

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

FAKULTA STAVEBNÍ

Katedra technologie staveb



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Vlastnosti deponovaných elektrářenských
popílků**

Kristýna Sokolová

2018

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem předkládanou bakalářskou práci vypracovala samostatně pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.

V Praze

.....

Jméno a příjmení

Poděkování:

Tímto bych chtěla poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Rostislavu Šulcovi, Ph. D. za odborné rady a pomoc při vypracování bakalářské práce. Dále bych ráda poděkovala Ing. Petru Formáčkovi za vysvětlení některých prováděných zkoušek. Nakonec bych ráda poděkovala pracovníkům Ústavu skla a keramiky VŠCHT v Praze za poskytnuté laboratoře, ochotu a asistenci při provádění laboratorních zkoušek, zejména Ing. Adéle Peterové, Ph.D. a Ing. Martině Šídlové, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Sokolová Jméno: Kristýna Osobní číslo: 424362

Zadávací katedra: K122 - Katedra technologie staveb

Studijní program: Stavitelství

Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vlastnosti deponovaných elektrárenských popílků

Název bakalářské práce anglicky: Properties of deposited fly ash from coal power plants

Pokyny pro vypracování:

- 1) Rešerše k problematice využití popílků ze složišť v ČR a ve světě.
- 2) Rešerše ke stavu vybraných složišť v ČR.
- 3) Popis vlastností popílků z různých zdrojů vzhledem ke klasifikaci ČSN 72 2071.
- 4) Určení základních mechanických, fyzikálních a chemických vlastností popílků ze složišť (hustota, sypaná hmotnost, chemické složení, granulometrie atd.)
- 4) Vyhodnocení vlastností popílků ze složišť vzhledem k požadavkům ČSN 72 2071 a ČSN EN 450-1.
- 5) Srovnání zjištěných parametrů s vlastnostmi vysokoteplotních popílků ze současné produkce.
- 6) Možnosti využití těchto popílků ve stavebnictví.

Seznam doporučené literatury:

- 1) BENSCHIEDT, N., R. HELA a Asociace pro využití energetických produktů. Příručka Popílek V Betonu: Příručka: Základy Výroby a Použití. 2.přepřac. vyd. Hostivice: ČEZ Energetické produkty vydává pro ASVEP, 2013.
- 2) FEČKO, Peter. Fly Ash. Ostrava: VŠB, 2005
- 3) ČSN 72 2071. Popílek pro stavební účely - Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Rostislav Šulc, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 22.2.2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 28.5.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Vlastnosti deponovaných elektrárenských popílků

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou vlivu na vlastnosti deponovaných vysokoteplotních popílků. Hledá cestu pro efektivní využívání tohoto vedlejšího elektrárenského produktu ze spalování hnědého uhlí, který je ukládán ve formě aglomerátu. Seznamuje s vybranými složišti v České republice a jejich stavem. Nastiňuje celkovou situaci potřeby popílku u nás i ve světě. Shrnuje zjištěné informace o možnosti jejich použití ve stavebnictví a jsou v ní prezentovány, vyhodnoceny a porovnány výsledky z laboratorních zkoušek na mechanické, chemické a fyzikální vlastnosti. Tyto zjištěné informace mohou být použity jako podklady pro další navazující práce.

Klíčová slova:

Popílek, aglomerát, složiště, vlastnosti deponovaných popílků, vedlejší energetické produkty

Propertie of deposited fly ash from coal power plants

This bachelor thesis deals with problems of influence on properties of deposited high temperature fly ash. The work is looking for a way to effectively utilise this side energy products of the lignite combustion which is deposited as an agglomerate. It acquaints with selected fly ash stock-pile in the Czech Republic and its status. It highlights the overall situation of the need for fly ash locally and globally. It summarizes the information on the possibility of using them in the construction industry and presents the results of the laboratory tests on mechanical, chemical and physical properties. This information can be used as a basis for further follow-up work.

Key words:

Fly ash, agglomerate, fly ash stock-pile, properties of deposited fly ash, side energy products

Obsah

Obsah	11
ÚVOD	10
Cíl práce	10
1 TEORETICKÁ ČÁST	11
1.1 Popílek.....	11
1.1.1 Vznik vysokoteplotního popílku	11
1.2 Škvára.....	11
1.3 Aglomerát z úložiště Panský les v Mělníku	12
1.4 Normy.....	12
1.4.1 Klasifikace popílku dle normy ČSN EN 450-1.....	13
1.5 Tepelné zdroje	14
1.5.1 Teplárny a elektrárny v ČR.....	14
1.6 Vybraná složiště v ČR.....	16
1.6.1 Složiště	16
1.6.2 Elektrárna Mělník – Panský les.....	17
1.6.3 Elektrárna Tušimice – Stodola	22
1.6.4 Elektrárna Prunéřov – Severní lom	24
1.7 Problematika využití popílků ze složišť ve světě a v ČR.....	25
1.7.1 Situace ve Velké Británii	25
1.7.2 Situace v České republice	26
1.8 Možnost využití popílku ve stavebnictví.....	28
1.9 Možnost využití popílku ze složišť	29
MOTIVACE.....	31
2 PRAKTICKÁ ČÁST	32
2.1 Popis vstupních surovin.....	32
2.1.1 Cement	32

2.1.2	Voda	32
2.1.3	Aglomerát – Elektrárna Mělník – Lokalita 1	32
2.1.4	Aglomerát – Elektrárna Mělník – Lokalita 3	32
2.1.5	Škvára – Elektrárna Mělník – Místo 1	33
2.1.6	Škvára – Elektrárna Mělník – Místo 2	33
2.1.7	Čerstvý popílek – Elektrárna Mělník	33
2.2	Popis použitých metod	33
2.2.1	Stanovení vlhkosti	33
2.2.2	Stanovení sypné hmotnosti (volně sypané, setřesené)	34
2.2.3	Stanovení měrné hmotnosti	35
2.2.4	Stanovení měrného povrchu	36
2.2.5	Stanovení ztráty žíháním	37
2.2.6	Normální konzistence	38
2.2.7	Stanovení počátku tuhnutí	39
2.2.8	Stanovení objemové stálosti	40
2.2.9	Obrazová analýza	40
2.2.10	Rentgenofluorescenční analýza – XRF	41
2.2.11	Rentgenová difrakční analýza – XRD	41
2.2.12	Laserová analýza velikosti částic	42
2.2.13	Stanovení zrnitosti škváry – síťový rozbor	43
2.3	Výsledky zkoušek	44
2.3.1	Stanovení vlhkosti	44
2.3.2	Stanovení sypné hmotnosti volně sypané a setřesené	45
2.3.3	Stanovení měrné hmotnosti	47
2.3.4	Stanovení měrného povrchu	48
2.3.5	Stanovení ztráty žíháním	49
2.3.6	Normální konzistence	50

2.3.7	Počátek tuhnutí.....	51
2.3.8	Stanovení objemové stálosti.....	53
2.3.9	Obrazová analýza	54
2.3.10	Rentgenofluorescenční analýza – XRF.....	60
2.3.11	Rentgenová difrakční analýza – XRD.....	62
2.3.12	Laserová analýza velikosti částic	63
2.3.13	Sítový rozbor.....	65
2.4	Vyhodnocení	66
ZÁVĚR	67

SEZNAM ZKRATEK

VEP = vedlejší elektrárenský produkt

EMĚ = elektrárna Mělník

EPO = elektrárna Počeradý

ETU = elektrárna Tušimice

EPR = elektrárna Pruněřov

HPV = hladina podzemní vody

ÚVOD

Vzhledem k tomu, že v současné době je velmi aktuální téma životní prostředí, ve světě dochází k ústupu získávání energie spalováním uhlí. Přestože je dnes čerstvého vysokoteplotního popílku pro použití ve stavebnictví stále dostatek, nahrazováním získávání energie ekologičtějšími zdroji, nastane situace zcela opačná. Ztráta cenné druhotné suroviny v podobě čerstvého popílku by mohla mít nejen nezanedbatelné ekonomické, ale i ekologické důsledky. Je tedy možné „recyklovat“ uložené vysokoteplotní popílky ze složišť a následně je využívat stejně jako popílek čerstvý. Ukazuje se, že je velmi málo informací o vlastnostech a možnostech jejich využití. Tato práce se zabývá zjištěním, prezentací a porovnáním vlastností deponovaného popílku, škváry a čerstvého popílku tak, aby poskytla podklady pro další práce, které se budou zabývat nalezením možností využívání deponovaného popílku ve stavebnictví.

Cíl práce

- Rešerše k problematice využití popílků ze složišť v ČR a ve světě.
- Rešerše ke stavu vybraných složišť v ČR.
- Určení základních mechanických, fyzikálních a chemických vlastností popílku a jejich vyhodnocení vzhledem k ČSN 72 2071 a ČSN EN 450-1.
- Srovnání s popílky ze současné produkce z elektráren Počerady a Tušimice.
- Jejich ověření na základě normových požadavků na využití ve stavebnictví.

