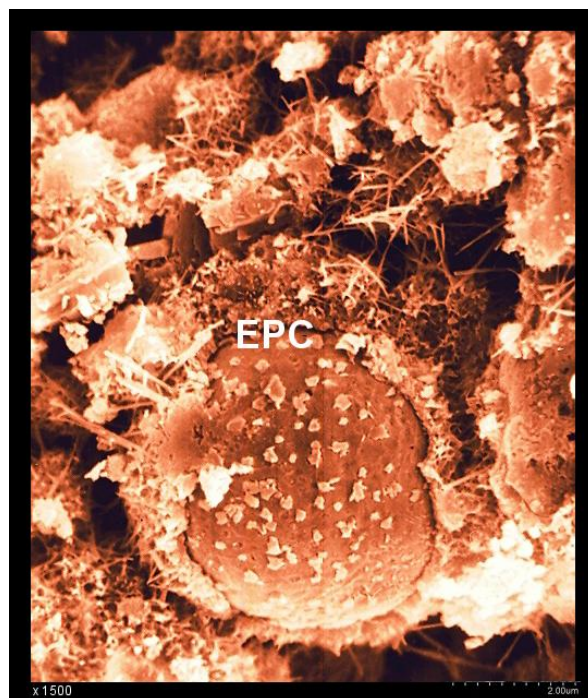
h)



i)

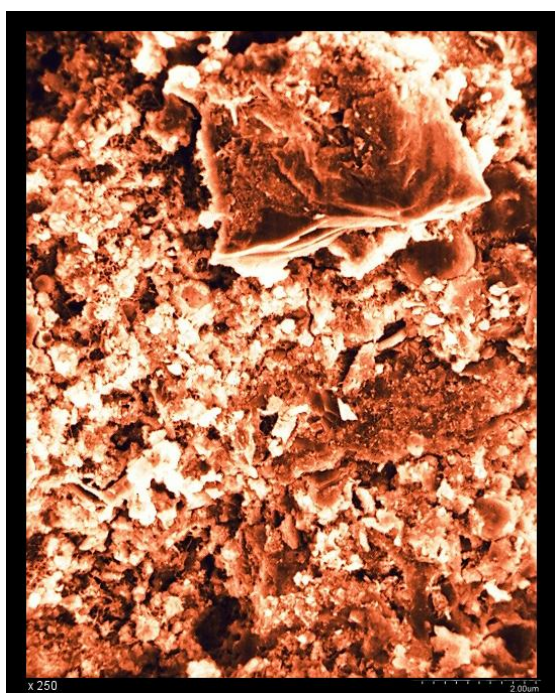


j)

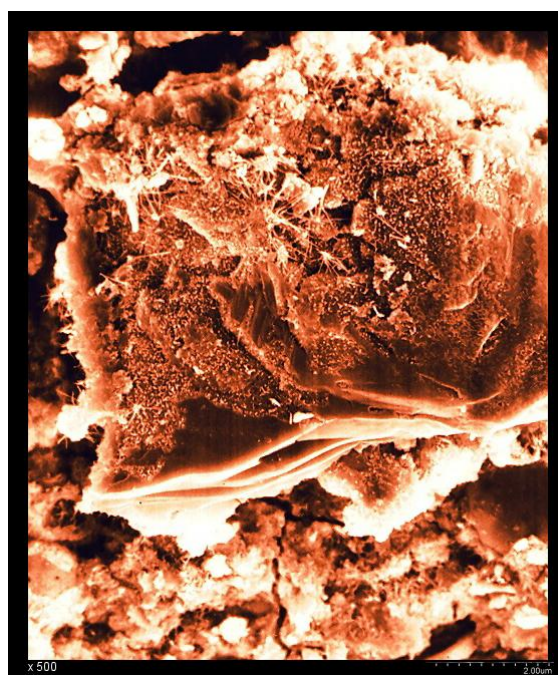


Obrázek 5.10 Maltové směsi s náhradou cementu elektrárenským popílkem Počerady v 35% a 45% nahrazení – e) 35% náhrada cementu EPC, pozorování po 28 dnech zrání, pozorována kulová zrna popílku s poměrně vysokým množstvím hydratačních produktů C – S – H, zvětšeno 300x, f) 45% náhrada cementu EPC, pozorování po 28 dnech zrání, mikrostruktura má převážně gelový charakter s nespojitým pórovým systémem, zvětšeno 500x, g) a i) 35% náhrada cementu EPC, pozorování po 28 dnech, etringit, kulová zrna popílku, zvětšeno 2500 a 5000x, h) a j) 45% náhrada cementu EPC, pozorování po 28 dnech zrání, kulová zrna popílku, nespojitý pórový systém, zvětšeno 1000 a 3000x

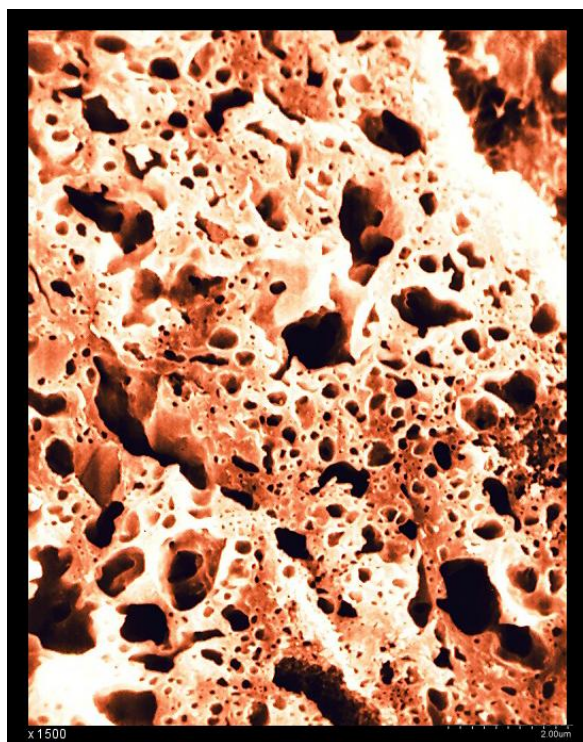
k)



l)



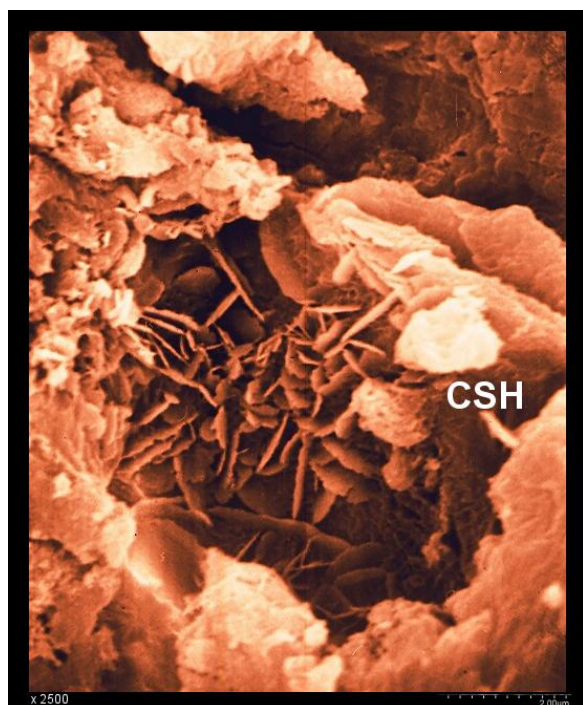
m)



n)



o)



Obrázek 5.11 Maltové směsi s náhradou cementu elektrárenským popílkem Tušimice v 35% a 45% nahrazením – k) 35% náhrada cementu ETU, pozorování po 28 dnech zrání, poměrně velké množství hydratačních produktů C – S – H, mikrostruktura má gelový charakter, zvětšeno 500x, l) 35% náhrada cementu ETU, pozorování po 28 dnech zrání, hydratační produkty C – S - H, zvětšeno 1000x, m) 35% náhrada cementu ETU, pozorování po 28

5.3 Rtuťová porozimetrie

Pórovitost materiálu je možné zjistit několika mechanizmy, a proto se v literatuře a ve zkušebnách můžeme setkat s několika druhy porozimetrických měření, která jsou založena na těchto mechanizmech. Nejčastěji využívanou je metoda vysokotlaké rtuťové porozimetrie, která byla použita i v této práci. Tato metoda poskytuje poměrně detailní informace o objemu, hustotě a specifickém povrchu jednotlivých pórů. Zároveň nám tyto informace mohou posloužit ke zjištění tvaru a struktury pórů.

Rtuťová porozimetrie je založena na vysokém povrchovém napětí rtuti, která je většinu porézních látek nesmáčí (tzn. úhel smáčení θ je vyšší než 90°). V důsledku toho tlak potřebný pro vtlačení rtuti do pórů závisí na jejich poloměru a to tak, že čím je pór užší, tím je potřebný tlak vyšší. Porovnáním síly způsobené povrchovým napětím rtuti (které se snaží rtuť z pórů vypudit) a působícího tlaku se dospěje k Washburnově rovnici:

$$\pi \cdot r^2 \cdot p = -2 \cdot \pi \cdot r \cdot \gamma \cdot \cos \theta$$
$$r = \frac{-2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{p},$$

Rovnice 5.16 a Rovnice 5.17

kde γ značí povrchové napětí rtuti, θ úhel smáčení povrchu porézní látky rtuti (obvykle $\theta = 130^\circ$), r je poloměr póru, do kterého rtuť vstupuje právě při tlaku p . Budeme – li vyjadřovat tlak v MPa a poloměr pórů v nm, bude mít tento vztah tvar:

$$r = \frac{623,5}{p}.$$

Rovnice 5.18

Z rovnice vyplývá, že při tlaku 0,1 MPa rtuť zaplňuje pouze póry s poloměry většími než 6235 nm. Použije – li se tlak 10 MPa, je tato hranice 62,4 nm. Podobně při tlaku 100 MPa $r = 6,2$ nm. [29] Rtuťový porozimetr používaný v této práci pracoval do tlaku 200 MPa. Každý přírůstek tlaku způsobí, že rtuť vnikne do další frakce pórů příslušného menšího poloměru, takže postupným zvyšováním tlaku a současným měřením rtuti vtlačené do pórů lze zjistit rozdělení objemu pórů dle velikosti. Proniknutí rtuti do pórů není okamžité, ale začíná vnikat do otvoru póru až ve chvíli, kdy tlak překročí hodnotu odpovídající otevření průměru póru. Ale čas odpovídající zaplnění celého póru rtutí závisí nejen na objemu pórů, ale i jeho tvaru.

Mezi velikostí tlaku a nejmenším poloměrem pórů R , které jsou při daném tlaku zaplněny, platí Laplaceova – Youngova rovnice následujícího tvaru:

$$h \cdot \rho \cdot g = p = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \theta}{R},$$

Rovnice 5.19 Laplaceova – Youngova rovnice

kde γ je povrchové napětí, ρ je hustota rtuti, R je poloměr pórů kruhového průřezu, g je tíhové zrychlení, h je výška sloupce rtuti v póru, θ úhlem smáčení pórů rtutí a p je celkový tlak, pod nímž rtuť vniká do jednotlivých pórů. Každý přírůstek tlaku způsobí, že rtuť vnikne do další frakce pórů příslušného menšího poloměru tak, že postupným zvyšováním tlaku a současným měřením objemu rtuti vtlačené do pórů lze zjistit rozdělení objemu pórů podle jednotlivých velikostí.

Uvedený vztah platí pouze za předpokladu několika zjednodušených parametrů:

- Póry studovaného materiálu mají válcovitý tvar s pevnými stěnami, které se za použitého tlaku nedeformují, aby nedošlo k významnějšímu zkreslení výsledků.
- Je známa hodnota kontaktního úhlu – tento předpoklad nebývá ve většině případů splněn.
- Povrchové napětí rtuti nezávisí na velikosti pórů, do nichž byla rtuť vtlačena, ani na použitém tlaku. Na tlaku závisí povrchové napětí rtuti velmi málo.

Při provádění vysokotlaké rtuťové porozimetrie je na vzorek pórovité látky ponořen v nesmáčivé kapalině působeno různou úrovní tlaku. Toto působení je prováděno jednou ze dvou metod, v našem případě metodou vyrovnávací:

- Skenování**, kdy tlak vzrůstá spojitě. Tato metoda je rychlá a poskytuje vysokou opakovatelnost měření, ovšem přesnost této metody může být snížena. Její nevýhodou je skon ukazovat nižší průnik rtuti do objemu pórů, a tedy nižší velikost pórů. Z toho vyplývá, že se tato metoda hodí pro potřebu vyššího opakování a nižší přesnost měření.
- Vyrovnávání**, kdy tlak zůstává po určitou dobu konstantní a jsou sbírána data na stejné úrovni, poté se skokově nastaví další hladina tlaku. Pomocí této metody získáme detailní, komplexní a přesná data. [32]

Jádrem rtuťového porozimetru je dilatometr, obsahující vzorek zkoumané porézní látky, který se za vakua naplní rtutí. Dilatometr se umístí do autoklávu, který je zcela zaplněn olejem. V autoklávu se postupně zvyšuje tlak, což způsobuje pronikání rtuti do pórů. Objem rtuti vtlačené do pórů při určitém tlaku se určuje z poklesu menisku rtuti v kalibrované kapiláře dilatometru. Tlak se postupně zvyšuje a pokles menisku se registruje. Z těchto údajů je sestrojena závislost objemu pórů s poloměry většími, než odpovídá okamžitému tlaku podle Washburnovy rovnice. Tato závislost bývá označována jako kumulativní distribuce

pórů nebo jako integrální distribuce. Záporně vzatá derivace této závislosti je frekvenční křivkou rozdělení objemu pórů podle poloměru (často označována jako distribuční křivka pórů). Frekvenční křivka názorně ukazuje, které póry přispívají k celkovému objemu pórů nejvíce [30], v případě této práce byly vytvořeny histogramy pro jednotlivé směsi a jsou zobrazeny níže.

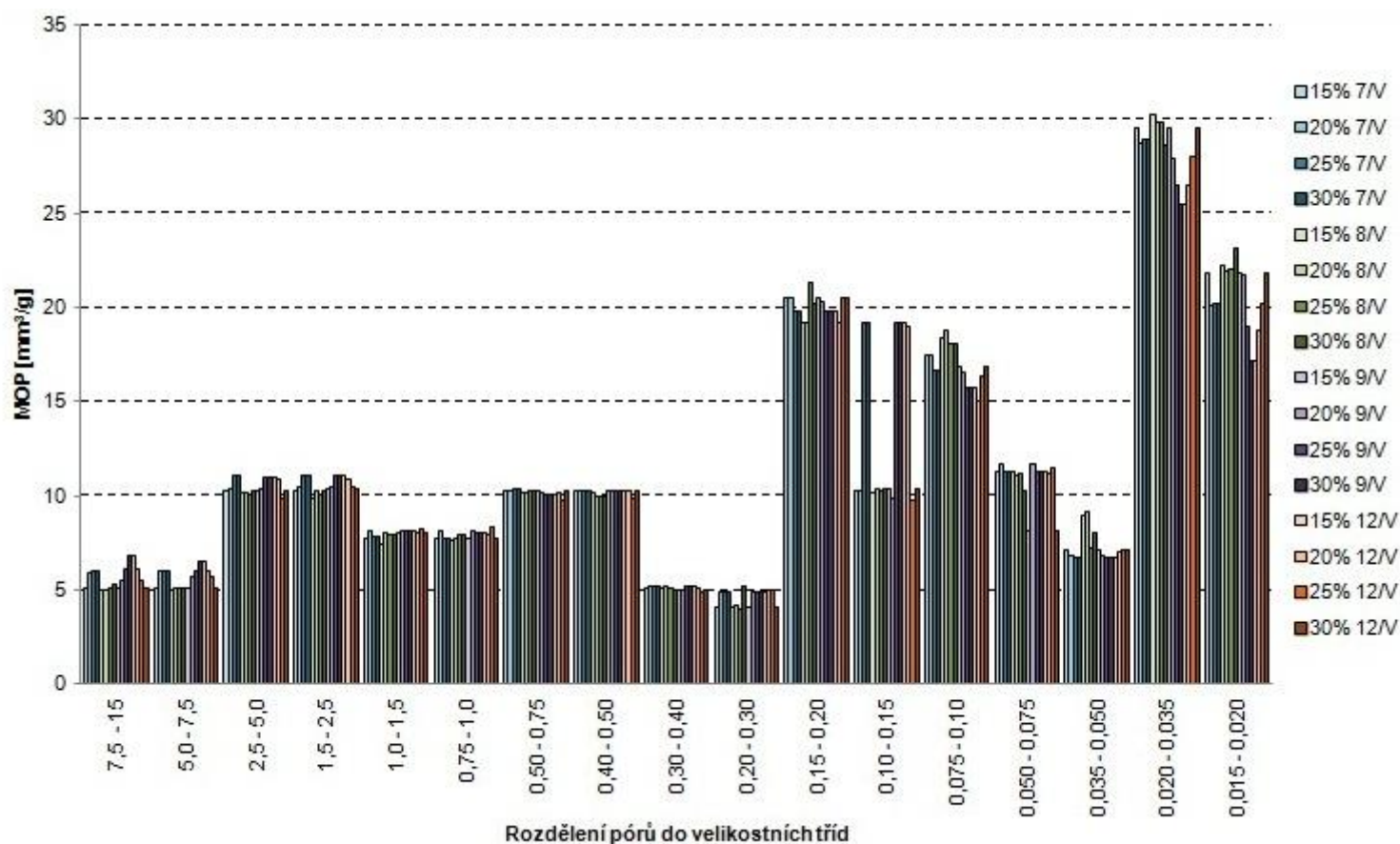
Vyhodnocení výsledků ze rtuťového porozimetru

V této části jsou zobrazeny výsledky z měření porozity jednotlivých směsí. Měření byla prováděna po 28, 90 a 180 dnech zrání jednotlivých směsí. Výsledky z těchto měření jsou následně porovnávány s výsledky stanovení nasákavosti jednotlivých vzorků a se snímky elektronové mikroskopie. V zobrazených grafech můžeme vidět průměrné hodnoty z 5 individuálních měření.

Působením tlaku se postupně póry zaplňují rtutí. V první řadě se zaplňují největší póry. Velikost zaplňovaných pórů se s vzrůstajícím tlakem zmenšuje. Ke každému tlaku lze následně přiřadit odpovídající průměr pórů, které jsou jeho působením právě zaplněny.

Z celkového objemu pórů, který je roven objemu vtlačené rtuti, a průměrné hodnoty průměru pórů se dá za předpokladu válcového tvaru pórů vypočítat celkový povrch pórů a je možné také zjistit hloubku pórů. Tyto parametry nám dávají představu o tvaru a distribuci pórů.

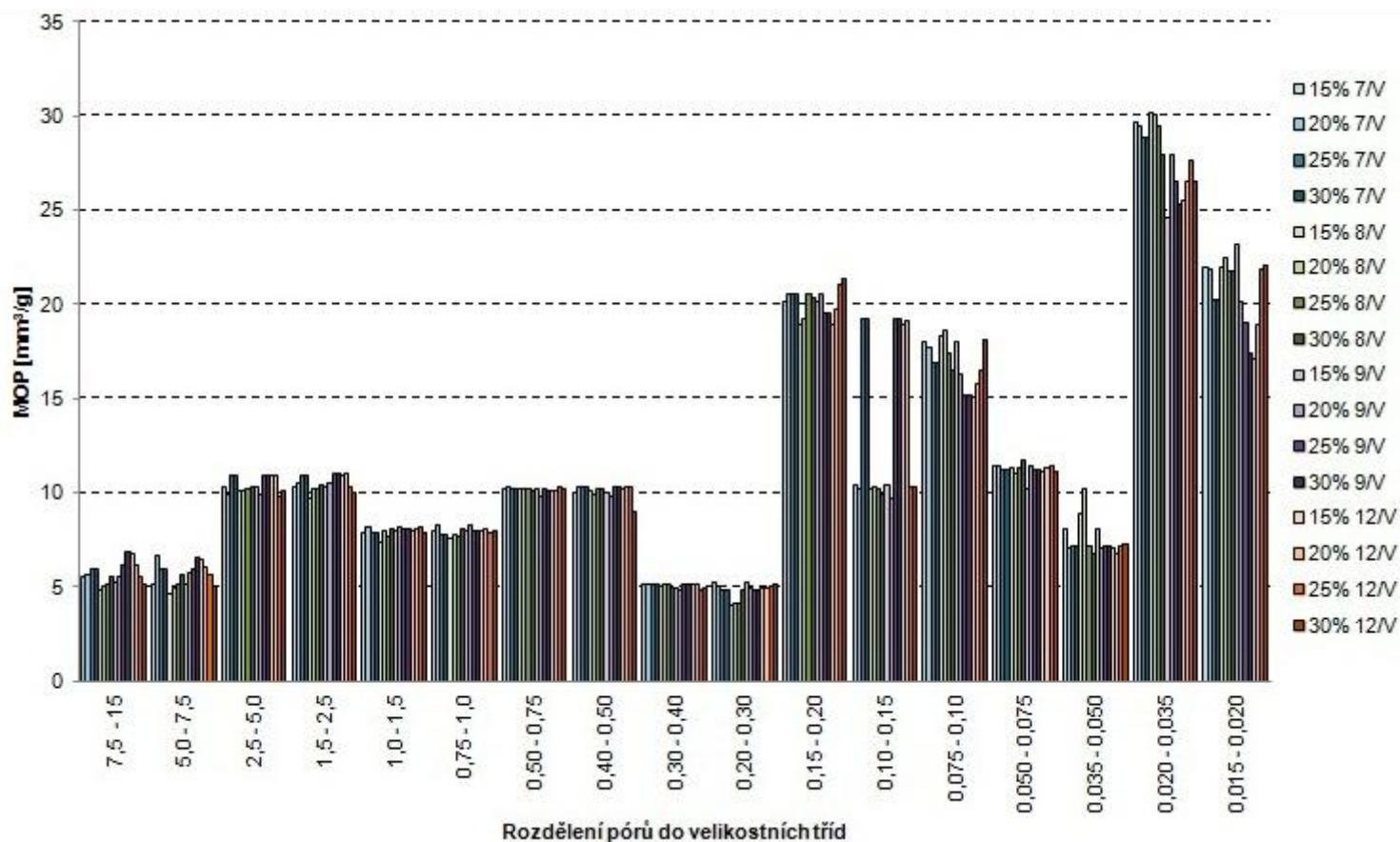
Při měřeních vysokotlakovou rtuťovou porozimetrií byly zkoušeny maltové směsi s náhradou cementu frakcemi mletého vápence a elektrárenského popílku. Výsledky nám ukazují, že dochází v průběhu času ke změně distribuce pórů v jednotlivých směsích. Tyto změny nejsou příliš zásadní, avšak z hlediska vlivu na fyzikálně – mechanické vlastnosti mají zřejmý vliv. S rostoucím časem dochází k ubývání pórů velikosti 7,5 – 15,0 μm , avšak obsah menších pórů o velikosti 0,015 – 0,035 μm je s rostoucím časem větší. V tabulkách 5.2 a 5.3 můžeme vidět právě tyto hodnoty. Na základě tohoto trendu můžeme říci, že budou mít tyto směsi nasákavost nižší s prodlužující se dobou zrání. Avšak s rostoucím množstvím nahrazeného cementu frakcemi mletého vápence a elektrárenského popílku nalezneme ve směsích větší póry, zatímco počet menších pórů se snižuje. To z pohledu fyzikálně – mechanických vlastností znamená snížení pevností v tahu za ohybu a v tlaku s rostoucím množstvím nahrazeného cementu příměsemi.



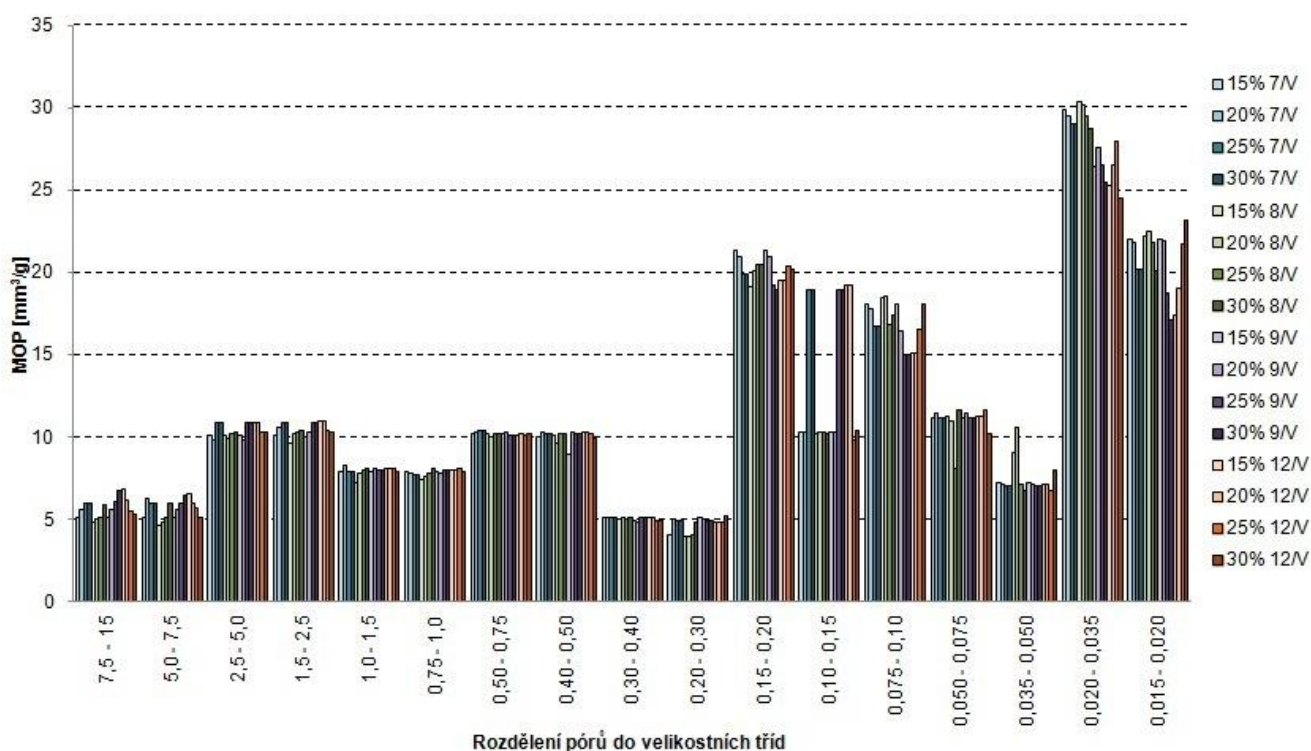
Graf 5.1 Distribuce pórů do velikostních tříd stanovená po 28 dnech zrání u maltových směsí s nahrazením cementu frakcemi mletého vápence

Velikost pórů [μm]	Maltová směs	Doba zrání			Velikost pórů [μm]	Maltová směs	Doba zrání		
		28 [mm³·g⁻¹]	90 [mm³·g⁻¹]	180 [mm³·g⁻¹]			28 [mm³·g⁻¹]	90 [mm³·g⁻¹]	180 [mm³·g⁻¹]
7,5 - 15,0	15% 7/V	5,43	5,33	5,09	0,015 - 0,035	15% 7/V	25,64	25,83	25,97
	20% 7/V	5,96	6,12	5,92		20% 7/V	24,44	25,71	25,71
	25% 7/V	6,03	5,99	5,96		25% 7/V	24,55	24,56	24,61
	30% 7/V	6,03	5,99	5,96		30% 7/V	24,55	24,56	24,61
	15% 8/V	4,97	4,77	4,74		15% 8/V	26,20	26,07	26,30
	20% 8/V	5,05	4,99	4,94		20% 8/V	25,93	26,27	26,33
	25% 8/V	5,09	5,13	5,13		25% 8/V	25,97	25,64	25,64
	30% 8/V	5,22	5,61	5,96		30% 8/V	25,87	24,85	24,44
	15% 9/V	5,33	5,22	5,13		15% 9/V	25,64	23,87	24,28
	20% 9/V	5,61	5,63	5,62		20% 9/V	24,85	24,09	24,77
	25% 9/V	6,09	6,08	6,05		25% 9/V	22,75	22,80	22,63
	30% 9/V	6,68	6,71	6,61		30% 9/V	21,34	21,40	21,29
	15% 12/V	6,68	6,61	6,71		15% 12/V	21,34	21,29	21,40
	20% 12/V	6,05	6,09	6,08		20% 12/V	22,63	22,75	22,80
	25% 12/V	5,63	5,62	5,61		25% 12/V	24,09	24,77	24,85
	30% 12/V	5,13	5,13	5,22		30% 12/V	25,64	24,28	23,87

Tabulka 5.2 Množství pórů v mm³·g⁻¹ v rozmezí velikosti pórů 7,5 – 15,0 μm a 0,015 – 0,035 μm v závislosti na době zrání maltových směsí s nahrazením cementu frakcemi mletého vápence



Graf 5.2 Distribuce pórů do velikostních tříd stanovená po 90 dnech zrání u maltových směsí s nahrazením cementu frakcemi mletého vápence

