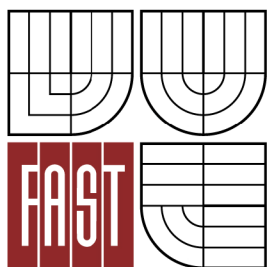


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A
DÍLCŮ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND
COMPONENTS

AKTIVACE PŘÍMĚSÍ DO BETONU

ACTIVATION ADMIXTURES IN CONCRETE

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Lukáš Eger

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2012

Abstrakt

Cílem této práce je shrnutí a pohled na příměsi do betonu. Jedná se o příměsi aktivní i inertní, které mají pozitivní vlastnosti na čerstvý i zatvrdlý beton. Především pak možné zvýšení jejich vazného potenciálu, pro co nejvyšší využití jejich pojivých vlastností, a to jak mechanickou tak chemickou cestou, popřípadě jejich kombinací, či jinou metodou. Dále pak posouzení fyzikálně – mechanických vlivů na čerstvý i zatvrdlý beton ve stáří až 60 dní, při částečné náhradě cementu příměsí odlišného charakteru.

Klíčová slova

Příměsi, beton, křemičité úlety, struska, popílek, pevnost, aktivace, náhrada, úprava

Abstract

The aim of my bachelor's work is the summarization and focus on admixture concrete, and the active and inert admixture, which have some positive characteristics for fresh and hardened concrete. Theoretically, I tried to study the increase of their joining potential while this characteristic can be used by either chemical or mechanical way, their combination as well. I also work on evaluation of physical mechanical influence for fresh and hardened concrete that can up to 60 days old while the cement was partly substituted by admixture of different character.

Keywords

Admixture, concrete, silica fume, slag, fly ash, strength, activation, replacement, treatment

Bibliografická citace VŠKP

EGER, Lukáš. *Aktivace příměsí do betonu*. Brno, 2012. 88 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně, a že jsem uvedl všechny použité, informační zdroje.

V Brně dne

.....

podpis autora

Lukáš Eger

Poděkování

V této části bych chtěl vyjádřit svou úctu a poděkování vedoucímu práce prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc., za odborné i pedagogické vedení a všem zaměstnanců ÚTHD FAST VUT Brno, kteří mi byli nápomocni při tvorbě této práce. Jmenovitě bych chtěl dále poděkovat Ing. Petru Novosadovi za nápomoc a konzultace během vypracování.

Obsah

1	Úvod	9
2	TEORETICKÁ ČÁST	10
2.1	Příměsi	10
2.2	Křemičité úlety (Silica Fume).....	10
2.2.1	Funkce	12
2.2.2	Využití	15
2.2.3	Křemičité úlety do betonu podle ČSN EN 13263-1+A1: Definice, požadavky a kritéria shody	18
2.2.4	Zvýšení potenciálu křemičitých úletu.....	20
2.3	Sruska (Slag).....	22
2.3.1	Krystalická struska	23
2.3.2	Sklovitá struska	24
2.3.3	Funkce vysokopecní granulované strusky	25
2.3.4	Využití	25
2.3.5	Zvýšení potenciálu vysokopecní granulované strusky	27
2.3.6	Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty podle ČSN EN15167-1: Definice, specifikace a kritéria shody.	30
2.4	Popílký (fly ash).....	31
2.4.1	Popílký z fluidního spalování	32
2.4.2	Popílký z klasického spalování.....	33
2.4.3	Požadavky na popílký do betonu podle ČSN EN 450-1+A1: Definice, specifikace a kritéria shody.	35
2.4.4	Využití elektrárenských popílků.....	37
2.4.5	Zvýšení potenciálu elektrárenských popílků	40
2.5	Domílané křemičité písky	44
2.5.1	Využití:	44

2.6	Metakaolín	46
2.6.1	Využití	46
2.6.2	Zvýšení potenciálu kaolínu a metakaolínu	47
2.7	Jemně mletý cihlářský stěp.....	48
2.7.1	Využití	48
2.8	Jemně mletý vápenec	50
2.8.1	Využití	51
3	PRAKTICKÁ ČÁST	52
3.1	Náhrada cementu	52
3.2	Použité vstupní suroviny.....	52
3.3	Použité příměsi	53
3.4	Metodika laboratorních zkoušek.....	57
3.5	Navržené receptury	60
3.6	Porovnání výsledků betonu v čerstvém stavu.....	60
3.7	Porovnání výsledků betonu v zatvrdlém stavu	62
4	Závěr.....	75
5	Použitá literatura.....	78
6	Seznam tabulek.....	85
7	Seznam obrázků.....	87
8	Seznam grafů	88

1 Úvod

Pokrok a moderní technologie se rozvíjejí mnohem více než v dřívějších dobách a nároky na vyšší životní úroveň stále narůstají. Plýtvání nerostným bohatstvím a vzácnými surovinami je třeba více redukovat a poskytnout možnost jejich náhrady alternativními zdroji. Tento globální „problém“ se reflektuje i do stavebnictví. Nemusí se vždy jednat o všudypřítomné a nejčastěji zmiňované snížení emisí CO₂, ale také o zachování zdrojů surovin do budoucna. Uvádí se, že cementářský průmysl vyprodukuje ročně okolo 5 % celosvětových emisí CO₂. S náročností doby jsou stále kladeny vyšší požadavky na konstrukční schopnost výsledných prvků, s těmito požadavky se zvyšuje i množství pojiva, které reprezentuje právě cement. Při snížení množství cementu v kompozitu dochází k úspoře jak vstupní suroviny, tak i snížení emisí CO₂, které jsou vyprodukovány při výrobě tohoto pojiva. Pro zachování pojivých vlastností nastupují „alternativní“ suroviny, které mohou být využity jako náhrada cementu. V betonářské praxi nazýváme tyto látky příměsi. Jedná se o „odpadní“ látky, které se vyskytují převážně v práškovém stavu, vznikly jako vedlejší produkt primární výroby, a které disponují vlastnostmi jako latentní hydraulita a pucolányta. V dnešní moderní době již není na místě nazývat tyto látky odpadní, ale začlenit je spíše do oblasti druhotných surovin vzniklých jako vedlejší produkt primární výroby. Jako hlavní představitele můžeme zařadit elektrárenský popílek vzniklý spalováním fosilných paliv. Si-úlety, jako vedlejší produkt při výrobě ferrosilicia v obloukových pecích a neposlední řadě i sekundární produkt při výrobě surového železa ve vysokých pecích strusku. Je třeba podotknout, že příměsí je velmi široká řada a nejedná se vždy o druhotnou surovinu, ale účelně vyráběný produkt. Hlavním úkolem příměsí je při výrobě betonu zlepšení nebo docílení zvláštních vlastností. Ne vždy může být výsledné užití příměsí přínosem pro výsledný produkt, v našem případě beton. Proto pro maximální využití a co možná největšího začlenění příměsí do vytvořeného kompozitního materiálu vyvstává oblast zušlechťování v našem případě tzv. „aktivace“. Jedná se o soubor cílených změn (fyzikálně-chemických) příměsí, jak mechanickou cestou (mletí, drcení aj.) tak cestou chemickou, popřípadě kombinací či jinou alternativní metodou. Výsledkem je docílení co možná největšího nabízeného potenciálu suroviny. Při výrobě kompozitu je třeba předem promyslet účel využití a požadované vlastnosti, dále pak zvážit alternativu jeho výroby a současně ekonomický a v nepolední řadě ekologický přínos.

2 TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Příměsi

Příměsi jsou většinou práškové látky přidávané do čerstvého betonu za účelem zlepšení některých vlastností nebo k dosažení zvláštních vlastností. Příměsi můžeme dle ČSN EN 206-1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda, rozdělit na dva typy:

Typ I - inertní příměsi

Jedná se o příměsi přidávané za účelem dosažení hutnější struktury betonu nebo pro zlepšení reologických vlastností čerstvého betonu. Tyto příměsi svým mineralogickým a chemickým složením netuhnou, netvrdnou ani za přídavku budiče. Jejich úkolem je především zvýšit hutnost struktury směsi a docílit za jejich pomocí zvýšení podílu jemné cementové malty, dále také zlepšit zpracovatelnost betonu, popřípadě změnit jeho barvu.

Do této skupiny můžeme zařadit: barevné pigmenty, mleté horniny, moučky (filer). Je ovšem potřeba brát zřetel, že s rostoucím množstvím jemných podílů roste i spotřeba záměsové vody potřebné ke smočení jejich povrchu [1].

Typ II – aktivní příměsi

Aktivní příměsi jsou látky, které díky chemickému a mineralogickému složení se aktivně podílejí na pevnosti cementového tmele. Aktivní příměsi můžeme dělit podle působení na látky latentně hydraulické a pucolánové. Latentní hydraulická je schopnost látky reakcí s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za normální teploty ve vodném prostředí tvrdnout. Tyto látky samy o sobě netuhnou ani netvrdnou, ale jejich hydraulická schopnost je vyvolána pomocí budiče. Budiče můžeme mít dvojího typu: alkalické ($\text{pH} > 7$) a síranové (vedou k tvorbě ettringitu). Nejvýznamnějším představitelem je vysokopecní struska. Pucolány jsou anorganické látky, které sami netuhnou ani netvrdnou a vyznačují se vysokým obsahem amorfního SiO_2 . Amorfní SiO_2 (nedokonale uspořádané atomy Si a O v krystalu křemene) tzv. silika je schopna reagovat s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za vzniku C-S-H gelu. Pucolány můžeme dále dělit dle původu na přírodní (tufy, trasy, křemelina) a umělé (křemičité úlety popílků, jemně mletý cihlářský střep) [1].

2.2 Křemičité úlety (Silica Fume)

Křemičité úlety jsou vedlejším produktem při výrobě ferrosilicia, křemíku a jeho dalších slitin. K výrobě křemíku a jeho slitin dochází v obloukové peci, kde je křemen

redukován v přítomnosti paliva, popřípadě železa, při výrobě ferrosilicia. Během redukce křemene vzniká v dosahu elektrického oblouku, při teplotě nad 2000 °C plynný SiO. Při unikání tohoto plynu k horní části pece dochází k jeho ochlazování, kondenzaci a oxidaci ve formě velmi jemných částic SiO₂ (tzv. silika). Ty jsou shromažďovány v odlučovacím systému. V odlučovačích může docházet k zachycování odlišných částic. Jedná se o velmi jemné částice křemene, paliva popřípadě uhlíkových částic z elektrod. Tyto odlišné částice představují velmi malé a zanedbatelné procento [2].

Křemičité úlety jsou tvořeny amorfni látkou zvanou silika. Z chemického a strukturního hlediska se jedná o nedokonale uspořádané atomy Si a O. Ochlazováním par SiO a následnou velmi rychlou oxidací na SiO₂ nemají tetraedry SiO₂ možnost pravidelně uspořádat a vytvořit tak krystalickou siliku.

Při výrobě různých typů slitiny dochází ke kolísání obsahu SiO₂. S rostoucím obsahem křemíku ve slitině roste také obsah SiO₂ v křemičitých úletech [2]. Úlety vznikající během výroby 50 % ferrosilicia obsahují 61-84 % SiO₂, 75 % ferrosilicia obsahují 87-91 % SiO₂ a během výroby čistého křemene pak 87-98 % SiO₂ [3].

Křemičité úlety jsou tvořeny zejména sklovitou silikou (Tab. 1). Částice jsou dokonalého kulovitého tvaru o průměru 0,1 μm do 1 μm. Částice křemičitých úletů jsou tedy 100 krát menší než průměrné zrno cementu. Objemová hmotnost se pohybuje okolo 2200 kg m⁻³. Vzhledem k velmi velkému měrnému povrchu 13 000 – 30 000 m²/kg, nelze měrný povrch měřit běžnou metodou. Proto se provádí zkouška prostřednictvím adsorpce dusíku. Při měření měrného povrchu portlandského cementu touto metodou se jeho měrný povrch pohybuje kolem 1 500 m²/kg [2].

Při výrobě slitiny z jedné pece se získávají křemičité úlety stejné kvality a složení. To ovšem neplatí při změně výroby slitiny v peci, kdy může dojít ke změně složení a následnému smíšení křemičitých úletu dvou odlišných slitin, odlišného chemického složení a pucolánových vlastností. Na to je třeba brát zřetel a důsledně kontrolovat vlastnosti křemičitých úletů [2].

Křemičité úlety se výrazně liší od ostatních příměsí díky své vysoké pucolánové aktivitě, množství amorfniho SiO₂ a velmi jemnému podílu zrn. Tyto parametry jim dávají velký potenciál a využití. Dle ČSN EN 13263-1+A1: Definice, požadavky a kritéria shody, může být silika dodávána, tak jak byla zachycena na filtrech (neaglomerována), nebo po úpravě zvětšením sypné hmotnosti (aglomerována), popřípadě jako kaše. [4]

	Šedý křemík	Šedé ferrosilicium	Bílé ferrosilicium
SiO ₂	93,7 %	87,3 %	90,0 %
Al ₂ O ₃	0,6 %	1,0 %	1,0 %
CaO	0,2 %	0,4 %	0,1 %
Fe ₂ O ₃	0,3 %	4,4 %	2,9 %
MgO	0,2 %	0,3 %	0,2 %
Na ₂ O	0,2 %	0,2 %	0,9 %
K ₂ O	0,5 %	0,6 %	1,3 %
Ztráta žháním	2,9 %	0,6 %	1,2 %

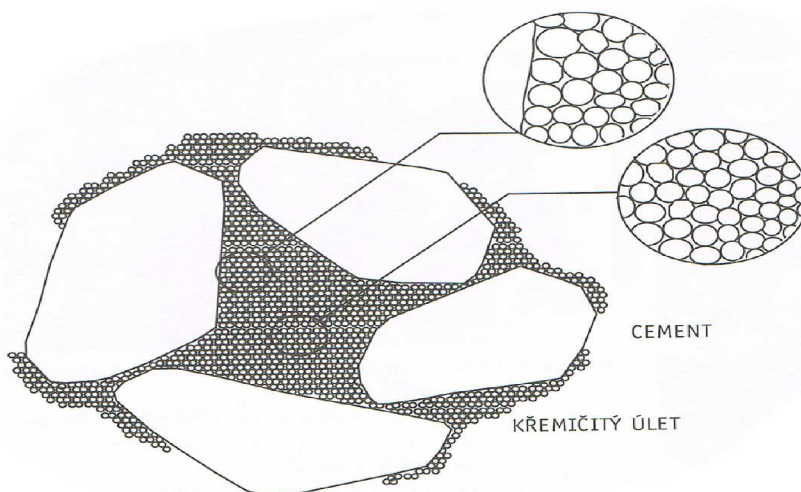
Tabulka 1. Běžné složení křemičitých úletu [2].

2.2.1 Funkce

Křemičitým úletům můžeme přiřadit tři hlavní funkce, které vykonávají v betonu a to:

- a) reakce SiO₂ s volným vápnem
- b) tvorba mezifázového rozhraní
- c) snížení velikosti póru v matrici

V čerstvém i zatvrdlém betonu hrají jemná zrna velkou roly. Díky velikosti částic mohou zrna úletu obalovat zrna cementu (Obr. 1), vyplňovat tak mezery a tvořit různě silné tranzitní zóny mezi zrny, a ovlivňovat stupeň orientace CH krystalů v něm [3]. Ovšem velmi důležitým faktorem je správný dispergace za pomoci vhodně zvoleného superplastifikátoru [5].



Obrázek 1. Vyplnění prostoru zrn cementového tmele křemičitým úletem[2].

Velký význam má i druh použití Si – prachu, především se jedná o použití aglomerovaných či neaglomerovaných Si – úletu (Obr. 2). Jak již víme, tak zrna Si – úletu mají velikost částic od 0,1 μm do 1 μm . U aglomerovaných Si – úletu mohou tvořit seskupení velikosti větší než 100 μm [10]. Rozptýlení aglomerovaných zrn do původních velikostí, pomocí superplastifikátoru, nebo například pomocí nadzvukového homogenizátor [8], [9], je velmi obtížné. Bylo prokázáno, že aglomerovaná zrna se nachází v zatvrdlé cementové pastě a to i ve věku delším než 90 dní. Pucolánová reakce může probíhat pouze na povrchu aglomerovaných zrn, kde dojde ke vzniku C-S-H a v jádru aglomerátu je obsažen křemičitý úlet [10]. Z předchozích poznatků vyplývá, že reaktivitu aglomerovaných křemičitých úlet udává především velikost aglomerátu než velikost jednotlivých částic.

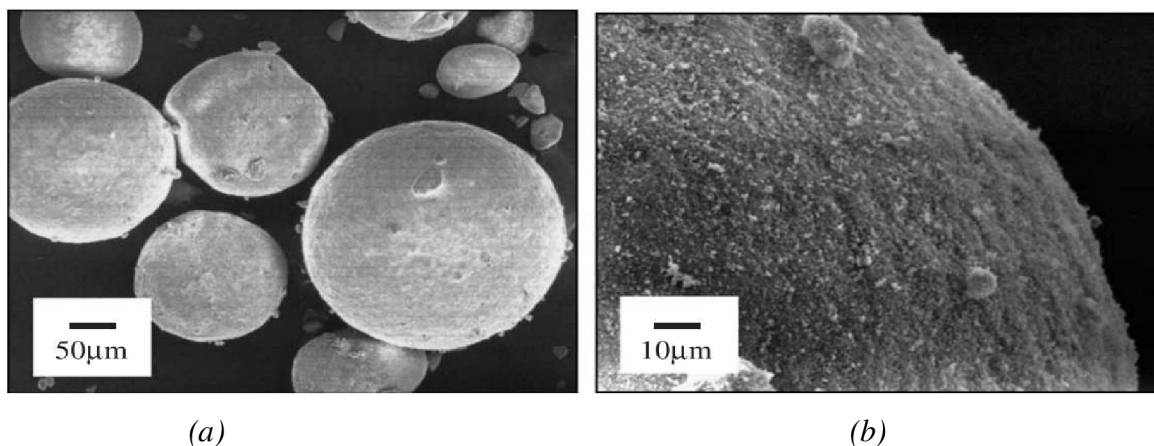
Vliv množství dávkování Si – úletu na pórovitou strukturu je neméně významný. Jedná se o velikost póru kapilárních (nad 10 nm) a částečná gelová pórovitost (od 3 do 10 nm). Tato pórovitost s rostoucí dobou vytvrzování a množstvím přísadků Si – úletu klesá (Tab. 2). Tento jev ovšem neplatí pro velké aglomerované shluky Si – úletu, protože velikost částic aglomerátu je o málo menší (záleží na tvorbě aglomerátu) než cementové částice. Dochází ke snížení kontaktní plochy a „dokonalému“ obalení zrna, reakci s Ca (OH)₂ a následnému vzniku C-S-H [10].

čas [den]	CSF0	CSF5	CSF10	CSF15	CSF20
	celková pórovitost měřená pomocí MIP				
3	35,69	35,72	34,90	34,74	37,36
7	31,97	31,54	29,69	31,16	31,77
14	27,62	29,55	26,79	26,06	28,39
28	26,90	27,36	26,31	23,82	26,39
56	23,95	24,90	23,57	23,64	23,56
90	-	25,00	22,69	22,96	22,31

Tabulka 2. Velikost póru v zatvrdlém betonu měřená pomocí rtuťové porozimetrie (MIP)[10].

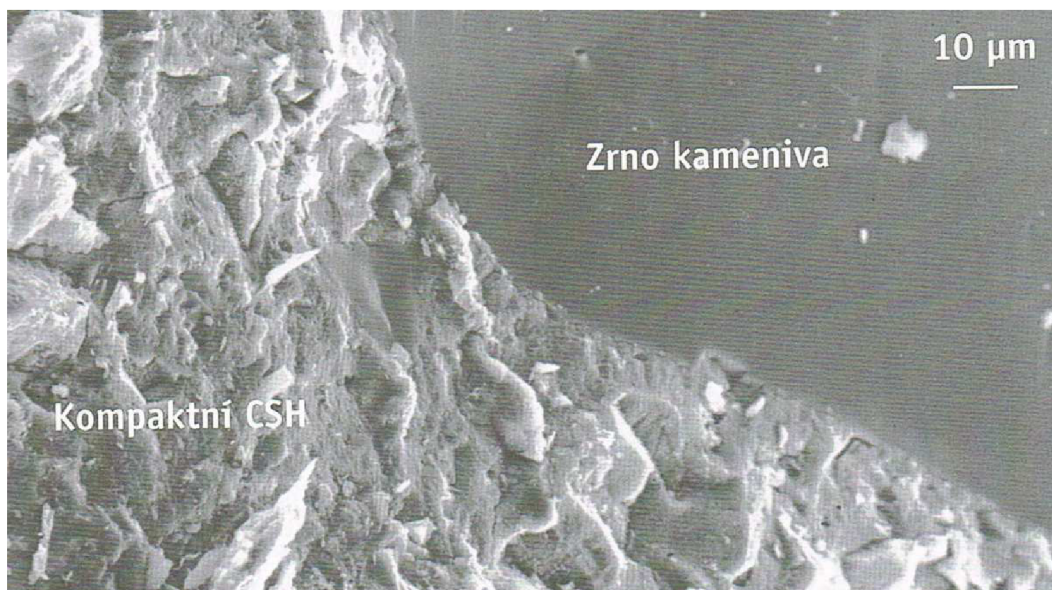
Křemičité úlety mají nemalý podíl na vysoké pevnosti betonu při jejich užití. Vliv na pevnost v tlaku v raném věku, mají opět velikosti částic křemičitých úletů. Důsledkem aglomerátu dochází ke snížení pucolánové reakci. Prodlužuje se tak reakce a výsledné pevnosti v raných dobách (první dny) se výrazně neliší od použití běžného cementu, bez

náhrady křemičitými úlety. Významnější nárůst pevnosti v tlaku způsobený zpomalením reakce se projeví ve věku okolo, nebo více jak 28 dní [10].



Obrázek 2. Rastrovací elektronový mikroskop. (a) tvar a velikost zrn křemičitých úletu (b) aglomerované křemičité úlety[10].

Křemičité úlety mají také velký vliv na zpracovatelnost a čerpatelnost čerstvého betonu. Velká jemnost částic zapříčiňuje snížení odmíšení, odlučování vody v betonové směsi. Snížení vnitřní a vnějšího odměšování vody nemá vliv na zpracovatelnost čerstvého betonu, kde je potřeba zvýšení množství vody o 1 litr na 1 kilogram Si – úletu k dosažení stejné zpracovatelnosti [1]. Směsi s velmi nízkým vodním součinitelem vykazují vysokou lepivost. U těchto směsí vykazují křemičité úlety ztekucující účinek. Tento jev je připisován působení jemných kuliček křemičitých úletu jako kuličková ložiska. Částice Si-úletu také vytěsňují vodu z mezer mezi flokulovanými cementovými zrny, tím pádem dochází ke zvýšení podílu vody pro ztekucení betonu. Díky všem mikrostrukturální schopnostem je výsledná tranzitní zóna mezi cementovou pastou a zrny kameniva velmi kompaktní (Obr. 3) [2].



Obrázek 3. Kompaktní CSH gel v betonu s křemičitými úlety. Lze vidět absenci zóny rozhraní mezi zatvrdlou cementovou pastou a zrnem kameniva [2].

Rozpory ohledně aglomerování křemičitých úletu vedly ke zkoumání, zdali se tyto shluky nepodílejí na alkalicko-křemičité reakci (ASR). Samostatná zrna křemičitých úletu se vzhledem k jejich velikosti nepodílejí na ASR. Ale aglomeráty větší jak 150 μm mohou mít vliv na ASR a následnou expanzi. Bylo zjištěno, že některé aglomeráty o velikosti větší jak 150 μm se nepodílejí na ASR a jiné aglomeráty z odlišného křemičitého úletu se na ASR podílejí. Výsledkem je návrh, že pro zachování eliminace ASR a následné expanzi, by bylo dobré držet se aglomerátu Si-úletu pod 150 μm [11].

2.2.2 Využití

Vzhledem k vlastnostem, které v betonech Si-úlety prokazují, se obecně mohou používat tam, kde chceme dosáhnout:

- Rychlého nárůstu pevností. Zde je třeba brát ohled na již zmiňované aglomerované, neaglomerované křemičité úlety. Bylo zjištěno, že u aglomerovaných úletů se nárůst počátečních pevností výrazně neliší, někdy je i menší, od nárůstu pevností bez jejich použití. Namísto u neaglomerovaných dochází k nárůstu počátečních pevností rychleji právě díky rychlé pucolánové reakci.
- Vysoké pevnosti v tahu, pevnosti v ohybu a modul pružnosti. Těchto vyšších hodnot dosáhneme díky jemnosti částic Si-úletu. Částice vyplní prostor mezi zrny

cementu. Při reakci a následnému vzniku C-S-H dojde ke spolupůsobení a minimalizaci zóny rozhraní mezi cementovou pastou a zrný kameniva (Obr. 3).

- Zvýšení odolnosti proti otěru. Tvorba hutné tvrdé a kompaktní struktury. Vlivem křemičitých úletů dochází k ucpání cementového tmele, kde $\text{SiO}_2 + \text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{C-S-H}$, snížení pórovitosti a následnému zvýšení trvanlivosti.
- Odolnosti vůči chemickému působení chloridů, kyselin, dusičnanů a sulfátů. Odtud pramení využití v oblasti snížení karbonatace a následné koroze výztuže [6]. V tomto případě je třeba brát zřetel na množství dávkovaného Si – úletu, kde je dávka omezená k hmotnosti cementu a to na hodnotu menší než 0,11. Jinak by mohlo dojít ke snížení pH cementového tmele a následné depasivaci výztuže. Kde roztok Ca(OH)_2 má pH okolo 12,5, a ocel je pasivována do $\text{pH} = 11,5$ [7].

Největší využití křemičitých úletů nalezneme v oblasti vysokohodnotných betonu (High Performance Concrete - HPC).

Křemičité úlety se mohou využívat do betonů vystavených agresivnímu prostředí, kde chemická odolnost vzniklého C-S-H za pomoci Si-úletu je vyšší než slabší Ca(OH)_2 .

SI-úlety mohou být použity také do samozhutnitelných betonů (Self Compacting Concrete – SCC), nebo do vysokopevnostních betonů (High Strength Concrete - HSC).

Dávkování křemičitých úletů je velmi rozmanité. Hlavními faktory je především čistota, tedy množství amorfního SiO_2 obsaženého v křemičitých úletech. Dále pak množství dávkování Si-úletu v závislosti na vodním součiniteli.

S rostoucí jemností částic dochází i k nárůstu množství vody potřebné k zachování potřebné konzistence. Vodní součinitel a minimální množství cementu spolu úzce souvisí a jeho výpočet je podmíněn EN 13263;1998. Výpočet vodního součinitele vychází z rovnice:

$$w_c = \frac{m_v}{m_c + k \cdot m_p}$$

Kde m_c , m_v , m_p je hmotnost cementu, vody a příměsi, tedy Si - úletu v kg/m^3 betonu. Funkce hodnoty k , slouží ke korekci a je ovlivněna prostředím a vodním součinitelem. Pro

beton obsahující cement CEM I dle EN 197-1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití, se používají tyto hodnoty k:

Pro vodní součinitel $w = 0,45$ je $k = 2,0$, pro $w > 0,45$ je $k = 2,0$ s výjimkou stupně prostředí XC a XF, kde $k = 1,0$.

V těchto případech je třeba brát zřetel na množství dávkovaného Si – úletu, kde je dávka omezená k hmotnosti cementu a to na hodnotu menší než 0,11. Při zvýšení množství Si – úletu nedochází k započítání při návrhu k - hodnoty. Množství (cement + $k \times$ křemičitý úlet) nesmí klesnout pod minimální hodnotu, která je požadována pro příslušný stupeň vlivu prostředí. Minimální množství cementu nesmí být sníženo o více než 30 kg/m³ betonu, pro daný stupeň vlivu prostředí, který vyžaduje minimální obsah cementu 300 kg/m³.