1 TEORETICKÁ ČÁST

1.1 Popílek

Podle ČSN EN 450-1 Popílek do betonu [1] je popílek jemný prášek převážně z kulovitých sklovitých částic, které vznikají při spalování práškového uhlí samotného, nebo i se spoluspalovaným materiálem, který má pucolánové vlastnosti a sestává převážně z SiO_2 a Al_2O_3 , a který:

- se získává elektrostatickým nebo mechanickým odlučováním z plynů topenišť elektráren otápěných; a*
- může se před jeho použitím upravovat například tříděním, výběrem, proséváním, sušením, smícháváním, mletím nebo snižováním uhlíku nebo kombinací těchto procesů ve vhodném výrobním zařízení. Takto upravený popílek může sestávat z popílků různých zdrojů, přičemž každý popílek musí vyhovovat definici, uvedené v tomto článku.*

1.1.1 Vznik vysokoteplotního popílku

Elektrárenský vysokoteplotní popílek vzniká jako sekundární produkt v tepelných elektrárnách při spalování antracitu, černého nebo hnědého uhlí při teplotách přibližně 900 – 1 100 °C. Nespalitelné zbytky jsou tvořeny úletovým popílkem (zhruba 80 % z nespalitelných zbytků), struskou a energosádrovcem, který vzniká odsířením spalin vápennou vypírkou. Nejen složením uhlí, ale i způsobem zpracování a teplotou spalování vzniká celá řada popílků, které mají různé mineralogické a chemické složení. V ČR ročně vznikne asi 8 milionů tun popílků vysokoteplotním spalováním uhlí. [2] [3]

1.2 Škvára

Škvára je hrubozrnný materiál, který vzniká „spékáním“ zbytků spalovaného uhlí. Má ostré hrany a skelný lesk, barva bývá černá a někdy v různých odstínech hnědé. Využívá se ve stavebnictví jako přídavek do cementu a pro výrobu škvárobetonu. Další možné využití je např. granulát pro technickou rekultivaci, v dopravní a inženýrské výstavbě, do konstrukčních vrstev vozovek, pro úpravy krajiny, jako zásypový

materiál pro vyplnění těžebních prostor při násypech, zásypech a obsypech a také jako posypový materiál při zimní údržbě komunikací. [4] [5]

1.3 Aglomerát z úložiště Panský les v Mělníku

Agglomerát z úložiště Panský les v Mělníku je směs vysokoteplotního popílku, záměsové labské vody a malého podílu škváry. Z důvodu ochrany podzemních vod se nepřimíchává ani sádrovec ani vápenec.

1.4 Normy

Požadavky na kvalitu a správnost využití popílku jako stavebního materiálu vyjadřuje norma ČSN 72 2071: Popílek pro stavební účely – Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení. Podle daného technologického využívání vysokoteplotního popílku v České republice řeší přesné požadavky soubor norem a technické podmínky v následující Tab. 1.

Tab. 1: Normy a technické podmínky [6]

Použití	Vysokoteplotní popílky
cement	ČSN 197-1, ČSN 72 2072-1
malto viny	ČSN 72 2072-1, ČSN 72 2072-2
umělé kamenivo	ČSN 72 2072-6, ČSN 72 2072- 8
betony	ČSN 450-1
pórobeton	ČSN 72 2072-5
cihlářské pálené výrobky	ČSN 72 2072-4
izolační materiály	ČSN 72 2072-9
asfaltové výrobky	ČSN 72 2072-10
dopravní stavitelství	TP93

1.4.1 Klasifikace popílku dle normy ČSN EN 450-1

Pro použití popílku do betonu podle ČSN EN 206-1 musí splňovat požadavky ČSN EN 450 a ČSN EN 12620. Tyto požadavky jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2: Normované požadavky na popílky do betonu [7]

Vlastnost dle způsobu užití popílku	Jednotka	Pucolánová příměs druhu II	Filer jako kamenivo příměs druhu I
		ČSN EN 450	ČSN EN 12620
Ztráta žíháním	% hm.	max. 5,0 ¹⁾	–
Obsah SO ₃	% hm.	max. 3,0	max. 0,8
Obsah celkové síry	% hm.	–	1,0
Obsah chloridů v přepočtu na Cl ⁻	% hm.	max. 0,10	0,03/0,06/0,15 ⁶⁾
Obsah volného CaO	% hm.	max. 1,0 ²⁾	–
Jemnost, zbytek na síti 0,045 mm	% hm.	max. 40 ³⁾	–
Sítový rozbor, propad na síti:			
2 mm	%	–	100
0,125 mm	%	–	85 – 100
0,063 mm	%	–	70 – 100
Obsah aktivního SiO ₂	% hm.	min. 25	–
Objemová stálost (roztažnost)	mm	max. 10 ²⁾	–
Index účinnosti po 28 (90) dnech	%	min 75 (85)	–
Měrná hmotnost (tolerance)	kg · m ⁻³	max. ± 150 ⁴⁾	–
Hmotnostní aktivita Ra ²²⁶	Bq · kg ⁻¹	max. 200 ⁵⁾	–

Poznámky:

- 1) Na národní úrovni je dovoleno používat popílky se ztrátou žíháním 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 vyhláškou SÚJB č. 184/19997 Sb.
- 6) Maximální hodnoty pro předpjatý, železový a prostý beton vodou rozpustných Cl k hmotnosti celkového kameniva. [7]

1.5 Tepelné zdroje

1.5.1 Teplárny a elektrárny v ČR

V České republice se nachází celkem deset tepelných elektráren. Z toho je osm v Čechách, nejvíce jich je situováno v západní části republiky, jedna na Moravě a jedna ve Slezsku viz Obr. 1.



Obr. 1: Elektrárny v ČR [5]

- **Dětmarovice** – největší elektrárna v Moravskoslezském kraji a zároveň největší černouhelný zdroj v ČR.

Instalovaný výkon 4 x 200 MW.

Produkce VEP je cca 400 000 tun ročně. Z toho je 90 % certifikovaných popelovin a 10 % energosádrovce.

- **Hodonín** – jedna z nejstarších elektráren v ČR, je v blízkosti lignitového dolu a řeky Moravy. V současné době se jeden blok elektrárny využívá ke spalování biomasy.

Instalovaný výkon 105 MW, 170 t páry/hod.

VEP: Suchý ložový popel (náhrada písku a zeminy), Stabilizát (popelová malta) a Úletový popílek (pro výrobu betonových směsí)

- **Ledvice** – nejmodernější klasická uhelná elektrárna ve střední Evropě. V provozu je již jen blok č. 4 a nový blok č. 6.

Instalovaný výkon 110 MW_{el} a 660 MW_{el}.

VEP: Přepřepování na stabilizát, rekultivace lomu Fučík.

- **Mělník** – je nejbližší Praze. Původně byla složena z částí EMĚ I, EMĚ II a EMĚ III jako komplex kondenzačních elektráren, které spalují hnědé uhlí.

Instalovaný výkon 4 x 60 MW, 2 x 110 MW a 1 x 500 MW.

VEP: Energosádrovec je plně zpracován v závodě Rigips na výrobu SDK desek. Popílek a struska jsou upravovány buď jako certifikované stavební materiály nebo používány k rekultivaci.

- **Počerady** – nová podnikatelská filozofie je kromě výroby elektrické energie, také vyrábět stavební hmoty z původně odpadových produktů.

Instalovaný výkon 5 x 200 MW.

VEP: Využití energosádrovce k výrobě SDK desek firmou KNAUF – Počerady, s.r.o., přebytek energosádrovce je briketován a jako náhrada přírodního sádrovce dodáván do cementáren. Popílek se využívá k rekultivaci bývalého uhelného lomu Třískolupy.

- **Poříčí a Dvůr Králové** – tvoří organizační jednotku Elektrárna Poříčí II a Teplárna Dvůr Králové. Je velmi důležitá pro udržování napěťových poměrů v SV Čechách.

Instalovaný výkon 3 x 55 MW.

VEP: Popílek pro rekultivaci, násypy a zásypy, stabilizovaný popílek pro krajinné úpravy.

- **Pruněřov** – největší uhelný elektrárenský komplex v ČR. Je složen z částí Pruněřov I a Pruněřov II.

Instalovaný výkon 4 x 110 MW a 3 x 250 MW.

VEP: Ukládání deponátu do upravené výsypky lomu Merkur Dolů Nástup Tušimice. Energosádrovec v celkové produkci cca 750 000 tun se bude částečně uplatňovat při výrobě tzv. alfa pojiv.

— **Trmice** – dnes je součástí organizační jednotky Elektrárna Mělník, Teplárna Trmice.

— **Tušimice** – předpokládaný provoz bude do roku 2035, po vytěžení sousedního dolu Libouš.

Instalovaný výkon 4 x 200 MW.

VEP: Deponát je využíván k revitalizaci okolní krajiny. Certifikovaná struska se požívá k asanaci bývalého složiště Tušimice a popílek se využívá ve stavebnictví.

— **Vítkovice** – je součástí organizační jednotky Teplo, do které patří ještě teplárny Poříčí a Hodonín.

[5]

1.6 Vybraná složiště v ČR

1.6.1 Složiště

V nedávné době se téměř veškerá produkce popílku a strusky v ČR ukládala ve formě hydrosměsi tzv. plavením na odkaliště viz Obr. 2. Oproti současnosti byla jen velmi malá část popílku využívána nebo se ukládala suchým způsobem. [2]

Nevýhody odkališť:

- Z hlediska ochrany životního prostředí je to velký zásah do přírody, vznikají obrovské plochy, ze kterých nemáme užitek a díky okrajům vzniká hodně prachu.
- Plavení omezuje využití popílku
- Neekonomické čerpání velkého množství vody
- Při výstavbě zvyšovací hráze se zvětšuje využitá plocha plavení.
- Stabilizátory, popel z fludního spalování a produkty polosuché metody odsíření tímto způsobem dopravovat nejde, neboť ucpávají dopravní cesty.

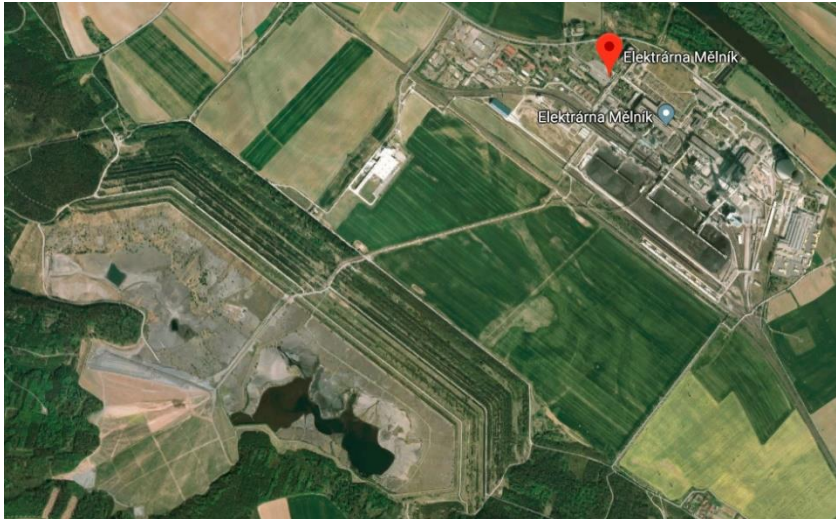


Obr. 2: Doprava hydrosměsi na odkaliště [2]

V roce 1976 došlo k havárii v odkališti v Dříteči, do kterého se ukládal popílek z nedaleké elektrárny v Opatovicích. Hydrosměs protržením hráze zaplavila přilehlé obce. [2]

1.6.2 Elektrárna Mělník – Panský les

Elektrárna Mělník se nachází asi třináct kilometrů od soutoku Labe a Vltavy. Do provozu byla uvedena v 60. letech jako komplex kondenzačních elektráren, které spalují hnědé uhlí, které se přiváží nákladním vlakem ze severočeských a západočeských dolů.