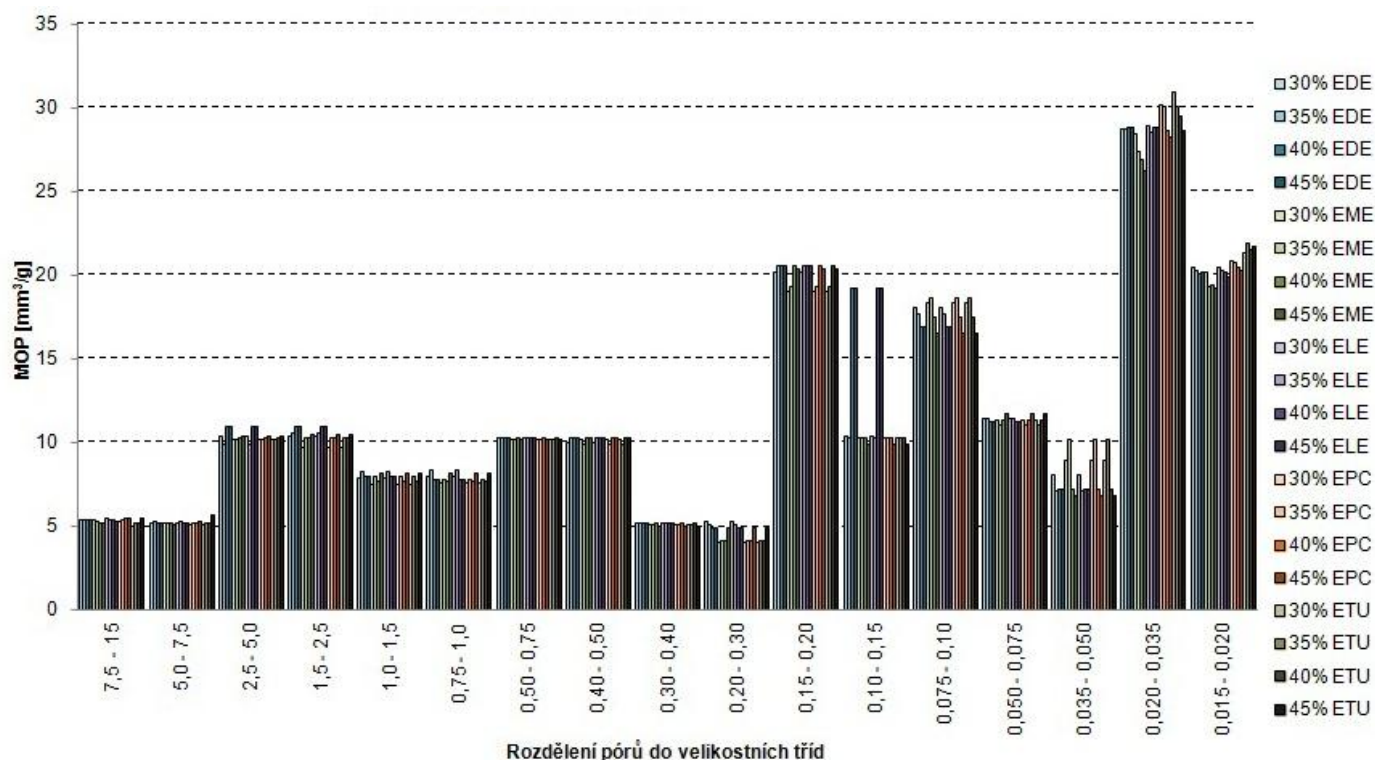


Graf 5.3 Distribuce pórů do velikostních tříd stanovená po 180 dnech zrání u maltových směsí s nahrazením cementu frakcemi mletého vápence

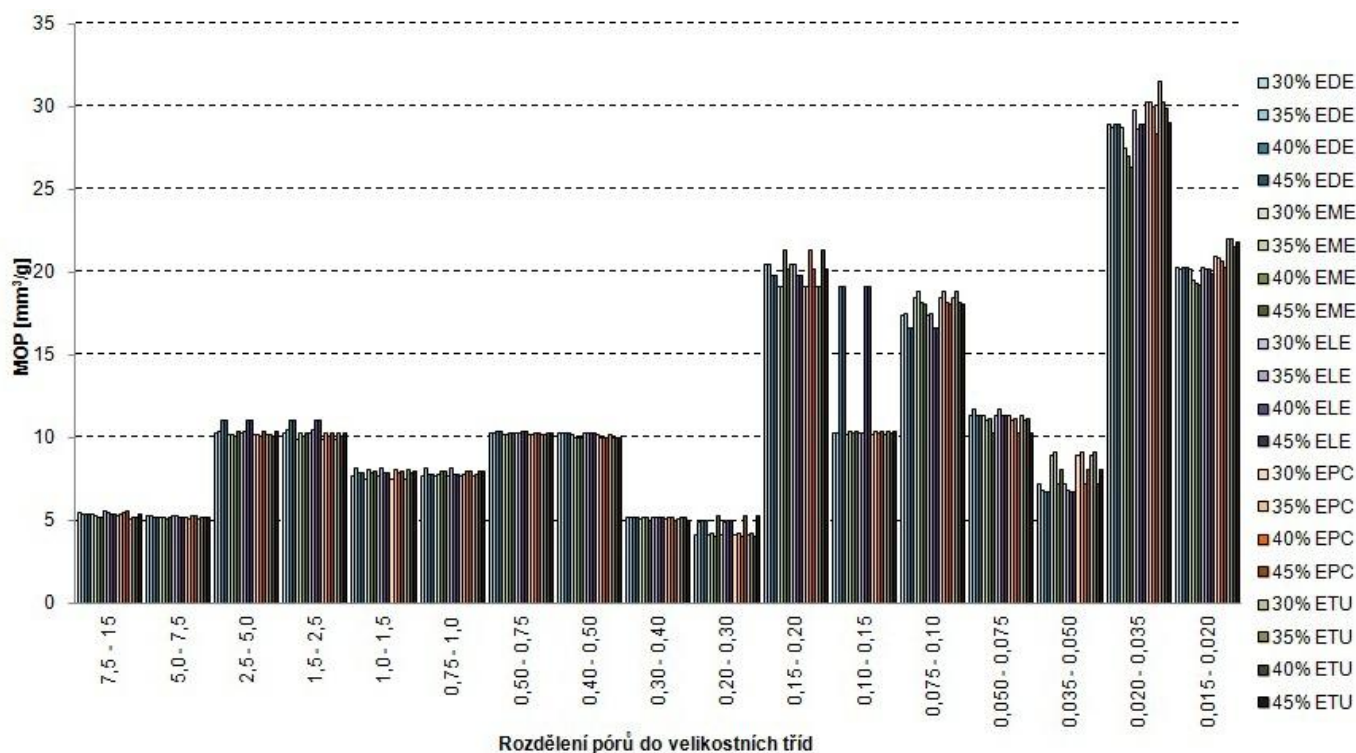
Velikost pórů [μm]	Maltová směs	Doba zrání			Velikost pórů [μm]	Maltová směs	Doba zrání		
		28 [mm ³ ·g ⁻¹]	90 [mm ³ ·g ⁻¹]	180 [mm ³ ·g ⁻¹]			28 [mm ³ ·g ⁻¹]	90 [mm ³ ·g ⁻¹]	180 [mm ³ ·g ⁻¹]
7,5 - 15,0	30% EDE	5,36	5,29	5,26	0,015 - 0,035	30% EDE	25,07	24,61	24,53
	35% EDE	5,33	5,3	5,25		35% EDE	24,44	24,52	24,46
	40% EDE	5,27	5,27	5,24		40% EDE	24,63	24,50	24,60
	45% EDE	5,26	5,25	5,24		45% EDE	24,59	24,51	24,57
	30% EME	5,28	5,27	5,24		30% EME	24,48	24,30	24,23
	35% EME	5,22	5,19	5,18		35% EME	23,46	23,37	23,34
	40% EME	5,15	5,17	5,15		40% EME	23,16	23,12	23,07
	45% EME	5,15	5,11	5,09		45% EME	22,80	22,74	22,70
	30% ELE	5,41	5,32	5,34		30% ELE	24,63	24,70	24,55
	35% ELE	5,38	5,31	5,29		35% ELE	24,42	24,44	24,46
	40% ELE	5,27	5,27	5,25		40% ELE	24,55	24,51	24,51
	45% ELE	5,26	5,25	5,23		45% ELE	24,41	24,37	24,35
	30% EPC	5,20	5,16	5,11		30% EPC	25,61	25,51	25,49
	35% EPC	5,22	5,24	5,21		35% EPC	25,57	25,42	25,33
	40% EPC	5,38	5,31	5,25		40% EPC	25,31	24,56	24,45
	45% EPC	5,40	5,38	5,33		45% EPC	24,34	24,28	24,20
	30% ETU	5,05	5,04	5,04		30% ETU	26,76	26,165	26,56
	35% ETU	5,15	5,16	5,13		35% ETU	26,12	26,015	26,18
	40% ETU	5,18	5,16	5,22		40% ETU	25,72	25,49	25,37
	45% ETU	5,25	5,59	5,93		45% ETU	25,41	25,20	24,36

Tabulka 5.3 Množství pórů v mm³·g⁻¹ v rozmezí velikosti pórů 7,5 – 15,0 μm a 0,015 – 0,035 μm v závislosti na době zrání maltových směsí s nahrazením cementu elektrárenskými popílky

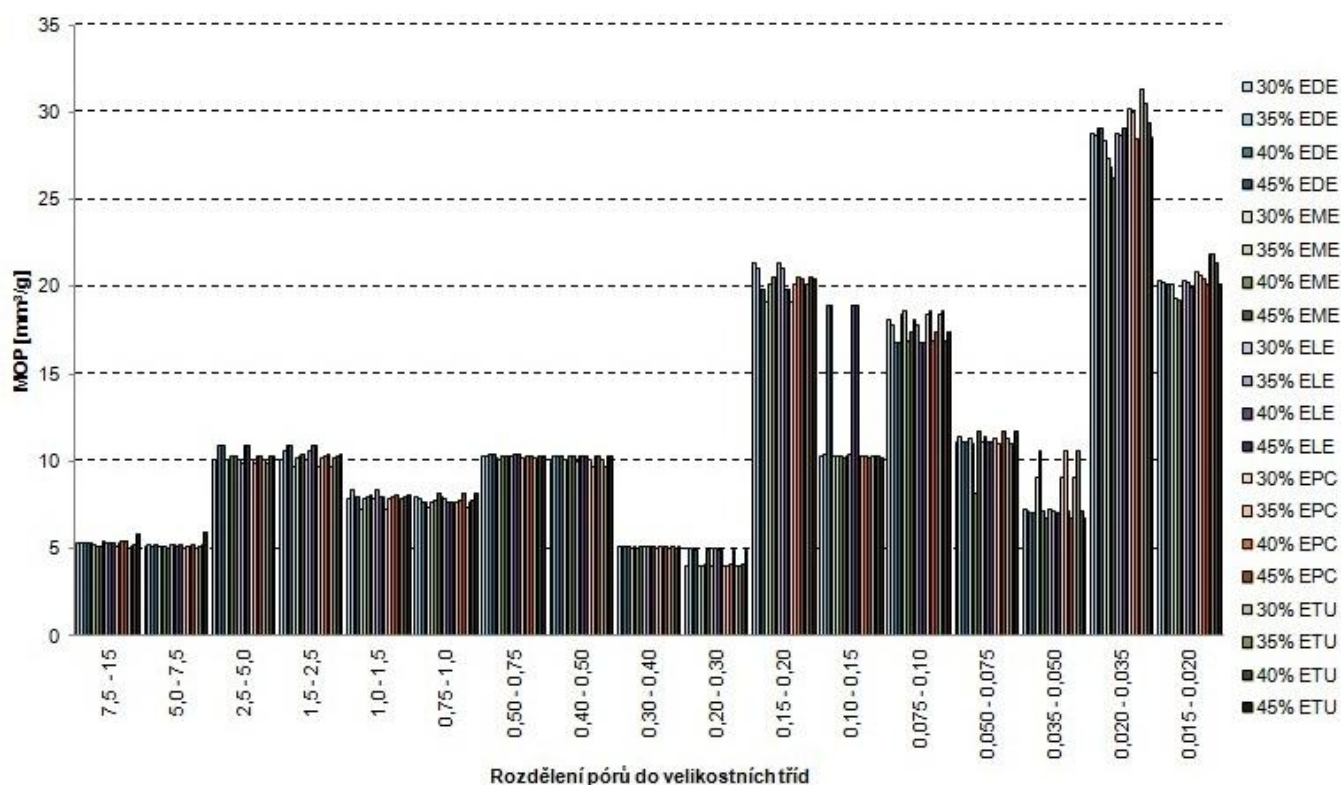
Na všech představených měřeních je patrný přínos rtuťové porozimetrie z hlediska pochopení chování jemných příměsí v maltových směsích. Ve všech případech můžeme vidět jakým způsobem se jsou odlišné jednotlivé směsi a můžeme předpokládat fyzikálně – mechanické vlastnosti těchto směsí. Z těchto poznatků lze najít takovou příměs s vhodným tvarovým indexem a dávkováním tak, aby bylo dosaženo požadované mezerovitosti a pórovitosti, aby distribuce jednotlivých pórů byla přínosem a nedocházelo k nepříznivému zachytávání plynů nebo kapalin ve struktuře směsí a nedocházelo tak k jejich nepříznivému působení. Cílem je tedy navrhnout takovou směs, aby měly jednotlivé vrstvy částic dostatečnou vzdálenost a co nejmenší množství pórů malé velikosti.



Graf 5.4 Distribuce pórů do velikostních tříd stanovená po 28 dnech zrání u maltových směsí s nahrazením cementu elektrárenskými popílky



Graf 5.5 Distribuce pórů do velikostních tříd stanovená po 90 dnech zrání u maltových směsí s nahrazením cementu elektrárenskými popílky



Graf 5.6 Distribuce pórů do velikostních tříd stanovená po 180 dnech zrání u maltových směsí s nahrazením cementu elektrárenskými popílkami

5.4 Nasákavost

Maximální množství vlhkosti, které v materiálu může být obsaženo, se vyjadřuje pomocí nasákavosti. Nasákavost hmotnostní se udává stejně jako hmotnostní vlhkost poměrem hmotnosti nasáklé vlhkosti k hmotnosti suchého vzorku materiálu a nasákavost objemová poměrem objemové hmotnosti k objemu materiálu vzorku. [36]

Při měření nasákavosti maltových směsí jsou vzorky zcela ponořeny ve vodě a dochází tak k nasycení otevřených pórů namíchané směsi všemi směry. Nasákavost nemá příznivý vliv na mrazuvzdornost maltových směsí, voda obsažená v pórovém systému směsi při teplotách pod bodem mrazu vody se mění v led a následně dochází k rozpínání a porušení struktury směsi. Hodnota, která je považována za limitní je 6% hmotnostních.

Pro zkoušení ztvrdlých maltových směsí byla vytvořena zkušební tělesa o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Na těchto vzorcích byla stanovena pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku a následně byla na zbytcích těchto těles stanovována nasákavost ztvrdlých směsí. Vzorky jsou nejprve vysušeny v sušárně při teplotě 105 ± 5 °C (m_s) a zcela ponořeny do vody, voda se po 1 hodině uvede do varu po dobu 4 hodin a vzorek se ponechá 72 hodin ve

vodě při pokojové teplotě a zváží se (m_n). Takto nasycený vzorek se potom zváží hydrostaticky ve vodě (m_{nv}). Následně se nasákavost vypočítá podle daného vzorce.

Nasákavost NV se určí podle vztahu:

$$NV = \frac{m_n - m_s}{m_s} \cdot 100 \quad [\%],$$

Rovnice 5.20

kde je m_n hmotnost zkušebního vzorku nasáklého vodou a m_s hmotnost vysušeného zkušebního vzorku. Měření byla prováděna v 5 opakováních a průměrné nasákavosti jednotlivých směsí jsou zobrazeny v tabulkách 5.2 a 5.3.

5.5 Shrnutí výsledků

Hydratace ve striktně chemickém pojetí je reakcí bezvodých sloučenin s vodou, při níž vzniká nová sloučenina – hydrát. V chemii silikátů se hydratací rozumí reakce nehydratovaného cementu nebo jednoho z jeho konstituentů s vodou, což je spojeno s chemickými a fyzikálně – mechanickými změnami systému, zejména tuhnutím a tvrdnutím. Postup hydratace cementu a jeho kinetiku ovlivňuje řada faktorů. Nejdůležitější z nich jsou tyto:

- fázové složení cementu
- jemnost mletí cementu
- hodnota vodního součinitele, avšak v tomto případě hodnota součinitele vody ku všem jemným podílům
- teplota ošetřování,

avšak sem i v neposlední řadě patří:

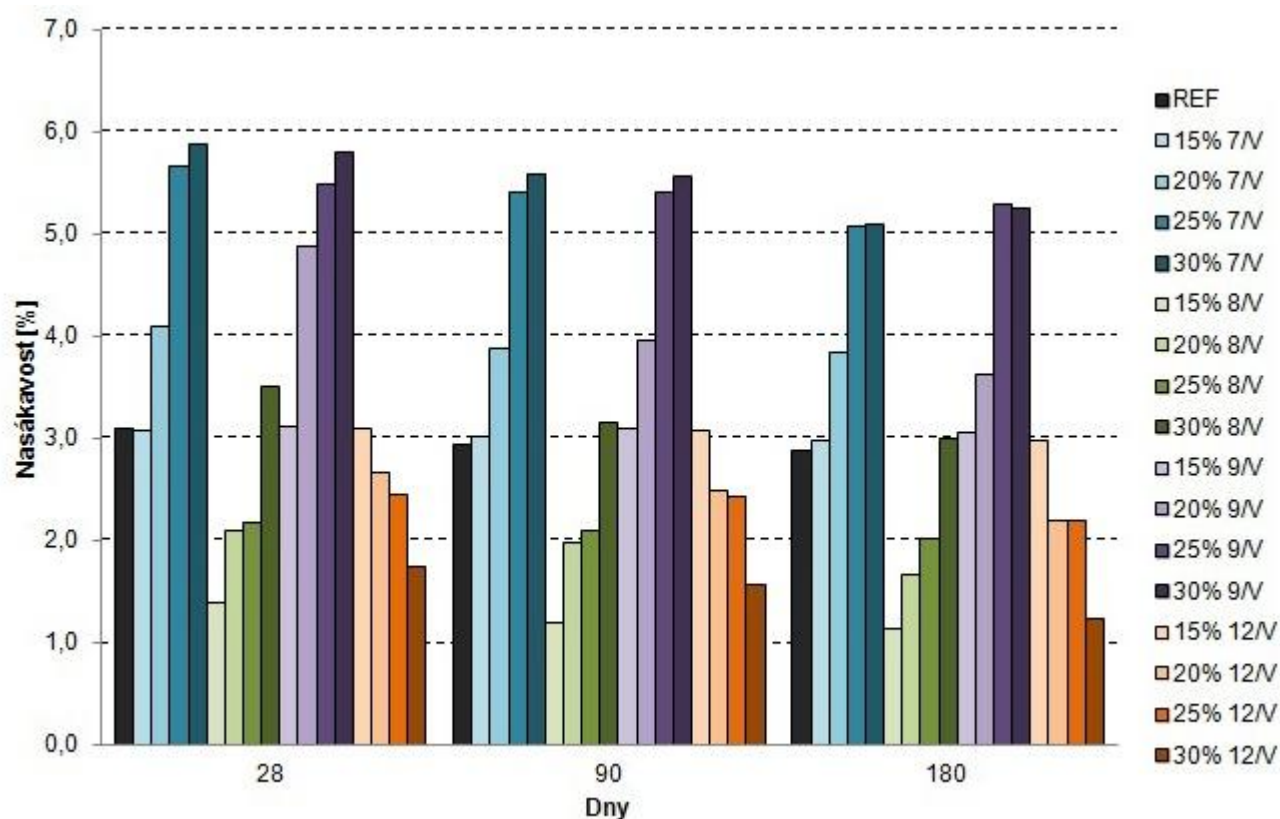
- přítomnost cizorodých iontů,
- přítomnost chemických přísad,
- přítomnost příměsí, v tomto případě jako fileru s účelem dosažení optimální mezerovitosti maltových směsí.

To znamená, že příměsí a chemické přísady, které se přidávají do směsí kvůli specifickým vlastnostem, mohou ovlivnit chování zejména při hydrataci cementu a tvrdnutí maltových směsí. [31]

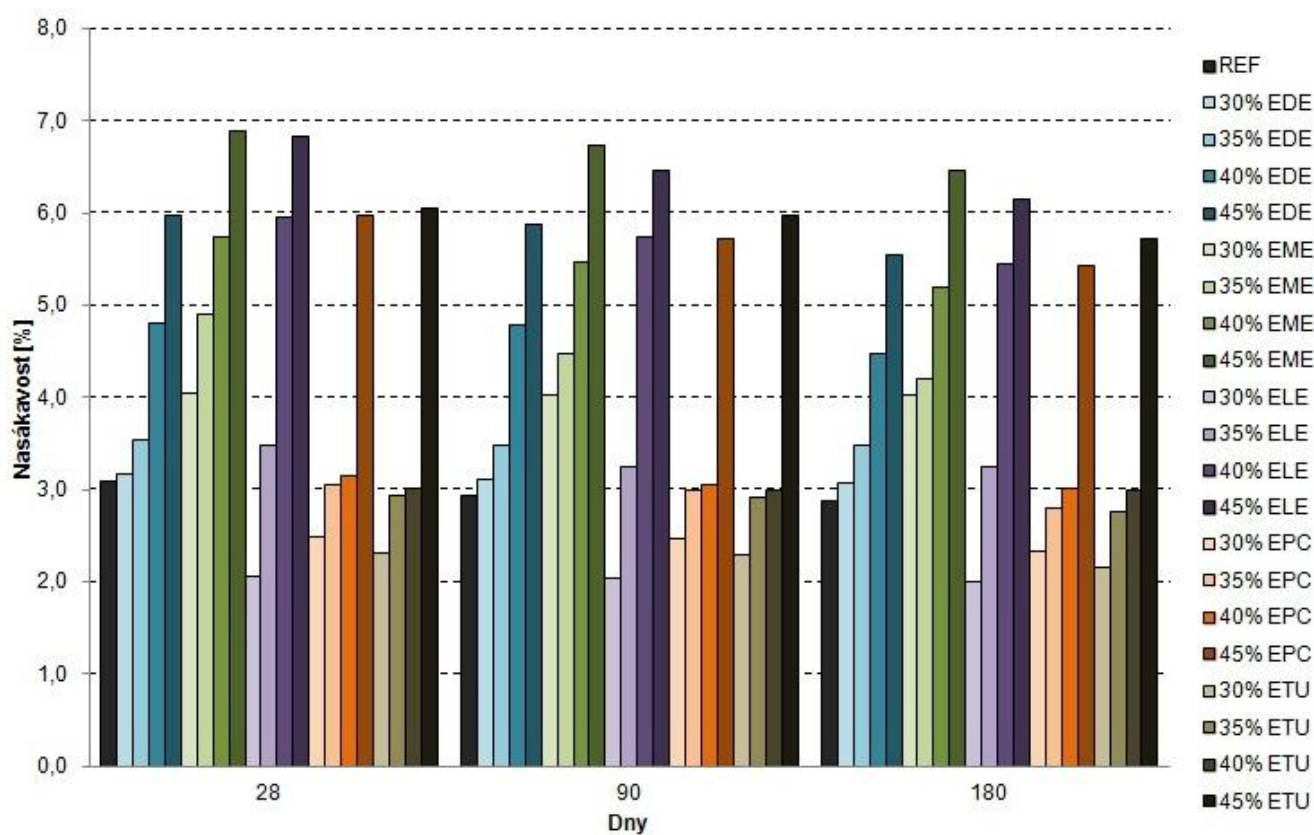
Maltové směsi s frakcemi mletého vápence				
Nasákavost NV [%]				
Dny zrání		28	90	180
REF		3,095	2,946	2,874
7/V	15%	3,078	3,018	2,978
	20%	4,089	3,876	3,842
	25%	5,665	5,413	5,076
	30%	5,876	5,573	5,100
8/V	15%	1,387	1,186	1,135
	20%	2,095	1,975	1,674
	25%	2,178	2,087	2,013
	30%	3,500	3,159	3,004
9/V	15%	3,105	3,097	3,054
	20%	4,876	3,946	3,621
	25%	5,486	5,411	5,278
	30%	5,798	5,555	5,240
12/V	15%	3,089	3,072	2,978
	20%	2,657	2,478	2,202
	25%	2,443	2,431	2,185
	30%	1,737	1,573	1,231

Tabulka 5.4 Nasákavost maltových směsí s náhradou cementu frakcemi mletého vápence

Použijeme – li příměs v takových objemech, jako jsou používány v těchto směsích, existuje vysoká pravděpodobnost, že nedojde k rovnoměrné distribuci v celém objemu matrice a že budou na určitých místech vznikat flokulace. Tento jev může být zapříčiněn větším množstvím pórovitých zón ve směsích. Lze tomu zabránit optimalizací směsi a především v postupu míchání tak, aby došlo k rovnoměrnému rozptýlení příměsí v celém objemu míchané směsi. Mikrostruktura maltových směsí byla zkoumána elektronovou mikroskopií,



Graf 5.5.7 Nasákavost maltových směsí s náhradou cementu frakcemi mletého vápence



Graf 5.5.8 Nasákavost maltových směsí s náhradou cementu elektrárenskými popílky

Maltové směsi s elektrárenskými popílký				
Nasákavost NV [%]				
Dny zrání		28	90	180
REF		3,095	2,946	2,874
EDE	30%	2,554	2,543	2,501
	35%	3,539	3,486	3,487
	40%	4,816	4,795	4,483
	45%	5,974	5,876	5,547
EME	30%	4,056	4,035	4,031
	35%	4,896	4,471	4,203
	40%	5,743	5,472	5,204
	45%	6,891	6,731	6,470
ELE	30%	3,178	3,111	3,064
	35%	3,483	3,247	3,240
	40%	5,961	5,734	5,458
	45%	6,824	6,470	6,143
EPC	30%	2,487	2,462	2,342
	35%	3,047	2,997	2,805
	40%	3,149	3,048	3,021
	45%	5,973	5,732	5,421
ETU	30%	2,321	2,298	2,148
	35%	2,946	2,912	2,764
	40%	3,009	2,997	2,994
	45%	6,048	5,976	5,721

Tabulka 5.5 Nasákavost maltových směsí s náhradou cementu různými elektrárenskými popílký

vysokotlakovou rtuťovou porozimetrií a stanovením nasákavosti ztvrdlých malt. Mikromletý vápenec se všeobecně chová jako inertní plnivo, proto může jeho přidavek zvýšit hustotu mikrostruktury v porovnání s referenční směsí. Tento předpoklad byl potvrzen u frakce mletého vápence 8/V.

Porozita a vývoj mikrostruktury v případě frakce 8/V jsou lepší ve srovnání se vzorky bez mletého vápence se stejnou hodnotou součinitele vody ku všem jemným podílům. Rozměry pórů se v tomto případě zmenšují. Vývoj struktury pórů ztvrdlé maltové směsi s mletým vápencem se řídí Powersovým modelem, což prokazují výsledky porozity zjištěné pomocí rtuťové porozimetrie.

Dalším závěrem těchto měření je, že přítomnost popílků „zlepšuje“ mikrostrukturu směsí. Struktura, která se vyvíjí, je mnohem hustější. Nezreagovaný popílek přispívá k mikroskopickým vlastnostem cementového kamene, neboť má ve směsi funkci mikroplniva. V případě maltových směsí s vysokým obsahem popílků lze celý systém považovat za kompozitní materiál s popínkem jako reaktivním mikroplnivem uloženým v matici

hydratačních a reakčních produktů. V průběhu zrání je mikrostruktura směsi jednotnější a produkty reakcí jsou v systému rovnoměrněji distribuovány. Porézní oblast v okolí částic popílku vypadá značně zahuštěně, avšak v určitých oblastech je stále porozita vyšší. Ve srovnání se směsmi s mletými vápenci můžeme dojít k závěru, že mají tyto směsi vyšší porozitu. Také se můžeme setkat se strukturou, která má nepojitý systém pórů. Hlavní příčinou vyšší porozity těchto maltových směsí je s největší pravděpodobností ta, že je míra reakce popílku s cementem relativně nízká. Další otázkou je, zda vysokotlaká rtuťová porozimetrie v případě popílkových směsí mění strukturu zkoušeného vzorku více než u referenčních směsí nebo u směsí s mletými vápenci. Maltové směsi obsahují velké nespojité póry oddělené stěnami, které jsou s největší pravděpodobností rtutí proráženy. Hustější struktura směsí s příměsemi se ukazuje v průběhu času nebo – li dostáváme méně pórovitou strukturu.

Závěrem lze říci, že u směsí s aplikací frakce mletého vápence 8/V s 15% nahrazením cementu a u elektrárenských popílků Tušimice a Počeradý s 30% nahrazením cementu jsou zajišťovány podstatně vyšší kvalitativní vlastnosti v čerstvém, ale především ve ztvrdlém stavu maltových směsí.

