

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra silničních staveb

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



**Experimentální ověření alternativních hydraulických pojiv
na bázi fluidních popílku a vysokopecních strusek**

**Experimental verification of alternative hydraulic binders
based on fly ash from fluidized bed and blast furnace slags**

Vypracoval: Pavel Koubík

Studijní program – STAVITELSTVÍ

Studijní obor – Realizace pozemních a inženýrských staveb

Vedoucí práce: Ing. Jan Valentin, Ph.D.

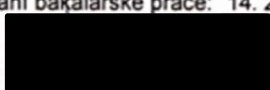
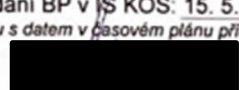
Praha 2022

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

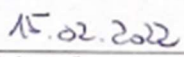

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Koubík	Jméno: Pavel	Osobní číslo: 478682
Zadávací katedra: K136		
Studijní program: Stavitelství		
Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Experimentální ověření alternativních hydraulických pojiv na bázi fluidních popílků a vysokopecních strusek	
Název bakalářské práce anglicky: Experimental verification of alternative hydraulic binders based on fly ash from fluidized bed and blast furnace slags	
Pokyny pro vypracování: Teoretická část: Zpracování rešerše na téma alternativních pojiv pro cementové kompozity, vliv jejich aplikace a způsobů úprav pro cementové kompozity. Experimentální část: Návrh směsí se čtyřmi různými druhy náhrad cementu a výroba cementových past s různým poměrem náhrady cementu. Experimentální ověření základních materiálových vlastností cementových past dle příslušných norem. Porovnání vlivu náhrady na základní materiálové vlastnosti výsledné cementové pasty.	
Seznam doporučené literatury: - Odborné časopisy: eBeton, WasteForum a další články dostupné v databázi Scopus a WoS - Technické normy: ČSN EN 196-1, ČSN EN 196-3 - Vědecké články zabývající se materiálovým výzkumem: Construction and Building Materials, Cement and Concrete Research, Cement and Concrete Composites, Materials	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Jan Valentin, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 14. 2. 2022	Termín odevzdání BP v IS KOS: 15. 5. 2022 <small>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</small>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

<i>Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.</i>	
 Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Praze dne 15. května 2022

.....
Pavel Koubík

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce Ing. Janu Valentinovi, Ph.D. za ochotu, cenné rady, trpělivost a zdravou kritiku během konzultací. Mé poděkování patří i Ing. Zdeňku Proškovi, Ph.D. za cenné rady a obětavou pomoc s experimentální částí práce. Nakonec bych chtěl poděkovat i Filipu Gramanovi a Leoši Jourovi za pomoc s výrobou vzorků a nesmím zapomenout ani na rodinu a přátelé, kteří mě podporovali během bakalářského studia.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá využitím alternativních pojiv na bázi strusek a popílků ve stavebnictví, konkrétně pak jejich využitím jako náhrad cementu. Využití těchto energetických vedlejších produktů by do budoucna vyřešilo problémy spojené s jejich skladováním a především pak problémy s vysokým množstvím emisí CO₂, které vznikají při výrobě cementu a také by ušetřilo přírodní zdroje. Pro jejich experimentální ověření byly vyrobeny zkušební vzorky cementových past, ve kterých byl cement nahrazen v různém poměru popílkem a třemi druhy strusek, které byly aktivovány vysokorychlostním mletím. Na vzorcích byl následně sledován vývoj mechanických vlastností po dobu 90 dní. Dále byl sledován vliv zmíněných alternativních pojiv na vlastnosti čerstvých směsí a to na zpracovatelnost, normální konzistenci a dobu tuhnutí.

Klíčová slova: popílek, struska, vysokorychlostní mletí, cementová pasta, mechanické vlastnosti

Abstract

This bachelor's thesis investigates the use of alternative binders based on slag and fly ash in construction, specifically their use as a substitute for cement. The use of these energy by-products would solve problems with their storage in the future, and especially the problems associated with the high amount of CO₂ emissions resulting from the production of cement, and it would also save natural resources. For their experimental verification, test samples of cement pastes were produced, in which the cement was replaced in various proportions by fly ash and three types of slag, which were then activated by high-speed grinding. The development of mechanical properties was then monitored on the samples for a period of 90 days. Furthermore, the influences of the mentioned alternative binders were studied on the properties of fresh mixtures, namely on the workability, standard consistency and the setting time.

Key words: fly ash, slag, high-speed grinding, cement paste, mechanical properties

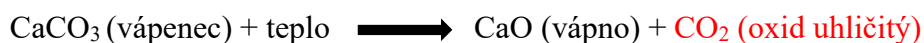
OBSAH

1	Úvod	1
2	Alternativní pojiva.....	3
2.1	Využití strusky a popílků v minulosti.....	7
2.2	Strusky	9
2.3	Popílký.....	16
2.4	Aktivace.....	23
3	Využití strusky a popílků jako náhrad cementu v cementových pastách.....	27
3.1	Čerstvá směs	27
3.2	Zatvrdlá směs.....	29
4	Experimentální metody	38
4.1	Čerstvá směs	38
4.2	Zatvrdlá směs.....	42
5	Použité materiály a vzorky	50
5.1	Specifikace vstupních surovin	50
5.2	Zkušební vzorky	57
6	Výsledky a diskuze.....	60
6.1	Čerstvá směs	60
6.2	Zatvrdlá směs.....	62
7	Závěr.....	71
	Seznam použité literatury	73
	Seznam obrázků.....	81
	Seznam tabulek.....	82
	Seznam grafů	83

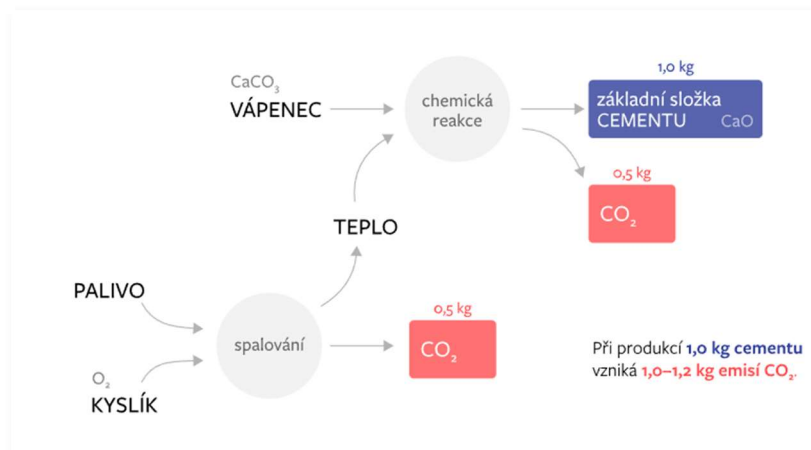
1 ÚVOD

Beton je v současné době jedním z nejvyužívanějších kompozitních stavebních materiálů. Ročně se ho vyprodukuje až přes 10 miliard tun a vzhledem k rostoucím požadavkům společnosti je zřejmé, že v budoucnosti jeho produkce bude výrazně stoupat. Betonová směs se skládá ze tří hlavních složek, kterými jsou pojivo, plnivo, voda a případně přísady a příměsi, které zlepšují či upravují vlastnosti betonu. Nejčastěji využívaným pojivem je portlandský cement, který se používá v 98 % využití betonu [1].

Cement se vyrábí vypalováním rozemletého vápence a jílu při teplotách dosahujících až 1450 °C a vzniklý slínek se poté mele na šedivý prach. Zmíněná výroba cementu představuje globální problém, jelikož při ní dochází ke vzniku obrovského množství emisí CO₂. V roce 2015 představovala výroba cementu 8 % celosvětových emisí CO₂, což je zhruba 2,8 miliard tun [1]. Zhruba 50 % emisí vzniká z chemické reakce výroby cementu, tj. ohřátím vápence za vysoké teploty:



K dosažení vysokých teplot v pecích určených k vypalování vápence se využívá fosilních paliv a při tomto procesu dochází k produkci dalších 40 % emisí. Zbýlých 10 % emisí vzniká při těžbě vápence či jeho dopravě do cementáren [1]. Na *Obrázku 1* pak lze pozorovat, že při výrobě 1 kg cementu vzniká 1 – 1,2 kg emisí.



Obrázek 1 - Produkce CO₂ při výrobě cementu [2]

Dalším negativem je fakt, že vápence je neobnovitelným zdrojem. Nicméně i přes tyto problémy, které způsobuje výroba cementu je jasné, že beton jako stavební materiál má řadu

výhod a v současnosti se bez něj nelze obejít, a to i z důvodu dostupnosti jiných stavebních materiálů. Vzhledem k důvodům zde uvedeným a naplnění Pařížské dohody, která byla sjednána za účelem snížení skleníkových plynů v ovzduší po roce 2020, je na místě najít vhodná alternativní pojiva, která budou mít stejné či dokonce lepší vlastnosti než samotný cement.

Práce se zabývá využitím odpadních produktů z energetického a metalurgického průmyslu v podobě popílků a strusek v cementových kompozitech. Jedná se o produkty, jejichž každoroční produkce významně narůstá i přes veškeré snahy jej recyklovat, a končí tak většinou na skládkách v okolí hutních závodů a elektráren. Z toho vyplývají problémy, které jsou spojené s jejich skladováním, a tím i výskytem jemných částic v ovzduší v blízkosti hald. Novým způsobem, který umožňuje jejich efektivní recyklaci, je vysokorychlostní mletí. Tento způsob recyklace se jeví výhodně i po ekonomické stránce, a proto jej lze využít i v praxi. Pomocí vysokorychlostního mletí lze ze zmíněných odpadních produktů vytvořit materiály s velmi dobrými pojivými vlastnostmi, neboť při něm dochází ke zjemnění jejich částic, a tím pádem i k vytvoření vyššího měrného povrchu zrn, které pak mají vyšší aktivitu v kompozitu. Využití těchto materiálů jako alternativních pojiv tak vyřeší problémy spojené s jejich skladováním, ušetří přírodní zdroje, finance a v neposlední řadě také sníží vysoké množství emisí CO₂, které vznikají při výrobě cementu.

Cílem práce je návrh cementových kompozitů s ideálním poměrem cementu a alternativních pojiv v podobě vysokopecních strusek a fluidních popílků tak, aby bylo dosaženo obdobných či dokonce lepších vlastností než u čistě cementového kompozitu. Dalším cíle je pak porovnat vliv různých náhrad na vlastnosti čerstvých a zatvrdlých směsí.

2 ALTERNATIVNÍ POJIVA

Pojiva lze charakterizovat jako látky, které umí spojit neaktivní sypké nebo kusové materiály v pevnou hmotu, a tato pevná hmota následně zvyšuje svoji pevnost v závislosti na čase během procesu tvrdnutí. Rozdělujeme je dle chemického složení na anorganická – tedy minerální a organická [3]. Z důvodů uvedených v kapitole „1 Úvod“ je zde snaha o částečné nahrazení cementu alternativními pojivy s vhodnými pojivými atributy a to nejlépe takovými, kterých je dostatek, a jedná se o odpadní produkty v jiných odvětvích, tedy nepochází z přírodních zdrojů jako cement. Využití příměsí na bázi popílku, strusek apod. je v současnosti běžné a dostatečně prověřené. Přidávají se do betonu za účelem zlepšení jeho vlastností a trvanlivosti a jejich pozitivní přínos je zdokumentován řadou výzkumů. Tyto příměsi se dělí dle normy ČSN EN 206+A2 na 2 základní druhy:

- **Typ I: Inertní** – jde převážně o výplňové materiály, tzv. filery, které mohou navíc pozitivně ovlivnit výsledné vlastnosti cementu. Do této skupiny řadíme např. jemně mletý vápenec, kamennou moučku a kamenné odprašky. Inertní příměsi zpravidla vyžadují více vody potřebné k ideálnímu omočení povrchu zrn.
- **Typ II: Aktivní** – aktivní příměsi se rozdělují na pucolánové a latentně hydraulické. Pucolánové příměsi charakterizuje vysoký obsah oxidu křemičitého (min. 25 %) a nízký obsah oxidu vápenatého a nejsou tak schopny samovolně reagovat. Přidáním potřebného množství vody a hydroxidu vápenatého vznikají kalciumhydrosilikáty (zkratkou C-S-H), které stojí za konečnou pevností hydraulických cementů. Pucolánové příměsi mohou mít sopečný původ (pemza, tufit), sedimentární (křemičité slíny, opuka) a umělý (elektrárenské popílký, metakaolin). Oproti tomu typickým příkladem latentně hydraulické příměsi je mletá granulovaná vysokopecní struska. Aby struska fungovala jako hydraulické pojivo, tak je nezbytná přítomnost vody a další látky sloužící jako katalyzátor či aktivátor. Aktivátory mohou být alkalické a síranové [4; 5; 6; 7].

Nejvyužívanějším hydraulickým pojivem je cement. Jde o jemně mletou anorganickou látku, která společně s vodou vytváří kaši a tato kaše následně tuhne a tvrdne vlivem hydratačních reakcí a procesů. Proces tvrdnutí a tuhnutí probíhá na vzduchu i ve vodě [8]. Cement, který obsahuje jednu či více příměsí v množství vyšším než 5 % hmotnosti portlandského slínku, nazýváme směsným [9]. Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití jsou

dány normou ČSN EN 197-1 ed. 2. V *Tabulce 1* jsou uvedeny druhy cementu, jejich označení a procentuální obsah jednotlivých příměsí. Zbytek % hm. představuje portlandský slínek.

Tabulka 1 - Cementy pro obecné použití dle ČSN EN 197-1 [8]

Druh	Označení	Obsah složek [% hm.]	Druhy složek: označení	
CEM I	portlandský cement	CEM I	0	pouze slínek
CEM II portlandský cement směsný	portlandský struskový cement	CEM II/A-S	6 až 20	granulovaná vysokopecní struska: S
		CEM II/B-S	21 až 35	
	portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	6 až 10	křemičitý úlet: D
		portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	6 až 20
	CEM II/B-P		21 až 35	přírodní kalcinovaný pucolán: Q
	CEM II/A-Q		6 až 20	
	CEM II/B-Q		21 až 35	
	portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	6 až 20	
		CEM II/B-V	21 až 35	vápenatý popílek: W
		CEM II/A-W	6 až 20	
		CEM II/B-W	21 až 35	
	portlandský cement s kalcinov. břidlicí	CEM II/A-T	6 až 20	
		CEM II/B-T	21 až 35	
	portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	6 až 20	vápenec s TOC ≤ 0,5 % hm.: L
		CEM II/B-L	21 až 35	
		CEM II/A-LL	6 až 20	vápenec s TOC ≤ 0,2 % hm.: LL
CEM II/B-LL			21 až 35	
portlandský směsný cement	CEM II/A-M	12 až 20	obsahuje všechny uvedené složky	
	CEM II/B-M	21 až 35		
CEM III	vysokopecní cement	CEM III/A	36 až 65	vysokopecní struska
		CEM III/B	66 až 80	
		CEM III/C	81 až 95	
CEM IV	pucolánový cement	CEM IV/A	11 až 35	pucolány a popílky
		CEM IV/B	36 až 65	
CEM V	směsný cement	CEM V/A	18 až 30	vysokopecní struska, pucolány a křemičité popílky
		CEM V/B	31 až 50	

Přístup normy ČSN EN 197-1 k vybraným složkám:

1. *Portlandský slínek (K)* – hydraulická látka, která musí být min. ze dvou třetin hmotnosti složena z tri a dikalciumsilikátu, které jsou velmi bohaté na oxid vápenatý. Zbytek hmotnosti tvoří slínkové fáze, které obsahují železo, hliník a jiné sloučeniny. Podíl hmotností oxidu vápenatého a oxidu křemičitého musí být větší než 2,0. Obsah oxidu hořečnatého musí být menší než 5 %.
2. *Granulovaná vysokopecní struska (S)* – latentně hydraulická látka, která vzniká prudkým ochlazením struskové taveniny vzniklé při tavení železné rudy ve vysoké peci. Minimálně dvě třetiny hmotnosti musí tvořit sklovitá struktura, oxid vápenatý (CaO), oxid hořečnatý (MgO) a oxid křemičitý (SiO₂). Zbytek hmotnosti představuje oxid hlinitý a menší množství ostatních sloučenin. Podíl hmotností (CaO + MgO) / (SiO₂) nesmí být menší než 1.

3. *Pucolány (P, Q)* – jde o látky přírodního původu s obsahem oxidu křemičitého, které při jemném namletí a teplotě okolí společně s vodou reagují s rozpuštěným hydroxidem vápenatým. Vlivem této reakce dochází ke vzniku sloučenin křemičitanů vápenatých a hlinitanů vápenatých, které stojí za zvyšující se pevností. Obsah oxidu křemičitého v pucolánových příměsích musí být minimálně 25 % jeho hmotnosti. Mimo aktivní oxid křemičitý obsahují oxid hlinitý a v menším množství oxid železitý a jiné oxidy.
4. *Popílky (V, W)* – popílek se získává elektrostatickým nebo mechanickým odloučením prachových částic ze spalin z pecí. V cementech lze použít pouze takto získaný popílek. K omezení nežádoucího obsahu spálených látek musí být ztráta žíháním dle EN 196-2 po 1 hodině žíhání v rozmezí hodnot 0 až 5 % hm. Použit může být i popílek se ztrátou žíháním v rozmezí hodnot 2 až 7 % hm. a 4 až 9 % hm., ale pouze za předpokladu splnění požadavků na trvanlivost a na slučitelnost s přísadami dle příslušných předpisů pro beton a maltu v oblasti použití. Křemičitý popílek je jemný prášek, který je složen zejména z kulovitých a skelných částic. Jedná se o pucolánovou látku čili složení je téměř stejné jako v bodě 3 s tím rozdílem, že u popílku je kladen důraz na obsah oxidu vápenatého a u pucolánů nikoliv. Obsah aktivního oxidu vápenatého nesmí být vyšší než 10 % hmotnosti a obsah volného oxidu vápenatého menší než 1 % hm. Vápenatý popílek má pucolánové i hydraulické vlastnosti. Obsah aktivního oxidu vápenatého musí být vyšší než 10 % hm. Ve směsi portlandského cementu s 30% náhradou vápenatým popílkem dle ČSN EN 196-3 nesmí mít vápenatý popílek při zkoušení větší objemovou stálost než 10 mm [8; 10].

Další velmi zajímavou příměsí podpořenou řadou výzkumů je metakaolin. Tato pucolánová příměs vzniká kalcinací kaolinitického jílu při teplotách 600 – 800 °C, což je téměř dvakrát menší teplota než při výrobě portlandského slínku. Výroba metakaolinu je tedy prokazatelně šetrnější k životnímu prostředí [11]. K aktivaci metakaolinu dochází během hydratace cementu, kdy reakcí s hydroxidem vápenatým dochází ke vzniku C-S-H gelu a oxidu hlinitého. Výhodou je, že tato reakce je rychlejší než v případě jiných příměsí [12]. Metakaolin se v současnosti hojně využívá společně s cementem k výrobě vysokohodnotných betonů a to z důvodu jeho výborných vlastností. Patří mezi ně vyšší pevnost v tlaku a v tahu za ohybu, snížená propustnost, odolnost proti chemickému napadení, odolnost proti ASR a lepší zpracovatelnost [13]. Nevýhodou metakaolinu je jeho stále vysoká cena, která tak brzdí jeho vysoký potenciál.

Cena za tunu metakaolinu se pohybuje kolem 600 – 700 amerických dolarů, což je zhruba 5násobek ceny portlandského cementu [14].

Schopností kaolinitického jílu se využívá i u tzv. LC3 cementu. Jde o typ směsného portlandského cementu, jehož hlavními složkami jsou z 50 hm. % slínek, 30 hm. % kaolinitický jíl, 15 hm. % vápenec a 5 hm. % sádrovec. Jelikož se ale kaolinitický jíl vykytuje zejména v tropických a subtropických oblastech, tj. na území Indie, jihovýchodní Asie, Číny, střední Afriky a jižní Ameriky, lze jeho využití v Evropě považovat za méně dostupné, a tím pádem i komerčně málo zajímavé [15].

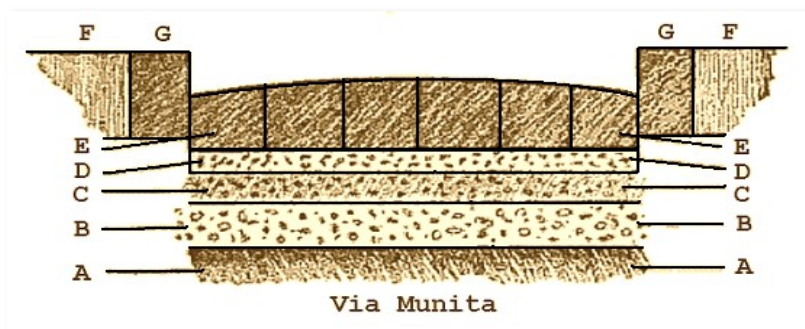
V současnosti je zde snaha i o úplné nahrazení portlandského cementu. Tohoto principu se využívá u tzv. geopolymerního betonu. Geopolymery vznikají reakcí materiálů s vysokým obsahem oxidu křemičitého a oxidu hlinitého (např. popílek, vysokopecní struska, metakaolin) s alkalickými roztoky (např. hydroxid sodný, hydroxid draselný) [16]. Tato reakce způsobí vznik sialátového (trojrozměrného) monomeru (Si-O-Al-O). V průběhu rozpouštění hlinitokřemičitanového prášku v alkalickém roztoku se volné tetraedrické jednotky SiO_4 a AlO_4 slučují sdílením atomu kyslíku a vytváří tak amorfní geopolymery [17]. Bylo zjištěno, že obsah oxidu hlinitého ve vstupních materiálech má vliv na dobu tuhnutí, a podíl oxidu hlinitého a oxidu křemičitého má vliv na nárůst pevnosti v pozdějších fázích [18]. Nespornou výhodou geopolymerního betonu je, že se k jeho výrobě využívají odpadní produkty (viz výše), a neobsahuje žádný portlandský cement. Proto jeho využitím můžeme snížit emise až o 80 % ve srovnání s portlandským cementem. Výzkumy bylo dokázáno, že tento beton má vynikající trvanlivost. Je odolný proti opakovanému mrazu a tání, proti chemickému napadení, proti velmi vysokým teplotám a v neposlední řadě má velmi nízkou propustnost vody a vzduchu [19].

Tato práce se zabývá struskou a popílkem, které řadíme mezi nejpoužívanější minerální příměsi v betonářském průmyslu, a budou podrobněji popsány v následujících kapitolách. Všeobecně lze říct, že vzhledem k technikám jejich zpracování (především popílků) většinou nesplňují normy o jejich přidávání do betonu. Jde hlavně o jejich chemické složení a fyzikální vlastnosti.

2.1 VYUŽITÍ STRUSKY A POPÍLKŮ V MINULOSTI

První zmínky o přidávání popílku do betonové směsi pochází z období starověkého Říma. Sopečný popel neboli pucolán se hojně přidával do betonových směsí určených ke stavbě budov, mezi které patří i římské Koloseum (100 n.l.) a Pantheon (128 n.l.). Tato směs je nazývána římským betonem a vyznačovala se menším obsahem materiálu na bázi cementu, nízkým obsahem vody, pomalejším tvrdnutím a malým smršťováním. Výsledkem byl velmi kvalitní beton, který odolal vnějším negativním vlivům více než 2000 let. Pro porovnání má současný beton životnost do 100 let. Recept na římský beton zmínil významný římský architekt Marcus Vitruvius (kolem r. 30 př.n.l.) ve svých spisech. Jednalo se o směs vápna, mořské vody, sopečného popela a vulkanických hornin. Vzniklá směs se uložila do dřevěných forem, které se následně ponořily do mořské vody. Vědci zjistili, že umístěním směsi do mořské vody dojde k postupnému rozpouštění sopečného popela, a tím dojde ke vzniku nových minerálů. Během několika let dojde ke vzniku hydrotermálního minerálu, který se nazývá hliníkový tobermorit, a právě ten stojí za dlouhodobou trvanlivostí a pevností římského betonu [20; 21; 22].

Popílky a strusky se dále využívaly při stavbě římských cest. Sopečný popel se přidával do cementové malty, která sloužila k zalití plochých kamenů tvořících spodní vrstvu cesty zvanou statumen (viz *Obrázek 2*). Struska se přidávala do směsi cementu, kamenné drti, jílu a písku a společně tvořily první nepropustnou vrstvu cest zvanou nucleus (viz *Obrázek 2*) [23].



Obrázek 2 - Typ římské cesty Via Munita (cesty v Pompejích): A – zhutněná zemina; B – statumen – vrstva z plochých kamenů zalitých maltou; C – audits – vrstva z drceného kamene; D – nucleus – nepropustná vrstva z betonu; E – dorsum – vrchní vrstva cesty z kamenných nebo lávových bloků; F – crepido – dlažba; G – umbones – obrubníky z kamenných bloků [23]

Betony s příměsí popílku a vysokopecní strusky našly obrovské uplatnění i při výstavbách vodních staveb. Mezi lety 1919 – 1930 byl poprvé velkoobjemově použit beton s příměsí vysokopecní strusky na území Nizozemska ke stavbě plavební komory Noordersluis Ijmuiden

v Severním moři. Řadou výzkumů a testů bylo jasně prokázáno, že tento beton je odolnější proti účinkům mořské vody než beton z běžného portlandského cementu. Testy provedené po více než 80 letech funkčnosti plavební komory neodhalily žádné vážné poškození z důvodu chemického napadení či koroze výztuže. Pro porovnání, u zdymadla Afsluitdijk v severním moři postaveného pouze z portlandského cementu bylo po stejné době zjištěno vážné poškození způsobené sírany a alkalicko-křemičitou reakcí [24]. Zhruba v polovině 20. století se začal velkoobjemově využívat popílek v USA. Roku 1942 byl využit k opravě přelivového tunelu Hooverovy přehrady v Nevadě. Mezi lety 1948 – 1952 při stavbě přehrady Hungry Horse v Montaně došlo k nahrazení portlandského cementu ze 35 % hm. uhelným popílkem. Tato přehrada je jednou z největších na světě, kdy k její stavbě bylo zapotřebí cca 2 453 600 m³ betonu [20]. Uhelný popílek ušetřil projektu přes 2 miliony amerických dolarů a stavba se stala vzorem pro užití popílku při stavbách velkých přehrad v USA [25]. Mezi lety 1956 a 1961 došlo k rozsáhlému využití elektrárenského popílku i na území ČR. Jednalo se o výstavbu tělesa přehrady Orlík, která je největším vodním dílem u nás. Elektrárenský popílek byl využit z důvodu omezení maximálních teplot při tvrdnutí betonu společně se strusko-portlandským cementem. Mechanickými zkouškami a analýzou vzorků po více než 50 letech bylo zjištěno, že nahrazením slínku došlo k omezení vysokého nárůstu vývoje hydratačního tepla v rané fázi a jeho produkce se rozložila do delších časových fází. Dále tento beton dosahoval vyšších pevností a snížila se i jeho celková nasákavost [26].

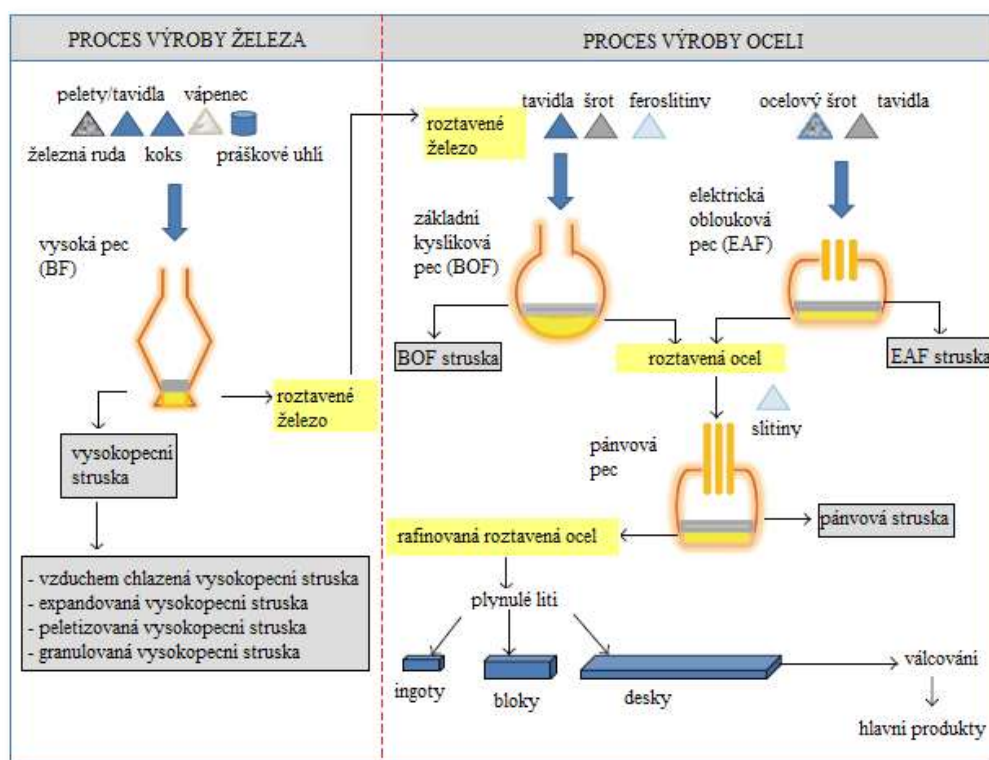
Od 80. let 20. století se začal využívat popílek v USA ve všech stavebních odvětvích. Mezi nejznámější příklady patří metro ve Washingtonu DC., Ronald Reagan Building and International Trade Center, tunel Big Dig v Bostonu, Olympijský stadion v Atlantě a Sunshine Bridge na Floridě [27].