Vodní součinitel je podmíněn také dávkou vhodného superplastifikátoru. Optimální vodní součinitel, tedy poměry voda/cement + silika se podle studií pohybuje v rozmezí 0,27 až 0,50 w/c. Optimální volba se blíží hodnotě 0,30 až 0,36 w/c. Kde je dosaženo nejvyšších hodnot pevností v tlaku vzhledem ke stáří betonu. Dávkování Si-úletu jako náhrada cementu začíná na 5 % a pokračuje do hodnoty 30 % (tato hodnota je využívána obvykle jen v laboratorních podmínkách). Obvyklé dávkování bývá v množství 5 až 10 % z hmotnosti cementu. Jak maxima, tak minima jsou velmi neefektivní, vzhledem k dosaženým pevnostem a množství. Z výzkumu [3], [12] je patrné optimální dávkování 8 až 12 % Si-úletu. Tato hodnota se jeví jako efektivní. U nižších hodnot není nárůst tlakových pevností v závislosti na čase tak razantní. U vyššího zastoupení se hodnota pevností razantně neliší od nižšího dávkování. S rostoucím věkem (řádově měsíce) se hodnoty pevností blíží podobným hodnotám [3], [12].

S rostoucím množstvím přidaných Si – úletu stoupá i množství přidaného superplastifikátoru potřebného k jejich rozptýlu. Následuje nárůst ceny odpovídající Kč/MPa. Abychom dostali vhodnou betonovou směs, je třeba zvážit veškerá kritéria a možnosti využití výsledného kompozitu, jak po stránce množstevní, tak po stránce finanční a užitkové.

2.2.3 Křemičité úlety do betonu podle ČSN EN 13263-1+A1: Definice, požadavky a kritéria shody

Aglomerované křemičité úlety

Křemičitý úlet, jehož zrna byla k docílení větší sypné hmotnosti upravena aglomerací, s typickou sypnou hmotností větší než 500 kg/m^3 . [4]

Neaglomerované křemičité úlety

Křemičité úlety odebrané přímo ze sběrného filtru, s typickou sypnou objemovou hmotností v rozmezí od 150 kg/m^3 do 350 kg/m^3 . [4]

Kaše z křemičitého úletu

Homogenní, tekutá suspenze křemičitého úletu ve vodě s úpravou pH, obsahující obvykle 50 % hmotnosti suchého křemičitého úletu což odpovídá asi 700 kg křemičitého úletu v jednom m^3 kaše. [4]

Oxid křemičitý

Obsah oxidu křemičitého, SiO_2 , stanovený metodou uvedenou jako referenční metoda v EN 196-2, nesmí být v křemičitých úletech menší jak 85 % hmotnosti pro třídu 1, nebo ne menší než 80 % hmotnosti pro třídu 2. [4]

Elementární křemík

Obsah elementárního křemíku, stanovený podle ISO 9286, nesmí být větší než 0,4 % hmotnosti. [4]

Volný oxid vápenatý

Obsah volného oxidu vápenatého, volný CaO, stanovený metodou uvedenou v EN 451-1, nesmí být větší než 1 % hmotnosti. [4]

Sírany

Obsahu síranů, stanovený metodou uvedenou v EN 196-2 a vyjádřený jako SO_3 , nesmí být větší než 2,0 % hmotnosti. [4]

Celkový obsah alkálií

Celkový obsah alkálií, stanovený metodou v EN 196-2 a přepočtená na Na₂O ekvivalentní, musí být deklarován. [4]

Chloridy

Obsah chloridů, vypočtený jako Cl⁻ a stanovený metodou uvedenou v EN 196-2, nesmí být větší než 0,3 % hmotnosti. Jestliže obsah Cl⁻ je větší než 0,10 % hmotnosti, musí být horní mez pro jeho charakteristickou hodnotu deklarována výrobcem. [4]

Ztráta žíháním

Ztráta žíháním se musí stanovit podle metody uvedené v EN 196-2 s tím, že žíhání je prováděno po dobu 1 hodiny, nesmí být větší než 4,0 % hmotnosti. [4]

Měrný povrch

Měrný povrch stanovený adsorpcí dusíku, metodou uvedenou v ISO 9277, nesmí být menší než 15,0 m²/g, a ne větší než 35,0 m²/g. [4]

Obsah sušiny v kaši

Obsah sušiny v kaši se nesmí lišit od dodavatelem deklarované hodnoty o více jak ±2 % hmotnosti kaše, stanovený sušením reprezentativního vzorku hmotnosti nejméně 5 g kaše v sušárně s nucenou cirkulací vzduchu při teplotě (105±5) °C do ustálené hmotnosti. Ustálenou hmotností se rozumí stav, kdy následující vážení nejméně po 1 hodině sušení při teplotě (105±5) °C se neliší o více než 0,2 %. [4]

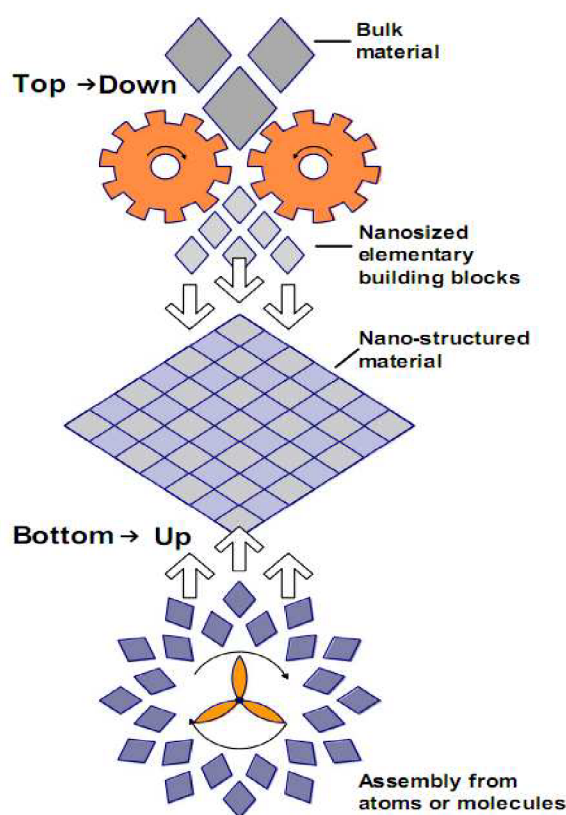
Index účinnosti

Index účinnosti se stanoví jako poměr (v procentech) pevnosti v tlaku normalizovaných maltových trámečků připravených s 90 % referenčního cementu a 10 % křemičitého úletu hmotnosti veškerého pojiva k pevnosti v tlaku normalizovaných trámečků připravených se 100 % cementu zkoušených ve stejném stáří.[4]

Index účinnosti musí být nejméně 100 % při zkoušce malty ve stáří 28 dnů. Výsledek zkoušky indexu účinnosti nedává přímou informaci o vlivu křemičitého úletu na pevnost betonu ani nelimituje dávkování křemičitých úletu ve směsi, která je použita při těchto zkouškách.[4]

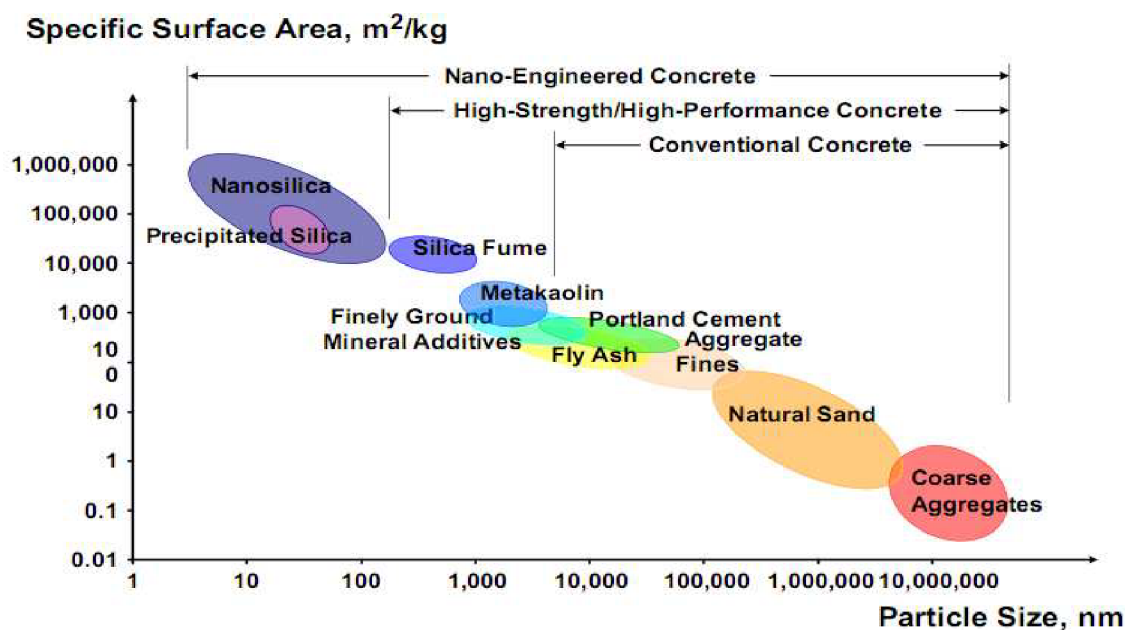
2.2.4 Zvýšení potenciálu křemičitých úletů

Jako nejefektivnější zvýšení potenciálu křemičitých úletů, se jeví využití jako nanočástice tzv. nano-SiO₂. Obecně nano-částice lze definovat, jako velmi malé částice. Způsob výroby a velikosti částic se zdatelně liší, vzhledem k způsobu a oblasti využití. Můžeme rozdělit dva základní způsoby výroby nano-částic. První způsob je tzv. „top-down“. V tomto systému dochází ke snižování velikosti částic, při zachování jejich původních vlastností. Druhý způsob tzv. „bottom-up“ nebo „molekulární nanotechnologie – molekulární výroba“, ve kterém jsou navrženy materiály z atomů nebo molekul a jsou složeny prostřednictvím procesu montáže (Obr. 4) [13].



Obrázek 4. Ilustrace ze „shora dolů“ a „zdola nahoru“ výroby v oblasti nanotechnologií [20].

Dochází ke zmenšení velikosti částic SiO₂ a to v rozmezí od 1 nm do 100 nm. Měrný povrch se pohybuje v rozmezí 35 000 až 500 000 m²/kg. Poměr nano-SiO₂ vzhledem k SiO₂-úletům je velmi značný (Obr. 5). Dalším významným znakem je vysoká čistota nano-SiO₂, tato hodnota se pohybuje nad 99,9 % SiO₂. Další prvky jsou zastoupeny v míře setin procenta [13].



Obrázek 5. Velikost částic a jejich specifický měrný povrch vzhledem ke konkrétnímu materiálu [20].

Nanočástice mohou působit jako jádra cementové fáze, podporovat hydrataci cementu vzhledem k jejich vysoké reaktivitě. Dále díky jejich velikosti snižují pórovitost. Už u klasických Si-úletů byl zmíněn problém se vznikem shluků. U nano-SiO₂ je tato problematika mnohem více aktuální. Proto nejvýznamnější roli u nano-SiO₂ hraje jejich účinné rozptýlení. Při jejich špatném rozptýlení mohou nastávat problémy s vlastní agregací, což snižuje výhody jejich malé velikosti a vytváří nezreagované kapsy vedoucí k možnosti koncentraci napětí v materiálu [12].

Velikost nano-SiO₂ částic umocňuje výhody a použití křemičitých úletů v betonu. Zvyšují odolnost proti pronikání vody a přispívají následnému snížení vyplavování vápenatých iontů Ca²⁺, tedy snížení degradace betonu. Vzhledem k velikosti a měrnému povrchu je mnohonásobně umocněná pucolánová reakce. Posilování vazeb nano-SiO₂ s Ca(OH)₂ a vzniku velmi kompaktního C-S-H. Díky rychlé pucolánové reakci dochází k možnosti využití jako „urychlovač hydratační reakce“ spolu s jinými druhotnými surovinami (např. popílky, struska). Ve studiích [14], [15] bylo prokázáno, že pomocí přídatku už 1 % nano-SiO₂ ke strusce či popílku dochází k urychlení hydratační reakce a zkrácení doby tuhnutí malty. Tento jev je úměrný velikosti částic podpůrné suroviny. Nano-SiO₂ má větší vliv na větší částice než na menší [14].

Ve studii [15] bylo prokázáno že nano-SiO₂ dosahuje vyšších pevností v tlaku cementové malty, především v raných fázích než klasické SiO₂-úlety. S rostoucí dobou

zrání však dochází k vyrovnání pevností v tlaku. Přídavkem 10 % nano-SiO₂ s vhodným dispergátorem bylo zjištěno, že zvýšení pevnosti v tlaku cementových malt po 28 dnech, až o 26 %, ve srovnání s pouhým 10 % nárůstem přidáním 15 % křemičitých úletu [17]. Dokonce přidáním i malého množství (0,25 %) nano-SiO₂, bylo pozorováno zvýšení 28 denních pevností v tlaku a to o 10 % a pevnosti v ohybu o 25 % [18].

Dosažené výsledky záleží především na způsobu výroby a aplikování nano-SiO₂ (např. molární poměry činidel, typy reakcí médií a trvání reakce), rozdíly nano-SiO₂ v cementové pastě hrají důležitou roli. Nano-SiO₂ se chová nejen jako výplň pro zlepšení mikrostruktury, ale také jako aktivátor pro podporu purolánové reakce [19].

Velký potenciál od nano-SiO₂ lze očekávat v oblasti HPC (High Performance Concrete), UHPC (Ultra High Performance Concrete) a RPC (Reactive Powder Concrete). Je třeba ovšem zvážit jaký přínos lze od této suroviny očekávat vzhledem k velké energetické, technologické a neposlední řadě finanční náročnosti na její výrobu.

2.3 Struska (Slag)

Struska je pevný nekovový vedlejší produkt hutní výroby především surového železa a oceli ve vysokých pecích. Struska obsahuje silikátové odpady (nečistoty vznikající v průmyslových pecích a topeništích), které brání oxidaci kovu při kontaktu se vzduchem. Roztavená struska dosahuje nižší specifické hmotnosti kolem 2800 kg/m³, oproti surovému železu, které má asi 7000 kg/m³. Proto roztavená struska plave na povrchu roztaveného železa a může být vypuštěna odděleně.

Díky tvorbě povlaku dochází ke snížení ztráty tepla zářením a navázání nečistot, které by mohly v určité kombinaci zvyšovat teplotu tavení. Korigující složky přidávané do vsázky jsou vzhledem k velkému významu na teplotu tavení směsi velmi dobře hlídáné, a chemické složení nečistot se pohybuje v definované oblasti SiO₂-CaO-Al₂O₃ (Tab. 3) [2].

Po chemické stránce je u strusky důležitý poměr tzv. zásaditých a kyselých oxidů, tedy poměr CaO : SiO₂. Tento ukazatel jakosti strusek nazýváme modul bazicity (nebo také modul zásaditosti) P₂.

$$P_2 = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3} = \frac{\text{zásadité oxidy}}{\text{kyselé oxidy}}$$

U vysokopecních strusek je tento modul P_2 ukazatelem vhodnosti použití strusky. Strusky vhodné pro zpěňování má tento modul nabývat hodnot menších než 1. Zatímco u zásaditých granulovaných strusek vhodných pro výrobu směsných cementů, nebo použití jako příměsí, má hodnota P_2 být větší než 1 [21].

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

Tabulka 3. Typické složení některých vysokopecních strusek [2].

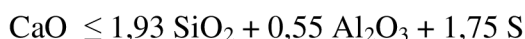
Strusky můžou být chlazeny dvěma základními způsoby. Pozvolným chlazením na vzduchu (vzniká krystalická struska), nebo chlazením za pomoci vody (vzniká sklovitá struska).

2.3.1 Krystalická struska

Při ponechání strusky na vzduchu dochází k pozvolnému chlazení a krystalizaci. Vznikají krystalické formy převážně melilitu a pevné roztoky galenitu C₂AS a ackermanitu C₂MS₂. Tyto krystalické vysokopecní strusky nemají hydraulické vlastnosti, proto nemohou být použity jako náhrada cementu, ani při jejich pomletí. Strusky v krystalické formě mohou být využity jako, kamenivo do betonu, kamenivo do lehkých betonů, tepelně izolační zásypy, výroba vápenostruskových cihel apod.

Nebezpečným jevem u krystalických vysokopecních strusek je samovolný rozpad, při kterém může docházet k objemovým změnám a následuje tak i úplný rozpad prvků z této vysokopecní krystalické strusky vyrobených. Nejběžnějším a zároveň nejnebezpečnějším typem rozpadu je tzv. silikátový rozpad. Tento rozpad nastává při modifikační změně α a β -C₂S na γ -C₂S při chlazení strusky při 675 °C, ovšem může probíhat i po velmi dlouhou dobu (několik let) i ve vychladlé strusce. Součástí této modifikační změny je nárůst objemu ve výši 9 až 10 %. Silikátový rozpad nastává u zásaditějších strusek, při obsahu CaO větším než 46 %. Vznik rozpadu je ovlivněn i jinými

oxidy, obzvláště fosforečným a hlinitým. Dále se uvádí, že při zpomalení chlazení při modifikační změně β -C₂S na γ -C₂S umožňuje eliminaci silikátového rozpadu. Další možností stabilizace α -C₂S je pomocí přítomnosti Ca₃/PO₄/₂, β -C₂S potom stabilizujeme přidáním Cr₂O₃, P₂O₅ a Al₂O₃. Silikátový rozpad může být dále podmíněn splněním jedné nebo obou následujících rovnic [21]:



Jako další nebezpečný jev vystupuje železno-manganatý rozpad.

Železnatý rozpad je způsoben přítomností pyritu (FeS). Při obsahu 2 až 3 % FeO ve strusce dochází ve vlhkém prostředí k oxidaci Fe²⁺ na Fe³⁺, vykrystalizování síranu železnatého a následného nárůstu objemu ve výši až 38 %.

Manganatý rozpad je zapříčiněn MnS. Proces je podobná jako u železnatého rozpadu. Pokud struska obsahuje více jak 5 % MnO, dochází k oxidaci a nárůstu objemu až o 24 % [22].

2.3.2 Sklovitá struska

Tento typ strusky vzniká při chlazení za pomoci vody. Pomocí rychlého chlazení dochází k tuhnutí strusky ve skelném stavu a získání latentně hydraulických vlastností. Roztavenou strusku můžeme chladit třemi způsoby [2]:

- Vypuštěním do vodní nádrže, kde dojde ke tvorbě shluků částic podobajícím se hrubému písku. Tento typ strusky označujeme jako granulovaná struska.
- Hašením pomocí tekoucí vody, kdy během vypouštění roztavené strusky do metalurgické stoky dochází k přímému chlazení tekoucí vodou. I v tomto případě získá takto ochlazená struska podobu hrubého písku a označujeme ji jako granulovanou strusku.
- Za pomoci kotouče, na který je rozžhavená struska lita dochází k jejímu vymrštění do vzduchu a následnému ochlazení jak za pomoci vzduchu, tak pomoci vody, tedy kombinací. Takto chlazená struska se podobá sférickým sbalkům (peletám) a je obvykle označována jako peletizovaná struska. Využití takto chlazené strusky může být jako lehké kamenivo, nebo při pomletí, jako hydraulický práše.

2.3.3 Funkce vysokopecní granulované strusky

Jak je z výše popsaného textu patrné tak základním rozdílem krystalické a sklovité strusky je rychlost chlazením taveniny a poměr zásaditých/kyselých oxidů. U strusky vhodného složení, tedy zásadité strusky, rychlým ochlazením (granulací) dosáhneme hydraulických schopností. Uvádí se, že kritická rychlost chlazení pro strusky je v rozmezí 0,1 až 5 °C/s v závislosti na stupni polymerizace v kapalině [23]. Tato vysokopecní granulovaná struska působením vody na její částice vykazuje vznik malého množství hydratačních produktů, z chemického hlediska se jedná o C-S-H gelové složky. Hydratace je zpočátku mnohem pomalejší ve srovnání s portlandským cementem. Hydratace, tedy reaktivita vzrůstá v roztoku Ca(OH)_2 spolu s rozpustnými ionty alkálií, vzniklých při hydrataci portlandského cementu. Dále můžeme, jako budič hydraulických schopností využít i roztok sádrovce. Mezi faktory ovlivňující aktivitu strusky můžeme zařadit její chemické složení, množství skelné fáze (udává hydraulické vlastnosti), tedy jak se nám povedlo její ochlazení, jemnost mletí a složení vysokopecní granulované strusky a portlandského cementu.

Aktivace je pomalý proces, který má za následek zpoždění vývoje hydratace strusky a s tím související pomalejší nástup pevnostního vývoje. Produkty vzniklé při hydrataci strusky mají více gelový charakter při porovnání s portlandským cementem, díky této vlastnosti mohou vyplňovat tyto gelové složky prázdná místa v cementové pastě. Pomocí těchto vlastností dochází k nárůstu konečných pevností a zvýšení trvanlivosti v důsledku snížení pórovitost, vnikání sulfátů a vniknutí chloridů do betonu [24].

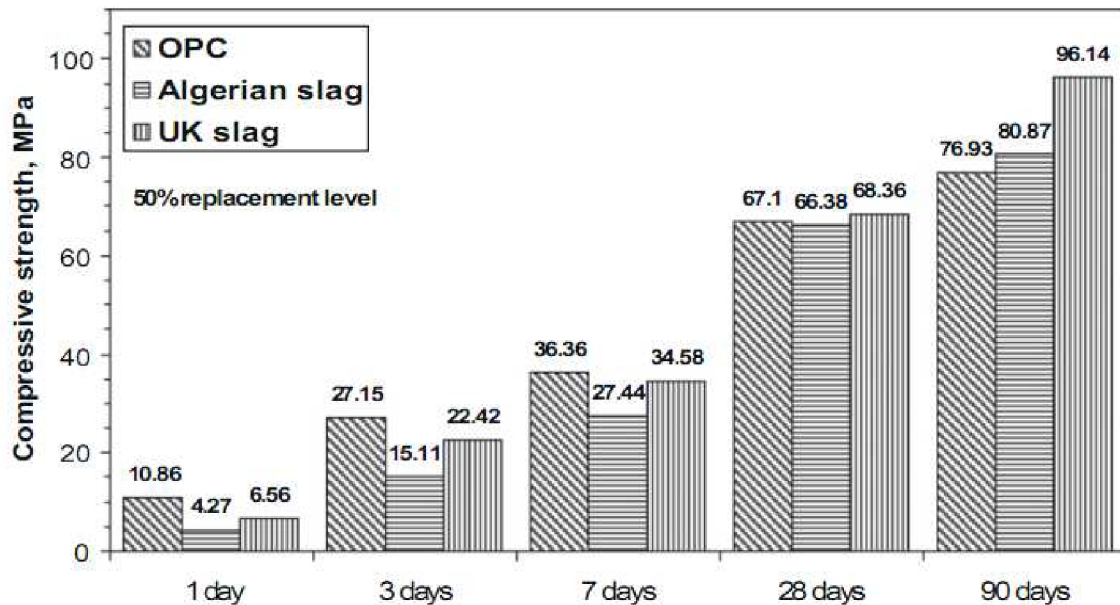
2.3.4 Využití

Vysokopecní granulovaná struska může být využita pro výrobu směsných cementů nebo jako samostatná příměs. Jak již bylo zmíněno tak hlavními faktory ovlivňující aktivitu strusky je jemnost částic, chemické složení a množství skelné fáze. Všechny tyto faktory spolu úzce souvisí a mají zásadní vliv na vzniklý produkt. Uvádí se, že struskové cementy, nebo použitím strusky dochází k zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu. Odtud plyne oblast jejich využití jako plnivo do samozhutnitelných betonů tzv. SCC (Self Compact Concrete). Četné studie také prokázaly prodloužení dobu tuhnutí při použití strusky, zde je ovšem třeba vycházet z fyzikálně chemických vlastností strusky. Vlivem zvýšení doby tuhnutí při nadměrném použití strusky může docházet k rozměšování vody. Se zvýšeným podílem jemných částic zastoupených ve strusce dochází ke zvýšení

reaktivity a zvýšením konečných pevností betonu a docílení jejich nárůstu v kratším časovém intervalu. S tím je i spjat nepatrně vyšší vývin hydratačního tepla. Díky jemnosti částic se také snižuje riziko krvácení betonu a snížení velikosti pórů matrice. Výsledkem je pak snížení propustnosti vzniklé matrice. Nemalý podíl na aktivitu strusky má také její zásaditost, tedy hydraulický (index bazicity) a následná společná interakce s portlandským cementem. Vzhledem k výrobě strusky, je v ní eliminován obsah uhlíku na rozdíl od popílků, z tohoto důvodu nedochází k nestabilitě a snižování obsahu vzduchu v betonu. Vytvořením silnější kontaktní vrstvy mezi cementovým zrnem struskou a zrnem kameniva dochází ke zvýšení ohybové pevnosti betonu [24].

Poměr jednotlivých složek podle ČSN EN 197-1 portlandsko struskového cementu bývá pro CEM II/A-S 6 – 20 % hmotnosti strusky, 80 – 94 % slínku, 0 – 5 % doplňujících složek. Pro CEM II/B-S 21 – 35 % hmotnosti strusky, 80 – 94 % slínku, 0 – 5 % doplňujících složek. Pokud se přidává struska jako samostatné plnivo do betonu, je vhodné, aby měrný povrch byl vyšší než 400 kg/m^3 , tedy vyšší než cementu. Při užití strusko portlandského cementu v betonu má v něm obsažená strusky měrný povrch pod 300 kg/m^3 v důsledku vyšší tvrdosti při mletí než má slínek. Obvyklá dávka se udává v rozmezí $100 - 300 \text{ kg/m}^3$. Vysokopeční granulovanou strusku můžeme využít jak do samozhutnitelných betonů tzv. SCC (Self Compact Concrete), tak do vysokohodnotných betonů HPC (High performance concrete). Dále lze využít pomalejšího nástupu počátečních pevností a s tím spjat menší vývin hydratačního tepla a to především v masivních konstrukcích.

Na obrázku 6 můžeme vidět vliv jednotlivých vysokopecních granulovaných strusek na pevnosti v tlaku, které vyplývají z jejich fyzikálně chemických vlastností. Porovnávají se 3 cementové pasty vyrobené z Portlandského cementu (OPC) 100 % a dvou směsných cementů Alžírská struska 50 % + 50 % OPC, Struska z Velké Británie 50 % + 50 % OPC. Jak je patrné z obrázku 6, tak nárůst pevností v tlaku je pomalejší u náhrad portlandského cementu a s rostoucím časem 28 dní, dochází k vyrovnání pevností a v době 90 dní je výsledná pevnost směsných cementů vyšší než u 100 % OPC [25].



Obrázek 6. Pevnost v tlaku tří rozdílných směsí v časovém období [25].

2.3.5 Zvýšení potenciálu vysokopecní granulované strusky

Vysokopecní granulovaná struska může být upravena samostatně a semleta s cementem, semleta společně se slínkem, nebo v případě samostatného mletí nabízena jako příměs. Pro zlepšení vazných vlastností vysokopecní granulované strusky můžeme využít její aktivace a to buď ve formě mechanické aktivace, tedy snížením velikosti zrn a zvýšením měrného povrchu, nebo chemickou cestou pomocí alkalické aktivace. Je možná i kombinace, pro dosažení optimálních parametrů.

2.3.5.1 Alkalická aktivace vysokopecní granulované strusky

Ve strusko portlandských cementech jako aktivátor pro dosažení vzniku C-S-H gelu, se využívá ve vlhkém prostředí vzniklý $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nebo sádrovec. Výsledný produkt dosahuje nižších pevností v počátečních dobách než portlandský cement (Obr. 6). Pro dosažení vyšších počátečních pevností je třeba použít vysoce alkalické roztoky. Během hydratace struskového zrna dochází zpočátku k rozpuštění skelné fáze a následně k tvorbě tenké vrstvy hydratovaných křemičitanů vápenatých, tzv. C-S-H gelu. Tato vrstva je nerozpustná pro vodu a zabraňuje tak další hydrolýze. Pomocí přítomnosti alkalických iontů dochází ke zvýšení difuze vody a zrychlení hydratace. V přítomnosti alkálií vznikají ve vodě alkalické křemičitan, které umožňují další rozpouštění skelné fáze. Alkalické ionty působí zpočátku jako katalyzátor reakce a po průběhu krystalizačních

a kondenzačních procesů se podílí na vzniku C-S-H gelu [29]. Odtud vyplývá Alkalicky Aktivovaná vysokopecní Struska (ASS). Nejčastější aktivátory jsou alkalické křemičitany (vodní skla), uhličitan sodný nebo draselný a hydroxidy. Aktivátory mohou být přidávány do směsí ve formě roztoku, nebo mohou být dávkovány jako prášek pro smíchání se struskou [26].