Obr. 3: Satelitní snímek elektrárny Mělník a složiště Panský les [Google Maps 2018, snímky GEODIS Brno]

1.6.2.1 Nakládání s VEP

Struska a popílek ze všech tří uvedených elektráren (EMĚ I – EMĚ III) jsou z 80-9 % ukládány na složišti Panský les, zbytek jde do prodeje jako popílek „čerstvý“. Ten je z kotlů shromažďován v jednom místě a jednou dopravní cestou je odváděn na odkaliště, které se provozuje jako vodní dílo.

1.6.2.2 Produkce VEP za 1 rok:

Mělník 1	380.000 tun popelovin
Mělník 2	237.000 tun popelovin 69.000 tun EGS
Mělník 3	347.000 tun popelovin 95.000 tun EGS

Pro případnou přepravu na jiná úložiště nebo do výsypek dolů je na EMĚ vybudována linka pro nakládku VEP do železničních vagónů. [8]

1.6.2.3 Stávající stav v lokalitě Panský les

Odkaliště Panský les bylo vybudováno jako průtočné (nadbytečná voda se odvádí do přilehlého vodního toku) a je složen ze dvou základních částí - kazeta I, kazeta II. Od roku 1960 zde byl ukládán popílek a struska do výšky 208 m n. m.. Ale od roku 1999 je pro technickou rekultivaci využíván aglomerát, jehož projektovaná kóta ukládání je 226 m n. m. V letech 1987 – 1999 probíhalo společné ukládání hydroměsí

z EMĚ a SEPAP Štěstí v poměru cca 15:1. Nyní je struska odvodňována již v areálu elektrárny. V případě poruchy je povoleno plavení neodvodněné strusky do kazety II (Obr. 4), kde je uměle udržována volná vodní hladina. K výrobě aglomerátu je používána záměsová labská voda a je pomocí pásových dopravníků přesunován do odkaliště, kde je nakladači a dozery rozprostírán do vrstev. [8]



Obr. 4: Zavodněná kazeta II

Vlastní odkaliště je tvořeno systémem 13 hrází. Koruna poslední hráze je na kótě 208 m n. m., kóta plavení je 207,4 m n.m. Hrázový systém je již zalesněn zejména borovicemi různého stáří. Na plochách, kde je ukončeno plavení, je jako zábrana proti prášení položena geotextilie a postupně zde byly vysázeny převážně břízy a topoly pro jejich rychlý růst.

1.6.2.4 Postup rekultivace v roce 2024-2025 v prostoru odkaliště

Panský les

Vlivem tvarování terénu odkaliště v prostoru pásových dopravníků vzniká nezasypaný prostor o velikosti 59 940 m³. Tento prázdný prostor se plánuje zasypat aglomerátem z deponie pomocí nákladních aut a buldozery. Proto je nutné situovat deponii co nejbližší dopravníkům.

1.6.2.5 Terénní dorovnávký a povážky etapa III

Zahájení rekultivace III. Etapy se předpokládalo v roce 2016 po dokončení stavby tělesa krajiny tvorby a předpoklaný konec je v roce 2024.

Povážky zúrodnitelnou zeminou budou provedeny v tloušťce 0,5 m v prostoru lesnických rekultivací v napojení na okolní lesní pozemky v jihozápadních svazích. V tloušťce 0,3 m budou provedeny povážky pod zbylou lesnickou rekultivací a pod ostatní zelení. V mocnosti 0,1 m budou provedeny povážky zbytkového prostoru mezi patou tělesa krajiny tvorby a poslední zvyšovací hrází II/13

Zúrodnitelná zemina pochází z pískovny Cítov a není nutné provádět její další prohnojení.

Technologický postup při povážkách v tloušťce 0,3 m spočívá v rozvrstvení zeminy na aglomerát a poté její homogenizaci pomocí frézy do hloubky 0,4 - 0,5 m tak, aby došlo ke smíchání obou vrstev a nedocházelo k výrazným deformacím kořenového systému dřevin.

Při povážce 0,5 m je doporučeno ze stejného důvodu provést navážku nejprve v mocnosti 0,3 m, poté provést homogenizaci, a nakonec dokončit povážku zbylou mocností 0,2 m. Toto opatření by do budoucna mělo přispět ke stabilizaci lesních porostů před vývraty.

V případě povážky o mocnosti 0,1 m a následného zatravnění se s homogenizací nepočítá.

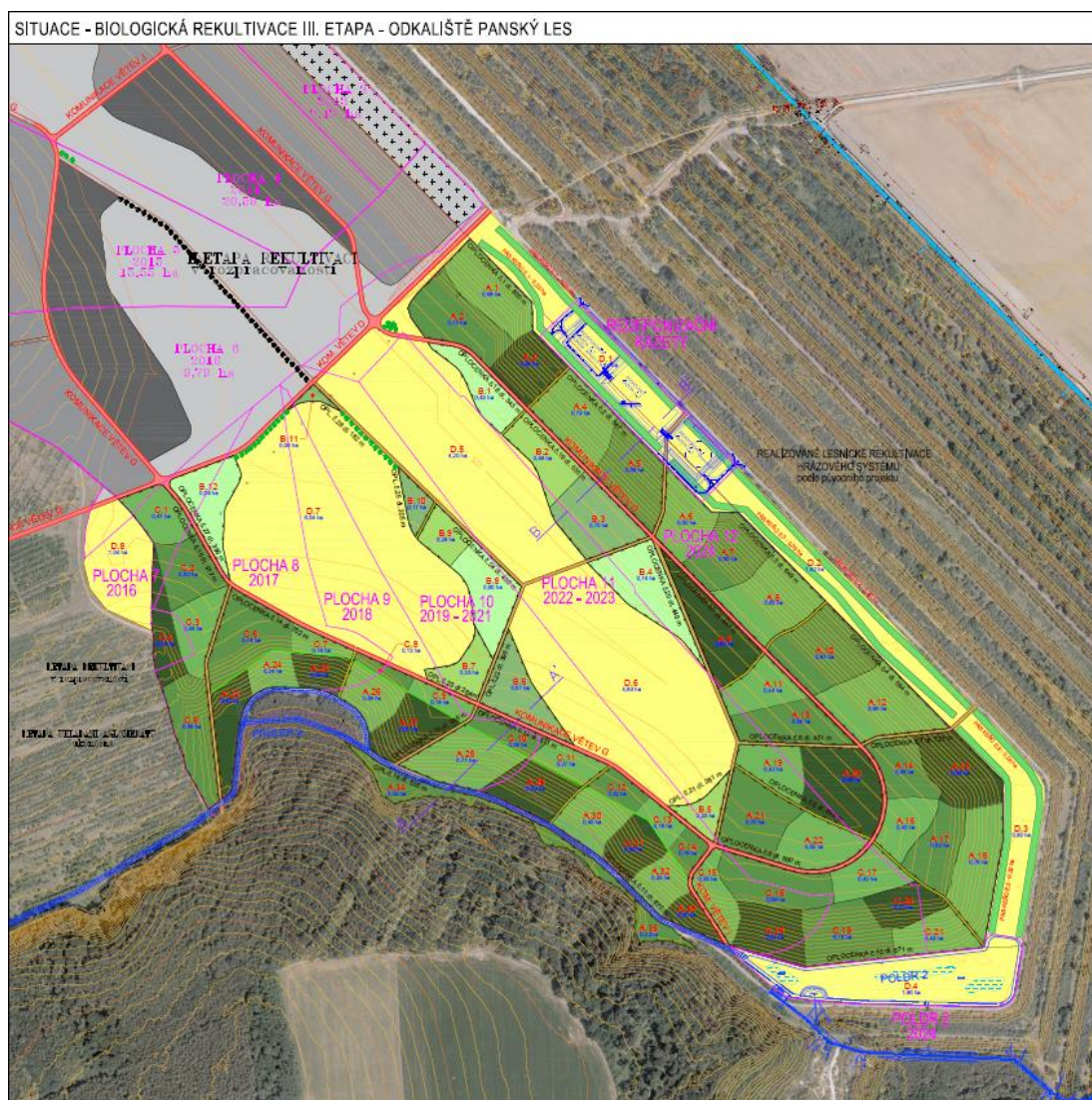
Před zavezením vodního prostředí je nutné provést průzkum populace skokana skřehotavého, případně dalších druhů obojživelníků. Následně, v případě potřeby, transfer jedinců odborně způsobilou osobou na náhradní vhodnou lokalitu v nejbližším okolí.

Přehled výměr – Terénní dorovnávký a povážky III. etapa:

Terénní dorovnávký - 200 m ³ /ha	50,00 ha
Povážky v mocnosti 0,5 m	5,19 ha (25 961,5 m ³)
Povážky v mocnosti 0,3 m	46,91 ha (138 804,3 m ³)
Povážky v mocnosti 0,1 m	7,67 ha (7 717,1 m ³)
(poldry, prostor mezi hrází a tělesem, průleh-nepovezené části)	
Celkový objem zúrodnitelné zeminy	172 482,9 m ³
Homogenizace povrchu	51,45 ha

1.6.2.6 Biologická rekultivace

Biologická rekultivace bude provedena zatravněním, výsadbou lesních dřevin a keřů. Na Obr. 1 zobrazuje žlutá barva zatravněné plochy a zelená barva zalesněné oblasti.