6 MECHANICKÉ VLASTNOSTI ZTVRDLÝCH SMĚSÍ

Pro stanovení a ověření chování jemnozrnných příměsí v maltách byla provedena poměrně rozsáhlá studie, kde byly prováděny zkoušky na čerstvých směsích a následně na ztvrdlých maltách. V následující kapitole je představeno zkoušení ztvrdlých kompozitů a jsou stanoveny jejich fyzikálně – mechanické vlastnosti, mikrostruktura, nasákavost a porozita směsí. Je zhodnocen dopad optimalizovaných křivkách zrnitosti na představené vlastnosti ve ztvrdlém stavu. Podrobně představené zkoušky najdeme v této kapitole. Veškerá prováděná měření probíhala na standardních trámečcích 40 x 40 x 160 mm, které jsou v souladu s požadavky s normou ČSN EN 196 – 1. V důsledku vysoké tekutosti směsi (SCC malty) nebyla potřebná žádná zhutňující energie. Vytvořené vzorky byly po 24 hodinách odformovány a uloženy ve vlhkém prostředí.

Míchání probíhalo na normové míchačce podle stanovené míchací doby normové malty. Sled přidávaných materiálů do míchacího procesu má zajisté vliv na reologické vlastnosti a vývoj mikrostruktury připravované malty. V literatuře se můžeme setkat s různými studiemi o vlivu míchacího postupu na vlastnosti zkoušených malt, avšak nebyl představen žádný konkrétní postup. Literatura se odkazuje na zkušenosti zkoušejícího a zkoušení typu „pokus - omyl“ s cílem zajištění co nejmenší chyby. Na základě různých teorií se předpokládá, že vhodným pořadím je míchání nejjemnějších složek s vodou, poté přidání složek hrubší zrnitosti, aby došlo k dokonalé homogenizaci směsi. Tento způsob vede k ideálně homogenizované cementové pastě s příměsí bez shluků s vrstvou vody okolo každé částice cementu a příměsí. Při míchání malty se cement sype do vody, předložené v míchací nádobě tak, aby nedošlo ke ztrátám vody ani cementu. Doba, po kterou byl přidáván cement do vody musela být delší než 5 sekund, ale nepřekročila 10 sekund. Okamžik ukončení přidání cementu je výchozí hodnotou pro měření času. Míchací proces má poté následující kroky:

- spustí se míchání nízkou rychlostí (140 ot./min.),
- po 30 s se plynule v průběhu následujících 30 s přisype písek,
- poté se míchá 30 s vyšší rychlostí (285 ot./min.),
- míchačka se na 90 s zastaví; během prvních 15 s se pomocí gumové stěrky setře všechna malta ulpělá na stěnách nádoby,
- v míchání se pokračuje 60 s vyšší rychlostí (285 ot./min.).

Tento časový program musí být dodržen pro jednotlivé úseky míchání s přesností na ± 1 sekundu. Bezprostředně po ukončení míchání se maltou rovnoměrně naplní jednotlivé díly formy.

6.1 Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku

Pro stanovení mechanických vlastností ztvrdlých malt byla provedena pevnost v tahu za ohybu na normových trámčích a pevnost v tlaku na jejich zlomcích dle ČSN EN 196 – 1. V tomto případě byly stanovovány mechanické vlastnosti po 7, 28 a 90 dnech při uložení ve vlhkém prostředí. Můžeme tedy stanovit i nárůst, případně pokles, pevností v čase.

Stanovení pevnosti v tahu za ohybu

Zkušební těleso se uloží do zkušebního stroje na jednu z bočních ploch na válcové podpěry tak, že jeho podélná osa je k válcovým podpěrám kolmá. Vzdálenost os obou válcových podpěr je 100 mm. Zatížení se přenáší přes zatěžovací válec kolmo na protilehlou boční plochu zkušebního tělesa (deformující síla tedy působí kolmo na původní směr hutnění malty) a zvyšuje se rovnoměrnou rychlostí $50 \pm 10 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$ až do zlomení vzorku. Poloviny trámečků se uchovávají do doby zkoušky pevnosti v tlaku ve vlhku. Pevnost v tahu za ohybu se počítá z obecného napětí v ohybu jako jeho mezní hodnota podle vzorce:

$$R_f = \max \cdot \sigma_f = \frac{\max \cdot M}{W} \quad [N \cdot mm^{-2}],$$

Rovnice 6.1

kde σ je napětí ohybu, M je ohybový moment a W je průřezový modul v místě porušení. Průřezový modul trámečku s čtvercovým průřezem o straně b se vypočte jako:

$$W = \frac{b^3}{6}.$$

Rovnice 6.2

Ohybový moment M je při vzdálenosti podpěr l a použitím uspořádání zkoušky dán vztahem:

$$M = \frac{F_t \cdot l}{4}.$$

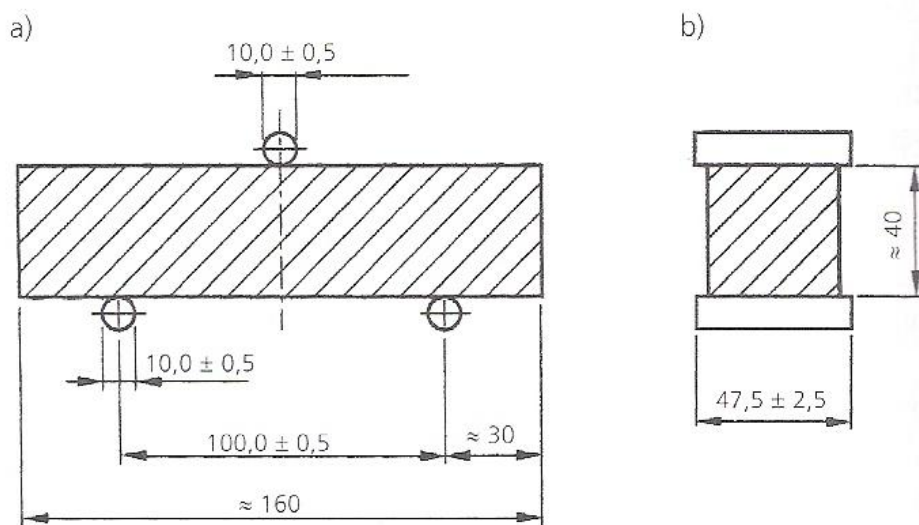
Rovnice 6.3

ČSN EN 196 – 1 uvádí pro výpočet pevnosti v tahu za ohybu vztah po dosazení:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_t \cdot l}{b^3} \quad [N \cdot mm^{-2}],$$

Rovnice 6.4

kde b je strana čtvercového průřezu trámečku, F_t je zatížení vynaložené na střed trámečku při zlomení a l je vzdálenost mezi podpěrami. [36]



Obrázek 6.1 Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu, a) čelní pohled, b) boční pohled [36]

Stanovení pevnosti v tlaku

Poloviny trámečků po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu se zkouší na pevnost v tlaku. Poloviny trámečků se vloží bočními plochami (kolmo na směr hutnění) mezi pomocné ocelové destičky, které přesně vymezují velikost tlačené plochy nepravidelného zlomku. Podle ČSN EN 196 – 1 jsou rozměry destiček z tvrzené oceli 40 x minimálně 40 mm a tloušťka minimálně 10 mm. Tyto destičky vymezují velikost plochy podrobené tlakovému namáhání (1600 mm²).

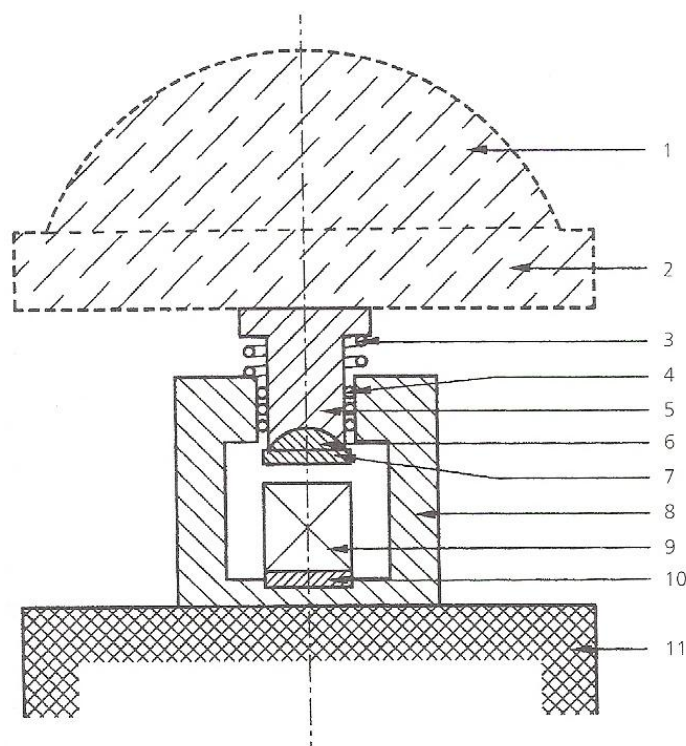
Vzájemná poloha horní a dolní destičky musí být během zkoušky stálá, výslednice zatížení musí procházet středem zkušebního tělesa. Zkušební přístroj musí mít možnost nastavení na vhodný pracovní rozsah, rychlost zatěžování by měla ležet v rozmezí 2400 ± 200 N·s⁻¹. Pevnost v tlaku se vypočítá ze vztahu:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad [N \cdot mm^{-2}],$$

Rovnice 6.5

kde R_c je pevnost v tlaku, F_c je nejvyšší zatížení při porušení a 1600 je plocha vymezená tlačnými destičkami (40 x 40 mm). Výsledkem zkoušky je aritmetický průměr alespoň ze šesti hodnot pevnosti v tlaku, které jsou stanoveny na sadě tří zkušebních těles. Jestliže se jedna hodnota ze šesti liší o více než 10% od průměru ze šesti stanovení, vyřadí se a ze zbylých pěti se vypočte nový aritmetický průměr. Jestliže se opět jedna hodnota liší o více než 10%

od tohoto průměru, je nutno výsledek zkoušky odmítnout. Tento předpoklad byl aplikován při všech stanoveních. [36]



Obrázek 6.2 Schéma přístroje pro zkoušení pevnosti v tlaku, 1 – kuličkové ložisko, 2 – pohyblivá část, 3 – vratná pružina, 4 – kulové uložení zkušebního přístroje, 5 – horní tlačná deska zkušebního přístroje, 6 – kulové uložení přístroje, 7 – horní tlačná destička přístroje, 8 – zkušební těleso, 9 – dolní tlačná destička, 10 – spodní deska přístroje, 11 – spodní deska zkušebního přístroje. [36]

6.2 Poměr nárůstu pevností

Proces pevnostního nárůstu je komplexní systém, která je ovlivněn mnoha faktory. Největší vliv má na tento proces hodnota vodního součinitele, složení směsí a množství použitého cementu. Průběh nárůstu pevností může být proto stanoven zkoušením různého stáří kompozitu. V tomto případě byly porovnávány hodnoty v průběhu 7, 28 a 90 dnů. Přehled pevností jednotlivých směsí je uveden v tabulce 6.1 a v grafech 6.1, 6.2, 6.3 a 6.4. Rychlost nárůstu pevností v průběhu času je u samozhutnitelných směsí velmi podobná jako u směsí tradičně zhutněných maltových směsí se stejným vodním součinitelem. Jediným obecným závěrem, který je možné učinit je to, že pokud se při výrobě samozhutnitelné směsi použije stejný obsah cementu a vody jako u tradičně zhutněné směsi, bude tato směs vykazovat stejnou nebo vyšší pevnost než zhutněná malta. Tento předpoklad je podle výsledků zaznamenán u směsí s elektrárenskými popílky Počerady a Tušimice a s frakcí

mletého vápence 8/V, kde jsou použita poměrně velká množství příměsí, avšak dávka cementu je snížena.

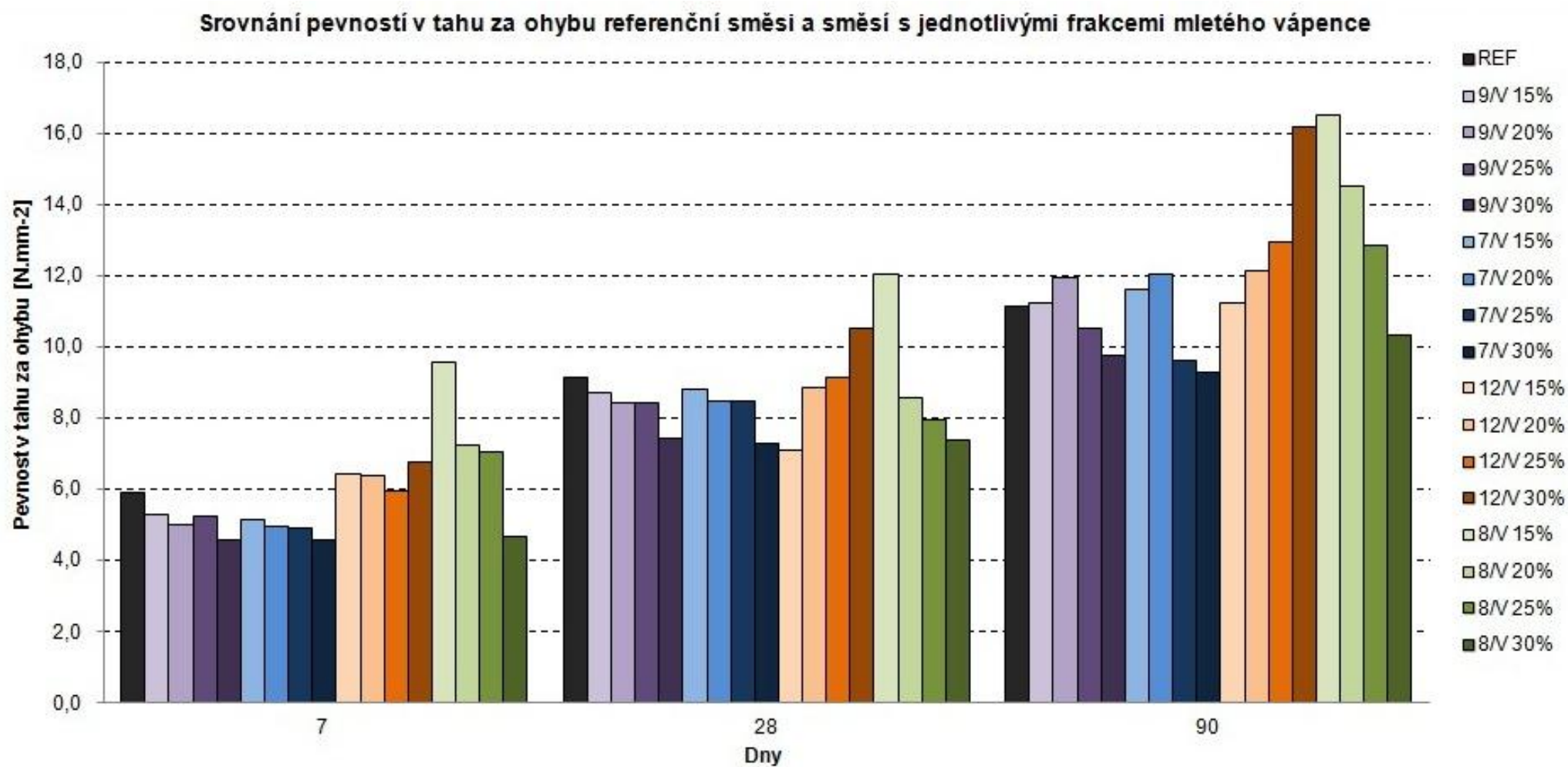
6.2.1 Substituce vodního součinitele součinitelem vody ku všem jemným podílům

Dalším obecným vyhodnocením může být porovnání pevností z hlediska substituce vodního součinitele součinitelem vody ku všem jemným podílům. V literatuře se dnes setkáváme se všeobecně přijímaným a stanoveným faktem, kde jsou k jednotlivých pevnostním třídám betonu určeny i jednotlivé poměry vody a cementu, tzv. vodní součinitel, což je i jakýmsi měřítkem pro kontrolu pevností. Avšak v dnešní době se tento koncept již jeví jako zastaralý a bylo by vhodné ho nějakým způsobem pozměnit. Důvody jsou následující: výroba cementu se kompletně změnila ve srovnání se 70. léty a dnes máme k dispozici poměrně velké množství jednotlivých druhů cementu s různými vlastnostmi a použitím pro jednotlivé betony. V dnešní době také hledáme alespoň částečnou náhradu drahého cementu ať už reaktivními nebo nereaktivními příměsemi, které jsou složeny z menších částic než jsou samotná zrna cementu. V případě, že použijeme takto jemnou příměs, je nutné si uvědomit, že nám dojde ke zvýšení měrného povrchu míchané směsi a s tím spojenou potřebu vody, která není v tomto případě závislá na skutečném množství použitého cementu ve směsi. Pokud položíme do grafu hodnoty pevnosti v tlaku po 28 dnech a vodního součinitele, nenalezneme zde žádnou přímou zákonitost. V této práci byly proto zvoleny směsi s konstantním součinitelem vody ku všem jemným podílům, tj. částicím menších než 125 μm .

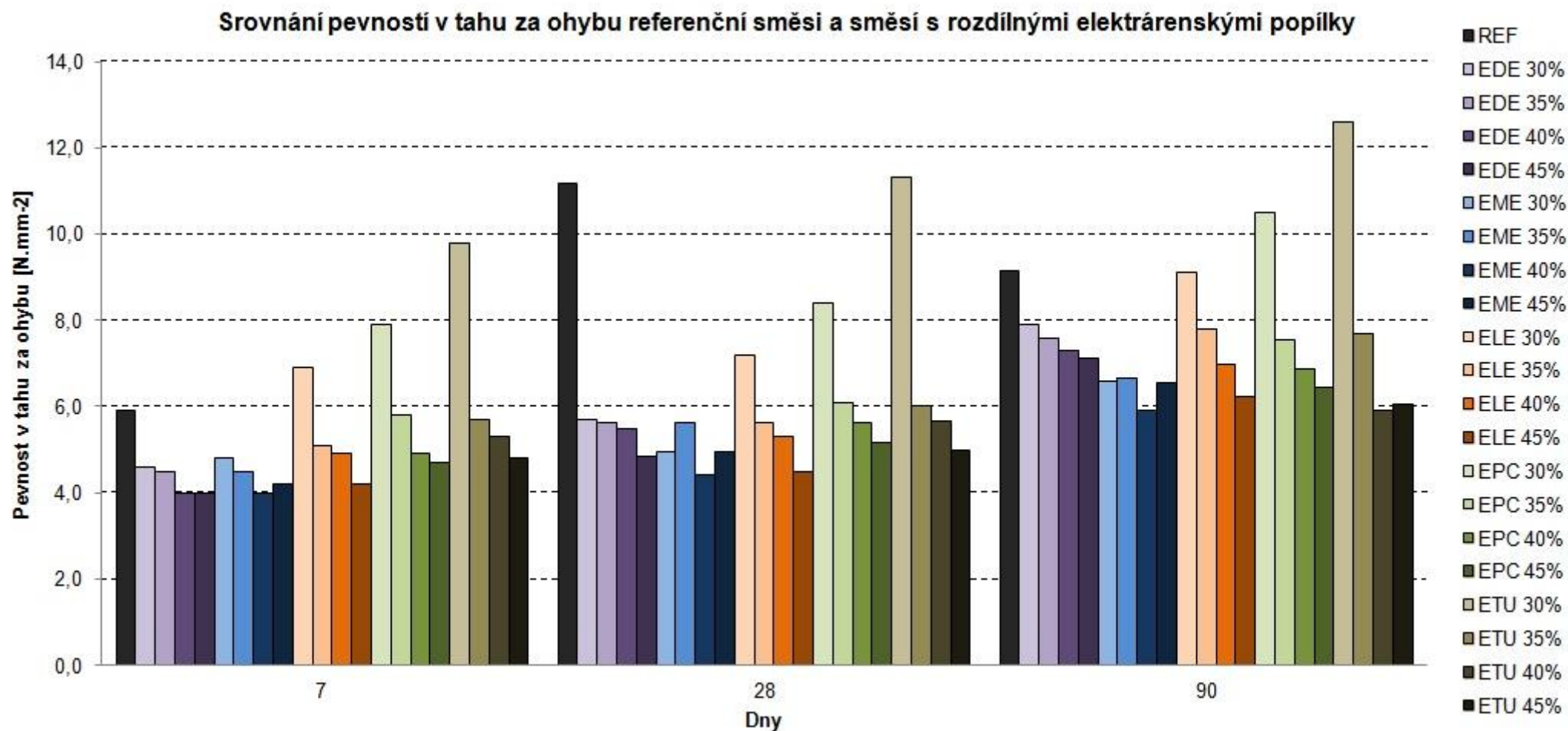
Pevnosti v tlaku v některých případech klesají pod hodnoty referenční směsi, což je následkem zvýšeného měrného povrchu celé matrice. Vybočující z tohoto závěru jsou některé směsi – směsi s přidáním frakcí mletého vápence 8/V a 12/V. V případě 15% nahrazení cementu touto frakcí, došlo k dosažení vyšších pevností v porovnání s referenční směsí. Stejný trend je pozorován v případě 20% a 25% nahrazení stejnou frakcí a 30% nahrazením cementu frakcí 12/V. V případě elektrárenských popílků má pozitivní vliv na pevnosti 30% náhrada cementu popílkem Počerady a Tušimice opět v porovnání s referenční směsí.

Pevnost v tahu za ohybu				Pevnost v tlaku		
Směs	Dny zkoušení			Dny zkoušení		
	7	28	90	7	28	90
REF	5,9	9,2	11,2	23,4	33,6	44,4
7/V 15%	5,2	8,8	11,6	18,5	30,0	37,9
7/V 20%	5,0	8,5	12,0	18,4	25,7	32,4
7/V 25%	4,9	8,5	9,6	17,4	23,7	29,8
7/V 30%	4,6	7,3	9,3	15,2	22,2	28,7
8/V 15%	9,6	12,1	16,5	36,8	43,8	56,1
8/V 20%	7,3	8,6	14,5	25,9	37,0	45,2
8/V 25%	7,0	8,0	12,9	25,6	31,4	37,5
8/V 30%	4,7	7,4	10,4	14,1	22,4	30,8
9/V 15%	5,3	8,7	11,2	18,7	29,3	38,1
9/V 20%	5,0	8,4	12,0	19,6	27,4	34,2
9/V 25%	5,3	8,4	10,6	17,1	24,1	30,9
9/V 30%	4,6	7,4	9,8	15,2	22,2	28,8
12/V 15%	6,4	7,1	11,3	25,8	27,2	36,1
12/V 20%	6,4	8,9	12,2	24,5	25,6	31,9
12/V 25%	6,0	9,1	12,9	22,0	27,4	36,1
12/V 30%	6,8	10,5	16,2	22,9	31,3	39,1
EDE 30%	4,6	5,7	7,9	22,8	25,6	32,6
EDE 35%	4,5	5,6	7,6	21,9	23,3	31,9
EDE 40%	4,0	5,5	7,3	20,8	22,1	31,4
EDE 45%	4,0	4,8	7,1	19,9	20,2	28,4
EME 30%	4,8	5,0	6,6	21,8	23,2	30,4
EME 35%	4,5	5,6	6,7	20,7	21,8	31,0
EME 40%	4,0	4,4	5,9	19,0	19,5	27,2
EME 45%	4,2	5,0	6,5	18,4	19,3	24,9
ELE 30%	6,9	7,2	9,1	20,1	22,9	32,3
ELE 35%	5,1	5,6	7,8	19,8	21,1	29,7
ELE 40%	4,9	5,3	7,0	18,0	18,9	26,7
ELE 45%	4,2	4,5	6,2	15,7	16,4	23,2
EPC 30%	7,9	8,4	10,5	25,4	34,7	44,8
EPC 35%	5,8	6,1	7,5	20,7	21,2	31,3
EPC 40%	4,9	5,6	6,9	18,0	18,9	27,2
EPC 45%	4,7	5,2	6,5	15,9	16,6	24,0
ETU 30%	9,8	11,3	12,6	26,2	35,0	44,9
ETU 35%	5,7	6,0	7,7	20,5	21,7	30,2
ETU 40%	5,3	5,7	5,9	21,2	22,8	29,3
ETU 45%	4,8	5,0	6,1	19,0	19,6	25,0

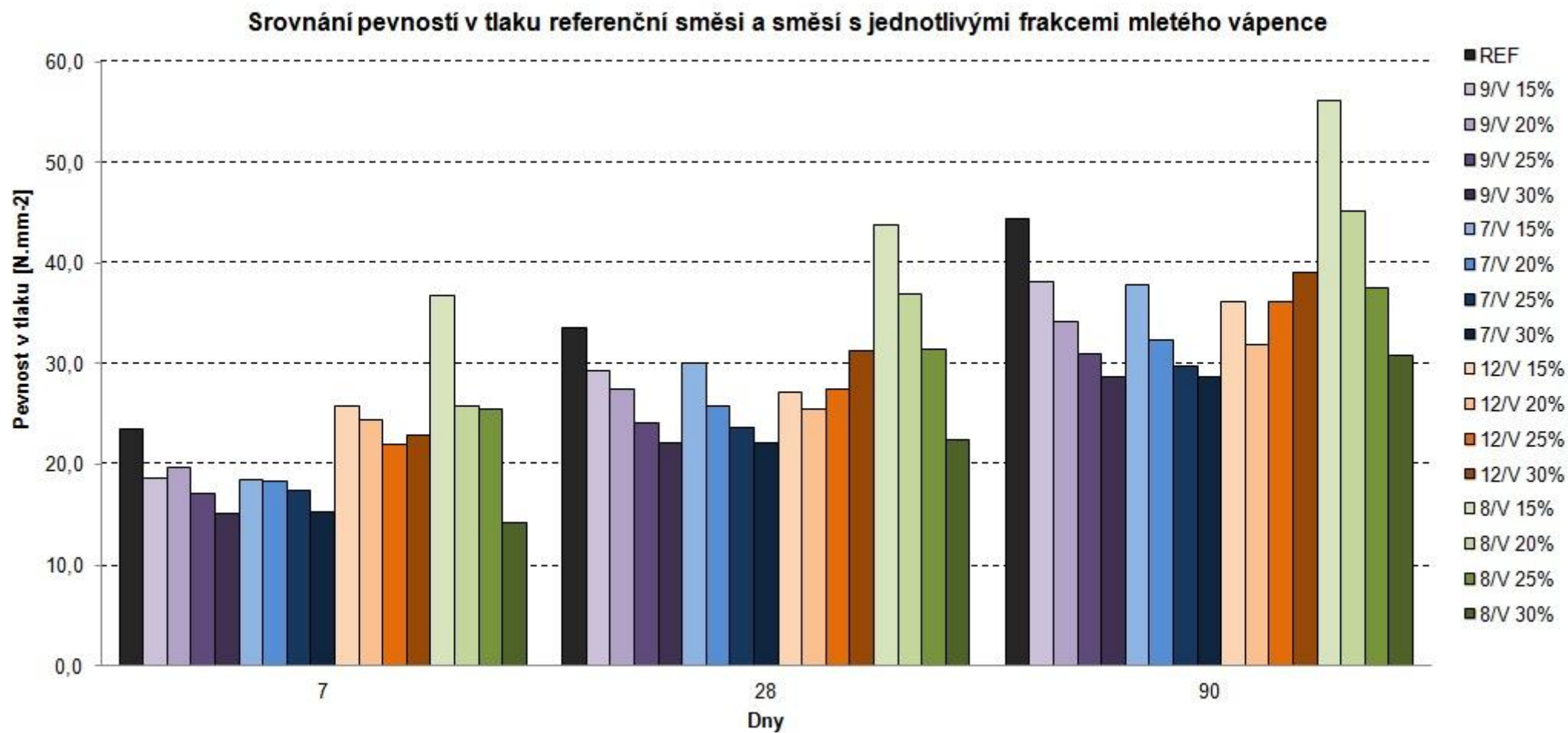
Tabulka 6.1 Přehled pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku namíchaných směsí (průměrné hodnoty z namíchaných směsí)



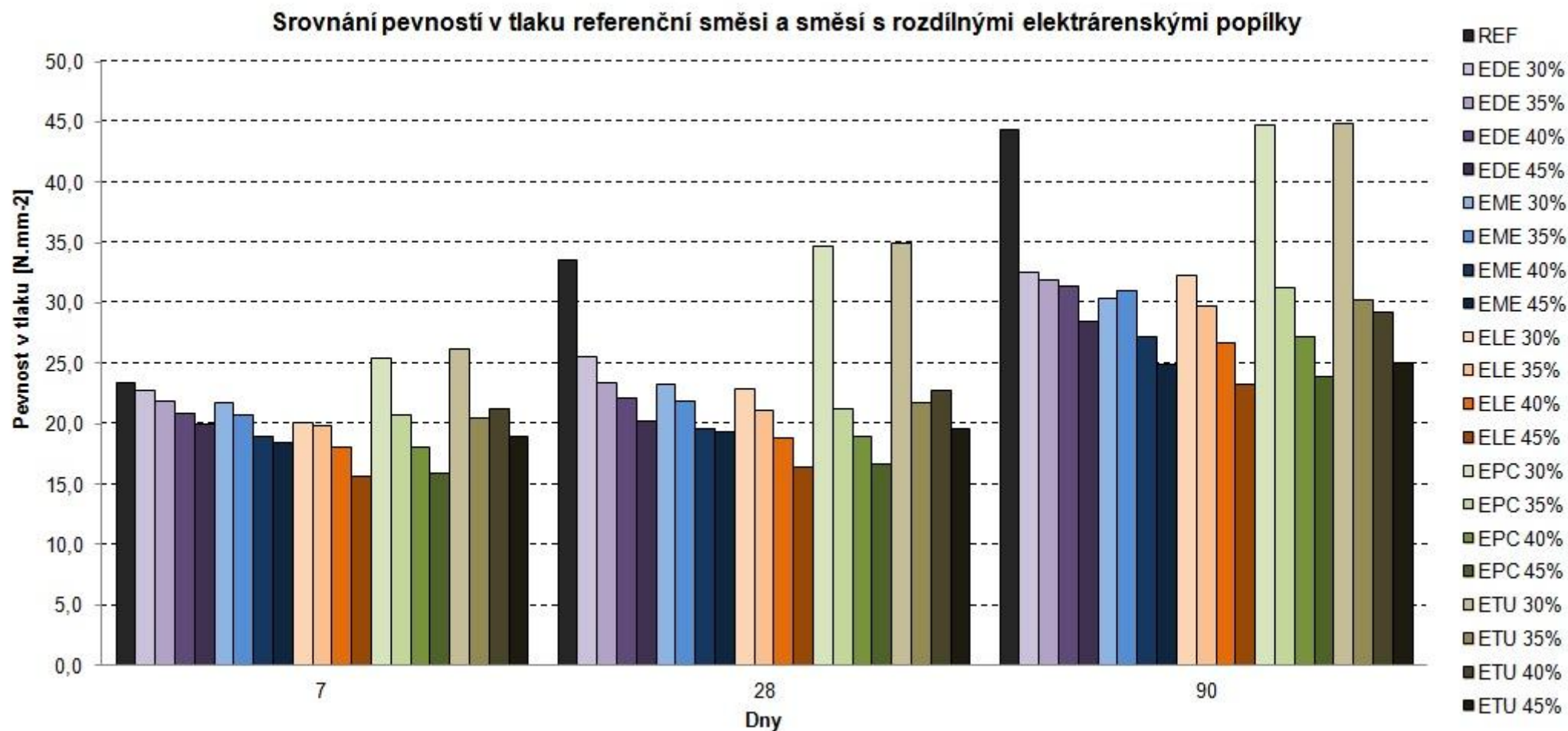
Graf 6.1 Pevnosti v tahu za ohybu (referenční směs a směsi s mletými vápenci)



Graf 6.2 Pevnosti v tahu za ohybu (referenční směs a směsi s elektrárenskými popílky)



Graf 6.3 Pevnosti v tlaku (referenční směs a směsi s mletými vápenci)



Graf 6.4 Pevnosti v tlaku (referenční směs a směsi s elektrárenskými popílky)

7 ZÁVĚR

Návrh a optimalizace maltových nebo betonových směsí je časově poměrně náročný a složitý proces. Zaměřuje se na složení směsí tak, aby bylo dosaženo optimální mezerovitosti s cílem dosažení požadované zpracovatelnosti, tak i příznivých fyzikálně – mechanických vlastností ztvrdlých směsí.