Výsledné produkty závisí na specifickém povrchu částic strusky, koncentraci, povaze aktivátoru a teplotě ošetřování. Vzhledem k nízké ceně se k aktivaci strusky využívají sodné aktivátory, které dobře rozpouští skelnou fázi, nato draselné aktivátory podporují tvorbu gelu a tedy pevnější strukturu. Při použití draselného aktivátoru bývá obecně dosaženo vyšších pevností v tlaku. Především draselná aktivátor má vzhledem k většímu iontovému poloměru než sodné ionty lepší vliv na výkvětovost či odolnost vůči vysokým teplotám. Vlivy aktivátorů na jednotlivé druhy strusek se mohou lišit v závislosti na jejich chemicko-fyzikálním složení [29].

S rostoucím množstvím aktivátoru do určité meze roste i pevnost, při vyšší koncentraci dochází k poklesu pevností. Velké množství může způsobovat příliš vysoké hydratační teploty spojené s tvorbou mikrotrhlin, a vytvořit vhodné prostředí pro vznik alkalicko-křemičité reakce kameniva a následné expanzi, což může mít za následek výslednému snížení pevností. Při vhodném použití aktivátoru, dávkování a podmínkách dochází k nárůstu mechanické pevnosti dříve než při použití samostatného portlandského cementu [27], [28].

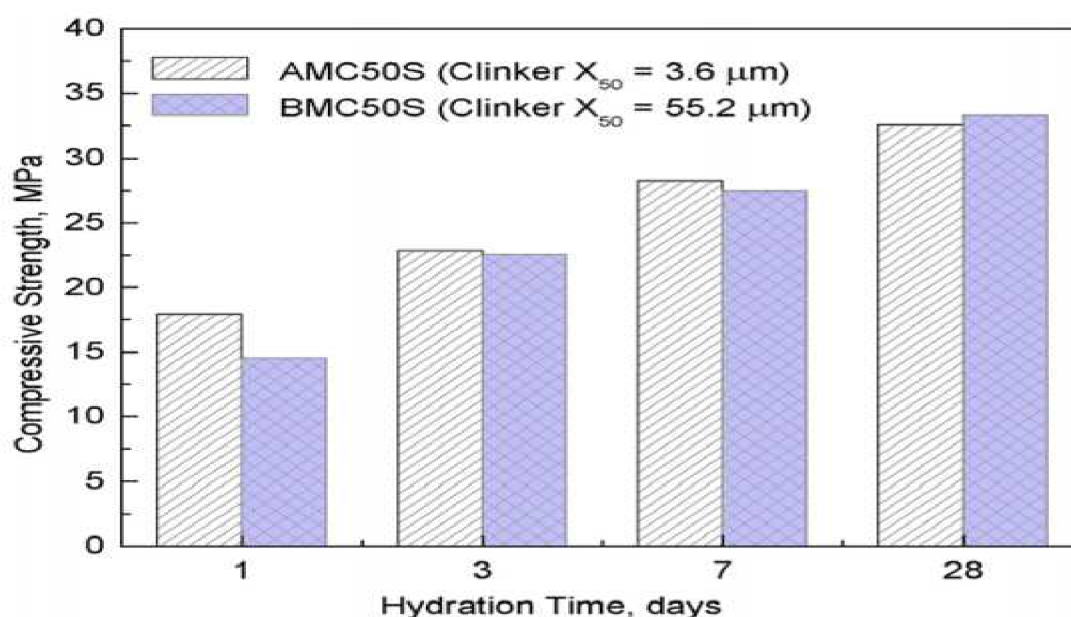
2.3.5.2 Mechanická aktivace vysokopecní granulované strusky

Mechanická aktivace se provádí pomocí bubnových nebo vibračních mlýnů. Jedním z hlavních faktorů ovlivňující velikost zrn je množství a velikost mlecích těles. Dále také doba mletí a rychlost otáček mlýna. Výsledkem vhodné volby těchto faktorů je docílení vyššího měrného povrchu strusky. Tyto kroky vedou ke zvýšení reaktivity vysokopecní granulované strusky a následného zkrácení doby pro dosažení prvotních pevností při reakci s portlandským cementem. Takto namletá vysokopecní granulovaná struska se označuje jako GBFS (Granulated blast furnace slag).

Vzhledem ke skelnému charakteru částic strusky, je potřebná energie pro vynaložení k jeho jemnozrnnému pomletí větší než u slínku. Při zkoumání vhodnosti jednotlivých mlýnů byly vyhodnoceny, jako nejlepší mlýny kde kromě mletí dochází k intenzivnímu míchání mlecího média. Můžeme sem zařadit roztírací mlýny, míchací

kulové mlýny, perlové míchací mlýny. Na rozdíl od klasických kulových mlýnů jsou tyto mlýny vybaveny vysokorychlostním rotorem pro míchání mlecího média. Mlecí tělesa jsou podstatně menší, ale zabírají větší objem. Dále je také docíleno vysoké rychlosti míchání (někdy až tisíce otáček za minutu). Tím je zajištěna vysoká účinnost.

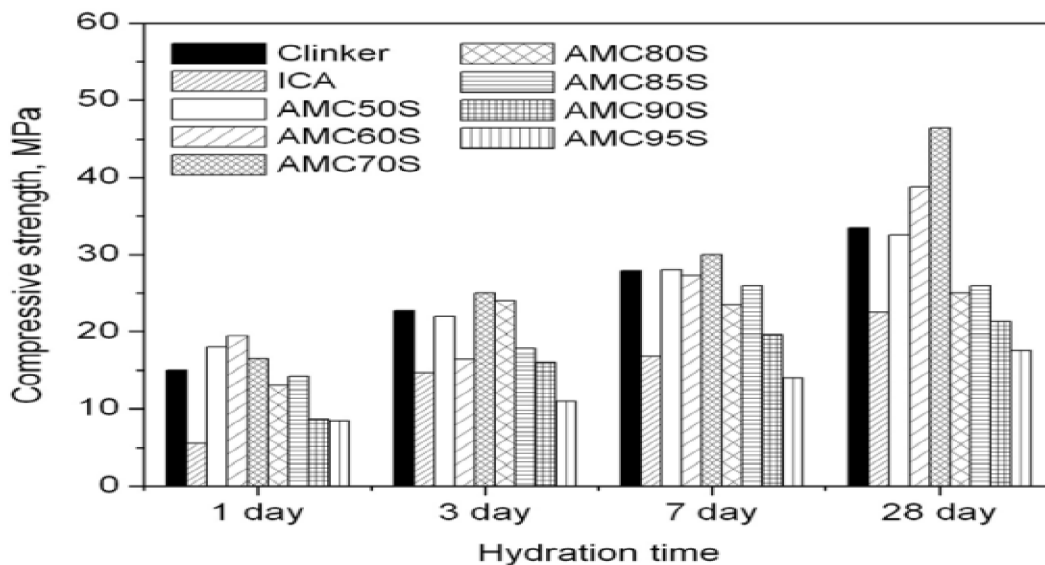
Jako ideální velikost středního zrna strusky po namletí se jeví cca 55 μm . Tato velikost je podmíněna dobou, rychlostí mletí a velikostí mlecích těles. Při nižší velikosti středního zrna kolem 4 μm se výsledné pevnosti v tlaku strusko cementové malty příliš neliší v závislosti na vynaložené nákladě na potřebnou délku mletí na dosažení menšího velikosti zrna (Obr. 7) [30]. Kde AMC, BMC je označení pro jemně mletou vysokopecní granulovanou strusku a číslo XS je množství v % náhrady strusky za portlandský cement.



Obrázek 7. Změna pevnosti v tlaku, struskového cementu na době hydratace pro AMC50S a BMC50S při odlišné velikosti zrna [30].

Výsledné pevnosti ovšem záleží na množství nahrazeného portlandského cementu. S rostoucím množstvím strusky v cementu dochází k poklesu počátečních pevností (Obr. 8). Zde můžeme vidět porovnání náhrady jemně mleté granulované vysokopecní strusky (AMCXS) o střední velikosti zrna 20 μm za portlandský cement s komerčně prodávaným strusko portlandským cementem o obsahu 40 % (ICA) vysokopecní granulované strusky [30].

Bylo prokázáno, že při mletí pod velikost zrna 5 μm došlo ke kompletní hydrataci zrna za dobu 28 dní, i bez pomoci aktivace chemické nebo za pomoci slínku. Dále při pomletí na střední velikost zrna 20 μm lze nahradit v množství 85 % namísto 40 % klasické strusky v cementu, aniž by došlo k poklesu pevností [30].



Obrázek 8. Změna pevnosti v tlaku s časem hydratace pro AMCXS vzorků ($x = 50 - 95$ % aktivní strusky) a ICA (40 % strusky) [30].

V obecném měřítku lze tyto výsledky akceptovat. Je potřeba klást důraz za jakých podmínek a teplot vznikla daná struska. Dále také sledovat její fyzikálně chemický charakter, jak obsah skelné fáze, chemické složení a odtud vyplývající zásaditost, která je jednou z podmínek. Nemalou roli hraje i její aktivace způsobená portlandským cementem a sádrou. Volby aktivace jak chemickou cestou, tedy za pomoci alkalických aktivátorů, tak mechanickou cestou, snížením velikosti zrn, záleží na volbě a vhodnosti použití.

2.3.6 Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty podle ČSN EN15167-1: Definice, specifikace a kritéria shody.

Na mletou granulovanou vysokopecní granulovanou strusku jsou kladeny následující požadavky:

Jemnost

Měrný povrch stanovený permeabilní metodou (Blaine) uvedenou v EN 196-6, nesmí být nižší než $275 \text{ m}^2/\text{kg}$ [31].

Index účinnosti

Musí být vyjádřen v procentech jako poměr pevností směsi 50% (hmotnosti) mleté vysokopecní granulované strusky a 50 % (hmotnosti) zkušebního cementu k pevnosti zkušebního cementu samostatného. Pevnost v tlaku se stanoví podle EN 196-1 a vodní součinitel pro vzorky je 0,50. Index účinnosti po 7 dnech nesmí být menší než 45 % a po 28 dnech menší než 70 % [31].

Počátek doba tuhnutí

Stanovený podle EN 197-1, kdy počátek tuhnutí směsi s 50% mleté granulované vysokopecní strusky a 50 % zkušebního cementu nesmí být delší než dvojnásobek počátku tuhnutí samostatného zkušebního cementu [31].

Vlastnosti	Požadavky
Obsah oxidu hořečnatého	$\leq 18 \%$
Obsah sulfidů	$\leq 2,0 \%$
Obsah síranů	$\leq 2,5 \%$
Ztráta žíháním, upravená na oxidaci sulfidů	$\leq 3,0 \%$
Obsah chloridů	$\leq 0,10 \%$
Obsah vlhkosti	$\leq 1,0 \%$

Tabulka 4. Požadavky na chemické vlastnosti mleté vysokopecní granulované strusky [31].

2.4 Popílky (fly ash)

Jedná se o vedlejší nerostný produkt tepelných elektráren při spalování zpravidla jemně mletých tuhých paliv, především uhlí hnědého (80 % v ČR), černého, lignitu popřípadě antracitu a spolu spalovaných materiálů (dřevěné třísky, masokostní moučka, papírový odpad, ropný koks aj.). Zachycení a usazování převážně jemných kulových, plných nebo dutých částic probíhá v tkaninových, elektrostatických filtrech, cyklónových odlučovačích. Na výsledný produkt v našem případě elektrárenský popílek může mít vliv mnoho faktorů jak způsob spalování, typ a množství spalovaného uhlí (černé, hnědé), typ spolu spalovaného materiálu, způsob spalování, dokonalost spalování, teplota a jiné. Odtud vycházejí proměnlivé chemické, mineralogické a granulometrické složení. Výsledkem jsou pak různé druhy popílků, jako křemičité, křemičito-vápenaté, vápenaté (u nás se vyskytují pouze křemičité), které mají pucolánové nebo latentně hydraulické vlastnosti. Černouhelné

popílků jsou díky menší proměnlivosti vlastností vhodnější jako příměs do betonu, než hnědouhelné.

Popílků mohou být řazeny do mnoha skupin, nejužívanější je řazení podle ASTM (American Society for Testing and Materials), kde rozeznáváme dvě základní třídy popílků, třídu C a třídu F. Tyto třídy se liší obsahem podílů oxidů SiO_2 (25–60 %), Al_2O_3 (10–30 %), Fe_2O_3 (5–25 %), CaO (1–35 %). Do třídy F obvykle řadíme popílků vzniklé spalováním černého uhlí nebo antracitu při majoritním zastoupení oxidů SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 více jak 70% a nízkém obsahu CaO v rozmezí 1–12 %. Vápník je zde zastoupen ve značné míře ve formě hydroxidu vápenatého, síranu vápenatého nebo ve formě sklovitých fází. Tato třída popílků bývá taktéž označována jako nízkovápenatý popílek LCFA (Low Calcium fly ash). Třída C vzniká obvykle spalováním hnědého uhlí a ligninu a obsahuje zastoupení oxidů, kde je udáváno zastoupení oxidů SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 v míře větší jak 50 % a obsah CaO v rozmezí 15–30 % [32].

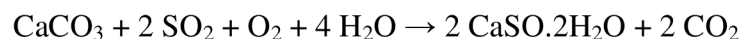
Popílků vzniklé různým druhem spalování tuhých paliv se mohou lišit z mineralogického a chemického hlediska. Z tohoto pohledu můžeme rozdělit dva typy spalování uhlí a to klasické a fluidní.

2.4.1 Popílků z fluidního spalování

Fluidní spalování můžeme obecně popsat jako oxidační reakci probíhající ve fluidní vrstvě. Úkolem fluidních kotlů je, co neefektivnější získání energie z tuhých paliv (uhlí). Spalování probíhá ve fluidní vrstvě (loží), tedy ve vznosu. Součástí paliva je drcené uhlí, spolu spalovaný materiál, rozemletý vápenec a popel. Výhodou fluidního spalování uhlí je snížení obsahu dusíku v důsledku nižší teploty (okolo $850\text{ }^{\circ}\text{C}$) spalování, tím pádem toto spalování probíhá pomaleji naopak nevýhodou je vysoký obsah síry, což má za následek potřebu odsiřování.

Popílek z fluidního spalování může být dvojího druhu a to buď popílek obsažený ve spalinách, tedy jemnější tvořící $\frac{3}{4}$. Jeho zachycení může probíhat pomocí tkaninových filtrů o účinnosti kolem 99 %, elektrostatických filtrů a velmi vysoké účinností cca 99,5 % nebo pomocí cyklónových odlučovačů cca 90 %. Zbylou $\frac{1}{4}$ tvoří hrubý ložový popel a struska o velikosti zrn v cm.

Nevýhodou fluidních popílků je odsiřování spalin. Při desulfataci kouřových plynů mokrou metodou jsou kouřové plyny propírány vápenou suspenzí za výsledného vzniku chemosádrovce.



Účinnost desulfatace mokrou metodou se pohybuje okolo 95 % a závisí na mnoha faktorech, jako je množství vápna nebo vápence v suspenzi (obvykle 25 %), jemnost mletí aj. Nevýhodou tohoto procesu je znehodnocení popílku pro další využití do malt nebo jako náhradu cementu. Takovíto fluidní popílek obsahuje zbytky anhydritu CaSO_4 II, volného CaO v množství až 15 %, vysoký obsah SO_3 , což může mít za následek vznik ettringitu, a vysokou ztrátu žháním až 15 % [24]. Takto „znečištěný“ popílek je potom obecně považován jako nevhodný do betonu, malt popřípadě jako náhrada cementu. Vysoká variabilita především chemických, ale i mineralogických a granulometrických vlastností je i u klasických popílků.

2.4.2 Popílky z klasického spalování

Jedná se o tuhé částice zachycené na odlučovačích, vzniklé spalováním tuhých paliv především černého a hnědého (v ČR 80 %) uhlí při teplotách 1400 až 1600 °C. Jako spolu spalovaný materiál může být podle ČSN EN 450-1 použit dřevěná třísky, sláma, rostlinná vlákna, masokostní moučka, městský odpad, papírový odpad, ropný koks aj. Vlivem teploty spalování, množství a jemnosti spalované suroviny a mnoha jiných faktorů je vysoká proměnlivost vlastností popílků.

Obecně částice popílku jsou malé křemičité kuličky skla o velikosti 1-100 μm a specifickém povrchu dle Blaina 200 až 300 m^2/kg . Ne vždy vzhledem k mnohokrát zmíněné variabilitě se musí jednat o kulaté částice plné mohou být i duté, průhledné nebo neprůhledné, popřípadě mít nepravidelný tvar. Měrná hmotnost se pohybuje v rozmezí 2100 až 2400 kg/m^3 a objemová hmotnost volně sypaného popílku je 550 až 900 kg/m^3 [21].

Z chemického hlediska je v popílku obsažen SiO_2 (25–60 %), Al_2O_3 (10-30 %), Fe_2O_3 (5-25 %), CaO (1-35 %), Mg , SO_3 (Tab. 5). Krystalické složky jsou zastoupeny ve větší míře v popílku ve formě vysokoteplotní modifikace SiO_2 tzv. mullitu ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), který slouží jako hlavní „identifikátor“ vysokoteplotních popílků. Dále β – křemene, SiO_2 fáze, v menší míře Gehlenit C_2AS , hydráty a oxidy železa α – Hematit (Fe_2O_3) aj. Ukazatelem reaktivity popílku je množství amorfnní fáze SiO_2 . Sklovitá fáze v popílku je obsažena z více jak z 50 %. Z hlediska reaktivity je třeba obsah amorfnní fáze v množství

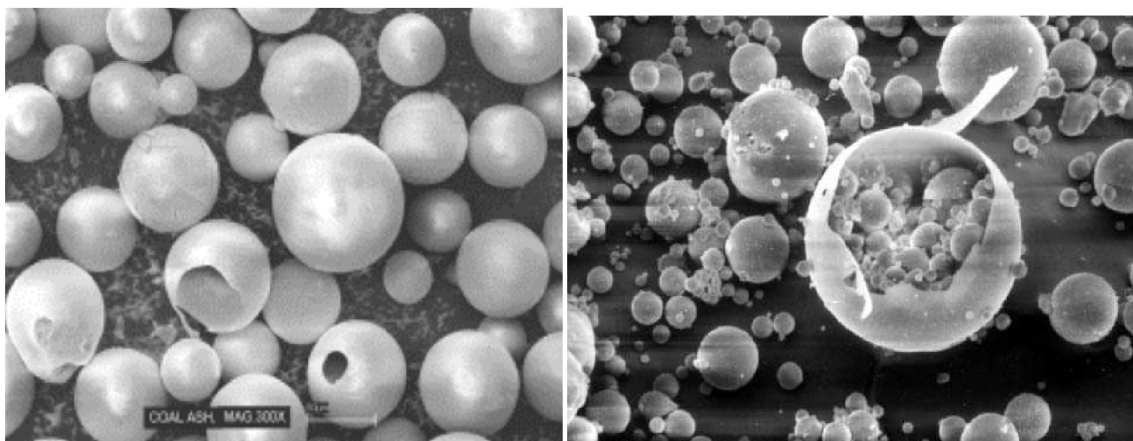
asi 90 %, zbylou část zaujímá krystalická fáze asi 10 %. Amorfni SiO_2 reaguje spolu s Ca(OH)_2 za vzniká hydratovaných křemičitanů vápenatých [33].

%	zlr.žih.	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3
Hodonín	0.7- 1.4	40-52	19-29	8-16	3-15	1-3	0.4-1.9
Handlová	1.5-5.1	50-57	22-24	9-14	3-6	1-3	0.6-1.4
Záluží	1.8- 1.9	51-56	27-30	6-8	3-6	1-2	0.1-0.6
Ervěnice	6.7-14.3	44-55	25-27	5-10	2-4	0.9-1.4	0.5-1.1
Třebovice	2.7	48	27	12	5	2	1.2
Oslavany	2.7-3.2	52	22	9	4	3	0.2-0.4

Tabulka 5. Chemické složení popílku z některých našich a slovenských elektráren [21].

Jedním z nejvýznamnějších charakterů popílku je i velikost částic zrn. Popílek má hydrofilní povrch a je velmi porézní. S klesající velikostí částic roste jejich reaktivita. Menší částice lépe reagují s Ca(OH)_2 a dochází k urychlení vzniku C-S-H. Menší částice se po ukončení spalování mnohem rychleji ochlazují což má za následek jejich poruchu a částice tak mají více amorfni charakter, tedy jsou více reaktivní [33]. Popílký jsou zachycovány na odlučovačích a jejich velikost částic, tedy zrnitost je dána typem filtru. V mechanických filtrech bývá zachycen hrubší popílek, zpravidla zrna $> 0,09$ mm obsahují více jak 20 %, sypaná hmotnost se potom pohybuje v mezích 900-1200 kg/m^3 . Modernější a v dnešní době využívanější jsou elektrostatické filtry, mívají účinnost okolo 99,5 % a zrna nad 0,09 mm jsou obsaženy v množství pod 20 %, sypaná hmotnost se potom pohybuje okolo 800 kg/m^3 [7].

V popílcích se mohou nacházet i tzv. cenosféry. Jedná se duté částice popílku o průměru 5 až 350 μm a tloušťce stěn 0,2 až 3 μm . Objemová hmotnost je 2,5 až 3,5 krát nižší než voda a to díky jejich nízké hmotnosti a velkému objemu. Vzhledem k jejich objemové hmotnosti se získávají plavením a dále se žihají na teplotu 850 $^{\circ}\text{C}$ pro odstranění přítomných spalitelných látek. Kromě cenosfér můžeme v popílku najít plerosféry. Rozdíl mezi cenosférou a plerosférou (Obr. 10) je, že dutina plerosféry obsahuje částice popílku tedy i cenosféry. Cenoféry a plerosféry řadíme do skupiny pod názvem makosféry [36].



(a)

(b)

Obrázek 9. Snímek cenosféry (a), plerosféry (b) pořízený pomocí el. mikroskopu [36].

Obsah amorfního SiO_2 ve skelné fázi, udává pucolánové vlastnosti a rozhoduje tak o použití popílků. Ty mohou být použity jako inertní příměsi při nízkém obsahu amorfního SiO_2 a za jejich pomoci můžeme dosáhnout hutnější struktury betonu, nebo zlepšení reologických vlastností čerstvého betonu. Pokud popílek má dostatek amorfního SiO_2 a dosahuje pucolánových vlastností a užívá se jako aktivní příměs do betonu.

K pucolánové reakci popílku dochází vlivem amorfního SiO_2 popřípadě Al_2O_3 obsaženém v popílku reagujícím s hydroxidem vápenatým $\text{Ca}(\text{OH})_2$ za vzniku kalciumsilikátových, kalciumaluminátových hydratačních produktů. Ukazatelem pucolánové aktivity popílku je nejenom schopnost SiO_2 vázat $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ale i rychlost této reakce. Pucolánová reakce popílků je velmi pomalá, začíná se projevovat přibližně okolo 28 dne zrání a prakticky zjištělná po 90 dnech. Kdy pevnosti s obsahem popílku převyšují hodnoty bez jeho užití [35].

2.4.3 Požadavky na popílků do betonu podle ČSN EN 450-1+A1:

Definice, specifikace a kritéria shody.

- Ztráta žíhání < 7,0 % hm. kategorie A
< 9,0 % hm. kategorie B
< 11,0 % hm. kategorie C
- Obsah chloridů < 0,10 %
- Oxid sírový < 3,5 %,
- Obsah alkálií < 5,5 %
- Limity měrné aktivity < 150 Bq.kg^{-1}

- Oxid hořečnatý < 4,0 %, pokud je popílek získán spalováním pouze práškovým uhlím je tato podmínka považována za splněnou [34].
- Volný CaO < 2,6 %, jestliže je obsah volného CaO větší jak 1 % musí být provedena zkouška na objemovou stálost [34].
- Aktivní CaO < 10,0 %
- Aktivní SiO₂ > 25 %, pokud je popílek získán spalováním pouze práškovým uhlím je tato podmínka považována za splněnou [34].
- SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ > 65%, pokud je popílek získán spalováním pouze práškovým uhlím je tato podmínka považována za splněnou [34].
- Rozpustné fosforečnany < 110 mg/kg, pokud je popílek získán spalováním pouze práškovým uhlím je tato podmínka považována za splněnou [34].
- Objemová stálost < 10,0 mm.

Jemnost

Jemnost popílku je vyjádřena v % zůstatku popílku při prosívání za mokra na síť 0,04 mm a stanovena podle EN 451-2. Dělíme jí do dvou kategorií N a S. Do kategorie N řadíme popílky, pokud je hmotnostní zůstatek 40 % ±10 %. Kategorie S pak 12 % ±10 % [34].

Index účinnosti

Jedná se o poměr (v procentech) v tlaku normalizovaných trámečků podle EN 196-1 z malty s 75 % referenčního cementu a 25 % hmotnosti popílku k pevnosti v tlaku trámečku připraveného ze 100 % referenčního cementu ve stejném stáří. Index účinnosti musí být nejméně 75 % po 28 dnech a 85 % po 90 dnech [34].

Počátek tuhnutí

Počátek tuhnutí se stanoví na cementové kaši zhotovené ze 25 % popílku a 75 % zkušební cementu a nesmí být dvakrát delší v porovnání se začátkem tuhnutí kaše zhotovené ze 100 % cementu. Pokud je popílek získán spalováním pouze práškovým uhlím je tato podmínka považována za splněnou [34].

Jako další nenormové požadavky bývá uváděno, že popílky by z technologických důvodů pro některé druhy použití měly být získávány a dodávány v suchém stavu, v důsledku porušení jejich pucolánových vlastností [21].

2.4.4 Využití elektrárenských popílků

Vzhledem k vysoké variabilitě popílku je třeba klást důraz na jejich chemické, fyzikální a mineralogické vlastnosti. Jejich využití je velmi široké.

Popílků mohou sloužit pro výrobu umělého pórového kameniva tzv. popílkového agloporitu. Kde dochází k jejich sbalkování a spékání syrových sbalků na aglomeračních rošttech nebo zpevnění za studena. Další forma využití pro tvorbu násypů silnic, speciální lehké betony, autoklávované i neatoklávované makro i mikropórovitých betonů a mnoho dalších [21].

Popílků mohou být využity jako inertní příměsi prvního typu, kde díky nízkému obsahu amorfního SiO_2 vykazují minimální nebo žádnou pucolánovou aktivitu. K tomuto zařazení slouží tzv. index účinnosti. Tyto popílků potom slouží jako filer, jehož pomocí můžeme zlepšit reologické vlastnosti čerstvého betonu, ucpat póry a zajistit tak hutnější strukturu zatvrdlého betonu. U popílků inertního typu (typ I) je limitována hranice podílu jemných částic do velikosti 0,125 mm a maximální množství do 25 % hmotnosti cementu [1].

Jako nejrozšířenější se vyskytuje použití hydraulicky aktivních popílků (typ II). V tomto ohledu ovšem nastává již mnohokrát zmíněná vysoká variabilita. Zde se naskytuje možnost výroby popílků portlandských cementů. Jako nejširší využití se jeví použití hydraulicky aktivního popílků jako příměs do betonu. Popílek obecně zlepšuje zpracovatelnost čerstvého betonu při vyšším obsahu amorfního SiO_2 roste i jeho pucolánová schopnost, která může mít za následek zvýšení dlouhodobých pevností. Přídavkem popílků dochází k reakci $\text{Ca}(\text{OH})_2$ spolu s amorfním SiO_2 obsaženým v popílků za vzniku C-S-H fáze. Dochází tedy k vázání volných vápenatých iontů a snížení náchylnosti ke karbonataci. Schopnost vázat volné vápenaté ionty pomocí amorfního SiO_2 a spolu s vodou tvořit C-S-H zvyšuje odolnost vůči síranům a následně tak minimalizuje možnou tvorbu sekundárního ettringitu. Obecně je ovšem známo že počáteční pevnosti v důsledku pomalé pucolánové reakce jsou nízké oproti běžnému betonu bez popílků. Důsledkem nízkých počátečních pevností dochází k menšímu vývinu hydratačního tepla a snížení reverzibilního smrštění. Tohoto jevu se dá využít především u masivních konstrukcí. Takto byla vystavena například přehrada Orlík.