Obr. 5: Biologická rekultivace, etapa III [9]

Plošné zalesnění bude provedeno na celkové ploše 27,48 ha. Jedná se především nejen o estetické zapojení umělého tělesa do krajiny, ale hlavně o protierozní ochranu. Zasázeny budou výhradně dřeviny místního původu jako je např. borovice lesní, dub zimní, habr obecný, lípa srdčitá a také několik druhů keřů.

Zatravněno bude náhorní plato a zbytkový prostor mezi patou tělesa a poslední zvyšovací hrází II/13. Zatravnění proběhne na celkové výměře 23,66 ha. Zasety budou směsi vhodné pro nenáročná stanoviště např. druhy kostřavy, lipnice luční, jílek vytrvalý a druhy jetele. [9]

1.6.3 Elektrárna Tušimice – Stodola

V jihovýchodní části oblasti Dolů Nástup Tušimice se nachází stavba „Prostor technické rekultivace Stodola“. Slouží k ukládání vedlejších energetických produktů, přesněji směs elektrárenského popílku a energosádrovce certifikovaného jako stavební výrobek. Tento deponát je představován jemnozrnným materiálem složeným z 50 - 70 % prachovité frakce, 35 – 45 % písčité frakce a nepatrným množstvím jílových částic. Deponát se zde ukládá od roku 1996.



Obr. 6: Satelitní snímek elektrárny Tušimice a složiště Stodoly [Google Maps 2018, snímky GEODIS Brno]

1.6.3.1 Posouzení stability úložného prostoru Stodola

Výchozím stavem je zaměření terénu z konce roku 2016. Jedná se o tři lokality a to, severní svahy nejbližší obslužné komunikaci SD a.s, závěrné svahy zemníku na východě stavby ETU – Stodola a jižní svahy směrem k VD Nechanice. V prvních dvou případech se původně jednalo pouze o dočasnou stabilitu. V případě jižních svahů byla posuzovaná dlouhodobá, trvalá stabilita tělesa.

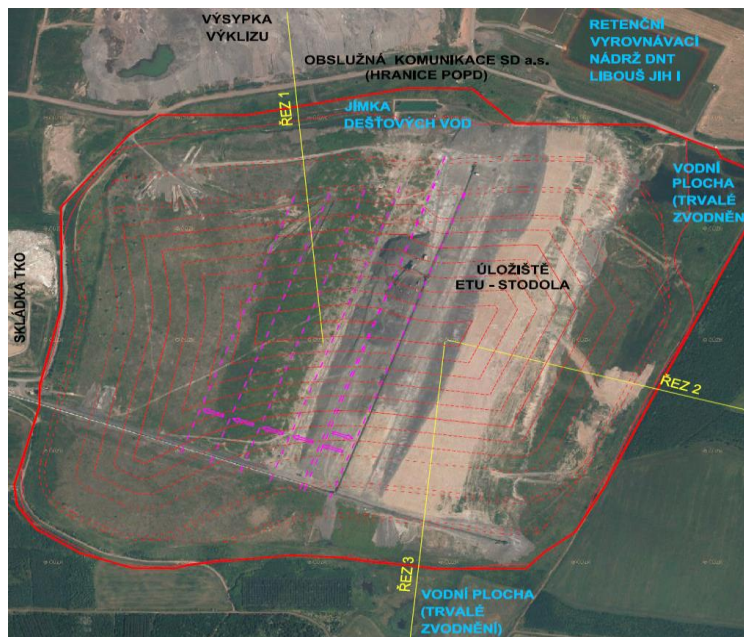
Posouzení probíhalo podle Eurokódu 7 - metody Bishop a Petterson. Stupeň stability byl pro všechny profily vyšší než požadované hodnota (pouze v případě jižních svahů vyhověla stabilita podmíněně).

Z těchto posouzení plyne několik doporučení pro jižní svahy:

- sledování chování svahů během dalšího ukládání,

- snížení přítomnosti pásového vozu,
- vybudování povrchového žlabu pro odvod vody, aby se zabránilo dalšímu sycení zemin,
- každý měsíc provádění rekognoskace a měření úrovně HPV,
- doplnění oblasti pozorovacími sondami pro sledování chování mělkého obzoru HPV.

[10]



Obr. 7: Situace výpočetních řezů [10]

1.6.3.2 Předpokládaná produkce VEP ETU

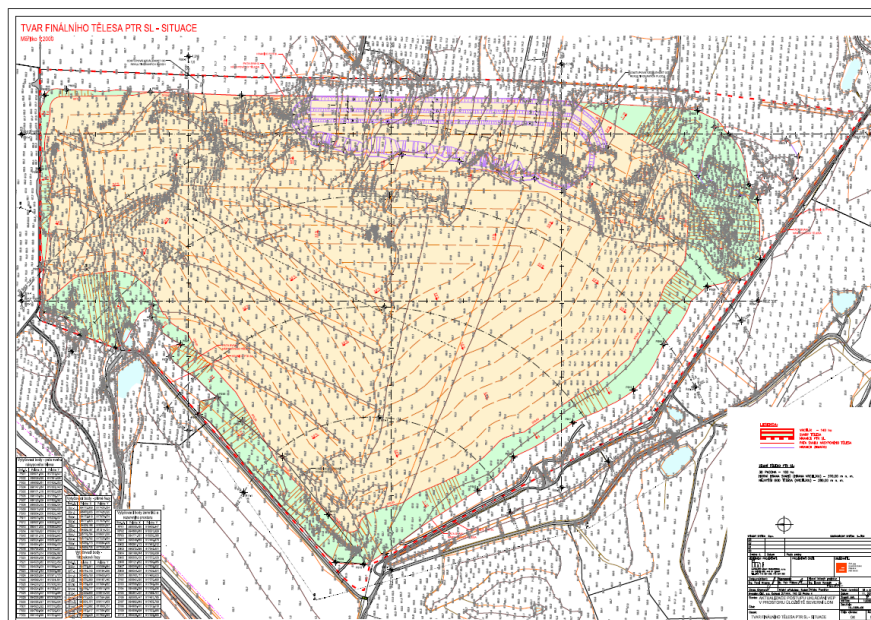
Ukládaný objem VEP v roce 2017 je 1 936 568 m³. Podle plánované produkce oddělením provozní ekonomie se do roku 2040 vyprodukuje až 51,55 mil m³. Kapacita úložiště Stodola ~18,70 mil. m³ není dostatečná a vystačí podle propočtů pouze cca do roku 2024. Poté ČEZ navrhuje různá rozšíření např. vyplnění prostoru úžlabí mezi stávajícím úložištěm a horní hranou stávajícího výklizu, také realizaci nového úložného prostoru. [11]

1.6.4 Elektrárna Pruněřov – Severní lom

Úložiště Severní lom se nachází východně od elektráren Pruněřov v Dobývacím prostoru Tušimice – Severočeské doly. Severní lom je z velké části obklopen staršími lesnickými rekultivacemi. Finální kóta vrchlíku je navržena +380 m n. m., znázorněna na Obr. 9 oranžovou barvou. Zelená barva značí svahování pod sklonem 1:10. [12]



Obr. 8: Satelitní snímek elektrárny Pruněřov a složiště Severní lom [Google Maps 2018, snímky GEODIS Brno]



Obr. 9: Finální tvar tělesa PTR SL [13]

1.6.4.1 Předpokládaná produkce VEP EPR

Ukládaný objem VEP v roce 2016 činí 1 908 022 m³. Podle plánované produkce oddělením provozní ekonomie se do roku 2040 vyprodukuje až 60,94 mil m³. Kapacita úložiště Severní lom ~11,88 mil. m³ není dostatečná a vystačí pouze cca do roku 2019. Poté ČEZ navrhuje realizaci nového úložného prostoru technické rekultivace Severní lom II. [14]

1.7 Problematika využití popílků ze složišť ve světě a v ČR

1.7.1 Situace ve Velké Británii

Uhlíková daň a zákony o znečištění ovzduší zapříčinili v posledních letech uzavření uhelných elektráren. Od poloviny roku 2017 Velká Británie vyrábí elektřinu z uhlí již jen ze 2 %, přestože před 5 lety to bylo ze 40 %. V provozu jich zůstává stále osm, ale nejsou v provozu nepřetržitě. Podle závazku vlády se snaží ukončit provoz všech uhelných elektráren do roku 2025. Těžba uhlí tedy klesá a od počátku 60. let 20. století byla zavřena většina hlubinných a povrchových dolů. Ze zhruba 1100 dolů dnes funguje jen 10 menších. [15]

Značné množství popílku ve Velké Británii se produkovalo v uhelných elektrárnách. Díky snižování výroby energie tak dochází k velkému snižování produkce popílku. Avšak existuje velká poptávka po popílku dle EN 450 s pucolánovými vlastnostmi jako příměs do betonu. Proto v současné době probíhá výzkumný projekt na oddělení betonové technologie na Univerzitě v Dundee, kterou sponzoruje UKQAA, pro vývoj vhodných technik.

Ve složištích v VB je uloženo asi 50 mil. tun popílku. Díky reakci popílku s vodou však v průběhu několika let vznikají složité chemické a fyzikální změny. Tyto změny ovlivňují vlastnosti popílku a omezují jeho pucolánové vlastnosti a tím i jeho využití v betonu. Zvětrávání popílku má dva důležité důsledky. Velká část menších částic aglomeruje dohromady a dochází ke snížení celkové plochy povrchu. Reakční produkty se ukládají na částice popílku a působí jako bariéra pucolánovým reakcím.

Podle výsledků místních studií tedy popílek obsahuje mnoho hodnotných složek, které mohou být efektivně získávány z dlouhodobých zásob. Specifickým cílem zpracování zpětně získaných vedlejších produktů spalování uhlí bylo oddělit částice do různých frakcí jemnosti. Ty jsou relevantní pro konkrétní aplikace a odstraňují nebo snižují obsah uhlíku. Na základě zjištění předchozí studie proveditelnosti bylo nejvhodnější cestou ke splnění požadavků z hlediska ekonomiky a minimálního dopadu na životní prostředí zpracování za mokra. Kombinovaný systém zpracování používaný v tomto projektu obecně splňoval požadavky na různé aplikace pokrývající nízkou, střední a vysokou ekonomickou a enviromentální hodnotu.

