



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ

FACULTY OF CHEMISTRY

ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

**VYUŽITÍ JIŽ DEPONOVANÝCH VEP PŘI
VÝROBĚ CEMENTU**

UTILISATION OF ALREADY DEPOSITED ENERGY BY-PRODUCTS IN CEMENT PRODUCTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Lukášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání bakalářské práce

Číslo práce: FCH-BAK1708/2021 Akademický rok: 2021/22
Ústav: Ústav chemie materiálů
Student: **David Lukášek**
Studijní program: Chemie a technologie materiálů
Studijní obor: bez specializace
Vedoucí práce: **doc. Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.**

Název bakalářské práce:

Využití již deponovaných VEP při výrobě cementu

Zadání bakalářské práce:

1. Literární rešerše.
2. Analýza vstupních surovin, fyzikální a chemické vlastnosti.
3. Návrhy experimentů v souladu s požadavky ČSN pro klasifikaci a zkoušení portlandského cementu (ČSN EN 197-1 a ČSN EN 196).
4. Experimentální část – provedení experimentů přípravy p-cementů s popílky z různých vrstev deponií. Testování připravených cementů CEM II, CEM IV a CEM V dle ČSN EN 196.
5. Zpracování dosažených výsledků vyhodnocení experimentů.
6. Závěry a doporučení.
7. Sepsání závěrečné práce.

Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2022:

Bakalářská práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu. Toto zadání je součástí bakalářské práce.

David Lukášek
student

doc. Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.
vedoucí práce

doc. Ing. František Šoukal, Ph.D.
vedoucí ústavu

V Brně dne 1.2.2022

prof. Ing. Michal Veselý, CSc.
děkan

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zaměřuje na studium deponovaných vysokoteplotních popílků a jejich využití při výrobě cementu. Teoretická část bakalářské práce se zabývá výrobou a dělením cementů. Jsou řešeny jednotlivé výhody a nevýhody vysokoteplotních a fluidních popílků při přidávání do cementů. Z teoretických poznatků bylo vycházeno pro navrhování následných experimentů. Závěr teoretické části práce se zabývá pucolány. Hlavní náplní experimentální části byla analýza vstupních surovin a následné analyzování mechanických vlastností připravených směsí. Experimenty byly navrhovány v souladu s platnými normami.

Abstract

This bachelor thesis focuses at study of deposited high-temperated fly ash and its utilization in production of cement. The theoretical part of the bachelor thesis deals with the production and division of cements. The individual advantages and disadvantages of high-temperature and fluid fly ash when added to cements are addressed. The theoretical knowledge was used to design subsequent experiments. The conclusion of the theoretical part of the work deals with pozzolans. The main content of the experimental part was the analysis of raw materials and subsequent analysis of the mechanical properties of the prepared mixtures. The experiments were designed in accordance with valid standards.

Klíčová slova

cement, deponované vedlejší energetické produkty, vysokoteplotní popílky, mechanické vlastnosti, pucolány

Keywords

cement, deposited energy by-products, high-temperated fly ash, mechanical properties, pozzolans

Citace

LUKÁŠEK, David. Využití již deponovaných VEP při výrobě cementu [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139550>.
Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, Ústav chemie materiálů.
Vedoucí práce Tomáš Opravil.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval. Bakalářská práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího bakalářské práce a děkana FCH VUT.

.....
David Lukášek

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce doc. Ing. Tomáši Opravilovi Ph.D. za jeho odborné vedení, rady a čas, který mi věnoval. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Barboře Šmírové za její pomoc při měření a Ing. Janu Hajzlerovi za jeho přínosné konzultace a v neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině za poskytnutí zázemí ke studiu.

Obsah

1	Úvod	7
2	Teoretická část.....	8
2.1	Portlandský cement.....	8
2.1.1	Historie	8
2.1.2	Výroba.....	8
2.1.2.1	Suchý proces	9
2.1.2.2	Polosuchý proces	9
2.1.2.3	Polomokrý proces	9
2.1.2.4	Mokrý proces	9
2.1.3	Klasifikace cementů	10
2.1.3.1	ČSN EN 197-1	10
2.1.3.2	ČSN EN 196-1	12
2.2	Popílek.....	13
2.2.1	Mineralogické a chemické složení	14
2.2.2	Fyzikální vlastnosti	15
2.2.3	Klasifikace popílků	17
2.2.3.1	Mezinárodní klasifikační systém	19
2.2.3.2	ASTM C618.....	19
2.2.3.3	CSA.A23.....	19
2.2.3.4	Podle zdroje	19
2.2.3.5	V. Klasifikace	19
2.2.3.6	Vápenný-lime index.....	19
2.2.3.7	ČSN EN 197-1	19
2.2.4	Vysokoteplotní popílek	20
2.2.5	Fluidní popílek	20
2.2.6	Pucolán a pucolánová aktivita.....	20
2.2.6.1	Přírodní pucolány	21

2.2.6.2	Umělé pucolány	21
2.2.6.3	Pucolánová aktivita	21
3	Experimentální část	23
3.1	Analýza popílků z deponií	23
3.1.1	Stanovení vlhkosti	23
3.1.2	Ztráta žiháním	23
3.1.3	Modifikovaný Chapelluv test	23
3.2	Mechanické zkoušky	25
4	Výsledky a diskuze	27
4.1	Analýza popílků z deponií	27
4.1.1	Stanovení vlhkosti	27
4.1.2	Ztráta žiháním	28
4.1.3	Modifikovaný Chapelluv test	29
4.2	Mechanické zkoušky	31
5	Závěr	39
6	Seznam použité literatury	41
7	Seznam použitých zkratek a symbolů	44

1 Úvod

Žijeme v době, kdy je kladen velký důraz na recyklaci materiálů, s tím spojené využívání druhotných produktů, snížení emisí CO₂ a v neposlední řadě uspořeni jak po energetické, tak finanční stránce. Na druhé straně je zde trend neustále rostoucí produkce, ať už se jedná o stavební materiál nebo jiný.

Objemově nejrozšířenějším stavebním pojivem je cement, u kterého celosvětová produkce v roce 2020 přesáhla 4,1 miliardy tun [1]. Při výrobě cementu, konkrétně slínku, se uvolňuje do atmosféry velké množství CO₂. Přesné množství se odvíjí od poměru slínku v cementu. V průměru se na 1000 kg cementu vyprodukuje 900 kg CO₂ [2]. V roce 2015 činila celosvětová výroba cementu 2 800 miliónů tun. Cementářský průmysl je největším samostatným producentem CO₂, v celosvětové produkci se jedná o 8 % CO₂, dle prognózy by do roku 2050 mohlo číslo stoupnout až na 23 %. [3].

Nedílnou součástí výroby cementu jsou popílků, které se řadí společně se struskou a energosádrovcem k tzv. vedlejším energetickým produktům dále VEP. VEP vznikají při spalování tuhých paliv nebo během procesu čištění spalin. V roce 2016 byl objem VEP vzniklých spalováním uhlí 780 miliónů tun. Z nich bylo pouze 53 % dále využito v průmyslu [4]. Česká republika za rok 2017 vyprodukovala přes 13 miliónů tun VEP. Z čehož využití ve stavebním průmyslu našlo maximálně 20 %. Zbytek se využil k zasypání dolů, popřípadě uložil na volný povrch, což značně zatěžuje životní prostředí zejména kvůli ukládání těžkých kovů v podzemních vodách. S využitím VEP jsou nejdále země Beneluxu, kde se využívá, popřípadě vyváží 100 % VEP[5].

Jedna z možností, jak snížit uhlíkovou stopu, uspořit finanční prostředky a zároveň zmenšit dopad na životní prostředí je začít více využívat VEP. Cílem této bakalářské práce je prozkoumat možnosti zužitkování deponovaných vysokoteplotních popílků z různých vrstev deponií při výrobě cementu.

2 Teoretická část

2.1 Portlandský cement

Portlandský cement je hydraulické pojivo, tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost také ve vodě [7].

2.1.1 Historie

Objev Portlandského cementu, jak ho známe dneš, nelze přiřadit jedinému vynálezci, cement se vyvíjel po celá staletí. Již ve starověkém Řecku se míchalo vápno se zeminou z ostrova Santorin, aby vznikla malta tvrdnoucí pod vodou. Féničané kolem roku 700. př. n. l. využívali směs vápna s cihlovou moučkou k betonování. Hydraulickou maltovinu, kterou Římané používali k betonování mostů, akvaduktů, kleneb budov a i přístavů byla připravena z vyhašeného vápna a 25 až 75% sopečného popela z Puteoli, dnešní Puzzuolo v Itálii – odtud je odvozen název Pucolán [12].

Roku 1824 byl udělen patent na výrobu Portlandského cementu britskému vynálezci a továrníkovi Johnu Aspdinovi. Přízvisko portlandský bylo převzato od Portlandského kamene, který byl v té době považován za kvalitní stavební materiál a byl brán jako standard pro porovnávání s ostatními stavebními materiály [6].

2.1.2 Výroba

Nejdůležitějším meziproduktem při výrobě cementu je slínek. Aby se vytvořil slínek, musí se nejdříve natěžit suroviny, tj. hlavně vápenec a břidlice, a to nejčastěji využitím clonových odstřelů. Natěžené suroviny se transportují a nadrtí na menší části. Jednotlivé nadrcené suroviny jsou podle daných poměrů naváženy a pomlety v kulovém mlýně, kde se promíchají. Pomletá surovinová moučka se může dle potřeby dále homogenizovat, poté se skladuje v zásobních silech. Ze sila se surovinová moučka transportuje do horní části výměníku a v průběhu její cesty do spodní části výměníku se surovinová moučka řadou cyklónů postupně ohřívá. Dalším krokem je tzv. kalcinace, kdy se surovinová moučka (CaCO_3) rozkládá v rotační peci. Při zhruba $900\text{ }^\circ\text{C}$ vzniká CaO a jako vedlejší produkt se uvolňuje CO_2 . Poté následuje proces slinování, kdy vzniklý oxid vápenatý reaguje při $1400\text{--}1500\text{ }^\circ\text{C}$ s oxidem křemičitým, hlinitým a železitým na C_3S – alit, C_2S – belit, C_3A – trikalciualuminát a C_4AF –

brownmillerit, tyto fáze vznikají postupně již od 900°C. Vzniklý horký slínek, vycházející z pece, se za pomoci studeného vzduchu prudce ochladí a nakonec se pomele spolu se sádrovcem a jinými přísadami, čímž se vyrábí cement. [25] Postup výroby cementu je znázorněn na obrázku 1.

Výroba cementu může probíhat čtyřmi způsoby: suchý, polosuchý, polomokrý a mokrý proces. Výběr je založen především na dostupnosti a stavu výchozích surovin. Suroviny mohou být buď mokré nebo suché. Většina celosvětové výroby slínku je založena na mokřém procesu, jeho nevýhodou je větší energetická a z toho vyplývající vyšší finanční náročnost. V Evropě se ovšem slínek vyrábí z 90 % suchým procesem, kvůli finanční úspoře a dostupnosti suchých surovin. [8][9]

2.1.2.1 Suchý proces

Surovina se namele a suší na surovinovou moučku. Vznikne sypký prášek, který se přivádí do pece s předehřivačem, předkalcinátorem nebo do dlouhé rotační pece.