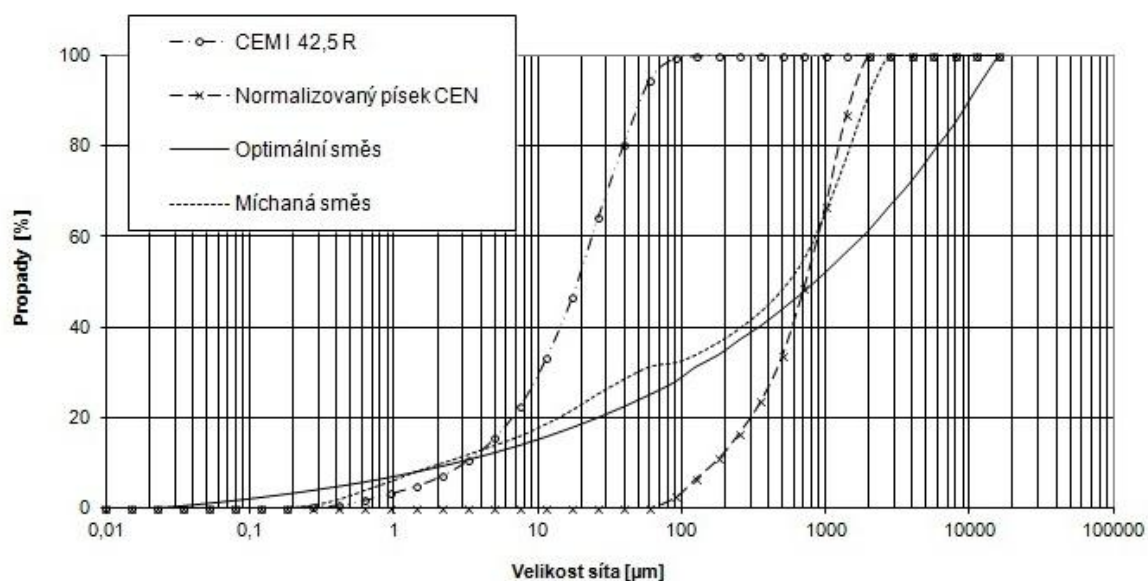
Během této práce byly namíchány optimalizované maltové směsi s poměrně nízkým obsahem cementu a poměrně vysokým podílem jemných příměsí. O těchto směsích můžeme říci, že pojetí vodního součinitele (tedy poměru vody ku cementu) a pevností v tlaku, již není platný. Ve skutečnosti je zde pojetí součinitele vody ku všem jemným podílům (to znamená poměr vody ku cementu včetně všech jemných příměsí) přijatelnějším. Návrh maltových směsí tímto způsobem se zdá být vhodným postupem pro optimalizaci směsí a dosažení požadovaných vlastností. K tomuto návrhu je však nutné znát teoretické předpoklady, vytvořit komplexní analýzu jemnozrnných příměsí zahrnujících křivky zrnitosti veškerých materiálů, jemnost mletí potvrzenou stanovením měrného povrchu, stanovení tvarového indexu těchto jemných materiálů a jejich vliv na mezerovitost zhutněného fileru.

7.1 Přehled získaných výsledků

Na následujících stránkách můžeme vidět přehled optimalizovaných směsí a jejich kompletní zhodnocení v porovnání se směsí referenční. Druhou částí je kompletní shrnutí výsledků optimalizovaných směsí, kde byly dosaženy příznivější výsledky (tj. 15% nahrazení cementu frakcemi mletého vápence a 30% nahrazením cementu elektrárenskými popílkami) v porovnání s referenční směsí. Tyto směsi jsou porovnávány nejen se směsí, kde nebyla použita žádná příměs, ale také vzájemně mezi sebou.

7.1.1 Přehled optimalizovaných směsí

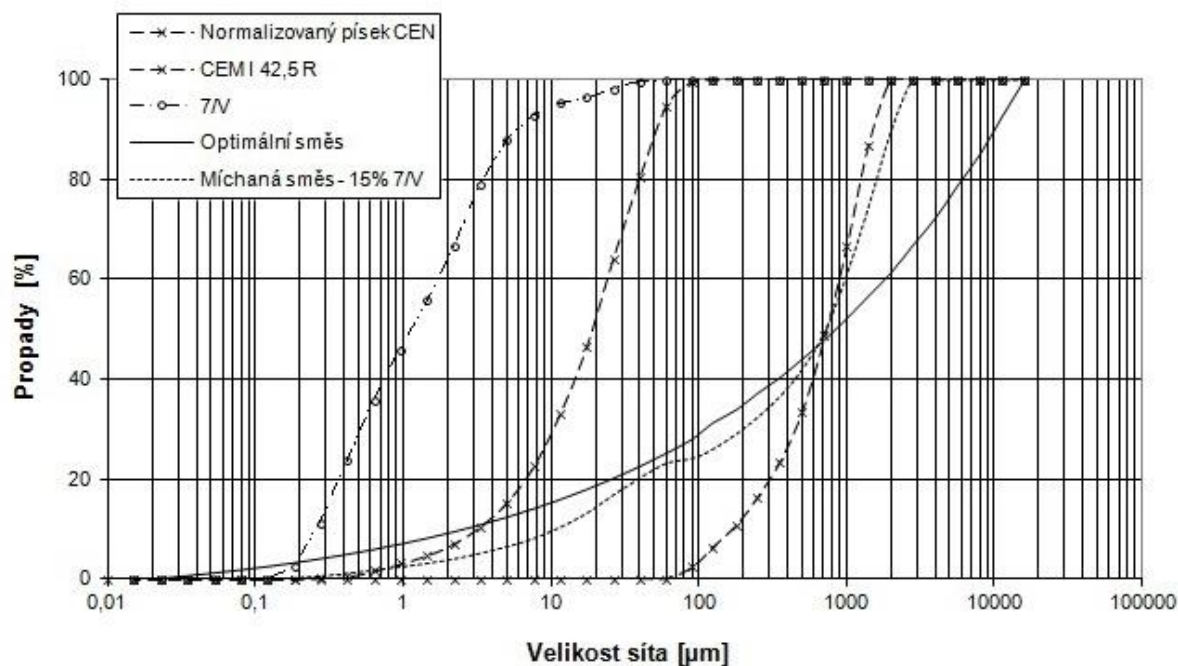
Přehled optimalizovaných směsí a vytvořených spojitých křivek zrnitosti s použitím příměsí frakcí mletých vápenců a elektrárenských popílků uvedených v této práci v porovnání s referenční směsí nalezneme níže. V této práci byly modifikovány spojitě křivky zrnitosti a to především v oblasti do 0,25 mm s cílem dosažení minimální mezerovitosti směsí. Veškeré připravené maltové směsi byly vyhodnoceny a byly stanoveny dopady na fyzikálně – mechanické vlastnosti ztvrdlých kompozitů.



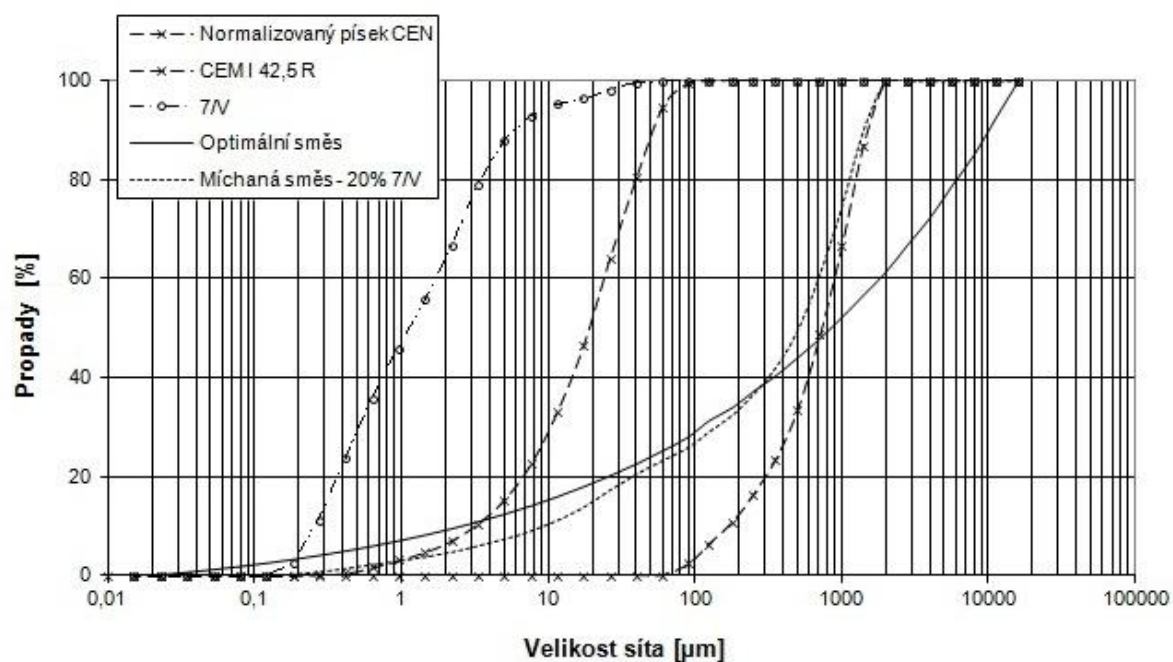
Graf 7.1 Referenční směs (REF) – z grafu je patrný nedostatek materiálu s velikostmi částic do 250 μm

Směsi s frakcí mletého vápence 7/V:

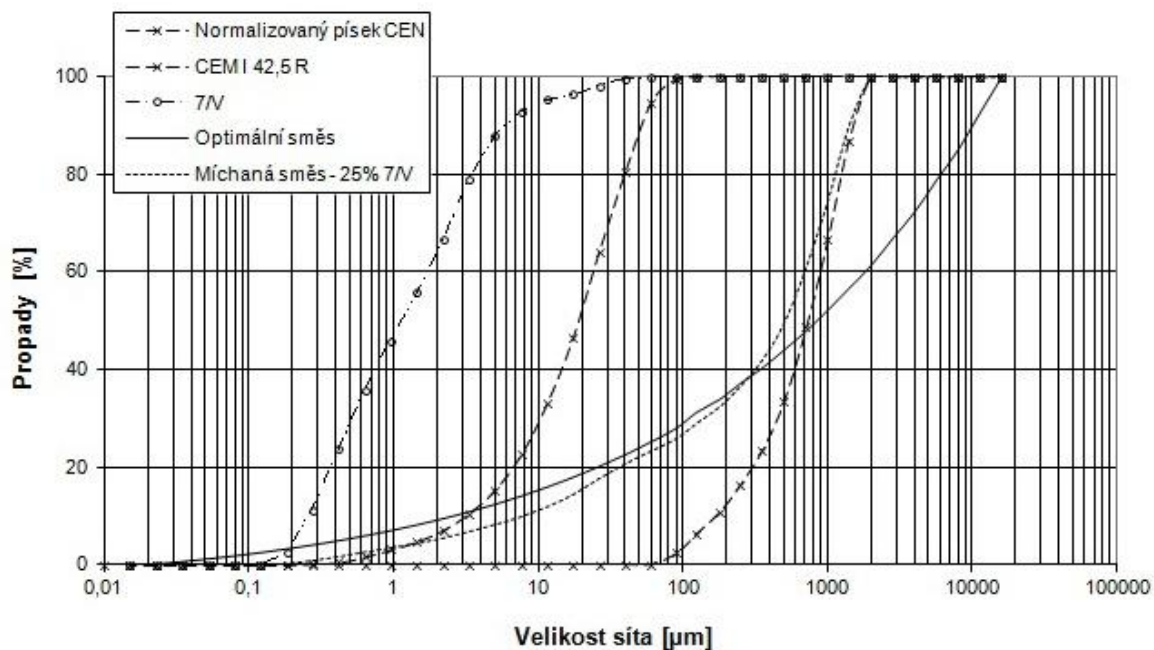
- 15% až 30% nahrazení cementu – tyto směsi upravují spojitou křivku zrnitosti, ale nedochází k optimalizaci směsi. Tato příměs má poměrně vysokou hodnotu kulatosti částic, avšak tato zrna neoptimalizují směs v oblasti částic do 250 μm . Mikrostruktura směsí je zobrazena na snímcích z elektronového mikroskopu. Tato příměs také nezlepšuje fyzikálně – mechanické vlastnosti v porovnání s referenční směsí, jak můžeme vidět z dosažených výsledků.



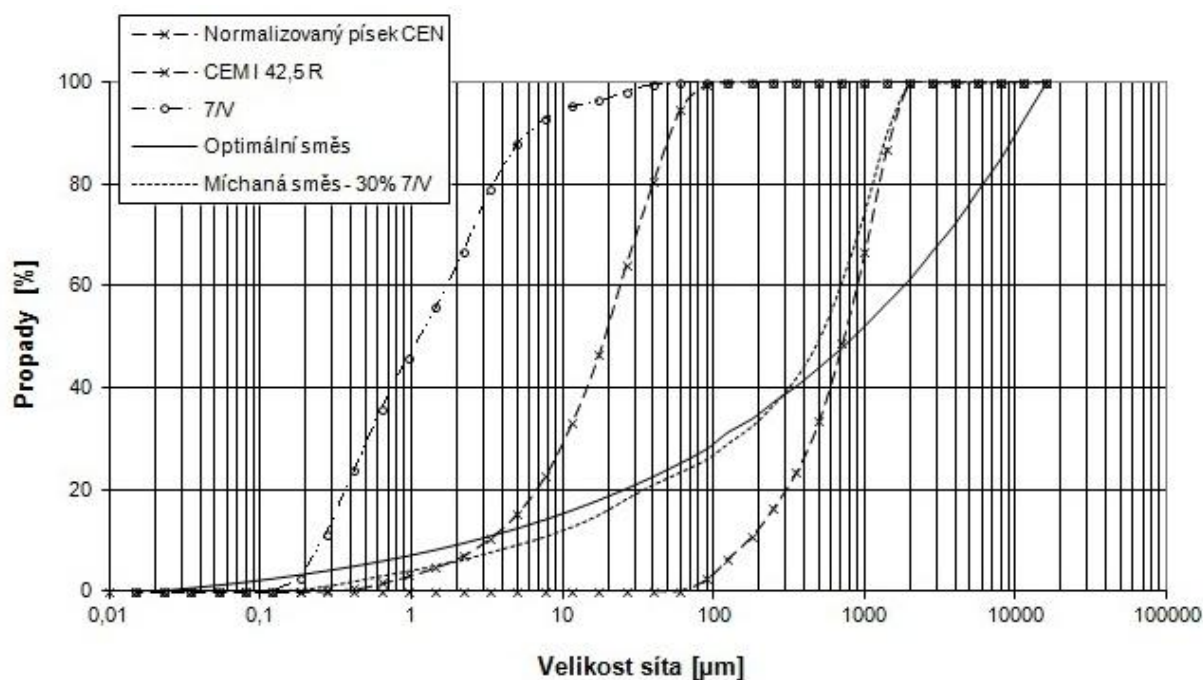
Graf 7.2 Maltová směs s frakcí mletého vápence 7/V s 15% nahrazením cementu touto příměsí



Graf 7.3 Maltová směs s frakcí mletého vápence 7/V s 20% nahrazením cementu touto příměsí



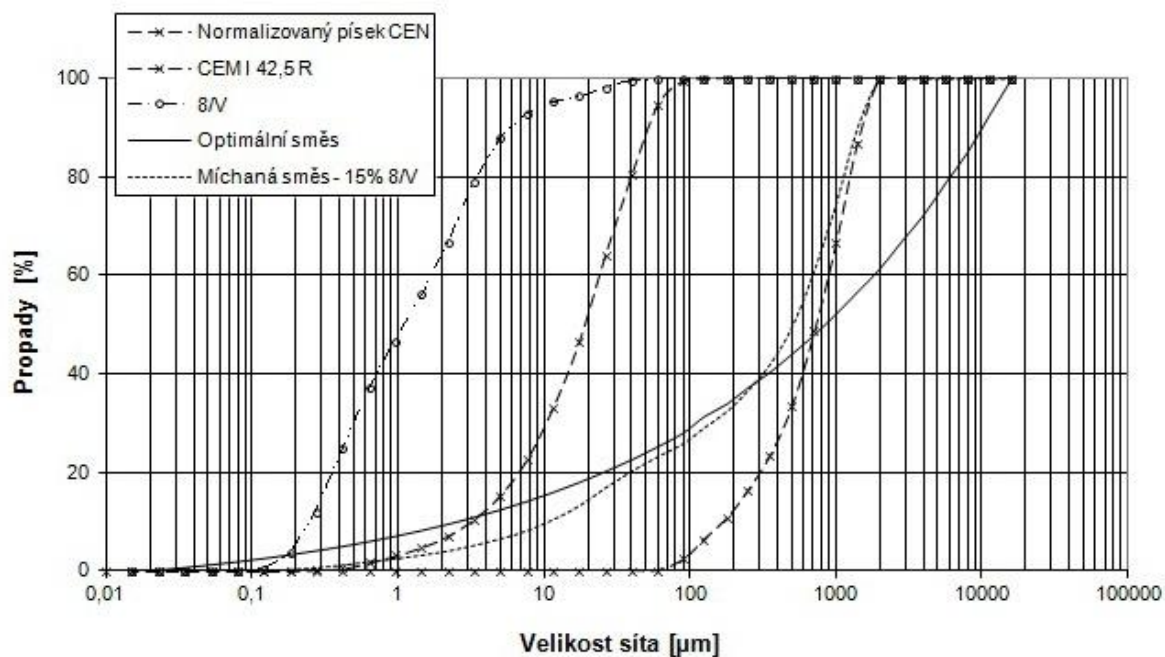
Graf 7.4 Maltová směs s frakcí mletého vápence 7/V s 25% nahrazením cementu touto příměsí



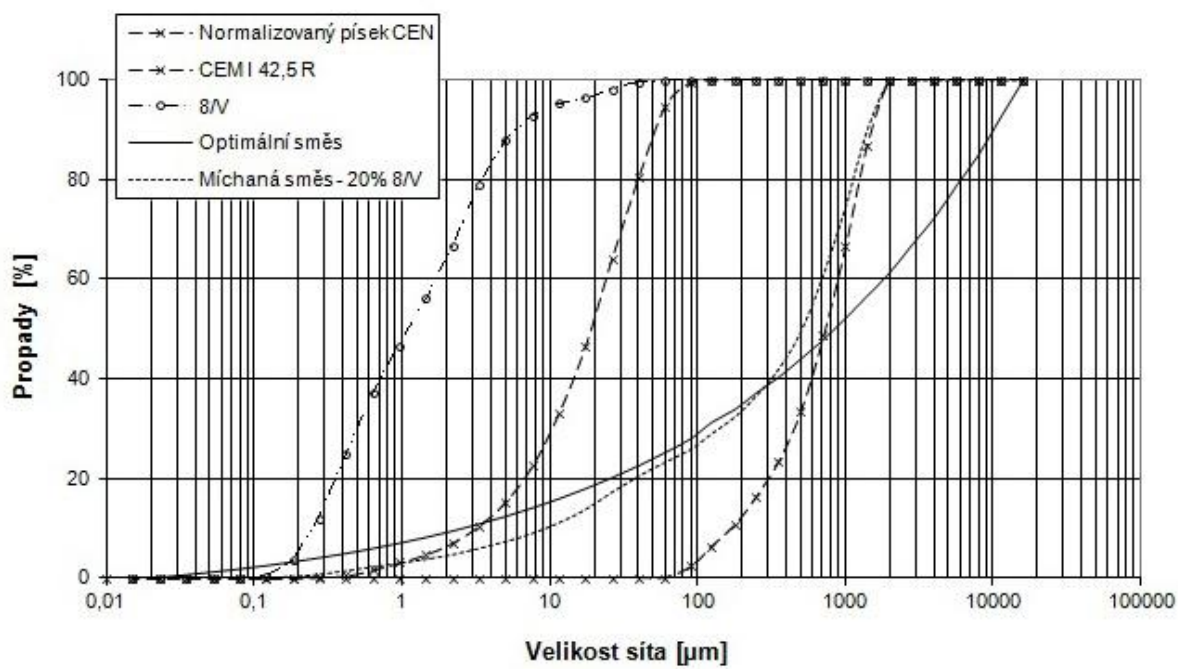
Graf 7.5 Maltová směs s frakcí mletého vápence 7/V s 30% nahrazením cementu touto příměsí

Směsi s frakcí mletého vápence **8/V**:

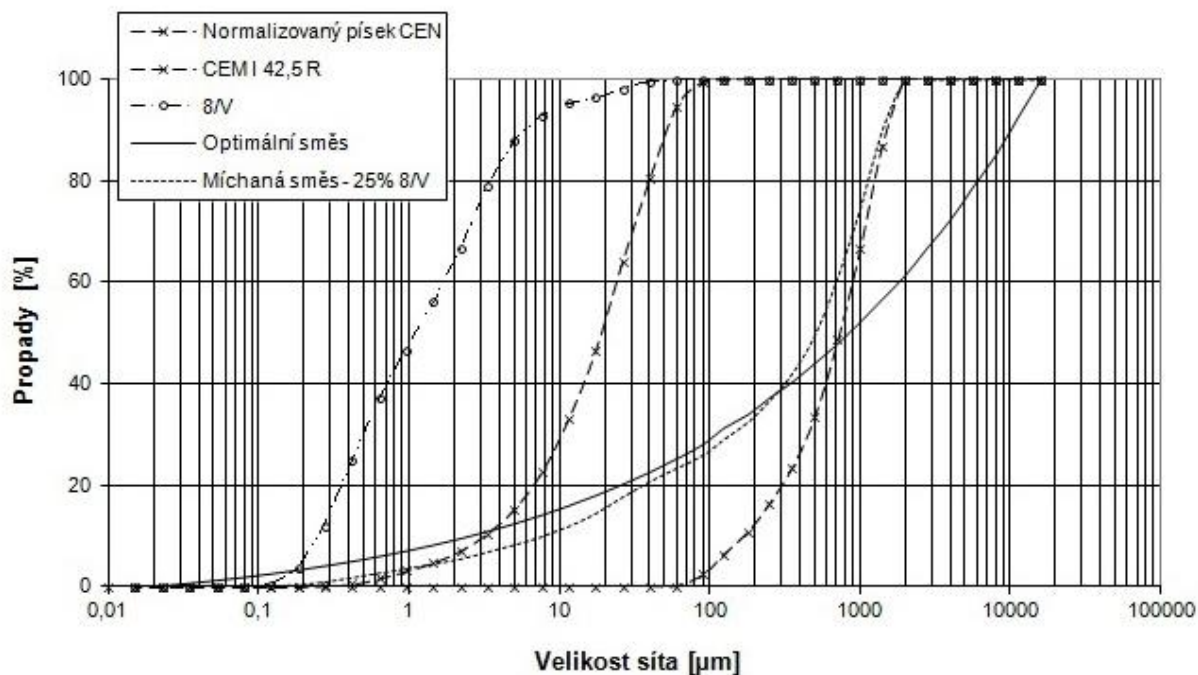
- 15% nahrazení cementu – tato frakce s tímto procentuelním nahrazením optimalizuje směs v oblasti velikosti částic 30 – 300 μm a snížení pórovitosti připravené směsi. Tvarový index tohoto materiálu se zdá být optimálním pro dosažení lepších výsledků. Z výsledků chování čerstvé směsi a ztvrdlé malty došlo ke zlepšení vlastností, především fyzikálně – mechanické vlastností. Pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku dosahují vyšších hodnot než směs referenční. Mikrostruktura je opět ověřena elektronovou mikroskopií.
- 20 až 30% nahrazení cementu – dochází k optimalizaci směsí, ale s rostoucím množstvím dochází ke zhoršování fyzikálně – mechanických vlastností.