Hydrofilní a velmi porézní povrch a velikost částic popílků zapříčiňuje zvýšení množství vody potřebné k smočení povrchu zrna popílků. Vzhledem k těmto vlastnostem je definováno maximální množství aktivního popílků vzhledem k množství cementu, kde

poměr popílek/cement $\leq 0,33$ hmotnosti. Při zvýšení množství popílku dochází k započítání k – hodnoty a úpravě výpočtu vodního součinitele podle rovnice:

$$w = \frac{m_v}{m_c + k \cdot m_p}$$

Kde m_c , m_v , m_p je hmotnost cementu, vody a příměsí, tedy popílku v kg/m^3 betonu. Koeficient k , se liší v závislosti na užití druhu cementu v betonu. Pro cement druhu CEM I, CEM II, CEM III podle EN 197-1 se používají následující hodnoty k :

CEM 32,5 $k = 0,2$

CEM 42,5 a vyšší $k = 0,4$

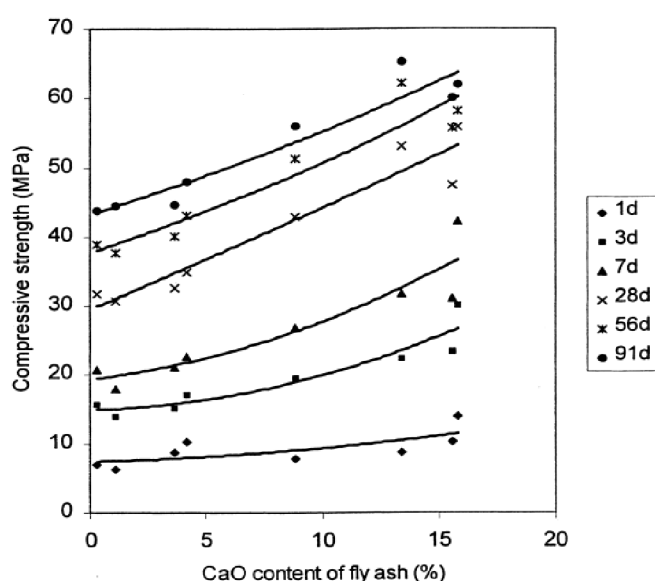
Množství cement + popílek nesmí klesnout pod minimální obsah cementu požadovaný v ČSN EN 206-1 [1].

Jako významná možnost využití popílku se jeví velkoobjemové popílkové betony HVFA (high-volume- fly- ash), kde množství popílku překračuje hranici až 50 % z celkové hmotnosti cementu. Zde taktéž vystupuje vysoká variabilita popílků. Proto mnoho prací využívá řazení podle ASTM (American Society for Testing and Materials), kde rozeznáváme dvě základní třídy popílků, třídu C a třídu F (viz. kapitola 2.4). Tyto velkoobjemové popílkové betony při využití popílků třídy F vykazují významné mechanické vlastnosti, jako trvanlivost vzhledem k zmrazování a rozmrazování, nízkou propustnost chloridových iontů, zvýšení otěruvzdornosti, popřípadě minimální významné expanzní účinky. Dále také u velkoobjemových popílků byla zjištěna snížená náchylnost proti alkalicko-křemičité reakci. Jako výhodné se také jeví míchání popílků třídy F a C. Nebezpečí vyvstává v podobě uhlíku, který váže vodu na svůj povrch a má za následek zvýšení jejího množství. Dále také uhlík snižuje množství vzduchu zvýšeného přídavkem provzdušňující přísady. Proto je třeba významná spolupráce superplastifikátoru při výrobě velkoobjemových popílkových betonů. Tyto HVFA betony dosahují vysoké soudržnosti. Při takto vysoké náhradě popílků za cement vystupuje nízký pucolánová aktivita popílků, tedy nízký nástup pevností, a potřeba jejího zvýšení pomocí aktivace a to jak mechanickou cestou tak chemickou [38].

Množství dávkování popílku do betonu jako příměsí je velice široké. Dávkovat lze podle použití až do výše okolo 70 % z hmotnosti cementu, je třeba ovšem doplnit že při velmi vysokých dávkách popílku dochází k vysokému snížení počátečních pevností. S rostoucím množstvím popílku roste i potřebné množství záměsové vody, kterou lze

účinně korigovat vhodnými superplastifikátory, v závislosti na požadovaných vlastnostech betonu. Při vyšších dávkách již vyvstává problém se samotnou pucolánovou reakcí a interakcí složek cementu a popílku s vodou a následného vzniku C-S-H fáze. Nízký vývoj počátečních pevností lze využít u masivních konstrukcí jako přehrady [44].

Vysoká variabilita hraje nejvýznamnější roly. Například popílky typu C s rostoucím obsahem CaO dosahují vyšších pevností, než popílky s nižším obsahem CaO (Obr. 10) a to již v době 28 dní, kde dochází k vyrovnání pevností v tlaku. Bylo zjištěno, že popílky s vyšším obsahem CaO také obsahují větší množství alkálií, což může mít za následek vyšší náchylnost k alkáliovému rozpínání [39].



Obrázek 10. Vliv množství CaO v popílku na pevnost velkoobjemového popílkového betonu v tlaku [38].

Velký význam popílků lze uplatnit v sektoru samozhutnitelných betonu SCC (Self Compact Concrete), popřípadě čerpatelných betonů. Kde zrna popílku vykazují efekt kuličkových ložisek. Optimální dávka popílku v těchto případech se uvádí 15 až 25 %, pro dosažení výborné zpracovatelnosti. Při vyšších dávkách dochází k zvýšení soudržnosti betonové směsi a eliminaci požadovaného efektu tečení [24].

Dávkování popílku do betonu je závislé na jeho fyzikálně chemických vlastnostech a účelu použití. S rostoucím množstvím roste i množství vody potřebné k hydrataci. Pro dosažení vyšších pevností se de cestou snížení vody aplikací superplastifikátoru. Vlivem vyššího množství. Jemnost popílku a obsah uhlíku (obvykle 2 až 12 %) zvyšuje množství

vody a také množství potřebné provzdušňovací přísady vlivem působení uhlíku, který redukuje množství vzduchu [24].

V klasických konstrukčních betonech se využívá popílek v množství 30 % z hmotnosti cementu. V takovémto množství dochází k vyrovnání pevností v tlaku po 28 dnech oproti klasickému betonu bez popílků. Ovšem u dlouhodobých pevností dochází k nárůstu tlakových pevností oproti klasickým betonům bez popílku. Přídavkem přísad upravujeme možnost použití výsledného kompozitu [38].

Využití popílků ve vysokohodnotných betonech je eliminováno jejich velmi vysokou variabilitou a nízkou reaktivitou. Pro jejich využití hovoří zejména ekonomie a snížení nákladů na výrobu betonu. Udává se, že ve vysokohodnotných betonech je dávka popílku okolo 15 %. Tato hodnota ovšem není fixní a odvíjí se především od vlastností popílků [2].

2.4.5 Zvýšení potenciálu elektrérenských popílků

Pro odstranění neduh popílku, především nízké reaktivity přistupujeme k jeho „aktivaci“. Existují dvě základní cesty k dosažení zvýšení reaktivity popílku a to buď mechanickou cestou, nebo pomocí alkalické aktivace a výsledného vzniku geopolymerního materiálu na bázi popílku. Vzhledem k nedostatečnému zvýšení reaktivity pouze jednou metodou se přistupuje ke kombinaci. Dále je také možné jít cestou kombinací příměsí. Příkladem může být nízká reaktivita popílku, která může být kompenzována přídavkem křemičitých úletu s podstatně vyšší reaktivitou.

2.4.5.1 Alkalická a mechanická aktivace popílků

V důsledku reakce mezi hlinito-křemičitany a oxidy alkalických směsí dochází ke zvýšení difuze vody a zrychlení hydratace a vzniku nových syntetických hlinito-silikátových materiálu tzv. geopolymérů [41].

Podstatou alkalické aktivace popílků je rozrušení vazeb Si-O-Si v silně alkalickém prostředí vytvořeného alkalickými aktivátory (NaOH, Na₂CO₃, KOH, sodné či draselné vodní sklo X₂O.nSiO₂ a jiné) za vzniku C-S-H a C-A-H fází. Výsledný vzniklý popílkový geopolymér dosahuje vyšších brzkých pevností oproti klasickým popílkům [40].

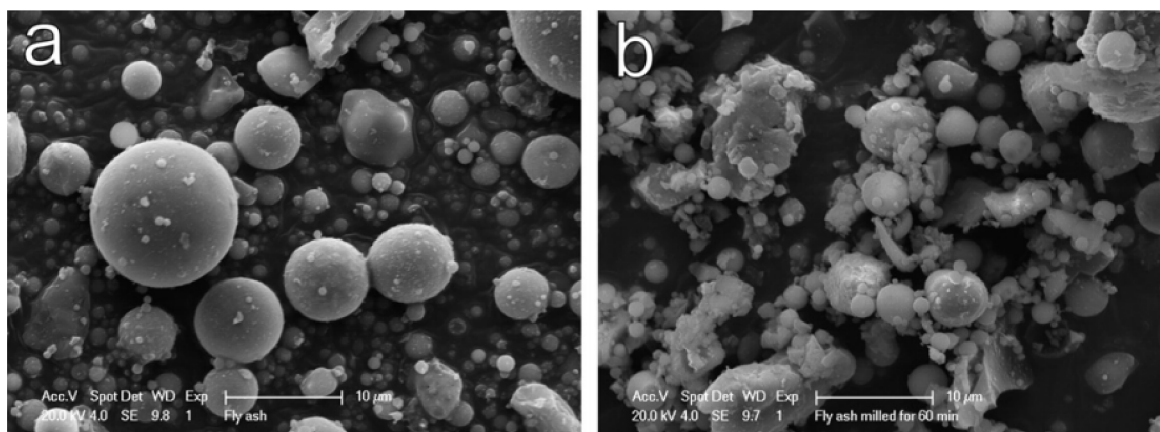
Faktorů ovlivňujících kvalitu vzniklého kompozitu jsou velmi rozsáhlé. Především se jedná velikost částic, množství skelné fáze popílků, chemickém složení popílků, pH aktivátoru, popřípadě jeho množství. Jako další faktory ovlivňující mikrostrukturu a

mechanické vlastnosti vzniklého geopolymery jsou hydrotermální podmínky a doba vytvrzování [42].

U mechanicky aktivované (mletím) strusky, může být dosaženo kompletní hydratace, bez jakékoliv chemické úpravy. Nízká reaktivita popílku vede k pomalému nastartování počátečních pevností. Z tohoto důvodu přistupujeme k mechanické aktivaci, která má za úkol snížit velikost částic zrna a docílit tak zvýšení reaktivity. Při snížení velikosti zrna roste reaktivita popílku vzhledem k zvýšení měrného povrchu. Velmi často se mechanická aktivace užívá pro následnou alkalickou aktivaci především pro vznik výsledného geopolymery. Mechanickou aktivací tedy spíše přizpůsobujeme velikost částic popílku pro vznik kopolymeru [41].

Bylo zjištěno, že vlastnosti popílků se odvíjejí od typu mlýnského zařízení a především závisí na době mletí. Například geopolymery vzniklé z popílků mletých pomocí vibračních mlýnů dosahují lepších mechanických vlastností ve srovnání s geopolymery vzniklých z popílků mletých v třecích mlýnech [41].

Je třeba si uvědomit, že drcením a mletím částic nedochází ke změně chemického složení. Bylo jisté, že vlivem mletí nedochází k zvýšení množství amorfni ani krystalické složky. Mletím dochází především k zvýšení měrného povrchu, snížení velikosti zrn, může také docházet ke změně tvaru, tvorbě aglomerátů a destrukci makrosfér (Obr. 11). Díky drcení a mletí dochází ke snížení jevu, kde kuličky popílku měly efekt „kuličkových ložisek“ a zvyšovaly tak zpracovatelnost vzniklé směsi [43].

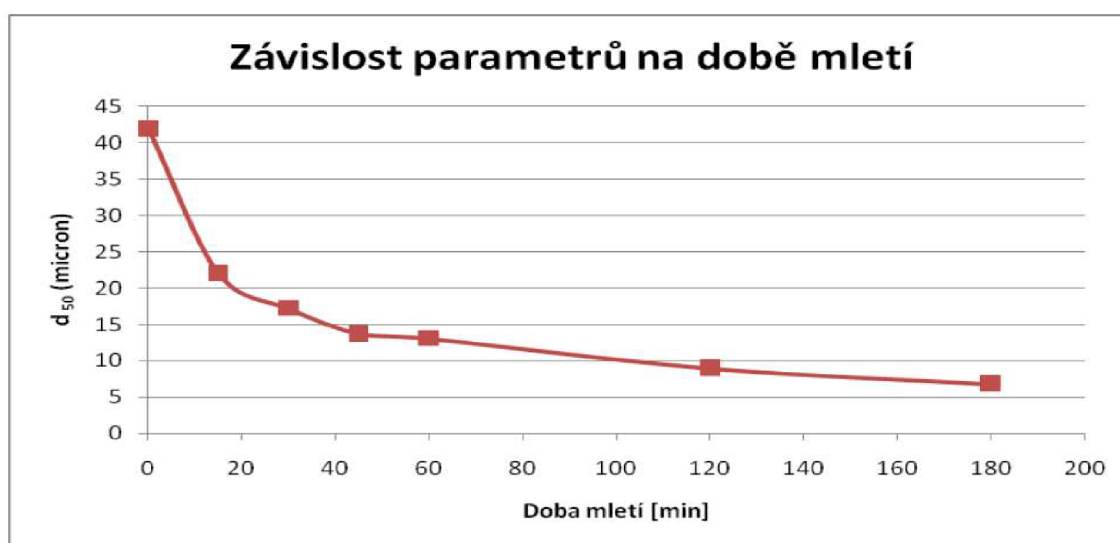


Obrázek 11. Popílků (a) neupravené, (b) mleté popílků [43]

Ve studii [43] je patrný vliv doby mletí (mechanická aktivace) popílku (Graf 1) na výslednou pevnost v tlaku směsi za použití alkalických aktivátorů. U mletých popílků je vliv aktivátorů mnohem efektivnější, kdy po 7 dnech výsledný kompozit dosahuje 70 %

koncové pevnosti a po 14 dnech 95 až 100 % konečných pevností. Na rozdíl u alkalické aktivace nemletých popílku, kde po 28 dnech dosahuje beton 70 až 80 % konečných pevností a po 7 dnech 10 % pevností. Ve srovnání tedy vychází mnohem lépe vzorky s mletým popílkiem kde je patrná rychlý průběh polymerace.

Mleté popílky jsou lépe rozpustné v alkalických aktivátorech, vedou rychlé polymeraci a vytvrzení. Tyto účinky můžou být dále vylepšeny zvýšením hydrotermálních podmínek [44], [43], [42], [41].



Graf 1. Závislost velikosti středního zrna popílku na době mletí [44].

Vzhledem k velkému množství vlivů, které mohou ovlivňovat kvalitu alkalicky aktivovaného popílku je třeba tyto vlivy zkoumat, pro možnou hromadnou aplikaci v praxi.

2.4.5.2 Tepelná úprava popílků

Tepelnou úpravou se zabývali Kulísek a Černý. V jejich práci se soustředily na snížení nespalitelných podílů obsažených v popílku (na požadovanou hodnotu 4-5 % hm.), pro jeho využití ve stavebních materiálech. Jednalo se o antracitový popílek z kvalitního antracitového černého uhlí spalovaném ve východo-slovenském regionu. Základem studie je obsah spalitelných látek v popílku reprezentovaný jako ztráta žíháním a jeho tepelná úprava s ohledem na snížení jeho množství a negativní dopad na vlastnosti popílku. Průměrné hodnoty zbytkového nedopalu z teplárny Košice (20-22 %) a elektrárny Vojany (klasické spalování 15-20 %, fluidní spalování 20-25 %) jsou velmi vysoké. Vlastnosti popílku jsou dány typem spalovaného uhlí a spalovacím zařízením [46].

Při teplotě 600-650 °C bylo podle výsledů dosaženo odstranění velké části nedopalu pod požadovanou limitní hodnotu udávanou max. 5 % zbytkového uhlíku. Posouzením vlivu teploty na granulometrii při teplotě 650 °C a 850 °C bylo dosaženo odstranění téměř veškerého uhlíku a nedocházelo ke spékání, granulometrie byla tedy zachována. U větších vzorků došlo k vyhoření obsahu uhlíku, v tomto důsledku došlo pravděpodobně ke snížení objemu částic zrn [46].

Při posouzení vlivu teploty na obsah skelné fáze bylo zjištěno, že teploty 650 °C a 850 °C nemají vliv na změnu jejího obsahu. Dále byly pomocí vysokoteplotní rtg-difrakční analýzy zjištěn vliv teploty na změnu amorfní fáze u popílku z elektrárny vojany vzniklého z klasického spalování. Vzorky byly zahřívány do teploty 750 °C, 900 °C, 1250 °C a následně chlazeny. Během teploty do 750 °C a 900 °C nedošlo ke změně obsahu amorfní fáze. Při teplotě v rozmezí 900 až 1200 °C došlo k razantnímu snížení amorfní fáze. Snížení amorfní fáze dochází při krystalizaci mullitu ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) a anortitu ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$). Lze tedy říct, že tepelná úprava popílku je bezpečná do 900 °C změna amorfní fáze nastává při teplotě žíhání na 1200 °C, kdy během chlazení se snižuje obsah amorfní fáze a mění v krystalickou. Takto žíhaný popílek ztrácí svoje pucolánové vlastnosti [46].

Závěrem lze tedy říct, že tepelnou úpravou do teploty 900 °C nedochází k úbytku skelné fáze, lze snížit obsah spalitelných látek pod hodnotu 4 %, a nedochází ke spékání zrn [46].

Další tepelnou úpravou popílku se zabýval Hela. Základem je směs vyrobená z mletého vápence a elektrárenského popílku Chvaletice v množství 15 až 30 %, a 5 % sádrovce ve formě sádry. Z homogenizované suché směsi se vyrobí pomocí zvlhčení sbalky. Sbalčky jsou vystaveny hydrotermálním podmínkám v autoklávu, kde po dobu jedné hodiny je dosaženo teploty 85 °C následuje izotermická výdrž na této teplotě po dobu pěti hodin a následné samovolné chlazení. V důsledku hydrotermální úpravy dochází k aktivaci hydraulických vlastností popílku vznikem kalciumsilikátového gelu. Sbalčky se následně suší do konstantní hmotnosti a melou do velikosti max. zrna 0,06 mm [47].

Základem bylo porovnání dvou směsí. První směs byla vyrobena výše uvedeným způsobem a druhá byla následně upravena pomocí krátkodobého temperování na teplotu 650 °C. Pomocí RTG analýzy bylo stanoveno mineralogické zastoupení. V obou vzorcích byly nalezeny stopy mullitu a křemene obsažených v popílku. Vzorek temperovaný na teplotu 650 °C obsahuje menší množství kalcitu, což můžeme přičíst k možnému počátku jeho rozkladu [47].

Z připravených směsí byly namíchány malty a vytvořeny sady zkušebních těles 40 x 40 x 160 mm. Na zkušebních vzorcích se provedlo měření pevnosti v tlaku a tahu za ohybu ve stáří vzorků 3, 7 a 28 dní. Vyšších pevnosti dosáhly vzorky vyrobené z netemperované směsi. Proto se ve výsledku jeví vhodnější jedna tepelná aktivace. V konečném důsledku dosahují upravené popílků zlepšení vlastností betonu [47].

2.5 Domílané křemičité písky

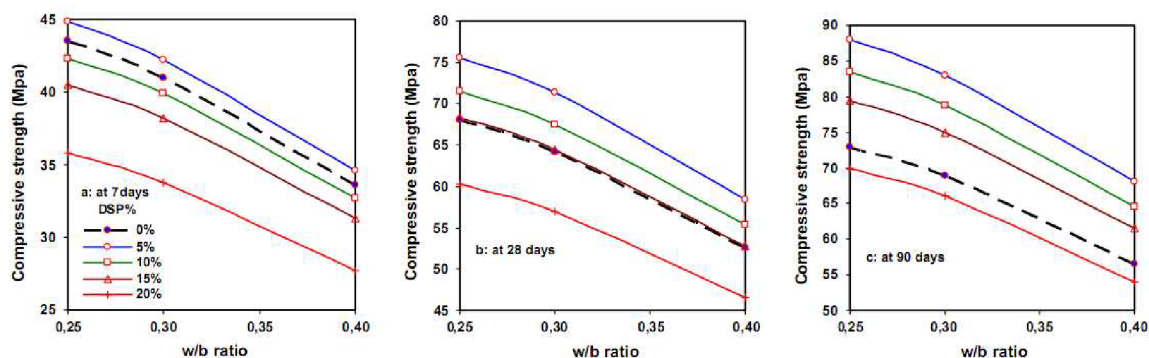
Oblast využití křemičitých písku je velmi široká, vzhledem k nízkému obsahu Fe_2O_3 , TiO_2 , Al_2O_3 a vysokému obsahu SiO_2 . Díky své čistotě je široká oblast využití především ve slévárenství dále je možná aplikace v keramickém, sklářském a neposlední řadě stavebním průmyslu (omítky, průmyslové podlahy, sanace a především pro výrobu pórobetonu). V křemičitých píscích se nachází křemen převážně v krystalické formě a tvrdost dle Mohse se pohybuje v rozmezí 6 až 7.

2.5.1 Využití:

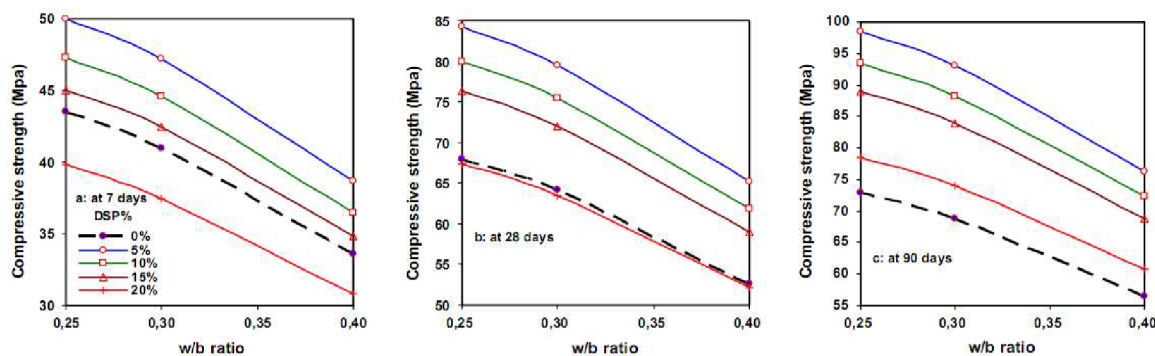
Doposud byla charakterizována pucolánová aktivita, množstvím amorfního SiO_2 spojována se vznikem skelné fáze při procesu mletí. Nízká chemická reaktivita byla připisována především struktuře materiálu. Pohledem na míru pucolánové aktivity vzhledem ke krystalické povaze materiálu je zkoumán ve studii [55]. Bylo zjištěno, že krystalický charakter křemičitého zrna není překážkou pro pucolánovou reakci. Proto křemenný prach nelze považovat za inertní materiál. S jemností částic dochází k nárůstu reaktivity. Pomocí experimentu byl definován tzv. kritický průměr částic okolo 5 μm , spojený s kritickým měrným povrchem 10 000 cm^2/g . Pod tyto kritické hodnoty narůstá pucolánová reaktivita vzhledem k velikosti částic a měrnému povrchu. Pucolánová reaktivita křemenných prachů silně závisí na velikosti částic, především pod kritickou hodnotu 5 μm . Při velikosti snížení velikosti částí na hodnotu 1 μm silně roste reaktivita.

V další studii je prokázán účinek jemnosti mletí na zvýšení reaktivity křemičitých písků. Ve studii [56] byly vyrobeny 2 směsi cementových malt s náhradou cementu 5, 10, 15 a 20 % jemně mletým křemičtým pískem. Křemenný písek byl pomlet na měrný povrch 3000 a 4000 cm^2/g . Při stanovení pevnosti v tlaku (v závislosti na vodním součiniteli graf 2 a 3) malt byl prokázán účinek jemnosti mletí na zvýšenou reaktivitu křemenného písku. Došlo k zvýšení reaktivity a výslednému vzniku pevnější struktury C-S-H fáze. S rostoucí jemností částic je možná vyšší náhrada cementu a dosažení vyšší

pevností již v brzkých obdobích zrání, převyšující i cementovou maltu bez použití náhrady cementu.



Graf 2. Změna pevnosti v tlaku v závislosti na čase a vodním součiniteli při jemnosti mletí 3000 cm²/g [56].



Graf 3. Změna pevnosti v tlaku v závislosti na čase a vodním součiniteli při jemnosti mletí 4000 cm²/g [56].

Jemnost mletí a výsledná pevnost malt se především projevuje v dlouhodobém měřítku, což je zřejmě výsledkem pomalého prorůstání krystalů a vzniku C-S.H fází. Jemnost mletí má v neposlední řadě vliv na velikost pórů. Dochází ke snížení počtu velkých pórů a zvýšení množství menších pórů. Déle dochází k nepatrnému snížení poptávky po vodě, kdy jemné částice vyplní mezikrystalový prostor [56].

V další studii byl zkoumán vliv křemenného prachu (velikost částic byly z 85 % pod 32 μm) jako náhrada cementu v množství 5, 10, 15 a 20 % na odolnost vůči vyšším teplotám 200, 400, 600, 800 a 1000 °C. Byly vytvořeny cementové pasty a z nich zkušební vzorky s uvedenou výší náhrady cementu, tyto vzorky byly podrobeny teplotnímu namáhání po dobu dvou hodin. Na vzorcích byly provedeny tlakové pevnosti po teplotním namáhání. Z výsledků je patrná zvýšená odolnost vzorků s náhradou cementu oproti

vzorkům bez náhrady. Tato zvýšená odolnost je připisována dvěma faktorům. Za první je považován vznik hutnější struktury a za druhý je považován snížení obsahu $\text{Ca}(\text{OH})_2$ [57].

Jemně mleté křemičité písky vhodné granulometrie se díky zvýšení jejich reaktivity dobře jeví v oblasti náhrady cementu, snížení emisí CO_2 , a dále nákladů na výrobu výsledného kompozitu. Křemen má vlastnost poměrně vysoké specifické adsorpce 0,0362 γ -záření, proto je možná jeho aplikace v místech se zvýšeným výskytem záření. Příkladem může být užití jako mikrovýplň v těžkých betonech. Další možnost aplikace je v oblasti samozhutnitelných betonů, tzv. SCC (Self Compact Concrete), kde se využívá jako mikroplnivo [24].

2.6 Metakaolín

Na rozdíl od popílků, Si-úletu či strusky kde tyto suroviny vznikají jako vedlejší produkt se metakaolín vyrábí záměrně kalcinací, kaolínu ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) nebo kaolinitických jílu při teplotě 600 až 800 $^{\circ}\text{C}$. Při této teplotě dochází k dehydroxilaci (odstranění strukturální vody) rozrušení struktury a vzniku nové fáze s vysokou reaktivitou tzv. metakaolínu $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$. Dehydroxilace začíná při teplotě 450 $^{\circ}\text{C}$ při této teplotě je udávána míra dehydroxilace z 18 %. Nejvýznamnější stádium nastává v rozmezí 450 až 570 $^{\circ}\text{C}$, zde už míra dehydroxilace dosahuje 95%. Konačná dehydroxilace nastává při teplotách 570 až 700 $^{\circ}\text{C}$, zde už je kaolinit plně dehydroxilován. Z chemického hlediska je tvořen převážně složkami SiO_2 a Al_2O_3 a doprovodnými Fe_2O_3 , TiO_2 , K_2O , CaO , MgO a Na_2O . Metakaolín je pucolán a díky tomu reaguje $\text{Ca}(\text{OH})_2$ vzniklého z hydratace portlandského cementu za tvorby hydratačních produktů C-S-H spolu s hydratovanými kalcium alumináty a silikáty C_2ASH_8 . Reaktivita metakaolínu a vznik následných hydratačních produktů závisí na podmínkách výroby a kvality vstupní suroviny [48].