2.1.2.2 Polosuchý proces

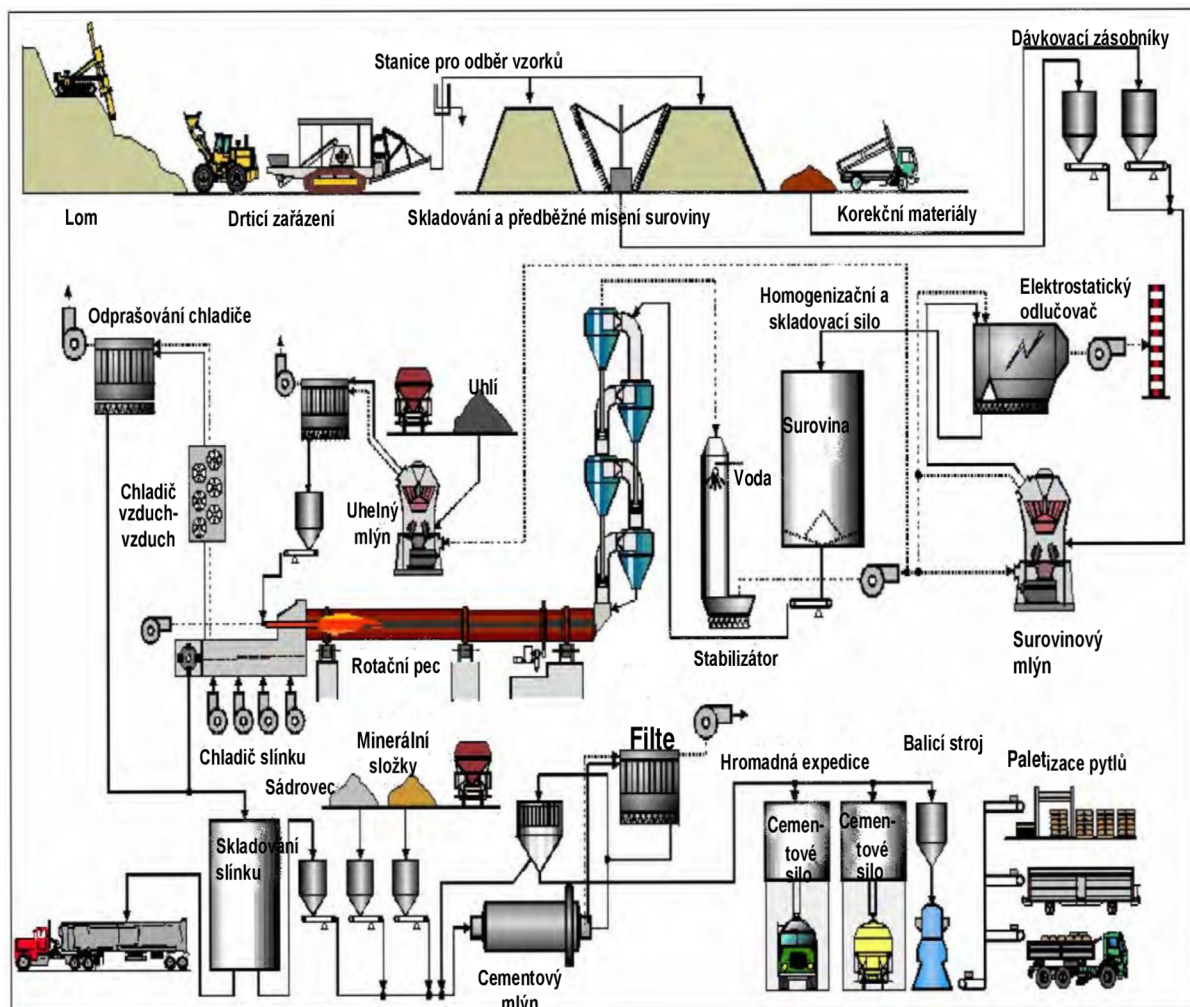
Suchá surovinová moučka se nechá granulovat s vodou a přivádí se do roštového předehřivače před pecí nebo do dlouhé pece vybavené řetězy.

2.1.2.3 Polomokrý proces

U polomokrého procesu se nejdřív ze surovinového kalu odstraňuje voda pomocí filtračních lisů. Z filtračního koláče se lisují granule a ty se přímo dávkuje buď do roštového předehřivače, nebo do sušičky filtračního koláče na výrobu surovinové moučky.

2.1.2.4 Mokřý proces

Suroviny s vysokým obsahem vlhkosti se melou ve vodě na čerpatelný kal, který se dopravuje buď přímo do pece, nebo nejdříve do sušičky kalu. [8]



Obrázek 1: Schéma výroby cementu [8]

2.1.3 Klasifikace cementů

2.1.3.1 ČSN EN 197-1

Dle normy ČSN EN 197-1 rozlišujeme cementy dle složení:

- CEM I Portlandský cement
- CEM II Portlandský cement směsný
- CEM III Vysokopeční cement
- CEM IV Pucolánový cement
- CEM V Směsný cement

Složení každého cementu dle normy musí být v souladu s tabulkou 1.

Tabulka 1: Rozdělení cementů dle ČSN 197-1[10]

Hlavní druhy	Označení 27 výrobků (druhy pro všeobecné použití)		Složení a (poměry složek podle % hmotnosti)			
			Hlavní složky			Doplňující složky
			Slínek			
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95-100			0-5
CEM II	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	Vysokopecní struska (S)	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35		0-5
	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	90-94	6-10	Křemičitý úlet (D) ^b	0-5
	Portlandský	CEM II/A-P	80-94	6-20	Přírodní pucolán	0-5
	pucolánový cement	CEM II/B-P	65-79	21-35	(P)	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	6-20	Přírodní kalcinovaný pucolán (Q)	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	21-35		0-5
	Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	80-94	6-20	Křemičitý popílek (V)	0-5
		CEM II/B-V	65-79	21-35		0-5
		CEM II/A-W	80-94	6-20	Vápenatý popílek (W)	0-5
		CEM II/B-W	65-79	21-35		0-5
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/A-T	80-94	6-20	Kalcinovaná břidlice (T)	0-5
		CEM II/B-T	65-79	21-35		0-5
	Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	80-94	6-20	Vápenec (L)	0-5
		CEM II/B-L	65-79	21-35		0-5
		CEM II/A-LL	80-94	6-20	Vápenec (LL)	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	21-35		0-5
	Portlandský směsný cement ^c	CEM II/A-M	80-88	12-20	S+D+P+Q+V+ +W+T+L+LL	0-5
		CEM II/B-M	65-79	21-35		0-5

CEM III	Vysokopecní cement	CEM III/A	35-64	36-65	Vysokopecní struska (S)	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80		0-5
		CEM III/C	5-19	81-95		0-5
CEM IV	Pucolánový cement ^c	CEM IV/A	65-89	11-35	D+P+Q+ +V+W	0-5
		CEM IV/B	45-64	36-55		0-5
CEM V	Směsný cement ^c	CEM V/A	40-64	18-30	S+(P+Q+V) ^d	0-5
		CEM V/B	20-38	31-49		0-5

^a Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek.

^b Obsah křemičitého úletu je omezen do 10 %.

^c hlavní složky v portlandských směsných cementech CEM II/A-M a CEM II/B-M, v pucolánových cementech CEM IV/A a CEM IV/B a ve směsných cementech CEM V/A a CEM V/B mimo slínku musí být deklarovány v označení cementu.

^d Směsný cement obsahuje 18 – 30 % respektive 31 – 49 % S a 18 – 30 % respektive 31 – 49 % P + Q + V.

2.1.3.2 ČSN EN 196-1

Cementy jsou zařazeny do pevnostních tříd podle mechanických vlastností:

Normalizovaná pevnost je pevnost cementu v tlaku, stanovaná podle ČSN EN 196-1 po 28 dnech, která musí odpovídat požadavkům v tabulce 2. Dělí se do tří tříd: třída 32,5, třída 42,5 a třída 52,5.

Počáteční pevnost, tím se rozumí pevnost v tlaku po 2 nebo 7 dnech, která musí vyhovět požadavkům v tabulce 1. Rozeznávají se tři třídy pro každou třídu normalizované pevnosti: třída N s normálními počátečními pevnostmi, třída R s vysokými počátečními pevnostmi a třída L s nízkou počáteční pevností používající se pouze pro vysokopecní cementy CEM III.

Tabulka 2: Pevnostní třídy stanovené dle ČSN EN 196-1 [11]

Pevnostní třída	Pevnost v tlaku [MPa]			Počátek tuhnutí [min.]	Objemová stálost (rozeprnutí) [mm]
	Počáteční pevnost		Normalizovaná pevnost		
	2 dny	7 dnů	28 dnů		
32,5 L	–	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≤ 10
32,5 N	–	≥ 16,0			
32,5 R	≥ 10,0	–			
42,5 L	–	≥ 16,0	≥ 42,5	≤ 62,5	
42,5 N	≥ 10,0	–			
42,5 R	≥ 20,0	–			
52,5 L	≥ 10,0	–	≥ 52,5	–	
52,5 N	≥ 20,0	–			
52,5 R	≥ 30,0	–			

2.2 Popílek

Dle ČSN EN 450-1 je popílek produkt vznikající při spalování uhlí samotného, nebo i s přidaným spoluspalovaným materiálem, získává se elektrostatickým nebo mechanickým odlučováním prachových částic ze spalin spalovacích zařízení. Popílek je ve formě jemného prášku, který má charakter kulovitých, sklovitých částic. Popílek je až druhotná surovina a jako taková může vykazovat proměnlivé chemické, mineralogické i granulometrické složení. Složení závisí na typu kotle, způsobu spalování, druhu spalovaného uhlí a způsobu odlučování. V tabulce 3 jsou seřazeny požadavky na popílek ve smyslu použití jako příměs druhu II podle ČSN EN 450. Rovněž jsou uvedena hlavní kritéria pro použití popílku jako fileru – příměsy druhu I podle prEN 12620 [13].

Tabulka 3: Normy pro popílek[14]

Vlastnost dle způsobu užití popílku	jednotka	pucolánová příměs druhu II ČSN EN 450	filér jako kamenivo příměs druhu I prEN 12620	pro výrobu popílkových směsí ČSN 72 2072-3
Ztráta žiháním	% hm.	max. 5,0 ¹⁾	-	max. 8,0
Obsah SO ₂	% hm.	max. 3,0	max 0,8	max. 3,0
Obsah celkové síry	% hm.	-	1,0	-
Obsah chloridů v přep. na Cl	% hm.	max. 0,10	0,03/0,06/0,15 ⁶⁾	max. 0,1
Obsah volného CaO	% hm.	max. 1,0 ²⁾	-	-
Obsah celkového CaO	% hm.	-	-	max. 2,5
Jemnost, zb. na sítě 0,045 mm	% hm.	max. 40 ³⁾	-	-
Sítový rozbor, zbytek na sítě: • 1 mm • 0,2 mm • 0,063 mm	%	-	-	10-30 ⁷⁾ 35-60 5-25
Sítový rozbor, propad na sítě: • 2 mm • 0,125 mm • 0,063 mm	%	-	100 85-100 70-100	-
Obsah aktivního SiO ₂	% hm.	min. 25	-	-
Obsah SiO ₂	% hm.	-	-	min. 40 ⁷⁾
Obsah Fe ₂ O ₃	% hm.	-	-	7,0
Obsah alkálií, přep. na Na ₂ O	% hm.	-	-	1,5 ⁷⁾
Objemová stálost (roztažnost)	mm	max. 10 ³⁾	-	vyhovuje
Index účín. po 28 (90) dnech	%	min. 75 popř. 85	-	-
Měrná hmotnost (tolerance)	kg.m ⁻³	max. ± 150 ⁴⁾	-	min. 2.000 ⁷⁾
Měrný povrch	m ² .kg ⁻¹	-	-	300 ⁷⁾
Zkrácení počátku tuhnutí	minuta	-	-	max. o 15 ⁷⁾
Prodloužení doby tuhnutí	minuta	-	-	max. o 240 ⁷⁾
Hmotnostní aktivita Ra226	Bq.kg ⁻¹	max. 200 ⁵⁾	-	max. 200 ⁶⁾

Vysvětlivky k tabulce z odkazů a poznámek uvedených norem:

- 1) Na národní úrovni je dovoleno používat popílek se ztrátou žiháním až do 7 % hmotnosti.
- 2) Popílek s obsahem volného oxidu vápenatého více než 1,0 % 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 Vyhlaškou SÚJB č. 184/1997 Sb.
- 6) Maximální hodnoty pro předpjatý, železový a prostý beton vodou rozpustných Cl k hmotnosti celkového kameniva.
- 7) Směrná hodnota podle ČSN 72 2072-3.

2.2.1 Mineralogické a chemické složení

Chemické složení vysokoteplotního popílku se skládá ze tří základních složek, SiO₂, Al₂O₃ a Fe₂O₃, které zaujímají 90 % celkového obsahu popílku. Dále se v menší míře vyskytují CaO, K₂O, Na₂O, SO₃, TiO₂ a jiné. Poměry zastoupení jednotlivých oxidů jsou hodně variabilní v závislosti na typu spáleného uhlí. Proto musíme porovnávat každý popílek zvlášť. Nejenom že se od sebe liší jednotlivé složení popílků, ale i v závislosti na čase se v určitém rozsahu mění jejich fyzikální a chemické vlastnosti.