Roku 1982 byla ze strusko-portlandského cementu s příměsí popílku vybudována stanice pražského metra Náměstí Republiky I.B. Šlo o výstavbu základové desky a obvodových stěn západního vestibulu a podchodu, kde bylo použito zhruba 2000 m³ tohoto betonu. O pět let později byly zahájeny stavební práce v JE Temelín. Ke zhotovení základové desky bylo zpracováno 11 050 m³ betonu téhož složení [28].

Minulost nám jasně ukázala, že tyto příměsi lze využít na stavby všeho druhu na základě provedených dlouhodobých průzkumů a testů. Částečnou náhradou slínku popílkem nebo struskou získáme beton s vyšší pevností, trvanlivostí a tím odolností proti agresivnímu prostředí a v neposlední řadě i s nižší cenou.

2.2 STRUSKY

Struska je hrubozrnná látka černého až šedého odstínu, která může být přírodního původu, tj. vulkanického nebo produktem metalurgického průmyslu, kde vzniká jako odpadní produkt při výrobě železa (vysokopecní struska) či výrobě oceli (ocelářská struska), viz *Obrázek 3* [29]. Dle celosvětových statistik z roku 2019 bylo výrobou železa generováno 320 až 384 milionů tun vysokopecní strusky a v případě výroby oceli 190 až 280 milionů tun ocelářské strusky [30]. Z těchto údajů je zřejmé, že tento odpad z velké části končí na skládkách, kde může dojít k jeho zvětvávání a následné kontaminaci životního prostředí. Na základě provedeného výzkumu v hutní oblasti Kabwe na území Zambie bylo zjištěno, že struskový prach ze skládek může mít negativní vliv na lidské zdraví. V případě jeho „požití“ se v lidském těle objeví vysoké množství toxického olova [31]. Strusky z hutního průmyslu mohou velmi efektivně nahradit přírodní suroviny, a proto jsou hojně využívány ve stavebnictví a umožňují tak zredukovat problém s jejich skladováním. Jejich finální využití ve stavebnictví ovlivňuje zejména chemické složení, mineralogické složení a v neposlední řadě způsob chlazení [32]. Před aplikací ve stavebnictví musí projít procesem odsíření, musí být zbaveny nadbytečné vlhkosti a zdraví nebezpečných látek, které se v ní po výrobě železa vyskytují.



Obrázek 3 - Schéma výroby železa a oceli [33]

2.2.1 VYSOKOPECNÍ STRUSKA

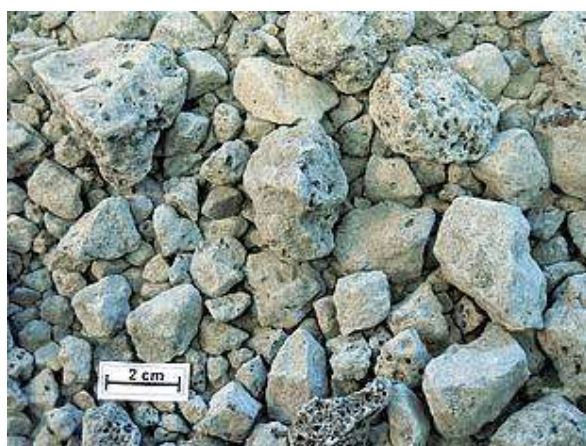
Vysokopecní struska je nejpoužívanějším typem strusky ve stavebnictví. Vzniká jako vedlejší produkt při výrobě železa termochemickou redukcí ve vysoké peci. Základní vstupní surovinou do tohoto procesu je železná ruda (případně pelety) s vysokým obsahem hematitu (Fe_2O_3) a s nízkým obsahem magnetitu (Fe_3O_4). Další surovinou jsou tavidla neboli přísady (vápenec, dolomit), které mají za úkol snížit tavný bod hlušiny, umožnit přechod nežádoucí síry do strusky a zajistit správnou kvalitu surového železa. Železná ruda a tavidla tvoří směs, která je označována jako vsázka, a společně s redukčním činidlem (koks, práškové uhlí) se zaváže do vrchní části vysoké pece pomocí zavážecího systému, jenž zároveň brání nežádoucímu úniku vysokopecního plynu. V místě výfučny se pak přivádí horký dmýchaný proud vzduchu o teplotě 900 – 1350 °C s přidavkem kyslíku včetně pomocných redukčních činidel a spolu vytváří protiproud redukčních plynů. Tento horký proud vzduchu je tedy potřebný ke zvýšení reakční teploty vsázky, pro zplynění koksu, a tím pádem ke vzniku kovového železa. Vzniklé tekuté železo se společně se struskou hromadí v nížeji a musí se soustavně odlévat. Vsázka ve vysoké peci postupně klesá, tím její teplota výrazně roste a dochází ke změnám jejího složení [34]:

- sloučeniny hematitu a magnetitu se redukuje do nižších oxidů železnatých a roztaveného surového železa
- dochází k reakci kyslíku obsaženého v železné rudě s koksem za vzniku oxidu uhelnatého nebo k reakci kyslíku s oxidem uhelnatým za vzniku oxidu uhličitého
- koks působí zároveň i jako palivo a z vysoké pece se vylučuje ve formě oxidu uhličitého a uhelnatého nebo v surovém železe ve formě uhlíku
- sloučením tavidel se složkami hlušin vzniká struska, která má menší hustotu než surové železo, a proto se v nížeji usazuje nad ním. Struska se odpichuje při teplotě 1440° - 1500 °C [34]

V okamžiku odpichování strusky z vysoké pece přichází na řadu její následné zpracování, které lze provést řadou způsobů. Tyto způsoby chlazení mají vliv na hustotu, poréznost a strukturu, která může být sklovitá anebo krystalická. Strusky sklovité struktury mají uplatnění jako cementové materiály a strusky krystalické struktury se využívají jako kamenivo. Podle použité technologie chlazení se vysokopecní strusky dělí na:

- vzduchem chlazená vysokopecní struska
- granulovaná vysokopecní struska
- expandovaná vysokopecní struska
- peletizovaná vysokopecní struska

Vzduchem chlazená vysokopecní struska (ABS) je chlazená při běžných atmosférických podmínkách ve struskové jámě v blízkosti pece nebo i dále, kam se dopravuje pomocí velkých pánví. Tento proces spočívá v postupném plnění a hloubení jámy, kde se vzniklá hrudková struska drtí na hrubé kamenivo. Kropením strusky vodou je možné delší dobu tvrdnutí zkrátit, ale pouze za cenu zvýšeného zápachu sirovodíku, který je pro proces chlazení typickým. Kropení má pozitivní vliv na mikrostrukturu a zlepšuje i mechanické vlastnosti. Nevýhodou tohoto chlazení oproti jiným způsobům je celkově větší pracnost spojená s manipulací a drcením. Tento typ strusky je využíván ve stavebním průmyslu jako kamenivo, a to zejména v silničním stavitelství v nestmelených podkladních vrstvách silnic a v některých zemích potom i v asfaltových směsích [35; 36].



Obrázek 4 - Vzduchem chlazená vysokopecní struska [37]

Granulovaná vysokopecní struska (GBS) se získává rychlým ochlazením. Proces spočívá v nástřiku sladké vody za vysokého tlaku na roztavenou strusku a provádí se v granulační hlavě nebo v granulačních komorách v blízkosti vysoké pece. Chlazení lze provést i vzduchem anebo spolupůsobením vody a vzduchu. Tímto ochlazením kapalně strusky dojde k jejímu ztuhnutí a vytvoří se úlomky velikosti písku (frity) sklovité struktury a materiál, který má jistou podobu slínku. Výsledné vlastnosti granulované strusky jsou ovlivněny chemickým složením strusky,

výrobou a teplotou strusky v okamžiku kalení vodou. Vzniklá granulovaná struska dále podstupuje proces drcení, třídění a mletí, který ovlivňuje následné využití. V současnosti má největší uplatnění mletá granulovaná vysokopecní struska, která má hydraulické vlastnosti jako portlandský cement a využívá se tak k jeho částečné náhradě jako příměs [35; 36].

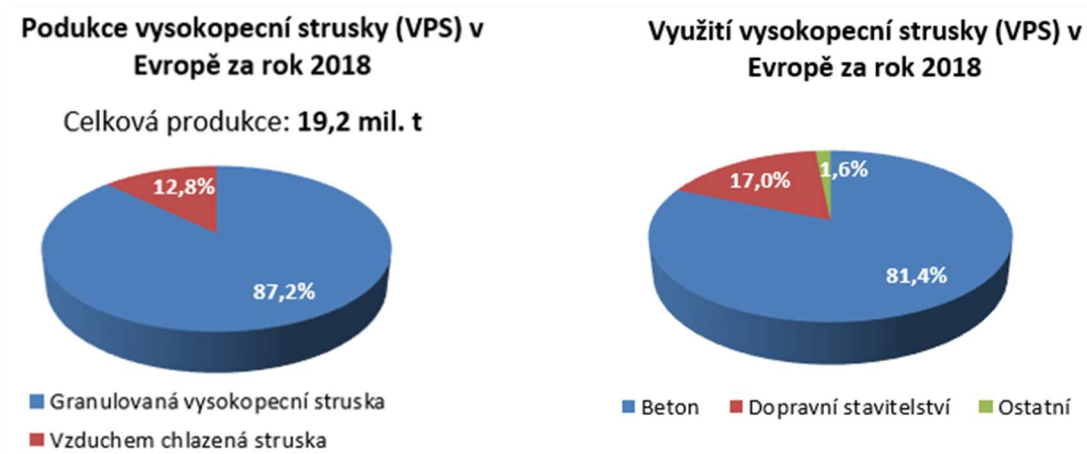


Obrázek 5 - Granulovaná vysokopecní struska [37]

Expandovaná vysokopecní struska vzniká ochlazením kapalně strusky, které je řízeno kontrolovaným množstvím vody. Od granulované strusky se liší zejména tím, že množství potřebné vody je daleko menší. Oproti vzduchem chlazené strusce má nižší objemovou hmotnost z důvodu zvýšené poréznosti. Výsledné vlastnosti expandované strusky jsou ovlivněny množstvím vody a rychlostí chlazení. Chladí-li se pomalu, vznikne krystalický produkt obdobný vzduchem chlazeným struskám. Pokud je proces chlazení rychlejší, dochází ke vzniku sklovitých produktů na bázi granulované strusky [35].

Peletizovaná vysokopecní struska není v Evropě zdaleka tak rozšířena jako např. v Kanadě odkud proces peletizace pochází. Při peletizaci je nanášena vrstva roztavené strusky na desku s funkcí deflektoru. Nanesená vrstva roztavené strusky je pak řezána vodními paprsky, které vyvolají bobtnání a chlazení strusky. Následně je struska pomocí rotujícího bubnu centrifugálně vhazována do vzduchu, kde se dokončuje proces chlazení a výfuku plynů. Výsledkem jsou pelety kulovitěho tvaru se sklovitými parametry [35; 36].

Z *Grafu 1*, který zobrazuje produkci a využití vysokopecní strusky v Evropě za rok 2018, je zřejmé, že v drtivé většině je produkována granulovaná vysokopecní struska, která se jak již bylo zmíněno výše, využívá jako příměs do betonových směsí.



Graf 1 - Produkce a využití VPS v Evropě za rok 2018 [38]

2.2.2 OCELÁRENSKÁ STRUSKA

Ocelářenské strusky vznikají jako vedlejší produkt při výrobě oceli. Na základě použitých vstupních materiálů a principů výroby se dělí na tři základní druhy:

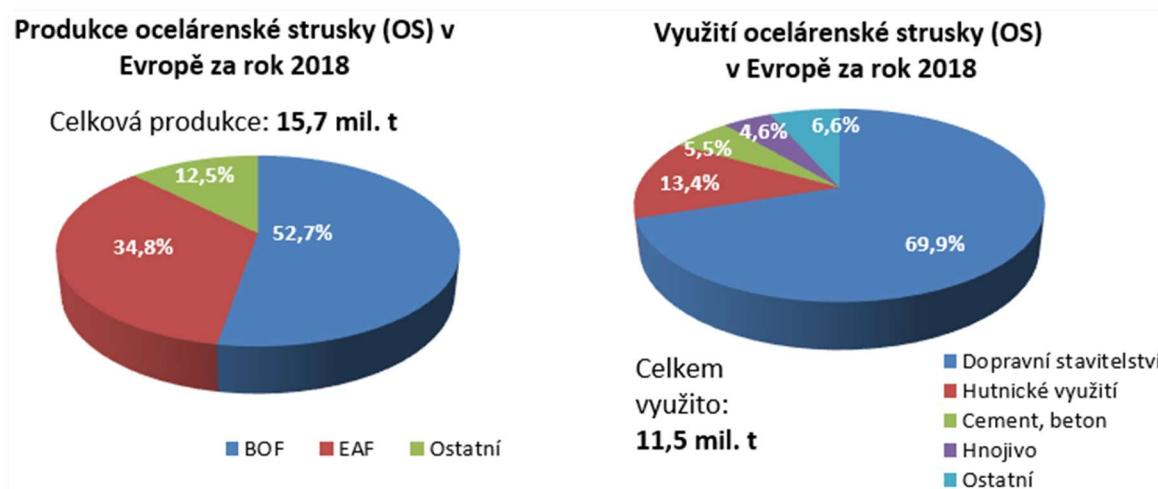
- ocelářská struska BOF (struska z kyslíkových pecí)
- ocelářská struska EAF (struska z elektrických pecí)
- ocelářská pánvová struska (struska z pánvové pece)

BOF struska je produktem kyslíkové pece, která slouží k přeměně roztaveného železa z vysoké pece na ocel. Společně s roztaveným železem jsou do kyslíkové pece přiváděna vápencová nebo dolomitická tavidla a šrot, jehož hlavní funkcí je úprava teploty exotermických reakcí. V následujícím kroku je do pece pod vysokým tlakem tryskou vstříkovan kyslík, který se sdružuje s nečistotami v podobě uhlíku, manganu, křemíku, fosforu a v menší míře kapalných oxidů železa. Uhlík je z pece vylučován prostřednictvím plynného oxidu uhelnatého a zbylé nečistoty reakcí s tavidly tvoří strusku. Vzniklá struska se v některých zemích využívá nebo v minulosti využívala zejména v silničním stavitelství jako kamenivo z důvodu vyšší pevnosti tohoto typu strusky a díky zvýšeným hodnotám protismykových vlastností, které se u přírodního kameniva dosahují jen u malé skupiny hornin [39; 40]. Na straně druhé zde však vznikaly i problémy spojené s tvorbou lokálních fleků rzi, které esteticky působily špatným dojmem. V některých případech, například v Rakousku, se potom projevíly u staveb i účinky objemové nestálosti.

EAF struska je produktem elektrické obloukové pece, která vyrábí ocel elektrickým tavením studeného ocelového šrotu. Tavení je zajištěno teplem, které vytváří tři grafitové elektrody procházející odnímatelným víkem pece, svým tvarem připomínající kotlík. Souběžně s procesem tavení ocelového šrotu dochází k přidávání feroslitin, které jsou nutné pro dosažení potřebného chemického složení vznikající oceli. V dalším kroku je stejně jako u kyslíkové pece vstřikován kyslík, který zbavuje ocel nečistot. Struska, která plave na povrchu oceli, se odlévá nakloněním pece k příslušné nádobě, kde probíhá její následné chlazení při běžných atmosférických podmínkách. Výsledkem je struska, která se stejně jako BOF struska využívá v silničním stavitelství, kde se vzhledem k její odolnosti vůči deformacím uplatňuje především pro povrchové úpravy vozovek [39; 41].

Pánvová struska vzniká dodatečnou rafinací BOF a EAF strusky, která je prováděna za účelem získání požadovaného chemického složení. Jde hlavně o procesy konečného odsiřeni, odplynění, oduhlíčení a finálního zbavení nečistot. Takto získaná struska neodpovídá vlastnostem pecních strusek, a to hlavně z důvodu dodávání velkého množství tavidel, které jsou pro dodatečnou rafinaci zapotřebí [33; 39].

Problémem ocelářských strusek je jejich objemová nestabilita, která je ve stavebnictví velmi nežádoucí. Ta je způsobena obsahem skelné fáze, která je náchylná k rozpadu a hydratací volného oxidu vápenatého, oxidu hořečnatého, karbonatů hydroxidů hořečnatých a vápenatých, polymorfní přeměnou dikalcium silikátů a reakcí aluminátů. Na základě tohoto problému musí být ocelářská struska před využitím ve stavebnictví posouzena laboratorními zkouškami, které musí tyto objemové změny vyloučit [32].



Graf 2 - Produkce a využití OS v Evropě za rok 2018 [38]

2.2.3 CHEMICKÉ SLOŽENÍ METALURGICKÝCH STRUSEK

Chemické složení metalurgických strusek je velmi rozsáhlé téma. K jejich výrobě se využívají různé vstupní materiály a liší se i ve výrobních procesech, které z velké části chemické složení ovlivňují. Typickou a nejvíce zastoupenou složkou těchto strusek je oxid vápenatý a oxid křemičitý, což je dáno taveninami, ze kterých tyto strusky pochází. Dále ve větší míře obsahují oxid hlinitý a hořečnatý a tyto 4 oxidy tvoří zhruba 88 – 92 % jejich hmotnosti. Zásadním rozdílem mezi vysokopecní a ocelářenskou struskou je obsah oxidu železnatého, který je v případě vysokopecní strusky redukován a v případě ocelářenské strusky je výsledkem oxidační reakce. BOF strusky jsou svým chemickým složením téměř totožné se struskami z elektrické obloukové pece na výrobu uhlíkové oceli (EAC-C). Strusky z elektrické obloukové pece na výrobu legované oceli (EAC-S) jsou od ostatních ocelářenských strusek velmi odlišné, a to zejména obsahem oxidu železnatého a vysokým obsahem chromu, který je považován za nebezpečný odpad. U pánvové strusky vzhledem k dodatečným rafinacím je hojně zastoupen hliník [39; 42].

Tabulka 2 - Průměrné chemické složení metalurgických strusek (% hmotnosti) [39; 42]

Složka	Vysokopecní struska	Ocelářenská struska			
		BOF	EAC-C	EAC-S	Pánvová
CaO	35 – 42	30 – 55	35 – 60	39 – 45	30 – 60
SiO ₂	33 – 38	8 – 20	9 – 20	24 – 32	2 – 35
Al ₂ O ₃	10 – 15	1 – 6	2 – 9	3 – 7,5	5 – 35
MgO	7 – 12	5 – 15	5 – 15	8 – 15	1 – 10
FeO	≤1,0	10 – 35	15 – 30	1 – 6	0,1 – 15
MnO	≤1,0	2 – 8	3 – 8	0,4 – 2	0 – 5
P	-	0,2 – 2	0,01 – 0,25	0,01 – 0,07	0,1 – 0,4
S	1 – 1,5	0,05 – 0,15	0,08 – 0,2	0,1 – 0,3	0,1 – 1
Cr	≤0,1	0,1 – 0,5	0,1 – 1	0,1 – 20	0 – 0,5

2.2.4 MINERALOGICKÉ SLOŽENÍ METALURGICKÝCH STRUSEK

Mineralogické složení je ovlivněno chemickým složením a procesem chlazení, kterým je struska zpracována. Struska chlazená vzduchem vytváří krystalickou strukturu, a tím dochází ke vzniku minerálů. Nejvíce zastoupeným minerálem je melilit, který je tvořen gehlenitem (C₂AS) a akermanitem (C₂MS₂). Mezi početně zastoupené minerály se dále řadí merwinit (C₃MS₂), diopsid (CMS₂), vápenec (C), wustit (F) a ferit (C₂F). V menší míře strusky obsahují monticellit (CMS), rankinit (C₃S₂), pseudowollastonit (CS) a oldhamit (CaS). Obsahuje-li

struska ve větším množství vápno, dochází ke vzniku dikalciumsilikátu, který je znám svým zvyšujícím se objemem a tím může rozložit strusku na prášek [35; 43].

2.2.5 PŘÍSTUP NOREM

Norma ČSN EN 197-1 charakterizuje strusku z hlediska jejího využití do směsných cementů. Tato charakteristika je zmíněna na začátku kapitoly „2 Alternativní pojiva“. Požadavky pro využití mleté granulované vysokopecní strusky do betonů či malt jsou předepsány normou ČSN EN 15167-1. Požadavky výše uvedených norem jsou shrnuty v následující tabulce.

Tabulka 3 - Požadavky norem pro využití mleté granulované strusky jako příměsi [8; 44]

Vlastnost	Jednotka	ČSN EN 15167-1	ČSN EN 197-1
Obsah oxidu hořečnatého	% hm.	max. 18	-
Obsah sulfidů	% hm.	max. 2,0	-
Obsah síranů	% hm.	max. 2,5	-
Obsah chloridů	% hm.	max. 0,10	-
Obsah vlhkosti	% hm.	max. 1,0	-
Ztráta žiháním	% hm.	max. 3,0	-
Obsah CaO+MgO+SiO₂	% hm.	-	min. 2/3

2.3 POPÍLKY

Uhlí je v současnosti celosvětovým nejvýznamnějším zdrojem energie. Spalováním fosilního paliva v podobě uhlí bylo v roce 2019 vyrobeno zhruba 9089 TWh elektřiny, což odpovídá 35,2 % světové produkce [45]. Jinak tomu není ani v případě ČR, kde za rok 2020 bylo spalováním uhlí (v drtivé většině hnědého) vyrobeno 42,66 % z celkové produkce elektřiny [46]. Z těchto čísel je patrné, že spalováním uhlí dochází k produkci vysokého množství CO₂ a odpadního produktu popílku, který je vzhledem k jeho pucolánovým vlastnostem hojně využíván ve stavebnictví. Proces spalování uhlí probíhá v elektrárnách a jeho cílem je vytvořit teplo potřebné pro přechod vody z kapalně fáze do plynné, tedy páry. Vzniklá pára pak slouží k pohonu parních turbín, které vyrábí elektrickou energii. Nejvýhodnějším palivem k těmto účelům je antracit (druh černého uhlí), jenž má nejvyšší výhřevnost, naopak lignit (druh hnědého uhlí) ji má nejnižší. Proces spalování může být proveden třemi způsoby, a to vysokoteplotním spalováním, spalováním ve fluidním loži a suchým spalováním. Popílký vzniklé při suchém spalování nejsou příliš vhodné pro stavební účely, jelikož mají malý podíl sklovitých částic [47].

Popílek lze charakterizovat jako jemně zrnitý prášek se sklovitou strukturou, který vzniká jako odpadní materiál při spalování antracitu, hnědého a černého uhlí, kde je zachycován ze

vzniklých plynů prostřednictvím elektrostatických či mechanických odlučovačů. Vzhledem k četnosti výrobních procesů, při kterých jsou používány různé druhy kotlů, techniky spalování, způsoby odlučování a druhy spalovaného uhlí, mohou mít vzniklé popílků zcela variabilní chemické, mineralogické a granulometrické složení. V betonářském průmyslu se více využívá popílků vzniklých z černého uhlí, jelikož nemají tak proměnlivé vlastnosti jako popílků z hnědého uhlí [48].

2.3.1 ČLENĚNÍ POPÍLKŮ A PŘÍSTUP NOREM

Základní členění popílků je dáno normou **ČSN EN 197-1**, která popílků rozděljuje na základě jejich složení na křemičité (V) a vápenaté (W). Toto rozdělení je již popsáno v úvodu kapitoly „2 Alternativní pojiva“. V řadě publikací se popílků rozdělují podle **ASTM C618** (American Society for Testing and Materials) na třídy typu F a C. Do *třídy F* patří popílků vzniklé ze spalování antracitu nebo bituminózního uhlí. Tyto popílků mají pucolánové vlastnosti. Do *třídy C* patří popílků vzniklé ze spalování lignitu nebo subbituminózního uhlí. Pro tyto popílků je typický vyšší obsah vápníku než 10 % hm. a mají společně s pucolánovými vlastnostmi i hydraulické [47]. Další možností klasifikace popílků je klasifikace dle **mezinárodního klasifikačního systému**. Tento systém člení popílků dle podílu $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ na 4 skupiny, a to na aluminosilikátové (>2), silikátoaluminátové (<2), sulfátoalkalické a jiné (např. vápenaté). Popílků lze klasifikovat i dle kanadské normy **CSA.A24**, která je rozděljuje na základě jejich obsahu vápníku. Popílků s nízkým obsahem vápníku (<8 % hm.) jsou označovány typem F, se středním obsahem vápníku (8 – 10 % hm.) typem Cl a typem CH jsou označovány popílků s vysokým obsahem vápníku (>20 % hm.) [49].

O použití popílků do betonu pojednává norma **ČSN EN 206+A2**, která odkazuje na normy **ČSN EN 450** a **ČSN EN 12620+A1**, které stanovují požadavky pro toto využití [7]. Všechny požadavky těchto norem jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 4 - Požadavky na popílky pro jejich použití do betonu [48; 50; 51].

Vlastnost dle způsobu užití popílku	Jednotka	Pucolánová příměs druhu II ČSN EN 450	Filer jako kamenivo příměs druhu I ČSN EN 12620+A1
Ztráta žiháním	% hm.	max. 5,0 ¹⁾	-
Obsah SO ₃	% hm.	max. 3,0	max. 0,8
Obsah celkové síry	% hm.	-	1,0
Obsah chloridů v přep. Na Cl	% hm.	max. 0,10	0,03/0,06/0,15 ⁶⁾
Obsah aktivního CaO	% hm.	max. 10	-
Obsah volného CaO	% hm.	max 1,5 ²⁾	-
Obsah SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	% hm.	min. 70	-
Obsah MgO	% hm.	max. 4,0	-
Jemnost, zb. na síť 0,045 mm	% hm.	max. 40 ³⁾	-
Sítový rozbor, zbytek na síť:			
2 mm			100
0,125 mm	%	-	85 – 100
0,063 mm			70 – 100
Obsah aktivního SiO ₂	% hm.	min. 25	-
Objemová stálost (roztlačnost)	mm	max. 10 ²⁾	-
Index účinnosti po 28 (90) dnech	%	min. 75 popř. 85	-
Měrná hmotnost (tolerance)	kg·m ⁻³	max. ± 200 ⁴⁾	-

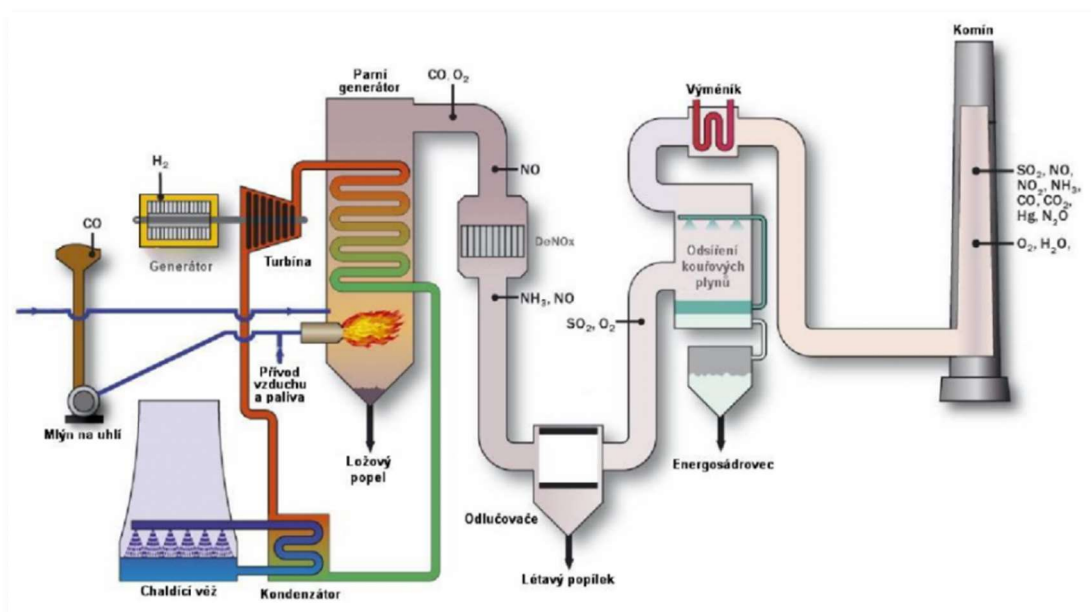
Poznámky k Tabulce 4:

- 1) Na národní úrovni je dovoleno používat popílky se ztrátou žiháním až do 7 % hmotnosti.
- 2) Popílek s obsahem volného oxidu vápenatého více než 1,5 % hmotnosti, ale méně než 2,5 % hmotnosti, je přijatelný za předpokladu, že vyhoví požadavkům na objemovou stálost.
- 3) Jemnost mletí popílku nesmí kolísat o více než ± 10 % z průměrné hodnoty, která je stanovena za předem dané časové období výrobcem.
- 4) Tolerance od průměrné hodnoty uváděné výrobcem.
- 5) Limit hodnoty stanoven vyhláškou SÚJB č. 184/1997 Sb.
- 6) Maximální hodnoty pro předpjatý, železový a prostý beton vodu rozpustných Cl- k hmotnosti celkového kameniva.
- 7) Počátek tuhnutí u cementové kaše tvořené ze 75 % cementem a 25 % popílkem nesmí být dvakrát delší než počátek tuhnutí u cementové kaše tvořené ze 100 % cementem.