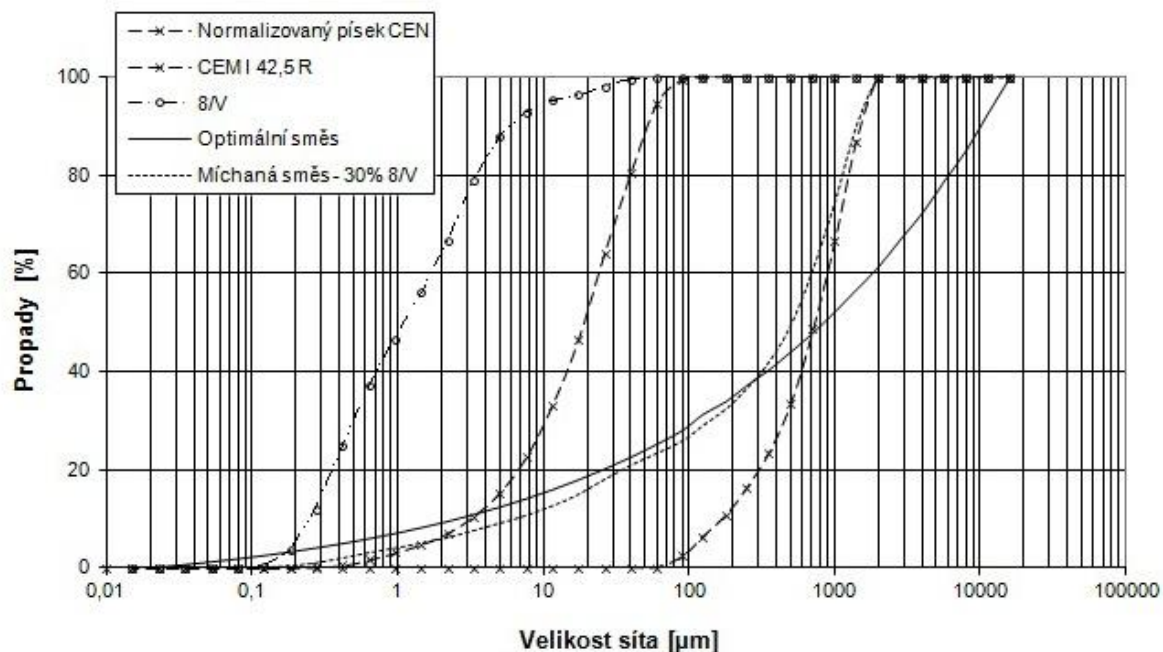
Graf 7.6 Maltová směs s frakcí mletého vápence 8/V s 15% nahrazením cementu touto příměsí



Graf 7.7 Maltová směs s frakcí mletého vápence 8/V s 20% nahrazením cementu touto příměsí



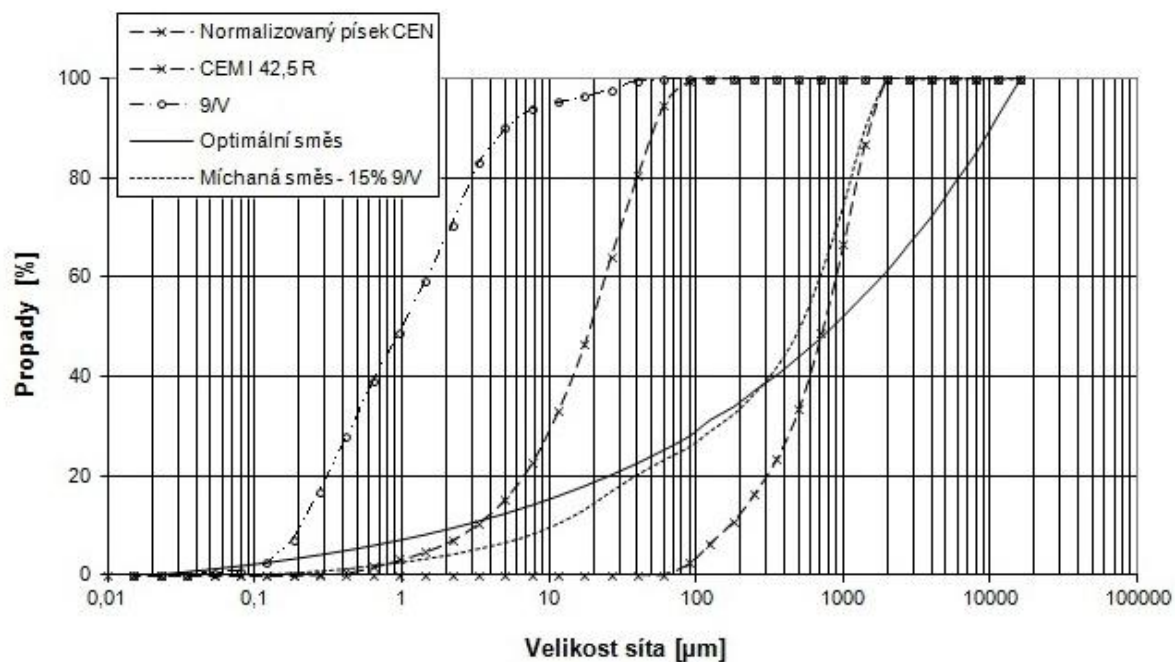
Graf 7.8 Maltová směs s frakcí mletého vápence 8/V s 25% nahrazením cementu touto příměsí



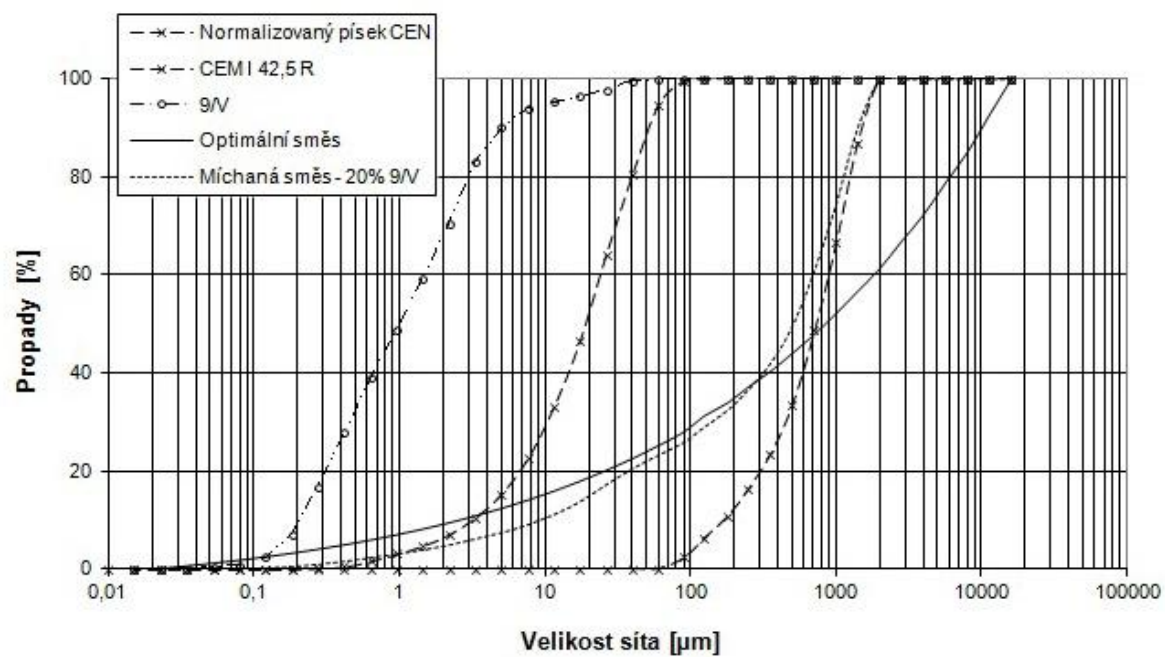
Graf 7.9 Maltová směs s frakcí mletého vápence 8/V s 30% nahrazením cementu touto příměsí

Směsi s frakcí mletého vápence 9/V:

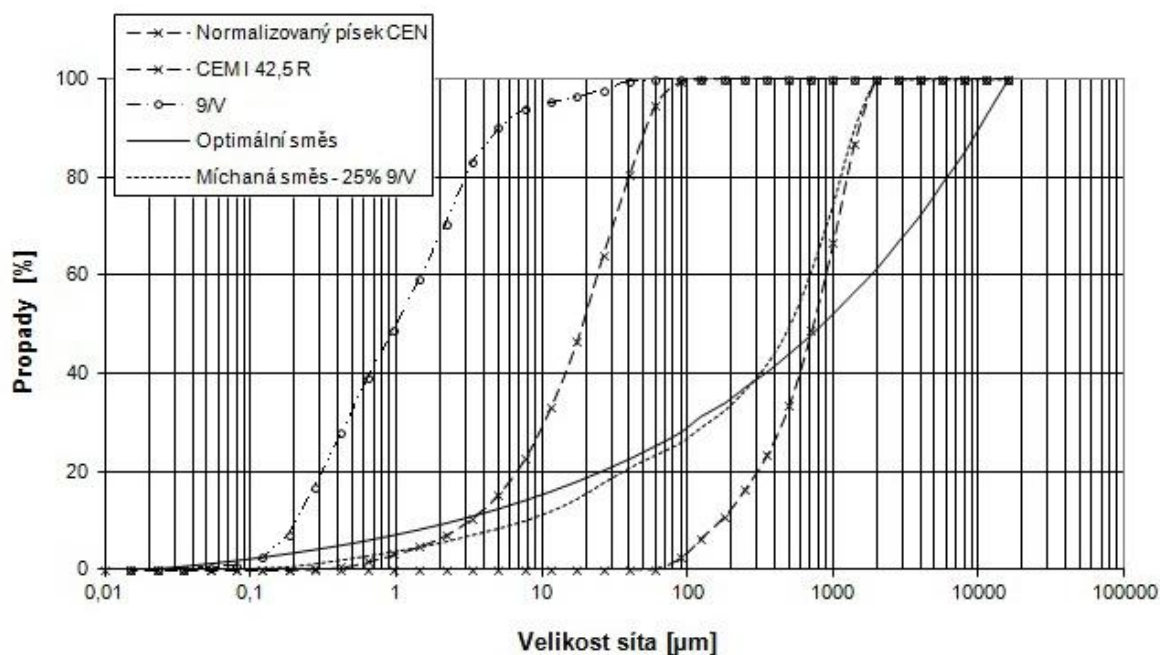
- 15% až 30% nahrazení cementu – tato frakce má velmi podobné chování jako frakce 7/V. Byl stanoven téměř stejný tvarový index částic obou zmíněných frakcí. Vlastnosti čerstvých směsí, ale i ztvrdlých jsou opět totožné



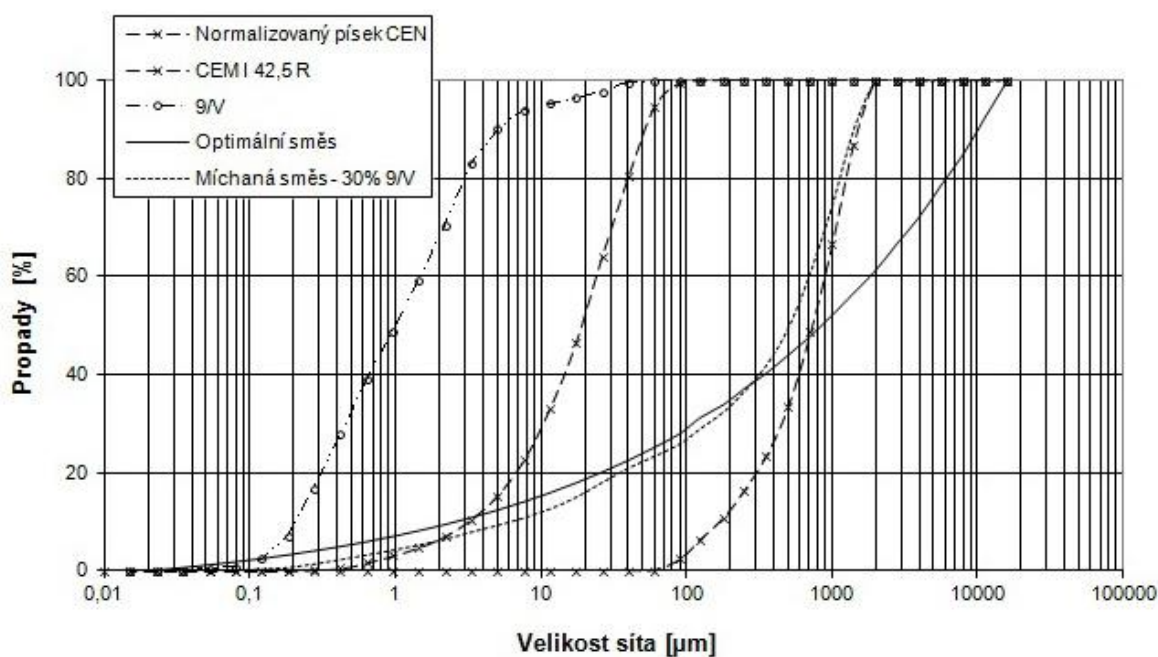
Graf 7.10 Maltová směs s frakcí mletého vápence 9/V s 15% nahrazením cementu touto příměsí



Graf 7.11 Maltová směs s frakcí mletého vápence 9/V s 20% nahrazením cementu touto příměsí



Graf 7.12 Maltová směs s frakcí mletého vápence 9/V s 25% nahrazením cementu touto příměsí



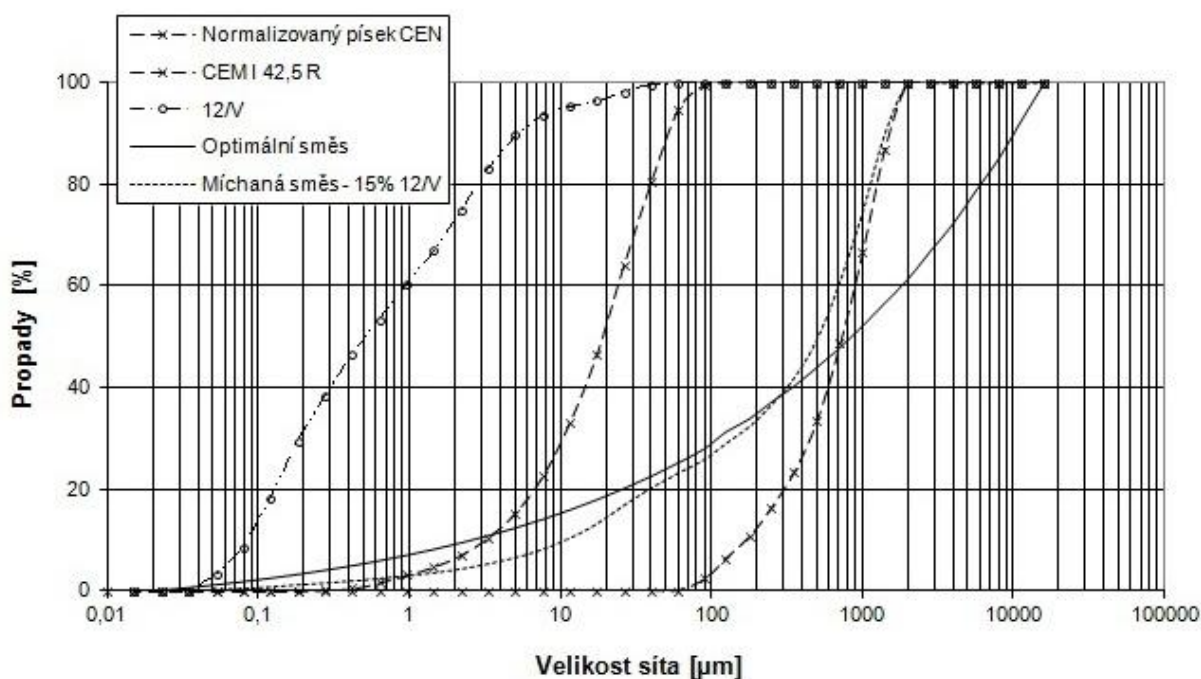
Graf 7.13 Maltová směs s frakcí mletého vápence 9/V s 30% nahrazením cementu touto příměsí

Směsi s frakcí mletého vápence **12/V**:

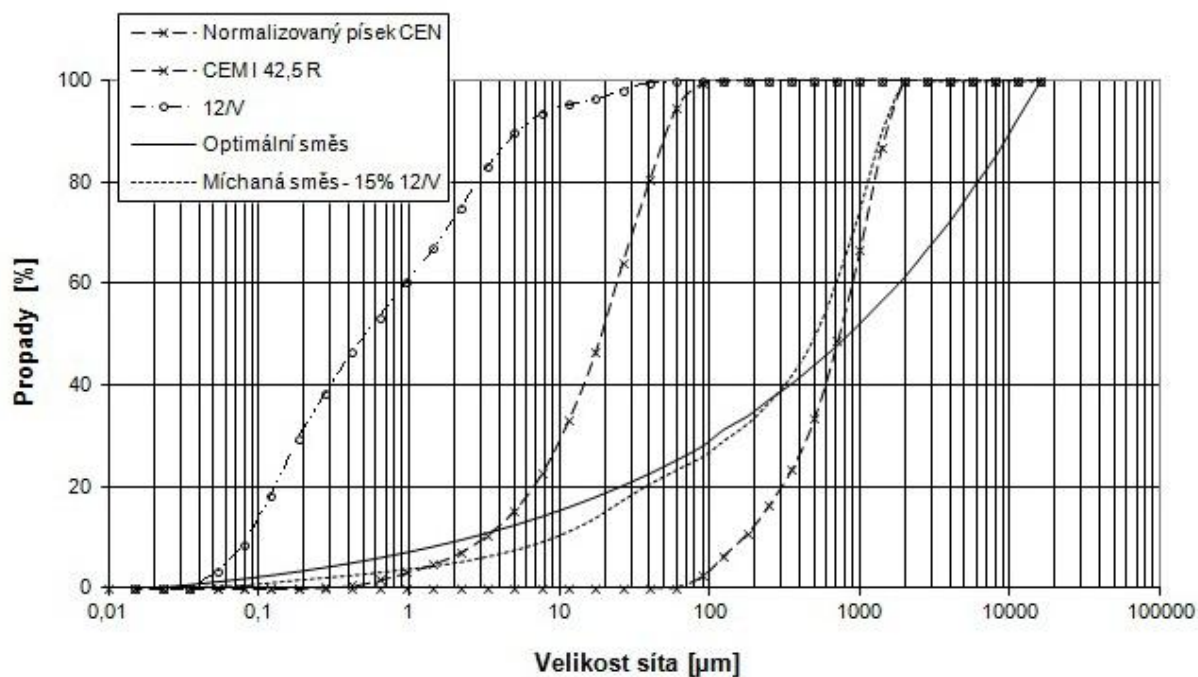
- 15% nahrazení cementu – tato frakce s tímto procentuelním nahrazením optimalizuje směs a zlepšuje tak její vlastnosti. Tvarový index v porovnání s ostatními frakcemi je nejnižším, ale jemnost této frakce je velmi vysoká. Toto

procentuelní nahrazení zlepšuje především fyzikálně – mechanické vlastnosti, došlo především ke zlepšení pevnosti v tahu za ohybu s porovnáním s referenční směsí, avšak pevnosti v tlaku jsou nižšími. Celková mezerovitost byla s porovnáním s referenční směsí zlepšena, tzn. optimalizována, což potvrzují i snímky z elektronové mikroskopie.

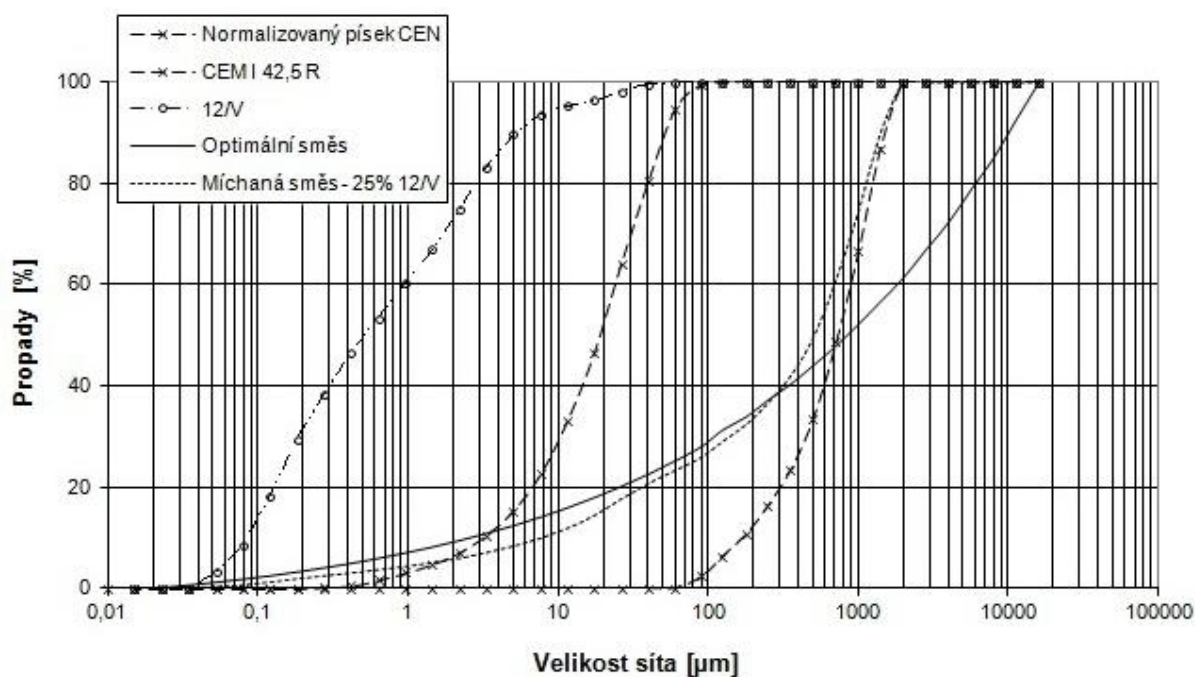
- 20 až 25% nahrazení cementu – dochází k optimalizaci směsí, tzn. mezerovitost směsí byla v porovnání s referenční směsí zlepšena. Avšak nedochází ke zlepšení fyzikálně – mechanických vlastností.
- 30% nahrazení cementu – tato směs je pomocí křivek zrnitosti nejlépe optimalizovanou a na základě toho může být předpokládáno podobné chování jako směs referenční. Došlo ke snížení pórovitosti směsi a zvýšení pevností v tahu za ohybu. Aby se takto jemný materiál mohl ve směsi použít a neměl negativní vliv na vlastnosti směsí, bylo by nutné odstranit nevyváženost velikosti maximálního a minimálního zrna celé směsi.



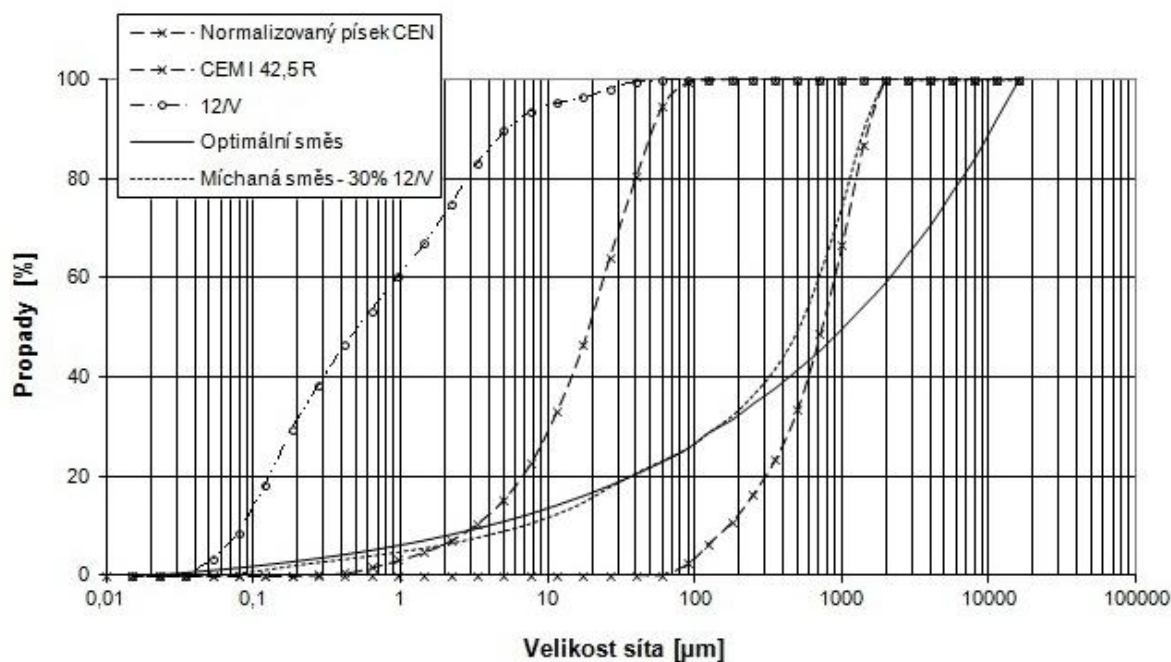
Graf 7.14 Maltová směs s frakcí mletého vápence 12/V s 15% nahrazením cementu touto příměsí



Graf 7.15 Maltová směs s frakcí mletého vápence 12/V s 20% nahrazením cementu touto příměsí



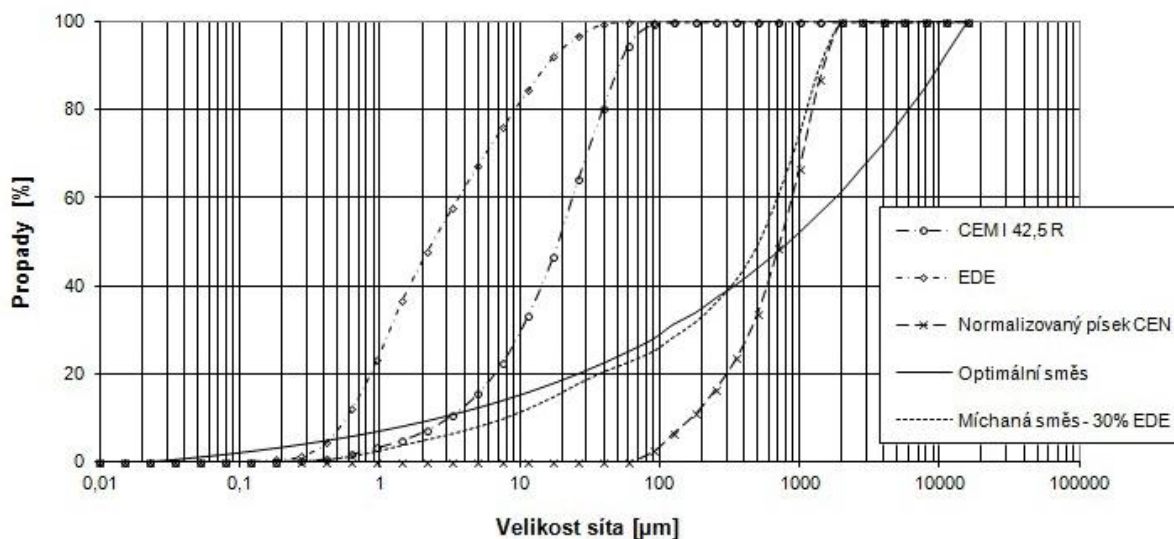
Graf 7.16 Maltová směs s frakcí mletého vápence 12/V s 25% nahrazením cementu touto příměsí



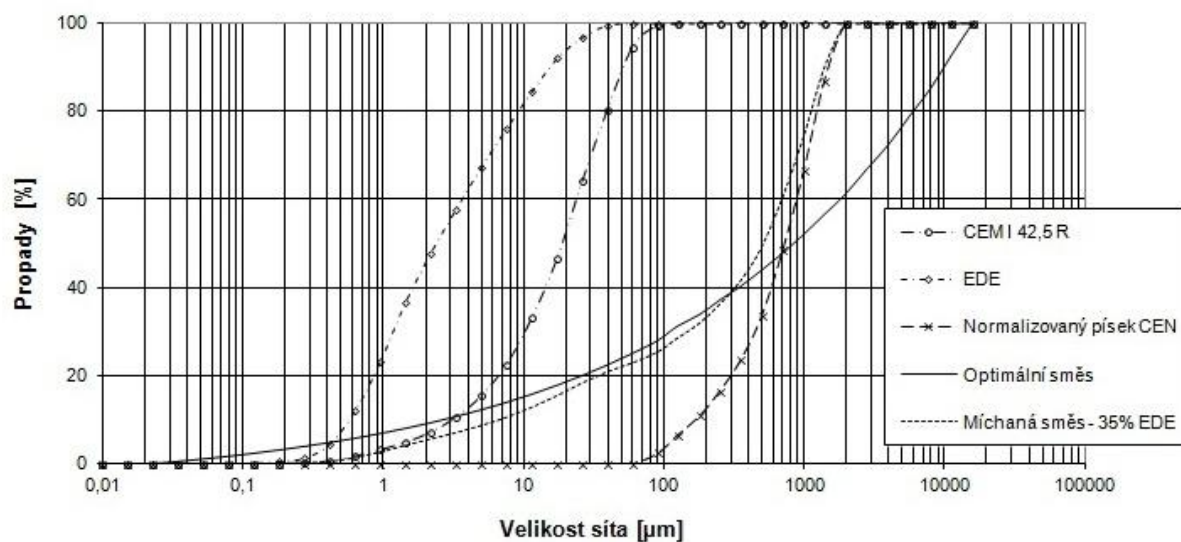
Graf 7.17 Maltová směs s frakcí mletého vápence 12/V s 30% nahrazením cementu touto příměsí

Směsi s elektrárenským popílkem **Dětmorovice, Mělník:**

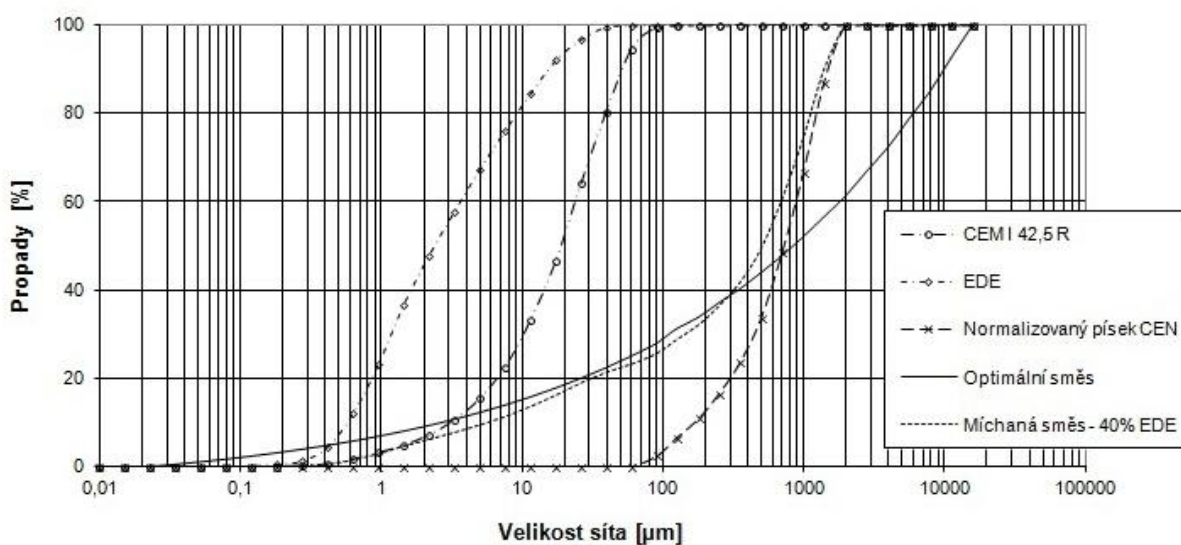
- 30 až 45% nahrazení cementu – na těchto směsích můžeme vidět, že s rostoucím množstvím přidané příměsí dochází ke snižování mechanicko – fyzikálních vlastností s porovnáním s referenční směsí. Vyšší množství těchto příměsí negativně ovlivňuje chování těchto směsí.