Důležitým parametrem popílků je ztráta žiháním. Ta nám uvádí množství zbytkového uhlíku, který zůstal v popílku po spálení uhlí v kotli. Popílků s vysokým obsahem uhlíku jsou nevhodné k použití do betonu.

Mineralogické složení popílku je závislé od vlastností uhlí, teploty, podmínek spalování a způsobu odlučování. Technické parametry spalování mají přímý vliv na teplotu spalování a teplota spalování podmiňuje vznik různých minerálních produktů. Dalším mineralogickým faktorem je druh minerálů přítomných v průvodní hornině a v uhlí. Nejčastější uhelné minerály jsou jílové minerály, sulfidy železnaté a uhličitany. Kromě těchto minerálů, které mohou tvořit až 95 % celkového obsahu minerálů, jsou zde přítomny křemen a různé oxidy a hydroxidy železa.

Při spalování uhelného prachu se minerály uhlí zahřejí nad teploty 1300 °C. Přitom probíhají procesy látkové přeměny a to odvodnění, oxidličování, slnutí. Většinová část minerálních látek se roztaví a ztuhne, po následujícím ochlazení, ve sklovitě-amorfni formě. Konečný obsah skla je 60 až 80 %. V krystalové formě je zde přítomen především mulit, křemen a oxidy železnaté. Z čehož vyplývá chemické složení popílků, které je charakterizované majoritním obsahem třech oxidů.

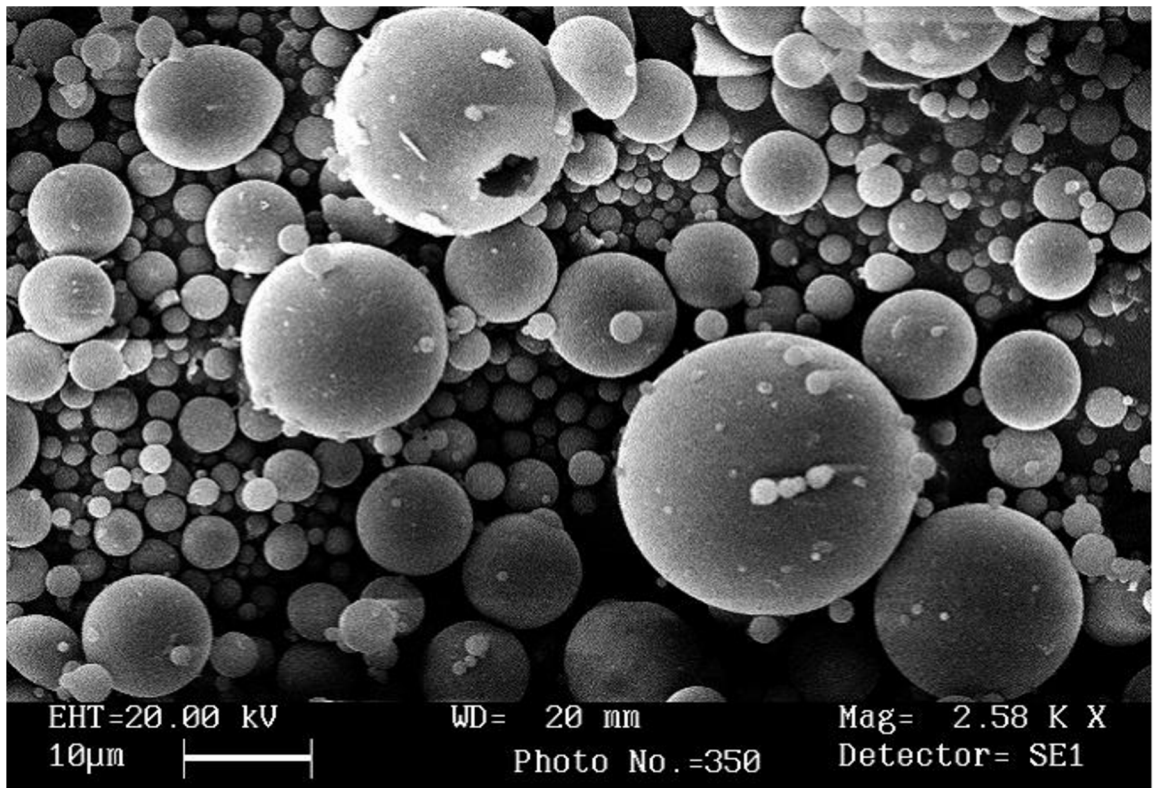
Rozdíl mezi popílkem vzniklým spalováním hnědého nebo černého uhlí je v množství vápníku, síranů a křemíku. Popílek z černého uhlí je bohatý na křemík, naopak popílek z hnědého uhlí je chudý na křemík, ale bohatý na vápník a sírany. Mezi stopové prvky popílků patří arsen, olovo a nikl, zinek a mangan. Organické stopové látky nejsou prokázány nebo jen na hraně detekce, z důvodu vysokoteplotního spalování. Jedná se o polycyklické aromatické uhlovodíky. Ve vodě rozpustného podílu je řádově pouze 1 hm %. [13]

2.2.2 Fyzikální vlastnosti

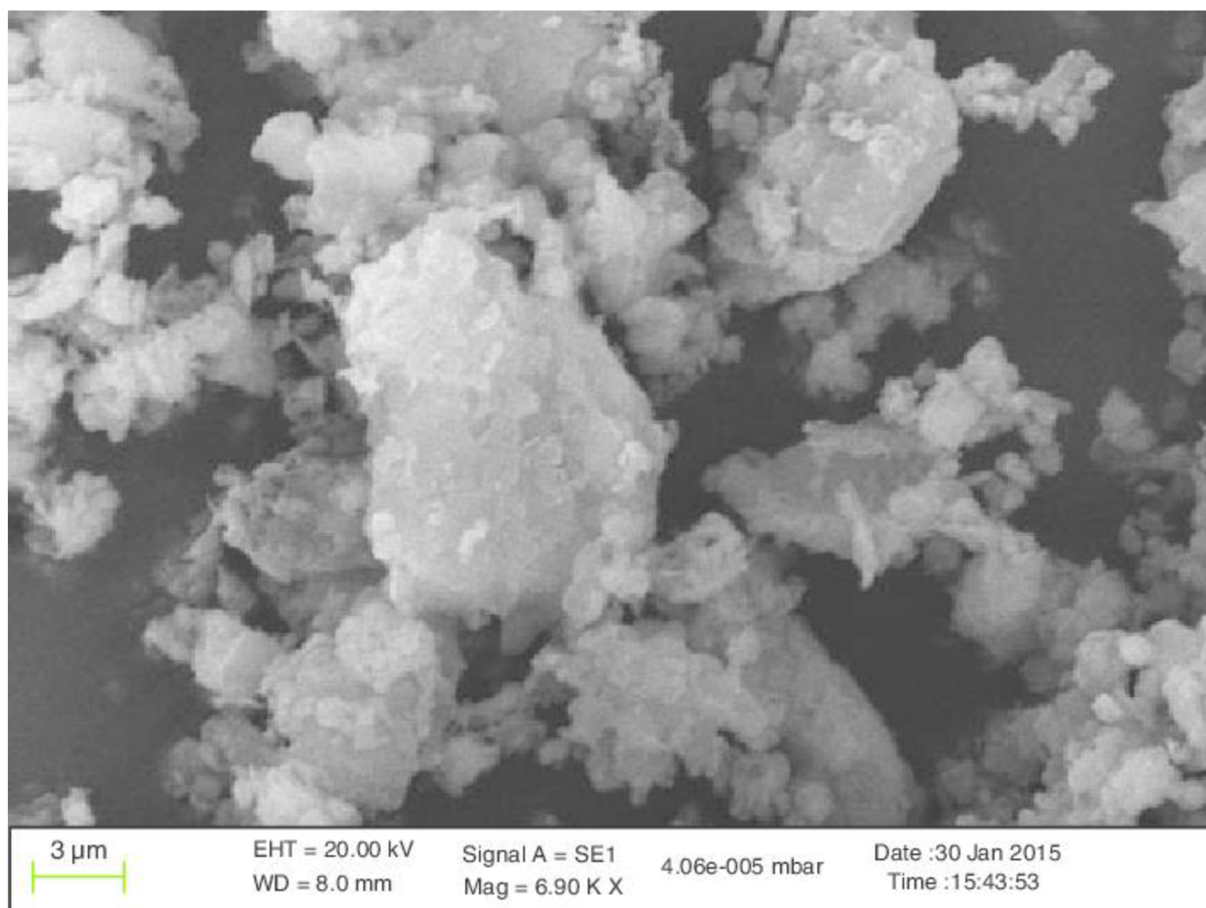
Popílký se liší také z fyzikálního hlediska. Vlastnosti popílků jsou určovány zejména tvarem zrn a granulometrickým složením. Když se v kotli taví velmi jemné částičky minerálů uhlí, dochází k povrchovému napětí nastupující fáze a tvorbě kulovitých částic, které mají uzavřený povrch. Mohou se ovšem jednotlivě vyskytnout i duté kuličky. Výsledná objemová hmotnost zrna je kolem 2300 kg/m³. Sypné hmotnosti mezi 800 kg/m³ až 1100 kg/m³. Jemnost popílku je řádově stejná jako u cementu, ale granulometrické složení popílku má jiný průběh. V hrubších zrnitostech mohou být nepravidelné a pórovité částice. Zpracováním, tříděním a prosíváním je možné se těchto částic zbavit a vyrobit popílek s ideálním tvarem zrn a ideální zrnitostí. [13]

Barva popílků je závislá na množství nespáleného uhlíku v popelu, nebo pokud je přítomna břidlice, která způsobuje zesvětlení, nebo pyrit způsobující ztmavení, v uhlí. Barva může přecházet od světle hnědé, přes šedou až po černou.

Významná charakteristika popílků je jejich tavitelnost. Z tohoto hlediska je rozdělujeme do tří skupin na: lehce tavitelné s bodem tání 1040–1200 °C, středně tavitelné s bodem tání 1200–1425 °C a těžce tavitelné s bodem tání nad 1425 °C. [15]



Obrázek 2: Snímek ze skenovacího elektronového mikroskopu (SEM) kulovitých zrn vysokoteplotního popílku. [16]



Obrázek 3: Snímek ze SEM – nepravidelný tvar částic fluidního popílku.[17]

2.2.3 Klasifikace popílků

Dle fyzikálních vlastností a mineralogického a chemického složení vzniklo pro popílky 6 různých typů klasifikací, jak je vidět v Tabulka 4. Ty se dále upravují tak, aby vyhovovaly různým druhům dalšího použití.

Tabulka 4: Klasifikace popílků [18]

I. Klasifikace (mezinárodní klasifikační systém)				
skupina	popílek	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	CaO	SO ₃
I.	ALUMOSILIKÁTOVÝ	> 2	< 15	ndef.
II.	SILIKÁTOALUMINÁTOVÝ	< 2	< 15	< 3
III.	SULFÁTOALKALICKÝ	ndef.	> 15	> 3
IV.	jiný (vápenatý)	ndef.	> 15	< 3
II. Klasifikace (ASTM C618)				
třída	popílek	Ca, Fe, suma oxidů (%)		CaO (%)

F	kyselý	velmi málo Ca značné množství Fe (SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O) > 70	< 10 10 - 20 > 20	
C	alkalický	značné množství Ca (SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O) > 50		
III. Klasifikace (CSA.A23)				
typ	popílek podle obsahu Ca	CaO (%)	ztráta žiháním (%)	
F	nízký	< 8	< 8	
Cl	střední	8 - 10	< 6	
CH	vysoký	> 20	< 6	
IV. Klasifikace (podle zdroje)				
třída	popílek ze spalování	CaO (%)		
1	antracitu, resp. bituminózního uhlí	< 5		
2	hnědého uhlí	15 - 35		
V. Klasifikace				
třída	popílek podle obsahu CaO	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ + Al ₂ O ₃ (%)
I.	nízký	< 4	6 - 35	70 - 90
II.	střední	4 - 20	6 - 25	40 - 70
III.	vysoký	> 20	6	40 - 65
VI. Klasifikace (vápenný-lime index)				
Hodnotí tzv. pucolánovou reaktivnost, reaktivní kvalitu, pomocí poměru				
CaO : (SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O), kromě situací, když % CaO < 4				

2.2.3.1 Mezinárodní klasifikační systém

První klasifikace člení popílky do čtyř skupin podle poměru obsahu SiO_2 a Al_2O_3 .