2.3.2 VYSOKOTEPLTNÍ POPÍLEK

Vysokoteplotní popílký jsou vedlejším produktem spalování uhlí v práškovém ohništi při teplotách v rozmezí 1200 – 1700 °C. Při tomto procesu vznikají společně s úletovým popílkem v menší míře i další nespalitelné zbytky v podobě strusky a energosádrovce, který vzniká důsledkem nezbytného odsiřovacího procesu spalin prostřednictvím mokré vápencové vypírky [52; 53].

Práškové ohniště slouží ke spalování jemně mletého uhelného prášku, který je do prostoru ohniště pneumaticky dopravován tryskami hořáku společně se spalovacím vzduchem. Část tohoto spalovacího vzduchu (primární vzduch) slouží jako nosné prostředí pro uhelný prášek a zbylá část vzduchu (sekundární vzduch) je přiváděna do spalovacího prostoru, kde se slučuje se směsí primárního vzduchu a práškového uhlí. Pro dosažení požadované účinnosti spalování je nutné, aby byl uhelný prášek dostatečně namletý. Doba setrvání paliva v ohništi totiž musí být delší než doba nezbytná k ideálnímu spálení částičky. Cílem práškového ohniště je tedy garantovat výpal paliva na co nejmenší nedopal a současně zajistit ochlazení spalin na teplotu umožňující vznik nánosů na výhřevných plochách. Popílek opouští prostor spalovací komory společně se spalinami a musí být zachycen v objemných odlučovačích. Prášková ohniště se dělí podle teploty spalování na granulační a výtavná. V případě granulačního ohniště je teplota spalování nízká a struska opouští ohniště v tuhé podobě. U výtavného ohniště je teplota spalování vysoká a struska vytéká tekutá. Nespornou výhodou kotlů fungujících na principu práškového ohniště je jejich výkon, účinnost spalování a široký výběr spalovaných paliv [54].



Obrázek 6 - Schéma vysokoteplotního spalování práškového uhlí [55]

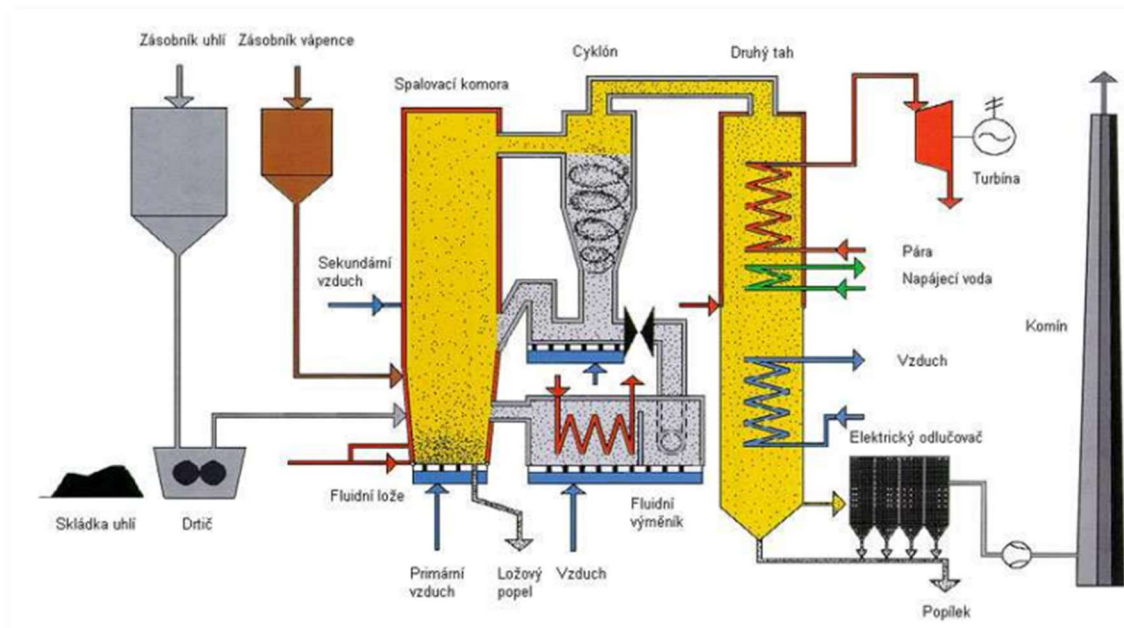
Popílky vznikající při procesu vysokoteplotního spalování jsou označovány jako soubor kulovitých částic obsahující amorfni a krystalické složky. Reaktivita těchto popílků s portlandským cementem za běžných teplot je spojena zejména s amorfni složkou, která je složena z látek na bázi mullitu a je zde zastoupena v 50 a více % hmotnosti [56].

U vysokoteplotních popílků určených pro stavební průmysl se musí hlídat obsah karbonátů v uhlí, které vstupuje do procesu spalování. Při spalování tohoto uhlí dochází ke vzniku oxidu vápenatého, který reaguje s oxidem siřičitým za vzniku síranu vápenatého. Síran vápenatý se vlivem panujících vysokých teplot rozkládá na kyslík, oxid siřičitý a oxid vápenatý, který je při těchto teplotách téměř nereaktivní, a je označován jako mrtvé pálené vápno. Tyto popílky se projevují zpožděnou hydratací vedoucí k objemovým změnám [57].

2.3.3 FLUIDNÍ POPÍLEK

Při procesu fluidního spalování je spolu s palivem ve spalovací komoře spalován sorbent, jehož finální množství je dáno obsahem síry v uhlí. K odsíření se nejčastěji využívá mletý vápenec a z tohoto důvodu je pro fluidní popílek typický vyšší obsah CaO. Tento proces probíhá při teplotě cca 850 °C, což je výrazně méně než u vysokoteplotního spalování, a nedochází tak k příliš vysoké produkci CO₂ [58]. Základem tohoto procesu je uvedení inertního materiálu ve spalovací zóně do spalovací teploty. Jako inertní materiál se využívá popel z vlastního paliva anebo materiály jako křemičitý písek či keramzit, které se prostřednictvím mnoha vzduchových trysek přivádí do kapalné podoby (fluidního stavu). Následný přenos hmoty a proces transportu tepla se tak koná mezi kapalinou a výhřevnou plochou. Další krok spočívá v přívodu drceného paliva a aditiv do vzniklé fluidní vrstvy. Množství přiváděného paliva je zhruba 2 – 3 % hmotnosti fluidní vrstvy. Přívodem intenzivního proudu spalovacího vzduchu dojde k porušení stability inertních a uhelných látek v ohništi a fluidní vrstva se vlivem změny svého objemu začne vznášet. Ve vrchní části spalovací komory přechází fluidní vrstva do cyklonového odlučovače, kde probíhá oddělení vzniklých spalin a tuhých částic. Tyto tuhé částice jsou pak přivedeny zpět do dolní části spalovací komory a celý proces se opakuje [54].

Při fluidním spalování dochází ke vzniku dvou typů popílků s různou velikostí jeho částic. Prvním typem je *ložový popel*, který se z větší míry skládá z hrubých částic, které propadly roštem pod fluidním prstencem během procesu spalování. Pro tento typ popelu je typický vyšší obsah měkce páleného vápna a anhydritu, a proto vykazuje vynikající hydraulické vlastnosti. Druhým typem je *popílek úletový*, příp. filtrový, který je naopak složen z malých a lehkých částic získaných v elektrických odlučovačích ze spalin v místě komínu [57].



Obrázek 7 - Schéma fluidního spalování uhlí [59]

Fluidní popílký se ve stavebním průmyslu využívaly jen zřídka a ve velké míře tak končily na skládkách. Tyto popílký totiž obsahují velké množství síry, která způsobuje vznik ettringitu, což je objemově nestálý minerál a ve stavebnictví tudíž nežádoucí. Dále bylo provedenou studií zjištěno, že fluidní popílký dlouhodobě uskladněné na skládce postupně zvětrávají, a tím prochází značnými mineralogickými změnami, které jsou výhodné pro jejich budoucí využití ve stavebním průmyslu [60].

Fluidní spalování je v porovnání s klasickým vysokoteplotním spalováním daleko účinnější a šetrnější k životnímu prostředí, což je ovlivněno menší spalovací teplotou, a tedy menší produkcí škodlivých látek. Tyto poznatky vedou k vyššímu využívání této metody spalování a produkce fluidních popílký se tím logicky zvyšuje. Problém fluidních popílký je ale v jejich chemickém složení a fyzikálních vlastnostech, které nesplňují kritéria předepsané normou ČSN EN 450-1, která pojednává o jejich použití jako příměsí do betonu [48].

2.3.4 CHEMICKÉ SLOŽENÍ

Chemické složení popílký ovlivňuje řada faktorů, a tudíž lze konstatovat, že každý popílek má jiné chemické složení. Tento fakt je ovlivňován především typem spalování, typem spalovaného uhlí a procesem odsíření, což je pro každou elektrárnu jiné. Zásadní rozdíl v chemickém složení mezi vysokoteplotním a fluidním popílkem je v obsahu CaO. Jak již bylo zmíněno v podkapitole „2.3.3 Fluidní popílek“, tak problém spojený se sírou ve fluidních popílcích je v současnosti řešený přidáváním mletého vápence jako aditiva do drceného uhlí

přímo do kotle, a to má za následek zvýšený obsah CaO v popílcích. Naproti tomu u vysokoteplotních popílků je tato hodnota daleko nižší, neboť proces přidávání vápencového sorbentu probíhá až v absorptéru, kde se odsířují spaliny bez popílků a mimo jiné dochází ke vzniku energosádrovce [49]. Příklad chemického složení vybraných tuzemských popílků je zobrazeno v následující tabulce.

Tabulka 5 - Chemické složení fluidních a vysokoteplotního popílku [49]

	Fluidní popílek Hodonín	Fluidní popílek Tisová	Fluidní popílek Ledvice	Vysokoteplotní popílek Mělník
SiO ₂	32,5	35,0	36,7	57,3
Al ₂ O ₃	16,0	23,3	25,4	29,3
Fe ₂ O ₃	6,7	5,5	6,5	5,1
TiO ₂	0,6	5,4	1,8	1,7
CaO	24,5	21,5	19,5	2,2
MgO	3,4	1,6	1,1	1,4
MnO	0,1	0,1	0,1	0,0
K ₂ O	0,8	0,5	1,5	1,6
Na ₂ O	0,1	0,1	0,3	0,1
SO ₃	4,0	2,5	3,3	0,1
ztráta žháním	4,5	4,5	3,8	1,2

Zvýšený obsah CaO u fluidních popílků je patrný i z této tabulky, kde jsou zvýšené hodnoty CaO označeny červenou barvou. Dle normy ČSN EN 450-1 je maximální množství aktivního CaO v popílku využívaného do betonu 10 % jeho hmotnosti (viz Tabulka 4). U fluidních popílků z elektráren Hodonín a Ledvice dokonce nestačil proces odsíření pomocí vápencového sorbentu ke snížení celkového obsahu SO₃ pod 3 % hmotnosti popílku a jedná se o další nesplněné kritérium této normy. Dále lze pozorovat, že všechny z uvedených fluidních popílků nelze využít dle normy ČSN EN 12620+A1 ani jako kamenivo do betonu. Obsah SO₃ je totiž vyšší než předepsaných 0,8 %.

2.3.5 MINERALOGICKÉ SLOŽENÍ

Mineralogické složení popílků vychází zejména z typu spalování a jeho teploty, z vlastností a složení uhlí, které je vstupním produktem do procesu spalování. Popílků jsou z největší části (50 – 90 %) tvořeny minerály se skelnou strukturou, která je následkem jejich prudkého ochlazení. V menší části se v nich vyskytují minerály s krystalickou strukturou. Dále jsou tyto popílků až z 16 % složeny z částic uhlíku, což je ovlivněno teplotou a rychlostí spalování, poměrem paliva a vzduchu, povahou spalovaného uhlí a velikostí částic práškového uhlí. Mezi nejvýznamnější minerály v popílku z černého uhlí patří magnetit (0,8 – 6,5 %),

hematit (1,1 – 2,7 %), křemen (2,2 – 8,5 %), mullit (6,5 – 9 %) a volný oxid vápenatý (do 3 %). Do 2,5 % hm. obsahuje wustit, goethit, pyrit, kalcit, anhydrit a periklas [47]. Na základě provedené RTG difrakční analýzy bylo zjištěno, že fluidní popílky v největší míře obsahují anhydrit, sádrovec, kalcit a oxid vápenatý. V menší míře je pozorováno zastoupení křemene a metakaolinitu. Vysokoteplotní popílky jsou složeny především z mullitu a křemene. Dále obsahují cristobalit a skelnou fázi, která je následkem vyšší teploty spalování [49].

2.4 AKTIVACE

2.4.1 ALKALICKÁ AKTIVACE

Alkalická aktivace je označení pro proces přeměny sklovité struktury prekurzoru, tj. pevných aluminosilikátů do kompaktních tvarů za alkalických podmínek daných aktivátorem. Tento aktivátor způsobí narušení vazby mezi křemičitanovými a hlinitanovými mnohostěny, které pak společně se vzniklými ionty přechází do tekuté fáze a tím umožňují vznik nových vazeb, které tvrdnou do kompaktních tvarů [61; 62].

V současnosti rozeznáváme dva hlavní způsoby výroby alkalicky aktivovaných pojiv. Nejčastějším způsobem je systém jednosložkový čili suchý prášek v kombinaci s vodou. Druhým způsobem je systém dvousložkový, kde se využívá tekutého aktivátoru. Jako pevné prekurzory jsou nejčastěji využívány aluminosilikátové doplňkové cementové materiály jako vysokopecní struska, uhelný popílek, kalcinované jíly a přírodní pucolány. Tyto materiály jsou v tomto odvětví považovány za nejúčinnější a dostatečně prověřené. Aby bylo možné tyto materiály využít při alkalické aktivaci, musí být dostatečně reaktivní, a proto musí projít procesem úpravy, kdy je nejčastěji využíváno procesu mletí [61]. Alkalické aktivátory rozdělil roku 1980 profesor Gluchovsky dle jejich chemického složení do šesti základních skupin, a to na [63]:

- silné zásady: MOH
- nesilikátové soli slabých kyselin: M_2CO_3 , M_2SO_3 , M_3PO_4 , MF
- silikáty: $M_2O \cdot nSiO_2$
- hlinitany: $M_2O \cdot nAl_2O_3$
- hlinitokřemičitany: $M_2O \cdot Al_2O_3 \cdot (2-6) SiO_2$
- nesilikátové soli silných kyselin: M_2SO_4

Finální volba aktivátoru vychází především z chemického složení aktivovaného materiálu. K aktivaci strusek jsou nejvhodnější alkalické křemičitany (vodní sklo), hydroxidy anebo uhličitany, ale z ekonomických důvodů se nejčastěji využívají sloučeniny sodíku. V praxi se dále lze setkat s využitím hydroxidu vápenatého, jeho kombinace se sádrovcem a také kombinace hydroxidu sodného a sádrovce vápníku [63]. Účinností jednotlivých aktivátorů pro různé pevné prekurzory se zabývali Provis a Deventer [64] a jejich zjištění jsou uvedeny v *Tabulce 6*. Při aplikaci aktivátorů se musí dávat velký pozor na jejich dávkování, neboť jeho vyšší koncentrace může zapříčinit degradaci pojiva, která se pak může projevit poklesem pevností [63].

Tabulka 6 – Účinnost vybraných alkalických aktivátorů [64]

Prekurzor	Alkalický aktivátor			
	MOH	M ₂ O·nSiO ₂	M ₂ CO ₃	M ₂ SO ₄
vysokopecní struska	přijatelná	žádoucí	dobrá	přijatelná
ocelářská struska	-	žádoucí	-	-
fluidní popílek	žádoucí	žádoucí	nežádoucí, *	*
vysokoteplotní popílek	-	přijatelná	-	-
pucolán	žádoucí	žádoucí	-	-

Poznámky k *Tabulce 6*:

Žádoucí – použitím daného aktivátoru vzniká vysoce výkonné pojivo.

Přijatelná – použitím daného aktivátoru vzniká poměrně výkonné pojivo, ale můžou nastat problémy spojené s jeho pevností, trvanlivostí a zpracovatelností.

Dobrá – použitím daného aktivátoru vzniká pojivo s řadou nevýhod, ale použitelné.

Nežádoucí – použitím daného aktivátoru vzniká pojivo se špatnými vlastnostmi.

* přidáním cementu/slínku vzniká pojivo s přijatelnými vlastnostmi.

- výsledky nejsou k dispozici.

Efektivita alkalicky aktivovaných pojiv byla v mnoha ohledech prokázána a mají tudíž velmi široký rozsah využití. Lze je využít např. v železobetonu, v prostém betonu, k výrobě betonových prefabrikátů, v maltách, spárovacích hmotách a omítkách, k výrobě lehkých betonů atd. [61].

2.4.2 VYSOKORYCHLOSTNÍ MLETÍ

Mletí lze charakterizovat jako proces, při kterém dochází ke zjemňování částic, a tím zvětšování měrného povrchu určitých produktů a dále ho lze také definovat i jako proces otevírání zrn. Tento proces se tedy využívá ke zlepšení finálních vlastností produktů, ze kterých pak lze těžit v řadě odvětví. Počátky mletí sahají až do dob starověku, kde ho naši předchůdci využívali především k výrobě léčiv, potravin a v neposlední řadě ke zpracování nerostných surovin nejčastěji za účelem získání kovů. Postupem času se mletí stalo nedílnou součástí téměř všech průmyslových výrob. V současnosti využívané technologické procesy mletí v klasických mlýnech (kulové, prstencové, tyčové, kolové, vibrační atd.) nejsou zdaleka tak energeticky účinné, jak by se očekávalo. Většina energie je totiž spotřebována formou tepla a nedá se s ní tedy počítat pro proces zjemnění částic mletého materiálu. Klasické mlýny jsou navíc poměrně těžké a velké vzhledem k jejich nízkému styku povrchu pracovních těles s částicemi mletého materiálu. Z těchto důvodů je zde v současnosti snaha vymýšlet nové technologie mletí, které budou daleko účinnější. Jednou takovou technologií je vysokorychlostní mletí [65].

Vysokorychlostní mletí spadá do kategorie vysokoenergetického mletí, pro které je typické velké množství předané energie na jednotku mletého materiálu. Princip vysokorychlostního mletí vychází z klasického mletí, tudíž jeho hlavním účelem je zjemnění zrnitosti, zvětšení měrného povrchu a otevření zrn mletého materiálu. Během procesu vysokorychlostního mletí dochází k jevům (efektům), které nelze při mletí v klasických mlýnech pozorovat. Vlivem těchto jevů zůstává část vynaložené energie přímo v mletých materiálech, což je zásadní rozdíl oproti klasickému mletí, kde je energie přeměněna na teplo. U anorganických materiálů jsou viděny jevy jako mechano-chemická (mechanická) aktivace, vznik většího množství nanočástic a částic o velikosti mikronu a někdy i efektivnější využití energie na vznik nových povrchů [65].



Obrázek 8 - Vysokorychlostní mlýn [63]

Mechano-chemická aktivace má výrazný vliv na efektivitu využití energie vynaložené k namletí materiálu a to zejména z důvodu jejího hromadění v podobě zvýšené entalpie mleté látky. Vlivem tohoto jevu ve vysokorychlostních mlecích zařízeních dále dochází k chemickým reakcím v pevném stavu během mletí (např. oxidace), k tvorbě mech. slitin kovových materiálů během mletí, k vyvolání fázových změn v různých látkách a k průběhu katalytických reakcí jak v organických, tak anorganických systémech během mletí [65].

Výzkumem bylo zjištěno, že vysokorychlostním mletím lze pozitivně ovlivnit především vlastnosti fluidních popílků, jelikož během mletí dochází k porušení jejich současných vazeb a tím k homogenizaci výsledného materiálu. Tímto procesem tedy lze zabránit vzniku nežádoucího ettringitu, thaumasitu a dalších látek spojených s objemovými změnami, díky kterým byl fluidní popílek dříve považován za téměř nepoužitelný ve stavebním průmyslu. Fluidní popílký prošlé tímto procesem úpravy lze účinně aplikovat ve stavebním průmyslu např. jako náhrady hydraulických pojiv, moderní mostní závěry a jako náhrady filerů pro asfaltové směsi za horka. Z těchto poznatků lze tedy konstatovat, že vysokorychlostní mletí má obrovský potenciál do budoucna jak z hlediska funkčního, tak i ekonomického [66].

3 VYUŽITÍ STRUSKY A POPÍLKŮ JAKO NÁHRAD CEMENTU V CEMENTOVÝCH PASTÁCH

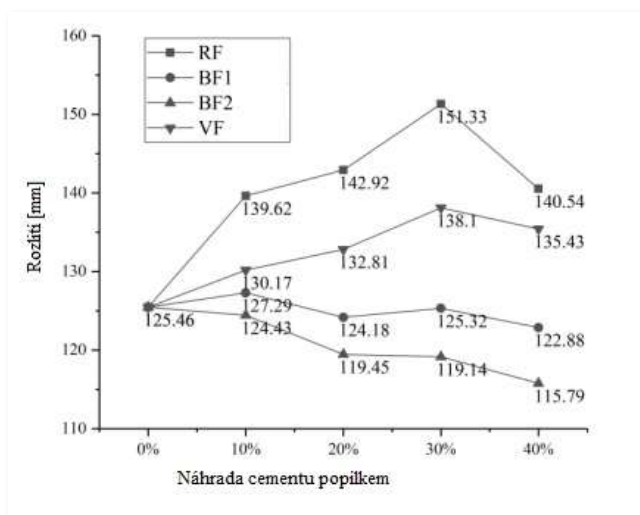
V této kapitole budou shrnuty výsledky provedených výzkumů, které se zabývají touto tematikou. Pro větší přehled bude vliv strusky a popílků v cementových pastách rozdělený pro čerstvé a zatvrdlé směsi. Poznatky této kapitoly budou srovnány s výsledky experimentální části této práce, které jsou uvedené v kapitole „6 Výsledky a diskuze“.

3.1 ČERSTVÁ SMĚS

3.1.1 KONZISTENCE ČERSTVÉ MALTY

Hanzálek [67] ve své práci provedl zkoušku konzistence čerstvé malty, kde byl portlandský cement nahrazován dvěma druhy mikromletých strusek v množství 10 – 50 % hmotnosti. Jednalo se o granulovanou vysokopecní strusku (O) a ocelářenskou strusku (K). Vodní součinitel byl u všech směsí roven 0,5. Ze zpracovaných dat je patrné, že se zvyšujícím se obsahem strusky ve směsi roste téměř lineárně její tekutost. Rozlití u referenčního vzorku vyšlo po 20 klepnutí střešacího stolku 142 mm. U strusky K se rozlití pohybovalo v rozmezí hodnot 141 – 179 mm. Rozlití u strusky O dosahovalo vyšších hodnot (140 – 195 mm). Tyto vyšší hodnoty odůvodňuje autor tím, že struska O byla při zpracování prašnější, tudíž i jemnější než struska K.

Ma a kol. [68] v rámci svého výzkumu provedli zkoušku konzistence čerstvé malty, kde nahradili portlandský cement neupraveným popílkem (RF), popílkem namletým v kulovém mlýnu po dobu 1 hodiny (BF1) a 2 hodin (BF2) a popílkem, který prošel procesem mletí ve vertikálním mlýnu (VF). V tomto výzkumu byl cement nahrazen z 10 – 40 % hmotnosti a vodní součinitel byl 0,5. Z *Grafu 3* je zřejmé, že u popílků BF1 a BF2 klesá rozlití se zvyšujícím se množstvím popílků v maltě, což je způsobeno porušením jeho kulovitých částic během procesu mletí v kulovém mlýně. Zajímavé je, že do 30% nahrazení se hodnoty rozlití zvyšují nebo jsou téměř konstantní, a při 30% a vyšším nahrazení dochází k intenzivním poklesům hodnot rozlití, což lze pozorovat především u vzorku RF, kde došlo ke snížení zhruba o 11 mm. Autoři došli k závěru, že v cementové pastě by mělo být optimální množství kulovitých částic. Pokud je v pastě větší množství těchto částic, tak se zvyšuje počet pórů, a díky tomu větší povrch částic popílku potřebuje více vody nutné k pohybu pevných částic.



Graf 3 - Rozliti cementových past s různými typy popílku [68]

3.1.2 NORMÁLNÍ KONZISTENCE A DOBA TUHNUTÍ

Normální konzistenci a dobou tuhnutí cementových past s obsahem strusky se v rámci výzkumu zabývali Zhu a kol. [69]. Jako částečnou náhradu portlandského cementu zvolili granulovanou vysokopecní strusku, která prošla procesem vysokorychlostního mletí. Tuto strusku pak rozdělili pomocí standartních sít podle velikosti jejich částic na SA (200 – 300 mikronů), SB (300 – 400 mikronů) a SC (menší než 400 mikronů) a pozorovali vliv velikosti částic strusky na dobu tuhnutí. Portlandský cement byl nahrazován v rozmezí 10 – 40 % hmotnosti. U referenčního vzorku byla stanovena normální konzistence 26,7 %, počátek tuhnutí byl 115 minut a konec tuhnutí 195 minut. V případě vzorku SA normální konzistence lineárně klesala s rostoucím obsahem strusky od 26,4 % k 26 %. Se zvyšujícím se obsahem strusky se naopak doba tuhnutí prodlužovala. Počátek tuhnutí se pohyboval v rozmezí 125 – 155 minut a konec tuhnutí byl od 213 do 314 minut. U směsi SB byl vývoj téměř totožný se směsí SA. U směsi SC lze pozorovat rozdíl v normální konzistenci, kdy se zvyšující se náhradou cementu roste i normální konzistence na 26,8 – 27,2 %. Dle autorů se normální konzistence zvýšila z důvodu malé velikosti částic strusky a tím jejich vyšším specifickým povrchem. Vývoj doby tuhnutí je srovnatelný s ostatními směsí.

Cheerarat a Jaturapitakkul [70] nahrazovali portlandský cement popílkem v množství 10 – 30 % hmotnosti a v rámci své práce se také zabývali normální konzistencí a dobou tuhnutí. Normální konzistence pasty obsahující pouze portlandský cement vyšla 26,8 %. Se zvyšujícím se obsahem popílku v pastách docházelo ke zvyšování hodnot normální konzistence (27,8 – 29 %). Dle autorů je důvodem vyšší porozita částic popílku, ve kterých se vstřebává voda, a to

je příčinou vyšší spotřeby vody. Z toho důvodu se snažili pórovitost popílku snížit prostřednictvím procesu mletí. Dle Felekogla a kol. [71] tohle ale není řešení, jelikož vyšší jemnost popílku se projeví zejména zvětšením měrného povrchu částic, a tím vzroste spotřeba záměsové vody. Popílek se v cementové pastě projevil také prodloužením doby tuhnutí, která se prodlužovala lineárně se zvyšující se náhradou. Tento fakt způsobilo snížení množství portlandského cementu čili i trikalciumpopílků (C3S) a trikalciumaluminátu (C3A), které zajišťují tuhost cementu v raných fázích. Stejný projev popílku v cementových pastách potvrzuje řada autorů včetně Dave a kol. [72] a Snelsona a kol. [73].

3.2 ZATVRDLÁ SMĚS

3.2.1 PÓROVITOST

Li a kol. [74] se v rámci své studie zabývali vlivem pórovitosti na pevnost v tlaku cementových past, kde byl nahrazován cement z 10 – 40 % vysokopecní struskou (SL), ocelářenskou struskou (ST) a úletovým popílkiem (FA). Vodní součinitel byl u všech směsí roven 0,44. Před zkouškami pórovitosti byly nejprve vzorky uloženy ve vodě o teplotě 20 ± 2 °C, poté byly vysušeny při teplotě 105 °C. Celkovou pórovitost u vzorků pak sledovali po 3, 7, 28, 90 a 180 dnech prostřednictvím rtuťového porozimetru Micrometer-9420. Výsledky jejich práce jsou zobrazeny v *Tabulce 7*. Z této tabulky je patrné, že u všech vzorků dochází postupem času ke snížení pórovitosti vlivem prodlužující se doby hydratace. Dochází tedy k postupnému vyplňování pórů hydratačními produkty cementových materiálů. Dále lze pozorovat, že s rostoucím procentuálním zastoupením ocelářské strusky a úletového popílku dochází ke zvyšování celkové pórovitosti. Jiné je to však u vysokopecní strusky, kdy je nejnižší pórovitosti dosaženo u 20 % nahrazení cementu. Autoři to odůvodňují tím, že při tomto poměru cementu a vysokopecní strusky dochází k hustšímu nahromadění částic z důvodu jejich optimálního poměru a velikosti. Nejvyšší hodnoty pórovitosti ve všech časových intervalech vykazují vzorky s úletovým popílkiem, což je způsobeno jeho pomalou pucolánovou reakcí. Dle autorů vyžaduje proces hydratace u popílků více CH, což je primárně způsobeno jeho chemickým složením. Proto ho v případě jeho vyššího zastoupení ve směsi zbytek portlandského cementu nedokáže dostatečně aktivovat. Právě z tohoto důvodu je pórovitost u 40% nahrazení tak vysoká, a jelikož pórovitost negativně ovlivňuje i pevnost v tlaku, tak je i ta velmi malá. Naopak nejnižších hodnot pórovitosti je dosaženo u směsi cementu a vysokopecní strusky, což není pro autory žádným překvapením, jelikož má vyšší reaktivitu a současně zlepšuje zpracovatelnost cementové pasty, a tím umožňuje vznik hustší mikrostruktury v různém stáří.