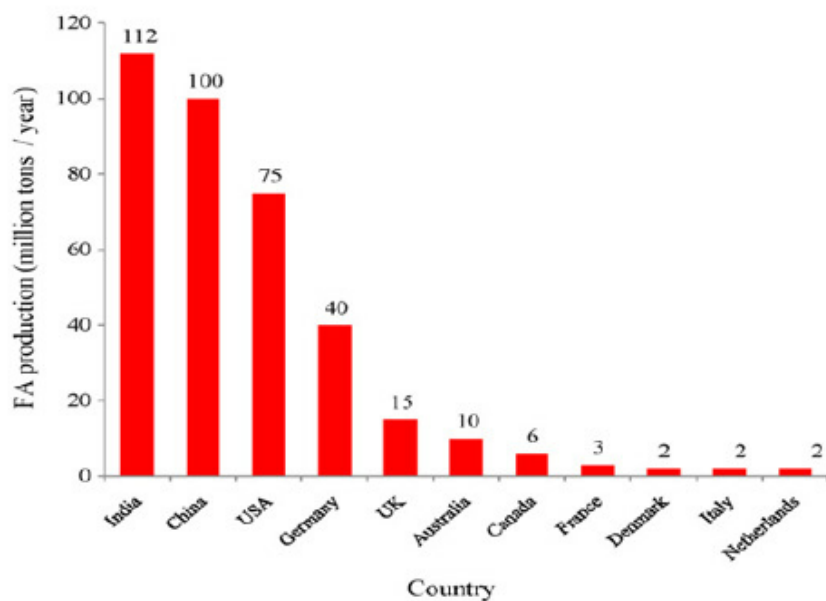
Vyloučení uhlíku však zůstává obtížné, protože je složen z velkých částic a jeho odstraňováním se ztrácí i významné pucolánově aktivní jemnozrnné části. V této oblasti je tedy zapotřebí více práce.

Jemnější frakce tedy byly použity jako cementové složky v betonu. Beton vyrobený z různých frakcí poskytl lepší konzistenci a uspokojivý vývoj pevnosti. Materiály s hrubým a středně jemným povrchem byly považovány za pěnový beton. Při poměru 1:1 s pískem se zlepšily výsledky zkoušek konzistence i pevnosti. Navrhuje se také, aby hrubé zpracované frakce popílku mohly být použity v betonu jako „aktivní“ náhrada písku.

Požadavky na vlastnosti deponovaných popílků lze obecně splňovat dodržováním normy pro vlastnosti čerstvého popílku. Výjimkou je použití materiálu jako cementové složky, kde mokré dlouhodobé skladování může vést ke ztrátě reaktivity. Drobné změny poměru betonových směsí však mohou tuto otázku snadno překonat. [16] [17]

1.7.2 Situace v České republice

Pro využití vysokoteplotních popílků ze složišť v ČR je nutné provést komplexní analýzu popílků ze všech složišť. Ta zahrnuje několik fyzikálních a chemických metod. Je potřebné navrhnout postup pro zpracování popílku od extrakce, přes různé úpravy (např. sušení a mletí), až po přípravu stavebních hmot a srovnání s čerstvým popílkem.



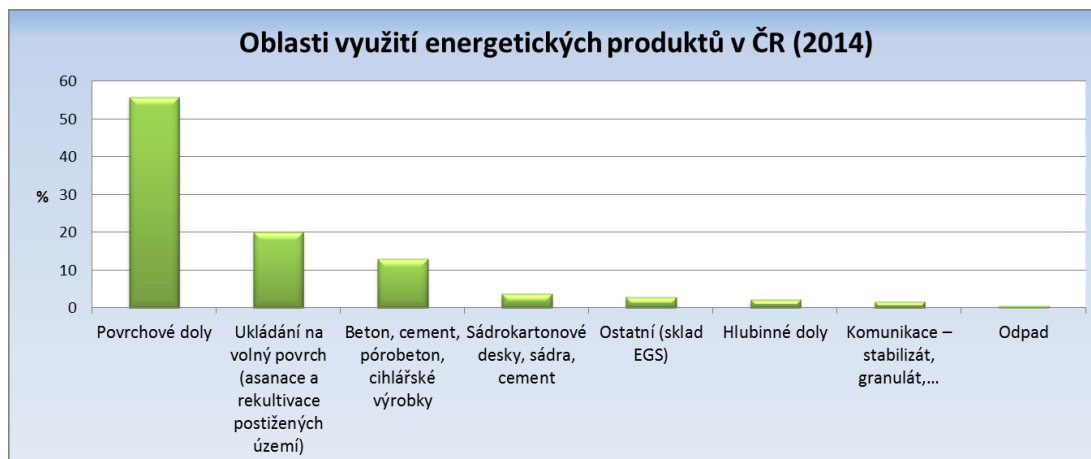
Graf 1: Produkce vysokoteplotního popílku v různých státech [Aakash Dwivedi, Manish Kumar Jain: Fly ash – waste management and overview : A Review Recent Research in Science and Technology 2014, 6(1): 30-35]

Česká republika ročně vyprodukuje nezanedbatelných 8 mil. tun ročně vysokoteplotního popílku, což ji podle předchozího obrázku (Graf 1) řadí mezi obrovské státy, jako jsou Austrálii a Kanadu. Celkovou produkci VEP lze v ČR odhadovat na 13,7 mil. tun za rok (údaje z roku 2014) viz Tab. 3.

Tab. 3: Produkce VEP v ČR [18]

Produkt	t	%
Popílek ze spalování uhlí	7 884 527	57,5
Struska (škvára)	1 690 319	12,3
Popílek z fluidního spalování - uhlí nebo spoluspalování uhlí + biomasa	1 407 713	10,3
Popílek ze spalování biomasy - fluidní kotle	6 656	0,0
Popílek ze spalování biomasy - nefluidní kotle	6 286	0,0
SDA Produkt	202 965	1,5
Energosádrovec	2 524 335	18,4

Z následujícího obrázku (Graf 1) je patrné, že většina VEP se používá na zasypání povrchových dolů, či na rekultivace. Ve stavebnictví se využívá jen něco pod 20 % VEP.



Graf 2: Oblasti využití energetických produktů v ČR [18]

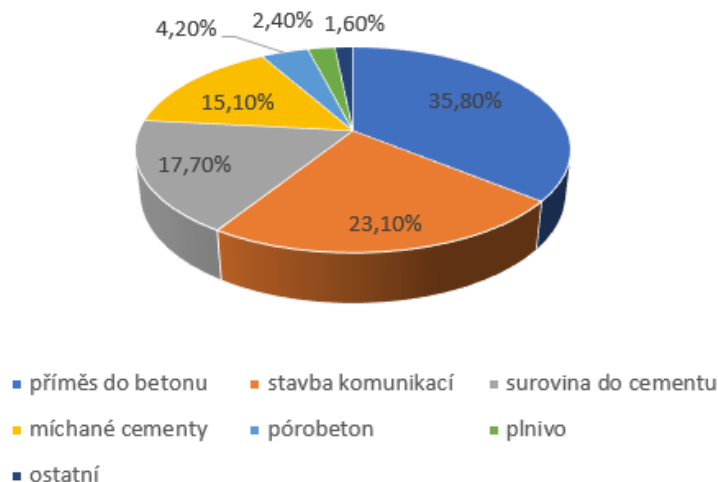
1.8 Možnost využití popílku ve stavebnictví

V dnešní době většina elektráren nabízí vedlejší energetické produkty pro stavebnictví, ve kterém má širokou škálu využití nejčastěji jako příměs do betonu pro vylepšení vlastností čerstvého betonu. Pro jejich pucolánové vlastnosti nahrazují část cementu a zabezpečují tak pevnostní charakteristiky ztvrdlého betonu. V betonech s vysokým obsahem popílku, kdy je poměr popílek/cement vyšší než 1, se tato technologie nazývá HVFA (Hight Volume Fly Ash). Dále se popílek používá do litých betonových potěrů a svým vysokým obsahem jemných částic je ideální pro dosažení požadované zpracovatelnosti. Jelikož se jím nahrazuje cement je tento produkt velkým přínosem pro snižování materiálových nákladů. Jeho další možností je použití jako tzv. portlandský popílkový cement, portlandský směsný cement, pucolánový cement či směsný cement, kde nahrazuje část portlandského slínku. Může také nahrazovat tradiční sádrovec na regulaci tuhnutí cementu nebo část vápence pro výpal cementového slínku. Poměry využití v roce 2009 ukazuje Graf 3.

Pro jeho schopnost regulace vlhkosti se může dále využít pro stabilizaci zemin a do podkladových vrstev silničních těles, kterým zvyšuje stabilitu a životnost.

Mimo jiné je vhodný i k čištění vody pomocí syntézy zeolitů, do lehkých stavebních prvků, předpjatých betonových prvků, do betonů s vysokou odolností proti ohni a jiným agresivním prostředím, k výrobě pórobetonu, lehkého kameniva atd. [19]

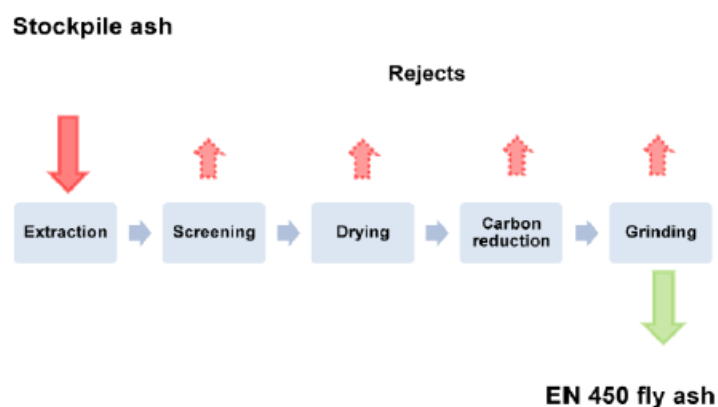
Využití popílku ve stavebnictví



Graf 3: Použití popílku ve stavebním průmyslu v Evropě v roce 2009 v původních 15 státech EU [13]

1.9 Možnost využití popílku ze složišť

Z důvodu snižování zisku energie ze spalování uhlí v tepelných elektrárnách v budoucnu bude nedostatek „čerstvého“ vysokoteplotního popílku. Vzniká tedy otázka, zda by bylo možné využívat ukládaný popílek ze složišť stejně jako čerstvý popílek. Hlavním cílem výzkumu je nalezení vhodné technologie zpracování uloženého vysokoteplotního popílku tak, aby splňoval podmínky normy EN 450 pro „čerstvý“ popílek do betonu. Postup procesu úpravy popílku ze složišť je patrný z Obr. 10. Nejprve se popílek vytěží, roztřídí na sítích, vysuší, odstraní se uhlík a poté se popílek rozemele. Tímto postupem by měl vzniknout popílek dle normy EN 450.