2.2.3.2 ASTM C618

Podle Americké společnosti pro testování materiálů jsou popílky děleny do dvou tříd: C a F. Popílky třídy C obsahují mezi 50 –70 hm. % $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, vysoký obsah vápna, vznikají nejčastěji spalováním nízkohodnotného uhlí - hnědého uhlí. Mají „cementové vlastnosti“, to znamená samovolné vytvrzování při reakci s vodou.

Popílky třídy F obsahují více než 70 hm. % $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, malý obsah vápna, vznikají naopak spalováním kvalitnějšího uhlí - černého uhlí. Nachází se u nich pucolánové vlastnosti – zpevňování při reakci s $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a vodou.[15]

2.2.3.3 CSA.A23

Kanadská norma dělí popílky do třech typů podle celkového obsahu Ca. Podle množství Ca mají popílky rozdílný účinek na vlastnosti čerstvého a tvrdnoucího cementu.

2.2.3.4 Podle zdroje

Čtvrtá klasifikace dělí popílky také podle obsahu Ca, ale v tomto případě je to dle spáleného uhlí (černé, hnědé).

2.2.3.5 V. Klasifikace

Pátá klasifikace je založená na dělení popílků na základě kolísání obsahů Fe_2O_3 , $(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ a CaO. Popílky různých původů vykazují společný trend: s poklesem $(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ roste CaO, s růstem Fe_2O_3 klesá $(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ při stejných hodnotách CaO.[15]

2.2.3.6 Vápenný-lime index

Principem poslední klasifikace je dělení popílků dle vápencového indexu, tj. poměr CaO a $(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3)$, čímž se kvantitativně určuje pucolánová reaktivnost.[15]

2.2.3.7 ČSN EN 197-1

V České republice dělíme popílky podle různého složení na popílky křemičité (V) a vápenaté (W) [10].

Křemičitý popílek (V) je jemný prášek převážně sestávající z kulových částic. Je tvořen zejména z SiO_2 a Al_2O_3 . Zbytek tvoří Fe_2O_3 a další sloučeniny. Má pucolánové vlastnosti.

Obsah aktivního SiO_2 nesmí klesnout pod 25 % hmotnosti. Obsah volného CaO nesmí být více jak 1 % hmotnosti a obsah aktivního CaO nesmí být pod 10,0% hmotnosti [10].

Vápenatý popílek (W) je jemný prášek s hydraulickými nebo pucolánovými vlastnostmi, popřípadě s obojím. Obsahuje zejména CaO , SiO_2 a Fe_2O_3 . Zbytek tvoří Al_2O_3 a jiné sloučeniny. Obsah aktivního CaO by měl být mezi 10 až 15 % hmotnosti a obsah aktivního SiO_2 alespoň 25 % hmotnosti [10].

2.2.4 Vysokoteplotní popílek

Vysokoteplotní popílky vznikají při spalování paliva při teplotách 1300–1600 °C. Obsahují zejména β – křemen a mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), tyto složky zásadně ovlivňují reaktivitu s CaO nebo cementem, ať už za pokojové nebo zvýšené teploty. Popílek nemá hydraulické vlastnosti, tedy není schopen reagovat s vodou, a proto se mísí s Ca(OH)_2 , aby reagoval jako cement s vodou. Tato reakce se odlišuje od typu popílku a označuje se termínem pucolanita. Pokud je popílek skladován ve vlhkém prostředí delší dobu, může jeho pucolánový účinek klesat [20].

2.2.5 Fluidní popílek

Při spalování ve fluidních kotlech je spalováno palivo společně se sorbentem při zhruba 850 °C. Sorbent se přidává do prostoru spalování podle hodnot síry v uhlí. Nejčastějším sorbentem je mletý vápenec, který zapřičiňuje vyšší obsah CaO v popílcích. Protože fluidní popílky obsahují vysoké množství měkce páleného vápna, mají velmi dobré hydraulické vlastnosti. Aniž by bylo třeba dalších příměsí a přísad, tuhnout a tvrdnou fluidní popílky již při pouhém smísení s vodou [21].

Fluidní popílek neodpovídá definici podle normy ČSN EN 450-1 o vzniku popílku do betonu a také nesplňuje předepsaná technická kritéria, jeho využití do betonu se tedy nemůže uskutečnit. Na druhou stranu je ve světě trend fluidního spalování, kvůli výrazně vyšší účinnosti a ne tak velkému zásahu do životního prostředí jako má vysokoteplotní spalování, a z toho vyplývající růst produkce fluidních popílků [21].

2.2.6 Pucolán a pucolánová aktivita

Pucolány jsou křemičité nebo křemičito-hlinité anorganické látky, popřípadě jejich kombinace. Samy o sobě mají velmi malé nebo žádné pojivové vlastnosti. Pokud se pomelou na jemný prášek, reagují za normální teploty v přítomnosti vody s Ca(OH)_2 a vznikají sloučeniny křemičitanů vápenatých a hlinitanů vápenatých, které způsobují narůstající pevnosti a jsou podobně těm, které vznikají při tvrdnutí hydraulických látek.[10]

Pucolány obsahují převážně aktivní SiO_2 a Al_2O_3 . Zbytek pak tvoří Fe_2O_3 a jiné oxidy. Obsah aktivního SiO_2 musí být alespoň 25 hm.%, obsah aktivního CaO je pro proces tvrdnutí zanedbatelný [10]. Pucolány můžeme dělit podle jejich původu na přírodní a umělé.

2.2.6.1 Přírodní pucolány

Přírodní pucolány jsou vulkanického nebo sedimentárního původu. Název pucolán je odvozen od původního pucolánového materiálu, který se nacházel kolem sopky Vesuv u města Puzzuoli. Pucolánová vlastnost se vyskytuje i u materiálů, které běžně v přírodě nenajdeme v sypké formě, ale mají potřebně reaktivní látky. Takovéto materiály se musí nejdříve převést na jemnou mletou formu. Přírodní pucolány obsahují zejména amorfní SiO_2 , ale také reaktivní formy Al_2O_3 a určité hlinitokřemičitany. Mezi přírodní pucolány patří například slídy, zeolity, čediče apod.[22]

2.2.6.2 Umělé pucolány

Umělé pucolány, někdy též označované jako technogenní, jsou cíleně připravené pálením jílových surovin a následně jemně namlety. Nejčastější jílovitá suroviny pro přípravu technogenních pucolánů je kaolín, který pálením při $600\text{ }^\circ\text{C}$ přechází na porézní metakaolín $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$. [22]

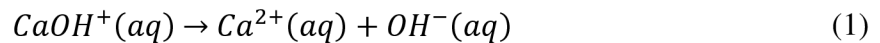
2.2.6.3 Pucolánová aktivita

Pucolánová aktivita je termín zahrnující všechny reakce, které probíhají mezi aktivními složkami pucolánu tj. hydroxidem vápenatým a vodou. Pucolánová aktivita nám říká jednak o maximálním množství vápna, s kterým je pucolán schopen reagovat a také rychlost, s kterou tak činí. Obojí závisí na charakteru a kvalitě použitého pucolánu, tj. obsažených aktivních složek. Mezi další parametry patří teplota, chemické složení, obsah vody ve směsi, specifický povrch, poměr vápno/pucolán ve směsi a délka ošetřování. [23]

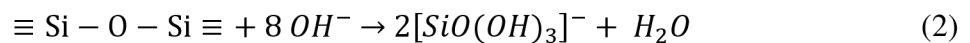
Výsledkem reakce směsi pucolánu – hydroxidu vápenatého s vodou jsou produkty podobné těm, které vznikají i při hydrataci cementu. Když reagují dva odlišné pucolány s vápnem, vznikají stejné hydratované křemičitany a hlinitany, rozdíly mezi nimi jsou velice malé. Přírodní pucolán v nasycené nebo skoro nasycené vápenné vodě reaguje s hydroxidem vápenatým za vzniku hydratovaných křemičitanů vápenatých (CSH) a hexagonálních hlinitanů C_4AH_{13} . Mezi další produkty patří: C_2ASH_8 a dále $\text{C}_3\text{ACaCO}_3\text{H}_{12}$, C_3AH_6 , $\text{C}_3\text{AS}_2\text{H}_2$. [23]

Pucolánovou reakci lze souhrnně napsat následovně dle rovnice (1):

Hydroxid vápenatý je silná zásada a ve vodném prostředí zcela disociuje na ionty:



Při pokojové teplotě je hodnota pH nasyceného roztoku $Ca(OH)_2$ 12,45. Vysoká koncentrace OH^- iontů způsobuje štěpení vazeb křemičitanů, hlinitokřemičitanů a SiO_2 a vznikají jednoduché ionty:



Kontaktem nové vzniklých křemičitanových a hlinitanových iontů s Ca^{2+} dochází k tvorbě CSH gelů a C_4AH_{13} . Aby se vytvořili hlinitany vápenaté je potřeba vyšší koncentrace Ca^{2+} , protože struktura křemičitanů je rychleji rozpustná oproti hlinitanovým. CSH gely nejdříve pokryjí povrch zrn pucolánu a následně na povrchu CSH gelů se vytváří hexagonální hlinitany C_4AH_{13} , popřípadě další produkty hydratace [23].

3 Experimentální část

Cílem experimentální části této bakalářské práce bylo prozkoumat dva typy popílků vzniklých vysokoteplotním spalováním a jejich využití. Popílků pochází ze dvou různých deponií, v nichž byly po delší dobu uloženy, s označením I a TR. V těchto úložištích byly provedeny hloubkové vrty a odebrány vzorky po určitých metrech. V první fázi probíhala analýza popílků a následně se přešlo k přípravě těles a mechanickým zkouškám.

3.1 Analýza popílků z deponií

V následujících kapitolách 3.1.1. až 3.1.3. byla provedena série stanovení k vyhodnocení vlastností odebraných popílků.

3.1.1 Stanovení vlhkosti

Do Petriho misek byly odebrány vzorky jednotlivých popílků. Následně probíhalo sušení na 105 °C. Po 24 hodinách byly vzorky vyjmuty a zváženy.

3.1.2 Ztráta žíháním

Vzorky popílku byly žíhány v keramických kelímcích v peci při teplotě 1000 °C po dobu jedné hodiny dle ČSN EN 196-2. Po ukončení nataveného programu byly kelímky vyňaty z pece a uloženy do eksikátoru a po vychladnutí zváženy na analytických vahách.

3.1.3 Modifikovaný Chapelluv test

Chapelluv test se používá k zjištění pucolánové aktivity pro dané zkoušené materiály, v našem případě se jednalo o popílků [24].

Do suché plastové Erlenmeyerovy baňky bylo na analytických vahách naváženo přibližně 0,8g CaO s přesností na 4 desetinná místa, které bylo připraveno výpalem CaCO₃. Poté bylo k CaO přisypáno přibližně 0,4g popílku s přesností na 4 desetinná místa. K takto připravené směsi bylo napipetováno 100ml převařené destilované vody. Každý vzorek byl připraven dvakrát. Byl připraven i slepý vzorek tzv. blank bez obsahu popílku. Baňky byly uzavřeny, obaleny alobalem a mezi špunt a sklo byl dán proužek alobalu, aby nedocházelo při zahřívání k přetlaku. Baňky byly míchány při teplotě 86 °C po dobu 16 hodin. K dispozici byla šestimístná magnetická míchačka s ohřevem (Obrázek 4), takže bylo možné najednou míchat až 6 baněk (2x blank, 2x první vzorek, 2x druhý vzorek). Pozice 1 občas 2 na míchačce, kde byly umístěny blanky, se někdy přestaly z neznámých důvodů míchat, což později mělo za

důsledek špatné hodnoty výsledků, které se od ostatních velmi lišily a musely být z dalších početních operací vyloučeny. Ani tak se u některých hodnot nepodařilo odstranit vysoké odchylky.