Tabulka 7 - Pórovitost cementových past s minerálními příměsemi [74]

No.	Celková pórovitost [%]				
	3 dny	7 dní	28 dní	90 dní	180 dní
OPC	38.11	31.85	21.76	20.64	20.81
ST1	37.07	32.57	23.54	20.51	21.37
ST2	40.53	35.89	26.38	24.22	22.86
ST3	41.77	37.03	29.67	26.36	25.82
ST4	44.95	40.16	32.82	29.55	29.63
SL1	39.67	30.89	21.36	18.98	18.18
SL2	32.80	24.46	15.59	12.96	12.04
SL3	35.77	32.70	20.01	17.05	17.05
SL4	42.74	34.36	21.35	18.62	18.36
FA1	38.86	32.08	23.34	21.48	20.32
FA2	39.83	33.44	26.72	24.03	23.99
FA3	41.12	36.10	29.30	26.95	26.81
FA4	42.93	38.19	33.03	31.13	31.19

Dalším významným kritériem, které ovlivňuje pórovitost, je dle Chindaprasirta a kol. [75] jemnost materiálu nahrazujícího cement. Ti ve své práci zjišťovali pórovitost cementových past obsahujících úletový popílek se střední velikostí částic 19,1 mikronů (OFA) a popílek se střední velikostí částic 6,4 mikronů (CFA). Stejně jako v předešlém výzkumu i zde popílek zvýšil celkovou a kapilární pórovitost pasty oproti čistě cementové pastě. V případě cementové pasty s CFA byla kapilární a celková poréznost výrazně nižší než u pasty s OFA, avšak stále nepatrně vyšší než u referenční cementové pasty.

Nejvýznamnější roli, která ovlivňuje celkovou pórovitost, však sehrává vodní součinitel, tudíž poměr vody ku pojivu. Tento fakt potvrzuje i výzkum provedený Zhou a kol. [76], kteří nahrazovali cement vysokopecní struskou z 10 – 90 %, a pro výrobu vzorků zvolili vodní součinitel 0,4 a 0,5. Vzorky s vodním součinitelem 0,4 měly celkovou pórovitost v každém případě o cca 5 – 8 % nižší.

3.2.2 OBJEMOVÉ ZMĚNY

Jak již bylo zmíněno v podkapitole „3.2.1 Pórovitost“, tak se pórovitost postupem času snižuje. Objemová hmotnost, která je na pórovitosti závislá, má opačný trend vývoje a stářím se tedy postupně zvyšuje. Tento vývoj je způsobený průběžnou hydratací portlandského cementu společně s reakcí popílku či strusky, již jsou aktivovány uvolněným CH právě během procesu hydratace cementu. Výsledkem toho je nárůst vysrážených hydratačních produktů vyplňujících otevřené póry, díky čemuž se zvyšuje objemová hmotnost cementové pasty [77].

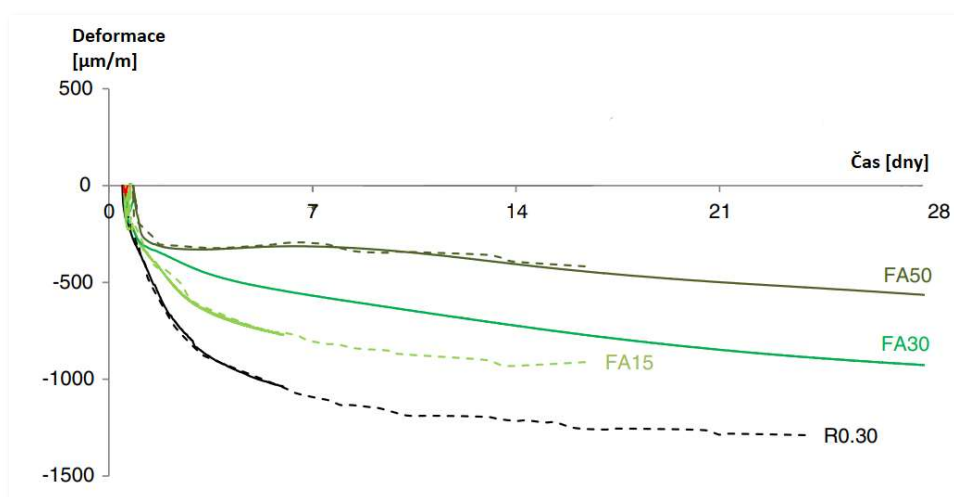
Heikal a kol. [78] se ve své práci zaměřili na vliv vysokopecní strusky a úletového popílku na objemovou hmotnost cementových past v průběhu jednoho roku. V cementových pastách nahradili cement ze 40 % hmotnosti úletovým popílkem či vysokopecní struskou. Dále byly vzorky vyrobeny s množstvím vody dle normální konzistence. V případě vzorku s úletovým popílkem byla objemová hmotnost po 28 dnech 2181 kg/m^3 , což je zhruba o 45 kg/m^3 menší objemová hmotnost než u čistě cementového vzorku. Tento trend byl zachován po dobu celého roku měření a lze tak konstatovat, že popílek objemovou hmotnost snižuje. Tento fakt potvrzuje např. i Mukherjee a kol. [79], kteří nahrazovali cement popílkem z 20 – 70 % hmotnosti. Z jejich výsledků lze pozorovat, že se zvyšujícím se obsahem popílku klesá lineárně objemová hmotnost vzorků. U vzorků s vysokopecní struskou byla naopak objemová hmotnost vyšší než u referenčního vzorku. Stejných výsledků se dopracoval i Khalil s Abd-El-Hameedem [77] a Hanzálek [67].

Objemové změny jsou dále způsobeny smršťováním. Co se smršťování týče, tak rozeznáváme dva základní principy, a to autogenní smršťování neboli chemické a smršťování způsobené vysycháním. *Autogenní smršťování* je jev, při kterém je objem zatvrdlé cementové hmoty menší než objem pojiva a vody před hydratací [80]. Tento jev doprovází vznik mikro a makrotrhlin, které se projevují snížením pevnosti a trvanlivosti především u směsí s nízkým vodním součinitelem [81]. *Smršťování vysycháním* je způsobeno únikem nespotřebované vody během procesu hydratace cementu z betonu do okolí již po začátku tuhnutí a tvrdnutí [80].

Hanzálek [67] se ve své práci, kde zkoumal vlastnosti cementových past s obsahem vysokopecní strusky, zaměřil také na objemové změny způsobené smršťováním. Smršťování vzorků měřil pomocí posuvného měřítka průběžně během 27 dní. Z výsledků měření je především zajímavý průběh v prvním týdnu, kdy se vzorky nepatrně prodloužily. Po prvním týdnu se naopak vzorky až do konce měření lineárně smršťovaly a po 27 dnech se velikosti smrštění jednotlivých vzorků pohybovaly v rozmezí 1 – 2,5 mm. Dále lze v této práci pozorovat, že se zvyšujícím se zastoupením strusky dochází k nárůstu smrštění. Tento průběh smrštění lze pozorovat i ve studii Collinse a Sanjayana [82]. Hanzálek [67] dále však podotýká, že tento postup měření není vhodným nástrojem pro stanovení velikosti smrštění, neboť rozptyl získaných hodnot je poměrně velký, a tudíž není tak přesný. To je způsobeno i tím, že vzorky byly před samotným měřením uloženy ve vodě, což smrštění výrazně zmenšuje.

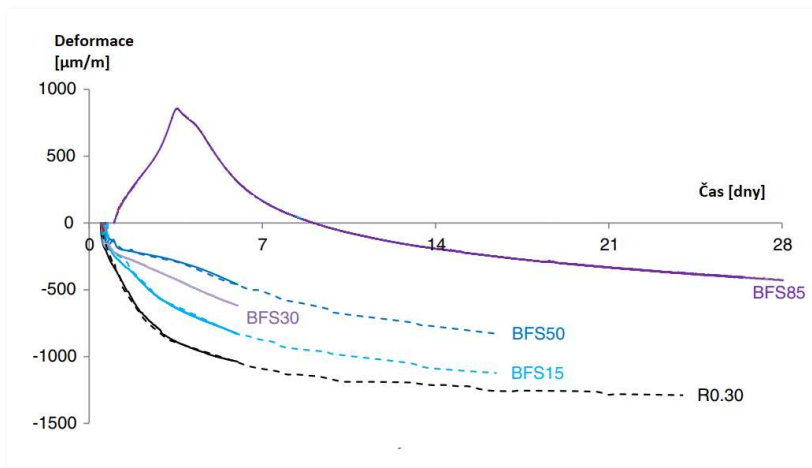
Daleko přesnější měření autogenního smrštění provedl Snoeck a kol. [81]. Předmětem jejich studie byl vliv popílku třídy F a vysokopecní strusky na autogenní smrštění směsí, kde částečně

nahrazovaly portlandský cement. Cement byl těmito příměsi nahrazován z 15 – 85 % hmotnosti a vzorky byly vyrobeny s vodním součinitelem 0,3. Čerstvě namíchané pasty se nalily do plastové vlnité trubky a poté v průběhu 28 dní se sledovala délka vzorků prostřednictvím dilatometru. Na *Grafu 4* lze pozorovat, že cementové pasty s popílkem mají oproti čisté cementové pastě (R0.30) podstatně nižší smrštění v rané fázi. To je dle autorů způsobené pomalejší pucolánovou reakcí, ke které dochází až v pozdějších fázích v důsledku spotřeby nebo aktivace $\text{Ca}(\text{OH})_2$, který vzniká z procesu hydratace cementu. Dále lze pozorovat, že se zvyšující se dávkou popílku ve vzorcích dochází ke snížení smrštění. Důvodem toho je dle autorů fakt, že se zvyšujícím se množstvím popílku klesá zároveň i jeho reakční stupeň, a to v důsledku nedostatečného množství $\text{Ca}(\text{OH})_2$, který vzniká během hydratace cementu.



Graf 4 - Autogenní deformace cementových past s popílkem a bez popílku [81]

Z *Grafu 5* je patrné, že při tomto vodním součiniteli je smrštění oproti R0.30 nižší, a to i v případě směsi cementu a vysokopecní strusky (BFS). Stejně jako u popílků je i zde pozorováno snížení smrštění s rostoucím množstvím strusky, což je způsobeno pomalou reakcí strusky. V případě 85% nahrazení cementu vysokopecní struskou (BFS85) nedochází takřka k žádnému smrštění v rané fázi. Dle autorů je to způsobeno velmi nízkým obsahem hydroxidu vápenatého z hydraulické reakce cementu. Stejně jako v práci Hanzálka [67] i zde lze pozorovat obrovskou expanzi během prvního týdne stáří. To je způsobeno již zmíněným nedostatkem $\text{Ca}(\text{OH})_2$, jenž nestačí k úplné aktivaci struskové reakce, a proto vysokopecní struska většinou tvoří funkci plniva. S časem ale lze pozorovat poměrně výrazné smršťování, které je způsobeno pomalou latentně hydraulickou reakcí strusky.



Graf 5 - Autogenní deformace cementových past s vysokopecní struskou a bez strusky [81]

V práci Lua a kol. [83] lze v případě cementových past se struskou pozorovat naopak mnohem vyšší autogenní smrštění vzorků než u vzorku obsahujícího pouze cement. Autoři jako dva hlavní důvody označují nižší modul pružnosti vzorků a větší pokles jejich relativní hmotnosti. Tento vývoj smrštění je tedy podobný jako v práci Hanzálka [67], ale poměrně odlišný od studie Snoecka a kol. [81].

3.2.3 DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI

Hanzálek [67] dále v rámci své práce zjišťoval také dynamický modul pružnosti cementových past s obsahem vysokopecní strusky v rozmezí 10 – 50 % hmotnosti (O10 – O50). Pro měření využil metodu pulzního buzení a ze získaných frekvencí stanovil dynamický Youngův modul pružnosti. První měření provedl autor dva dny po jejich vyrobení. Referenční vzorek (R0) měl společně se vzorkem O10 nejvyšší modul pružnosti (23,5 GPa). Se zvyšujícím se zastoupením vysokopecní strusky pak modul pružnosti lineárně klesal, kdy rozdíl mezi vzorky R0 a O50 činil 17,5 %. Nejvýznamnějších změn modulu pružnosti bylo dosaženo během prvního týdne, kdy struska začala reagovat, a po 9 dnech všechny vzorky měly modul pružnosti vyšší než vzorek R0. Poslední měření autor provedl po 27 dnech, kdy byl modul pružnosti nejvyšší u vzorku O50 (30,6 GPa) > O30 > O20 > O10 > O40 > R0 (29,5 GPa).

Šádková [84] v rámci své práce stanovila také dynamický modul pružnosti cementových past, kde byl nahrazován cement několika alternativními pojivy, resp. aktivními jemnozrnnými příměsemi. Mezi ně patří granulovaná mletá vysokopecní struska z Třince, mletý fluidní popílek z Kladna, úletový popílek z Mělníka, mletá vysokopecní struska z Kladna a poté směsi popílku a strusky v poměru 75:25 % hm., 25:75 % hm. a 50:50 % hm. Cement nahrazovala těmito pojivy z 30 a 50 % hm. a vzorky vyrobila s vodním součinitelem 0,5 a některé s w/b

0,45. Pro měření zvolila rezonanční metodu stejně jako Hanzálek [67] a měření provedla po 7 a 28 dnech zrání. Z výsledků měření je patrné, že žádná z past po 7 dnech nedosahovala vyššího modulu pružnosti než pasta referenční. Nejvíce se jí však přiblížil vzorek, který obsahoval z 30 % hm. CEM II 42,5 R a ze 70 % hm. směs popílku a strusky z Kladna v poměru 75:25, jenž měl dokonce vyšší smykový modul pružnosti než vzorek referenční. Po 28 dnech zrání lze pozorovat lineární růst modulů pružnosti u všech past. Po této době měly nejvyšší hodnoty modulu pružnosti vzorky s granulovanou mletou vysokopecní struskou z Třince, kde byl nahrazen cement z 30 a 70 % hm. U vzorku s 30 % nahrazením vyšel modul pružnosti 19,29 MPa, což je o 0,21 MPa více než u vzorku referenčního. Autorka práce uvádí, že u těchto vzorků nastal mezi 7. a 28. dnem prudký nárůst modulů pružnosti a je tak očividné, že směsi s vyšším podílem strusky začínají reagovat až po určité době. Naopak nejhorších výsledků bylo dosaženo v případě vzorků s 50% nahrazením cementu mletým fluidním popínkem z Kladna (13,13 MPa) a s 50% nahrazením cementu vysokopecní struskou z Kladna (11,69 MPa).

3.2.4 PEVNOST V TAHU ZA OHYBU

Wong a kol. [85] testovali pevnost v tahu za ohybu cementových malt obsahujících z 15 – 55 % hm. popílek třídy F. Vzorky byly vyrobeny v poměrech materiálů 1:1,5:0,3 (pojivo: písek: voda). V této práci byly vzorky testovány po 28 a 90 dnech. Ze získaných dat je zřejmé, že žádný ze vzorků neměl po 28 ani 90 dnech vyšší pevnost než vzorek referenční, jehož pevnost byla po 90 dnech 7,74 MPa. Nejvíce se mu však přiblížil vzorek, ve kterém byl nahrazen cement z 15 % hm. popínkem (7,68 MPa). Dále je pozorován trend, že se zvyšujícím se množstvím popílku ve směsi klesá pevnost v tahu za ohybu, která se u vzorků s popínkem po 90 dnech pohybovala v rozmezí 7,68 – 5,59 MPa. Dle autorů dochází u vzorků s vyšším obsahem popílku ke zpomalení rychlosti reakce popílku. U pasty, která obsahovala z 55 % hm. popílek, byl stupeň reakce popílku po 90 dnech zhruba o 30 % nižší než u pasty obsahující popílek z 25 % hm. Vyšší obsah popílku tak negativně ovlivňuje pevnost matrice. Tento efekt ale může být dle autorů postupně kompenzován pucolánovou reakcí, jenž může probíhat i po delší době vytvrzování. Závěry této práce tedy korespondují s předchozími výzkumy.

Sičáková a kol. [86] se v rámci své práce zabývali pevností v tahu za ohybu cementových malt, ve kterých byl nahrazován cement typu CEM I 42,5 R (C) mletou granulovanou vysokopecní struskou (S) a popínkem (F). Tyto malty pak byly vyrobeny v poměru 1:3:0,5 (pojivo: standardní písek CEN: voda). Cement byl nahrazován z 30 a 50 % hmotnosti. Z *Tabulky 8* je zřejmé, že při provedené zkoušce 2 dny od výroby vzorků měl nejrychlejší nárůst

pevnosti referenční vzorek společně se vzorkem C70S15F15, který tak během dvou dní dosáhl 61 % své 90denní pevnosti. Po 7 dnech lze u všech vzorků kromě C50F50 pozorovat vyšší pevnost než u referenčního vzorku. V *Tabulce 8* je dále označen červeně velmi zajímavý vývoj pevnosti u vzorku C50S50, který měl po 2 dnech nejnižší pevnost, zatímco po 90 dnech ji měl suverénně nejvyšší. Naopak nejhůře dopadly vzorky, kde byl cement substituován popílkem, tudíž vzorky C70F30 a C50F50. U vzorku C50F50 lze pozorovat nejnižší pevnost po celých 90 dní.

Tabulka 8 - Pevnost v tahu za ohybu cementových malt s popílkem a vysokopecní struskou [86]

Vzorek (pojivo, % hm.)	Pevnost v tahu za ohybu [MPa]			
	2 dny	7 dní	28 dní	90 dní
REF	4,4	4,7	7	7,8
C70 S30	3,9	5,6	7,2	8,1
C70 F30	3,6	4,9	5,9	6,7
C50 S50	2,7	5,1	5,7	9,1
C50 F50	2,8	4,2	5	5,7
C70 S15 F15	4,3	5,9	6,8	7

Obdobných výsledků jako Sičáková a kol. [86] dosáhli i Gosálvez a kol. [87], kteří taktéž nahrazovali cement z 30 % hm. mletou granulovanou vysokopecní struskou a popílkem. Zkoušku pevnosti v tahu za ohybu provedli po 28 a 250 dnech. Vzorky obsahující vysokopecní strusku měly po 28 dnech pevnost 8,8 MPa a po 250 dnech 9,2 MPa, což byli zároveň nejvyšší pevnosti v příslušných stářích. Vzorky obsahující popílek měly po 28 dnech pevnost 7,9 MPa a po 250 dnech 8,2 MPa, což byli naopak nejnižší pevnosti v příslušném stáří.

3.2.5 PEVNOST V TLAKU

Jak již bylo zmíněno v podkapitole „3.2.1 Pórovitost“, tak se Li a kol. [74] zabývali vlivem pórovitosti na pevnost v tlaku. V tomto výzkumu byly vzorky vyrobeny v poměru materiálů 1:3:0,4 (pojivo: písek: voda). Jen pro připomenutí byl cement částečně nahrazován vysokopecní struskou (SLn) a úletovým popílkem (FAn), jejichž zastoupení ve směsích se pohybovalo v rozmezí 10 – 40 % hm (resp. 10, 20, 30, 40). Pevnost v tlaku byla stejně jako pórovitost zkoušena po 3, 7, 28, 90 a 180 dnech. Při pohledu na *Tabulku 7* a *Tabulku 9* je zcela zřejmá závislost pórovitosti na pevnosti v tlaku. Pórovitost se postupem času vytvrzování prokazatelně snižuje, což má za následek zvyšování pevnosti v tlaku. V *Tabulce 9* lze pozorovat, že nejvyšších počátečních pevností dosahují vzorky OPC a SL1, což je způsobeno vysokým

obsahem cementu a tím rychlejším procesem hydratace. Nejnižších pevností v tlaku po 7 dnech naopak dosahují vzorky FA2, FA3, FA4, což je způsobeno pomalejší pucolánovou reakcí, jenž se projevuje až postupem vytvrzování. Proto lze u vzorků FA2 a FA3 pozorovat nejvyšší pevnosti v tlaku po 180 dnech. Prudký nárůst pevností v tlaku u vzorků s vysokopecní struskou lze pozorovat v podstatě již po 7 dnech, což koresponduje i s jejich pórovitostí, která byla v průběhu vytvrzování zcela nejnižší. U vzorků s vysokopecní struskou lze dále pozorovat, že s jejich vyšším zastoupením ve směsích se pevnost v tlaku zvyšuje. Naproti tomu vzorky s popílkem mají nejvyšší pevnost v tlaku po 180 dnech při 20% a 30% nahrazení. Nejnižší pevnost v tlaku má vzorek FA4, který měl zároveň i zdaleka nejvyšší pórovitost. Z dlouhodobého hlediska by bylo velmi zajímavé pozorovat následující vývoj tohoto vzorku, který by mohl mít po určitém čase vytvrzování pevnost v tlaku nejvyšší.

Tabulka 9 - Pevnost v tlaku cementových malt s obsahem vysokopecní strusky a úletového popílku [74]

No.	Pevnost v tlaku [MPa]				
	3 dny	7 dní	28 dní	90 dní	180 dní
OPC	35.8	45.4	54.4	55.2	57.6
SL1	36.3	46.6	60.3	60.4	59.7
SL2	29.1	41.8	56.4	61.8	61.8
SL3	23.3	37.5	54.2	68.1	68.8
SL4	19.7	34.8	52.0	69.0	69.8
FA1	31.0	40.0	47.6	64.7	66.4
FA2	24.4	32.4	45.8	63.3	71.6
FA3	20.5	28.8	41.6	59.2	70.3
FA4	12.9	20.8	33.3	46.1	55.7

Sičáková a kol. [86] v rámci své práce taktéž zjišťovali pevnost v tlaku. Složení směsí v této práci je již popsáno v podkapitole „3.2.4 Pevnost v tahu za ohybu“. Po provedených tlakových zkoušek během 90 dní neměl žádný ze vzorků vyšší pevnost v tlaku než vzorek referenční, jenž měl pevnost v tlaku po 90 dnech 55,4 MPa. Stejně jako v případě pevnosti v tahu za ohybu byl nejzajímavější vývoj pevnosti v tlaku u vzorku C50S50, který vykazoval po 2 dnech zraní zcela nejnižší hodnotu. Po 90 dnech se však nejvíce přiblížil referenčnímu vzorku s pevností 48,7 MPa. Stejně jako v práci Lia a kol. [74] lze pozorovat u vzorků obsahujících popílek nejvyšší pevnost v tlaku při 30% nahrazení cementu (46,9 MPa). U vzorku, který obsahoval z 50 % hm. popílek byla po 90 dnech pevnost v tlaku opět nejnižší (34 MPa). I z této práce je tedy patrné, že vysokopecní struska má do 90 dní pozitivnější vliv na pevnost v tlaku než popílek.

Gosálvez a kol. [87] zjišťovali pevnost v tlaku vzorků obsahujících z 30 % hm. mletou granulovanou vysokopecní strusku a popílek po 28 a 250 dnech. I v této práci lze potvrdit

poznatky z výše zmíněných výzkumů. Po 28 dnech měl referenční vzorek pevnost v tlaku 56 MPa. Vzorky s vysokopecní struskou po této době vytvrzování měly pevnost v tlaku nejvyšší (58 MPa) a vzorky s popílkem opět nejnižší (52 MPa). Po 250 dnech se již zásadně projevila pucolánová reakce a vzorky s popílkem měly pevnost v tlaku nejvyšší (68 MPa). Vzorky s vysokopecní struskou pak měly pevnost v tlaku nepatrně vyšší než vzorky referenční (65 MPa).

4 EXPERIMENTÁLNÍ METODY

Předmětem této kapitoly bude popis metodiky provedených zkoušek a měření na čerstvých a zatvrdlých cementových pastách, ve kterých byl cement nahrazován fluidním popílkem a několika typy vysokopecní strusky. Pro čerstvou směs byla provedena zkouška rozlití, dále byla stanovena normální konzistence směsí, na kterých pak byla stanovena doba tuhnutí. Na zatvrdlých směsích byla zjišťována pórovitost, pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku a také dynamický modul pružnosti. Vzorky byly dále měřeny a váženy v průběhu vytvrzování z důvodu sledování změn objemových hmotností.

Z výsledků měření každé skupiny vzorků dosažených během prováděných zkoušek byl vypočten aritmetický průměr, přičemž tato hodnota určuje výsledky pro dané měření. Současně byl proveden výpočet směrodatné odchylky dle vzorce (1), která určuje odchylku jednotlivých měření od aritmetického průměru naměřených hodnot. Tyto dva parametry byly dále zpracovány do tabulek či grafů.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (1)$$

kde:

- σ směrodatná odchylka,
- N počet provedených měření,
- x_i měřené hodnoty,
- \bar{x} aritmetický průměr měřených hodnot.

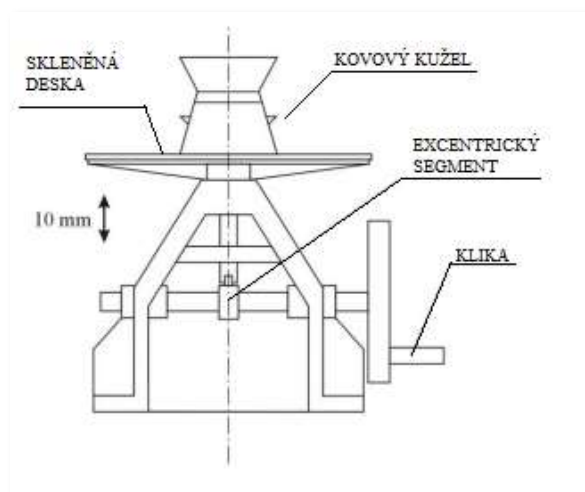
4.1 ČERSTVÁ SMĚS

4.1.1 KONZISTENCE ČERSTVÉ MALTY

Konzistence čerstvé malty byla stanovena zkouškou rozlití, která byla provedena dle příslušné normy ČSN EN 1015-3 [88] pomocí střešacího stolku (*Obrázek 9*). Výsledná hodnota rozlití je stanovena změřením průměrů vzorku po odejmutí kovového kužele a po následujících 15 svislých pádech na vodorovné skleněné desce. Samotný postup zkoušky byl proveden následovně:

1. Důkladné očištění skleněné desky o průměru 300 mm a kovového kužele vysokého 60 mm, jehož spodní část má průměr 100 mm a horní část 70 mm.
2. Natření povrchu skleněné desky a vnitřního povrchu kovového kužele tenkou vrstvou minerálního oleje. Umístění kovového kužele do středu skleněné desky.
3. Příprava zkušebních vzorků dle dané receptury.
4. Zhutnění jednotlivých vrstev nejméně 10 lehkými údery dusadla, jehož průměr je 40 mm. Kovový kužel musí být dostatečně naplněn tak, aby malta lícovala s horním povrchem kužele.
5. Setření přebytečné malty prostřednictvím špachtle a následovné očištění okolního povrchu skleněné desky do sucha.
6. Odejmutí kovového kužele rovnoměrným pohybem vzhůru zhruba po 15 sekundách.
7. Provedení 15 nárazů pomocí kliky zhruba po 1 sekundě.
8. Změření 2 kolmých průměrů rozlitého vzorku a jejich následovné zprůměrování.

Jelikož se hodnoty dvou na sebe kolmých průměrů rozlitého vzorku nelišily o více než 10 %, tak nebylo nutné zkoušku opakovat.



Obrázek 9 - Střásací stůl dle ČSN EN 1015-3 [89]

4.1.2 NORMÁLNÍ KONZISTENCE

Normální konzistence cementové kaše byla stanovena dle ČSN EN 196-3 [90] pomocí ručně ovládaného Vicatova přístroje a penetračního válečku o průměru 10 mm a hmotnosti 300 g (viz Obrázek 10). Cementová kaše normální konzistence vytváří odpor vůči pronikání normalizovaného válečku. Potřebné množství vody k dosažení normální konzistence cementové kaše je určeno pokusným pronikáním penetračního válečku do kaší s odlišným

množstvím vody. V průběhu měření byla teplota prostředí 20 ± 2 °C a minimální relativní vlhkost 50 ± 2 %. Postup měření byl následující:

1. Navážení 500 g cementu a např. 125 g vody pomocí váhy s přesností ± 1 g.
2. Nalítí vody a nasypání cementu do míchací nádoby během 10 s. Poté zapnutí míchacího zařízení na nízkou rychlost a zahájení měření času míchání. Čas zahájení míchání je označen jako nulový čas.
3. Zastavení míchání po uplynutí 90 s na 30 s. Během této doby bylo provedeno setření cementové kaše ze stěn a dna míchací nádoby a kaše se poté umístila do jejího středu. Poté zapnutí míchacího zařízení na nízkou rychlost na dalších 90 s. Celková doba míchání tak byla 3 minuty.
4. Natření podložní destičky a vnitřního povrchu Vicatova prstence tenkou vrstvou minerálního oleje.
5. Naplnění Vicatova prstence cementovou kaší bez přílišného hutnění ihned po dokončení míchání. Odstranění přebytečného vzduchu v kaši poklepáním o pěst ruky. Sejmutí přebytku kaše z vrchní části prstence pomocí pilového pohybu vhodné pomůcky tak, aby povrch cementové kaše lícoval s vrchní částí prstence.
6. Nastavení Vicatova přístroje tak, aby byl penetrační váleček v nulové poloze. Poté zvednutí do horní výchozí polohy.
7. Ihned po uhlazení kaše bylo provedeno postavení Vicatova prstence na podložní destičce tak, aby byl jeho střed pod penetračním válečkem.
8. Nastavení penetračního válečku tak, aby byl v kontaktu s horním povrchem kaše a bylo tak zabráněno nechtěné počáteční rychlosti válečku.
9. Uvolnění penetračního válečku a zahájení jeho vnikání do cementové kaše do 4 minut ± 10 s po nulovém čase.
10. Odečtení hodnoty na stupnici, která značí vzdálenost penetračního válečku od podložní destičky po 30 s od uvolnění válečku nebo po 5 s jeho ustálení, tudíž dle toho, co nastalo dříve.
11. Opakování měření s upraveným množstvím vody až do dosažení normální konzistence, tj. vzdálenosti mezi podložní destičkou a penetračního válečku 6 ± 2 mm.