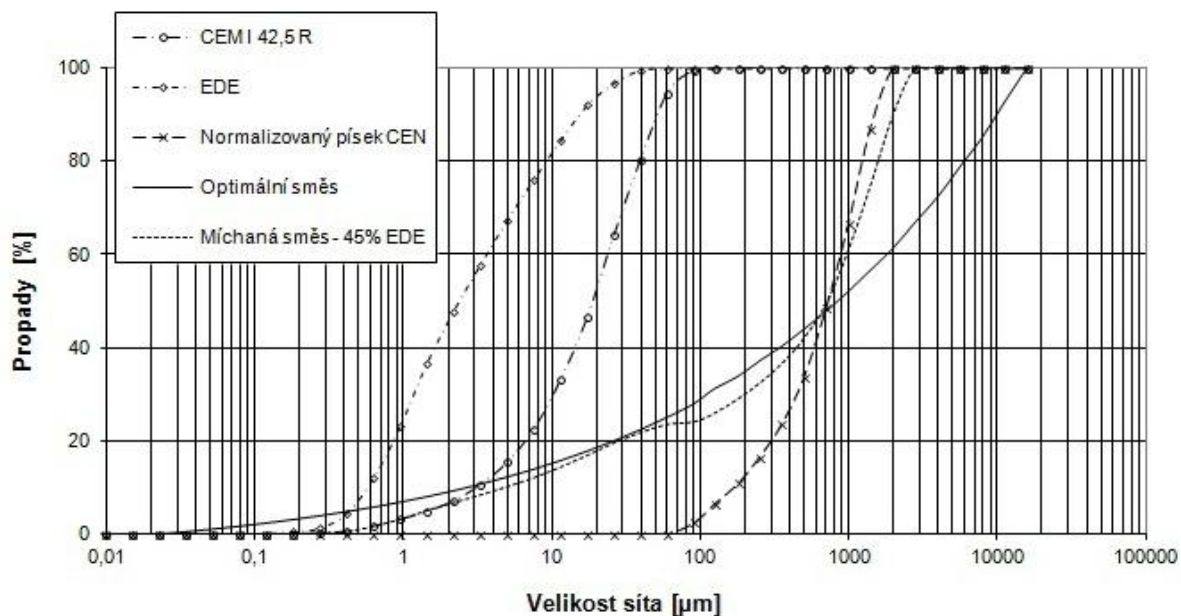
Graf 7.18 Maltová směs s elektrárenským popílkem Dětmorovice s 30% nahrazením cementu touto příměsí



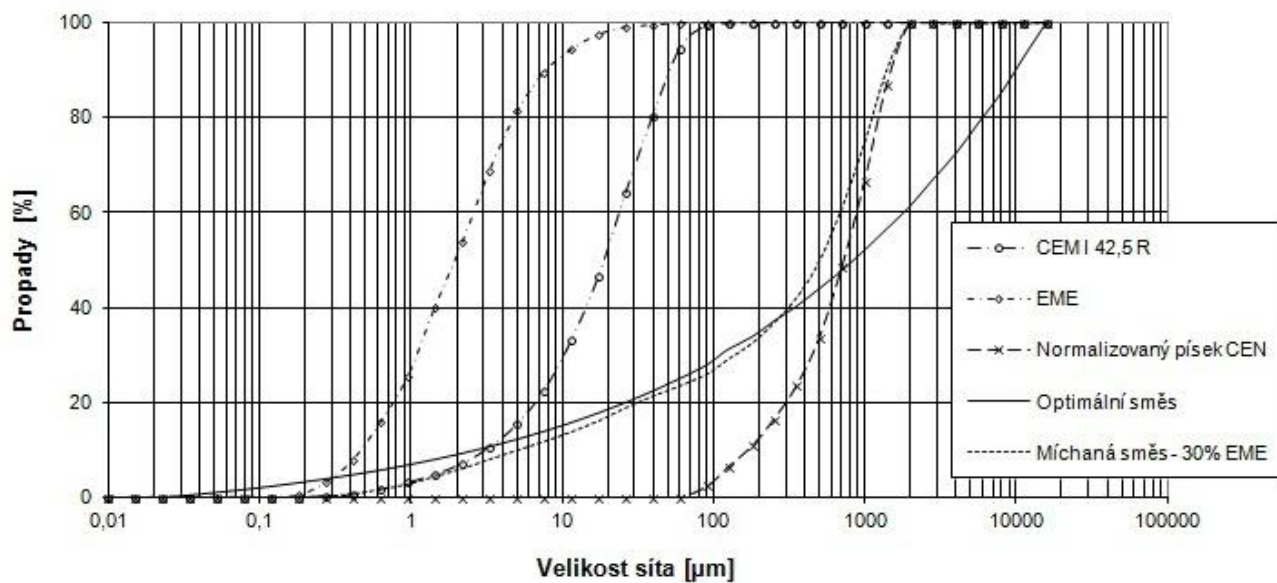
Graf 7.19 Maltová směs s elektrárenským popílkem Dětmárovice s 35% nahrazením cementu touto příměsí



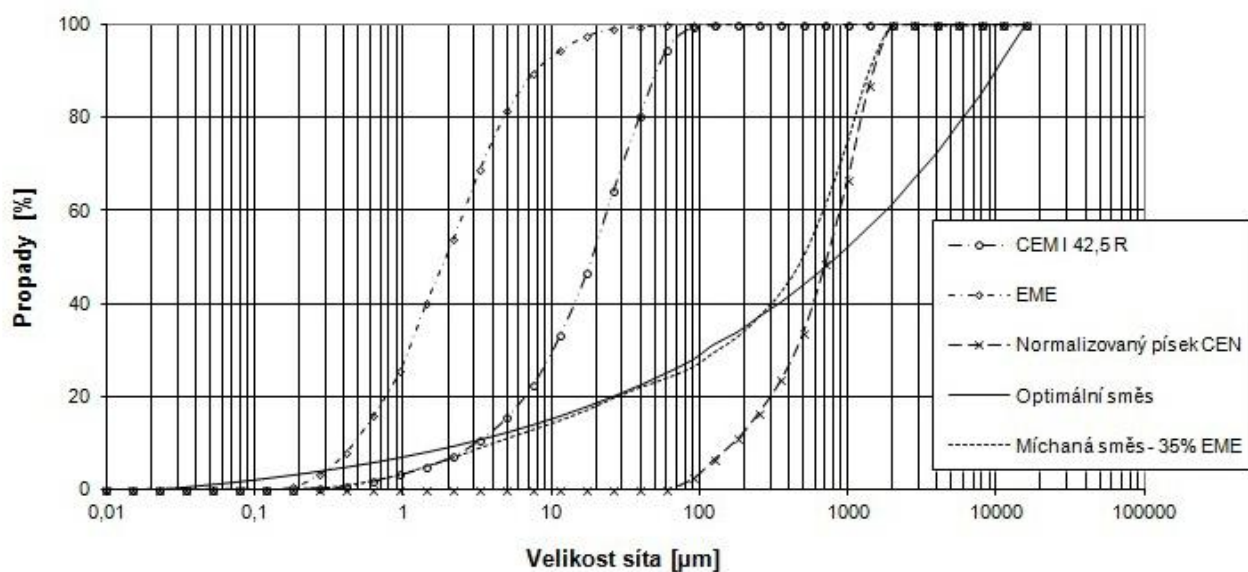
Graf 7.20 Maltová směs s elektrárenským popílkem Dětmárovice se 40% nahrazením cementu touto příměsí



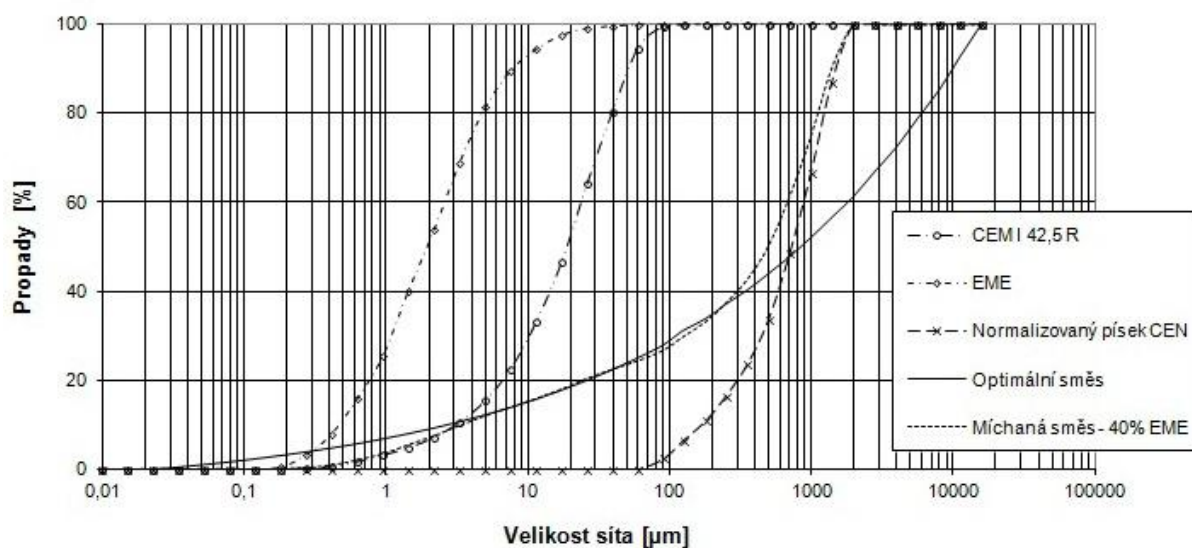
Graf 7.21 Maltová směs s elektrárenským popínkem Dětmorovice s 45% nahrazením cementu touto příměsí



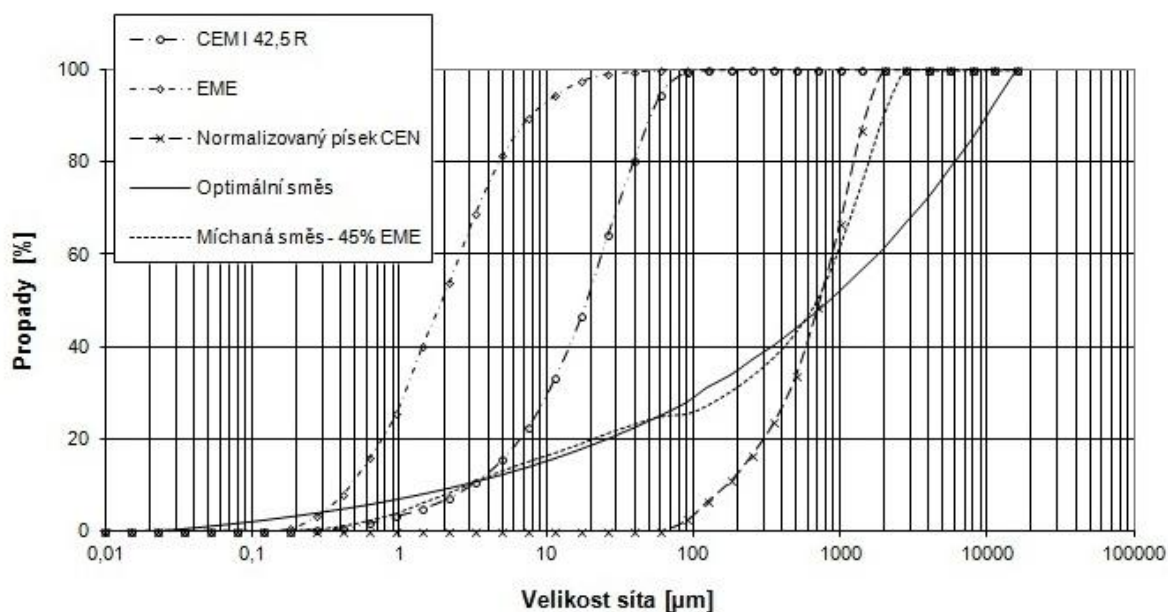
Graf 7.22 Maltová směs s elektrárenským popínkem Mělník s 30% nahrazením cementu touto příměsí



Graf 7.23 Maltová směs s elektrárenským popílkem Mělník s 35% nahrazením cementu touto příměsí



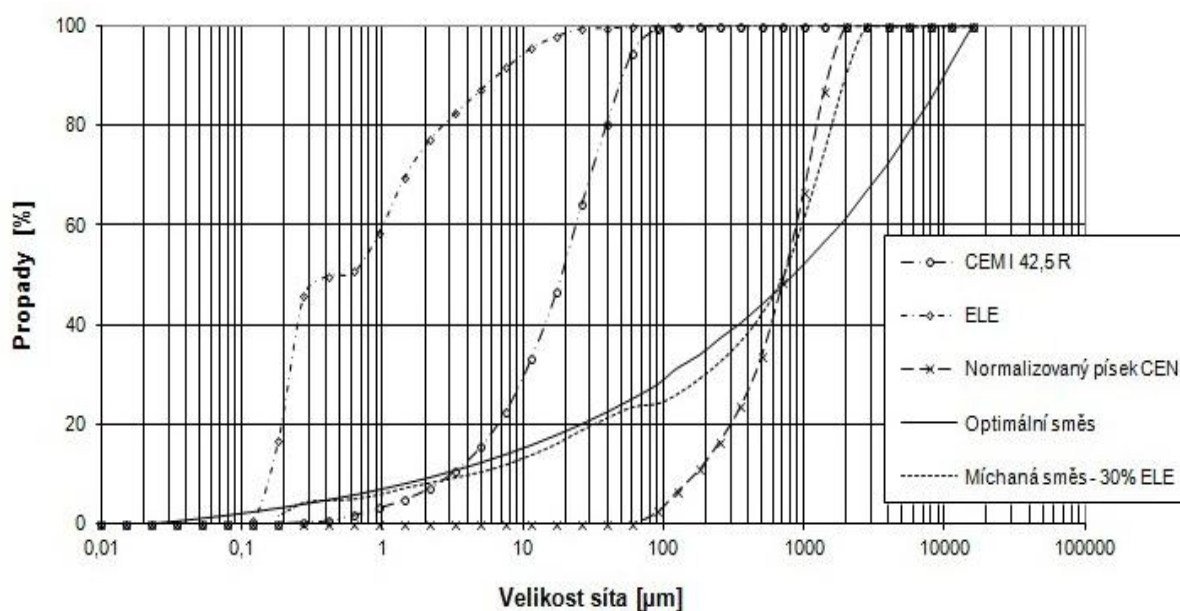
Graf 7.24 Maltová směs s elektrárenským popílkem Mělník se 40% nahrazením cementu touto příměsí



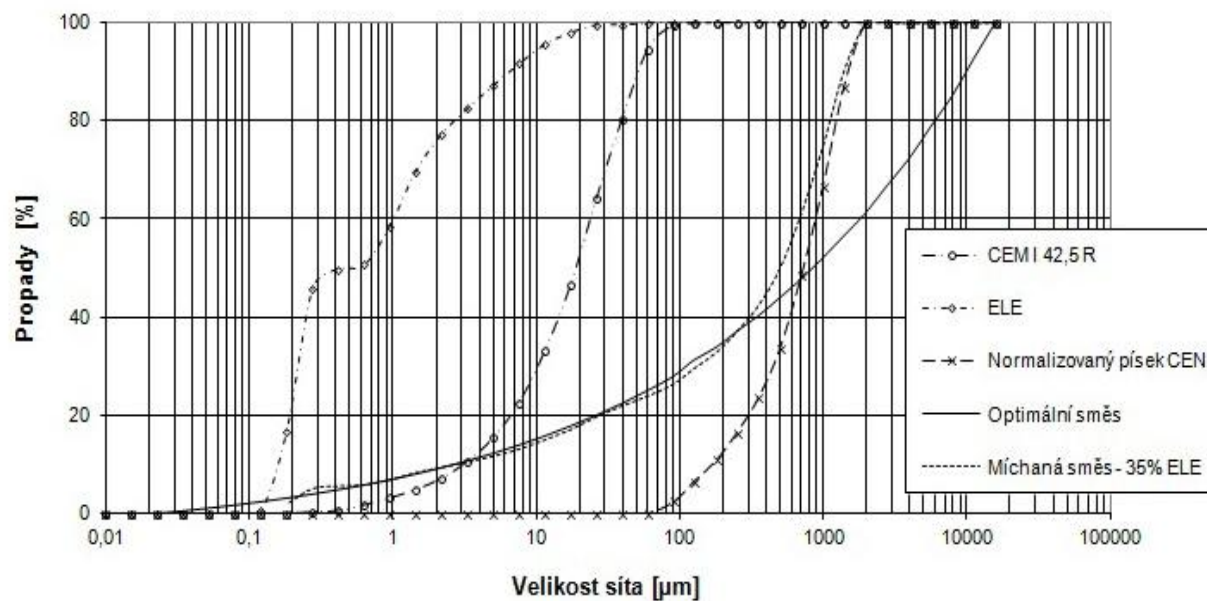
Graf 7.25 Maltová směs s elektrárenským popílkem Mělník se 45% nahrazením cementu touto příměsí

Směsi s elektrárenským popílkem **Ledvice**:

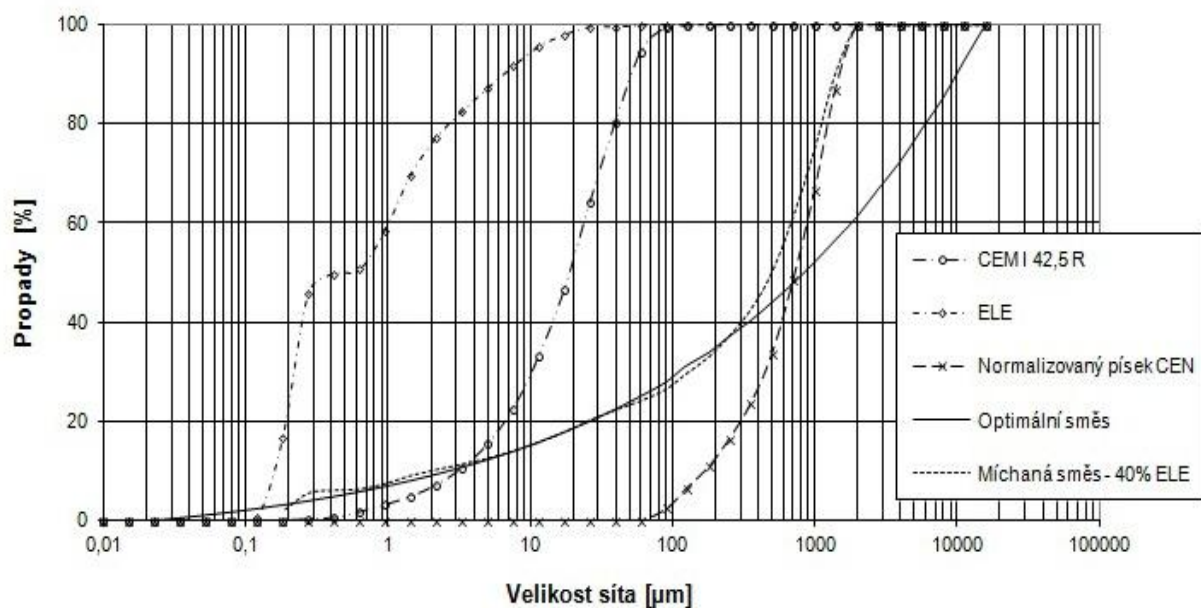
- 30 až 45% nahrazení cementu – optimalizované směsi, bez zlepšujícího vlivu na maltové směsi. S rostoucím množstvím přidávané příměsi se vlastnosti zhoršují.



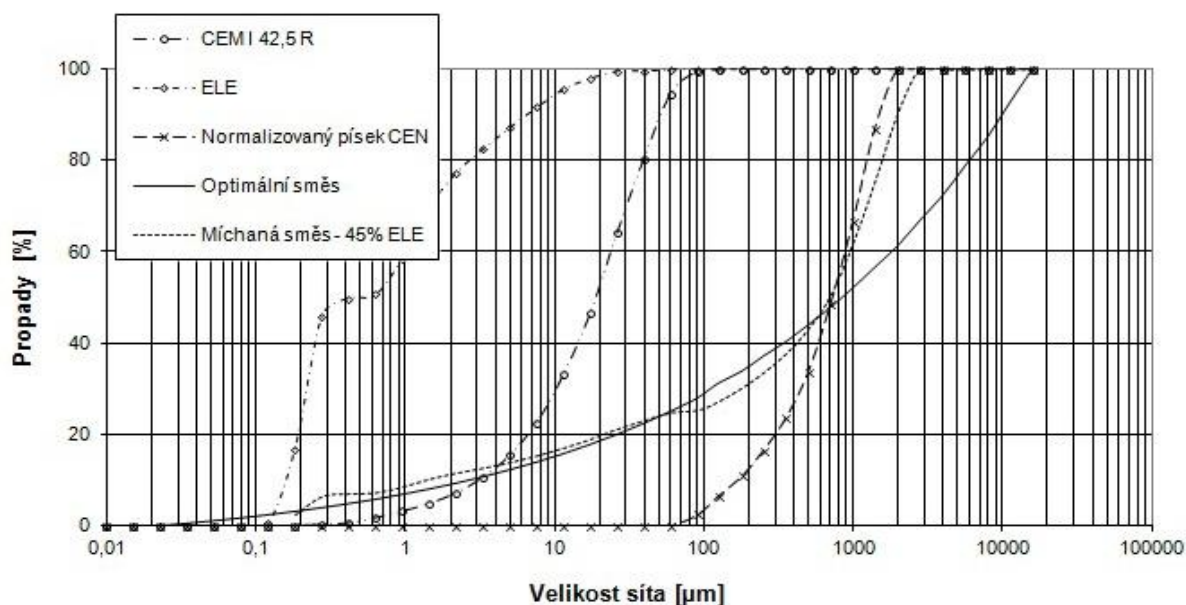
Graf 7.26 Maltová směs s elektrárenským popílkem Ledvice s 30% nahrazením cementu touto příměsí



Graf 7.27 Maltová směs s elektrárenským popílkem Ledvice s 35% nahrazením cementu touto příměsí



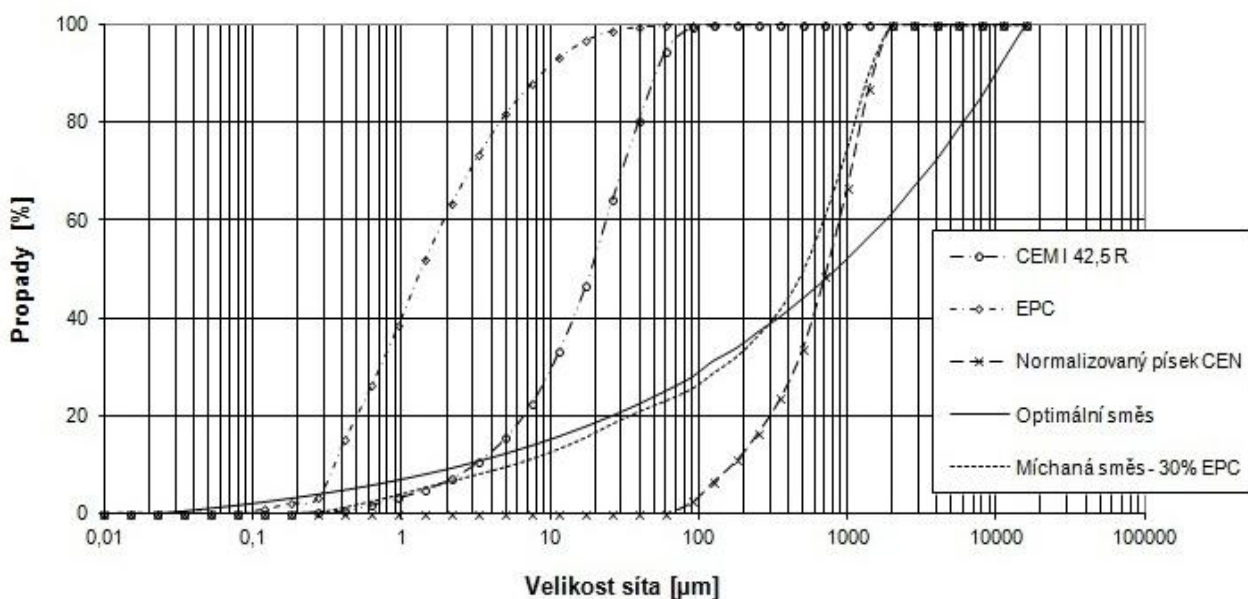
Graf 7.28 Maltová směs s elektrárenským popílkem Ledvice se 40% nahrazením cementu touto příměsí



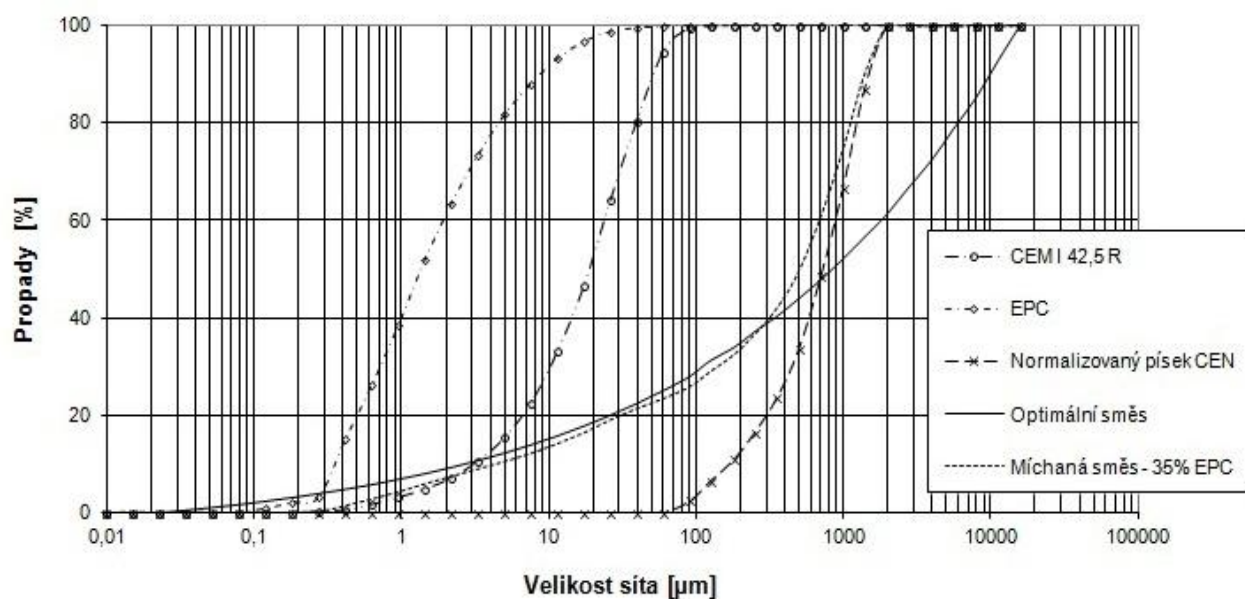
Graf 7.29 Maltová směs s elektrárenským popílkem Ledvice se 45% nahrazením cementu touto příměsí

Směsi s elektrárenským popílkem **Počerady**:

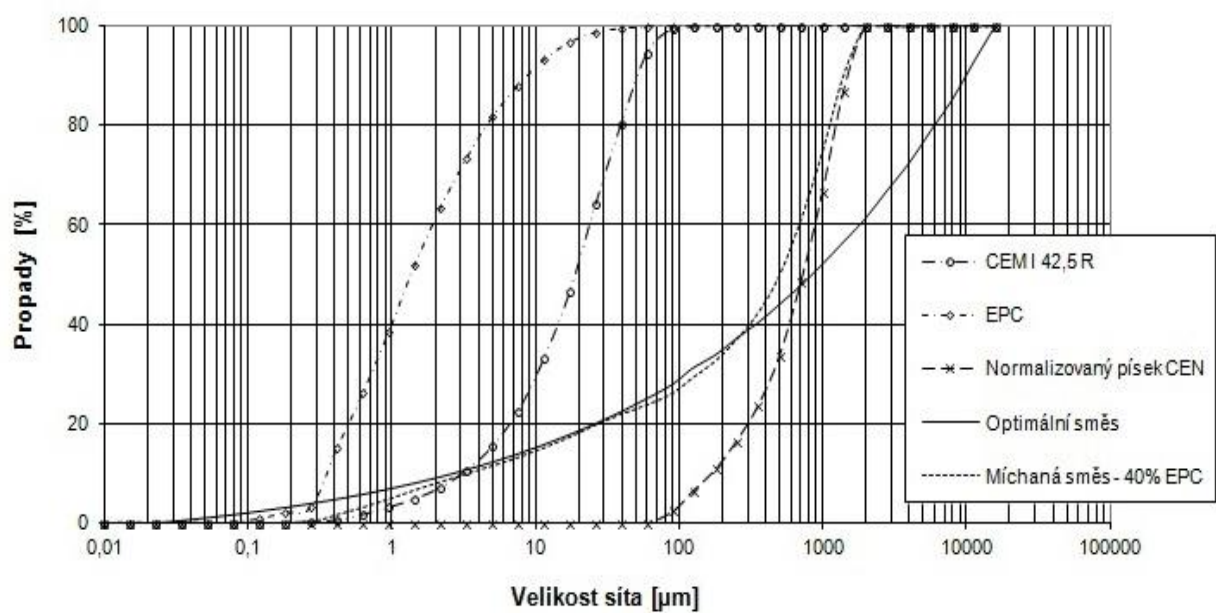
- 30 až 40% nahrazení cementu – optimalizované směsi a to především v oblasti od 30 do 300 μm . V průběhu času dochází ke zlepšování fyzikálně – mechanických vlastností. Optimální náhradou je v případě tohoto popílku 30%.
- 45% nahrazení cementu – příliš velkým množstvím, dochází k negativnímu vlivu na vlastnosti připravené směsi.