Po uplynutí 16 hodin byly baňky ochlazeny na laboratorní teplotu. Bylo naváženo 24,0 g sacharózy a přidáno ke každé vychladlé směsi. Obsah baněk byl míchán 15 minut na magnetické míchačce. Po míchání byly obsahy baněk zvlášť odfiltrovány na Büchnerové nálevce s použitím membránové vývěvy. Z každého filtrátu bylo odpipetováno 10ml do titračních baněk a vzorky byly titrovány 0,1 molárním roztokem kyseliny chlorovodíkové, přesně stanovené, na indikátor fenolftalein dle rovnice (4):



Každý vzorek byl titrován dvakrát. Pucolánová aktivita P.A. byla vypočítána dle rovnice (5):

$$P.A. = \left(\frac{V_1}{m_1} - \frac{V_2}{m_2} \right) \cdot \frac{c_{\text{HCl}} \cdot M_{\text{Ca(OH)}_2} \cdot f_{\text{zředění}} \cdot 1000}{2 \cdot m_{\text{popílku}}} \quad (5)$$

V_1 je objem kyseliny z titrace slepého vzorku (dm^3),

m_1 je hmotnost naváženého CaO ke slepému vzorku (g),

V_2 je objem kyseliny z titrace vzorku popílku (dm^3),

m_2 je hmotnost naváženého CaO ke vzorku popílku (g),

c_{HCl} je koncentrace HCl ($\text{mol} \cdot \text{dm}^{-3}$),

$M_{\text{Ca(OH)}_2}$ je relativní molární hmotnost hydroxidu vápenatého

$f_{\text{zředění}}$ je podíl objemu odměrné baňky a objemu pipety: $f_{\text{zředění}} = 100/10=10$,

1000 je převod na mg

2 je stechiometrický koeficient z rovnice reakce

$m_{\text{popílku}}$ je hmotnost naváženého popílku (g).



Obrázek 4: Magnetická míchačka pro Chapelluv test

3.2 Mechanické zkoušky

Pro určení mechanických vlastností byly namíchány malty z cementu, studovaných popílků, písku a vody. Byl použit normový písek složený z frakcí PG 1, PG 2 a PG 3 v poměru 1:1:1. Cement byl částečně nahrazován popílkem a to konkrétně po 25 %, 35 % a 55 %. Připravené malty byly vpěchovány do ocelových forem (Obrázek 5), s rozměry testovacích těles 40x40x160 mm, předem vymazaných buď odformovacím olejem nebo vazelínou. Směs v ocelové formě byla zhutňována na vibračním stole po dobu 15 s. Po zhutnění byla nožem seříznuta horní strana směsi v ocelové formě do roviny. Ocelová forma se společně s navlhčenou houbičkou vložila do sáčku s uzávěrem. Po 24 hodinách byla tělesa odformována a uložena do vody.



Obrázek 5: Ocelová forma s rozměry testovacích těles 40x40x160 mm

Zkoušky pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku probíhaly na zařízení DESTTEST 3310 (obrázek 6), zařízení pro stavební pevnostní zkoušky. Každé těleso bylo nejdříve zkoušeno na pevnost v tahu za ohybu (obrázek 7). Vznikly 2 části, na kterých byla dále zkoušena pevnost v tlaku (obrázek 8). Hodnota pevnosti v tlaku se brala jako aritmetický průměr naměřených hodnot.

Zkoušky pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu byly prováděny po době tuhnutí 1, 2 a 28 dní.



Obrázek 6: Stolek s přístroji na měření pevnosti



Obrázek 7: Zařízení pro měření pevnosti v tahu za ohybu



Obrázek 8: Zařízení pro měření pevnosti v tlaku

4 Výsledky a diskuze

4.1 Analýza popílků z deponií

Pro analýzu kvality, vlastností a rozdílů dvou vysokoteplotních popílků z různých úložišť byly provedeny následující stanovení.

4.1.1 Stanovení vlhkosti

Stanovení vlhkosti probíhalo v sušárně při teplotě 105 °C. Popílků byly naváženy do Petriho misek po 20-50 g dle velikosti misek a následně se umístily do sušárny na vzorky vyhřáté na 105 °C. Po 24 hodinách došlo k jejich opětovnému zvážení a zaznamenání hodnot. Výsledky jsou uvedeny v přehledné tabulce 5 a tabulce 6.

Tabulka 5 Vlhkost popílků s označením TR z hloubky od 0-1 m až 37-38 m

Vzorek dle hloubky (m)	Vlhkost (% hmot.)	Vzorek dle hloubky (m)	Vlhkost (% hmot.)
TR 0-1	19,68	TR 13-14	40,53
TR 1-2	27,80	TR 17-18	70,88
TR 3-4	27,27	TR 18-19	42,48
TR 5-6	32,70	TR 22-24	50,69
TR 7-8	41,11	TR 29-30	36,18
TR 9-10	49,25	TR 37-38	38,81
TR 12-13	47,85		

Hodnoty stanovení hmotnostní vlhkosti popílků TR se v hloubce 0-6 m pohybují kolem 30 %, v hloubce nad 6 m vlhkost narůstá a hodnoty jsou blízké 45 %. Nejmenší vlhkost vykazuje popílek z 0-1 m a popílek s nejvyšší hmotnostní vlhkostí, která přesahuje 70 %, se nachází v hloubce 17-18 m.

Tabulka 6: Vlhkost popílků s označením I z hloubky 0-3 m až 19-20 m

Vzorek dle hloubky (m)	Vlhkost (% hmot.)	Vzorek dle hloubky (m)	Vlhkost (% hmot.)
I 0-3	32,06	I 15-16	42,68
I 3-4	9,18	I 16-17	55,30
I 6-9	30,66	I 18-19	49,66
I 11-12	38,98	I 19-20	48,44
I 14-15	38,02		

Hmotnostní vlhkost se u popílku I pohybuje obdobně jako u popílku TR v blízkosti 40–45 %. Velice nízká hodnota byla stanovena u popílku z hloubky 3-4 m. U vrtu v hloubce 3-4 m nejspíše došlo k nabrání malého procentuálního zastoupení popílku, nebo popílku velmi se lišícího svým složením od ostatních vzorků. Nejvyšší vlhkost má popílek z hloubky 16-17 m, ale nerůzní se tolik oproti ostatním hodnotám, pokud nebereme v potaz hloubku právě 3-4 m.

4.1.2 Ztráta žiháním

Popílek byl navážen na analytických vahách do keramických kelímků a následně vložen do pece a žihán na 1000 °C po dobu 60 minut. Poté byl popílek vyjmut kleštěmi a zvážen na analytických vahách. U každého popílku byly provedeny 2 sady navážení a vyžihání. Hodnoty jsou uvedeny jako průměr získaných hodnot v následující tabulce 7 a tabulce 8.

Tabulka 7 Ztráta žiháním popílků s označením TR z hloubky od 0-1 m až 37-38 m

Vzorek dle hloubky (m)	Ztráta žiháním (%)	Vzorek dle hloubky (m)	Ztráta žiháním (%)
TR 0-1	5,81	TR 13-14	7,69
TR 1-2	3,61	TR 17-18	8,93
TR 3-4	8,40	TR 18-19	3,69
TR 5-6	9,57	TR 22-24	11,23
TR 7-8	10,71	TR 29-30	3,87
TR 9-10	7,41	TR 37-38	9,37
TR 12-13	7,81		

Tabulka 8 Ztráta žiháním popílků s označením I z hloubky 0-3 m až 19-20 m

Vzorek dle hloubky (m)	Ztráta žiháním (%)	Vzorek dle hloubky (m)	Ztráta žiháním (%)
I 0-3	7,46	I 15-16	6,60
I 3-4	6,06	I 16-17	6,77
I 6-9	10,01	I 18-19	7,47
I 11-12	6,18	I 19-20	8,21
I 14-15	7,31		

Popílků z hlubších vrtů jsou starší než ty povrchové. Předpokladem bylo, že popílků s větším stářím budou mít menší ztrátu žiháním. Výsledky ztráty žiháním nevykazují žádnou souvislost mezi stářím a množstvím nedopalu (nespáleného uhlí). Úložiště TR vykazuje větší rozdíly v krajních hodnotách jak úložiště I, ale v průměru mají stejnou ztrátu žiháním, přibližně 7,5 %. Nejnižší hodnota ztráty žiháním je u vzorku TR 1-2 m a nejvyšší u TR 22-24 m.

Dle normy ČSN EN 450 a ČSN EN 12620 nelze popílků se ztrátou žihání větší jak 5 % hmotnosti použít do betonu. Z testovaných popílků lze použít pouze TR 1-2, TR 18-19 a TR 29-30, které mají ztrátu žiháním pod 5 % hmotnosti. Z deponie I by žádný popílek neodpovídal výše uvedeným normám.

Dle normy ČSN EN 450-1, ztráta žiháním, se jedná až na již zmíněné TR (1-2, 18-19, 29-30) o popílků kategorie B (ztráta žiháním ≤ 7 % hmotnosti) a kategorie C (ztráta žiháním ≤ 9 % hmotnosti). Popílků TR z hloubek 5-6 m, 7-8 m, 22-24 m, 37-38 m a popílek I 6-9 by normu nespĺňovali.

4.1.3 Modifikovaný Chapelluv test

K určení pucolánové aktivity jednotlivých vzorků byl použit modifikovaný Chappeluv test popsáný v 3.1.3. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce 9.

Tabulka 9: Pucolánová aktivita jednotlivých hloubkových metrů deponie TR

Vzorek dle hloubky (m)	Pucolánová aktivita (mg Ca(OH) ₂ /1 g pucolánu)	Směrodatná odchylka (%)
TR 0-1	606,8	22,4
TR 1-2	539,5	4,1
TR 3-4	702,2	46,8
TR 5-6	312,7	18,7
TR 7-8	301,1	31,8
TR 9-10	394,0	30,8
TR 12-13	204,9	50,4
TR 13-14	144,2	70,1
TR 17-18	200,4	17,6
TR 18-19	220,1	80,3
TR 22-24	316,1	17,1
TR 29-30	213,0	28,1
TR 37-38	648,1	28,0

Tabulka 10: Pucolánová aktivita jednotlivých hloubkových metrů deponie I

Vzorek dle hloubky (m)	Pucolánová aktivita (mg Ca(OH) ₂ /1 g pucolánu)	Směrodatná odchylka (%)
I 0-3	440,3	32,1
I 3-4	196,2	10,9
I 6-9	283,4	16,7
I 11-12	545,9	7,0
I 14-15	604,5	2,8
I 15-16	683,5	25,8
I 16-17	492,7	52,1
I 18-19	652,3	9,8
I 19-20	712,2	18,6

Z naměřených dat vyplývá, že některé testované popílký mají velice nízké pucolánové aktivity, což by se mělo projevit na nízkých hodnotách pevností. Největší pucolánovou aktivitu má popílek s označením I 19-20 a nejmenší popílek s označením TR 13-14, ovšem při měření

TR 13-14 vznikla odchylka 70,1 %, takže se skutečná hodnota může velmi lišit. Stejně jako u ztráty žíháním 4.1.2 ani zde nelze hledat žádnou podobnost mezi hloubkou, z které jsou

popílky odebrány a naměřenými hodnotami. Na první pohled lze říci, že popílky z deponie I mají větší průměrné pucolánové aktivity, jak popílky z deponie TR.

V rámci bakalářské práce z roku 2014 byla měřena pucolánová aktivita několika vzorků Chappelovým testem. Pro porovnání pucolánová aktivita křemičitého úletu vyšla 1693 mg $\text{Ca(OH)}_2/1$ g pucolánu a sodnovápenatého skla 815 mg $\text{Ca(OH)}_2/1$ g pucolánu. [26]

U vzorku I 3-4 byla naměřena malá pucolánová aktivita oproti ostatním vzorkům ve stejné deponii. Jedním z důvodů může být nedostatečné množství reaktivního SiO_2 pro pucolánovou reakci nebo při hloubkovém vrtu došlo k odběru nejen popílku, ale i velké části půdních složek.

4.2 Mechanické zkoušky

K mechanickým zkouškám bylo vybráno celkem 11 popílků, 6 popílků z deponie TR a 5 popílků z deponie I, tak, aby se otestovaly hloubkové vrty v co největším rozsahu u obou deponií.

Experimentální malty byly připraveny podle ČSN EN 196-1, kdy v první maltě bez popílku bylo naváženo 450 ± 2 g cementu, konkrétně CEM I 42,5 R, 1350 ± 5 g normového písku CEN a 225 ± 1 g vody. U dalších těles došlo k nahrazení cementu, pro náš experiment reprezentující zejména slínek, jednotlivými popílky a to zastoupením 25 %, 35 % a 55 % každým z testovaných popílků tak, aby to odpovídalo složení CEM II, CEM IV a CEM V. S rostoucím množstvím popílku v testovací maltě došlo ke zvýšení vody, tak aby se zachovala stejná konzistence, jakou měla referenční testovací malta bez popílku. Některá testovací tělesa musela být připravena znovu s větším obsahem vody, protože při prvotní tvorbě se nepřidal dostatek vody a nedošlo k dostatečné hydrataci cementu, došlo k tvorbě zrnité nízko pevnosti malty, z důvodu velké absorpce vody popílkem.