Obrázek 10 - Stanovení normální konzistence pomocí ručního Vicatova přístroje

4.1.3 DOBA TUHNUTÍ

Doba tuhnutí byla stanovena na základě ČSN EN 196-3 [90] prostřednictvím automatického Vicatova přístroje Vicamatic 2 (viz *Obrázek 11*). Pro stanovení doby tuhnutí byla využita cementová kaše normální konzistence, jejíž složení a postup výroby je již uveden v předchozí kapitole „4.1.2 Normální konzistence“. Touto kaší pak byl naplněn Vicatův prstenec, jenž byl umístěn do vhodné nádoby, a kaše byla ztuhněna rázy nádoby o pěst ruky. Poté byl zarovnan povrch cementové kaše v prstenci pomocí pilového pohybu vhodné pomůcky a následně byla nádoba naplněna vodou o teplotě 20 ± 1 °C tak, aby byl povrch kaše ponořen min. 5 mm. Počátkem tuhnutí je označována doba, jenž uběhla od nulového času, tj. kontaktu vody s cementem až po okamžik průniku Vicatovy jehly do vzdálenosti 6 ± 3 mm od podložní destičky. Koncem tuhnutí je označována doba, jenž uběhla od nulového času až po okamžik průniku Vicatovy jehly do zatvrdlé kaše, a to do hloubky 0,5 mm.



Obrázek 11 - Stanovení doby tuhnutí pomocí automatického Vicatova přístroje

4.2 ZATVRDLÁ SMĚS

4.2.1 PÓROVITOST

Pórovitost vzorků byla stanovena na základě poměru objemu vody ve vodou nasycených vzorcích ku celkovému objemu vysušeného vzorku (viz rovnice 2). Ke stanovení pórovitosti byly využity půlky vzorků, jež byly získány ze zkoušky pevnosti v tahu za ohybu. Tyto vzorky pak byly sušeny v laboratorní sušárně při teplotě 105 °C až do doby, kdy došlo k ustálení jejich hmotností. Následně byly vzorky uloženy ve vodě o teplotě 20 ± 2 °C po dobu jednoho týdne. Po uplynutí této doby byly vzorky umístěny do exsikátoru naplněného vodou, kde proběhlo jejich finální nasycení vodou při tlaku 0,2 kPa pomocí rotační vývěvy LAVAT VR 1,5/R. Zhruba po 5 minutách byla vývěva vypnuta a vzorky byly 1 hodinu ponechány v exsikátoru. Nakonec byly vzorky vyjmuty z exsikátoru, povrchově osušeny a zváženy.

$$P = \frac{(m_2 - m_1)}{\frac{\rho_v}{V_s}} \cdot 100, \quad (2)$$

kde:

- P pórovitost [%],
- m_2 hmotnost vodou nasyceného vzorku [kg],
- m_1 hmotnost vysušeného vzorku [kg],
- ρ_v objemová hmotnost vody [kg/m³],
- V_s objem vysušeného vzorku [m³].

4.2.2 ZMĚNA OBJEMOVÉ HMOTNOSTI

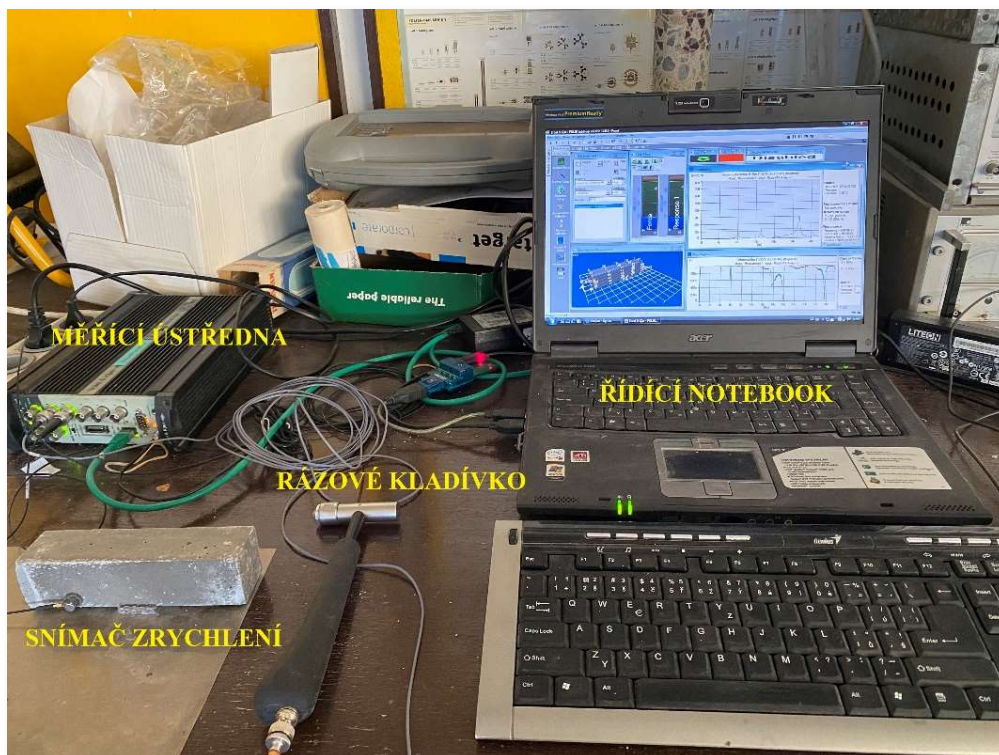
Vzorky byly váženy a měřeny při měření dynamického modulu pružnosti, před zkouškami pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku a dále před zkouškami pórovitosti. Před samotným měřením rozměrů a hmotnosti byly vzorky uloženy ve vodě o teplotě 20 ± 2 °C, poté byly vyjmuty a povrchově osušeny látkou.

Vzorky byly váženy pomocí laboratorní váhy s přesností ± 1 g. Vážení bylo u všech vzorků provedeno zhruba 20 minut po jejich vyjmutí z vody a to z důvodu snížení nepřesností daných odlišnou vlhkostí.

Rozměry vzorků byly měřeny pomocí digitálního posuvného měřítka s přesností $\pm 0,01$ mm. U všech vzorků byla měřena jejich délka, šířka a výška. Každý z těchto rozměrů byl změřen 3krát na odlišných místech a výsledná hodnota byla získána jejich průměrem.

4.2.3 DYNAMICKÉ MODULY

Dynamický modul pružnosti byl měřen pomocí rezonanční metody, která je považována za velmi přesnou nedestructivní metodu určující vlastní frekvence pro podélné, ohybové a torzní kmitání vzorků. Prostřednictvím této metody tak lze pozorovat v čase proměnné materiálové vlastnosti stavebních materiálů jako např. dynamický modul pružnosti a dynamický smykový modul [91]. Měření vlastních frekvencí bylo provedeno na základě norem ČSN 73 1372 [92] a ASTM E 1876-01 [93] prostřednictvím měřicí sestavy od výrobce Brüel & Kjær (*Obrázek 12*). Součástí této sestavy byla měřicí ústředna typu 3560-B-120, snímač zrychlení typu 4519-003, rázové kladívko typu 8206 a řídicí notebook se softwarem PULSE LabShop 14.0.1, který využívá Furierovy transformace k převodu časové akustické odezvy na frekvenční.

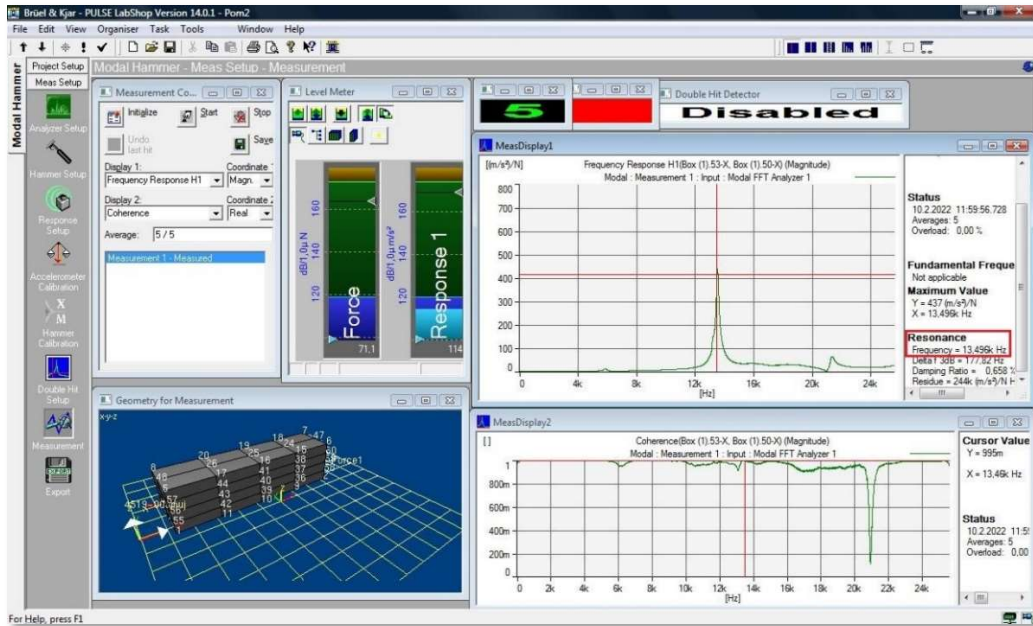


Obrázek 12 - Měřicí sestava Brüel & Kjaer

Měření u všech vzorků bylo provedeno následovně:

1. Vyjmutí vzorku z nádoby s vodou a osušení jeho povrchu.
2. Změření pomocí posuvného digitálního měřítka s přesností $\pm 0,01$ mm a zvážení pomocí laboratorní váhy s přesností ± 1 g.
3. Umístění vzorku na měřicí podložku tak, aby byly podpory v místě uzlů příslušných pro každý směr kmitání.
4. Umístění snímače zrychlení pomocí včelího vosku na příslušnou část vzorku dle typu měřeného kmitání (viz *Obrázek 14 – Obrázek 16*). Zahájení měření v softwaru PULSE LabShop.
5. Provedení pěti úderů rázovým kladívkem do příslušné části vzorku dle typu měřeného kmitání (viz *Obrázek 14 – Obrázek 16*).
6. Zaznamenání jednotlivých frekvencí kmitání ze softwaru PULSE LabShop (viz *Obrázek 13*).

Software PULSE LabShop využívá funkci frekvenční odezvy, kde jednotlivé vrcholky píků představují vlastní frekvence. Vrcholky píků musí být jasně definovány, a proto v případě výskytu více lokálních maxim u jednoho píku bylo měření opakováno.



Obrázek 13 - Výstup softwaru PULSE LabShop

Dynamický modul pružnosti z podélného kmitání ($E_{d,l}$) byl vypočten dle následujícího vztahu:

$$E_{d,l} = \frac{4 \cdot l \cdot m \cdot f_l^2}{b \cdot t}, \quad (3)$$

kde:

- $E_{d,l}$ dynamický modul pružnosti [Pa],
- l délka vzorku [m],
- m hmotnost vzorku [kg],
- f_l vlastní frekvence podélného kmitání [Hz] (viz Obrázek 14),
- b šířka vzorku [m],
- t výška vzorku [m].



Obrázek 14 – Poloha snímače a rázového kladívka při měření podélného kmitání

Dynamický modul pružnosti získaný z podélného kmitání byl kontrolován s dynamickým modulem pružnosti z příčného kmitání ($E_{d,p}$), přičemž tyto dva moduly pružnosti by se neměly lišit o více jak 2 %. Dynamický modul pružnosti z příčného kmitání byl vypočten dle následujícího vztahu:

$$E_{d,p} = \frac{0,9465 \cdot l^3 \cdot m \cdot f_p^2 \cdot T_1}{b \cdot t^3}, \quad (4)$$

kde:

$E_{d,p}$ dynamický modul pružnosti [Pa],

l délka vzorku [m],

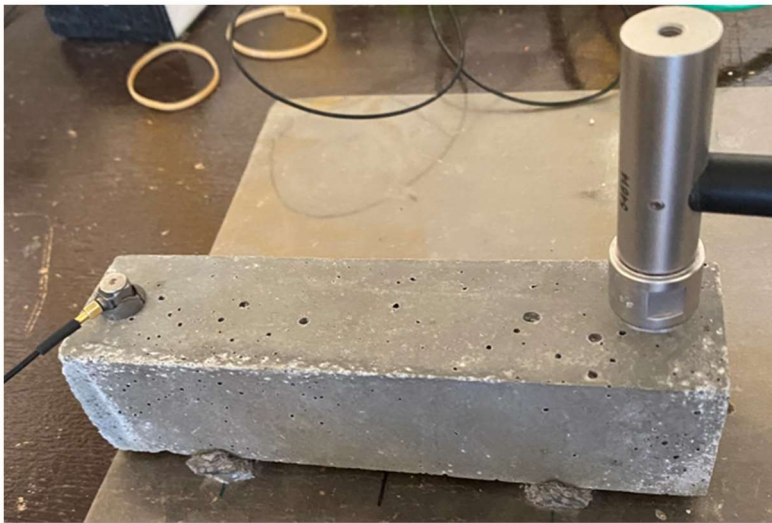
m hmotnost vzorku [kg],

f_p vlastní frekvence příčného kmitání [Hz] (viz *Obrázek 15*),

T_1 korekční součinitel, který zahrnuje vliv délky vzorku a Poissonova čísla (dle ASTM 1876-01 [93]),

b šířka vzorku [m],

t výška vzorku [m].



Obrázek 15 - Poloha snímače a rázového kladívka při měření příčného kmitání

Pro výpočet dynamického smykového modulu (G_d) byla stanovena vlastní frekvence kroutivého kmitání. Vztah pro jeho výpočet pak byl následující:

$$G_d = \frac{4 \cdot l \cdot m \cdot f_t^2}{b \cdot t} \cdot \frac{B}{1 + A}, \quad (5)$$

kde:

- G_d dynamický smykový modul [Pa],
- l délka vzorku [m],
- m hmotnost vzorku [kg],
- f_t vlastní frekvence kroutivého kmitání [Hz] (viz *Obrázek 16*),
- b šířka vzorku [m],
- t tloušťka vzorku [m],
- A empirický součinitel poměru šířky a výšky vzorku [-],
- B korekční faktor, který je určen ze vztahu:

$$B = \frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4 \cdot \frac{t}{b} - 2,52 \cdot (b \cdot t)^2 + 0,2 \cdot l \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^6} \quad (6)$$



Obrázek 16 - Poloha snímače a rázového kladívka při měření kroutivého kmitání

4.2.4 PEVNOST V TAHU ZA OHYBU

Zkouška pevnosti v tahu za ohybu byla provedena na základě ČSN EN 196-1 [94] na trámečcích o rozměrech 40×40×160 mm (výška; šířka; délka). Po změření a zvážení byl vzorek umístěn přesněji stranou na 2 podpory hydraulického lisu od výrobce STRASSENTEST (viz *Obrázek 17*), které od sebe byly vzdáleny 100 mm. Poté byl prostřednictvím počítače a příslušného softwaru zahájen posun horní části hydraulického lisu rychlostí 1 mm/min až do porušení vzorku. Dle rozdělení zatížení šlo o zkoušku s tříbodovým uspořádáním, tj. kombinaci ohybového a smykového namáhání. Během této zkoušky došlo ke zlomení tří vzorků téhož složení na šest polovin, kdy pět polovin bylo využito pro zkoušku pevnosti v tlaku a jedna k posouzení pórovitosti. Pevnost v tahu za ohybu byla vypočtena dle následovného vztahu:

$$f_t = \frac{3F_{b,max} \cdot L_s}{2ab^2}, \quad (7)$$

kde:

- f_t pevnost v tahu za ohybu [Pa],
- $F_{b,max}$ maximální dosažená síla při zlomení trámečku [N],
- L_s vzdálenost mezi podporami [m],
- a šířka vzorku [m],
- b výška vzorku [m].



Obrázek 17 - Zkouška pevnosti v tahu za ohybu

4.2.5 PEVNOST V TLAKU

Zkouška pevnosti v tlaku byla provedena na základě ČSN EN 196-1 [94] na pěti polovinách trámečku (viz předchozí podkapitola). V tomto případě se jednalo o jednoosou tlakovou zkoušku, tedy vnášení tlakového napětí až do doby, kdy došlo k porušení vzorku. Vzorek byl nejprve uložen přesnější stranou na tlačnou plochu tlačného přípravku typu BTP 300 od výrobce BRIO HRANICE o rozměrech 40×40 mm (viz *Obrázek 18*). Poté byl zahájen posun horní části hydraulického lisu, kdy rychlost posunu byla po celou dobu konstantní a to 5 mm/min. Nakonec byla z ciferníku odečtena velikost síly, při níž došlo k destrukci trámečku. Velikost této síly pak byla zanesena do následujícího vztahu:

$$f_c = \frac{F_{c,max}}{ab} , \quad (8)$$

kde:

f_c pevnost v tlaku [Pa],

$F_{c,max}$ maximální dosažená síla při deformaci trámečku [N],

a šířka vzorku [m],

b výška vzorku [m].



Obrázek 18 – Zkouška pevnosti v tlaku

5 POUŽITÉ MATERIÁLY A VZORKY

V této kapitole jsou specifikovány suroviny, které byly použity v této práci. Jde o použitý cement, 3 typy vysokopecních strusek, fluidní popílek, křemičitý písek a vodu. Dále je zde popsáno složení jednotlivých směsí, výroba vzorků a jejich následné uložení.

5.1 SPECIFIKACE VSTUPNÍCH SUROVIN

Jelikož použitá alternativní pojiva nebo aktivní jemnozrné příměsi v této práci prošly procesem vysokorychlostního mletí, tak byla provedena mikroskopická analýza s cílem stanovit strukturu a charakter jejich jednotlivých částic, která může mnoho napovědět o jejich zapojení do výsledné struktury kompozitu. Mikroskopická analýza se skládala ze dvou hlavních technik, a to skenovací elektronové mikroskopie (SEM) a obrazové analýzy snímků ze sekundárních elektronů. Mezi sledovanými parametry byla kruhovitost, kulovitost a poměr os. Kruhovitost popisuje podobnost částice ke kružnici, kdy hodnota 1,0 označuje perfektní kružnici. Poměr os je pak definován prostřednictvím elipsy, která nejlépe vystihuje tvar částic. Kulatost je dalším parametrem, který popisuje podobnost částice ke kruhu s tím rozdílem oproti kruhovitosti, že kulatost se vypočítává bez vlivu drsnosti hran. Kulatost má maximální hodnotu 1 pro drsné částice podobné kruhu a nižší hodnoty pro elipsovité tvary [95].

5.1.1 VYSOKOPECNÍ STRUSKA Kladno (N1)

Jedná se o stabilizovanou vzduchem chlazenou vysokopecní strusku pocházející z haldy Koněv, která patří do vlastnictví firmy DESTRO. Na příslušnou haldu byla tato struska navážena již od počátku minulého století až do zhruba 70. – 80. let minulého století. Firma Miroslav Karas – DESTRO (dnes DestroKladno s r.o.) pak strusku z haldy Koněv po částech odtěžuje, drtí, třídí a částečně i sama zpracovává (viz *Obrázek 19*) [96].



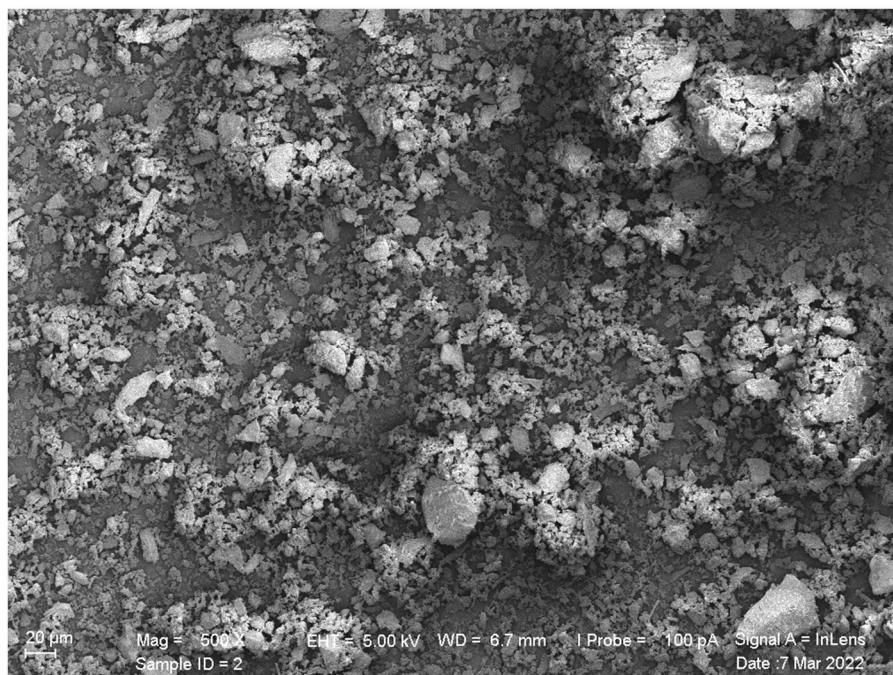
Obrázek 19 - Odtěžování strusky z haldy Koněv

Pro studijní účely prošla tato struska procesem mletí v desintegrátoru a její měrný povrch dle Blaine je 370 m²/kg. Chemické složení je znázorněno v *Tabulce 10*. Velikost zrn této strusky se pohybuje v rozmezí 0,1 – 50 mikronů, avšak zrna o velikosti 10 – 15 mikronů mají zastoupení nejvyšší. Tato struska má dále menší podíl sklovité fáze, čímž se liší od běžně využívaných granulovaných vysokopecních strusek jako příměsí do betonu [96].

Tabulka 10 - Chemické složení vysokopecní strusky Kladno

Obsah ve strusce [%]							
Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃
2,09	5,76	11,75	25,11	4,67	36,92	1,16	5,37

Mikroskopickou analýzou byla zjištěna kruhovitost částic této vysokopecní strusky $0,85 \pm 0,26$, poměr os $1,55 \pm 0,72$ a jejich kulatost $0,76 \pm 0,27$. Na následujícím obrázku je snímek získaný pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM).



Obrázek 20 - Snímek SEM (vysokopecní struska Kladno), zvětšeno 500×, detektor sekundárních elektronů

5.1.2 FLUIDNÍ POPÍLEK A VYSOKOPECNÍ STRUSKA KLADNO (N2 A N3)

Teplárna Kladno vlastní jedno z nejmodernějších technologických zařízení k výrobě elektrické energie v ČR. Toto zařízení vyrábí elektrickou energii spalováním jemně mleté palivové směsi s fluidním ložem, což mnohonásobně zvyšuje efektivitu spalovacího procesu [97]. V této práci byl využit fluidní úletový popílek, jenž pocházel ze zmíněné teplárny Kladno. Měrný povrch

tohoto popílku, který následně prošel desintegrátorem činil 905 m²/kg. V následující tabulce je zobrazeno chemické složení daného popílku.

Tabulka 11 - Chemické složení fluidního úletového popílku Kladno

Obsah v popílku [%]							
Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃
2,23	1,52	30,98	32,55	6,01	17,60	2,40	5,97

V této práci byl fluidní úletový popílek z teplárny Kladno kombinován s vysokopecní struskou z Kladna, která byla popsána v předchozí kapitole. Oba produkty byly vzájemně kombinovány v poměrech 50:50 a 75:25 (popílek : struska) a následně byly prostřednictvím vysokorychlostního mletí homogenizovány a aktivovány.

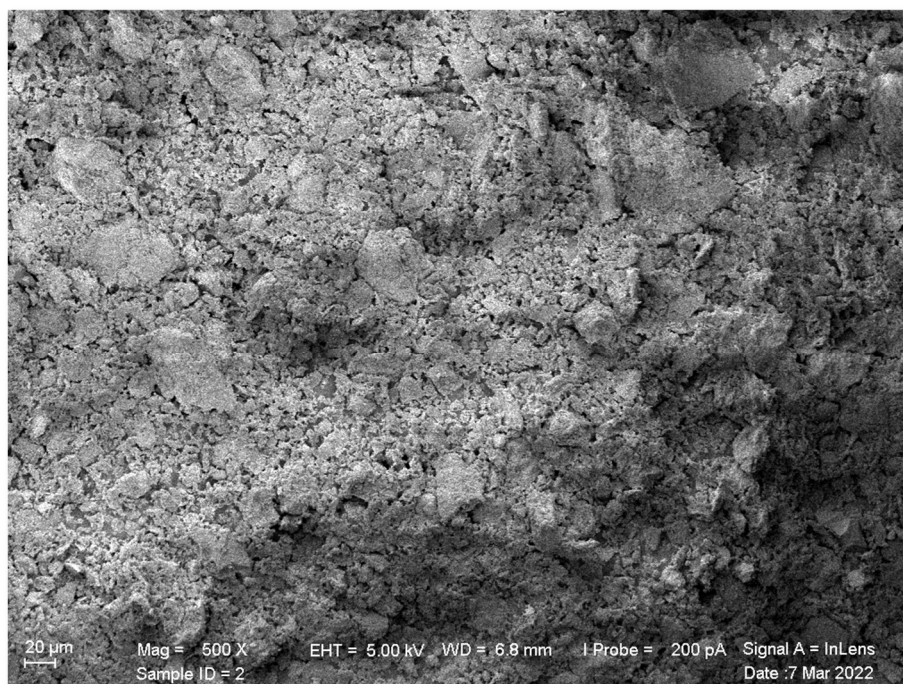
U kombinace 50:50 (popílek : struska) byla provedenou mikroskopickou analýzou zjištěna kruhovitosť částic $0,86 \pm 0,24$, poměr os $1,59 \pm 0,75$ a jejich kulatost $0,75 \pm 0,27$. Na následujícím obrázku je snímek tohoto materiálu, který byl získán pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM).



Obrázek 21 - Snímek SEM (fluidní popílek a vysokopecní struska Kladno 50:50), zvětšeno 500×, detektor sekundárních elektronů

U kombinace 75:25 (popílek : struska) byla provedenou mikroskopickou analýzou zjištěna kruhovitosť částic $0,87 \pm 0,24$, poměr os $1,55 \pm 0,75$ a jejich kulatost $0,77 \pm 0,27$. Na

následujícím obrázku je snímek tohoto materiálu, který byl získán pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM).



Obrázek 22 - Snímek SEM (fluidní popílek a vysokopecní struska Kladno 75:25), zvětšeno 500×, detektor sekundárních elektronů

5.1.3 VYSOKOPECNÍ STRUSKA TŘINEC (N4)

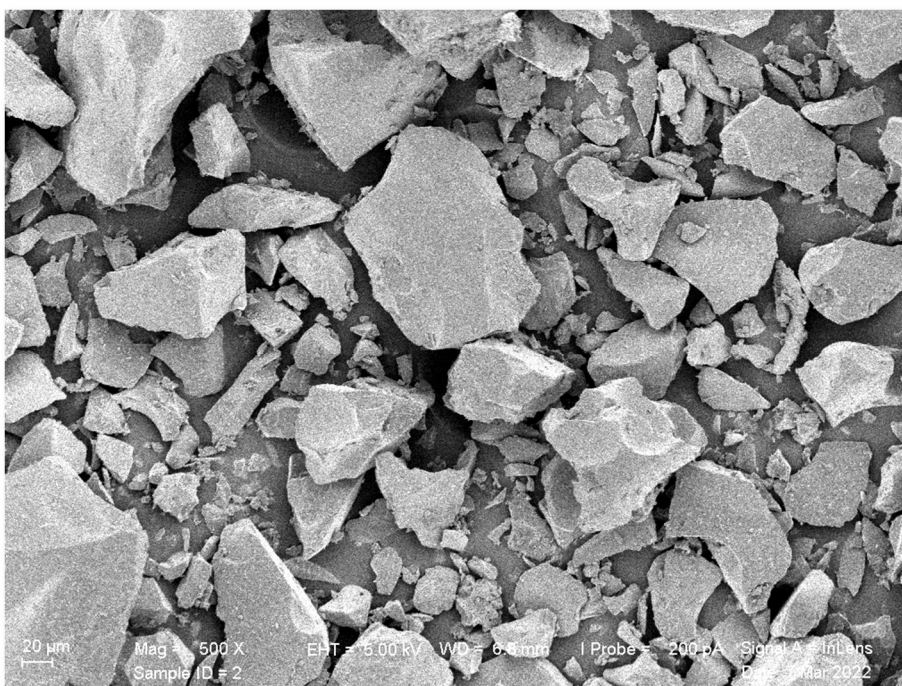
Jedná se o vodou chlazenou vysokopecní granulovanou strusku, která pochází z Třineckých železáren. Třinecké železářny se již dlouhodobě zabývají využitím velkoobjemových odpadů, které vznikají při výrobě železa a oceli. Také proto je v současnosti veškerá vyrobená struska zpracovávána a dále využívána. Třinecké železářny mají k dispozici vospělá zařízení na zpracování velkoobjemových odpadů jako např. výlevny strusek, drtící a třídící linky a také mlýnice strusky pro zpracování především ocelářenských strusek z vlastního výskytu a strusek z hald. Takto zpracované hutní odpady uplatňují ve vlastní hutní výrobě anebo je nabízejí externím odběratelům nejčastěji ve stavebním průmyslu [98].