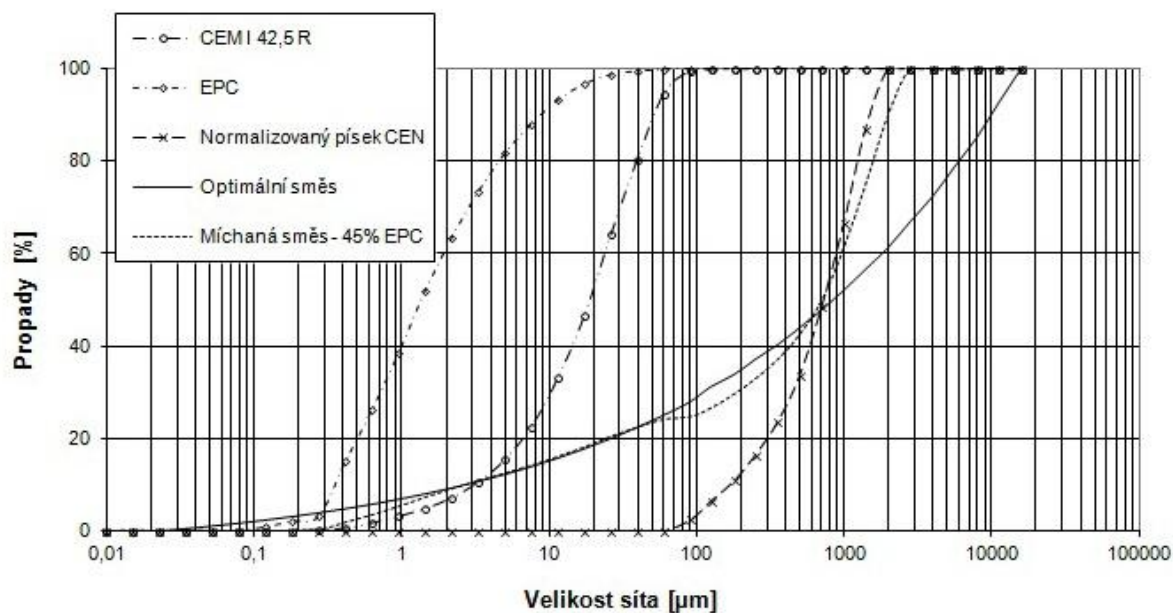
Graf 7.30 Maltová směs s elektrárenským popílkem Počerady s 30% nahrazením cementu touto příměsí



Graf 7.31 Maltová směs s elektrárenským popílkem Počerady s 35% nahrazením cementu touto příměsí



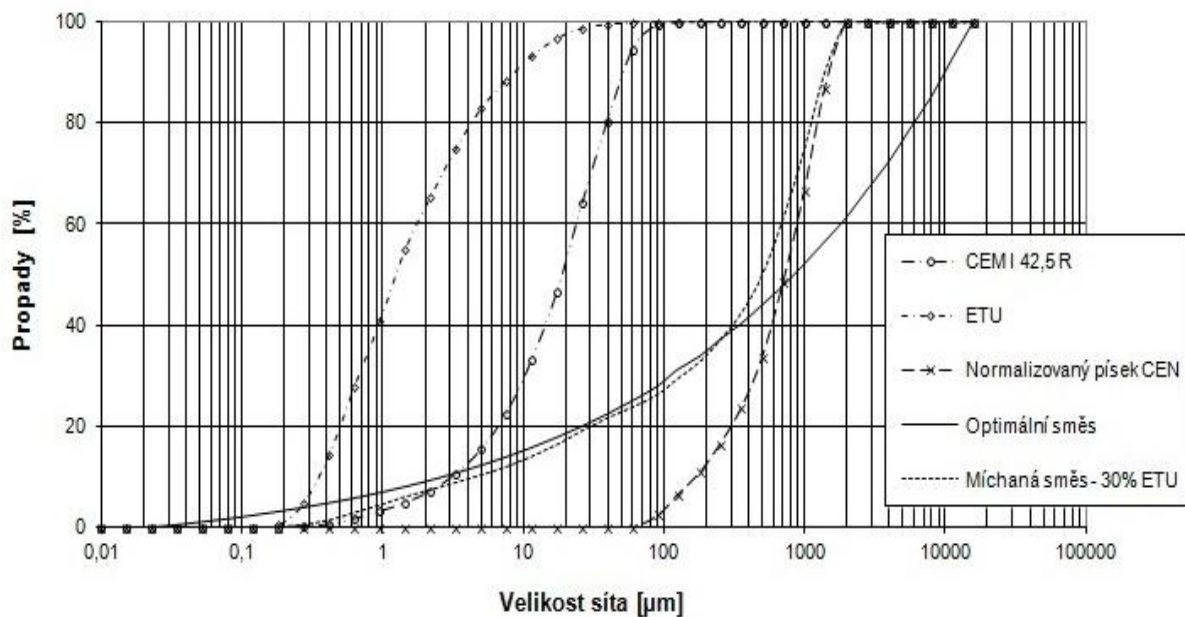
Graf 7.32 Maltová směs s elektrárenským popílkem Počerady se 40% nahrazením cementu touto příměsí



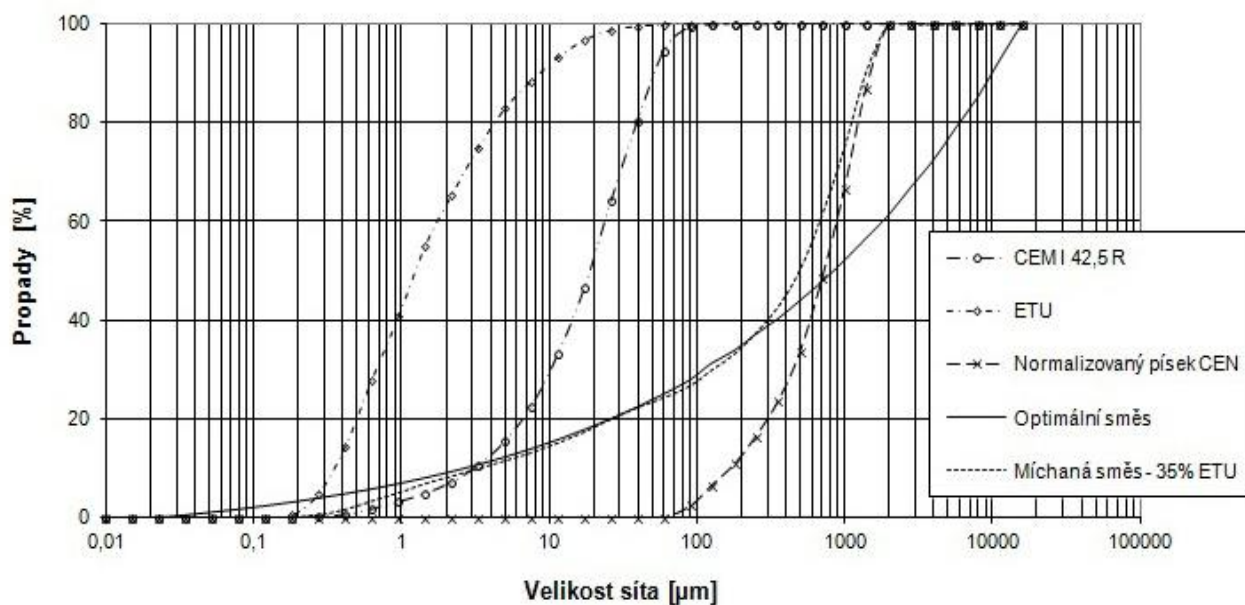
Graf 7.33 Maltová směs s elektrárenským popílkem Počerady se 45% nahrazením cementu touto příměsí

Směsi s elektrárenským popílkem **Tušimice**:

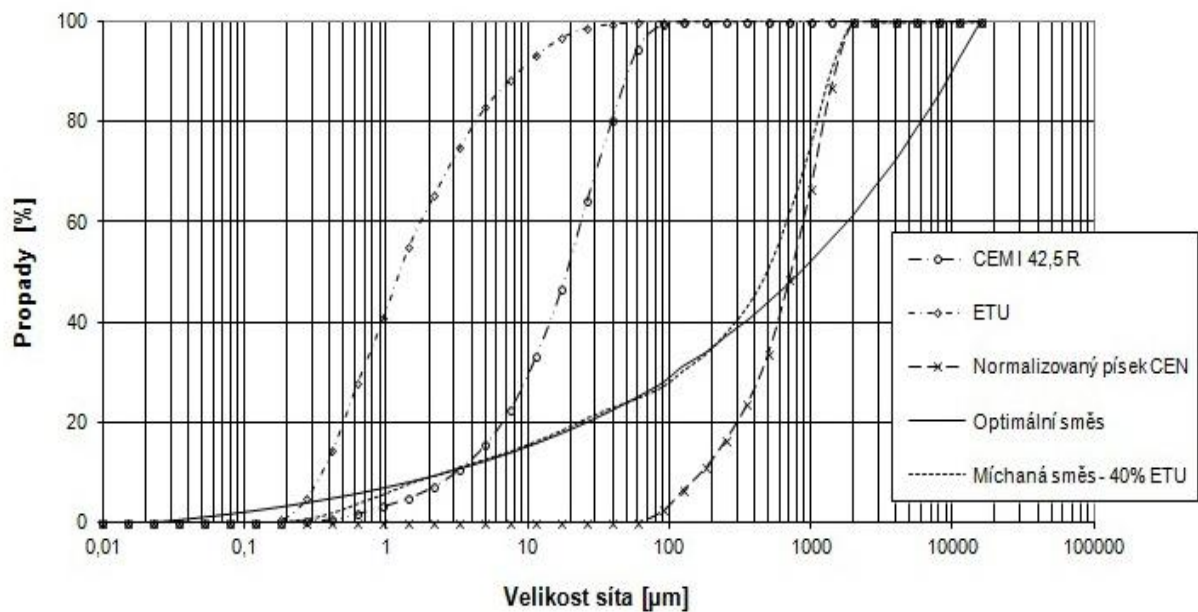
- 30 až 40% nahrazení cementu – optimalizované směsi, které vykazují velmi dobré fyzikálně – mechanické vlastnosti. V důsledku velmi vysoké kulatosti částic je však chování čerstvé směsi negativně ovlivněno a vysoké procento takto jemné příměsi negativně ovlivňuje především tekutost směsi. Proto můžeme říci, že je tento materiál nevhodný pro vytvoření samozhutnitelných směsí. Avšak mikrostruktura a pórovitost těchto směsí je s porovnáním s referenční směsí výrazně ovlivněna.
- 45% nahrazení cementu – příliš velkým množstvím, dochází k negativnímu vlivu na fyzikálně mechanické vlastnosti směsi.



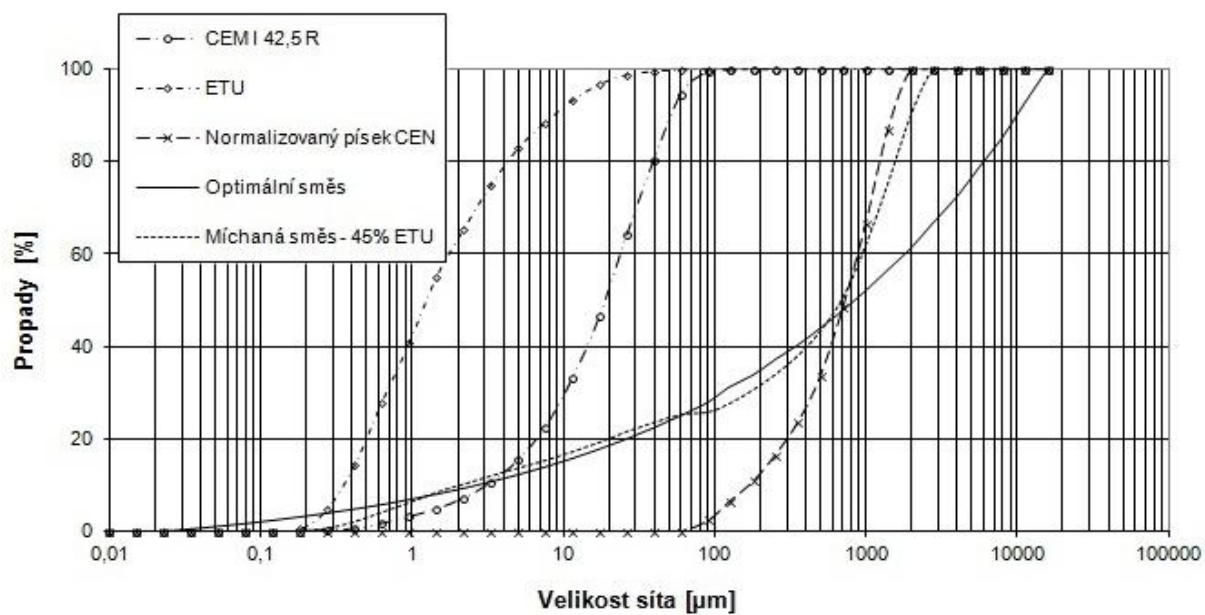
Graf 7.34 Maltová směs s elektrárenským popínkem Počerady s 30% nahrazením cementu touto příměsí



Graf 7.35 Maltová směs s elektrárenským popínkem Počerady s 35% nahrazením cementu touto příměsí



Graf 7.36 Maltová směs s elektrárenským popílkem Počerady se 40% nahrazením cementu touto příměsí



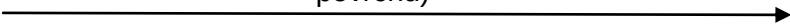
Graf 7.37 Maltová směs s elektrárenským popílkem Počerady se 45% nahrazením cementu touto příměsí

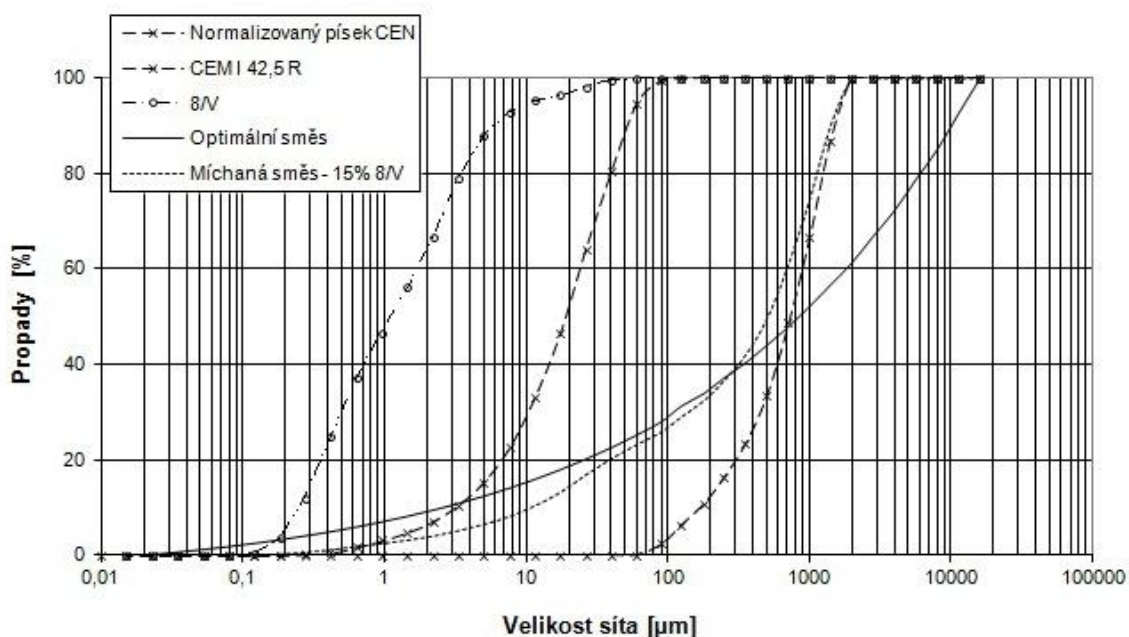
7.1.2 Kompletní shrnutí optimalizovaných směsí

MALTOVÉ SMĚSI s 15% náhradou cementu frakcemi mletého vápence, po 28 dnech zrání

Frakce mletého vápence

7/V	8/V	9/V	12/V
-----	-----	-----	------

Rostoucí jemnost mletí v tomto směru (potvrzená granulometrií, stanovením měrného povrchu) 



Hodnota Aspect Ratio [-] - čím vyšší je tato hodnota, tím více se zrna tohoto materiálu blíží kulovitému tvaru, morfologie zrn mletých vápenců - protáhlejšího tvaru, s různou drsností povrchu.

0,779	0,840	0,774	0,726
-------	-------	-------	-------

Vyšší hodnota Aspect Ratio ovlivňuje tekutost čerstvé směsi – snižuje ji.

Vysokotlaká rtuťová porozimetrie [$\text{mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$] - množství pórů v rozmezí pórů 0,015 - 0,035 μm (čím více drobných pórů, tím nižší pórovitost směsi).

25,64	26,20	25,64	21,34
-------	-------	-------	-------

Nasákavost [%]

3,08	1,39	3,11	3,09
------	------	------	------

Pevnost v tahu za ohybu [N·mm⁻²]

11,6	16,5	11,2	11,3
------	------	------	------

Pevnost v tlaku [N·mm⁻²]

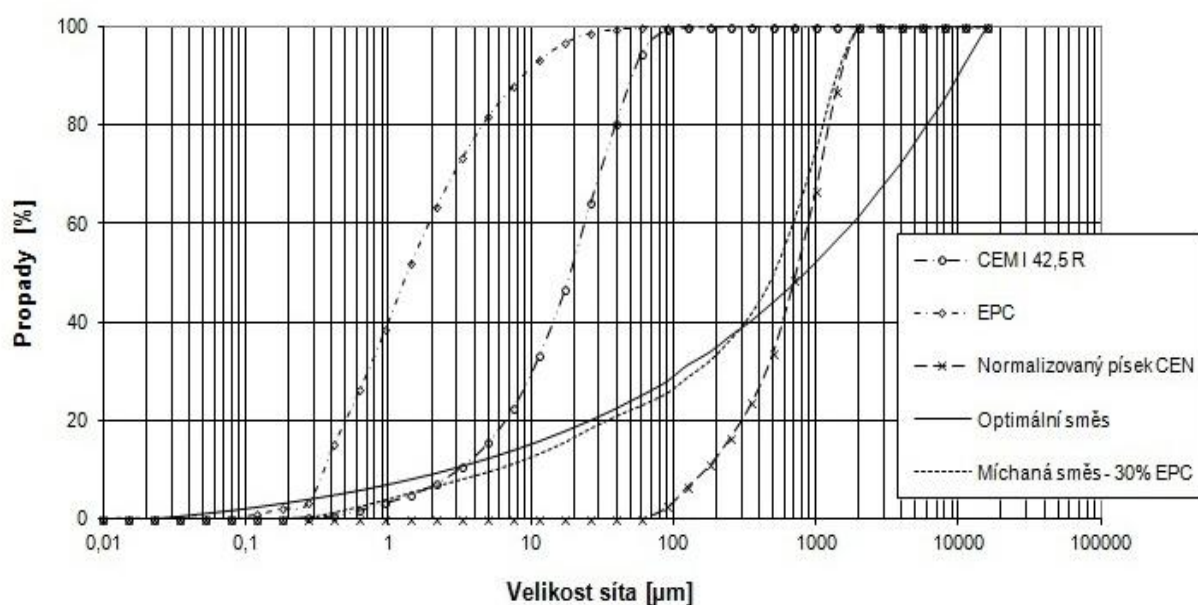
30,0	43,8	29,3	36,1
------	------	------	------

Tabulka 7.1 *Přehled jednotlivých výsledků pro maltové směsi s 15% náhradou cementu frakcemi mletého vápence a jejich vyhodnocení*

MALTOVÉ SMĚSI s 30% náhradou cementu elektrárenskými popílky, po 28 dnech zrání

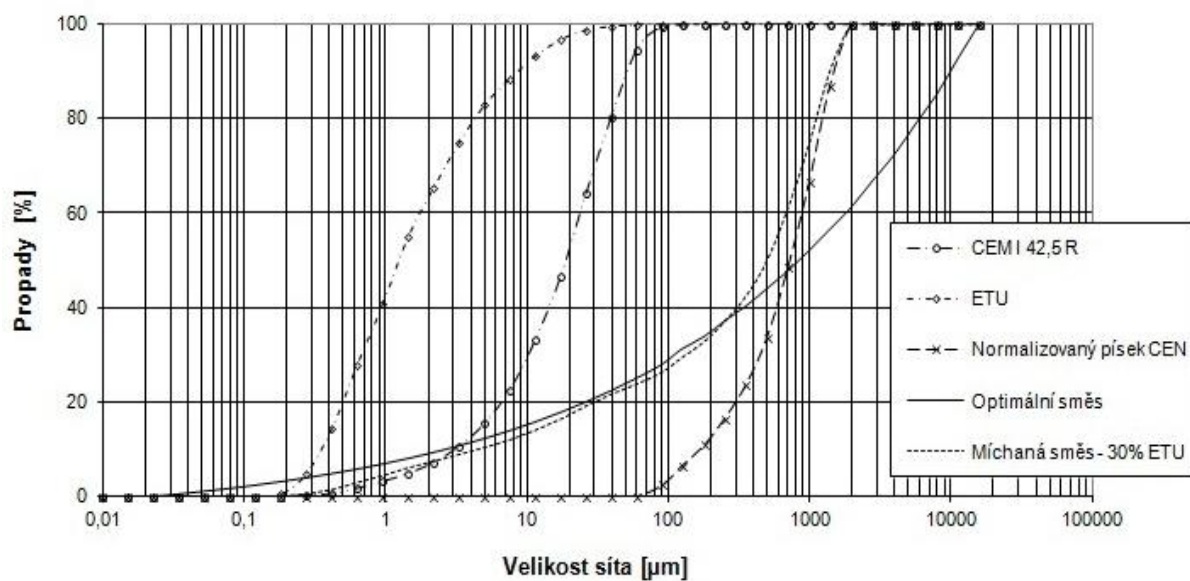
Elektrárenské popílky

EDE	EME	ELE	EPC	ETU
-----	-----	-----	-----	-----



Měrný povrch [$\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$]

400	240	300	300	250
-----	-----	-----	-----	-----



Hodnota Aspect Ratio [-] - čím vyšší je tato hodnota, tím více se zrna tohoto materiálu blíží kulovitému tvaru, morfologie zrn elektrárenských popílků – převládající zrna s hladkým povrchem, pravidelného tvaru.

0,856	0,878	0,830	0,861	0,912 (nejmenší rozliti pomocí Hägermannova kužele)
-------	-------	-------	-------	--

Vyšší hodnota Aspect Ratio, vysoká kulatost jednotlivých částic a velký podíl částic kulového tvaru s hladkým povrchem ovlivňuje tekutost čerstvé směsi – snižuje ji.

Vysokotlaká rtuťová porozimetrie [$\text{mm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$] - množství pórů v rozmezí pórů 0,015 - 0,035 μm (čím více drobných pórů, tím nižší pórovitost směsi).

24,63	24,48	25,08	25,61	26,76
-------	-------	-------	-------	-------

Nasákavost [%]

3,18	4,06	2,55	2,49	2,32
------	------	------	------	------

Pevnost v tahu za ohybu [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]

4,6	4,8	6,9	7,9	9,8
-----	-----	-----	-----	-----

Pevnost v tlaku [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}$]

22,8	21,8	20,1	25,4	26,2
------	------	------	------	------

Tabulka 7.2 Přehled jednotlivých výsledků pro maltové směsi s 15% náhradou cementu frakcemi mletého vápence a jejich vyhodnocení

7.2 Shrnutí poznatků

V literatuře se můžeme setkat s velkým množstvím výzkumů a studií v této problematice. Se všeobecně uznávaným předpokladem se v těchto pracích můžeme setkat s tím, že čím kulatější zrna s nestrukturovaným povrchem máme k dispozici, měli bychom docílit velmi hutné struktury směsi. Druhým předpokladem, který literatura udává je však opak. Hutné struktury je docíleno za předpokladu dostatečného množství kulových částic s částicemi nepravidelného tvaru určitého distribučního rozdělení v celé směsi (H. J. Herrmann et al., 2003). Tato teorie je však v počátcích a je jistě nutné ji mnohými zkouškami a simulacemi prokázat. Obecným závěrem z měření prováděných v této práci je to, že čím více mají jemné příměsi kulatějších zrn, získáváme zhuštěný filer v suchém

stavu s vyšší pórovitostí. Tento výsledek je také potvrzen na ztvrdlých směsích. Maltové směsi s vyšším obsahem příměsí a vyšším počtem kulových zrn, tzn. například s elektrárenským popílkem Tušimice a vysokou hodnotou Aspect Ratio, mají vyšší pórovitou strukturou v porovnání s referenční směsí a ostatními záměsemi. Výsledky těchto měření byly potvrzeny elektronovou mikroskopií, vysokotlakou rtuťovou porozimetrií a nasákavostí ztvrdlé směsi. Z hlediska fyzikálně – mechanických vlastností dochází ke snížení objemové hmotnosti těchto směsí a nižších pevností v tahu za ohybu a v tlaku.

Z počátku této práce jsme se domnívali, že přidáním jemnějšího materiálu do míchané směsi dosáhneme požadované zpracovatelnosti, omezíme krvácení (bleeding) a zamezíme rozměšování jednotlivých složek. Tento předpoklad opět platí pouze za určitých podmínek. Pokud máme k dispozici velmi jemný materiál s vysokým obsahem kulovitých a relativně hladkých zrn s vysokou hodnotou Aspect Ratio, zpracovatelnost směsi je snížena. Tekutost směsi je při vysoké hodnotě Aspect Ratio, s nižším obsahem kulových částic a nepravidelnými zrny naopak zlepšena. Můžeme tedy říci, že je reologické chování pasty, maltové nebo betonové směsi přímo ovlivněno morfologií a tvarem zrn jemných příměsí. Aby mohly být efektivně využity i příměsi s kulovitými částicemi, hladkého povrchu a vysokou hodnotou Aspect Ratio a měly tak pozitivní vliv na vlastnosti míchaných směsí, musí být tyto směsi vhodně optimalizovány pomocí komplexní analýzy a musí být vhodně zvoleno množství tohoto materiálu v míchané směsi. V našem případě je toto množství maximálně 15% nahrazení cementu frakcí mletého vápence 8/V a 30% nahrazením cementu elektrárenským popílkem Tušimice a Počerady, abychom dosáhli stejných fyzikálně – mechanických vlastností jako má směs referenční.

Shrnutí této práce vede k průběžně uváděným závěrům a k výše uvedenému shrnutí a vede k myšlenkám dalšího potenciálního výzkumu v této problematice:

1. Nalezení optimálního množství nahrazení cementu jemnozrnnými příměsemi s dosažením pozitivního vlivu na fyzikálně – mechanické vlastnosti směsí, stejně tak nalezení optimálního množství příměsí pro optimalizaci již stávajících směsí za pomoci výše představené komplexní analýzy.
2. Ověření vlivu jemných příměsí, jejich tvaru a morfologie na zpracovatelnost a reologické chování past, maltových a betonových směsí ve spolupůsobení s vodou a případně s plastifikačními přísadami nebo viskozitou modifikujícími přísadami.