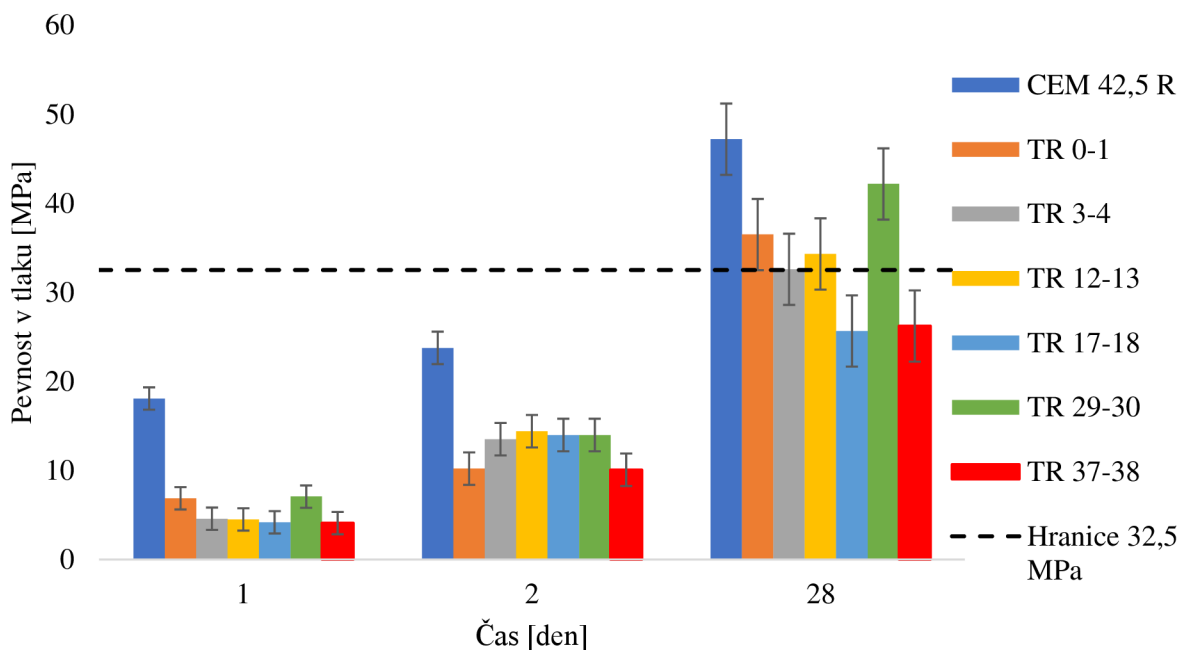
Vodní součinitel byl počítán jako poměr vody a pojiva, kdy do pojmu pojiva je zahrnut součet hmotnosti cementu a popílku, i přesto, že vysokopecní popílek není brán jako samostatné pojivo, nýbrž pouze pucolánový materiál.

Tabulka 11: Složení malty s náhradou 25 % cementu

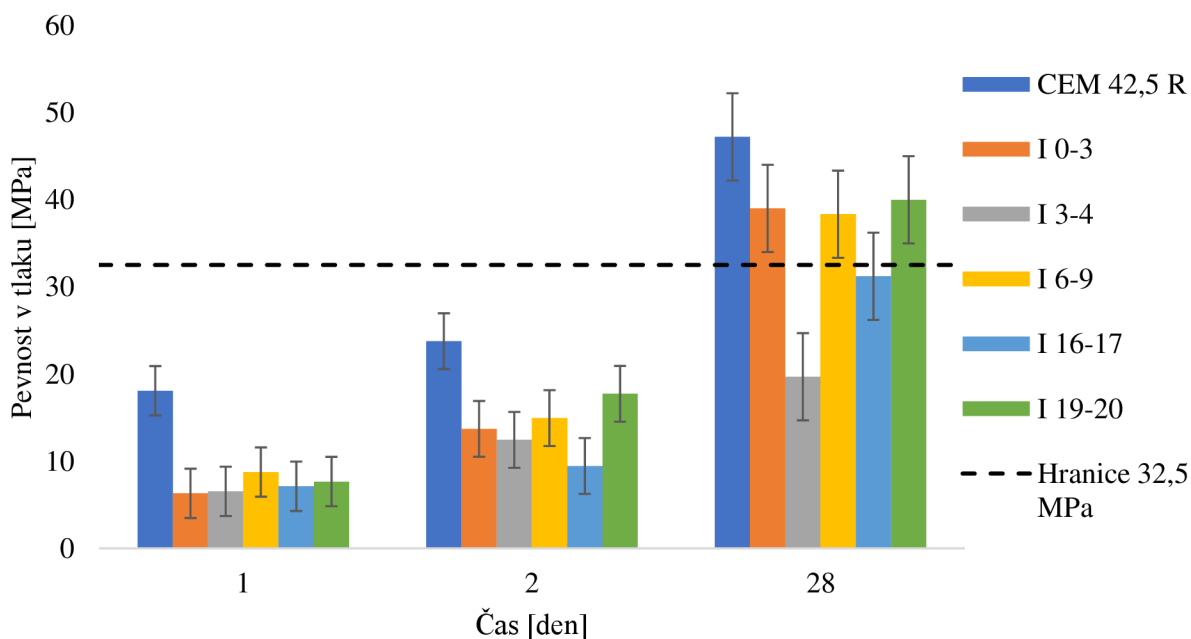
Náhrada 25 % cementu popílkiem					
Vzorek	CEM 42,5 R (g)	Popílek (g)	Normový písek (g)	Voda (ml)	Vodní součinitel w/b
TR 0-1	337,5	112,5	1 350	240	0,53
TR 3-4	337,5	112,5	1 350	240	0,53
TR 12-13	337,5	112,5	1 350	240	0,53
TR 17-18	337,5	112,5	1 350	240	0,53
TR 29-30	337,5	112,5	1 350	240	0,53
TR 37-38	337,5	112,5	1 350	240	0,53
I 0-3	337,5	112,5	1 350	240	0,53
I 3-4	337,5	112,5	1 350	240	0,53
I 6-9	337,5	112,5	1 350	240	0,53
I 16-17	337,5	112,5	1 350	240	0,53
I 19-20	337,5	112,5	1 350	240	0,53

Tabulka 12: Pevnosti malty s náhradou 25 % cementu

Náhrada 25 % cementu popílkiem						
Vzorek	Pevnost po 24 hodinách (MPa)		Pevnost po 2 dnech (MPa)		Pevnost po 28 dnech (MPa)	
	V tahu za ohybu	V tlaku	V tahu za ohybu	V tlaku	V tahu za ohybu	V tlaku
CEM 42,5 R	4,24	18,08	5,75	23,76	7,36	47,19
TR 0-1	2,05	6,87	3,51	10,20	7,06	36,48
TR 3-4	1,60	4,58	3,50	13,51	6,69	32,58
TR 12-13	1,56	4,50	3,36	14,41	6,66	34,30
TR 17-18	1,69	4,18	3,25	13,98	6,53	25,66
TR 29-30	2,10	7,07	3,27	13,98	7,75	42,16
TR 37-38	1,19	4,09	2,43	10,08	4,75	26,21
I 0-3	2,17	6,32	3,64	13,71	6,91	38,98
I 3-4	1,82	6,55	3,15	12,45	5,89	19,68
I 6-9	2,23	8,76	3,63	14,94	6,60	38,32
I 16-17	1,83	7,13	2,79	9,45	6,03	31,20
I 19-20	3,11	7,67	4,06	17,73	7,18	39,97



Obrázek 7: Vývoj pevností malt s 25 % popílku TR z vybraných hloubek a srovnávací malta CEM 42,5 R



Obrázek 8: Vývoj pevností malt s 25 % popílku I z vybraných hloubek a srovnávací malta CEM 42,5 R

Na obrázku 7 a obrázku 8 jsou znázorněny grafy s náhradou 25 % cementu, lze pozorovat postupné narůstající pevnosti malt, jak bylo předpokládáno. Pevnosti jednotlivých zkušebních malt s popílkem jsou menší než u malty bez popílku. Z deponie TR se porovnávací maltě CEM 42,5 R nejvíce přiblížil vzorek TR 29-30, z deponie I vzorek z hloubky 19-20 m. Na hranici nejmenší pevnostní třídy 32,5 MPa, viz Tabulka 2, nedosáhly po 28 dnech pouze 4 popílky

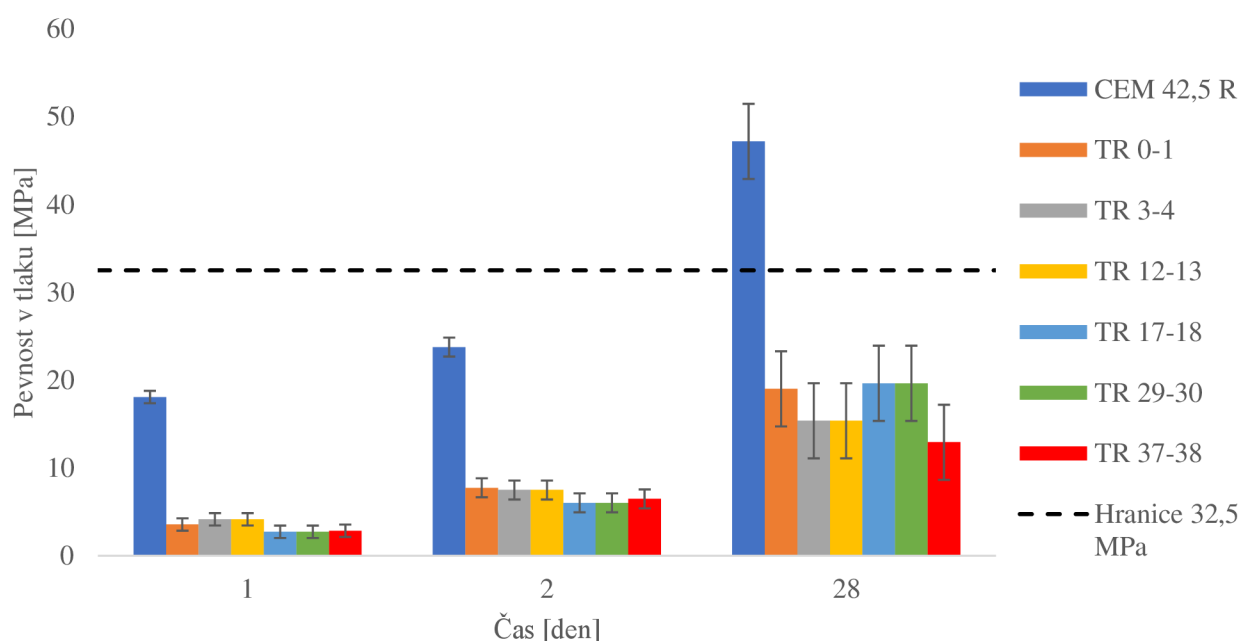
z celkových 11 testovaných. Konkrétně se jednalo o vzorky TR 17-18, TR 37-38, I 16-17 a I 3-4. U vzorku I 3-4 byla naměřena velmi malá hodnota pevnosti oproti ostatním vzorkům ze stejné deponie. Jak již bylo zmíněno výše v 4.1.2 a 4.1.3, vzorek I 3-4 se nejspíše liší složením od ostatních popílků.