Tato struska byla taktéž aktivována mletím v desintegrátoru a její měrný povrch stanovený dle Blaine je 84 m²/kg, což je mnohem nižší hodnota než u vysokopecní strusky z Kladna. Velikost zrn této strusky se pohybuje v rozmezí 0,1 – 250 mikronů. Nejvyšší zastoupení však měla zrna o velikosti 40 – 100 mikronů [96]. Chemické složení této strusky je zobrazeno v následující tabulce.

Tabulka 12 - Chemické složení vysokopecní strusky z Třinecké železárny [99]

Obsah ve strusce [%]							
Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃
0,99	11,10	9,44	30,68	1,45	37,68	0,67	2,95

Mikroskopickou analýzou byla zjištěna kruhovitost částic této vysokopecní strusky $0,86 \pm 0,24$, poměr os $1,52 \pm 0,72$ a jejich kulatost $0,78 \pm 0,27$. Na následujícím obrázku je snímek získaný pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM).



Obrázek 23 - Snímek SEM (vysokopecní struska Třinec), zvětšeno 500×, detektor sekundárních elektronů

5.1.4 VYSOKOPECNÍ STRUSKA ECOCOAL (N5)

Jedná se o vodou chlazenou vysokopecní granulovanou strusku od firmy ECOCOAL Slag Handling. Pro mletí této strusky byl navržen funkční a inovativní bariérový typ rotoru. Jelikož byla konstrukce rotoru tvořena otěruvzdornými materiály (karbidy wolframu či korundem), které jsou méně odolné vůči rázovému zatížení, bylo tak nutné tuto strusku nejdříve podrobit předběžnému mletí ve dvouválcovém mlýně na velikost zrn menších než 0,5 mm a až poté provést mletí ve vysokorychlostním mlýně. Měrný povrch takto upravené strusky dle Blaine je $175 \text{ m}^2/\text{kg}$. Velikost zrn této strusky se pohybuje v rozmezí 0,5 – 320 mikronů, přičemž největší zastoupení mají zrna o velikosti 10 – 80 mikronů [100]. V následující tabulce je zobrazeno chemické složení této strusky.

Tabulka 13 - Chemické složení vysokopecní strusky Ecocoal [100]

Obsah ve strusce [%]							
Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	CaO	MnO	Fe ₂ O ₃
0,43	9,9	8,44	36,89	1,74	41,08	0,49	0,18

Mikroskopickou analýzou byla zjištěna kruhovitosť částic této vysokopecní strusky $0,82 \pm 0,27$, poměr os $1,67 \pm 0,80$ a jejich kulatost $0,72 \pm 0,27$. Na následujícím obrázku je snímek získaný pomocí skenovacího elektronového mikroskopu (SEM).



Obrázek 24 - Snímek SEM (vysokopecní struska EcoCoal), zvětšeno 500×, detektor sekundárních elektronů

5.1.5 CEMENT

V této práci byl k výrobě vzorků využit CEM I 42,5 R z cementárny Radotín, která spadá pod výrobce Českomoravský cement a.s. Jde o typ cementu s rychlým nárůstem pevností, a tudíž s vysokou počáteční a konečnou pevností. Jeho fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 14 - Fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti cementu typu CEM I 42,5 R [101]

Fyzikální a mechanické vlastnosti				Chemické vlastnosti			
Parametr	Charakteristická hodnota	Metoda / poznámka	Parametr	Charakteristická hodnota	Metoda / poznámka		
Pevnost v tlaku [MPa]	1 den	16,0	EN 196-1	CaO	66,1	EN 196-2	
	2 dny	29,9	EN 196-1	SiO ₂	19,7	EN 196-2	
	7 dní	50,0	EN 196-1	Al ₂ O ₃	4,4	EN 196-2	
	28 dní	59,7	EN 196-1	Fe ₂ O ₃	2,5	EN 196-2	
	56 dní	64,0	EN 196-1	MgO	2,0	EN 196-2	
	90 dní	66,0	EN 196-1	SO ₃	3,01	EN 196-2	
Pevnost v tahu za ohybu [MPa]	1 den	4,0	EN 196-1	Cl	0,083	EN 196-2	
	2 dny	5,9	EN 196-1	K ₂ O	0,75	EN 196-2	
	7 dní	8,0	EN 196-1	Na ₂ O	0,11	EN 196-2	
	28 dní	9,4	EN 196-1	Na ₂ O ekvivalent [%]	0,60	EN 196-2	
	56 dní	9,4	EN 196-1	Nerozpuštěný zbytek [%]	1,03	EN 196-2	
	90 dní	9,4	EN 196-1	Ztráta žíháním [%]	2,65	EN 196-2	
Normální konzistence [%]	28,3	EN 196-3					
Počátek tuhnutí [min]	196	EN 196-3					
Konec tuhnutí [min]	281	EN 196-3					
Objemová stálost [mm]	1,6	EN 196-3, Le Chatelier					
Měrný povrch [m ² ·kg ⁻¹]	357	EN 196-6, Blaine					
Měrná hmotnost [kg·m ⁻³]	3150	EN 196-6					
Sypná hmotnost [kg·m ⁻³] - v autocisterně	970	Přibližná hodnota při uložení cementu do cisterny.					
Sypná hmotnost [kg·m ⁻³] - v síle	1200–1600	Odhad při uskladnění v síle. Mění se v závislosti na míře setřesení cementu, době uskladnění nebo velikosti a zaplnění síle.					
Hydratační teplo [J·g ⁻¹]	7 dní	335	EN 196-8				

5.1.6 PÍSEK

V této práci byl jako plnivo využitý křemičitý písek od společnosti Filtrační písky, spol. s r.o. Tato společnost nevyrábí přímo normalizovaný písek CEN, ale vyrábí křemičité písky s označením PG1, PG2 a PG3, které se od sebe liší příslušnou frakcí (viz *Tabulka 15*). Smícháním těchto typů písků v poměru 1:1:1, byl získán písek, jenž odpovídal normalizovanému písku CEN dle ČSN EN 196-1 [94]. Tato společnost vlastní certifikát na produkt normalizovaný písek, který byl vydán Technickým a zkušebním ústavem stavebním v Praze, a lze ho tak použít dle ČSN EN 196-1.

Tabulka 15 - Zrnitost použitých typů písku a normalizovaného písku CEN

Síta [mm]	Celkový zbytek na síť [%]			
	PG1	PG2	PG3	Normalizovaný písek CEN
2,00	-	-	0	0
1,60	-	-	21	7 ± 5
1,00	-	7	92	33 ± 5
0,50	8	93	100	67 ± 5
0,16	61	100	-	87 ± 5
0,08	97	-	-	99 ± 1
<0,08	100	-	-	100

5.1.7 VODA

K výrobě vzorků byla využita běžná kohoutková voda bez dalších přísad. V okamžiku výroby vzorků byly z dat společnosti Pražské vodovody a kanalizace, a.s. ověřeny všechny náležitosti určené vyhláškou č. 252/2004 Sb. a použitá voda je splňovala.

5.1.8 VLHKOST VSTUPNÍCH SUROVIN

Vlhkost vstupních surovin byla stanovena analyzátozem vlhkosti KERN DLB 160-3A dle ČSN EN 1097-5 [102]. Hmotnost zkušební navážky byla 16 ± 1 g. Sušení vzorku zajistil halogenový zářič o příkonu 400 W. Teplota sušení byla nastavena na 110 ± 5 °C. Výsledné vlhkosti vstupních surovin jsou zobrazeny v následující tabulce.

Tabulka 16 - Vlhkost vstupních surovin

Surovina	Vlhkost [%]
CEM I 42,5R	0,69
Vysokopecní struska Kladno (N1)	2,05
Popílek a struska Kladno 50:50 (N2)	1,81
Popílek a struska Kladno 75:25 (N3)	0,77
Vysokopecní struska Třinec (N4)	0,10
Vysokopecní struska EcoCoal (N5)	0,10
Křemičitý písek (0-2 mm)	0,14

Ze získaných hodnot vlhkostí lze konstatovat, že až na vysokopecní strusku Kladno (N1) lze všechna použitá alternativní pojiva, resp. aktivní jemnozrné příměsi využít jako příměs do betonu. Vysokopecní struska Kladno (N1) nesplňuje normu ČSN EN 15167-1 [44], dle které musí být vlhkost strusky použité jako příměs do betonu maximálně 1 %. Křemičitý písek (0-2 mm) pak lze využít dle normy ČSN EN 196-1 [94] k výrobě cementových past (viz následující kapitola). Dle této normy musí být maximální vlhkost písku 0,2 %.

5.2 ZKUŠEBNÍ VZORKY

Zkušební vzorky o rozměrech 40×40×160 mm byly vyrobeny dle ČSN EN 196-1 [94] pomocí ocelových trojforem. Pro zkušební účely bylo navrženo celkem 11 směsí, kdy pro každou směs bylo vyrobeno 12 vzorků. Celkový počet vyrobených vzorků byl tedy 132.

Cementové pasty byly vyrobeny v poměru materiálů 1:3:0,5 (pojivo: písek: voda). Vodní součinitel (w/b) byl pro všechny směsi roven 0,5, a to z důvodu porovnání vlastností cementu a částečně nahrazeného cementu alternativními pojivy bez vlivu odlišného množství vody. Jednotlivé sady vzorků byly označeny formou N1-5_30 (50), kde číslem 1 – 5 byl označen

materiál (viz *Tabulka 17*), kterým byl cement nahrazován, a číslem za podtržítkem pak procentuální nahrazení cementu tímto materiálem (30 %-hm. nebo 50 %-hm.). Označení a složení jednotlivých směsí je zobrazeno v *Tabulce 17*.

Tabulka 17 - Složení testovaných směsí

Ozn.	Množství [kg]							Křemičitý písek (0 - 2 mm)	Voda
	CEM I 42,5R	Vysokopecní struska Kladno	Popílek a struska Kladno 50:50	Popílek a struska Kladno 75:25	Vysokopecní struska Třinec	Vysokopecní struska EcoCoal			
REF	1,650	-	-	-	-	-	4,950	0,825	
N1_30	1,155	0,495	-	-	-	-	4,950	0,825	
N1_50	0,825	0,825	-	-	-	-	4,950	0,825	
N2_30	1,155	-	0,495	-	-	-	4,950	0,825	
N2_50	0,825	-	0,825	-	-	-	4,950	0,825	
N3_30	1,155	-	-	0,495	-	-	4,950	0,825	
N3_50	0,825	-	-	0,825	-	-	4,950	0,825	
N4_30	1,155	-	-	-	0,495	-	4,950	0,825	
N4_50	0,825	-	-	-	0,825	-	4,950	0,825	
N5_30	1,155	-	-	-	-	0,495	4,950	0,825	
N5_50	0,825	-	-	-	-	0,825	4,950	0,825	

5.2.1 VÝROBA VZORKŮ

Nejprve byly naváženy všechny potřebné suroviny (voda, cement, alternativní pojiva a písek) pomocí laboratorní váhy s přesností ± 1 g dle daných receptur jednotlivých směsí. Poté byl do míchací nádoby opatrně nasypán cement s alternativním pojivem tak, aby nedošlo k žádným ztrátám materiálu. Následně byla během 10 sekund do nádoby nalita voda a zahájeno míchání na nízkou rychlost po dobu 1 minuty. Po 30 sekundách míchání byl během dalších 30 sekund míchání do nádoby plynule nasypán písek a míchání bylo přepnuto na vysokou rychlost po dobu dalších 30 sekund. Poté bylo míchání pozastaveno na 90 sekund, během kterých byla pomocí plastové stěrky setřena malta ze stěn míchací nádoby a umístěna do středu. Po 90 sekundách bylo opět zahájeno míchání vysokou rychlostí po dobu 60 sekund. Celková doba míchání tak byla 4 minuty. Ihned po dokončení míchání se pomocí špachtle naplnily maltou zhruba do poloviny připravené ocelové trojformy, jejichž vnitřní povrch byl natřen tenkou vrstvou minerálního oleje. Tato první vrstva malty byla dále zhutněna 10 rázy dvou protilehlých stran trojformy o stůl, aby nedošlo k nahromadění materiálu k jedné straně. Poté byly maltou naplněny zbylé části forem a bylo provedeno jejich následné zhutnění. Nakonec byl zarovnan povrch malty s okraji trojforem pomocí pilového pohybu špachtle a vzorky byly uloženy při teplotě okolí 22 °C.



Obrázek 25 - Výroba vzorků

5.2.2 ULOŽENÍ VZORKŮ

Zkušební vzorky byly vyjmuty z forem po 24 hodinách vytvrzování. Poté byly vzorky popsány a uloženy do kalfasu s kohoutkovou vodou o teplotě 20 ± 1 °C a to tak, aby byly zcela pod vodou. Vzorky byly uloženy ve vodě až do samotných zkoušek. Před zkouškami byly vzorky zváženy, změřeny a přikryty vlhkou tkaninou až do okamžiku zkoušky.

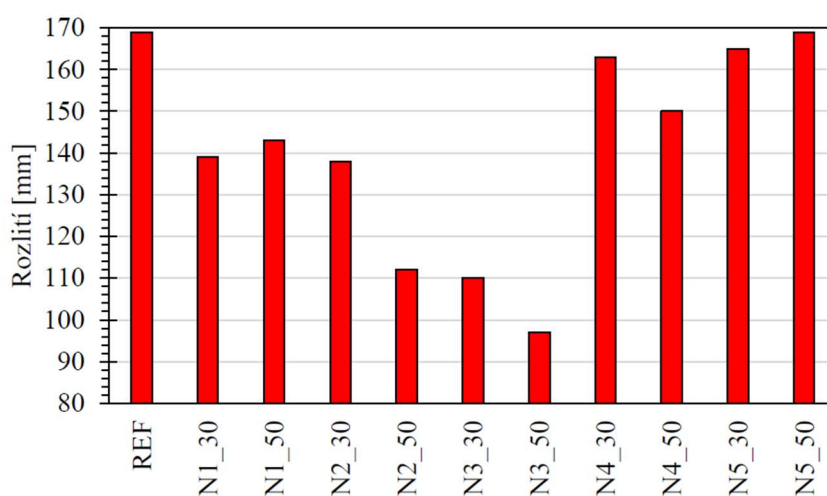
6 VÝSLEDKY A DISKUZE

V této kapitole budou zobrazeny a popsány výsledky jednotlivých měření. Výsledky budou dále porovnány s výsledky měření jiných autorů, které jsou popsány v kapitole „3 Využití strusky a popílků jako náhrad cementu v cementových pastách“.

6.1 ČERSTVÁ SMĚS

6.1.1 KONZISTENCE ČERSTVÉ MALTY

Konzistence čerstvé malty byla stanovena na vzorcích se stejným vodním součinitelem, tj. 0,5. Naměřené hodnoty jsou zobrazeny v následujícím grafu.



Graf 6 - Rozliti čerstvé malty

Z Grafu 6 je patrné, že se zvyšujícím se obsahem popílku v pastách hodnoty rozliti klesají, zatímco se zvyšujícím se obsahem strusky hodnoty rozliti stoupají. Tyto trendy lze pozorovat i v práci Hanzálka [67] a Ma a kol. [68]. Zajímavé však je, že u vzorků s označením N4 dochází se zvyšujícím se obsahem strusky ke snížení tekutosti. Nejnižší hodnoty rozliti lze pozorovat u vzorků s označením N3. Příčinou je zde pravděpodobně jemnost částic popílku, která byla oproti ostatním použitým materiálům zdaleka nejvyšší. Nejvyšší hodnoty rozliti lze naopak pozorovat u vzorků s označením N4 a N5, kdy částice použitých strusek byly nejhrubší. Z těchto závěrů lze konstatovat, že jemnost materiálů má výrazný vliv na výslednou konzistenci, kdy se zvyšující se jemností klesá tekutost.

6.1.2 NORMÁLNÍ KONZISTENCE A DOBA TUHNUTÍ

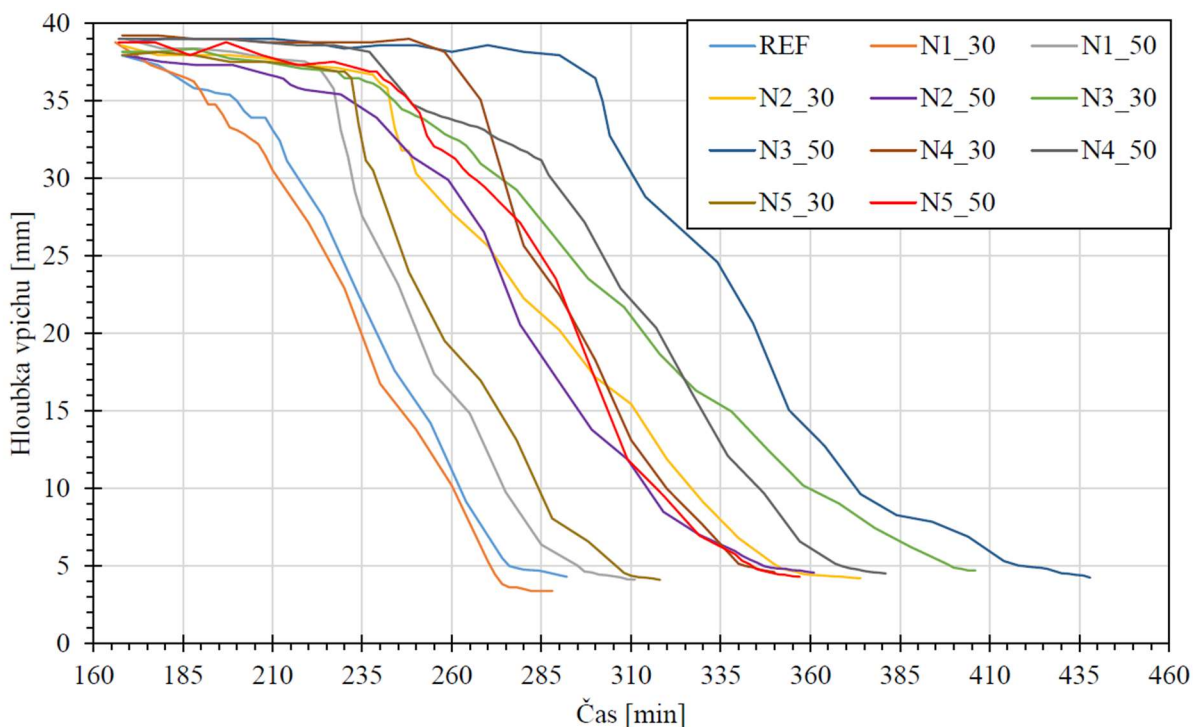
Opakovaným měřením normální konzistence s upraveným množstvím vody byly získány výsledné hodnoty, které jsou uvedeny v *Tabulce 18*. U vzorků N4 lze pozorovat pokles normální konzistence se zvyšujícím se obsahem strusky, čímž se liší tato varianta od vzorků N1 a N5, kde se s vyšším obsahem strusky normální konzistence naopak zvyšuje. To lze vysvětlit tím, že strusky ve vzorcích N1 a N5 jsou jemnější, tím mají vyšší měrný povrch částic a roste tak spotřeba záměsové vody. Všechny vzorky, které obsahovaly strusku, měly hodnoty normální konzistence nižší než vzorek referenční. Nejvyšších hodnot normální konzistence je opět dosaženo u vzorků s velmi jemným fluidním popílkem. Zcela nejvyšší normální konzistenci lze pak pozorovat u vzorku N3_50, který obsahoval nejvyšší množství daného popílku. Ze získaných dat je stejně jako u rozliti zcela patrný vliv jemnosti částic materiálů na výsledné hodnoty normální konzistence, což plně koresponduje s poznatky Zhua a kol. [69] a Cheerarota a kol. [70].

Tabulka 18 - Normální konzistence a doba tuhnutí testovaných past

Ozn.	Normální konzistence [%]	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí [min]	Doba tuhnutí [min]
REF	28,0	198	280	82
N1_30	25,0	194	274	80
N1_50	25,6	227	299	72
N2_30	31,6	242	354	112
N2_50	34,4	229	353	124
N3_30	35,6	248	400	152
N3_50	42,4	300	426	126
N4_30	24,0	258	342	84
N4_50	22,4	269	369	100
N5_30	26,0	232	310	78
N5_50	26,4	241	345	104

Výsledky získané prostřednictvím automatického Vicatova přístroje jsou zobrazeny v *Tabulce 18* a v *Grafu 7*. Na začátek je důležité zmínit, že se nepodařilo nastavit automatický Vicatův přístroj tak, aby měřil hloubku vpichu jehly v požadovaném rozmezí 40 – 0,5 mm. Z tohoto důvodu se naměřené hodnoty hloubky vpichu pohybovaly v rozmezí 39 – 4 mm, což je patrné i z *Grafu 7*. Ze získaných dat je zřejmé, že se zvyšujícím se procentuálním nahrazením cementu dochází ke zpomalení počátku tuhnutí, což je způsobeno nižší aktivitou použitých materiálů v raných fázích tuhnutí a tvrdnutí. Tento trend lze pozorovat i ve studii Cheerarota a kol. [70]. Dle těchto autorů je to způsobeno snížením obsahu cementu a tím i trikalciumpopílkem (C3S) a trikalciualuminátem (C3A), jenž zajišťují tuhost cementu v raných fázích. Zajímavý

vývoj doby tuhnutí lze pak pozorovat u vzorků N1_30 a N1_50, které mají kratší dobu tuhnutí než vzorek referenční. Nejdelší dobu tuhnutí mají vzorky obsahující popílek. Jde o vzorky s označením N2, a především pak N3_30, který má dobu tuhnutí až o 70 minut delší než vzorek referenční. Tento fakt je způsoben pomalejší pucolánovou reakcí popílku, která se projevuje až po delší době vytvrzování. U vzorků N4 a N5, kde byl cement nahrazen struskami došlo taktéž k prodloužení doby tuhnutí oproti referenčnímu vzorku, ale rozdíl mezi nimi byl pouze 20 minut, což je výrazně méně než u vzorku N3_30.



Graf 7 - Doba tuhnutí testovaných past

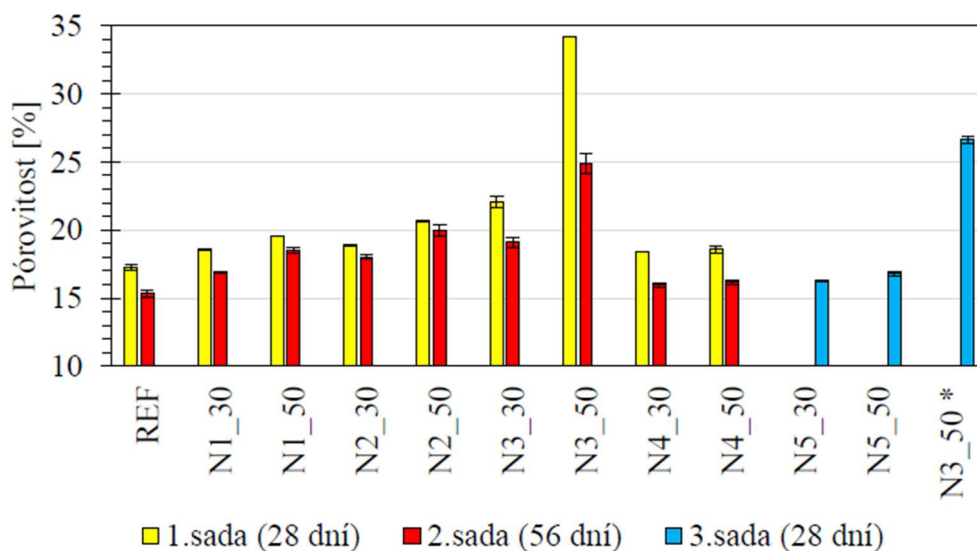
6.2 ZATVRDLÁ SMĚS

Na zatvrdlých směsích byl po dobu 90 dnů sledován vývoj objemových hmotností, dynamických modulů, pevností v tlaku a pevností v tahu za ohybu. Dále byla stanovena pórovitost vzorků po 28 a 56 dnech. Vzhledem k pozdějšímu dodání vysokopecní strusky Ecocoal (N5) nejsou k dispozici výsledky dynamických modulů a pevnostních zkoušek po 90 dnech.

6.2.1 PÓROVITOST

Pórovitost vzorků byla stanovena z několika důvodů. Prvním důvodem bylo sledování vývoje pórovitosti po 28 dnech (1. a 3.sada) a 56 dnech (2. sada), která by měla vlivem postupného zaplňování pórů hydratačními produkty klesat. Jelikož nebyly všechny vzorky vyrobeny

najednou, ale po třech sadách, tak byla prostřednictvím pórovitosti ověřena jednotnost vzorků stejného složení z jiných výrobních sad. Při hutnění vzorků by totiž mohlo dojít ke vzniku technologických pórů, které by pak mohly negativně ovlivnit výsledky jednotlivých zkoušek. Dalším důvodem bylo sledování vlivu pórovitosti na výsledné pevnosti v tlaku. Výsledné hodnoty pórovitosti jednotlivých vzorků a sad jsou zobrazeny v následujícím grafu.

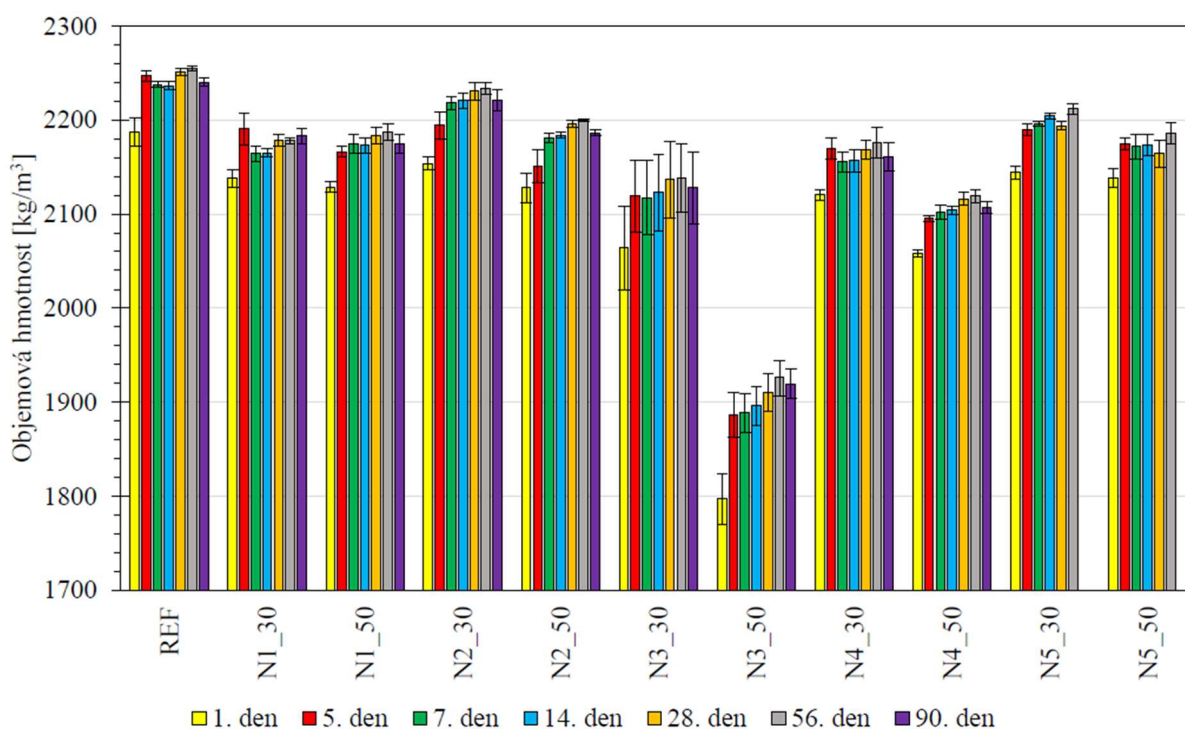


Graf 8 - Pórovitost vzorků s vnesenými směrodatnými odchylkami

Z Grafu 8 je patrné, že se zvyšujícím se procentuálním nahrazením cementu dochází ke zvýšení celkové pórovitosti u všech vzorků. Toto zvýšení pórovitosti je pak výrazné zejména u vzorků s označením N3, které obsahovaly vyšší podíl fluidního popílku. Dále je zřejmé, že mezi 28. a 56. dnem vytvrzování dochází k již zmíněnému snížení pórovitosti vlivem postupného zaplňování pórů hydratačními produkty. Největší rozdíl pórovitostí mezi 28. a 56. dnem pak lze pozorovat u vzorků s označením N3_30 a N3_50, kde se projevila pomalejší pucolánová reakce popílku. Tato zjištění jsou v souladu s výzkumem, který provedli Li a kol. [74]. Neméně důležitou roli zde sehrává vodní součinitel (w/b), tedy poměr vody ku pojivu. Z důvodu vysoké pórovitosti vzorku N3_50 byl vyroben vzorek N3_50 * s množstvím vody dle normální konzistence. Jak lze pozorovat v Grafu 8, tak s vyšším množstvím vody se pórovitost tohoto vzorku po 28 dnech snížila zhruba o 22 %. Nejnižší pórovitost po 28 dnech měly vzorky s vysokopecní struskou Ecocoal s označením N5.