Obr. 10: Návrh procesu úpravy popílku ze složišť na popílek podle normy EN 450

V současné době však ještě není známo po jak dlouhé době ukládání dochází ke změně vlastností. Jestli nedojde ke změně vyluhovatelnosti toxických prvků z popílku, a také jestli vyhovují normám pro jejich použití. Proto je nutné provést komplexní analýzu popílků ze složišť v ČR, která zahrnuje různé fyzikální a chemické metody, a také návrh zpracování od extrakci až po přípravu stavebních hmot.

MOTIVACE

Na deponii Panský les je ukládaná produkce VEP již od počátku 60. let. Za necelých 50 let se zde nashromáždilo obrovské množství aglomerátu, což je v tomto případě směs popílku, škváry a vody. Odtěžením aglomerátu a jeho prodejem by docházelo k celkovému snížení nutnosti záboru ploch pro budování úložišť VEP. Také by odpadala nutnost realizace opatření ke snížení prašnosti během ukládání, a hlavně k výrazné úspoře primárních surovin na výrobu betonu. Přítomnost popílku v betonu nemá jen dopad na snížení obsahu pojiva či plniva, ale také zlepšuje zpracovatelnost, pevnost s dlouhodobým růstem v čase a snižuje vývoj hydratačního tepla.

Využití popílku z deponií ve stavebnictví je předmětem intenzivního výzkumu. Lze zmínit například práci Kalousové (2014), která analyzovala popílek z deponií pocházející z geo-vrtů v odstupňované hloubce 1 až 20 metrů. Se všemi vzorky byly připraveny cementové pasty, ve kterých byl obsah popílku 65–70 %. Testované vzorky prokázaly velmi dobré výsledky až na vzorky z nejhlubší hloubky, kde došlo k promíchání se zeminou. Dle doporučení Kalousové můžeme předpokládat velmi slibné uplatnění těchto popílků jako součásti stavebních materiálů. [20]

2 PRAKTICKÁ ČÁST

V této kapitole jsou popsány a porovnány jednotlivé vzorky deponovaného a čerstvého popílku a škváry. Na nich provedené zkoušky a postupy pro zjištění mechanických, fyzikálních a chemických vlastností. Všechny uvedené zkoušky se řídí přesnými normovými pokyny.

2.1 Popis vstupních surovin

Níže jsou uvedeny a popsány veškeré suroviny, které byly použity pro provedení jednotlivých zkoušek. Testovaný mělnický aglomerát je směs vody, popílku a části škváry.

2.1.1 Cement

Pro namíchání jednotlivých cementových směsí byl použit portlandský cement CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá a vyhovující požadavkům normy ČSN EN 197-1.

2.1.2 Voda

Pro všechny zkoušky byla použita destilovaná voda z VŠCHT v Praze.

2.1.3 Aglomerát – Elektrárna Mělník – Lokalita 1

Ze složiště EMĚ v lokalitě 1 byl proveden odběr aglomerátu z hloubky cca 50 cm dne 18. 4. 2018, uložený dle odhadu místního šetření v lednu 2018 (L1).

2.1.4 Aglomerát – Elektrárna Mělník – Lokalita 3

Ze složiště EMĚ v lokalitě 3 byl proveden odběr aglomerátu z hloubky cca 50 cm dne 18. 4. 2018, uložený 1 den před odběrem 17.4. 2018 (L3).

2.1.5 Škvára – Elektrárna Mělník – Místo 1

Ze složiště EMĚ v místě 1 byl proveden odběr škváry v hloubce cca 50 cm dne 18. 4. 2018, uložena dle odhadu místního šetření v roce 2010 (Š1).

2.1.6 Škvára – Elektrárna Mělník – Místo 2

Ze složiště EMĚ v místě 2 byl proveden odběr škváry v hloubce cca 50 cm dne 18. 4. 2018, uložena dle odhadu místního šetření v roce 2010 (Š2).

2.1.7 Čerstvý popílek – Elektrárna Mělník

Z EMĚ byl dovezen vzorek čerstvého popílku ze dne 9. 5. 2018. (Č)

2.2 Popis použitých metod

2.2.1 Stanovení vlhkosti

Podle ČSN 72 2071. Podstata zkoušky spočívá v oddělení volné vody ve vzorku popílku a stanovení hmotnosti či objemu popílku a vody.

Přístroje a pomůcky

- sušárna s teploměrem a termostatem
- váženka nebo vysoušecí nádoba
- váhy s kapacitou do 1 kg a přesností na 0,1 g.
- exsikátor

Postup zkoušky

Do vysušené, čisté a předem zvážené nádoby (m_1) se vloží alespoň 100 g popílku. Nádoba se uzavře a zváží (m_2). Vysoušecí nádoba se vloží do sušárny a s odklopeným víkem se při teplotě 105° - 110° C vysuší do ustálené hmotnosti. Vzorek se považuje za vysušený, pokud se po čtyřhodinovém intervalu při dvou po sobě jdoucích váženích neliší hmotnost popílku o více než 0,1 hmotnostních procent ($m_2 - m_1$). Doporučuje

se využívat sušáren s nucenou cirkulací vzduchu. Po ukončení sušení se na vysoušecí nádobu nasadí víko, nádoba se vyjme ze sušárny a nechá se vychladnout v exsikátoru. Následně se vysoušecí nádoba s víkem zvaží (m_3).

Vlhkost popílku v hmotnostních procentech se vypočítá s přesností na minimálně tři desetinná místa podle vzorce.

Výpočet

$$w = \frac{m_w}{m_0} \times 100 = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \times 100 [\%]$$

kde

m_w [g]	je	hmotnost vysušené vody
m_0 [g]		hmotnost vysušeného popílku
m_1 [g]		hmotnost vysoušecí nádoby
m_2 [g]		hmotnost nádoby s vlhkým vzorkem
m_3 [g]		hmotnost nádoby se suchým vzorkem

[21]

2.2.2 Stanovení sypané hmotnosti (volně sypané, setřesené)

Podle ČSN 72 2071. Podstata stanovení sypané hmotnosti se provádí zjištěním hmotnosti popílků v dané objemové jednotce. Jak volně sypaná, tak i setřesená hmotnost jsou důležitými charakteristickými veličinami daného materiálu a korespondují s objemovou hmotností vyrobené stavební hmoty.

Přístroje a pomůcky

- odměrná nádoba
- plechová násypka
- laboratorní stojan s objímkou
- ocelové pravítko
- váha EW 4200-2NM s přesností 0,01 g
- sušárna CHIRANA
- gumové/dřevěné kladívko či palička

Postup zkoušky pro sypnou hmotnost volně sypanou

Vysušený popílek se volně a bez otřesů sype do odměrné nádoby předepsanou plechovou násypkou upevněnou v držáku stojanu. Vzdálenost spodní hrany násypky od horní hrany odměrné nádoby je 20 mm. Přebytké množství vzorku se seřízne ocelovým pravítkem, aniž se na popílek jakkoliv tlačí. Odměrná nádoba zvážená bez popílku, následně se vzorkem a daný rozdíl udává sypnou hmotnost volně sypanou.

Postup zkoušky pro sypnou hmotnost setřesenou.

Začátek zkoušky je stejný jako u hmotnosti volně sypané. Prázdna nádoba se zváží a následně se naplní popílkem. Poté se mírně poklepává dřevěným nebo gumovým kladívkem po stranách nádoby a zároveň se dosypává další popílek tak dlouho, až vzorek zůstává beze změn na horním okraji nádoby. Přebytký vzorek se seřízne pravítkem a nádoba i se vzorkem se zváží s přesností na 1 g.

Výsledkem zkoušky je aritmetický průměr ze tří stanovení sypné hmotnosti volně sypané nebo setřeseného popílku provedených na jednom vzorku popílku udávaný v celých číslech. Rozdíl mezi hodnotami nesmí převyšovat 10 kg/m^3 . [21]

2.2.3 Stanovení měrné hmotnosti

Podstatou zkoušky je stanovení měrné hmotnosti popílku v g/cm^3 pyknometrickou metodou. Zkouška byla provedena podle norem ČSN 72 2071, ČSN EN 1097-6 a ČSN EN 1097-7.

Přístroje a pomůcky:

- pyknometr
- vodní lázeň UH 8 (MLW, Německo)
- analytické váhy s přesností 0,0001g HR-200 (AND, Japonsko)
- sušárna CHIRANA
- vakuový exsikátor
- vývěva
- stěrka
- zkušební síto

Postup zkoušky

Vzorek popílku o minimální hmotnosti 50 g se vysuší do ustálené hmotnosti. Po vychladnutí v exsikátoru (minimálně 90 minut) se případné hrudky rozmělní stěrkou. Vzorek se proseje sítím 0,125 mm. Zváží se suchý a čistý pyknometr (m_0). Naplní se vzorkem (10 ± 1 g) a znovu se zváží (m_1). Pyknometr se zaplní petrolejem až po úplné ponoření popílku. Následně se pyknometr umístí do vakuového exsikátoru a vytvoří se podtlak méně než 3,0 kPa. Po 30 minutách se uvolní podtlak, pyknometr je vyjmut a po doplnění petroleje bez zátky vložen do vodní lázně o teplotě $25 \pm 0,1$ °C tak, že vyčnívá 2 až 3 mm nad hladinu. Po 60 minutách je pyknometr zazátkován, osušen a následně zvážen s dílčí navázkou (m_2).