Tabulka 13: Složení malty s náhradou 35 % cementu

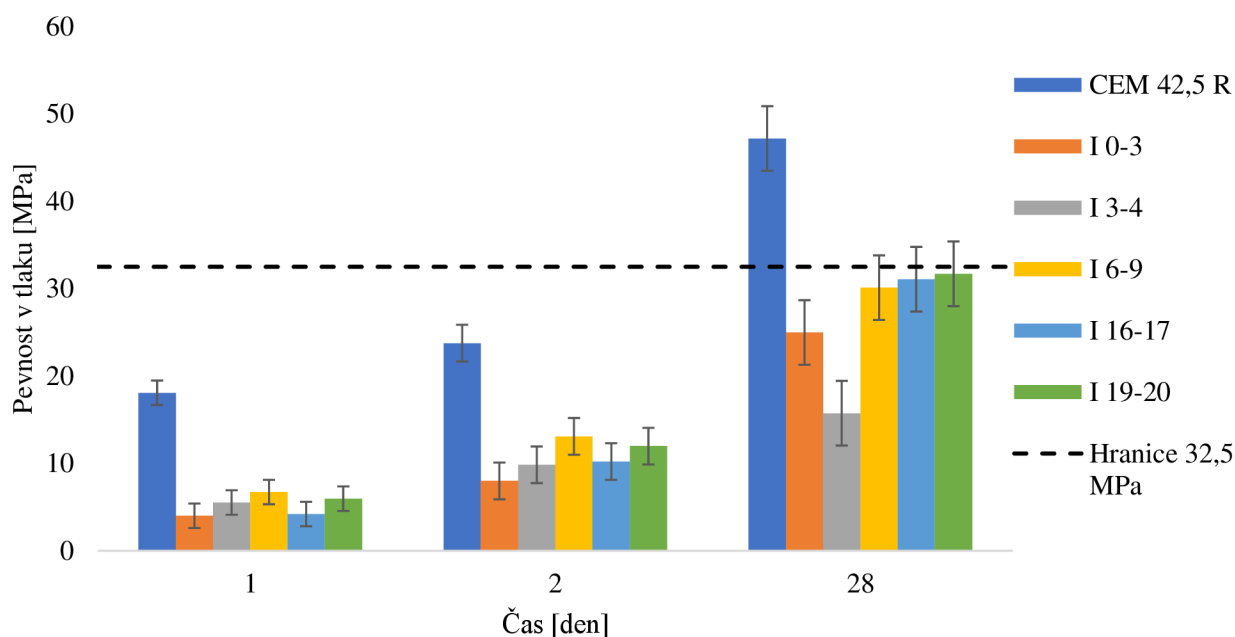
Náhrada 35 % cementu popílkem					
Vzorek	CEM 42,5 R (g)	Popílek (g)	Normový písek (g)	Voda (ml)	Vodní součinitel w/b
TR 0-1	292,5	157,5	1 350	258	0,57
TR 3-4	292,5	157,5	1 350	250	0,56
TR 12-13	292,5	157,5	1 350	250	0,56
TR 17-18	292,5	157,5	1 350	250	0,56
TR 29-30	292,5	157,5	1 350	250	0,56
TR 37-38	292,5	157,5	1 350	250	0,56
I 0-3	292,5	157,5	1 350	250	0,56
I 3-4	292,5	157,5	1 350	250	0,56
I 6-9	292,5	157,5	1 350	250	0,56
I 16-17	292,5	157,5	1 350	245	0,54
I 19-20	292,5	157,5	1 350	250	0,56

Tabulka 14: Pevnosti malty s náhradou 35 % cementu

Náhrada 35 % cementu popílkem						
Vzorek	Pevnost po 24 hodinách (MPa)		Pevnost po 2 dnech (MPa)		Pevnost po 28 dnech (MPa)	
	V tahu za ohybu	V tlaku	V tahu za ohybu	V tlaku	V tahu za ohybu	V tlaku
CEM 42,5 R	4,24	18,08	5,75	23,76	7,36	47,19
TR 0-1	1,12	3,57	2,13	7,74	5,68	19,01
TR 3-4	1,08	3,09	2,33	9,39	4,73	25,23
TR 12-13	0,99	4,15	2,41	7,49	5,30	15,38
TR 17-18	0,71	1,88	1,95	7,91	5,33	23,59
TR 29-30	0,91	2,73	1,56	6,03	4,79	19,64
TR 37-38	0,76	2,85	1,59	6,48	3,80	12,92
I 0-3	1,52	4,00	2,40	7,99	6,00	24,98
I 3-4	1,71	5,52	2,56	9,84	5,46	15,74
I 6-9	1,42	6,72	2,74	13,09	6,51	30,11
I 16-17	1,77	4,20	2,90	10,21	6,28	31,08
I 19-20	1,95	5,96	3,09	11,97	6,03	31,71



Obrázek 9: Vývoj pevností malt s 35 % popílku TR z vybraných hloubek a srovnávací malta CEM 42,5 R



Obrázek 10: Vývoj pevností malt s 35 % popílku I z vybraných hloubek a srovnávací malta CEM 42,5 R

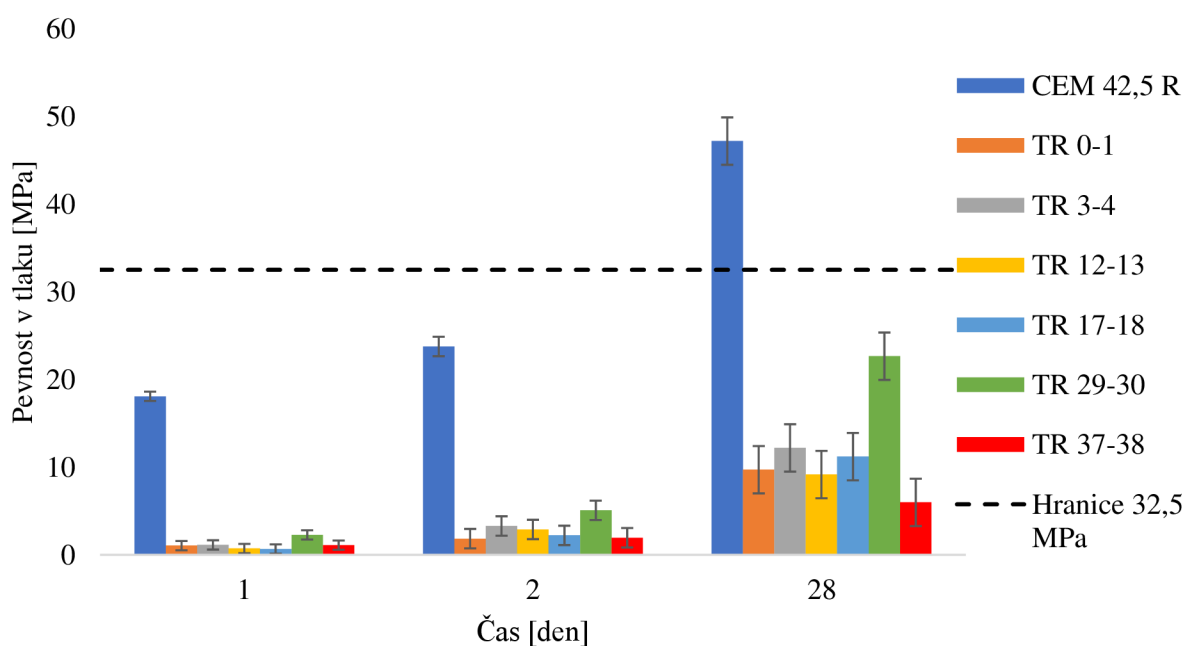
Při větším procentuálním zastoupení popílků dochází k dosažení čím dál menších pevností u malt. Žádná z testovaných malt s popílkem nepřekročila hodnotu 32,5 MPa, ale je z grafů patrné, že malty s popílkem z deponie I mají větší hodnoty pevností, jak malty s popílkem z deponie TR. Odlišnosti v pevnostech jednotlivých deponií odpovídají rozdílným hodnotám pucolánové aktivity, která byla okomentována v 4.1.3.

Tabulka 15: Složení malty s náhradou 55 % cementu

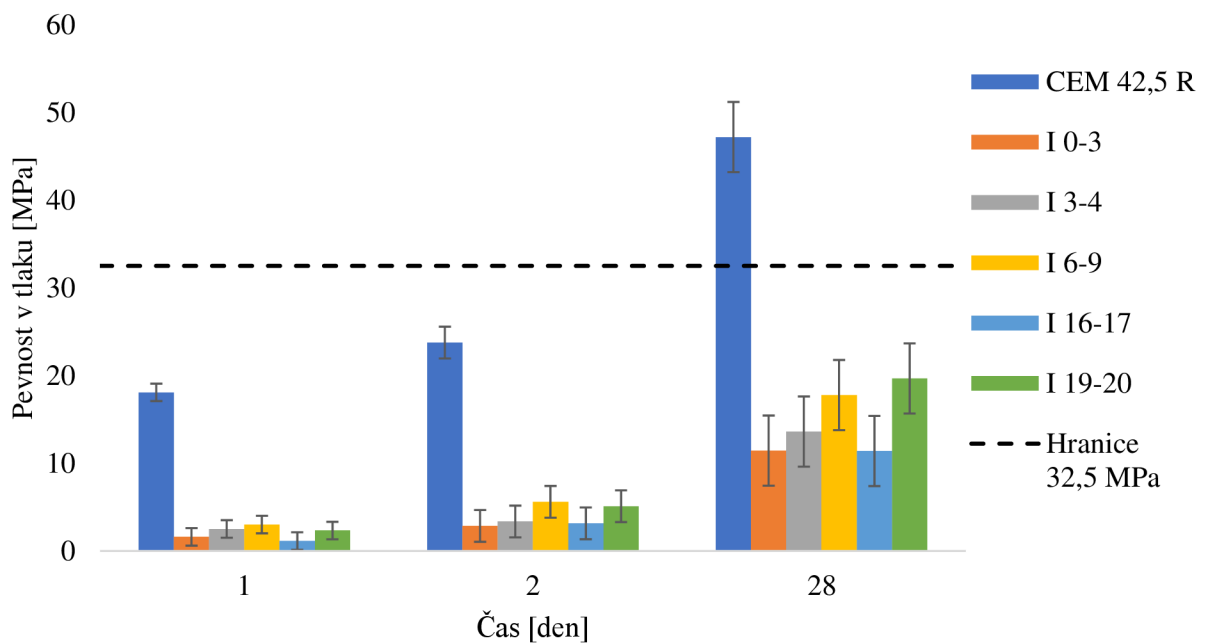
Náhrada 55 % cementu popílkem					
Vzorek	CEM 42,5 R (g)	Popílek (g)	Normový písek (g)	Voda (ml)	Vodní součinitel w/b
TR 0-1	202,5	247,5	1 350	310	0,69
TR 3-4	202,5	247,5	1 350	310	0,69
TR 12-13	202,5	247,5	1 350	310	0,69
TR 17-18	202,5	247,5	1 350	300	0,67
TR 29-30	202,5	247,5	1 350	320	0,71
TR 37-38	202,5	247,5	1 350	300	0,67
I 0-3	202,5	247,5	1 350	300	0,67
I 3-4	202,5	247,5	1 350	255	0,57
I 6-9	202,5	247,5	1 350	260	0,58
I 16-17	202,5	247,5	1 350	320	0,71
I 19-20	202,5	247,5	1 350	278	0,62

Tabulka 16: Pevnosti malty s náhradou 55 % cementu

Náhrada 55 % cementu popílkem						
Vzorek	Pevnost po 24 hodinách (MPa)		Pevnost po 2 dnech (MPa)		Pevnost po 28 dnech (MPa)	
	V tahu za ohybu	V tlaku	V tahu za ohybu	V tlaku	V tahu za ohybu	V tlaku
CEM 42,5 R	4,24	18,08	5,75	23,76	7,36	47,19
TR 0-1	0,37	1,05	0,73	1,85	2,37	9,71
TR 3-4	0,38	1,13	0,86	3,29	3,20	12,19
TR 12-13	0,30	0,72	0,82	2,89	2,49	9,15
TR 17-18	0,38	0,66	0,58	2,22	2,70	11,20
TR 29-30	0,79	2,27	1,57	5,07	5,30	22,65
TR 37-38	0,43	1,10	0,52	1,95	1,52	5,98
I 0-3	0,40	1,61	0,78	2,86	3,48	11,45
I 3-4	0,66	2,51	1,42	3,36	3,55	13,61
I 6-9	0,82	3,01	1,65	5,61	4,82	17,78
I 16-17	0,41	1,13	0,95	3,15	3,05	11,40
I 19-20	0,78	2,33	1,51	5,10	4,91	19,67



Obrázek 11: Vývoj pevnosti malty s 55 % popílku TR z vybraných hloubek a srovnávací malta CEM 42,5 R



Obrázek 12: Vývoj pevností malt s 55 % popílku I z vybraných hloubek a srovnávací malta CEM 42,5 R

Náhrada 55 % popílku se jeví jako nepřínosná. Pevnosti dosahují velice malých hodnot, u malt s popílku z deponie TR je tato hodnota kolem 12 MPa, u deponie I pak 15 MPa.