6.2.2 OBJEMOVÁ HMOTNOST

Pro výpočet objemových hmotností vzorků byly využity jejich rozměry a hmotnosti, které byly měřeny pro výpočet dynamického modulu pružnosti a dynamického smykového modulu. Objemová hmotnost po 1 dni vytvrzování byla vypočtena z rozměrů a hmotností nenamočených vzorků, a to zhruba 20 minut po jejich odbednění. V následujících dnech byly vzorky uloženy ve vodě. Měřeny a váženy byly po osušení jejich povrchu látkou a zhruba po 20 minutách od vyjmutí z vody. V *Grafu 9*, který zobrazuje vývoj objemových hmotností vzorků během 90 dní vytvrzování, lze proto pozorovat výraznější rozdíl objemových hmotností mezi 1. a 5. dnem stáří.



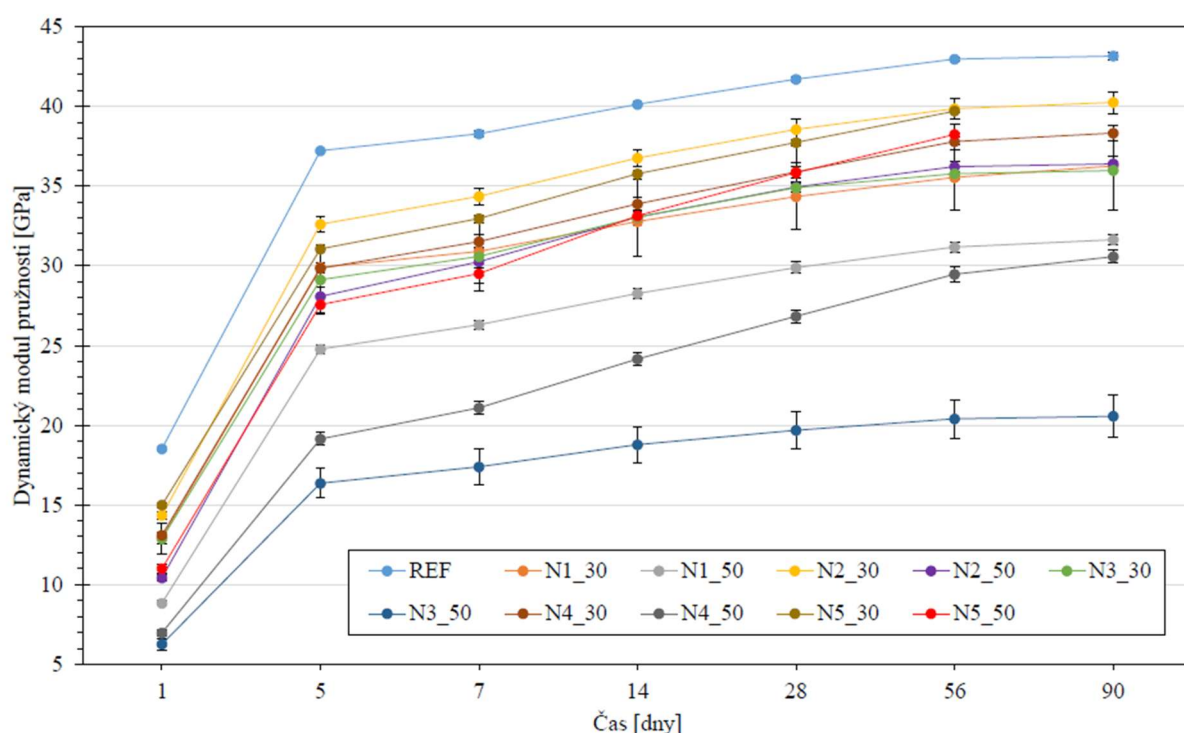
Graf 9 - Objemová hmotnost vzorků s vyneseny směřodatnými odchylkami

Z *Grafu 9* je zřejmé, že žádný ze vzorků neměl po celou dobu měření vyšší objemovou hmotnost než vzorky referenční (2240 kg/m^3 po 90 dnech). Nejvíce se mu přiblížily vzorky N2_30 (2220 kg/m^3 po 90 dnech) a N5_30 (2212 kg/m^3 po 56 dnech). Se zvyšujícím se obsahem popílku dochází ke snížení objemové hmotnosti, což odpovídá zjištěním Heikala a kol. [78] a Mukherjea a kol. [79]. U vzorků N1 lze se zvyšujícím se obsahem vysokopecní strusky pozorovat téměř totožné hodnoty objemových hmotností. U vzorků N4 a N5, které obsahují taktéž vysokopecní strusku lze se zvyšujícím se zastoupením strusky pozorovat naopak snížení objemové hmotnosti. V tomto případě se výsledky neshodují se závěry Hanzálka [67] a Khalila [77], kteří tvrdí, že s vyšším nahrazením cementu vysokopecní struskou dochází ke

zvýšení objemové hmotnosti. Při pohledu na *Graf 8* a *Graf 9* je zcela patrná přímá závislost pórovitosti a objemové hmotnosti. Zatímco pórovitost stářím klesá, tak objemová hmotnost vlivem vyplňování pórů hydratačními produkty s časem roste. Nejnížší objemovou hmotnost měly vzorky N3_50 (1919 kg/m³ po 90 dnech), které byly zároveň i nejvíce porézní.

6.2.3 DYNAMICKÝ MODUL PRUŽNOSTI A SMYKOVÝ MODUL

V *Grafu 10* je zobrazen vývoj dynamického modulu pružnosti jednotlivých vzorků po dobu 90 dní. Hodnoty dynamického modulu pružnosti byly vypočteny z podélných vlastních frekvencí dle vzorce (3). V *Grafu 11* je pak zobrazen vývoj dynamických smykových modulů, které byly vypočteny dle vzorce (5).

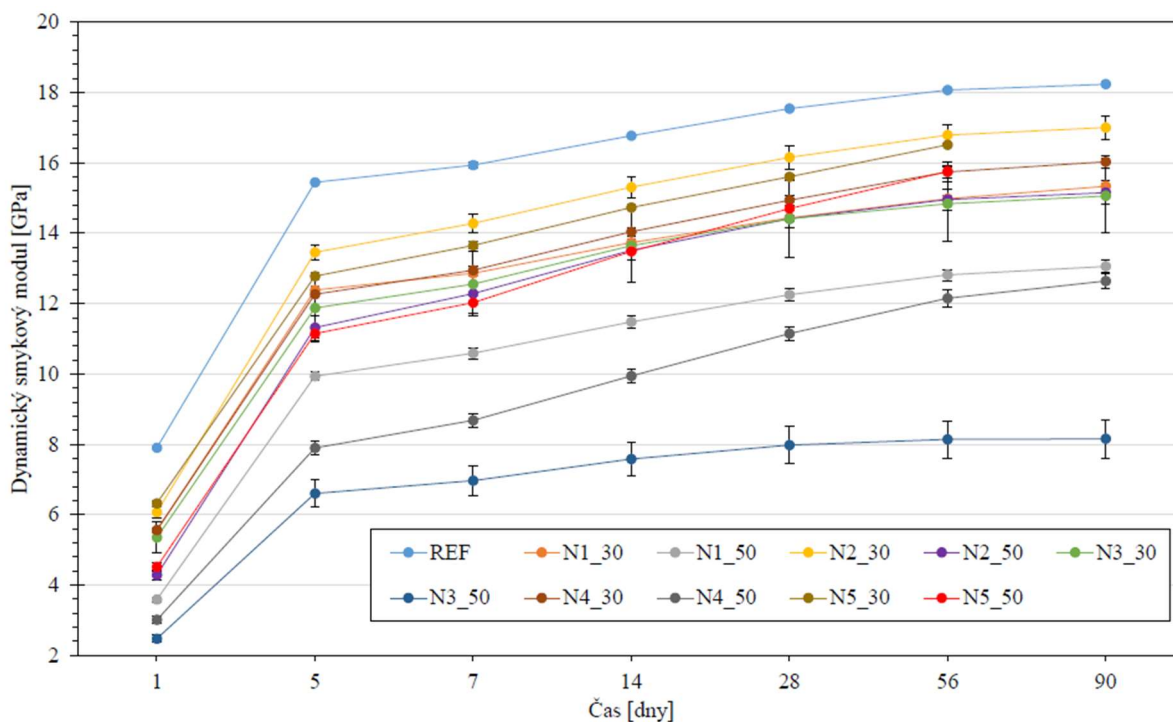


Graf 10 - Dynamický modul pružnosti s vyneseními směrodatnými odchylkami

Z předchozího grafu je zcela očividné, že žádný z testovaných vzorků neměl během 90 dní vytvrzování vyšší dynamický modul pružnosti než vzorek referenční, který dosáhl hodnoty 43,1 GPa po 90 dnech zrání. Referenčnímu vzorku se nejvíce přiblížil vzorek N2_30, který měl po 90 dnech zrání modul pružnosti nižší o necelé 3 GPa. Při pohledu na vývoj dynamického modulu pružnosti u vzorků N5_30 a N5_50 lze predikovat, že se po 90 dnech nejvíce přiblíží referenčnímu vzorku a přeskočí tak vzorek N2_30. Nejintenzivnější nárůst dynamického modulu pružnosti lze u všech vzorků pozorovat během prvních 5 dní, kdy všechny vzorky kromě vzorku N4_50 dosáhly zhruba 77 – 80 % svých 90denních hodnot. Z tohoto důvodu by

bylo zajímavé zvýšit četnost měření během těchto pěti dní. Ze získaných dat je dále zřejmé, že s vyšším obsahem strusky a popílků dochází ke snížení dynamického modulu pružnosti. Nejnižší dynamický modul pružnosti lze sledovat u vzorku s označením N3_50, který po 90 dnech dosáhl hodnoty pouze 20,5 GPa, což je zhruba 48 % z 90denního modulu pružnosti vzorku referenčního. Důvodem je vysoká poréznost vzorků N3, což už bylo zmíněno v předchozích podkapitolách. S vysokou pórovitostí je pak spojená i špatná povrchová struktura těchto vzorků, která byla zcela nevhodná pro rezonanční metodu. Z tohoto důvodu lze u vzorků N3 pozorovat výrazně vyšší směrodatné odchylky než u jiných vzorků.

V práci Hanzálka [67] lze sledovat, že po 27 dnech zrání měly všechny vzorky s vysokopecní struskou vyšší modul pružnosti než vzorek referenční. Tento trend však nebyl v této práci potvrzen. Šádková [84] ve své práci nahrazovala cement obdobnými pojivy, kdy nejlepšími výsledky bylo dosaženo u vzorku, kde byl cement z 30 % nahrazen vysokopecní struskou z Třince, který měl po 28 dnech vytvrzování vyšší modul pružnosti než referenční vzorek. Vzorek N4_30 v této práci nedosáhl během 90 dní vyššího modulu pružnosti než vzorek referenční, ale jeho modul pružnosti byl jeden z nejvyšších. Důležité je zmínit, že ve výše zmíněných pracích nebyl v pastách obsažen křemičitý písek, který modul pružnosti výrazně ovlivňuje. Také proto jsou hodnoty zmíněné v podkapitole „3.2.3 Dynamický modul pružnosti“ výrazně nižší než v této práci.



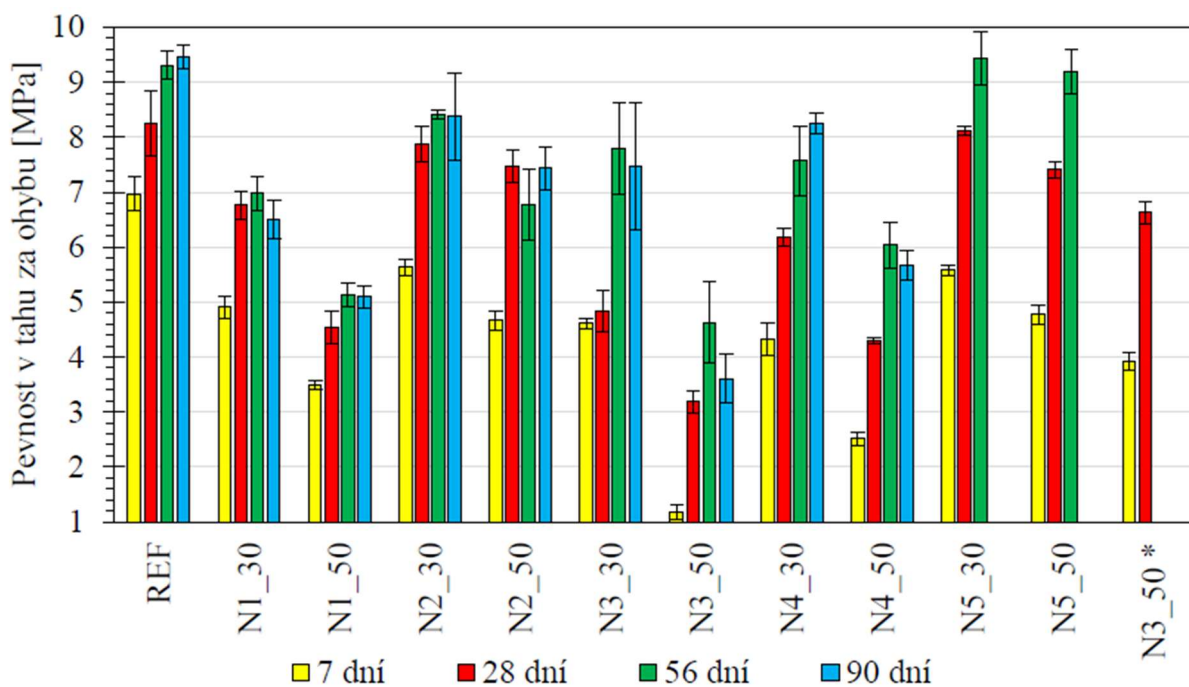
Graf 11 - Dynamický smykový modul s vynesnými směrodatnými odchylkami

Dynamický smykový modul jednotlivých vzorků (*Graf 11*) má během 90 dní obdobný vývoj jako dynamický modul pružnosti (*Graf 10*), a proto i pro něj platí výše zmíněné.

Dynamický modul pružnosti, který byl vypočten z podélných vlastních frekvencí, byl na závěr kontrolován s dynamickým modulem pružnosti, který byl vypočten z příčných vlastních frekvencí dle vzorce 4. Hodnoty těchto dynamických modulů pružnosti se bez vzorků N3 (z důvodu zmíněného výše) lišily pouze v rozmezí 0 – 2 %. Vzhledem k velmi nízkým odchylkám lze naměřené hodnoty považovat za velmi přesné.

6.2.4 PEVNOST V TAHU ZA OHYBU

Výsledné hodnoty pevností v tahu za ohybu, které byly získány prostřednictvím zkoušky s tříbodovým ohybem, jsou zobrazeny v *Grafu 12*. Vzorky byly podrobeny této zkoušce po 7, 28, 56 a 90 dnech zrání.



Graf 12 - Pevnost v tahu za ohybu s vyneseními směrodatnými odchylkami

Z *Grafu 12* je patrné, že s vyšším obsahem vysokopecní strusky, a zejména pak popílků, dochází ke snížení počátečních pevností v tahu za ohybu. To lze vysvětlit snížením obsahu cementu, který mimo jiné obsahuje trikalciumpilíkát a trikalciualuminát, jenž zajišťují pevnost cementové matrice v raných fázích. Dalším důvodem je, že materiály jako strusky a popílků reagují až po delší době vytvrzování, a proto lze u většiny vzorků pozorovat vyšší nárůst pevností po 28 či 56 dnech zrání než u referenčního vzorku. Názorným příkladem může být

například vzorek N3_30, kdy mezi 28 a 56 dnem vytvrzování došlo vlivem pucolánové reakce popílku ke zvýšení pevnosti v tahu za ohybu zhruba o 62 %.

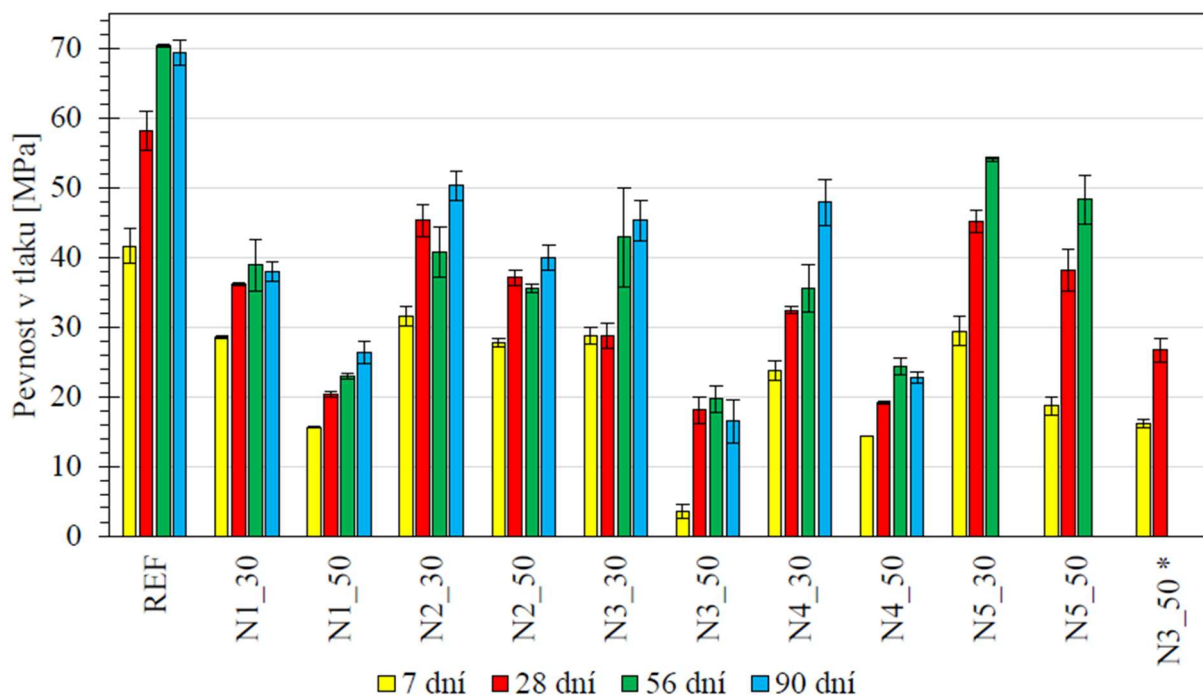
Po 90 dnech vytvrzování dosáhl referenční vzorek pevnosti v tahu za ohybu 9,4 MPa. Stejně hodnoty dosáhl i vzorek N5_30 s vysokopecní struskou Ecocoal, a to pouze po 56 dnech vytvrzování. Při pohledu na vývoj pevnosti v tahu za ohybu u vzorků N5_30 a N5_50 lze předpokládat, že po 90 dnech zrání budou mít o něco vyšší pevnost v tahu za ohybu než vzorek referenční. Velmi dobrých výsledků bylo dosaženo i v případě vzorků N2_30 (8,4 MPa po 90 dnech) a N4_30 (8,3 MPa po 90 dnech).

U vzorku N3_50, který obsahoval nejvyšší množství popílku a byl zároveň i nejvíce porézní, bylo dosaženo jednoznačně nejhorších hodnot po celou dobu měření. Vzhledem k velmi nízké sedmidenní pevnosti a vysoké pórovitosti tohoto vzorku byl vyroben vzorek s množstvím vody dle normální konzistence s označením N3_50*. Změnou vodního součinitele došlo oproti původnímu vzorku k výraznému nárůstu pevnosti v tahu za ohybu po 7 a 28 dnech zrání. V práci Wonga a kol. [85] lze pozorovat také nejnižší pevnost v tahu za ohybu u vzorku, ve kterém byl cement nahrazen z 55 % hm. popílkem. Tento fakt potvrzuje i Sičáková a kol. [86].

V *Grafu 12* lze u některých vzorků pozorovat propady pevností během vytvrzování (např. u vzorku N2_50 po 56 dnech). Tyto propady jsou ale v rozmezí směrodatné odchylky, a proto z nich nelze dělat žádné závěry. U některých vzorků je možné pozorovat i relativně vysoké směrodatné odchylky, což může být způsobeno například vnitřní pórovitostí vzorků. Nejvyšší směrodatná odchylka je 1,17 MPa, a to u vzorku N3_30 po 90 dnech vytvrzování, přičemž průměrná odchylka je zhruba 0,17 MPa.

6.2.5 PEVNOST V TLAKU

Jednoosé tlakové zkoušky bylo podrobena 5 – 6 polovin vzorků od každé pasty. Ze získaných hodnot pevností v tlaku byla odstraněna ta nejvyšší a nejnižší a ze zbylých hodnot byl vypočten aritmetický průměr, jenž představuje výslednou hodnotu pevnosti v tlaku dané pasty. Tyto výsledné hodnoty pak byly zpracovány do následujícího grafu.



Graf 13 - Pevnost v tlaku s vnesenými směrodatnými odchylkami

Z Grafu 13 je zřejmé, že s vyšším zastoupením popílku a strusky v pastách dochází ke snížení pevnosti v tlaku. Jednoznačně nejvyšší pevnost v tlaku po 90 dnech vytvrzování lze pozorovat u referenčního vzorku, který dosáhl hodnoty 69,3 MPa. Této hodnotě se nejvíce přiblížil již po 56 dnech vytvrzování vzorek N5_30 (54 MPa). Stejně jako v předešlých případech lze ale očekávat, že po 90 dnech vytvrzování svoji pevnost v tlaku navýší, což platí i pro vzorek N5_50. Dle mého odhadu by tyto vzorky mohly dosáhnout pevnosti v tlaku zhruba 60 – 70 MPa. Zajímavých výsledků bylo dosaženo také v případě vzorků N2_30 (50,3 MPa po 90 dnech), N3_30 (45,2 MPa po 90 dnech) a N4_30 (47,8 MPa po 90 dnech). Nelze si nevšimnout, že u referenčního vzorku mezi 56. a 90. dnem dochází k mírnému poklesu pevnosti v tlaku. U většiny vzorků jde naopak v této fázi pozorovat nárůst pevností, což opět potvrzuje fakt, že strusky, a především popílky reagují i po delší době vytvrzování (viz např. vzorek N4_30).

Při pohledu na *Graf 8* a *Graf 13* je zcela zřejmá závislost pevnosti v tlaku na pórovitosti. Pórovitost se postupem času vlivem zaplňování pórů hydratačními produkty snižuje, a tím se zvyšuje pevnost v tlaku. Nejnižší pevnost v tlaku lze během celých 90 dní sledovat u vzorku N3_50, který byl zároveň nejvíce porézní. S množstvím vody dle normální konzistence došlo u tohoto vzorku ke snížení pórovitosti zhruba o 22 %, což mělo za následek výrazné zvýšení pevnosti v tlaku (vzorek N3_50*). Jak již bylo zmíněno výše, tak nejvyšší pevnosti v tlaku po referenčním vzorku dosáhl vzorek N5_30, který byl naopak porézní nejméně. Tyto zjištění zcela odpovídají závěrům Lia a kol. [74].

V práci Lia a kol. [74] lze pozorovat trend, že se zvyšujícím se obsahem vysokopecní strusky v pastách dochází ke zvýšení pevnosti v tlaku. To v této práci nebylo potvrzeno ani u jednoho vzorku s vysokopecní struskou, přičemž je důležité zmínit, že autoři zmiňované práce vyráběli vzorky s jiným vodním součinitelem (0,4). Jak již bylo zmíněno výše, tak vodní součinitel má významný vliv na pevnost v tlaku, což může být i příčinou v tomto případě. V dalších pracích lze také sledovat, že nahrazení cementu popílkem v množství vyšším jak 30 %-hm. má negativní vliv na pevnost v tlaku [74; 86].

7 ZÁVĚR

Bakalářská práce se v rešeršní části zabývala charakterizací strusek a popílků, jejich využitím ve stavebnictví, zejména pak v cementových kompozitech, a také způsoby, kterými lze aktivovat jejich pojivové vlastnosti. V experimentální části práce bylo navrženo 11 cementových past, ve kterých byl cement nahrazen ze 30 a 50 % hmotnosti třemi druhy vysokopecních strusek a fluidním popílkem. Na jednotlivých pastách pak byly ověřeny základní materiálové vlastnosti dle příslušných norem, kdy byl sledován vliv náhrad na vlastnosti čerstvých a zatvrdlých směsí. Na čerstvých směsích byla stanovena zpracovatelnost, normální konzistence a doba tuhnutí. U zatvrdlých směsí byl sledován vývoj mechanických vlastností po dobu 7 – 90 dní zrání, a také vliv pórovitosti a objemové hmotnosti na tyto vlastnosti.

Výsledky provedeného experimentu lze shrnout do následujících bodů:

- Žádná z testovaných past nedosáhla po 90 dnech vytvrzování lepších vlastností než čistě cementová pasta.
- Nejlepší vliv na výsledné mechanické vlastnosti mělo nahrazení cementu vysokorychlostně mletou vysokopecní struskou EcoCoal v množství 30 % hmotnosti. O moc horší to nebylo ani v případě 50% nahrazení cementu tímto typem strusky. Dobrých výsledků bylo dosaženo také u nahrazení cementu ze 30 % kombinací vysokorychlostně mletého fluidního popílku (50 %) a vysokopecní strusky z Kladna (50 %), a také u směsi s vysokopecní struskou z Třineckých železáren, ve které byl cement nahrazen ze 30 % hmotnosti.
- Nejhorší vliv na výsledné mechanické vlastnosti mělo nahrazení cementu kombinací vysokorychlostně mletého fluidního popílku (75 %) a vysokopecní strusky z Kladna (25 %) v množství 50 % hmotnosti. Dobrého výsledku nebylo dosaženo ani v případě nahrazení cementu samotnou mletou vysokopecní struskou z Kladna.
- U všech testovaných past platilo, že se zvyšujícím se zastoupením vysokopecní strusky či fluidního popílku dochází ke zhoršení mechanických vlastností, ke zvýšení pórovitosti a k prodloužení doby tuhnutí.
- U většiny past byl pozorován vyšší nárůst pevností po 28 či 56 dnech než u pasty referenční, která dosáhla velmi vysokých hodnot již po týdnu vytvrzování. Tento jev tedy potvrdil všeobecný fakt, že vysokopecní strusky, a především pak fluidní popílků reagují až po delší době vytvrzování.

- Bylo také prokázáno, že s vyšší jemností částic použitých materiálů roste i spotřeba záměsové vody. Vyšší jemnost částic společně s nízkým vodním součinitelem způsobuje vyšší pórovitost past, která pak výrazně ovlivňuje výsledné mechanické vlastnosti kompozitů.