2.6.1 Využití

Bílá barva metakaolínu způsobuje světlé zbarvení betonu, odtud plyne možná aplikace v oblasti architektonických betonů. Díky tomu že se nejedná o druhotnou surovinu je možná modifikace podle účelů potřeby a dosažení charakteristických vlastností v požadovaném směru. Měrný povrch se pohybuje v rozmezí 2000 až 20 000 m^2/kg . České lupkové závody a.s. nabízí metakaolín pod obchodním názvem Mefisto se střední velikostí částic (D50) 3 až 5 μm . Díky jeho vysokému měrnému povrchu a malému průměru zrna je metakaolín schopen vyplnit mezery mezi cementovými zrny a vytvořit tak kompaktní strukturu cementového kamene. V tomto důsledku dochází ke snížení propustnosti vlivem

snížení velikosti pórů betonu a zvýšení odolnosti vůči chloridům a síranům. Metakaolín může ovlivnit reologické vlastnosti především snížit krvácení a rozměšování. Dále jeho přidavkem dochází k potlačení alkalicko-křemičité reakce. Snížení výkvětovnosti v závislosti na použitém plastifikátoru. Metakaolín se využívá i jako náhrada mikrosiliky. Obvyklé dávkování se uvádí do 20 až 25 % (v mnoha studiích se provádí náhrada do 15 %), kdy dochází k zvýšení pevností v tlaku to je ovšem podmíněno korekcí vodního součinitele pomocí vhodného superplastifikátoru. K zvýšení pevností v tahu za ohybu dochází přidavkem metakaolínu jen nepatrně [24].

Vzhledem k možné náhradě Si-úletu metakaolínem je oblast využití podobná a to do samozhutnitelných betonu (Self Compacting Concrete – SCC), nebo do betonů vystavených agresivnímu prostředí, kde chemická odolnost vzniklého C-S-H spolu s hydratovanými kalcium alumináty a silikáty C_2ASH_8 je vyšší než slabší $Ca(OH)_2$. Metakaolín nijak neovlivňuje celulózová, polypropylenová a skelná vlákna. Zde se tedy rýsuje další oblast využití a to do vláknobetonů.

Ve studii [49] je zkoumán vliv metakaolínu na cementovou maltu. Portlandská cement je zde nahrazen metakaolínem z části 5, 10 a 15 % hmotnostní. Jsou využity 3 stejné druhy metakaolínu (Mefisto K05) lišící se pouze dobou nákupu (srpen, listopad 2005 a únor 2006), která se zřejmě vlivem výroby podepsala na velikosti částic. Dále je zde stanovena na zkušebních trámečcích pevnost v tlaku a tahu za ohybu ve stáří vzorku 2,7,14,28 a 90 dní. Z výsledků je patrné, že velikost částic a množství metakaolínu má zásadní vliv na výslednou pevnost v tlaku a to jak v brzkých tak i konečných pevnostech. Při 5 % náhradě má zásadní vliv velikost částic a to jak v raném období 2 a 7 dní, tak i v průběhu (14, 28 až 90 dní). Dále byla zkoumána pevnost v tahu za ohybu. Z výsledku lze konstatovat, že nárůst pevností v tahu za ohybu se nijak výrazně neliší od použité bez metakaolínu. Závěrem lze tedy říct, že s klesající velikosti částic roste reaktivita metakaolínu a výsledná pevnost v tlaku zkušební malty se zvyšuje spolu s množstvím přidaného metakaolínu. Pevnost v tahu za ohybu se nijak výrazně neliší od referenčního vzorku bez metakaolínu.

2.6.2 Zvýšení potenciálu kaolínu a metakaolínu

Samotná tepelná úprava, kalcinace kaolínu a kaolinitických jílu za výsledného produktu metakaolínu se dá nazvat jeho aktivace. Kdy získáváme již výsledný produkt požadovaných vlastností.

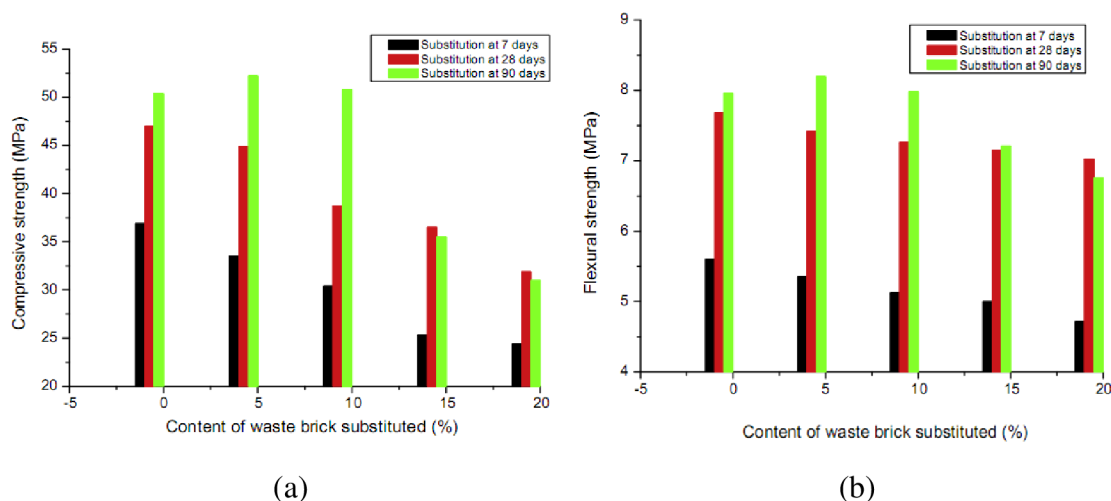
Jako další úprava se jeví alkalická aktivace metakaolínu. Zde už se ovšem dostáváme do rozsáhlé oblasti geopolymérů. Jednotlivé podmínky polymerizace jsou podmíněny mnoha faktory a zkoumány v mnoha oblastech. Obecný předpoklad je, že geopolymery by mohli částečně nahradit cement. Pro hovoří nižší energetická náročnost a také nižší zatížení ovzduší CO₂.

2.7 Jemně mletý cihlářský střep

Jedná se o odpad vzniklý výpalem jílu a jílových zemin na požadovanou teplotu. Při kalcinaci na požadovanou teplotu dochází rozkladu jílových a nejílových minerálů modifikačním přeměnám a vzniku nových fází. Pro možné využití v jako pucolán je důležitý především vznik amorfních fází oxidu křemičitého a hlinitého. Velký vliv na vznik těchto amorfních oxidů má kvalita vstupní suroviny a teplota kalcinace. Následnou úpravou (v našem případě mechanickou) dochází ke vzniku umělého pucolánu, který má schopnost reagovat s Ca(OH)₂ vzniklým hydratací cementu za vzniku nových hydratačních produktů.

2.7.1 Využití

Ve studii [53] byl zkoumán vliv náhrady cementu jemně mletým cihlářským střepem. Byly vyrobeny vzorky z cementové malty s náhradou 0, 5, 10, 15 a 20 % cementu cihelným střepem a konstantním množstvím sádry v množství 5 %. Z poznatků vyplívá, že při mletí cementu spolu s cihelným střepem dochází ke zkrácení doby mletí (ne nijak významně) s rostoucím obsahem cihelné drti. Specifická hmot s množstvím náhrady klesá z důvodů nízké hustoty částic cihelné drtě. Nízká hustota a tvrdost cihelné drti usnadňuje a zkracuje dobu mletí. S rostoucím množstvím cihelné drtě roste množství potřebné vody k udržení stejné konzistence. Dále také dochází k snížení počátku a konce doby tuhnutí s rostoucím množstvím cihelné drti. Tento jev lze vysvětlit snížením množstvím cementu a konstantní dávkou sádry a vysokou absorpcí způsobenou zvýšeným množstvím cihelné drtě. Vlivem zvýšeného množství vody k udržení stejné konzistence dochází s rostoucí náhradou ke zvýšení smrštění. Z malty s náhradou cihelné drtě za cement byly vyrobeny zkušební vzorky rozměru 40 x 40 x 160 mm. Na těchto vzorcích byla měřena pevnost v tlaku a tahu za ohybu (Graf 4) po době 7, 28 a 90 dní. Z naměřených hodnot je patrný nárůst dlouhodobých (90 denní) pevností při náhradě do 10 %. U pevností 7 a 28 denních je tento trend klesající při jakékoliv náhradě [53].



Graf 4. Vliv množství náhrady cihelné drtě za cement, pevnosti v tlaku (a), pevnost v tahu za ohybu (b)[53].

Tento trend může být způsoben snížením poměru CaO/SiO_2 kde s rostoucí náhradou cementu dochází k poklesu CaO a nárůstu SiO_2 . Poměr CaO/SiO_2 při náhradě 5 a 10 % keramické drtě činí 2.13 a 1.95 při 15 a 20 % náhradě 1.81 a 1.63. Poměr zastoupení CaO/SiO_2 bez náhrady cementu je roven 2.85 [53].

S rostoucím množstvím náhrady keramické drti za portlandský cement dochází k poklesu hydratačního tepla vyrobeného směsného pojiva. Uvádí se, že množství náhrady cementu keramickou drtí nad 20 % nedochází k zapojení značné části do hydratačního procesu a tato část se chová jako plnivo [54].

Obecně bychom mohli říct, že aktivita keramického střepu záleží na jemnosti jeho mletí odvíjející se od délky mletí a mlecího zařízení, chemickém složení, tedy především na zastoupení SiO_2 . Zastoupení amorfního SiO_2 záleží na vstupní surovině (jílu a jílových zemin) potřebné na výrobu samotné keramiky. Teplota kalcinace bude také nemálo důležitá. Je třeba si uvědomit, že keramický střep je odpadní produkt keramické výroby a jeho kvalita je ovlivněna účelem využití. Proto je třeba se zamyslet na možností jeho využití v konkrétním případě, popřípadě je-li možná jeho kombinace s jinými přísadami (popílek, struska, Si-úlet aj.) za účelem odstranění nežádoucích jevů a zvýšení jeho potenciálu.

2.8 Jemně mletý vápenec

Vápenec CaCO_3 se vyskytuje ve třech základních polymorfních modifikacích a to jako Kalcit, který je hlavním představitelem. Kalcit krystalizuje v soustavě romboedrické a je obsažen ve vápenci. Další polymorfní modifikace jsou Aragonit a Vaterit, který je nestabilní a přechází na Kalcit nebo Aragonit.

Mikromletý vápenec se připravuje drcením a mletím vápence (uhličitanu vápenatého CaCO_3). Vápenec je převážně složen z uhličitanu vápenatého CaCO_3 s doprovodnými složkami jako MgCO_3 , SiO_2 aj.

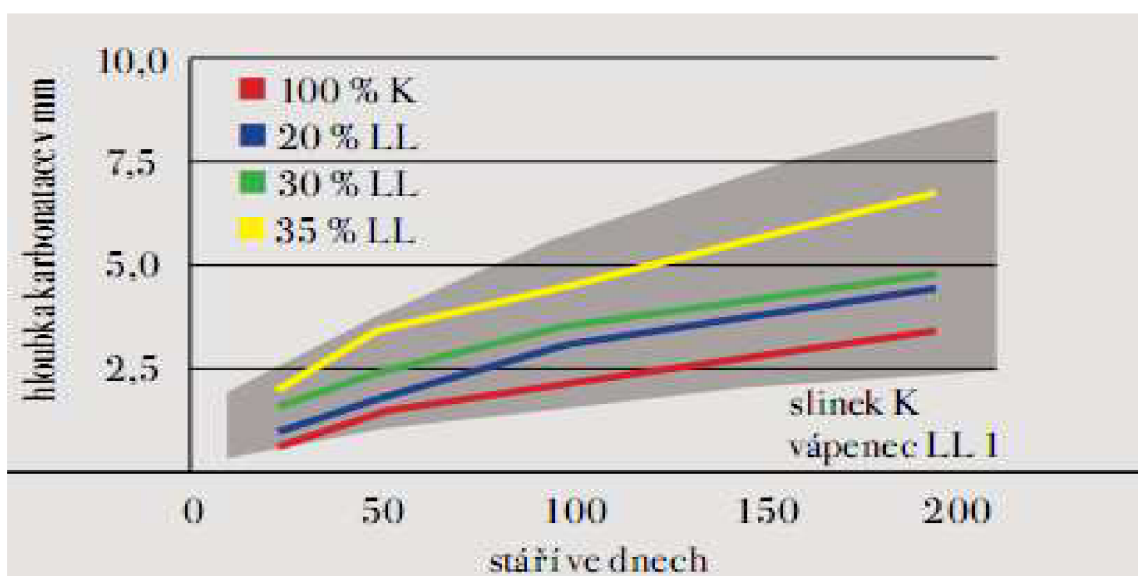
Bylo prokázáno, že přidavkem mletého vápence dochází k urychlení hydratace C_3S a C_3A a v tomto důsledku dochází nárůstu počátečních pevností betonu. Další výhodou vápence je zvýšení konzistence betonu za stejného množství vody a to s rostoucí jemností mletí vápence. Proto lze snížit množství plastifikátoru a následně tak dosáhnout vyšších pevností [50].

Vliv mikromletého vápence na tvrdnutí betonu může mít dva efekty, které můžeme nazvat urychlující a pojící. Urychlující efekt vlivem tvorby zárodků zvyšuje pravděpodobnost sražení a spojení částic rozpuštěných v C-S-H. Urychlující efekt je patrný v počátečních stádiích tvrdnutí a po 28 dnech bývá zanedbatelný. Druhý tzv. pojící efekt může vlivem velkého množství hlinitanové fáze v cementu spolu s mikromletým vápencem za vzniku hlinitokřemičitanů tvořit pojící schopnost. Tyto vlastnosti byly prokázány ve studii [51]. Dále také ze studie vyplývá, že při stejné jemnosti částic mikromletého vápence je hlavním ukazatelem počátečních pevností množství alitu (C_3A). Při stejné jemnosti mletí mikromletého vápence dosáhly pasta (při náhradě 5 % mikromletého vápence za cement) s cementem o nižším obsahu alitu (C_3A) vyšších počátečních pevností. Při nepatrném zvýšení mletí se počáteční pevnosti dále zvyšují. Závěrem z této studie vyplývá, že hlavní vliv na počáteční nárůst pevností má množství alitu (C_3A) v cementu a jemnost mletí vápence který podporuje hydrataci alitu (C_3A). Proto je třeba konstatovat, že vápenec se nechová jako inertní materiál ale musí být považován za aktivní část hydratačního systému.

2.8.1 Využití

Mikromletý vápenc se především jako minerální plnivo a jeho vlastnosti záleží především na tvaru, zrnitosti a nasákavosti částic. Uvádí se, že vhodná zrnitost má být pod 125 mm a jako ideální se jeví 70 % propad pod síto o velikosti otvorů 63 μm [24].

Jako další oblast využití je do portlandských cementů směsných CEM II, kde se jeví jako možná alternativní náhrada se sníženými náklady a snížením emisí CO_2 oproti výrobě slínku. Zde ovšem je potřeba zvážit veškerá kritéria a oblast použití portlandských cementů směsných s náhradou vápence. Betony vyrobené ze směsných cementů s přídatkem vápence obecně snižují odolnost vůči agresivnímu prostředí. Zvyšováním obsahu vápence v cementu dochází ke zvýšení hloubky karbonatace (Graf 5).



Graf 5. Srovnání hloubky karbonatace u betonu vyrobeného z portlandského cementu a z portlandského cementu s vápencem při náhradě za cement v množství 20, 30 a 35 % [52].

V oblasti využití vápence v cementech do 35 % se udává neomezené použití v oblasti vlivu prostředí XC, tedy kde hrozí koroze výztuže vlivem karbonatace [52].

3 PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 Náhrada cementu

Na základě konzultací se školitelem bakalářské práce, bylo navrženo 10 receptur betonové směsi, kde byl CEM I 42,5 R nahrazen příměsí v množství 10 a 20 %, s výjimkou mikrosiliky FSZ Istebné SR, kde nebyl dostatek materiálu pro 20 %-ní náhradu. Betonové směsi byly srovnávány s referenční směsí betonu obsahující pouze CEM I 42,5 R. Dále byla stanovena objemová hmotnost betonu, stanovení zpracovatelnosti čerstvého betonu a pevnost v tlaku po 7, 28 a 60 dnech.

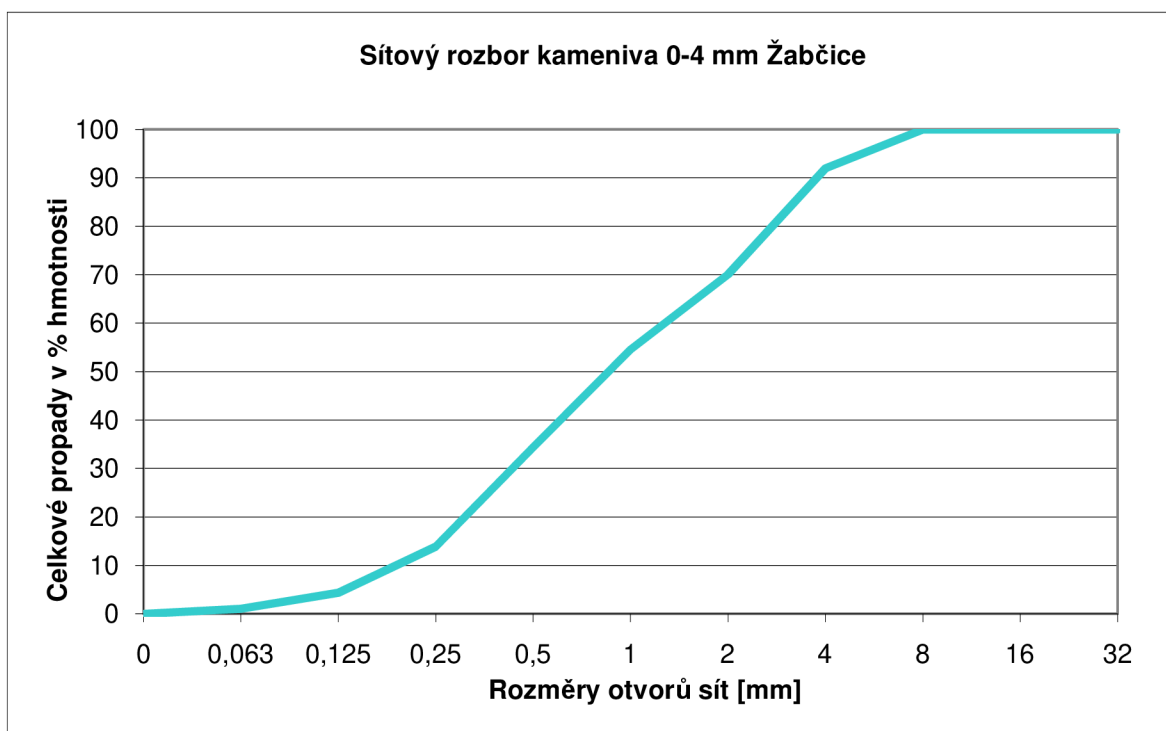
3.2 Použité vstupní suroviny

Cement

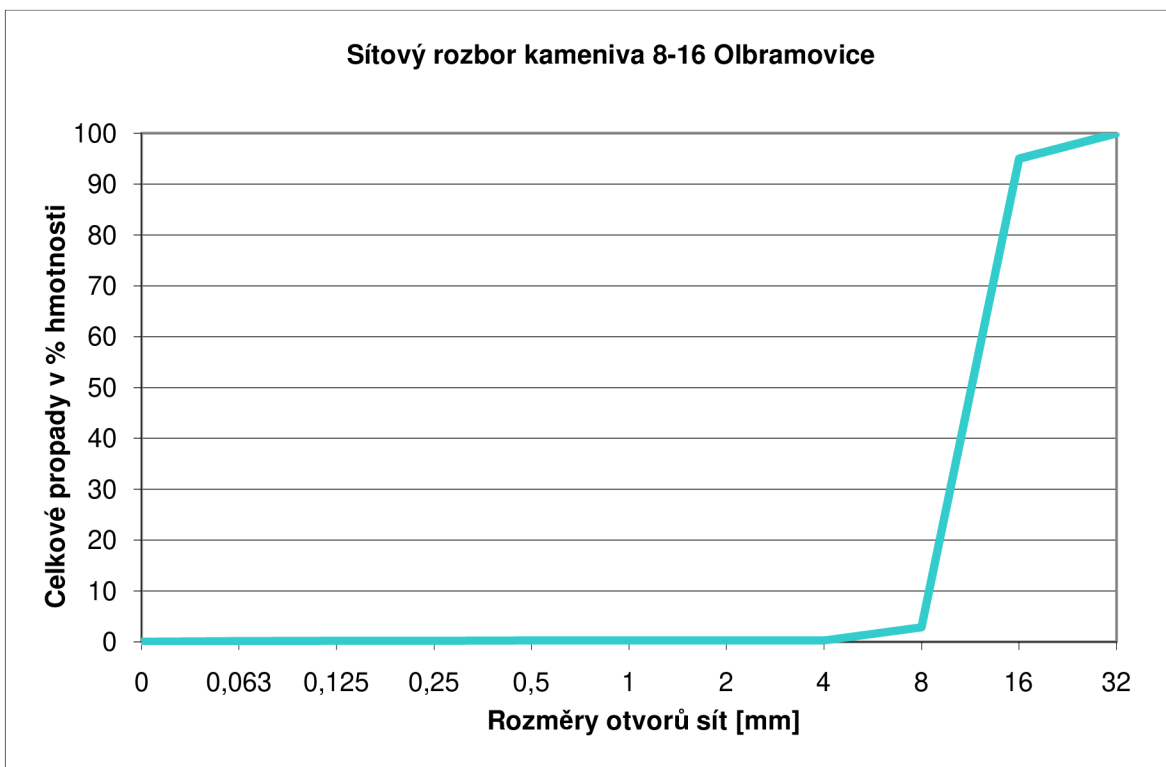
Pro všechny receptury byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R s rychlým nárůstem počátečních pevností z produkce Českomoravský cement a.s., závod Mokrý.

Kamenivo

Na výrobu zkušebních vzorků byly použity 2 různé frakce kameniva: 0 – 4 přírodní těžené kamenivo z pískovny Žabčice a hrubá frakce 8 – 16 přírodní drcené kamenivo z lomu Olbramovice. Křivky zrnitosti jednotlivých frakcí jsou uvedeny v grafech č. 6 – 7.



Graf 6. Křivka zrnitosti kameniva frakce 0 – 4 mm Žabčice.



Graf 7. Křivka zrnitosti kameniva frakce 8 – 16 mm Olbramovice.

Záměšová voda

Na všechny receptury byla použita pitná voda z vodovodního městského řádu.

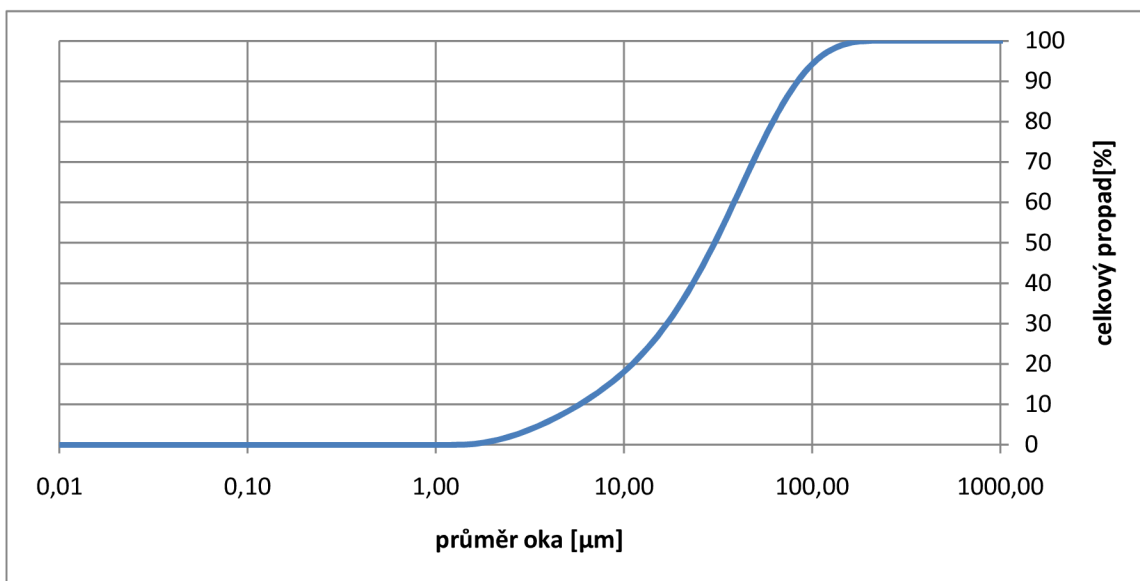
Přísady

Jako superplastifikační přísada byly použity Dynamon SX 14 z firmy MAPEI spol. s.r.o., na bázi nesířených akrylových polymerů.

3.3 Použité příměsi

Křemičitý písek MT8

Byl použit křemičitý písek značený CAS 14808-60-7 (Provodínské písky) s obsahem $\text{SiO}_2 > 98 \%$. Tento produkt obsahuje více než 10 % křemene dýchatelného, který je klasifikován jako STOT RE1. Bod tání křemičitého písku je roven 1710°C a pH 5-8. Měrný povrch dle Blaina je $2940 \text{ cm}^2/\text{g}$ a relativní hustota $2,590 \text{ g/m}^3$. Granulometrie stanovené laserem je uvedena v grafu 8. Granulometrie jemně mletého křemičitého písku se pohybuje v rozmezí 1,31 až $222 \mu\text{m}$. Částice $< 1,31 \mu\text{m}$ nebyly detekovány.



Graf 8. Granulometri jemně mletého křemičitého písku.

Mikrosilika FSZ Istebné- Sioxid

Tento Si-úlet, neboli mikrosilika je vedlejší produkt při výrobě ferossilicia, v elektrických obloukových pecích. Velikost částic se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,2 μm, 90 % pod 0,2 μm. Sypná hmotnost v neaglomerované podobě, tedy tak jak byla mikrosilika zachycena na odlučovačích se pohybuje v rozmezí 150 – 350 kg/m³. Mikrosilika SR - Sioxid může být dodávána z důvodu usnadnění přepravy v aglomerované podobě, kde dochází k zvýšení sypné hmotnosti a to na hodnotu 400 – 500 kg/m³, nebo až 550 – 650 kg/m³. Chemické složení je uvedeno v tabulce 6.

Typické		Garantované	
SiO ₂	91,00%	SiO ₂	88 - 93 %
Al ₂ O ₃	0,30%	Al ₂ O ₃	max 2 %
CaO + MgO	1,50%	CaO + MgO	max 4 %
Na ₂ O	0,50%	K ₂ O + Na ₂ O	max 4 %
K ₂ O	1,50%		
Ztráta žíháním	1,30%	Ztráta žíháním	max 3 %

Tabulka 6. Chemické složení mikrosiliky SR - Sioxid v hmotnostních % .

Mikrosilika Stachema

Tento výrobek firma Stachema prodává pod obchodním názvem Stachesil S. Mikrosilika je v práškové neaglomerované formě o sypné hmotnosti 200 – 300 kg/m³. Hustota 2200 kg/m³. Velikost částic je specifikována 100 % < 100 μm. Měrná plocha není blíže určena, technické listy udávají pouze parametr 15 000 – 35 000 cm²/g. Chemické složení je uvedeno v tabulce 7.

Parametr	Množství [%]
SiO ₂	≥ 85 %
CaO _{volný}	< 1,0 %
SO ₃	< 2,0 %
Cl ⁻	< 0,3 %
Si _{volný}	< 0,4 %
MgO	≤ 1,5 %
Al ₂ O ₃	≤ 1,0 %
Na ₂ O	cca. 0,5 %

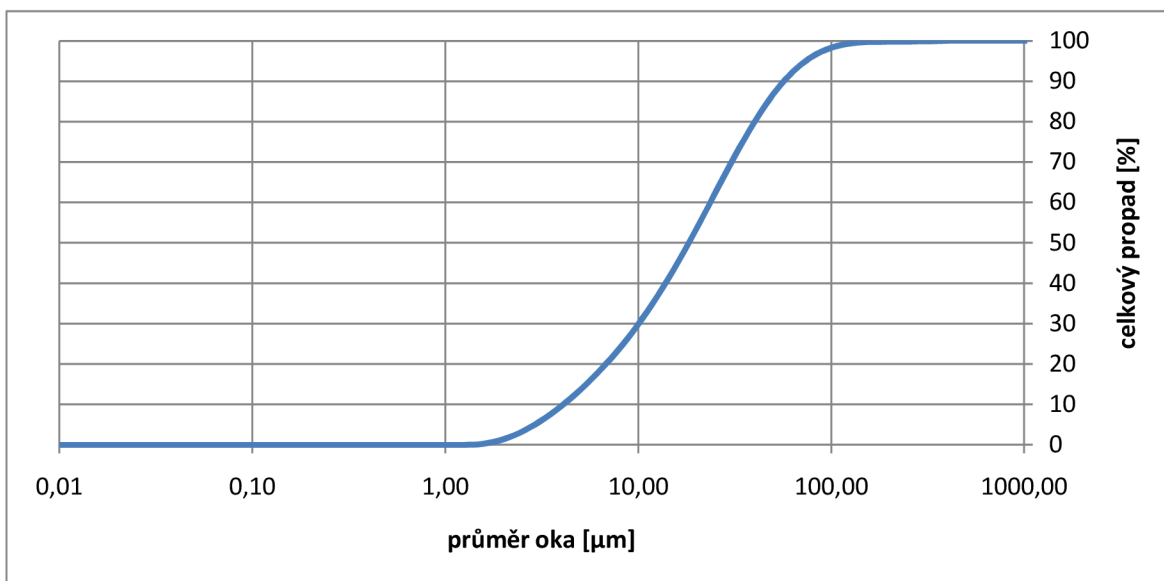
Tabulka 7. Chemické složení mikrosiliky Stachema.