Měrná hmotnost popílku je vypočtena podle vzorce:

$$\rho_f = \frac{m_1 - m_0}{V - \frac{m_2 - m_1}{\rho_l}}$$

kde m_0 [g] je hmotnost prázdného pyknometru se zátkou
 m_1 [g] hmotnost pyknometru se zkušební navázkou vzorku popílku
 m_2 [g] hmotnost pyknometru se zkušební navázkou vzorku popílku a petrolejem
 V [ml] objem pyknometru v ml, je hustota petroleje při 25 °C

Výsledek je průměr ze tří stanovení na třech dílčích navázkách. [23]

2.2.4 Stanovení měrného povrchu

Podle ČSN EN 196-6. Měrný povrch se měří tzv. permeabilitní metodou dle Blaina, vypočte z času, který je potřebný pro průtok určitého množství vzduchu přes zhutněné popílkové lůžko.

Přístroje a pomůcky:

- Blainův přístroj MATEST
- analytické váhy s přesností 0,0001g HR-200 (AND, Japonsko)
- stopky
- sušárna CHIRANA

Postup zkoušky

Nejdříve se připraví lůžko. Na děrovanou destičku se umístí kolečko z filtračního papíru, na které se nasype odvážený vzorek popílku. Na popílek se přiloží další kolečko z filtračního popílku a následně se pístem s pootočením 2x stlačí. Takto připravené lůžko se vloží do Blainova přístroje. Balonkem se nasaje kapalina v trubičce do dané výšky, následně se trubička uzavře kohoutem a měří se čas poklesu kapaliny mezi dvěma ryskami. [24]

Výpočet

$$S = \frac{K}{\rho} \times \frac{\sqrt{e^3}}{(1-e)} \times \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{10 \times \eta}}$$

kde	K	je	konstanta přístroje
	e		porozita lůžka
	$t [s]$		naměřený čas
	$\rho [g/cm^3]$		měrná hmotnost vzorku
	$t [s]$		naměřený čas
	$\eta [Pa.s]$		viskozita vzduchu při teplotě zkoušení

[24]

2.2.5 Stanovení ztráty žiháním

Podle ČSN 72 0103. Podstatou zkoušky je žihání vzorku při teplotě $1\ 100 \pm 20$ °C do ustálené hmotnosti. Úbytek hmotnosti odpovídá ztrátě žiháním.

Přístroje a pomůcky

- žihací pec
- porcelánový kelímek
- analytické váhy s přesností 0,0001g
- exsikátor

Postup zkoušky

Do vyžihaného a zváženého porcelánového kelímku se naváží 1 g popílku. Následně se kelímek se vzorkem vloží do žihací pece a zvolna se zahřívá na danou teplotu. Po 1

hodině žihání při dané teplotě se kelímek vyjme, nechá se vychladnout v exsikátoru a následně se zváží. Žihání se opakuje do ustálené hmotnosti.

Výpočet

$$z\check{z} = \frac{m_s - m_z}{m_s} \times 100 [\%]$$

kde m_s [g] je hmotnost navážky vysušeného vzorku,

m_z [g] je hmotnost vyžihaného vzorku

[22]

2.2.6 Normální konzistence

Podle ČSN EN 196-3. Princip zkoušky spočívá ve zjištění optimální hustoty, tj. optimálnímu poměru cementu, popílku a vody, aby tato cementová kaše měla ideální odpor vůči penetračního válečku Vicatova přístroje.

Přístroje a pomůcky:

- Vicatův prstenec
- Vicatův přístroj
- míchačka ELE (JIP-TECH, Česká Republika)
- váhy EW 4200-2NM s přesností 0,01g (Kern&Sohn, Německo)
- odměrný válec
- podložka
- stěrka

Postup zkoušky

Naváží se 375 g srovnávacího cementu CEM I 42,5 R, 125 g popílku a množství odhadované vody. Vše se vloží do míhací nádoby a na nízkou rychlost se začne promíchávat po dobu 90 s, poté se míchání přerušuje, stěrkou se setře kaše ze stěn nádoby a opět se uvede míchačka na 90 s do provozu.

Vicatův prstenec umístěný na podložce se bez většího hutnění naplní namíchanou kaší. Lehce se poklepem o pěst ruky zbavíme přebytečného vzduchu. Penetrační váleček se umístí do výchozí polohy a ukazatel se nastaví na nulovou hodnotu. Následně se posune dolů, aby byl ve styku s povrchem kaše. Pohyblivá část se rychle uvolní a

penetrační váleček vniká do cementové kaše. Toto uvolnění musí proběhnout 4 minuty od nulového času. Poté se provede na stupnici odečet – tento odečet se provede nejdříve 5 sekund po ustálení polohy válečku, nebo 30 sekund po uvolnění – záleží na tom, co nastane dříve.

Zkouška se opakuje s cementovými kašemi s různým poměrem vody tak dlouho, až je dosaženo vzdálenosti mezi spodní hranou válečku a podložní destičkou 6 ± 2 mm. Obsah vody se uvede s přesností na 0,5 %. [25]

2.2.7 Stanovení počátku tuhnutí

Podle ČSN EN 196-3.

Přístroje a pomůcky:

- Vicatův prstenec
- Vicatův přístroj
- míchačka ELE (JIP-TECH, Česká Republika)
- váhy EW 4200-2NM s přesností 0,01g (Kern&Sohn, Německo)
- stěrka
- odměrný válec
- podložka
- nádoba na vodu

Postup zkoušky

Vicatův prstenec se naplní kaší normální konzistence a následně se vloží na podložní destičku do misky, která se zaplní vodou a vloží se do automatického Vicatova přístroje. Přístroj zaznamenává hloubku zanoření jehly na milimetrový papír. Čas se měří od tzv. nulového času. Nulový čas se bere jako okamžik přidání vody do směsi cementu a popílku a následného začátku míchacího procesu. Vpichy se opakují po 10 minutách. [25]

2.2.8 Stanovení objemové stálosti

Podle ČSN EN 196-3.

Pomůcky a přístroje:

- Le Chatelierova objímka
- vodní lázeň
- ocelové pravítko
- elektrický vařič
- vhodný prostor pro uložení, v němž lze dodržet teplotu $20 \pm 2^\circ\text{C}$ a vlhkost vzduchu nejméně 90%

Postup zkoušky

Le Chatelierova objímka se postaví na podložní destičku a naplní cementovou kaší normální konzistence v poměru 30% popílku a 70% cementu. Příliš se nezhutňuje a zarovná se ocelovým pravítkem. Objímka se přikryje krycí destičkou a vše se umístí do vlhkého uložení, kde se nechá při teplotě okolo 20°C a vlhkosti 90% po dobu 24 hodin.

Po 24 hodinách se změří vzdálenost (A) mezi hroty tyčinek s přesností na 0,5 mm. Následně se objímka zahřívá ve vodní lázni až k varu a teplota varu se udržuje 3 hodiny. Po ukončení vaření se změří vzdálenost hrotů tyčinek (B). Objímka se vyjme z vodní lázně, ochladí na teplotu vzduchu laboratoře a změří se vzdálenost mezi hroty tyčinek (C). Rozdíl hodnot C a A, vypočten s přesností na 1 mm udává objemovou stálost. V případě, že při zkoušení nevznikají velké rozdíly mezi měřeními B a C, může být uveden do protokolu rozdíl hodnot B a A, jelikož se tím zkracuje čas pro zkoušku.

[25]

2.2.9 Obrazová analýza

Vysušený popílek se zalije do formy pryskyřicí a nechá se několik dní vytvrdnout. Následně se vzorek obrousí na brusce do roviny a provede se rozbor pod mikroskopem.

Pomůcky a přístroje:

- forma
- digitální mikroskop AM7515MZT – Edge
- stativ Dino–Lite RK10-A
- software DinoCapture (AnMo Electronics Corporation)

2.2.10 Rentgenofluorescenční analýza – XRF

Rentgenová prvková analýza se používá pro hromadné zjišťování hlavních a stopových chemických prvků ve vzorku. Stanovení probíhá v rentgenovém vlnově-disperzním spektrometru (XRF).

Metoda je založena na principu změny chování atomů, které jsou vystaveny rentgenovému záření. Vzorek je nejprve ozářen intenzivním rentgenovým paprskem. Část energie je rozptýlena a část vstřebána ve vzorku způsobem, který závisí na jeho chemickém složení. Ozářený vzorek začne vydávat fluorescenční rentgenové záření. Toto záření vzorku je způsobeno uvolňováním energie uvnitř atomů jednotlivých prvků. Použitím XRF spektrometru lze oddělit komplexní emitované rentgenové záření vzorku do charakteristických vlnových délek pro jednotlivé chemické prvky obsažené ve vzorku. Pro měření intenzity vyzařovaného paprsku jsou použity různé druhy detektorů. [23]

Měření bylo provedeno v Laboratořirentgenové difraktometrie a spektrometrie na Vysoké škole chemicko-technologické v Praze.

2.2.11 Rentgenová difrakční analýza – XRD

Jedná se o měření velikosti částic vzorku použitím laserového paprsku. Metoda je rychlá a reprodukovatelná. Laserový paprsek prozařuje souvislý tok částic v kyvetě, od kterých dochází k jeho difrakci (ohybu).

Měření

Data byla naměřena při pokojové teplotě na θ - θ práškovém difraktometru X'Pert3 Powder od Holandské firmy PANalytical v Bragg-Brentanově parafokující geometrii s použitím vlnové délky $\text{CuK}\alpha$ záření ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, $U = 40 \text{ kV}$, $I = 30 \text{ mA}$).

Data byla naskenována pomocí rychlého lineárního detektoru PIXcel v úhlovém rozsahu $5-90^\circ$ (2θ) s krokem měření 0.013° (2θ) a časem čítání 180 s krok^{-1} . Pro měření byla použita fixní clona. Kvůli potlačení přednostní orientace byly vzorky připraveny zadním plněním.