V další fázi výzkumu by bylo vhodné provést podrobnější studii vysokopecní strusky EcoCoal, vysokopecní strusky z Třineckých železáren a také kombinace fluidního popílku s vysokopecní struskou z Kladna v poměru 50:50. Studie by měla být především zaměřena na analýzu jejich chemického složení a mikrostruktury, a na jejich vliv na výsledné materiálové vlastnosti. Od věci by také nebylo podrobněji prozkoumat vliv vodního součinitele na výsledné mechanické vlastnosti a také ověřit, zda k obdobným výsledkům dojde i při zrání vzorků na vzduchu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] TIMPERLEY, Jocelyn. Q&A: Why cement emissions matter for climate change. In: *CarbonBrief* [online]. London: CarbonBrief, 2018 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://www.carbonbrief.org/qa-why-cement-emissions-matter-for-climate-change>
- [2] PŘIBYLA, Ondráš. Jakou roli hrají emise CO₂ z výroby cementu v klimatické změně?. In: *Fakta o klimatu* [online]. 2021 [cit. 2022-02-16]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/explainery/emise-vyroba-cementu>
- [3] Betonové a maltové směsi, omítky - přehled trhu. In: *Tzbinfo* [online]. 2007 [cit. 2022-02-18]. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/3942-betonove-a-maltove-smesi-omitky-prehled-trhu>
- [4] PAVLÍKOVÁ, Milena. *Fyzikální a chemická charakterizace vlivu minerálních příměsí na vlastnosti cementových a vápenných past a malt*. 2016. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [5] HLAVINKOVÁ, Eva. *Potenciální náhrada vysokopecní strusky ve směsných portlandských cementech*. 2012. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [6] BOHÁČ, Martin. *Vývoj cementových směsí pro sklovláknobetonový kompozit*. 2011. Disertační práce. PřF, Geologie.
- [7] ČSN EN 206+A2. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [8] ČSN EN 197-1. *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [9] *Průručka technologa BETON*. 1.vydání aktualizované. Českomoravský beton, 2013.
- [10] LOCHER, Friedrich W. *Cement: principles of production and use: principles of production and use*. Erkrath: Verlag Bau+Technik, 2013, . Dostupné také z: <https://go.exlibris.link/12qPBL9p>
- [11] REITERMAN, Pavel. *Význam minerálních příměsí pro zajištění dlouhodobé trvanlivosti betonu v dopravní infrastruktuře*. 2020. Habilitační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [12] DUAN, Ping, Zhonghe SHUI, Wei CHEN a Chunhua SHEN. Influence of metakaolin on pore structure-related properties and thermodynamic stability of hydrate phases of concrete in seawater environment. *Construction and Building Materials* [online]. 2012, **36**, 947-953 [cit. 2022-02-20]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.06.073
- [13] SIDDIQUE, Rafat a Juvas KLAUS. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. *Applied Clay Science* [online]. 2009, **43**(3-4), 392-400 [cit. 2022-02-20]. ISSN 01691317. Dostupné z: doi:10.1016/j.clay.2008.11.007
- [14] BAKERA, Alice a Mark ALEXANDER. Use of metakaolin as supplementary cementitious material in concrete, with focus on durability properties. *RILEM Technical Letters* [online]. 2019, **4**, 89-102 [cit. 2022-02-20]. ISSN 2518-0231. Dostupné z: doi:10.21809/rilemtechlett.2019.94
- [15] The Material. In: *LC3* [online]. Lausanne [cit. 2022-02-22]. Dostupné z: <https://lc3.ch/the-material/>

- [16] XU, Hua a J.S.J. VAN DEVENTER. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing* [online]. 2000, **59**(3), 247-266 [cit. 2022-02-27]. ISSN 03017516. Dostupné z: doi:10.1016/S0301-7516(99)00074-5
- [17] KOMNITSAS, Konstantinos A. Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. *Procedia Engineering* [online]. 2011, **21**, 1023-1032 [cit. 2022-02-27]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2011.11.2108
- [18] SILVA, P., K. SAGOE-CRENSSTIL a V. SIRIVIVATNANON. Kinetics of geopolymerization: Role of Al₂O₃ and SiO₂. *Cement and Concrete Research* [online]. 2007, **37**(4), 512-518 [cit. 2022-02-27]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2007.01.003
- [19] HASSAN, Amer, Mohammed ARIF a M. SHARIQ. Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2019, **223**, 704-728 [cit. 2022-02-27]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.03.051
- [20] History. In: *Ecosmartconcrete* [online]. Vancouver [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: http://ecosmartconcrete.com/?page_id=250
- [21] MOORE, David. The Riddle of Ancient Roman Concrete. In: *Roman Concrete* [online]. Texas, 1995 [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: <http://www.romanconcrete.com/docs/spillway/spillway.htm>
- [22] AHMAD, Zahra. Why modern mortar crumbles, but Roman concrete lasts millennia. In: *Science* [online]. [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: <https://www.science.org/content/article/why-modern-mortar-crumbles-roman-concrete-lasts-millennia>
- [23] Roman Roads. In: *Imperium Romanum* [online]. [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: <https://imperiumromanum.pl/en/roman-art-and-culture/roman-architecture/roman-roads/>
- [24] GULIKERS, Joost. Durability aspects of fly ash and slag in concrete: Long-term practice experience with the use of blast furnace slag cement for concrete structures at Rijkswaterstaat. *Nordicconcrete* [online]. Oslo, 3 [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: https://nordicconcrete.net/wp-content/uploads/2012/02/Workshop-Proceeding-No-10_komplett-pdf.pdf
- [25] Hungry Horse Project. In: *Hess Roise* [online]. Minneapolis [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: <https://www.hessroise.com/project/hungry-horse-project/>
- [26] ZOBAL, Ondřej, Lubomír KOPECKÝ, Pavel PADEVĚT, Vít ŠMILAUNER a Zdeněk BITTNAR. Analýza betonu z tělesa přehrady Orlík po padesáti letech. *Beton: Technologie - beton v extrémních podmínkách* [online]. **2014**(2), 19-25 [cit. 2022-02-27]. ISSN 1213-3116. Dostupné z: https://mech.fsv.cvut.cz/~smilauer/pdf/Analyza%20betonu%20z%20telesu%20prehrady%20Orlik_Zobal.pdf
- [27] *Using Coal Ash in Highway Construction: A guide to Benefits and Impacts* [online]. EPA, 2005 [cit. 2022-02-26]. Dostupné z: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P100071H.PDF?Dockkey=P100071H.PDF>
- [28] MORAVEC, Tomáš. Z historie používání elektrárenského popílku jako příměsi do betonu v České republice. In: *TZB-info* [online]. [cit. 2022-02-27]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/16746-z-historie-pouzivani-elektrenskeho-popilku-jako-primesi-do-betonu-v-ceske-republice>
- [29] *Struska* [online]. 2008 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <http://www.strusky.cz/>

- [30] C. CURRY, Kenneth. Iron and steel slag. *Mineral Commodity Summaries 2020* [online]. Reston (Virginia): U.S. Geological Survey, 2020, 86-87 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: doi:10.3133/mcs2020
- [31] PIATAK, Nadine a Vojtech ETTLER. CHAPTER 1. Introduction: Metallurgical Slags – Environmental Liability or Valuable Resource?. *Metallurgical Slags* [online]. Cambridge: Royal Society of Chemistry, 2021, 1-13 [cit. 2022-03-02]. Chemistry in the Environment. ISBN 978-1-78801-887-6. Dostupné z: doi:10.1039/9781839164576-00001
- [32] ŠAFRATA, Jiří, Vojtěch VÁCLAVÍK a Petr MLČOCH. Ocelářenská struska a její aktuální využití při výrobě betonu. *Beton* [online]. 2021(1), 41-43 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2021-1-41.pdf>
- [33] YILDIRIM, Irem a Monica PREZZI. Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag. *Advances in Civil Engineering* [online]. 2011, 2011, 1-13 [cit. 2022-03-02]. ISSN 1687-8086. Dostupné z: doi:10.1155/2011/463638
- [34] KONVIČKA, Vladislav. Hornická skripta: Vysokopecní provoz železáren. In: *Nejen HORNICTVÍ.info* [online]. [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <http://podzemi.solvayovylomy.cz/prirucka/zprac/vyspec/vyspec.htm>
- [35] SARNA, Kumar. Blast Furnace Slag. In: *Ispatguru* [online]. Greater Noida, India [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.ispatguru.com/blast-furnace-slag/>
- [36] REMUS, Rainer, Miguel AGUADO-MONSONET, Serge ROUDIER a Luis DELGADO SANCHO. Slag cooling and processing. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production* [online]. European Union, 2013, 297-301 [cit. 2022-03-05]. ISSN 1831-9424. Dostupné z: doi:10.2791/97469
- [37] Products: Properties. In: *EUROSLAG* [online]. Duisburg, Germany: Euroslag - The European Slag Association [cit. 2022-03-05]. Dostupné z: <https://www.euroslag.com/products/properties/>
- [38] Statistics: Statistics 2018. In: *EUROSLAG* [online]. Duisburg, Germany: Euroslag - The European Slag Association [cit. 2022-03-06]. Dostupné z: <https://www.euroslag.com/products/statistics/statistics-2018/>
- [39] SHI, Caijun. Steel Slag—Its Production, Processing, Characteristics, and Cementitious Properties. *Journal of Materials in Civil Engineering* [online]. 2004, 16(3), 230-236 [cit. 2022-03-07]. ISSN 0899-1561. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)0899-1561(2004)16:3(230)
- [40] Products: BASIC OXYGEN FURNACE SLAG. In: *EUROSLAG* [online]. Duisburg, Germany: Euroslag - The European Slag Association [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.euroslag.com/products/bos/>
- [41] Products: ELECTRIC ARC FURNACE SLAG. In: *EUROSLAG* [online]. Duisburg, Germany: Euroslag - The European Slag Association [cit. 2022-03-07]. Dostupné z: <https://www.euroslag.com/products/eaf/>
- [42] Products: Properties. In: *EUROSLAG* [online]. Duisburg, Germany: Euroslag - The European Slag Association [cit. 2022-03-08]. Dostupné z: <https://www.euroslag.com/products/properties/>
- [43] RAMEZANIANPOUR, Ali Akbar. *Cement Replacement Materials : Properties, Durability, Sustainability* [online]. Springer Berlin / Heidelberg, 2013 [cit. 2022-03-08]. ISBN 978-3-642-36721-2. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=1538712>

- [44] ČSN EN 15167-1. *Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty - Část 1 : Definice, specifikace a kritéria shody*. Český normalizační institut, 2006.
- [45] Výroba elektřiny ve světových regionech. In: *Fakta o klimatu* [online]. Otevřená data o klimatu, z. ú., 2021 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://faktaoklimatu.cz/infografiky/elektrina-svet>
- [46] Statistika: Národní energetický mix. In: *OTE* [online]. OTE, a.s., 2018 [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: <https://www.ote-cr.cz/cs/statistika/narodni-energeticky-mix>
- [47] WESCHE, K., ed. *Fly Ash in Concrete : Properties and Performance* [online]. Taylor & Francis Group, 1990 [cit. 2022-03-09]. ISBN 9781482267051. Dostupné z: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/techlib-ebooks/detail.action?docID=183041>
- [48] Popílek a jeho použití do betonu. *Svaz výrobců cementu ČR* [online]. Výzkumný ústav maltovin Praha, spol. s r.o. [cit. 2022-03-09]. Dostupné z: https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/06/popilek_a_jeho_pouziti_do_betonu.pdf
- [49] SOKOLÁŘ, Radomír a Martin NGUYEN. Vlastnosti fluidních elektrarenských popílků s ohledem na jejich použitelnost ve výrobě pálených staviv. In: *Tzbinfo* [online]. Topinfo, 2007 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/cihly-bloky-tvarnice/18458-vlastnosti-fluidnich-elektrarenskych-popilku-s-ohledem-na-jejich-pouzitelnost-ve-vyrobe-palenyh-staviv>
- [50] ČSN EN 450-1. *Popílek do betonu - Část 1 : Definice, specifikace a kritéria shody*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [51] ČSN EN 12620+A1. *Kamenivo do betonu*. Český normalizační institut, 2008.
- [52] YAO, Z.T., M.S. XIA, P.K. SARKER a T. CHEN. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China. *Fuel* [online]. 2014, **120**, 74-85 [cit. 2022-03-12]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2013.12.003
- [53] BLISSETT, R.S. a N.A. ROWSON. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. *Fuel* [online]. 2012, **97**, 1-23 [cit. 2022-03-12]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2012.03.024
- [54] POLACH, Vladislav. Parní kotle. *Inovace odborného vzdělávání na středních školách zaměřené na využívání energetických zdrojů pro 21. století a na jejich dopad na životní prostředí* [online]. Plzeň: Fakulta strojní západočeské univerzity [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: https://kke.zcu.cz/export/sites/kke/about/projekty/enazp/projekty/01_Stavba-a-provoz-stroju_1-3/1_IUT/005_Parn-kotle---Polach---P0.pdf
- [55] Produkty: Popílek. In: *Silotransport* [online]. Praha: SILO TRANSPORT [cit. 2022-03-12]. Dostupné z: <https://www.silotransport.cz/popilek>
- [56] BENEZET, Jean-Charles, Pierre ADAMIEC a Ali BENHASSAINE. Relation between silico-aluminous fly ash and its coal of origin. *Particuology* [online]. 2008, **6**(2), 85-92 [cit. 2022-03-12]. ISSN 16742001. Dostupné z: doi:10.1016/j.partic.2007.09.002
- [57] KALOUSOVÁ, Hana. *Vliv podmínek skladování na kvalitu klasických popílků*. 2014. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická.
- [58] LEDEROVÁ, Jaroslava, Michaela SUCHARDOVÁ, Pavel LEBER a Miroslav SVOBODA. Využití průmyslových odpadních materiálů při výrobě stavebních hmot. In: *Časopis stavebnictví* [online]. Stavebnictví, 2007 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-vyuziti-prumyslovych-odpadnich-materialu-pri-vyrobe-stavebnich-hmot.html>

- [59] TICHÝ, Vít. Program obnovy uhelných zdrojů v ČEZ. In: *Časopis stavebnictví* [online]. INFORMAČNÍ CENTRUM ČKAIT, 2007 [cit. 2022-03-13]. Dostupné z: <https://www.casopisstavebnictvi.cz/clanky-program-obnovy-uhelných-zdroju-v-cez.html>
- [60] MEJEUOMOV, Gleb, Chang-Seon SHON, Don SAYLAK a Cindy ESTAKHRI. Beneficiation of stockpiled fluidized bed coal ash in road base course construction. *Construction and Building Materials* [online]. 2010, **24**(11), 2072-2078 [cit. 2022-03-13]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.04.055
- [61] PROVIS, John L. Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research* [online]. 2018, **114**, 40-48 [cit. 2022-03-20]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2017.02.009
- [62] ŽIVNÝ, Martin. *Kompozitní směsi pro recyklaci konstrukčních vrstev vozovky za studena s využitím upravených vysokopecních strusek*. 2019. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, dopravní fakulta Jana Pernera.
- [63] ŠEDINA, Jakub, Jan VALENTIN a Petr MONDSCHHEIN. *Recycling 2019 - Recyklace a využití stavebních odpadů jako druhotných surovin: VYUŽITÍ AKTIVOVANÝCH STRUSEK PRO TECHNOLOGIE PODKLADNÍCH VRSTEV* [online]. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, 1996 [cit. 2022-03-20]. ISBN 978-80-214-5728-7. Dostupné z: http://www.arasm.cz/dok/RECYCLING_2019_sbornik.pdf
- [64] PROVIS, John a Jannie DEVENTER. *Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report, RILEM TC 224-AAM* [online]. Springer [cit. 2022-03-20]. ISBN 978-94-007-7671-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-94-007-7672-2
- [65] PROKŠAN, Zbyněk, Michal PROCHÁZKA, Miloš FALTUS, Miroslav PROCHÁZKA a Jan VALENTIN. Využití vysokorychlostního mletí v odpadovém hospodářství. *TVIP 2017* [online]. Hustopeče [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/TVIP2017/prispevky/135.pdf>
- [66] ŠEDINA, Jakub. *Alternativní přísady a pojiva v technologiích prováděných za studena*. 2018. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [67] HANZÁLEK, Michal. *Mechanické vlastnosti cementových malt s příměsí mikromleté strusky*. Praha, 2017. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [68] MA, Juntao, Daguang WANG, Shunbo ZHAO, Ping DUAN a Shangdong YANG. Influence of Particle Morphology of Ground Fly Ash on the Fluidity and Strength of Cement Paste. *Materials* [online]. 2021, **14**(2) [cit. 2022-03-17]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14020283
- [69] ZHU, Jianping, Qifang ZHONG, Gaige CHEN a Dongxu LI. Effect of particlesize of blast furnace slag on properties of portland cement. *Procedia Engineering* [online]. 2012, **27**, 231-236 [cit. 2022-03-18]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2011.12.448
- [70] CHEERAROT, Raungrut a Chai JATURAPITAKKUL. A study of disposed fly ash from landfill to replace Portland cement. *Waste Management* [online]. 2004, **24**(7), 701-709 [cit. 2022-03-18]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2004.02.003
- [71] FELEKOĞLU, Burak, Selçuk TÜRKEL a Hasan KALYONCU. Optimization of fineness to maximize the strength activity of high-calcium ground fly ash – Portland cement composites. *Construction and Building Materials* [online]. 2009, **23**(5), 2053-2061 [cit. 2022-03-18]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.024

- [72] DAVE, Niragi, Anil MISRA, Amit SRIVASTAVA a S.K. KAUSHIK. Setting time and standard consistency of quaternary binders: The influence of cementitious material addition and mixing. *International Journal of Sustainable Built Environment* [online]. 2017, **6**(1), 30-36 [cit. 2022-03-18]. ISSN 22126090. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijbsbe.2016.10.004
- [73] SNELSON, David, Stan WILD a Martin O'FARRELL. SETTING TIMES OF PORTLAND CEMENT–METAKAOLIN–FLY ASH BLENDS / PORTLANDCEMENČIO, METAKAOLINO IR LAKIŲJŲ PELENŲ MIŠINIŲ RIŠIMOSI TERMINAI. *Journal of Civil Engineering and Management* [online]. 2011, **17**(1), 55-62 [cit. 2022-03-18]. ISSN 1392-3730. Dostupné z: doi:10.3846/13923730.2011.554171
- [74] LI, Yong-Xin, Yi-Min CHEN, Jiang-Xiong WEI, Xing-Yang HE, Hong-Tao ZHANG a Wen-Sheng ZHANG. A study on the relationship between porosity of the cement paste with mineral additives and compressive strength of mortar based on this paste. *Cement and Concrete Research* [online]. 2006, **36**(9), 1740-1743 [cit. 2022-03-22]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2004.07.007
- [75] CHINDAPRASIRT, Prinya, Chai JATURAPITAKKUL a Theerawat SINSIRI. Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2005, **27**(4), 425-428 [cit. 2022-03-22]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.07.003
- [76] ZHOU, Jian, Klaas BREUGEL a Guang YE. *Hydration Process and Pore Structure of Portland Cement Paste Blended with Blastfurnace Slag* [online]. [cit. 2022-03-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/242157339_Hydration_Process_and_Pore_Structure_of_Portland_Cement_Paste_Blended_with_Blastfurnace_Slag
- [77] KHALIL, Kh. a N. ABD-EL-HAMEED. Physicochemical characteristics of slag rich cement pastes incorporated by-pass cement dust. *Egyptian Journal of Chemistry* [online]. 2016, **59**(4), 491-507 [cit. 2022-03-24]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/316215682_Physicochemical_characteristics_of_slag_rich_cement_pastes_incorporated_by-pass_cement_dust
- [78] HEIKAL, Mohamed, Ivon HELMY, Shereen AWAD a Noha IBRAHIM. IMPROVEMENT OF CEMENT PASTES COMPOSITE PROPERTIES CONTAINING CLAY NANOPARTICLES. *Ceramics Silikaty* [online]. 2020, **64**(4), 398-406 [cit. 2022-03-24]. ISSN 0862-5468. Dostupné z: doi:10.13168/cs.2020.0027
- [79] MUKHERJEE, Shaswata, Saroj MANDAL a U.B. ADHIKARI. Study on the physical and mechanical property of ordinary Portland cement and fly ash paste. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering* [online]. 2012, **2**(3) [cit. 2022-03-24]. ISSN 1524-5845. Dostupné z: doi:10.6088/ijcser.00202030003
- [80] Smršťování betonu. In: *Ebeton* [online]. Svaz výrobců betonu ČR [cit. 2022-03-25]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/smrstovani-betonu/>
- [81] SNOECK, D., O.M. JENSEN a N. DE BELIE. The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research* [online]. 2015, **74**, 59-67 [cit. 2022-03-26]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2015.03.020
- [82] COLLINS, F.G. a J.G. SANJAYAN. Workability and mechanical properties of alkali activated slag concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 1999, **29**(3), 455-458 [cit. 2022-03-25]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(98)00236-1

- [83] LU, Tianshi, Zhenming LI a Hao HUANG. Effect of Supplementary Materials on the Autogenous Shrinkage of Cement Paste. *Materials* [online]. 2020, **13**(15) [cit. 2022-03-26]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma13153367
- [84] ŠÁDKOVÁ, Kateřina. *Strusky a popílky jako alternativní hydraulická pojiva pro užití v dopravním stavitelství*. Praha, 2020. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [85] SIČÁKOVÁ, Alena, Erika FIGMIGOVÁ a Matej ŠPAK. Comparison of the strength development of binary and ternary cements containing perlite powder. *Selected Scientific Papers - Journal of Civil Engineering* [online]. 2020, **15**(1), 47-57 [cit. 2022-03-28]. ISSN 1338-7278. Dostupné z: doi:10.1515/sspjce-2020-0006
- [86] IBÁÑEZ-GOSÁLVEZ, Javier, Teresa REAL-HERRAIZ a José ORTEGA. Microstructure, Durability and Mechanical Properties of Mortars Prepared Using Ternary Binders with Addition of Slag, Fly Ash and Limestone. *Applied Sciences* [online]. 2021, **11**(14) [cit. 2022-03-28]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app11146388
- [87] WONG, Y.L., L. LAM, C.S. POON a F.P. ZHOU. Properties of fly ash-modified cement mortar-aggregate interfaces. *Cement and Concrete Research* [online]. 1999, **29**(12), 1905-1913 [cit. 2022-03-28]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(99)00189-1
- [88] ČSN EN 1015-3. *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím sřásacího stolku)*. Český normalizační institut, 2000.
- [89] HEŘMÁNKOVÁ, Věra. *Stavební látky: cvičebnice k předmětu Ai01* [online]. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví, 2010 [cit. 2022-04-02]. ISBN 978-80-214-4047-0. Dostupné z: <https://readgur.com/doc/157392/stavebn%C3%AD-l%C3%A1tky-cvi%C4%8Debnice-k-p%C5%99edm%C4%9Btu-ai01>
- [90] ČSN EN 196-3. *Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [91] PROŠEK, Zdeněk. *Využití odpadního mramoru na bázi odprašku ve stavebnictví*. Praha, 2021. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [92] ČSN 73 1372. *Nedestruktivní zkoušení betonu - Rezonanční metoda zkoušení betonu*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [93] ASTM E1876-01. *Standart Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. Annual Book of ASTM Standards, 2015.
- [94] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevností*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [95] PROŠEK, Zdeněk, Jan TREJBAL, Vladimír HRBEK a Pavel TESÁREK. Mechanická aktivace odpadního betonu: stanovení efektivity pro různé druhy odpadních betonů. In: *Tzbinfo* [online]. Praha: Topinfo, 2001 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/beton-malty-omitky/18808-mechanicka-aktivace-odpadniho-betonu-stanoveni-efektivita-pro-ruzne-druhy-odpadnich-betonu>
- [96] VALENTIN, Jan a Majda BELHAJ. Poznatky z alternativních návrhů složení směsí recyklace za studena. In: *Asfaltové vozovky 2021*. Sdružení pro výstavbu silnic.
- [97] Produkty a služby: Energetické produkty a služby. In: *SEVEN ENERGY* [online]. Skupina Sev.en [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.7energy.com/cz/produkty-a-sluzby/#energeticke-produkty-a-sluzby>

- [98] Druhotné suroviny. In: *Profil společnosti* [online]. Třinec: Třinecké železářny, 2016 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: https://apl.trz.cz/pdf/profil_2016.pdf
- [99] ZOBAL, Ondřej, Pavel TESÁREK a Zdeněk PROŠEK. *Pilotní ověření vybraných vlastností 3 typů strusek*. Praha, 2019. Souhrnná zpráva. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [100] VALENTIN, Jan a Miloš FALTUS. *Inovativní technologie využití anorganických průmyslových odpadů nebo vedlejších produktů - průběžná zpráva 2021*. Praha, 2022. Projekt TH04020043.
- [101] *Technický list CEM I 42,5 R Radotín* [online]. In: . Českomoravský cement, 2021 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: https://www.heidelbergcement.cz/cs/system/files_force/assets/document/a0/7a/tl-portlandskyementcemi425rradotin-04-2021.pdf?download=1
- [102] ČSN EN 1097-5. *Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva - Část 5: Stanovení vlhkosti sušením v sušárně*. Praha: Český normalizační institut, 2008.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1 - Produkce CO₂ při výrobě cementu [2]</i>	1
<i>Obrázek 2 - Typ římské cesty Via Munita (cesty v Pompejích) [23]</i>	7
<i>Obrázek 3 - Schéma výroby železa a oceli [33]</i>	9
<i>Obrázek 4 - Vzduchem chlazená vysokopeční struska [37]</i>	11
<i>Obrázek 5 - Granulovaná vysokopeční struska [37]</i>	12
<i>Obrázek 6 - Schéma vysokoteplotního spalování práškového uhlí [55]</i>	19
<i>Obrázek 7 - Schéma fluidního spalování uhlí [59]</i>	21
<i>Obrázek 8 - Vysokorychlostní mlýn [63]</i>	25
<i>Obrázek 9 - Stráscací stolek dle ČSN EN 1015-3 [89]</i>	39
<i>Obrázek 10 - Stanovení normální konzistence pomocí ručního Vicatova přístroje</i>	41
<i>Obrázek 11 - Stanovení doby tuhnutí pomocí automatického Vicatova přístroje</i>	42
<i>Obrázek 12 - Měřicí sestava Brüel & Kjær</i>	44
<i>Obrázek 13 - Výstup softwaru PULSE LabShop</i>	45
<i>Obrázek 14 – Poloha snímače a rázového kladívka při měření podélného kmitání</i>	45
<i>Obrázek 15 - Poloha snímače a rázového kladívka při měření příčného kmitání</i>	46
<i>Obrázek 16 - Poloha snímače a rázového kladívka při měření krouživého kmitání</i>	47
<i>Obrázek 17 - Zkouška pevnosti v tahu za ohybu</i>	48
<i>Obrázek 18 – Zkouška pevnosti v tlaku</i>	49
<i>Obrázek 19 - Odtěžování strusky z haldy Koněv</i>	50
<i>Obrázek 20 - Snímek SEM (vysokopeční struska Kladno), zvětšeno 500×, detektor sekundárních elektronů</i>	51
<i>Obrázek 21 - Snímek SEM (fluidní popílek a vysokopeční struska Kladno 50:50), zvětšeno 500×, detektor sekundárních elektronů</i>	52
<i>Obrázek 22 - Snímek SEM (fluidní popílek a vysokopeční struska Kladno 75:25), zvětšeno 500×, detektor sekundárních elektronů</i>	53
<i>Obrázek 23 - Snímek SEM (vysokopeční struska Třinec), zvětšeno 500×, detektor sekundárních elektronů</i>	54
<i>Obrázek 24 - Snímek SEM (vysokopeční struska EcoCoal), zvětšeno 500×, detektor sekundárních elektronů</i>	55
<i>Obrázek 25 - Výroba vzorků</i>	59

SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1 - Cementy pro obecné použití dle ČSN EN 197-1 [8].....</i>	<i>4</i>
<i>Tabulka 2 - Průměrné chemické složení metalurgických strusek (% hmotnosti) [39; 42].....</i>	<i>15</i>
<i>Tabulka 3 - Požadavky norem pro využití mleté granulované strusky jako příměsi [8; 44].....</i>	<i>16</i>
<i>Tabulka 4 - Požadavky na popílky pro jejich použití do betonu [48; 50; 51].</i>	<i>18</i>
<i>Tabulka 5 - Chemické složení fluidních a vysokoteplotního popílku [49]</i>	<i>22</i>
<i>Tabulka 6 – Účinnost vybraných alkalických aktivátorů [64].....</i>	<i>24</i>
<i>Tabulka 7 - Pórovitost cementových past s minerálními příměsemi [74].....</i>	<i>30</i>
<i>Tabulka 8 - Pevnost v tahu za ohybu cementových malt s popílkem a vysokopecní struskou [85]</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 9 - Pevnost v tlaku cementových malt s obsahem vysokopecní strusky a úletového popílku [74]</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 10 - Chemické složení vysokopecní strusky Kladno</i>	<i>51</i>
<i>Tabulka 11 - Chemické složení fluidního úletového popílku Kladno</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 12 - Chemické složení vysokopecní strusky z Třinecké železárny [99].....</i>	<i>54</i>
<i>Tabulka 13 - Chemické složení vysokopecní strusky Ecocoal [100]</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 14 - Fyzikální, mechanické a chemické vlastnosti cementu typu CEM I 42,5 R [101].....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 15 - Zrnitost použitých typů písku a normalizovaného písku CEN.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabulka 16 - Vlhkost vstupních surovin</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 17 - Složení testovaných směsí</i>	<i>58</i>
<i>Tabulka 18 - Normální konzistence a doba tuhnutí testovaných past</i>	<i>61</i>

SEZNAM GRAFŮ

<i>Graf 1 - Produkce a využití VPS v Evropě za rok 2018 [38]</i>	13
<i>Graf 2 - Produkce a využití OS v Evropě za rok 2018 [38]</i>	14
<i>Graf 3 - Rozlití cementových past s různými typy popílku [68]</i>	28
<i>Graf 4 - Autogenní deformace cementových past s popílkem a bez popílku [81]</i>	32
<i>Graf 5 - Autogenní deformace cementových past s vysokopecní struskou a bez strusky [81]</i>	33
<i>Graf 6 - Rozlití čerstvé malty</i>	60
<i>Graf 7 - Doba tuhnutí testovaných past</i>	62
<i>Graf 8 - Pórovitost vzorků s vynesnými směrodatnými odchylkami</i>	63
<i>Graf 9 - Objemová hmotnost vzorků s vynesnými směrodatnými odchylkami</i>	64
<i>Graf 10 - Dynamický modul pružnosti s vynesnými směrodatnými odchylkami</i>	65
<i>Graf 11 - Dynamický smykový modul s vynesnými směrodatnými odchylkami</i>	66
<i>Graf 12 - Pevnost v tahu za ohybu s vynesnými směrodatnými odchylkami</i>	67
<i>Graf 13 - Pevnost v tlaku s vynesnými směrodatnými odchylkami</i>	69