Struska Cemex

Měrný povrch dle Blaina byl naměřen 4160 cm²/g a relativní hustota 3,310 g/m³. Index účinnosti po 7 dnech 47 % a po 28 dnech 86 %. Chemická analýza je uvedena v tabulce 8. Granulometrie strusky stanovené laserem je uvedena v grafu 9. Granulometrie strusky se pohybuje v rozmezí 1,31 až 198 μm. Částice < 1,31 μm nebyly detekovány.

Obsah	Předpis	Průměrné
CaO	26-45%	38,91%
SiO ₂	28-45%	39,84%
MgO	≤ 18%	10,33%
Al ₂ O ₃	6-17%	6,69%
Cl	< 0,1%	0,017%
SO ₃	≤ 2,5%	1,62%
Obsah Sulfidů	≤ 2,0%	0,60%
Ztráta žíháním	≤ 3,0%	0,32%
CaO+SiO ₂ +MgO	≥ 67,7%	89%
Bazicita (CaO+MgO)/SiO ₂	> 1%	1,24%
Sklovitá fáze	≥ 66,7%	93%
K ₂ O	-	0,75%
Na ₂ O	-	0,48%

Tabulka 8. Chemické složení strusky.



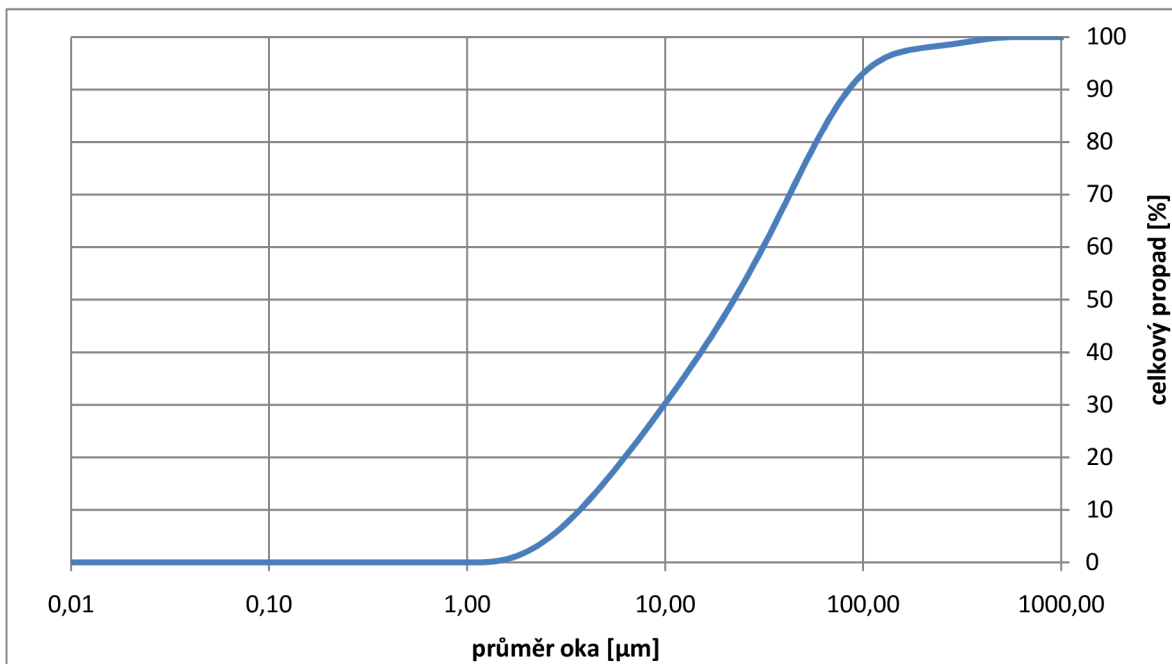
Graf 9. Granulometri strusky.

Serpentinit lom Hrubčice

Serpentinit můžeme znát také pod názvem Hadeč. Jedná se o metamorfovanou horninu složenou především ze serpentinitu a vedlejších minerálů jako magnezit, pyroxen, mastek, olivín a jiné. Měrný povrch dle Blaina byl naměřen $3740 \text{ cm}^2/\text{g}$ a relativní hustota $2,610 \text{ g/m}^3$. Chemické složení je uvedeno v tabulce 10. Velikost a množství částic je uvedena v grafu 10. Granulometrie serpentinitu se pohybuje v rozmezí 1,16 až 590 μm . Částice $< 1,16 \mu\text{m}$ nebyly detekovány.

Parametr	Množství
Ztráta žíháním ($105 \text{ }^\circ\text{C}$)	1,31%
SiO_2	35,8%
Al_2O_3	1,43%
Fe_2O_3	7,39%
CaO	2,14%
MgO	36,4%

Tabulka 9. Chemické složení serpentinou.



Graf 10. Granulometrie serpentinou.

3.4 Metodika laboratorních zkoušek

Postup při výrobě čerstvého betonu:

- Příprava a navážení složek pro danou záměs v množství, které zaujímá požadovaný výsledný objem.
- Navlhčení míchačky s nuceným oběhem typu Coufal.
- Dávkování sypkých složek, poté přidání 50 % záměsové vody a po částečném promíchání byl dolit zbytek vody s plastifikační přísadou. Celková doba míchání tak činila 3- 4 minuty.
- Vyhovující beton byl ukládán do připravených forem o rozměrech 150*150*150 mm.
- Následovalo plnění forem a jejich uchycení k vibračnímu stolku s horizontální vibrací a jeho spuštění při 3000 ot./min a amplitudou 0,3 mm po dobu 10 - 30 sekund.
- Identifikační popis a expedice vzorku do vlhkého uložení.

Navážení všech složek směsi

Hmotnostně na elektronických vahách.

Stanovení zpracovatelnosti čerstvého betonu

Zkouška sednutím kužele, dle normy ČSN EN 12350-2, Zkoušení čerstvého betonu. Část 2: Zkouška sednutím. Všechny směsi byly koncipovány na výsledné sednutí kužele S3 (100 až 150 mm).

Stanovení objemové hmotnosti

Objemová hmotnost byla posuzována podle ČSN EN 12350 Zkoušení čerstvého, zatvrdlého betonu - Část 6,7: Objemová hmotnost. Objemová hmotnost je definována jako hmotnost objemové jednotky včetně dutin a pórů. Podstatou zkoušky je změření objemu zkušebního tělesa a stanovení jeho hmotnosti. Objemová hmotnost byla zjišťována na krychlích 150*150*150 mm uložených v laboratorních podmínkách dle vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

kde:

m.....hmotnost zkušebního tělesa [kg]

V.....vypočítaný objem zkušebního tělesa [m³]

Stanovení pevnosti v tlaku

Pevnost v tlaku byla stanovena dle ČSN EN 12390 – 3, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Pevnost v tlaku byla stanovena po 7, 28 a 60- ti dnech na zkušebních krychlích o hraně 150 mm. Zkušební tělesa byla po vyrobení až do doby zkoušky uložena ve vlhkém prostředí.

Principem zkoušky je stanovení smluvního napětí, které je definováno poměrem největší dosažené síly potřebné k porušení zkušebního tělesa při namáhání tlakem a velikosti plochy tlačného průřezu zkušebního tělesa. Zkušební tělesa jsou uložena do lisu kolmo na směr ztuhnutí. Výsledná pevnost betonu v tlaku se vypočte ze vztahu:

$$f_{c,cu} = F / A$$

kde:

$f_{c,cube}$...pevnost v tlaku [N/mm²]

F.....největší dosažená síla [N]

Atlačná plocha [mm²]



Obrázek 12. Lis pro stanovení pevnosti v tlaku.

Granulometrie

Granulometrie je velmi důležitý prvek sypkých materiálů udávající poměr zastoupení jednotlivých zrn. Granulometrii lze u materiálů o velikosti zrna větším jak 50 μm provést pomocí síťového rozboru. U materiálů upravovaných na menší rozměry zrn nastupují modernější a přesnější metody.

V našem případě jsme využili laserové granulometrie pro stanovení velikosti částic. Tato metoda je založena na rozptylu světla dopadajícího na částice.

Měrný povrch

Měrná povrch byl stanoven podle ČSN EN 196-1 permeabilní metodou dle Blaina. Metoda je založena na porovnání měrného povrchu s povrchem kalibračním. Tato metoda nemusí vždy nabízet uspokojivé výsledky, především u materiálů s vyšším měrným povrchem, kterých dosahuje např. Si-úlety. Zde dochází k měření měrného povrchu metodou adsorpcí dusíku, metodou BET.

3.5 Navržené receptury

Bylo navrženo 10 receptur s 10 a 20 %-ním množstvím náhrady cementu, s výjimkou mikrosiliky SR, kde byla odzkoušena jen 10 %-ní náhrada. Jedná se o tyto receptury:

Složení BS [kg/m ³]	Složení směsi, receptury									
	REF	MIK-SR10	SEP10	SEP20	MIK-ST10	MIK-ST20	KREM10	KREM20	STRU10	STRU20
CEM I 42,5 R Mokrá	370	333	333	296	333	296	333	296	333	296
Kam. 0 – 4 Žabčice	880	880	880	880	880	880	880	880	880	880
Kam. 8 – 16 Olbramovice	945	945	945	945	945	945	945	945	945	945
Mikrosilika SR 10% z m _c	-	37	-	-	-	-	-	-	-	-
Serpentinit 10% z m _c	-	-	37	-	-	-	-	-	-	-
Serpentinit 20% z m _c	-	-	-	74	-	-	-	-	-	-
Mikrosilika Stachema 10% z m _c	-	-	-	-	37	-	-	-	-	-
Mikrosilika Stachema 20% z m _c	-	-	-	-	-	74	-	-	-	-
Křemen MT8 10% z m _c	-	-	-	-	-	-	37	-	-	-
Křemen MT8 20% z m _c	-	-	-	-	-	-	-	74	-	-
Struska T2 10% z m _c	-	-	-	-	-	-	-	-	37	-
Struska T2 20% z m _c	-	-	-	-	-	-	-	-	-	74
Voda	170	212	206	198	201	211	184	179	204	211
Plastifikátor Dynamon SX 14, 0,9% z REF m _c	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33

Tabulka 10. Složení receptur na m³.

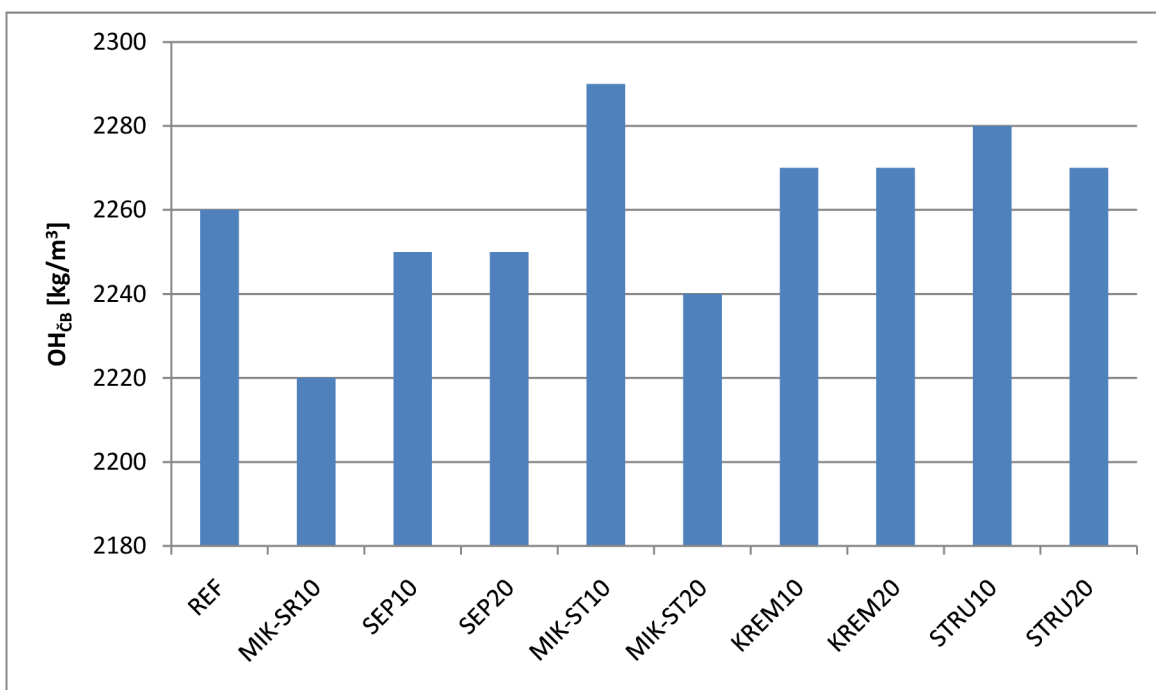
3.6 Porovnání výsledků betonu v čerstvém stavu

Na čerstvý beton byly kladeny požadavky ve formě konstantní konzistence. Tato konzistence se měla pohybovat ve stanovených mezích. Jako hodnotící kritérium byla stanovena zkouška sednutím kužele, dle normy ČSN EN 12350-2, Zkoušení čerstvého betonu. Část 2: Zkouška sednutím. Požadovaná hodnota sednutí S3 (100 – 150 mm).

Dále byla na čerstvém betonu stanovena objemová hmotnost. Objemová hmotnost byla posuzována podle ČSN EN 12350 Zkoušení čerstvého betonu - Část 6: Objemová hmotnost. Objemová hmotnost je definována jako hmotnost objemové jednotky včetně dutin a pórů.

Receptura	$OH_{\text{čb}} [\text{kg}/\text{m}^3]$	Množství záměsové vody [kg]	Sednutí [mm]
REF	2260	170	150
MIK-SR10	2220	212	130
SEP10	2250	206	130
SEP20	2250	198	130
MIK-ST10	2290	201	110
MIK-ST20	2240	211	120
KREM10	2270	186	110
KREM20	2270	179	130
STRU10	2280	204	130
STRU20	2270	211	130

Tabulka 11. Celkové porovnání objemových hmotností čerstvého betonu, množství záměsové vody a dosaženého sednutí pomocí Abrasova kužele.



Graf 11. Porovnání objemových hmotností čerstvého betonu.

3.7 Porovnání výsledků betonu v zatvrdlém stavu

Pevnost v tlaku byla stanovena dle ČSN EN 12390 – 3, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Pevnost v tlaku byla stanovena po 7, 28 a 60- ti dnech na zkušebních krychlích o hraně 150 mm. Zkušební tělesa byla po vyrobení až do doby zkoušky uložena ve vlhkém prostředí.

Dále byla na zatvrdlém betonu stanovena objemová hmotnost. Objemová hmotnost byla posuzována podle ČSN EN 12350 Zkoušení zatvrdlého betonu - Část 7: Objemová hmotnost. Objemová hmotnost je definována jako hmotnost objemové jednotky včetně dutin a pórů.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	φf _c [MPa]
		a	b	c					
A1	7,545	148,50	149,60	149,60	2270	2260	650	29,0	28
A2	7,364	147,20	150,08	149,14	2240		600	27,0	

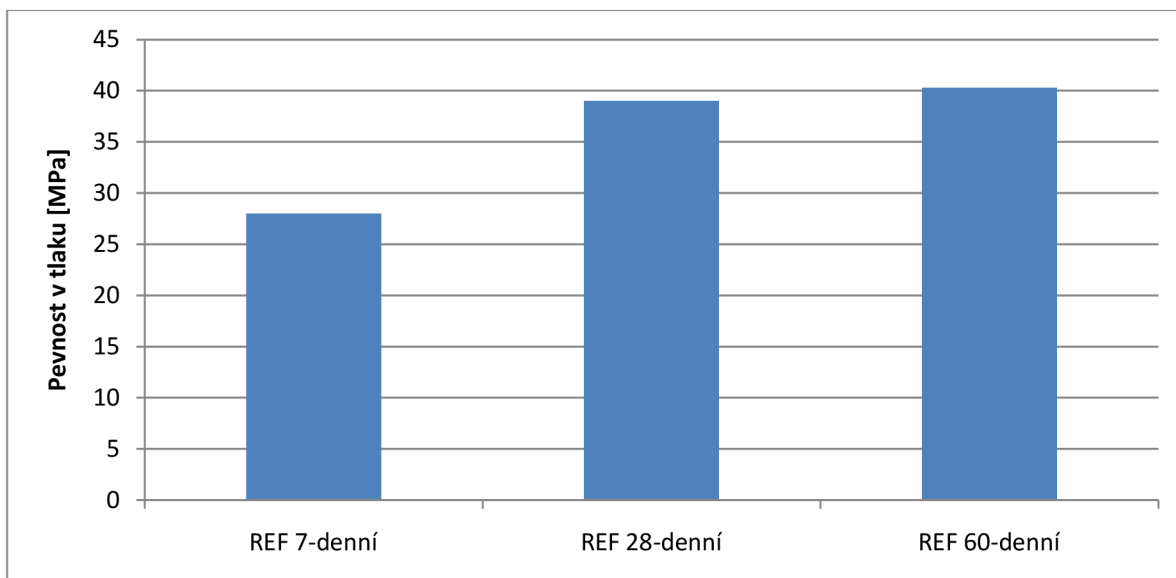
Tabulka 12. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorků REF po 7 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	φf _c [MPa]
		a	b	c					
A3	7,345	149,40	149,06	147,45	2240	2240	850	38,5	39
A4	7,375	150,60	150,45	146,18	2230		702	32,0	

Tabulka 13. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorků REF po 28 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	φf _c [MPa]
		a	b	c					
A5	7,440	149,34	149,00	148,49	2250	2260	864	39,0	40,3
A6	7,470	149,00	149,14	148,77	2260		904	40,5	

Tabulka 14. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorků REF po 60 dnech.



Graf 12. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků REF.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A1	7,455	150,31	150,23	148,82	2220	2210	497	22,0	22,7
A2	7,435	150,55	150,11	149,51	2200		503	22,5	
A3	7,570	150,17	150,22	151,59	2210		533	23,5	

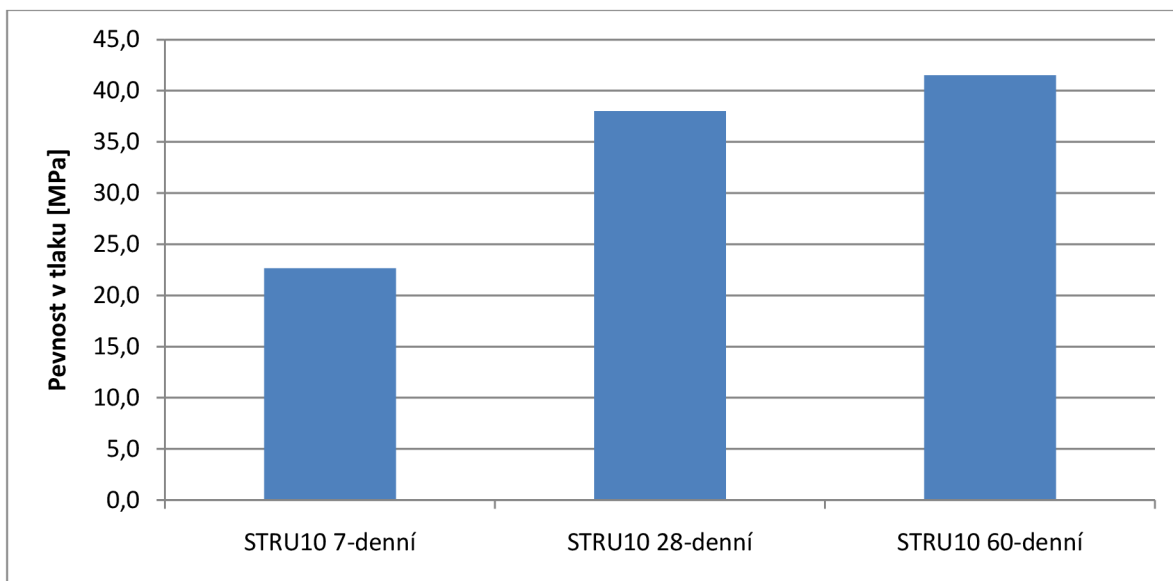
Tabulka 15. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorků STRU10 po 7 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A4	7,456	149,00	149,00	148,99	2250	2250	900	40,5	38
A5	7,466	149,20	149,14	149,07	2250		794	35,5	

Tabulka 16. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorků STRU10 po 28 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A6	7,510	149,60	149,37	149,46	2250	2260	918	41,0	41,5
A7	7,620	149,25	149,35	150,74	2270		946	42,0	
A8	7,685	149,25	149,41	152,67	2260		942	41,5	

Tabulka 17. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorků STRU10 po 60 dnech.



Graf 13. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků STRU10.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	φf _c [MPa]
		a	b	c					
A4	7,375	149,26	149,25	148,27	2230	2240	623	28,0	27,5
A5	7,455	149,37	149,41	148,42	2250		595	27,0	

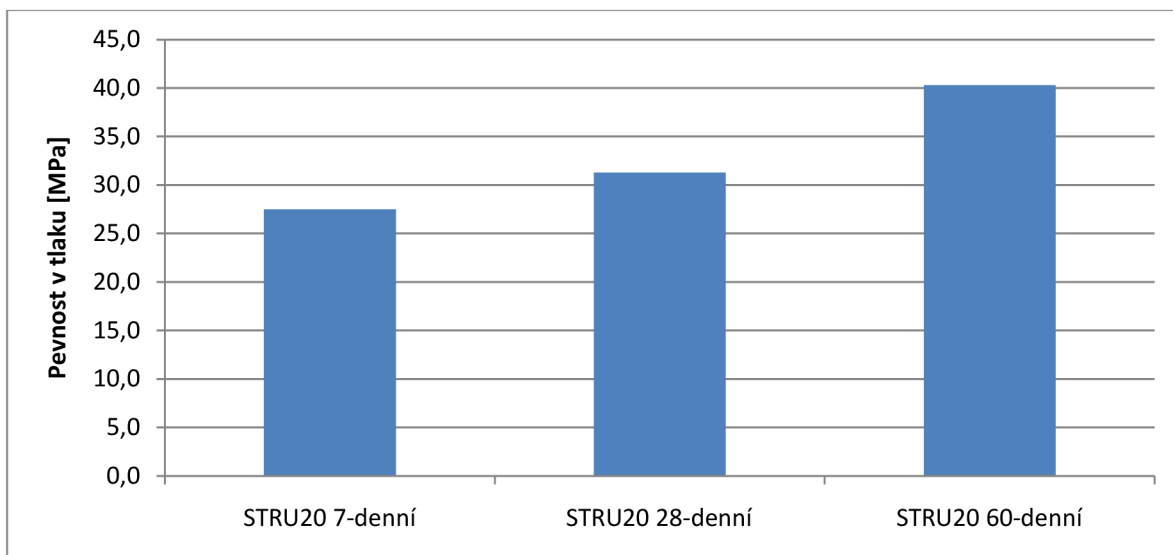
Tabulka 18. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů STRU20 po 7 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	φf _c [MPa]
		a	b	c					
A4	7,606	150,02	150,31	150,27	2240	2240	700	31,0	31,3
A5	7,496	150,34	150,18	148,48	2240		705	31,5	

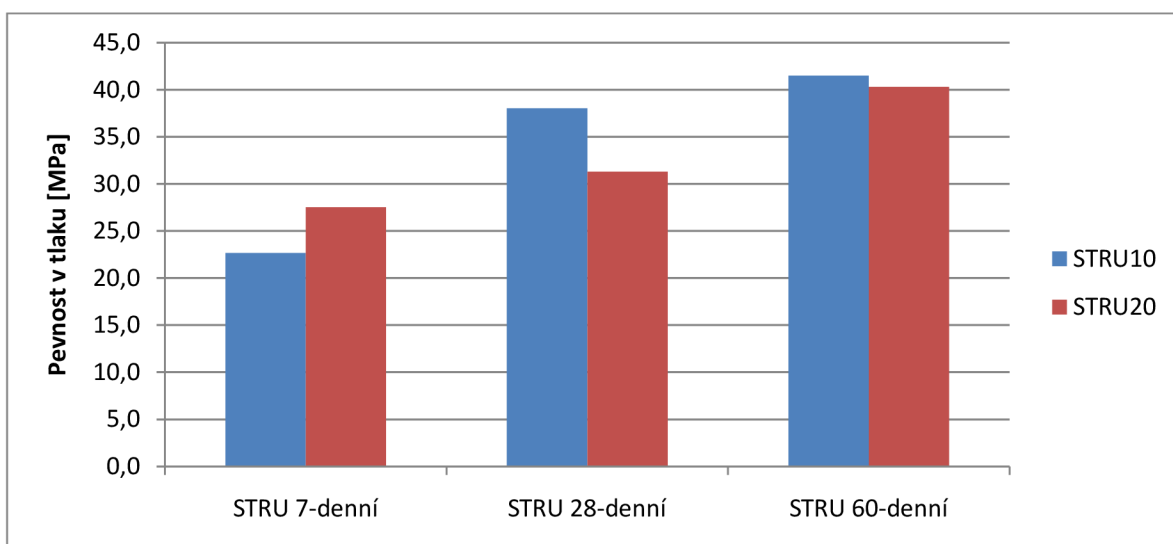
Tabulka 19. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů STRU20 po 28 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	φf _c [MPa]
		a	b	c					
A4	7,520	149,48	149,48	148,97	2260	2250	991	44,5	40,3
A5	7,550	150,00	150,00	149,49	2240		806	36,0	

Tabulka 20. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů STRU20 po 60 dnech.



Graf 14. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků STRU20.



Graf 15. Vzájemné porovnání pevnosti v tlaku vzorků STRU10 a STRU20.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A1	7,414	150,20	149,56	150,38	2190	2200	533	23,5	24,3
A2	7,296	149,96	147,98	149,16	2200		547	25,0	

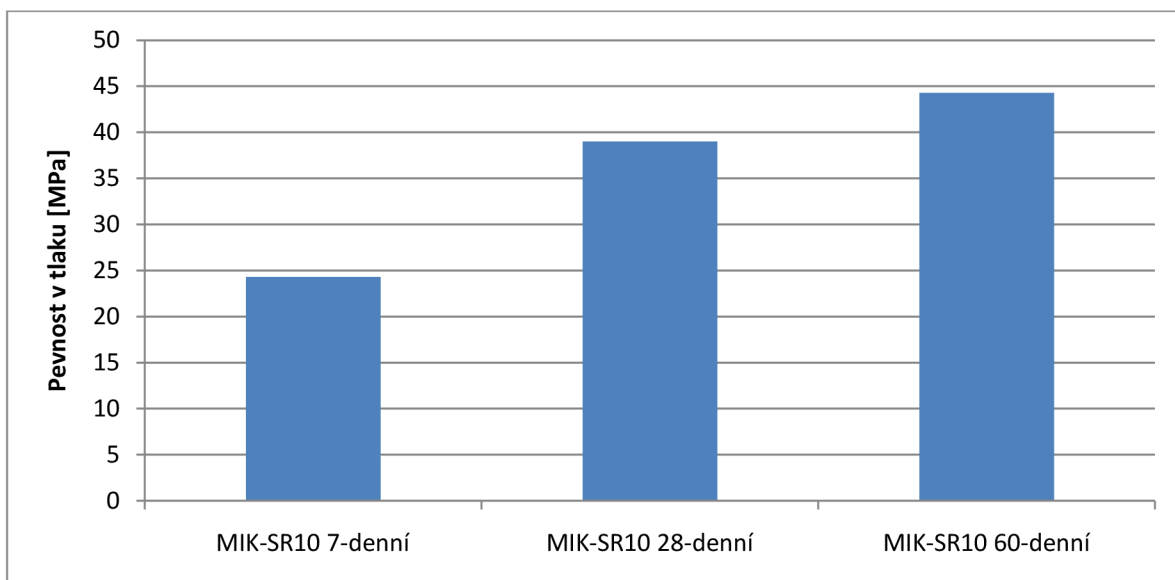
Tabulka 21. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-SR10 po 7 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A3	7,210	149,21	149,16	146,28	2210	2210	817	37,5	39
A4	7,275	149,76	149,32	147,13	2210		890	40,5	

Tabulka 22. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-SR10 po 28 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A5	7,255	149,00	148,96	147,58	2210	2230	956	43,5	44,3
A6	7,365	149,15	149,15	147,51	2240		993	45,0	

Tabulka 23. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-SR10 po 60 dnech.