8 PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Aictin, P. – C.: *High – performance concrete*, Taylor & Francis, 1998
- [2] Bartos, P. J. M., Sonebi, M. a Tamimi, A. K. E.: *Workability and rheology of fresh concrete: Compendium of tests*, Report, RILEM TC 145 – WSM, Bagnaux, France, 2002
- [3] Brouwers, H. J. H. and Radix, H. J.: *Self – compacting concrete: Theoretical and experimental study*, Cement and Concrete Research 35, 2005, 2116 – 2136
- [4] Brunauer, S., Emmett, P. H., teller, E.: *Adsorption of Gases in Multimolecular Layers*, Journal of American Chemical Society 60, 1938, 309 – 319
- [5] Cazacliu, B., Roquet, N.: *Concrete mixing kinetics by means of power measurement*, Cement and Concrete Research 39, 2009, 182 – 194
- [6] Davies, R.: *Simple Feature – Space Representation of Particle Shape*, Powder Technology 12, 1975, 111 – 124
- [7] de Larrard, F., Malier, Y.: *High Performance Concrete: From Material to Structure*, (Ed.) Malier, Y., E & FN Spon, London, kapitola Engineering properties of very high performance concrete, 1992, 85 – 114
- [8] de Larrard, F., Sedran, T.: *Optimization of ultra – high – performance concrete by the use of a packing model*, Cement and Concrete Research 24, 1994, 997 – 1009
- [9] Diederich, P., Mouret, M., de Ryck, A., Ponchon, F., Escadeillas, G.: *The nature of limestone filler and self – consolidating feasibility – Relationships between physical, chemical and mineralogical properties of fillers and the flow at different states, from powder to cement – based suspension*, Powder Technology 218, 2012, 90 - 101
- [10] Domone, P. L.: *Self – compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies*, Cement and Concrete Composites 28, 2006, 197 – 208
- [11] Elfmarková, V.: *Křivka zrnitosti jako hlavní ukazatel pro návrh samozhutnitelných betonů s využitím mikromletého vápence a vliv na vlastnosti čerstvých a ztvrdlých SCC*, bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Brno, 2011
- [12] Felekoglu, B.: *A new approach to the characterization of particle shape and surface properties of powders employed in concrete industry*, Construction and Building Materials 23, 2009, 1154 - 1162
- [13] Feng, J. Q., Hays, D. A.: *Relative importance of electrostatic forces on powder particles*, Powder Technology 135 – 136, 2003, 65 – 75
- [14] Geisenhansluke, C.: *Influence of the granulometry of fine particles on the rheology of pastes*, doktorská práce, University of Kassel, Kassel 2009, Německo (v němčině)
- [15] Goltermann, P., Johansen, V.: *Packing of aggregates: An alternative tool to determine the aggregate mix*, ACI Materials Journal 94, 1997, 435 – 443

- [16] Herrmann, H. J., Mahmoodi Baram, R., Wackenhut, M.: *Searching for the perfect packing*, Physica A 330, 2003, 77 – 82
- [17] Ho, D. W. S., Sheinn, A. M. M., Hg, C. C., Tam, C. T.: *The use of quarry dust for SCC applications*, Cement and Concrete research 32, 2002, 505 – 511
- [18] Hunger, M., Brouwers, H. J. H.: *Flow analysis of water – powder mixtures: Application to specific surface area and shape factor*, Cement and Concrete Composites 31, 2009, 39 – 59
- [19] Jia, X., Williams, R. A.: *A packing algorithm for particles of arbitrary shapes*, Powder Technology 120, 2001, 175 – 186
- [20] Latham, J. – P., Munjiza, A., Lu, Y.: *On the prediction of void porosity and packing of rock particulates*, Powder Technology 125, 2002, 10 - 27
- [21] Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M.: *Concrete. Microstructure, Properties, and Materials*, Department of Civil and Environmental Engineering, University of California at Berkley, Third Edition, 2006
- [22] Mertens, G., Elsen, J.: *Use of computer assisted image analysis for the determination of the grain – size distribution of sands used in mortars*, Cement and Concrete Research 36, 2006, 1453 – 1459
- [23] Okamura, H.: *Self compacting high performance concrete*, ACI Concrete International 19, 1997, 50 – 54
- [24] Okamura, H., Ouchi, M.: *Self – compacting concrete development, present use and future*, in A. Skarenddahl, O. Petersson, 1st International RILEM Symposium on Self – Compacting Concrete, RILEM Publications S. A. R. L., France, Stockholm, Sweden, 1999, 3 – 14
- [25] Okamura, H., Ouchi, M.: *Self - compacting high performance concrete*, Progress in Structural Engineering and Materials 1, 1998, 378 – 383
- [26] Okamura, H., Ouchi, M.: *Self – compacting concrete*, Journal of Advanced Concrete Technology, Japan Concrete Institute 1, 2003, 5 – 15
- [27] Powers, M. C.: *A new roundness scale for sedimentary particles*, Journal of Sedimentary Research 23, 1953, 117 – 119
- [28] Provis, J. L., Duxson, P., van Deventer, J. S. J.: *The role of particle technology in developing sustainable construction materials*, Advanced Powder Technology 21, 2010, 2 – 7
- [29] Sabin, G. C. W., Hansen, D.: *The Effects of Particle Shape and Surface Roughness on the Hydraulic Mean Radius of a Porous Medium Consisting of Quarried Rock*, Geotechnical Testing Journal 17, 1994, 43 – 49

- [30] Schneider, P.: *Textura porézniých látek*, učební text pro doktorské stadium, Ústav chemických procesů AV ČR, Praha, 2007
- [31] Schutter, G. et al a Hela, R.: *Samozhutnitelný beton*, vydala Česká betonářská společnost ČSSI: ČBS Servis (2008), ISBN 987 – 80 – 87158 – 12 – 8 (anglické vydání: Self – Compacting Concrete, ISBN 987 – 1 – 904445 – 30 – 2)
- [32] Soukeník, O.: *Porozimetrie – využití v oblasti nanokompozitů*, bakalářská práce, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Zlín 2006
- [33] Stovall, T., de Larrard, F., Buil, M.: *Linear packing density model of grain mixtures*, Powder Technology 48, 1986, 1 – 12
- [34] Su, N., Hsu, K. C., Chai, H. W.: *A simple mix design method for self – compacting concrete*, Cement and Concrete Research 31, 2001, 1799 – 1807
- [35] Su, N., Miao, B.: *A new method for mix design of medium strength concrete with low cement content*, Cement and Concrete Composites 25, 2003, 215 – 222
- [36] Svoboda, L. a kolektiv: *Stavební hmoty*, publisher Jaga Group, s.r.o., Bratislava 2007, ISBN 987 – 80 – 8076 – 057 – 1
- [37] Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., Forssberg, E.: *Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars*, Cement and Concrete Composites 30, 2008, 274 – 282
- [38] Ye, G., Xin, H., Bao – lin, Z., Bao – guo, M., Hong – bo, Z.: *Method for calculating packing density of powder particles in paste with continuous particle size distribution*, Powder Technology 187, 2008, 88 - 93
- [39] Yilmaz, Y.: *A study on the limit void ratio characteristics of medium to fine mixed graded sands*, Engineering Geology 104, 2009, 290 – 294
- [40] Yu, A. B., Bridgwater, J., Burbidge, A.: *On the modeling of the packing of fine particles*, Powder Technology 92, 1997, 185 – 194

Normy, zákony, vyhlášky, směrnice

- [41] ASTM C114 – 07 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cements
- [42] ČSN EN 196 – 1 Metody zkoušení cement. Část 1: Stanovení pevnosti (1996)
- [43] ČSN EN 196 – 6 Metody zkoušení cementu. Část 6: Stanovení jemnosti mletí (1993)
- [44] ČSN EN 1015 – 3 Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím setřásacího stolku)
- [45] ČSN EN 1097 – 4 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 4: Stanovení mezerovitosti suchého zhutněného fileru

- [46] ČSN EN 1097 – 6 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti (2006)
- [47] ČSN EN 1097 – 7 Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 7: Stanovení měrné hmotnosti fileru – Pyknometrická zkouška (2000)
- [48] ČSN EN 12 350 – 9 Zkoušení čerstvého betonu – Část 9: Samozhutnitelný beton – Zkouška V - nálevkou
- [49] EFNARC, *Specification and guidelines for SCC*, Report, European Federation of Producers and Contractors of Specialist Products and Structures, Surrey, UK, 2002

9 SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky

7/V	Frakce mletého vápence firmy Carmeuse, obchodně značená 7/V
8/V	Frakce mletého vápence firmy Carmeuse, obchodně značená 8/V
9/V	Frakce mletého vápence firmy Carmeuse, obchodně značená 9/V
12/V	Frakce mletého vápence firmy Carmeuse, obchodně značená 12/V
ASTM	Americké normy (American Society for Testing and Materials)
A & A	Teorie mezerovitosti podle Andreasena a Andersena
BET	Brunauer, Emmett, Tellerova analýza
C2S	„Belit“ – dikalciumsilikát
C3S	„Alit“ – trikciumsilikát
C3A	Trikciumaluminát
C4AF	„Celit“ – tetrakciumaluminátferit
CEN	Normalizovaný písek certifikovaný podle CEN národní normalizační organizací
CH	Hydratační produkty - kalciumhydráty
CSH	Hydratační produkty – kalciumhydrosilikáty
DEM	Discrete Element Method
EDE	Elektrárenský popílek Dětmárovice
ELE	Elektrárenský popílek Ledvice
EME	Elektrárenský popílek Mělník
EPC	Elektrárenský popílek Počeradý
ETU	Elektrárenský popílek Tušimice
LALLS	Low Angle Laser Light Scattering
MV	Mletý vápenec
NV	Nasákavost [%]
PC	Portlandský cement
PSD	Particle Size Distribution – křivka zrnitosti
REF	Referenční maltová směs
RSS	Stanovení spojitě křivky zrnitosti pomocí metody nejmenších čtverců
SCC	Samozhutnitelný beton
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie
SSA	Měrný povrch [$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$]
SSA S	Vypočítaný měrný povrch [$\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$]
SSA S_{Sph}	Měrný povrch [$\text{cm}^2 \cdot \text{cm}^{-3}$]

XRF	Rentgenová difrakční analýza
EDE 30%	30% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Dětmarovice
EDE 35%	35% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Dětmarovice
EDE 40%	40% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Dětmarovice
EDE 45%	45% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Dětmarovice
ELE 30%	30% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Ledvice
ELE 35%	35% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Ledvice
ELE 40%	40% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Ledvice
ELE 45%	45% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Ledvice
EME 30%	30% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Mělník
EME 35%	35% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Mělník
EME 40%	40% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Mělník
EME 45%	45% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Mělník
EPC 30%	30% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Počerady
EPC 35%	35% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Počerady
EPC 40%	40% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Počerady
EPC 45%	45% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Počerady
ETU 30%	30% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Tušimice

ETU 35%	35% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Tušimice
ETU 40%	40% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Tušimice
ETU 45%	45% nahrazení cementu v maltových směsích elektrárenským popílkem Tušimice
7/V 15%	15% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 7/V
7/V 20%	20% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 7/V
7/V 25%	25% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 7/V
7/V 30%	30% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 7/V
8/V 15%	15% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 8/V
8/V 20%	20% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 8/V
8/V 25%	25% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 8/V
8/V 30%	30% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 8/V
9/V 15%	15% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 9/V
9/V 20%	20% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 9/V
9/V 25%	25% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 9/V
9/V 30%	30% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 9/V
12/V 15%	15% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 12/V
12/V 20%	20% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 12/V
12/V 25%	25% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 12/V
12/V 30%	30% nahrazení cementu v maltových směsích frakcí mletého vápence 12/V

Symbols

a	Měrný povrch [$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$]
a_{Blaine}	Měrný povrch stanovený pomocí Blainovy aparatury [$\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$]
β_p	Vázaný vodní součinitel [-]
γ	Deformační koeficient , smykové přetvoření
$\dot{\gamma}$	Rychlost změny smykové deformace [s^{-1}]
D	Objemová hmotnost [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]
E_p	Deformační koeficient [-]
G	Smykový modul
Γ_p	Relativní rozlití [-]
ρ_{comp}	Objemová hmotnost fileru ve zhuštěném stavu [$\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$]

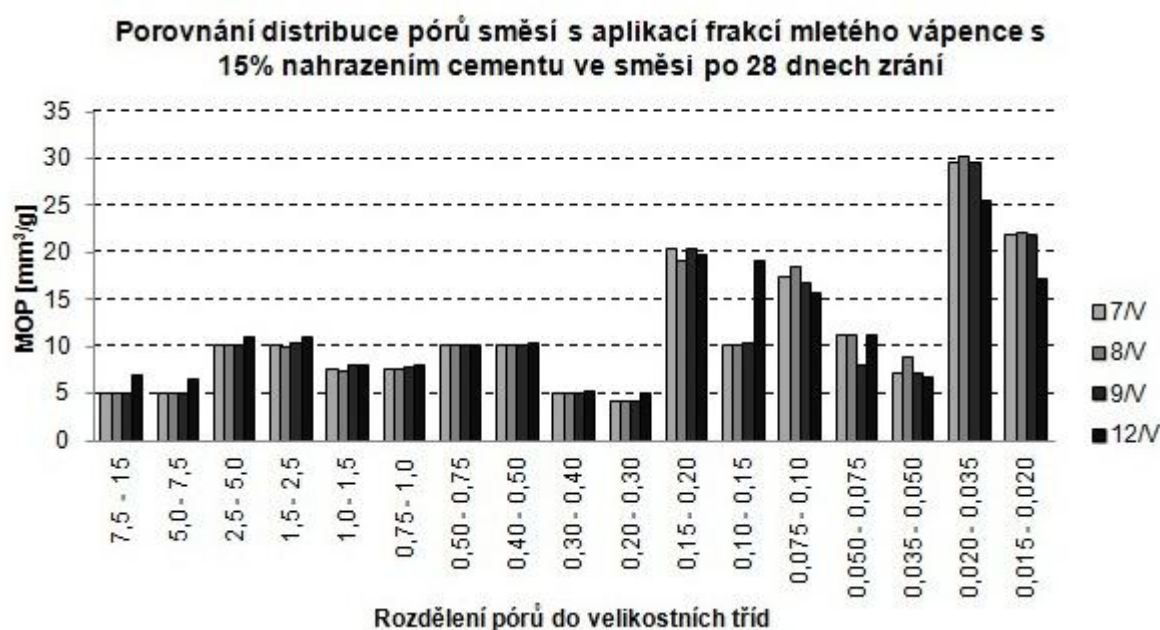
ρ_s	Sypná hmotnost [g·cm ⁻³]
μ	Plastická viskozita [Pa·s]
$P'(d)$	Mezerovitost [%]
q	Distribuční modul [-]
t_v	Doba výtoku při zkoušce V – trychtýř [s]
τ	Smykové napětí
τ_0	Napětí na mezi kluzu
$\xi_{Reschke}$	Tvarový index dle Reschkeho [-]
w/c	Vodní součinitel (tj. poměr vody ku množství cementu) [-]
w/p	Součinitel vody ku všem jemným podílům (tj. poměr vody ku množství cementu včetně jemných příměsí) [-]

10 SEZNAM PŘÍLOH

- A. Rtuťová porozimetrie po 28, 90 a 180 dnech zrání maltových směsí

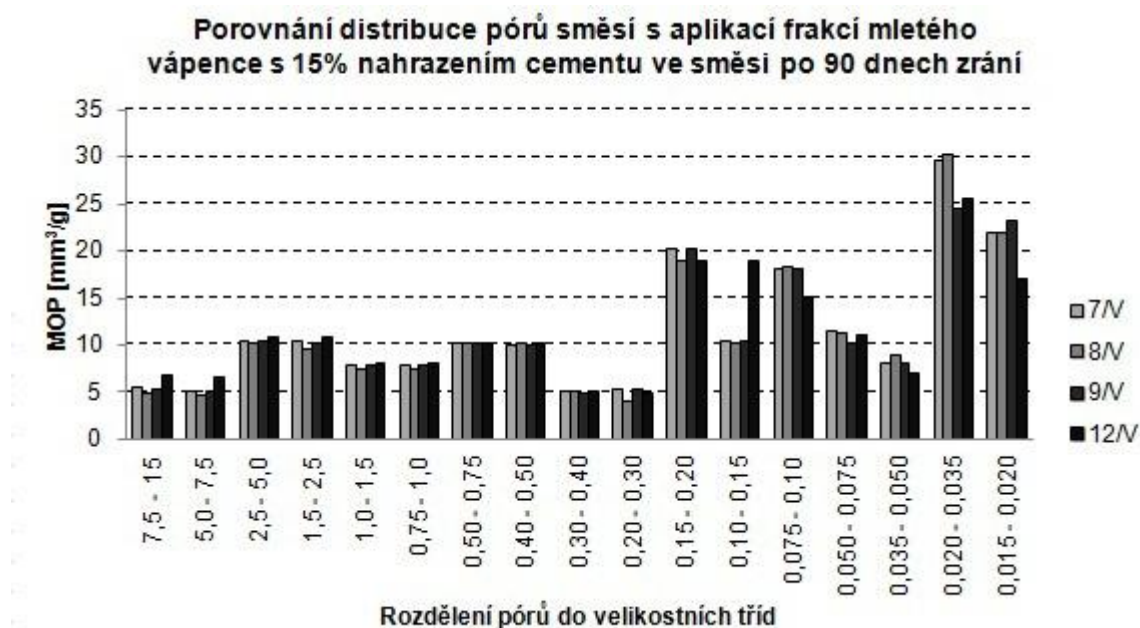
A. PŘÍLOHA

Tato příloha obsahuje histogramy ze zkoušení pomocí rtuťová porozimetrie stanovené po 28, 90 a 180 dnech zrání jednotlivých směsí. Jsou zde zobrazeny směsi s výsledky fyzikálně – mechanických vlastností stejných jako referenční směs, případně s těmito vlastnostmi lepšími (tj. směsi – 15% nahrazení cementu frakcí mletého vápence 8/V, 30% nahrazením cementu elektrárenskými popílky Tušimice a Počerady). V následujících grafech je zobrazen vývoj mikrostruktury v průběhu jednotlivých měření.

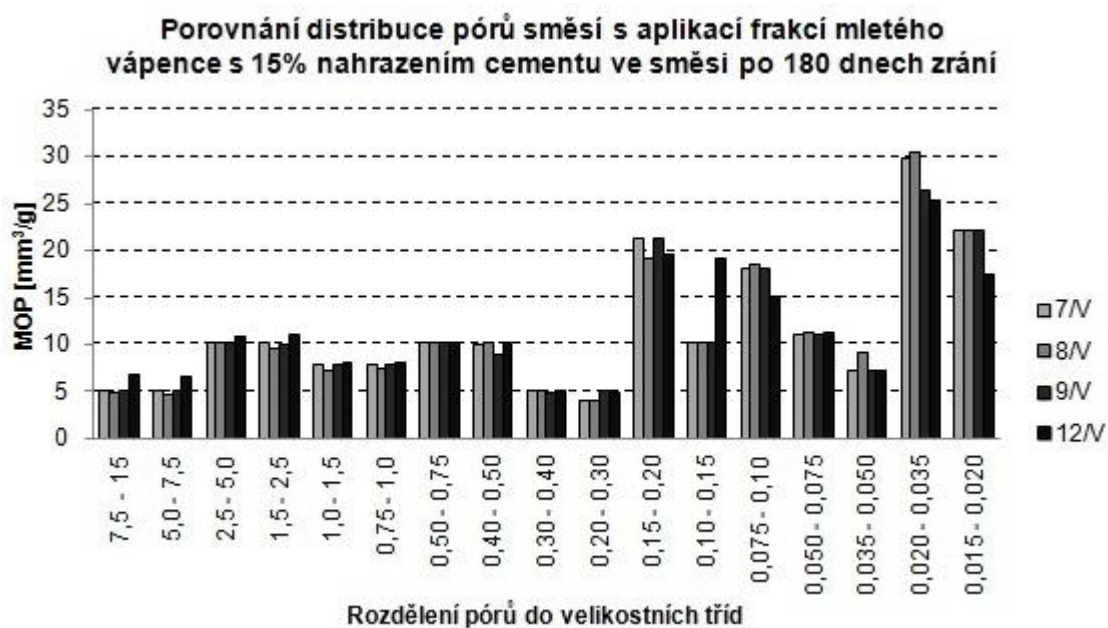


A.1

V průběhu času dochází ke změně distribuce pórů v jednotlivých směsích. Tyto změny nejsou příliš zásadní, avšak z hlediska vlivu na fyzikálně – mechanické vlastnosti mají značný vliv. Ve směsích s fyzikálně – mechanickými vlastnostmi stejnými jako je směs referenční je zobrazen trend ubývání pórů větších rozměrů, zatímco obsah menších pórů se v závislosti na čase zvětšuje. Naopak se zvyšujícím se množstvím nahrazeného cementu dochází ke zvyšování počtu větších pórů a snižování obsahu menších pórů, jak bylo představeno v kapitolách výše. Tento trend je zobrazen v grafech A.1 až A.6.

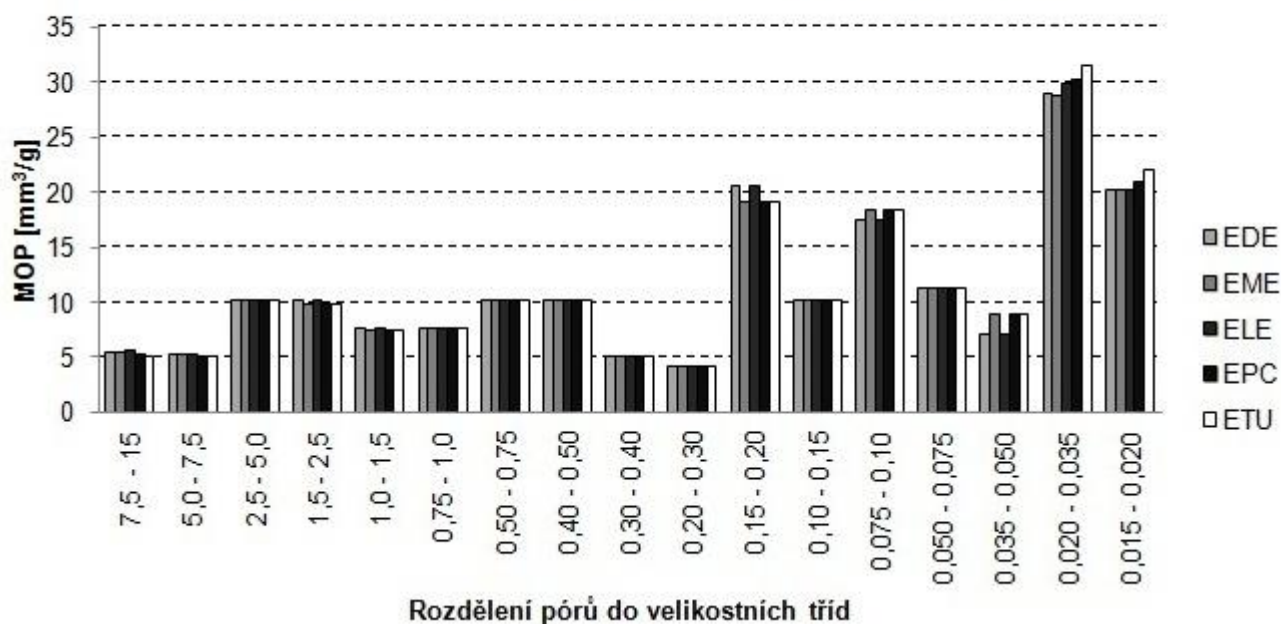


A.2



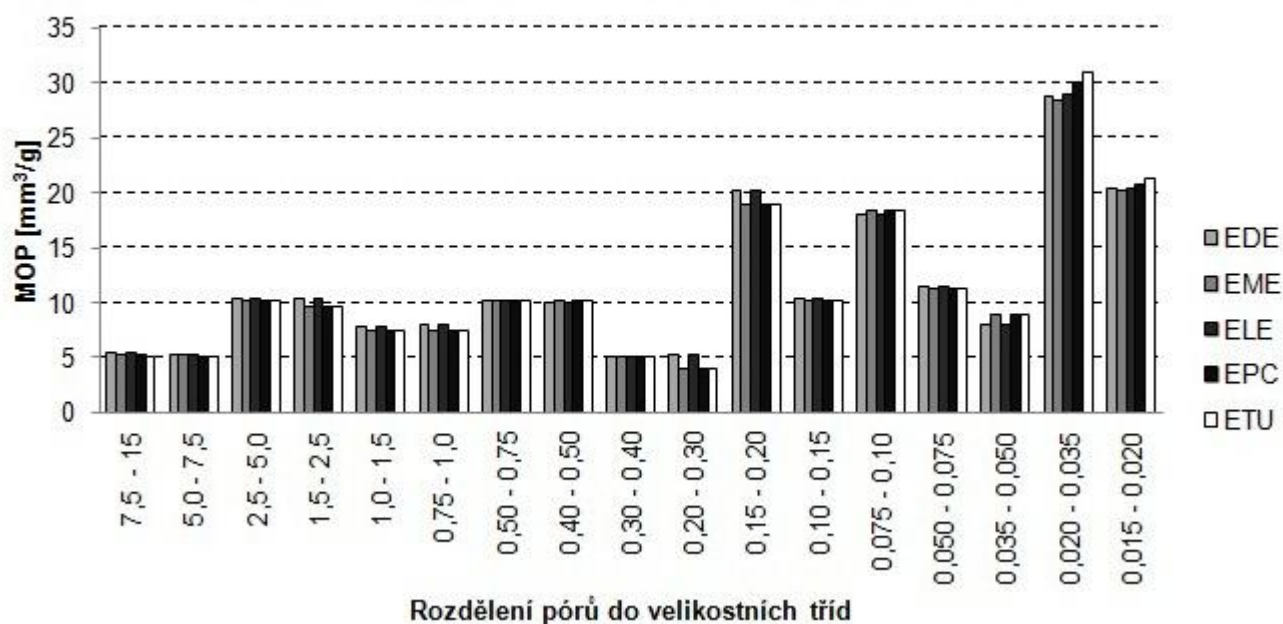
A.3

Porovnání distribuce pórů směsí s aplikací elektrárenských popílků s 30% nahrazením cementu ve směsi po 28 dnech zrání



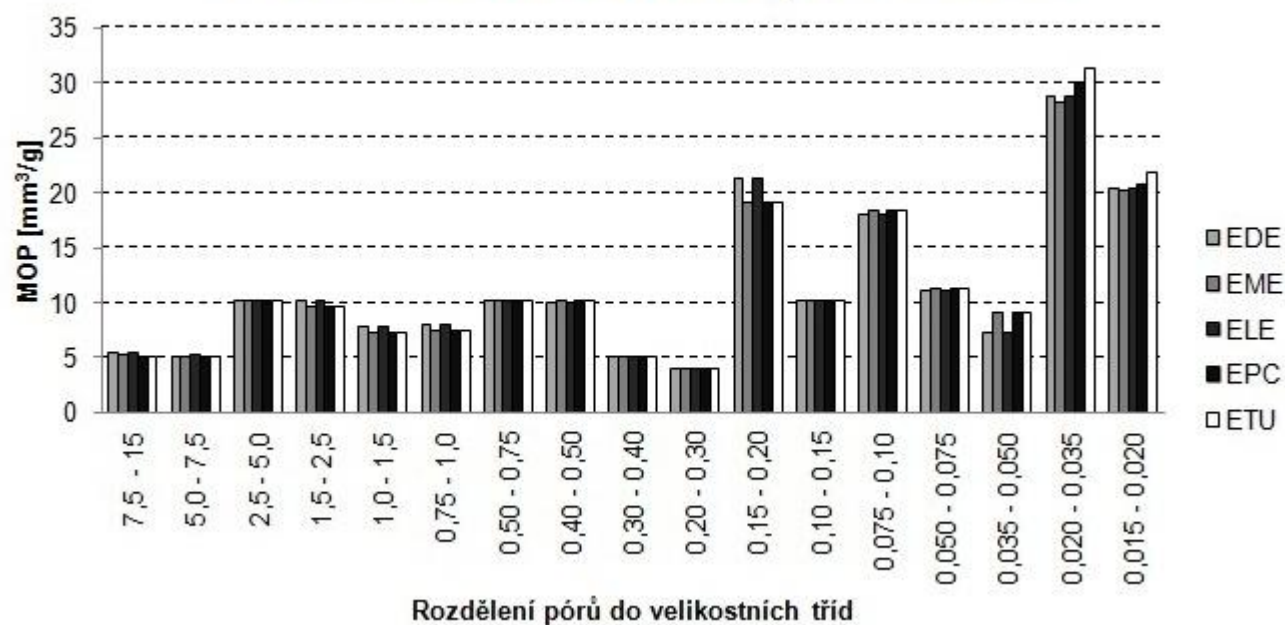
A.4

Porovnání distribuce pórů směsí s aplikací elektrárenských popílků s 30% nahrazením cementu ve směsi po 90 dnech zrání



A.5

**Porovnání distribuce pórů směsí s aplikací elektrárenských popílků
s 30% nahrazením cementu ve směsi po 180 dnech zrání**



A.6