Při procentuálním zastoupení 55 % popílku v cementu bylo zjištěno, že malta se vzorek TR 37-38 byla zbarvena do oranžova oproti ostatním maltám, které byly tmavě šedé až mírně nahnědlé. V popílku TR 37-38 byly zřejmě nečistoty (Fe, Zn), které ve větší koncentraci v maltě měly za následek mnohem menší pevnosti oproti ostatním testovaným maltám.

5 Závěr

Bakalářská práce se zabývá zkoumáním vlastností cementových malt při částečném nahrazení cementu vysokoteplotními popílkami, které vznikly spalováním v tepelných elektrárnách, jako možná částečná náhrada cementu například ve stavebnictví. Popílkami byly po delší dobu uloženy v deponiích a vystaveny vnějším vlivům. Ve dvou popílkových deponiích byly provedeny hloubkové vrty, vzorky byly odebírány po jednotlivých metrech. Hloubkový vrt z deponie TR byl proveden do celkové hloubky 38 m, v deponie I do hloubky 20 m.

Na 22 popílcích byly v první fázi vykonány analýzy, které měly za úkol zjistit základní fyzikální charakterizaci analyzovaných vzorků. Na základě získaných výsledků byly navrženy experimenty, které prozkoumaly možnosti využití těchto deponovaných vzorků v průmyslovém měřítku.

Po provedení prvotních analýz vzorků bylo zjištěno, že jeden vzorek z deponie I, konkrétně vzorek I 3-4, se vymyká svými hodnotami, což bylo pravděpodobně způsobeno odebráním nejen deponovaného vysokoteplotního popílku v hloubce 3-4 m, ale i společným odebráním půdního vzorku. Z výsledků provedených analýz lze odvodit, že stáří popílků, reprezentující hloubku, nemá významný vliv na jejich vlastnosti, ať už se konkrétně jedná o hmotnostní vlhkost, množství nedopalu nebo pucolánovou aktivitu. Rozdíl hodnot je znatelný mezi jednotlivými deponiemi, a to zejména v hodnotách pucolánové aktivity, kdy popílkami z deponie I mají lepší pucolánové vlastnosti.

Díky výsledkům z první experimentální fáze bakalářské práce bylo vybráno celkem 11 z 22 vzorků na zjišťování mechanických vlastností při částečných náhradách cementu deponovanými vysokoteplotními popílkami. Výběr vzorků byl přizpůsoben nejen vhodným výsledkům z prvotních analýz, ale také reprezentativním pokrytím celého hloubkového vrtu. Byla vytvořena normová testovací tělesa. Po odformování byly zkušební trámečky uloženy do vodního prostředí. Mechanické testy byly provedeny po 1, 2 a 28 dnech. Byly zjištěny pevnosti v ohybu a pevnosti v tlaku.

Z výsledků je patrné, že všechny připravené malty z cementu s náhradou popílku postupně nabývaly pevnosti. Čím více se však zvyšoval obsah deponovaného popílku v cementu, tím měly malty horší mechanické vlastnosti, což lze vysvětlit poklesem obsahu cementu v materiálu, a tudíž i menším obsahem hydratačních produktů v testovacím trámečku. Cílem experimentální části bylo dosáhnout hodnoty pevnosti v tlaku alespoň 32,5 MPa po 28 dnech. Náhrada 25 % cementu popílkem se ukázala jako vhodná, jelikož hodnota 32,5 MPa byla

dosáhuta u 7 z 11 takto připravených malt. S vyššími přídávky popílků nedošlo ani u jednoho testovaného vzorku k dosažení požadované pevnosti v tlaku. Bylo zjištěno, že popílký v tak vysoké procentuální náhradě za cement, již nejsou vhodné při použití do maltových směsí. Použitelné nahrazení cementu deponovanými popílký je maximálně 25 %, avšak za současného poklesu pevností na stanovenou hranici pevností. Vhodnější varianta se jeví s nižší náhradou popílký, kdy se stále využije poměrně velké množství vedlejšího energetického produktu, ale zároveň nedojde k tak výraznému zhoršení mechanických vlastností. Celkově však předložené výsledky ukazují, že deponované vysokoteplotní popílký lze použít jako částečnou náhradu cementu v maltových směsí využitelných ve stavebním průmyslu. Bylo by možné vyzkoušet popílký, jako příměs do betonů, ve formě částečné náhrady záměsové vody, vzhledem k jejich vysokým hmotnostním vlhkostem a tím dále zvýšit jejich využití.

6 Seznam použité literatury

- [1] K. HATFIELD, Ashley, 2021. Cement. *Mineral commodity summaries 2021* [online]. Reston: U.S. Government Publishing Office, s. 42-43 [cit. 2021-11-03]. ISBN 978-1-4113-4398-6. Dostupné z: <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021.pdf>
- [2] MAHASANAN, N, S SMITH a K HUMPHREYS, 2003. The Cement Industry and Global Climate Change Current and Potential Future Cement Industry CO2 Emissions. *Greenhouse Gas Control Technologies - 6th International Conference* [online]. Elsevier, 2003, 995-1000 [cit. 2021-11-03]. ISBN 978-0-08-044276-1. Dostupné z: doi:10.1016/B978-008044276-1/50157-4
- [3] TIMPERLEY, Jocelyn, 2018. Why cement emissions matter for climate change. *Carbon Brief* [online]. London: Carbon Brief [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://www.carbonbrief.org/qa-why-cement-emissions-matter-for-climate-change>
- [4] SUTCU, Mucahit, Ertugrul ERDOGMUS, Osman GENCEL, Aliakbar GHOLAMPOUR, Ebubekir ATAN a Togay OZBAKKALOGLU, 2019. Recycling of bottom ash and fly ash wastes in eco-friendly clay brick production. *Journal of Cleaner Production* [online]. **233**, 753-764 [cit. 2021-11-03]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2019.06.017
- [5] KHOLOMYEVA, Marina, 2018. Ve světě na výhody použití elektrárenských popílku už přišli. A jak jsme na tom my? In: *Průmyslová ekologie* [online]. Odolena voda: Průmyslová ekologie, 15.3.2018 [cit. 2021-11-03]. Dostupné z: <https://www.prumyslovaekologie.cz/info/ve-svete-na-vyhody-pouziti-elektrarenskych-popilku-uz-prisli-a-jak-jsme-na-tom-my->
- [6] HALSTEAD, P. E., 2014. The Early History of Portland Cement. *Transactions of the Newcomen Society* [online]. **34**(1), 37-54 [cit. 2021-11-12]. ISSN 0372-0187. Dostupné z: doi:10.1179/tns.1961.003
- [7] PEŘKA, Lukáš. Druhy a složení cementů podle ČSN EN 197-1 ed. 2 (TP 2.2). In: *Profesní informační systém ČKAIT* [online]. Praha: PROFESIS [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: <https://profesis.ckait.cz/dokumenty-ckait/tp-2-2/#2>
- [8] SCHORCHT, Frauke, Ioanna Kourti, KOURTI, Serge ROUDIERY, Luis Delgado SANCHO a Bianca Maria SCALET, 2013. Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Cement, Lime and Magnesium Oxide.

- In: *European Commission* [online]. Brusel: European Commission [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/CLM_Published_def_0.pdf
- [9] Jak se u nás vyrábí cement. In: *Českomoravský cement Heidelberg cement group* [online]. Mokrá [cit. 2021-11-17]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/vyroba?fbclid=IwAR1K6QJVq2iLhGyrXbS3sphPbSyTheUYdomVtWhjzCCM6WXN25yPHFvj5PM>
- [10] ČSN EN 197-1 ed. 2 (722101). Cement: Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití. 2012.
- [11] ČSN EN 196-1 (722101). Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti. 2005.
- [12] BÁRTA, Rudolf. *Chemie a technologie cementu*. Praha: Nakladatelství československé akademie věd, 1961, 1107 s.
- [13] BENSCHIEDT, N. a Rudolf HELA, 2013. *Příručka Popílek v betonu: základy výroby a použití*. Hostivice: ČEZ Energetické produkty vydává pro ASVEP. ISBN 978-80-260-4226-6.
- [14] Popílek a jeho použití do betonu, 2015. In: *Výzkumný ústav maltovin Praha, s. r. o.* [online]. Praha: Výzkumný ústav maltovin Praha [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: https://www.vumo.cz/wp-content/uploads/2015/05/popilek_a_jeho_pouziti_do_betonu.pdf?fbclid=IwAR0Jk5enqNeRwIwHXsRDQOOp5LU2NmRXp5yonRXIXoMPu4imPQIwS2CT_mQ
- [15] Bc. Et Bc. Radka Frýzová. Fázové složení elektrárenských popílků: kvantitativní stanovení vybraných minerálů. Brno 2012. Dostupné také https://is.muni.cz/th/lfwz6/DP_researse_-_fryzova.pdf. Bakalářská práce. Masarykova Univerzita. Přírodovědecká fakulta. Ústav geologických věd. Vedoucí práce RNDr. Václav, Ph.D.
- [16] Scanning electron microscopy (SEM) of coal fly ash FA2., 2008. In: *Research gate* [online]. Berlin: ResearchGate [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/Scanning-electron-microscopy-SEM-of-coal-fly-ash-FA2_fig1_236462335
- [17] Scanning electron microscope image of coal fly ash. The irregular shape and rough surface is clearly visible., 2008. In: *Research gate* [online]. Berlin: ResearchGate [cit. 2021-12-03]. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/figure/Scanning-electron->

microscope-image-of-coal-fly-ash-The-irregular-shape-and-rough-surface fig1 290393423

- [18] FEČKO, Peter. *Popilky*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2003, 187 s. : il. ISBN 80-248-0327-5.
- [19] AHMARUZZAMAN, M. A review on the utilization of fly ash. *Progress in energy and combustion science* [online]. OXFORD: Elsevier, 2010, **36**(3), 327-363 [cit. 2021-12-04]. ISSN 0360-1285. Dostupné z: doi:10.1016/j.pecs.2009.11.003
- [20] ŠIMKOVÁ, J.; Příprava lehkých kompozitů na bázi alkalicky aktivovaných popílků z vysokoteplotního spalování uhlí. Brno, 2007. 34s. Bakalářská práce na Fakultě chemické Vysokého učení technického v Brně, Ústav chemie materiálů. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaromír Havlica, CSc.
- [21] KALOUSOVÁ, H. Vliv podmínek skladování na kvalitu klasických popílků. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2014. 84 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.
- [22] BAYER, P. *Vliv popilku na vlastnosti cementových malt*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2012. 70 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Šiler, Ph.D
- [23] BAREK, Jaroslav. Pucolánová aktivita oxidu křemičitého. Brno, 2014. 78 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc.
- [24] Metakaolin - measuring the total quantity of fixed Calcium Hydroxide (Chapelle test modified) Referring to the French norm NF P 18-513. In: *Metakaolin* [online]. [cit. 2022-04-02]. Dostupné z: <http://www.metakaolin.info/quality-criteria/chapelle-test.html>
- [25] HLAVÁČ, Jan, 1981. *Základy technologie silikátů*. Praha 1: SNTL.
- [26] BAREK, Jaroslav. Pucolánová aktivita oxidu křemičitého. Brno, 2014. 78 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav chemie. Vedoucí práce prof. RNDr. Pavla Rovnaníková, CSc

7 Seznam použitých zkratk a symbolů

VEP	vedlejší energetické produkty
CO ₂	oxid uhličitý
CaO	oxid vápenatý
CaCO ₃	uhličitan vápenatý (vápenec)
Al ₂ O ₃	oxid hlinitý
SO ₃	oxid sírový
Fe ₂ O ₃	oxid železitý
SiO ₂	oxid křemičitý
Na ₂ O	oxid sodný
K ₂ O	oxid draselný
TiO ₂	oxid titaničitý
C ₄ AH ₁₃	hexagonální hlinitan
Ca ²⁺	kationt vápenatý
CSH	hydratovaný křemičitan vápenatý
SEM	skenovací elektronová mikroskopie
Fe	železo
Zn	zinek
Ca(OH) ₂	hydroxid vápenatý