Graf 16. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků MIK-SR10.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A1	7,526	150,00	150,00	149,58	2240	2230	525	23,5	24,5
A2	7,488	150,06	150,18	149,34	2220		573	25,5	

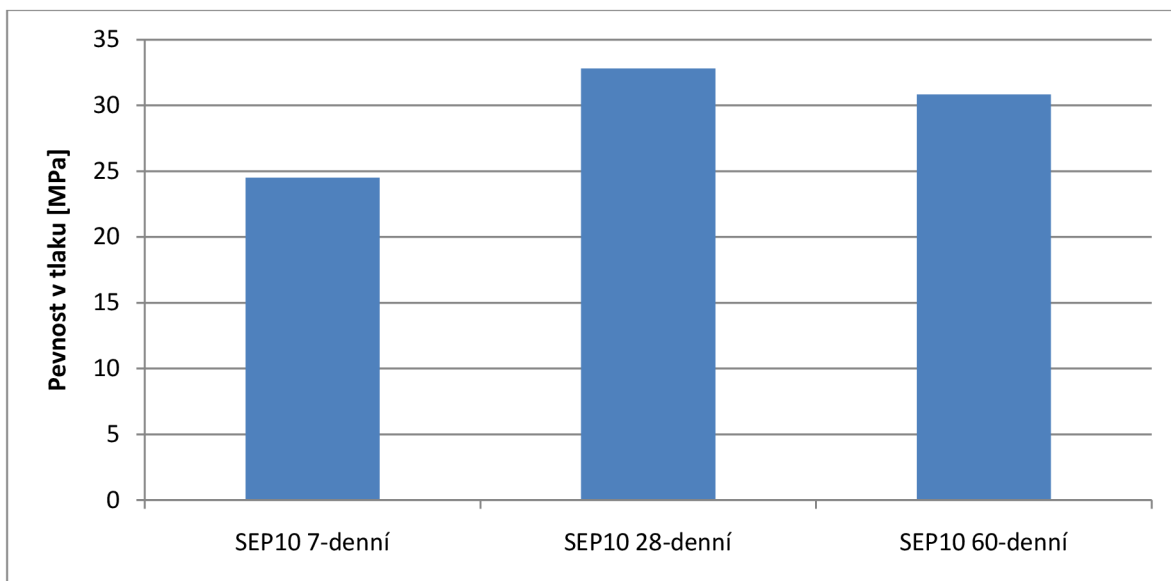
Tabulka 24. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů SEP10 po 7 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A3	7,475	149,46	149,25	149,66	2240	2220	766	34,5	32,8
A4	7,215	149,40	149,11	147,02	2200		675	31,0	

Tabulka 25. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů SEP10 po 28 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A5	7,355	150,25	150,40	148,98	2180	2190	727	32,5	30,8
A6	7,445	150,27	150,22	149,60	2200		670	30,0	
A7	7,340	150,12	150,06	147,89	2200		667	30,0	

Tabulka 26. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů SEP10 po 60 dnech.



Graf 17. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků SEP10.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A1	7,512	151,00	151,32	150,48	2180	2180	445	19,5	18,8
A2	7,393	150,60	150,04	150,78	2170		420	18,5	
A3	7,322	150,66	148,48	150,12	2180		410	18,5	

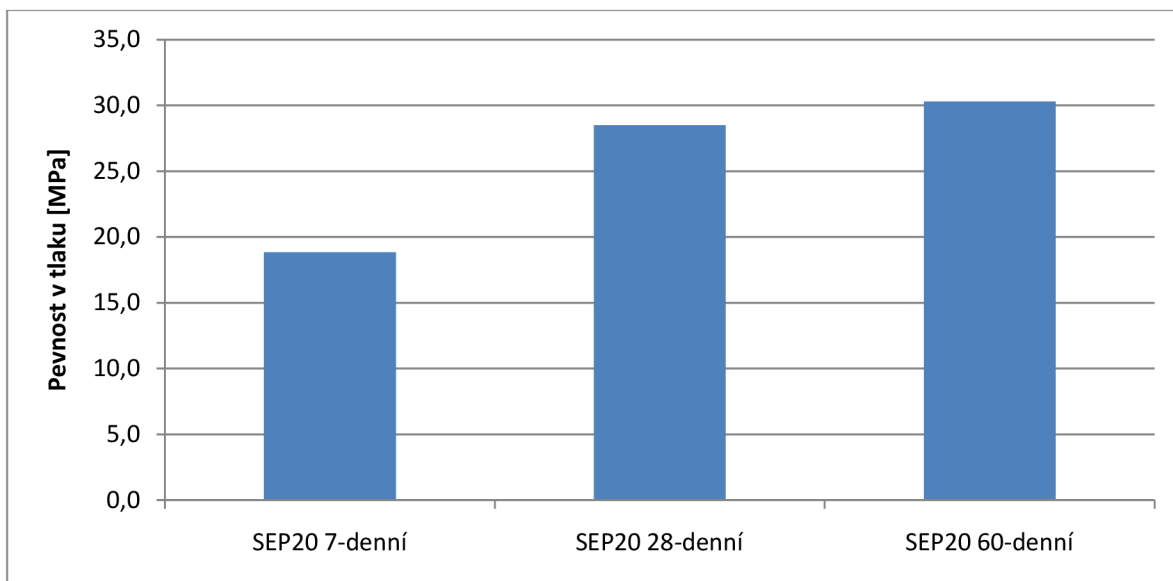
Tabulka 27. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů SEP20 po 7 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A4	7,265	149,00	148,94	147,27	2220	2230	640	29,0	28,5
A5	7,365	149,11	149,00	148,63	2230		625	28,0	

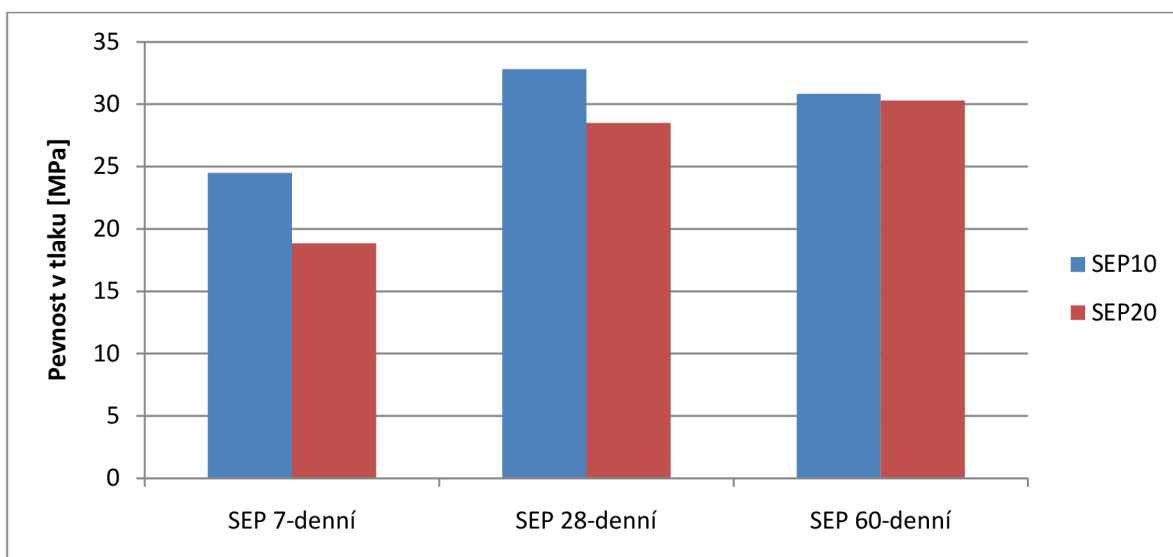
Tabulka 28. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů SEP20 po 28 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A6	7,330	149,42	149,00	147,88	2230	2230	702	32,0	30,3
A7	7,505	150,00	150,10	150,38	2220		645	28,5	

Tabulka 29. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů SEP20 po 60 dnech.



Graf 18. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků SEP20.



Graf 19. Vzájemné porovnání pevnosti v tlaku vzorků SEP10 a SEP20.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A1	7,640	150,20	150,30	150,42	2250	2240	557	24,5	25,3
A2	7,627	151,17	150,10	151,00	2230		593	26,0	

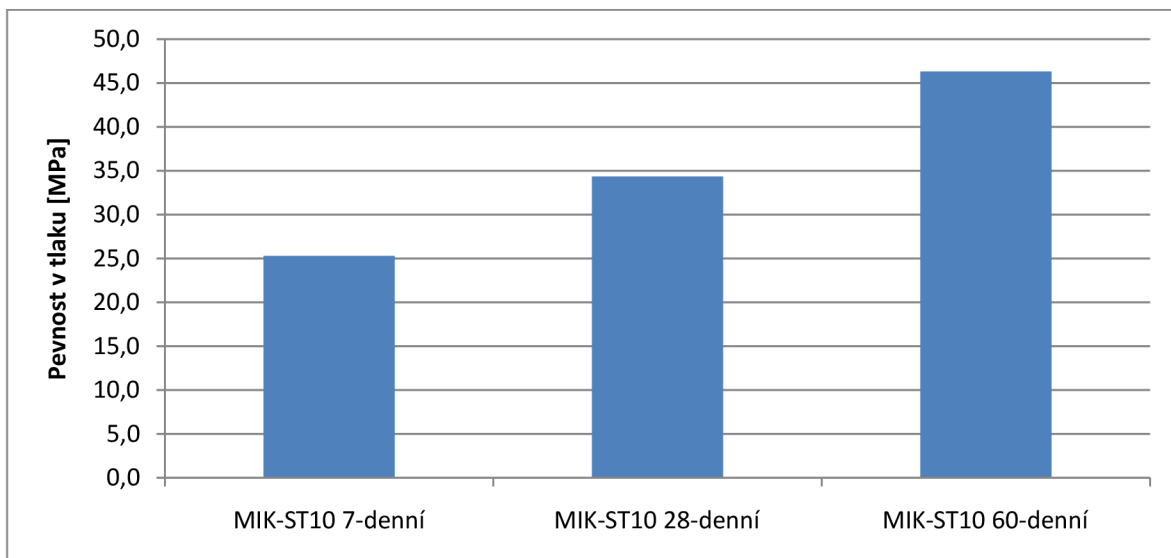
Tabulka 30. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-ST10 po 7 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A3	7,541	150,31	150,08	150,41	2220	2230	755	33,5	34,3
A4	7,461	150,23	150,13	148,65	2230		806	36,0	
A5	7,726	150,00	150,09	153,00	2240		774	33,5	

Tabulka 31. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-ST10 po 28 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A6	7,375	149,00	149,00	149,11	2230	2240	1029	46,5	46,3
A7	7,430	149,45	149,52	148,00	2250		1015	46,0	

Tabulka 32. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-ST10 po 60 dnech.



Graf 20. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků MIK-ST10.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A1	7,454	149,15	149,08	151,05	2220	2220	577	25,5	25,3
A2	7,213	149,27	149,28	146,59	2210		545	25,0	

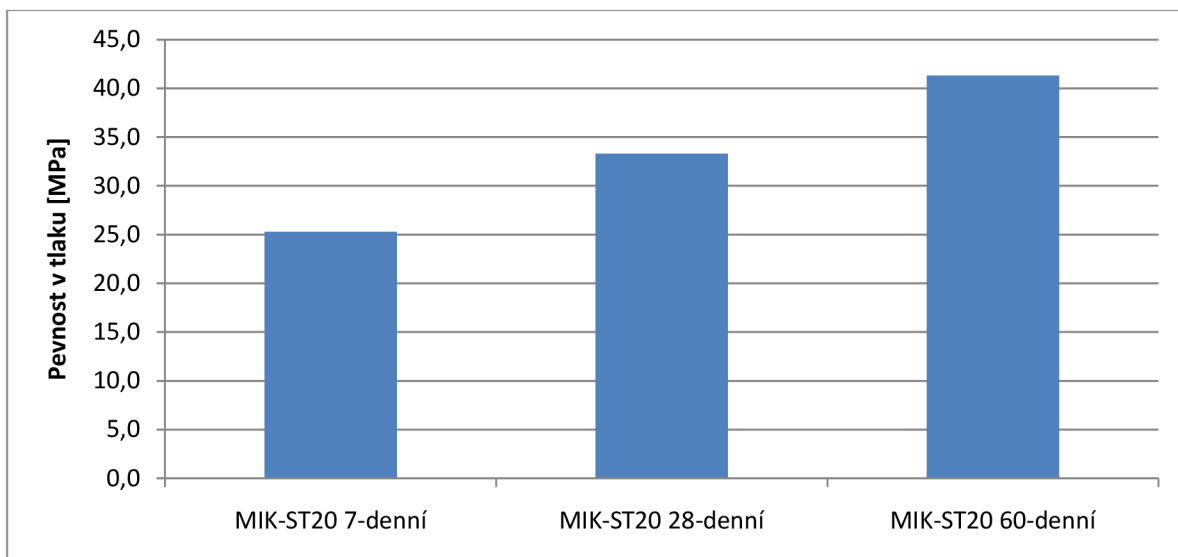
Tabulka 33. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-ST20 po 7 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A3	7,446	150,17	150,29	150,31	2190	2200	775	34,5	33,3
A4	7,561	150,10	150,25	152,15	2200		732	32,0	

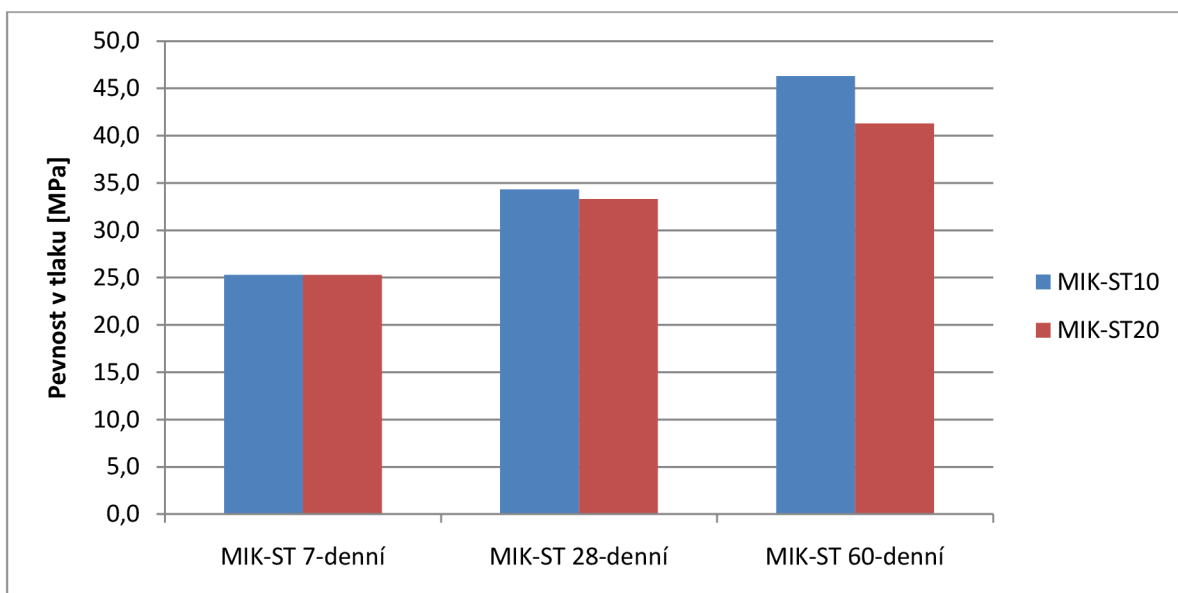
Tabulka 34. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-ST20 po 28 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A5	7,555	150,26	150,29	152,37	2200	2210	837	36,5	41,3
A6	7,325	149,00	149,00	149,00	2210		1016	46,0	

Tabulka 35. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-ST20 po 60 dnech.



Graf 21. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků MIK-ST20.



Graf 22. Vzájemné porovnání pevnosti v tlaku vzorků MIK-ST10 a MIK-ST20.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A1	7,563	150,11	150,06	149,97	2240	2240	570	25,5	24,8
A2	7,393	149,34	149,29	148,02	2240		533	24,0	

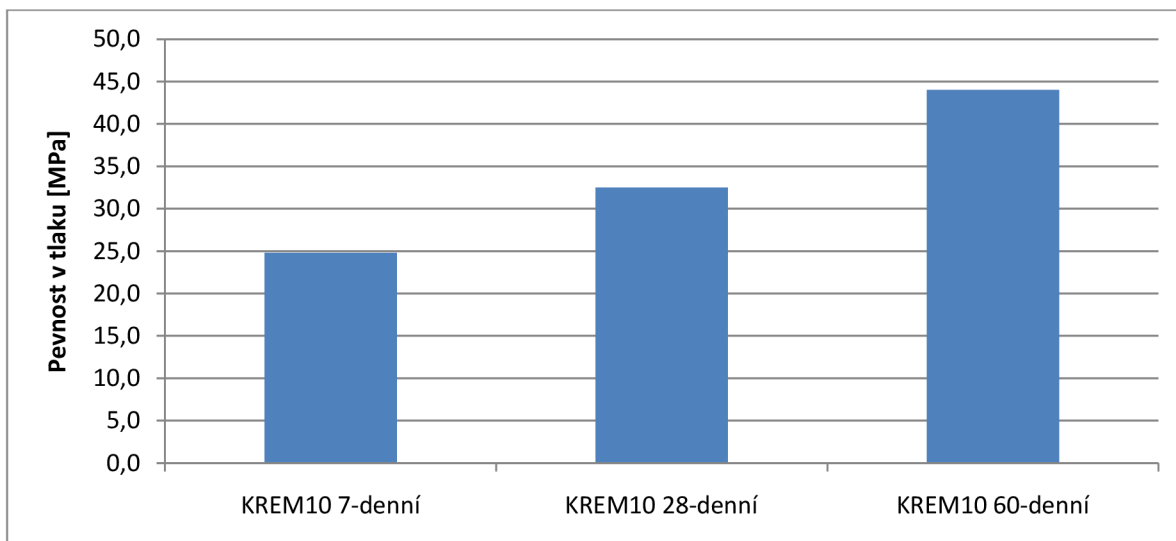
Tabulka 36. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů KREM10 po 7 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A3	7,626	150,44	150,21	150,27	2250	2250	720	32,0	32,5
A4	7,481	149,05	149,00	149,48	2250		740	33,0	

Tabulka 37. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů KREM10 po 28 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A5	7,515	149,06	148,91	149,93	2260	2260	932	41,5	44,0
A6	7,455	149,23	149,16	148,55	2250		1030	46,5	

Tabulka 38. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů KREM10 po 60 dnech.



Graf 23. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků KREM10.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A1	7,340	149,08	148,93	148,55	2230	2240	525	23,5	23,3
A2	7,533	149,16	149,18	151,37	2240		543	24,0	
A3	7,599	150,33	150,30	152,54	2200		515	22,5	

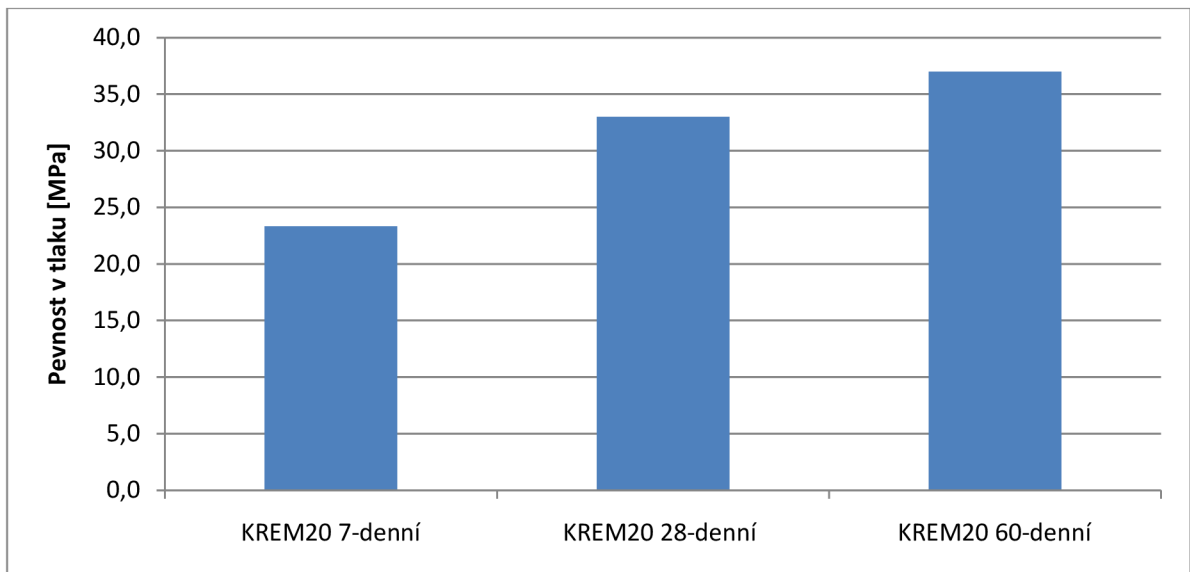
Tabulka 39. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů KREM20 po 7 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A4	7,416	149,01	149,02	147,81	2260	2260	680	31,0	33
A5	7,500	149,21	149,00	149,65	2250		775	35,0	

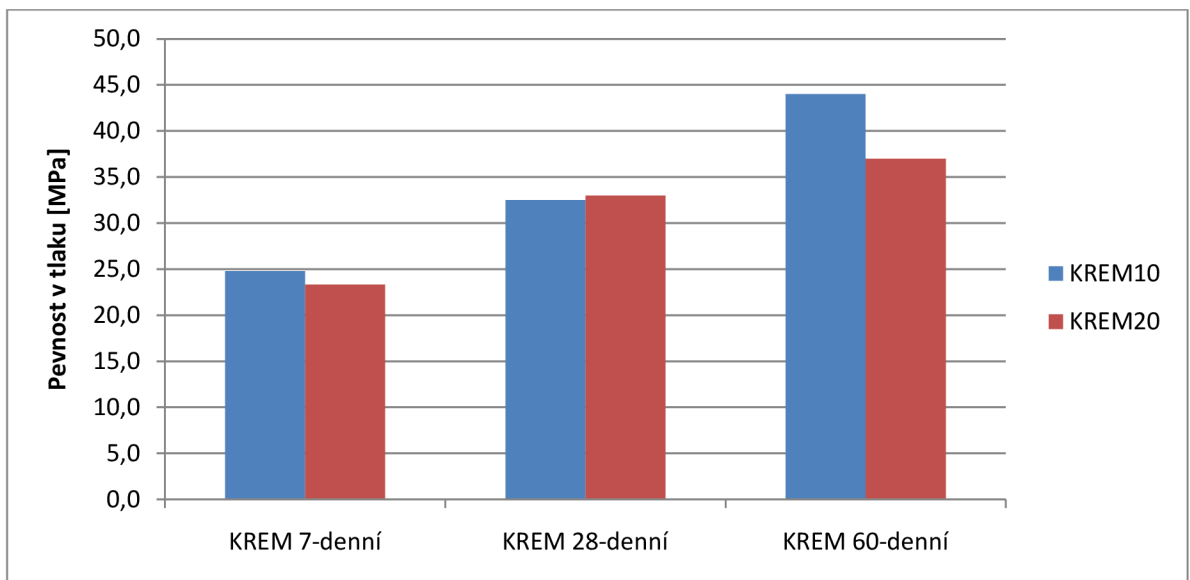
Tabulka 40. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů KREM20 po 28 dnech.

vzorek	m [kg]	rozměr [mm]			OH _{ZB} [kg/m ³]	průměr OH _{ZB} [kg/m ³]	F [kN]	f _c [MPa]	ϕf _c [MPa]
		a	b	c					
A6	7,485	148,92	148,81	150,17	2250	2260	812	36,5	37
A7	7,415	148,90	149,00	147,50	2270		825	37,5	

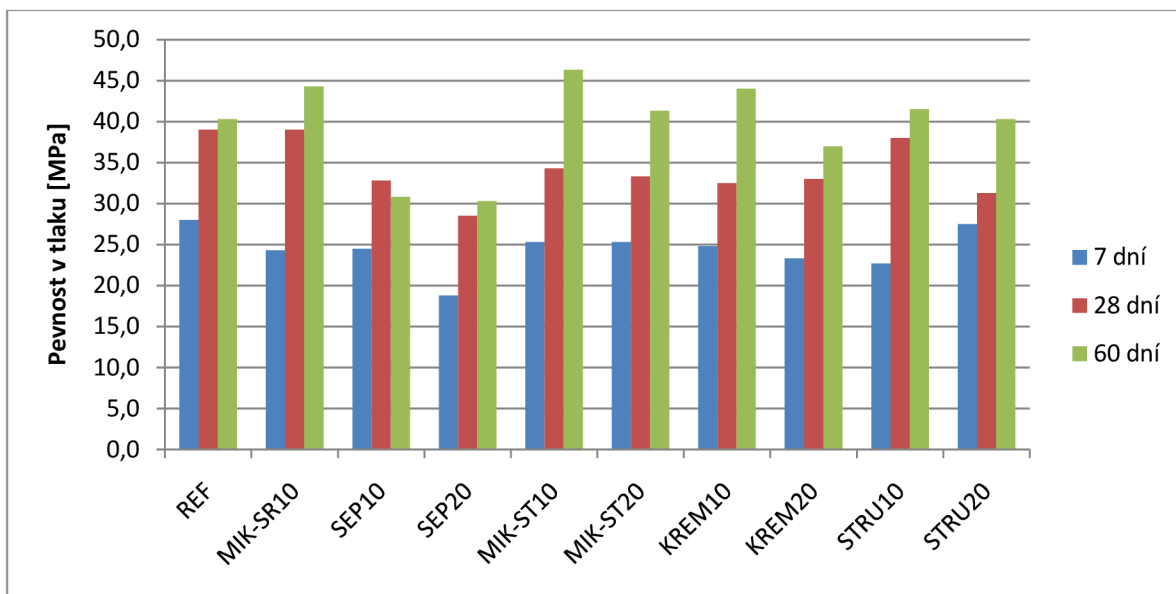
Tabulka 41. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů KREM20 po 60 dnech.



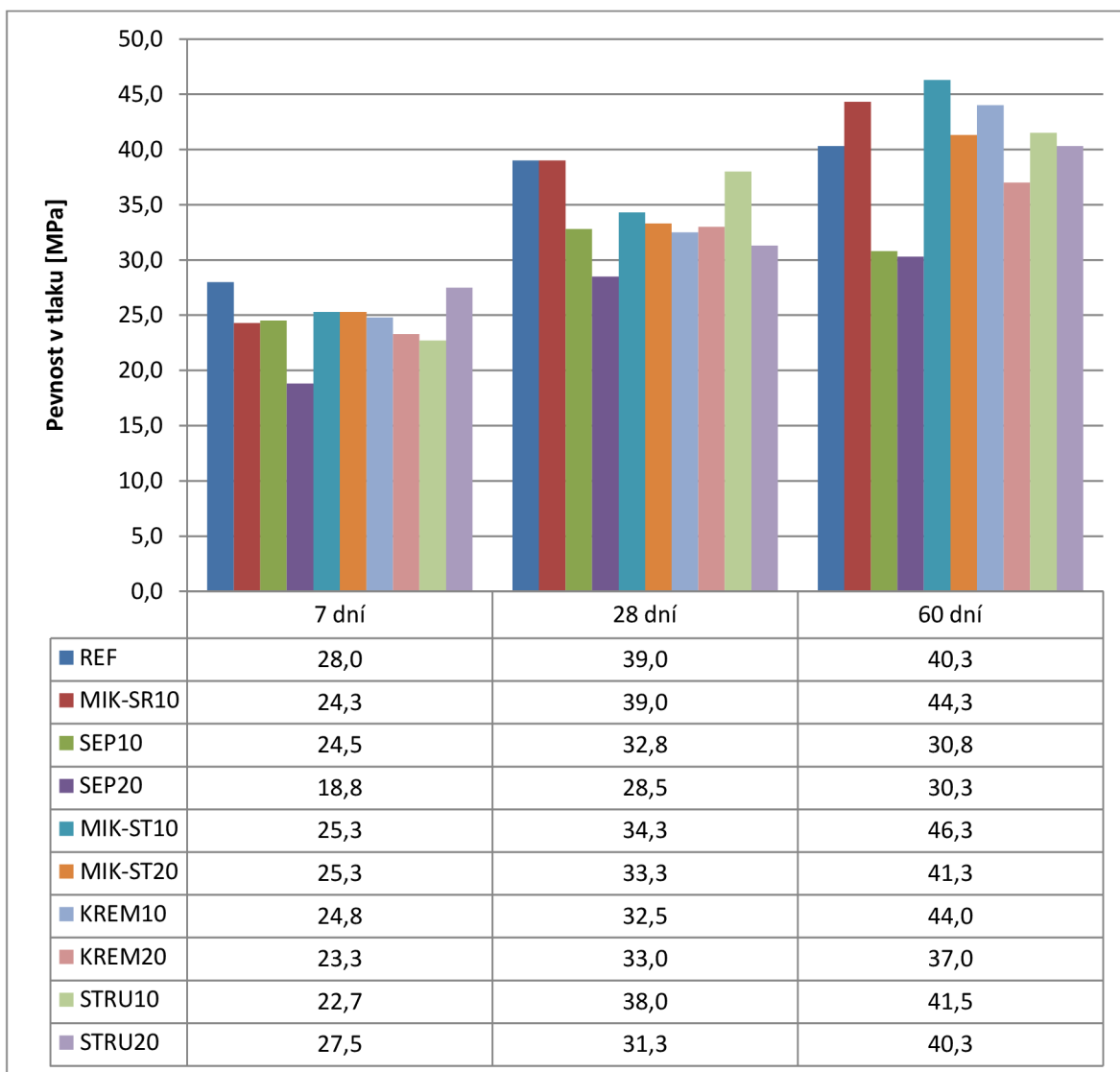
Graf 24. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků KREM20.



Graf 25. Vzájemné porovnání pevnosti v tlaku vzorků KREM10 a KREM20.



Graf 26. Výsledné pevnosti v tlaku po 7, 28 a 60 dnech.



Graf 27. Porovnání výsledných pevností v tlaku po 7, 28 a 60 dnech.

	7-28 dní [%]	28-60 dní [%]
REF	126	103
MIK-SR10	160	114
SEP10	134	94
SEP20	152	106
MIK-ST10	136	135
MIK-ST20	132	124
KREM10	131	135
KREM20	143	112
STRU10	167	109
STRU20	114	129

Tabulka 42. Nárůst pevností v tlaku navržených směsí v závislosti na čase v %.

4 Závěr

Úkolem této bakalářské práce bylo věnovat pozornost příměsím a možnému zvýšení potenciálu jejich úpravou. V teoretické části jsem se snažil popsat typy příměsí, jejich účel, funkci, v čerstvém i zatvrdlém betonu, stejně tak i možné způsoby zvýšení jejich potenciálu pro dosažení maximálního možného zisku jejich vlastností.

V praktické části této, práce po dohodě s vedoucí bakalářské práce, byly vybrány příměsi, a to mikrosilika Sioxid - FSZ Istebné, mikrosilika Stachesil od firmy Stachema, jemně mletá granulovaná struska od firmy Cemex, serpentinit z lomu Hrubčice a křemičitý písek MT8. Bližší specifikace jsou uvedeny v praktické části v sekci příměsí. Z těchto příměsí byly vytvořeny receptury s náhradou cementu v množství 10 % a 20 %, s výjimkou mikrosiliky SR, kde byla odzkoušena jen 10 %-ní náhrada. Jako hlavní pojící prvek byl vybrán cement CEM I 42,5 R. Směsi byly po dohodě s vedoucím práce koncipovány tak, aby v čerstvém stavu vyšlo sednutí měřené pomocí Abramsova kužele S3 (100 až 150 mm) při konstantním množství superplastifikátoru. V čerstvém stavu jsem dále měřil objemovou hmotnost čerstvého betonu, a na zatvrdlém betonu objemovou hmotnost a pevnost v tlaku.

Jako první bylo na čerstvém betonu stanoveno sednutí pomocí Abramsova kužele. Tato hodnota byla nejvyšší u referenčního vzorku REF, kde dosahovala 150 mm. Nejnižšího sednutí kužele bylo dosaženo u vzorku s použitím mikrosiliky Stachema MIK-ST10 o hodnotě 110 mm. Ostatní příměsi se nijak výrazně nelišily (viz. Tab. 11) a dosahovaly požadovaného sednutí S3 (100 až 150 mm).

Objemová hmotnost čerstvého betonu a jeho porovnání je uvedeno v tabulce 11 a grafu 11. Nejnižší objemová hmotnost čerstvého betonu byla naměřena u vzorku MIK-SR10, kde dosahovala hodnoty 2220 kg/m^3 . Nejvyšší u vzorku MIK-ST10 2290 kg/m^3 . Tento rozdíl není nijak markantní, v procentním zastoupení činí 3 %.

Mezi objemovou hmotností čerstvého betonu, množstvím záměsové vody a sednutím kužele dle Abramse lze najít určitou souvislost. Vztah mezi těmito výsledky je komplikovanější a může být ovlivněn více faktory. Funkci superplastifikátoru můžeme z části eliminovat, protože bylo jeho množství využito ve všech záměsích stejně. Ovšem úplně jej vyřadit nelze, protože může daný superplastifikátor, v našem případě Dynamon SX 14 od firmy Mapei na bázi nesířených akrylových polymerů, reagovat s každou příměsí odlišně. Jako další faktor vystupuje samotná příměs a především její měrný povrch a jeho smáčivost. V neposlední řadě můžeme zmínit dobu, rychlost míchání a množství míchané směsi, tak aby došlo k co nejlepší homogenizaci.

Pevnost v tlaku byla stanovena v časovém období 7, 28 a 60 dní. Vývoj pevností v čase lze pozorovat v grafu 26 a tabulce 42. U všech vzorků dochází k nárůstu pevností v tlaku se zvyšujícím se stářím. Pouze u vzorku SEP10 při 10 % náhradě cementu jemně mletým serpentinitem dochází v období 60 dní k poklesu pevností z 32,8 MPa na 30,3 MPa, tedy o 6 %. Tuto hodnotu bych považoval za chybnou, vzhledem k nárůstu pevností za 60 dní u vzorku SEP20 s vyšším množstvím serpentinou.

Porovnání jednotlivých nárůstů pevností v tlaku je prezentováno v grafu 27 a tabulce 42. Nejvyššího nárůstu pevností za období 7 dnů dosáhl referenční vzorek REF, se 100 % zastoupením cementu - 28 MPa. Tento jev byl předpokládán především při náhradě cementu za mikrosiliku. Tento trend se nepotvrdil a mikrosilika zůstala za očekáváním. Jako příčinu bych volil možný obsah aglomerátů v mikrosilice, které mají za následek pomalejší reakci. Jev aglomerátů v mikrosilice je podrobněji rozepsán v teoretické části. Nejnižších sedmidenních pevností v tlaku dosáhl vzorek SEP20 18,8 MPa. Výsledná pevnost v tlaku vzorku SEP20 byla očekávána z chemického rozboru. Výrazný nárůst tlakových pevností lze také pozorovat u vzorku STRU20 s 20 % náhradou cementu, který dosahuje 27,5 MPa. Nárůst pevností v tlaku za období 28 dní dosáhl nejvýše opět vzorek REF, spolu se vzorkem MIK-SR10 a to 39 MPa. Zde lze pozorovat zvýšení rychlosti růstu krystalů a vytvrzování C-S-H fází. Zmiňovaný jev ovšem zůstává potlačen u vzorků MIK-ST10 a MIK-ST20. Nejnižší hodnotu opět prokázal vzorek SEP20 28,5 MPa. Velký nárůst lze také pozorovat u vzorku STRU10, kde za období 7 až 28 dní je nárůst o 167 % na hodnotu 38 MPa. Zde se projevila latentní hydraulická. Nárůst pevností v tlaku po 60 dnech je nejvyšší u vzorku MIK-ST10, kde za období 28 až 60 dní došlo k nárůstu pevností o 135 %. Stejněho procentního nárůstu dosáhl i vzorek KREM10, ale nedosáhl tak vysokých pevností. Pevnost v tlaku vzorku se dostala na hodnotu 44 MPa. Nejnižších pevností za dobu 60 dnů dosáhly podle očekávání vzorky sespentinu SEP10 30,8 MPa a SEP20 30,3 MPa.

U všech vzorků s náhradou mikrosilky nedošlo k projevení jejich vysoké pucolanity. Ta se začala projevovat až v období 28 dní u vzorku MIK-SR10 a u vzorku MIK-ST10 a MIK-ST20, až po 28 dnech. Vzhledem k pomalému projevu pucolanity, což je neobvyklé, lze předpokládat další nárůst tlakových pevností v čase. Vzorky s náhradou serpentinou SEP10 a SEP20 se nijak nevymykají. Jejich chování bych přiřadil inertní příměsi. Menší nárůst tlakových pevností v delším časovém období lze předpokládat i u vzorků s náhradou strusky STRU10, STRU20. Křemenná náhrada cementu KREM10, KREM20 především KREM10 nijak nezaostává za jinými vzorky.

Zvýšení potenciálu příměsí do betonu, pro maximální využití jejich vlastností se jeví jako velmi dobrá perspektiva do budoucna. Využíváním druhotných surovin a jejich úpravou lze dosáhnout příznivých vlastností. Je třeba ovšem zvážit do jaké míry je úprava příměsí možná, a především její ekonomický a také ekologický přínos.

5 Použitá literatura

- [1] TECHNOLOGIE BETONU: Petr Pytlík. Druhé vydání. Vysoké učení technické v Brně: VITIUM, Antonínská 1, Brno, 2000. Edice Učebnice sv. 1. ISBN 80-214-1647-5.
- [2] Vysokohodnotný beton. v Praze: ČKAIT, červen 2005. ISBN 80-86769-39-9.
- [3] Rafat Siddique, Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties, Resources, Conservation and Recycling, Volume 55, Issue 11, September 2011, Pages 923–932.
- [4] ČSN EN 13263-1+A1. Křemičité úlety do betonu: Část 1: Definice, požadavky a kritéria shody. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [5] Martin Cyr, Claude Legrand, Michael Mouret Study of the shear thickening effect of superplasticizers on the rheological behaviour of cement pastes containing or not mineral additives, Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 9, September 2000, Pages 1477–1483.
- [6] V. Kasselouri, N. Kouloumbi, Th. Thomopoulos, Performance of silicafume-calcium hydroxide mixture as a repair material, Cement and Concrete Composites, Volume 23, Issue 1, February 2001, Pages 103–110.
- [7] R. Hela, Technologie betonu I, Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Modul M01, Brno 2005.
- [8] S. Nagataki, N. Otsuki, M. Hisada, Effects of physical and chemical treatments of silica fume on the strength and microstructures of Mostar, High-Performance Concrete, Proceedings of ACI International Conference, Singapore, American Concrete Institute, Detroit, MI (1994), pp. 21–35.

- [9] D.R.G. Mitchell, I. Hinczak, R.A. Day, Interaction of silica fume with calcium hydroxide solutions and hydrated cement pastes, *Cem. Concr. Res.*, 28 (1998), pp. 1571–1584.
- [10] J Yajun, J Cahyadi, Effects of densified silica fume on microstructure and compressive strength of blended cement pastes, *Cement and Concrete Research*, Volume 33, Issue 10, October 2003, Pages 1543–1548.
- [11] A.J. Maas, J. H. Ideker, M.C.G. Juenger, Alkali silica reactivity of agglomerated silica fume, *Cement and Concrete Research*, Volume 37, Issue 2, February 2007, Pages 166–174.
- [12] G.A. Rao, Role of water–binder ratio on the strength development in mortars incorporated with silica fume, *Cement and Concrete Research*, Volume 31, Issue 3, March 2001, Pages 443–447.
- [13] F. Sanchez, K. Sobolev, Nanotechnology in concrete – A review, *Construction and Building Materials*, Volume 24, Issue 11, November 2010, Pages 2060–2071.
- [14] K.L. Lin, W.C. Chang, D.F. Lin, H.L. Luo, M.C. Tsai, Effects of nano-SiO₂ and different ash particle sizes on sludge ash–cement Mostar, *Journal of Environmental Management*, Volume 88, Issue 4, September 2008, Pages 708–714.
- [15] J Björnström, A Martinelli, A Matic, L Börjesson, I Panas, Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement, *Chemical Physics Letters*, Volume 392, Issues 1–3, 1 July 2004, Pages 242–248.
- [16] Ye Qing, Zhang Zenan, Kong Deyu, Chen Rongshen, Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume, *Construction and Building Materials*, Volume 21, Issue 3, March 2007, Pages 539–545.
- [17] Hui Li, Hui-gang Xiao, Jie Yuan, Jinping Ou, Microstructure of cement mortar with nano-particles, *Composites Part B: Engineering*, Volume 35, Issue 2, March 2004, Pages 185–189.

- [18] Sobolev K, Flores I, Torres-Martinez LM, Valdez PL, Zarazua E, Cuellar EL. Engineering of SiO₂ nanoparticles for optimal performance in nano cement-based materials. In: Bittnar Z, Bartos PJM, Nemecek J, Smilauer V, Zeman J, editors. Nanotechnology in construction: proceedings of the NICOM3 (3rd international symposium on nanotechnology in construction). Prague, Czech Republic; 2009. p. 139–48.
- [19] B.-W. Jo, C.-H. Kim, G.-h. Tae, J.-B. Park, Characteristics of cement mortar with nano-SiO₂ particles, *Construct Build Mater*, 21 (6) (2007), pp. 1351–1355.
- [20] K. Sobolev, M. Ferrada-Gutiérrez, How nanotechnology can change the concrete world: Part 1, *Am Ceram Soc Bull*, 84 (10) (2005), pp. 14–17.
- [21] R. Drochytka, P. Matulová, *Lehké stavební látky, Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Modul M01, Brno 2006.*
- [22] F. Kresta, *Druhotné a recyklované materiály v zemním tělese pozemních komunikací, Praha 2010.*
- [23] D. Durinck, F. Engström, S. Arnout, J. Heulens, P.T. Jones, B. Björkman, B. Blanpain, P. Wollants, Hot stage processing of metallurgical slags, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 52, Issue 10, August 2008, Pages 1121–1131.
- [24] R. Hela, *Technologie betonu II, Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Modul M01, Brno 2007.*
- [25] A. Bougara, C. Lynsdale, N.B. Milestone, Reactivity and performance of blastfurnace slags of differing origin, *Cement and Concrete Composites*, Volume 32, Issue 4, April 2010, Pages 319–324.
- [26] C. E. S. Tango, E. Y. Y. Vaidergorian, Some studies on activation of blast furnace slag in cements without clinker, in *Proceedings 9th ICCS, New Delhi, Vol.3, pp.101-107, 1992.*

- [27] A. Fernández-Jiménez, J.G. Palomo, F. Puertas, Alkali-activated slag mortars: Mechanical strength behaviour, *Cement and Concrete Research*, Volume 29, Issue 8, August 1999, Pages 1313–1321.
- [28] F. Puertas, M. Palacios, A. Gil-Maroto, T. Vázquez, Alkali-aggregate behaviour of alkali-activated slag mortars: Effect of aggregate type, *Cement and Concrete Composites* Volume 31, Issue 5, May 2009, Pages 277–284.
- [29] I. Frýbortová, Možnosti alkalické aktivace ocelářské strusky. Brno, 2010. Bakalářská práce. Vysoké učení technické, Fakulta chemická.
- [30] S. Kumar, R. Kumar, A. Bandopadhyay, T.C. Alex, B. Ravi Kumar, S.K. Das, S.P. Mehrotra, Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement, *Cement and Concrete Composites*, Volume 30, Issue 8, September 2008, Pages 679–685.
- [31] ČSN EN 15167-1. Mletá granulovaná vysokopeční struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty: Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Evropský výbor pro normalizaci, 2006.
- [32] S. Tsimas, A. M-Tsima, High-calcium fly ash as the fourth constituent in concrete: problems, solutions and perspectives, *Cement and Concrete Composites*, Volume 27, Issue 2, February 2005, Pages 231–237.
- [33] R.S Iyer, J.A Scott, Power station fly ash — a review of value-added utilization outside of the construction industry, *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 31, Issue 3, March 2001, Pages 217–228.
- [34] ČSN EN 450-1. Popílek do betonu: Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody. Český normalizační institut, 2008.
- [35] J. Bydžovský, Vlastnosti a užití stavebních materiálů v konstrukcích, Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia, Modul M01, Brno 2007.

- [36] L. Nevřivová, Cenoféry: nová možnost lehčení žárovzdorných materiálů. Keramický zpravodaj. 2004, 20, 5, [cit. 2012-04-10]. s. 5-7. Dostupný z WWW:<http://www.fce.vutbr.cz/veda/dk2004texty/pdf/04_Fyzikalni%20a%20stavebne%20materialove%20inzenyrstvi/4_02_Nove%20stavebni%20hmoty/Nevrivova_Lenka.pdf>. ISSN 1210-2520.
- [37] M, Karin. Fly ash helps green concrete. Journal of Commerce : Western Canada's Construction Newspaper [online]. July 10, 2006, Technology, [cit.2012-04-10] :<<http://www.journalofcommerce.com/article/20060710500>>.
- [38] M. Ahmaruzzaman, A review on the utilization of fly ash, Progress in Energy and Combustion Science, Volume 36, Issue 3, June 2010, Pages 327–363.
- [39] L.H Jiang, V.M Malhotra, Reduction in water demand of non-air-entrained concrete incorporating large volumes of flyash, Cement and Concrete Research, Volume 30, Issue 11, November 2000, Pages 1785–1789.
- [40] F.Škvára, Alkalicky aktivované materiály, geopolymery. In: Ústav skla a keramiky, Vysokáškola chemicko-technologická v Praze [online]. [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: http://www.vscht.cz/sil/pojiva/geo_2007.pdf.
- [41] S. Kumar, R. Kumar, Mechanical activation of fly ash: Effect on reaction, structure and properties of resulting geopolymer, Ceramics International, Volume 37, Issue 2, March 2011, Pages 533–541.
- [42] M. Komljenović, Z. Baščarević, V. Bradić, Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers, Journal of Hazardous Materials, Volume 181, Issues 1–3, 15 September 2010, Pages 35–42.
- [43] J. Temuujin, R.P. Williams, A. van Riessen, Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature, Journal of Materials Processing Technology, Volume 209, Issues 12–13, 1 July 2009, Pages 5276–5280.

- [44] R. Šulc, P. Svoboda, Alkalická aktivace mletého úletového popílku, In: Ecology and New Buildings Materials and Products - Proceedings of the 13th International Conference. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, a.s., 2009.
- [45] C.D. Atiş, Heat evolution of high-volume fly ash concrete, Cement and Concrete Research, Volume 32, Issue 5, May 2002, Pages 751–756.
- [46] K. Kulísek, V. ČERNÝ. Možnosti tepelné úpravy antracitických popílků pro využití ve stavebnictví. *Stavebné hmoty*. 2009, roč. 5, č. 1.
- [47] R. Hela, Tepelná aktivace elektrárenských popílků., příspěvek na konferenci Betonářské dny Pardubice.Sborník ke konferenci., ISBN 80-238-9644-X, ČBS, Praha, 2002.
- [48] R. Siddique, J. Klaus, nfluence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review, Applied Clay Science, Volume 43, Issues 3–4, March 2009, Pages 392–400.
- [49] Studium vlivu metakaolínu Mefisto K05 na pevnostní vlastnosti modifikovaných cementových malt [online].2008[cit.2012-05-10].Dostupné z:http://www.fce.vutbr.cz/veda/juniorstav_2008_sekce/pdf/4_1/Hurta_Jan_CL.pdf.
- [50] M. Bouasker, P. Mounanga, P. Turcry, A. Loukili, A. Khelidj, Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions, Cement and Concrete Composites, Volume 30, Issue 1, January 2008, Pages 13–22.
- [51] T. Vuk, V. Tinta, R. Gabrovšek, V. Kaučič, The effects of limestone addition, clinker type and fineness on properties of Portland cement, Cement and Concrete Research Volume 31, Issue 1, January 2001, Pages 135–139.

- [52] Přepřacovaný text přednášky z Technické a vědecké cementářské konference 2005 pořádané 27. a 28. října 2005 v Norimberku Německou cementářskou asociací. Autor: Dr-Ing. Ch. Müller, Výzkumný ústav cementářského průmyslu, Düsseldorf. [online]. [cit.11.5.2012].Dostupný naWWW: http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/pdf/vlastnosti_portlandskych_cementu_smesnych.pdf.
- [53] A Naceri, M. Ch. Hamina, Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar, *Waste Management*, Volume 29, Issue 8, August 2009, Pages 2378–2384.
- [54] V. Tydliát, J. Zákoutský, R. Černý ; Hydratace cementu s příměsí cihelné keramiky, příspěvek v časopise *Beton*, vydání 4/2011.
- [55] J.C Benezet, A Benhassaine, Grinding and pozzolanic reactivity of quartz powders, *Powder Technology*, Volume 105, Issues 1–3, 1 November 1999, Pages 167–171.
- [56] S. Guettala, B. Mezghiche, Compressive strength and hydration with age of cement pastes containing dune sand powder, *Construction and Building Materials*, Volume 25, Issue 3, March 2011, Pages 1263–1269.
- [57] A. M. Rashad, S. R. Zeedan, A preliminary study of blended pastes of cement and quartz powder under the effect of elevated temperature, *Construction and Building Materials*, Volume 29, April 2012, Pages 672–681.

6 Seznam tabulek

Tabulka 1. Běžné složení křemičitých úletu

Tabulka 2. Velikost póru v zatvrdlém betonu měřená pomocí rtuťové porozimetrie

Tabulka 3. Typické složení některých vysokopecních strusek

Tabulka 4. Požadavky na chemické vlastnosti mleté vysokopecní granulované strusky

Tabulka 5. Chemické složení popílku z některých našich a slovenských elektráren

Tabulka 6. Chemické složení mikrosiliky SR - Sioxid v hmotnostních %

Tabulka 7. Chemické složení mikrosiliky Stachema

Tabulka 8. Chemické složení strusky

Tabulka 9. Chemické složení serpentinou

Tabulka 10. Složení receptur na m³

Tabulka 11. Celkové porovnání objemových hmotností čerstvého betonu, množství záměsové vody a dosaženého sednutí pomocí Abrasmova kužele

Tabulka 12. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorků REF po 7 dnech

Tabulka 13. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorků REF po 28 dnech

Tabulka 14. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorků REF po 60 dnech

Tabulka 15. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorků STRU10 po 7 dnech

Tabulka 16. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorků STRU10 po 28 dnech

Tabulka 17. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorků STRU10 po 60 dnech

Tabulka 18. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů STRU20 po 7 dnech

Tabulka 19. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů STRU20 po 28 dnech

Tabulka 20. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů STRU20 po 60 dnech

Tabulka 21. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-SR10 po 7 dnech

Tabulka 22. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-SR10 po 28 dnech

Tabulka 23. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-SR10 po 60 dnech

Tabulka 24. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů SEP10 po 7 dnech

Tabulka 25. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů SEP10 po 28 dnech

Tabulka 26. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů SEP10 po 60 dnech

Tabulka 27. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů SEP20 po 7 dnech

Tabulka 28. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů SEP20 po 28 dnech

Tabulka 29. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů SEP20 po 60 dnech

Tabulka 30. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-ST10 po 7 dnech

Tabulka 31. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-ST10 po 28 dnech

Tabulka 32. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-ST10 po 60 dnech
Tabulka 33. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-ST20 po 7 dnech
Tabulka 34. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-ST20 po 28 dnech
Tabulka 35. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů MIK-ST20 po 60 dnech
Tabulka 36. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů KREM10 po 7 dnech
Tabulka 37. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů KREM10 po 28 dnech
Tabulka 38. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů KREM10 po 60 dnech
Tabulka 39. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů KREM20 po 7 dnech
Tabulka 40. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů KREM20 po 28 dnech
Tabulka 41. Pevnost v tlaku a objemová hmotnost vzorů KREM20 po 60 dnech
Tabulka 42. Nárůst pevností v tlaku navržených směsí v závislosti na čase v %

7 Seznam obrázků

Obrázek 1. Vyplnění prostoru zrn cementového tmele křemičitým úletem

Obrázek 2. Rastrovací elektronový mikroskop. (a) tvar a velikost zrn křemičitých úletu (b) aglomerované křemičité úlety

Obrázek 3. Kompaktní CSH gel v betonu s křemičitými úlety. Lze vidět absenci zóny rozhraní mezi zatvrdlou cementovou pastou a zrnem kameniva

Obrázek 4. Ilustrace ze "shora dolů" a "zdola nahoru" výroby v oblasti nanotechnologií

Obrázek 5. Velikost částic a jejich specifický měrný povrch vzhledem ke konkrétnímu materiálu

Obrázek 6. Pevnost v tlaku tří rozdílných směsí v časovém období

Obrázek 7. Změna pevnosti v tlaku, struskového cementu na době hydratace pro AMC50S a BMC50S při odlišné velikosti zrna

Obrázek 8. Změna pevnosti v tlaku s časem hydratace pro AMCXS vzorků ($x = 50 - 95\%$ aktivní strusky) a ICA (40% strusky)

Obrázek 9. Snímek cenosféry (a), plerosféry (b) pořízený pomocí el. mikroskopu

Obrázek 10. Vliv množství CaO v popílku na pevnost velkoobjemového popílkového betonu v tlaku

Obrázek 11. Popílků (a) neupravené, (b) mleté popílků

Obrázek 12. Lis pro stanovení pevnosti v tlaku

8 Seznam grafů

Graf 1. Závislost velikosti středního zrna popílku na době mletí

Graf 2. Změna pevnosti v tlaku v závislosti na čase a vodním součiniteli při jemnosti mletí 3000 cm²/g

Graf 3. Změna pevnosti v tlaku v závislosti na čase a vodním součiniteli při jemnosti mletí 4000 cm²/g

Graf 4. Vliv množství náhrady cihelné drtě za cement, pevnosti v tlaku (a), pevnost v tahu za ohybu (b)

Graf 5. Srovnání hloubky karbonatace u betonu vyrobeného z portlandského cementu a z portlandského cementu s vápencem při náhradě za cement v množství 20, 30 a 35 %

Graf 6. Křivka zrnitosti kameniva frakce 0 – 4 mm Žabčice

Graf 7. Křivka zrnitosti kameniva frakce 8 – 16 mm Olbramovice

Graf 8. Granulometri jemně mletého křemičitého písku

Graf 9. Granulometri strusky

Graf 10. Granulometrie serpentinou

Graf 11. Porovnání objemových hmotností čerstvého betonu

Graf 12. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků REF

Graf 13. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků STRU10

Graf 14. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků STRU20

Graf 15. Vzájemné porovnání pevnosti v tlaku vzorků STRU10 a STRU20

Graf 16. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků MIK-SR10

Graf 17. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků SEP10

Graf 18. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků SEP20

Graf 19. Vzájemné porovnání pevnosti v tlaku vzorků SEP10 a SEP20

Graf 20. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků MIK-ST10

Graf 21. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků MIK-ST20

Graf 22. Vzájemné porovnání pevnosti v tlaku vzorků MIK-ST10 a MIK-ST20

Graf 23. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků KREM10

Graf 24. Porovnání pevnosti v tlaku vzorků KREM20

Graf 25. Vzájemné porovnání pevnosti v tlaku vzorků KREM10 a KREM20

Graf 26. Výsledné pevnosti v tlaku po 7, 28 a 60 dnech

Graf 27. Porovnání výsledných pevností v tlaku po 7, 28 a 60 dnech