Vyhodnocení dat bylo provedeno programem HighScore Plus, verze 4.0 (PANalytical, Almelo, Holandsko) srovnáním s databází PDF-4+ 2016 obsahující 365.877 experimentálních a počítaných práškových karet. U všech vzorků byl proveden odhad hmotnostních zlomků jednotlivých krystalických fází a fáze amorfní pomocí Rietveldovy metody. Pro tyto účely bylo využito metody vnitřního standardu s přimícháním definovaného množství (7,5%) ZnO.

Rietveldova metoda

Rietveldova analýza difrakčního záznamu je metoda, která byla vytvořena pro vyhodnocování difraktogramů práškových materiálů, a která se v současné době používá jako užitečný nástroj strukturní analýzy. Rietveldova analýza slouží k určení parametrů modelu reálné struktury vyšetřované látky nebo směsi látek, přičemž model reálné struktury musí být známý.

Kritérium úspěšnosti

Při výpočtu hodnot parametrů reálné struktury se používá nelineární metody nejmenších čtverců, která převádí problém nalezených hodnot určovaných parametrů na problém řešení soustavy normálních rovnic. Pro posouzení úspěšnosti výpočtu se obvykle používá několik různých kritérií „goodness of fit“ jako je strukturní R-faktor (R_F), Braggův faktor (R_B), R-faktor váženého difrakčního záznamu (R_W), aj.

Měření bylo provedeno v Laboratoři rentgenové difraktometrie a spektrometrie na Vysoké škole chemicko-technologické v Praze.

2.2.12 Laserová analýza velikosti částic

Laserová analýza velikosti částic slouží k měření velikosti částic práškových vzorků. Tato metoda umožňuje měření a srovnání výsledků suchého a mokrého způsobu měření, s širokou možností prezentace (diferenciální a integrální distribuční funkce, D_{50} , zastoupení částic v libovolných velikostních intervalech, zbytek na „sítech“). Vlivem přítomných částic, které jsou analyzovány, dochází k ohybu laserového

paprsku pod úhlem, který je nepřímo úměrný jejich velikosti. Se zmenšující se velikostí částice, vzrůstá difrakční úhel logaritmicky, zatímco intenzita záření klesá v závislosti na objemu částice. Velké částice tedy způsobují ohyb laserového paprsku pod malým úhlem, a proto paprsek dopadající na detektor má velkou intenzitu, zatímco malé částice způsobují difrakci laserového paprsku pod velkým úhlem, ale paprsek dopadající na detektor má nízkou intenzitu. Naměřený průběh difrakce laserového paprsku je následně použit k výpočtu distribuce velikosti částic. [26]

Toto měření provedla Fakulta chemicko-technologická Univerzity Pardubice

2.2.13 Stanovení zrnitosti škváry – síťový rozbor

Podle ČSN EN 933-4.

Pomůcky a přístroje:

- Sada normovaných sít MATEST
- Vibrační přístroj MATEST
- váhy EW 4200-2NM s přesností 0,01g (Kern&Sohn, Německo)

Postup zkoušky

Vysušený vzorek naváží podle zrn největšího rozměru a vloží do sady zkušebních sít seřazených vzestupně dle normové řady. Sloupcem sít se mechanicky třese do ustálené hmotnosti. Následně se propad na jednotlivých sítěch váží a zaznamenává do tabulky.

[27]

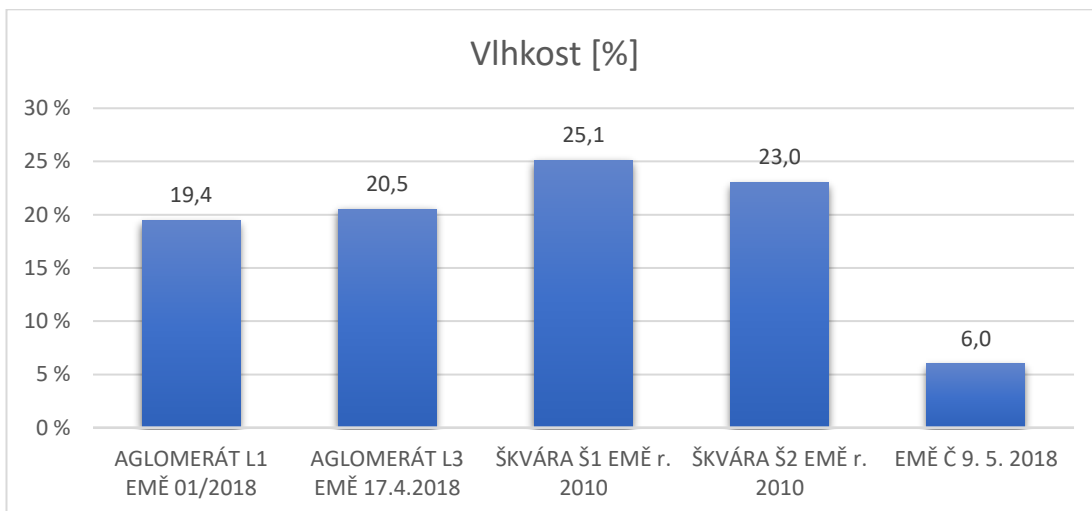
2.3 Výsledky zkoušek

2.3.1 Stanovení vlhkosti

Stanovení vlhkosti aglomerátu, škváry a čerstvého popílku. Ze vzorku bylo odebráno 2×100 g, toto množství se sušilo do konstantní hmotnosti za teploty $105\text{ }^{\circ}\text{C}$. V tabulce jsou průměrné hodnoty z obou měření.

Tab. 4: Stanovení vlhkosti

Označení vzorku	Vlhkost [%]
AGLOMERÁT L1 EMĚ 01/2018	19,4
AGLOMERÁT L3 EMĚ 17.4.2018	20,5
ŠKVÁRA Š1 EMĚ r. 2010	25,1
ŠKVÁRA Š2 EMĚ r. 2010	23,0
EMĚ Č 9. 5. 2018	6,0



Graf 4: Stanovení vlhkosti vzorků

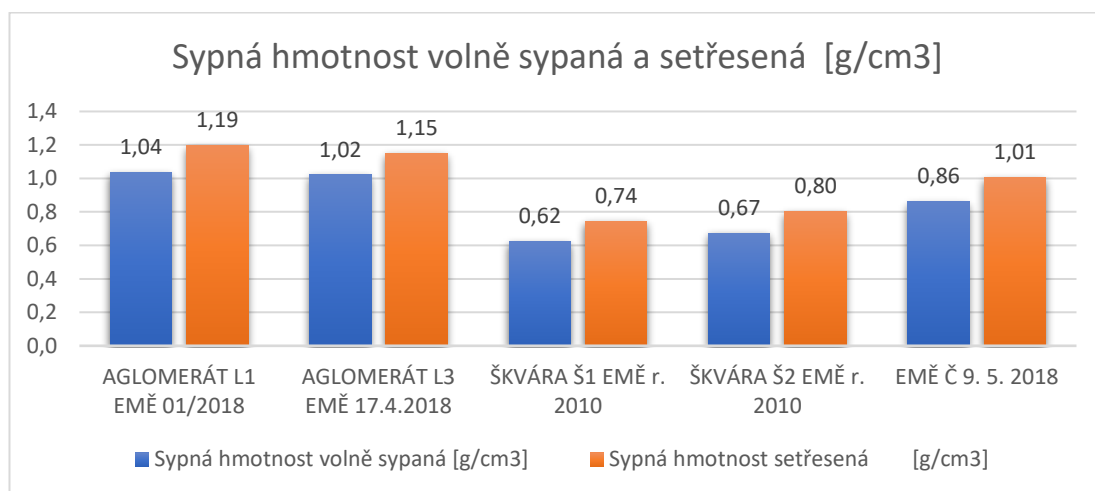
Získané výsledky stanovení vlhkosti aglomerátů se pohybují kolem 20 %. U škváry je vlhkost vyšší a pohybuje se mezi 23 - 25 %. Vlhkost čerstvého popílku je 6 %.

2.3.2 Stanovení sypné hmotnosti volně sypané a setřesené

Všechny vzorky byly podrobeny stanovení sypné hmotnosti volně sypané i setřesené. Standard volně sypané hmotnosti se pohybuje v rozmezí 0,5 – 1,0 g/cm³. [28] Tabulky a grafy zobrazují zprůměrované hodnoty odběrů.

Tab. 5: Hodnoty sypné hmotnosti

Označení vzorku	Sypná hmotnost volně sypaná [g/cm ³]	Sypná hmotnost setřesená [g/cm ³]	Rozdíl setřesené a volně sypané hmotnosti [g/cm ³]
AGLOMERÁT L1 EMĚ 01/2018	1,04	1,19	0,16
AGLOMERÁT L3 EMĚ 17.4.2018	1,02	1,15	0,13
ŠKVÁRA Š1 EMĚ r. 2010	0,62	0,74	0,12
ŠKVÁRA Š2 EMĚ r. 2010	0,67	0,80	0,13
EMĚ Č 9. 5. 2018	0,86	1,01	0,14



Graf 5: Sypná a setřesená hmotnost

Hodnoty sypné hmotnosti volně sypaných aglomerátů se pohybují nad horní hranicí standardního intervalu hodnot. Setřesením popílků vzrůstá sypná hmotnost zhruba o 130 – 160 kg/m³.

Čerstvý popílek je v intervalu hodnot a jeho setřesením sypná hmotnost vzrostla o 140 kg/m³. V porovnání s popílkem z elektrárny Počeradky [6], kde se volně sypaná sypná hmotnost pohybuje v rozmezí 0,861 – 0,911 g/cm³, je sypná hmotnost podobná, ale setřesená sypná hmotnost je o něco nižší než u popílků z EPO (1,06 – 1,16 g/cm³). Popílků z elektrárny Tušimice [6] mají hodnoty sypné hmotnosti pro volně sypanou

v rozmezí 0,64 – 0,83 g/cm³ a pro setřesenou 0,79 – 1,07 g/cm³. Obě hodnoty z ETU se shodují s popílkem z EMĚ.

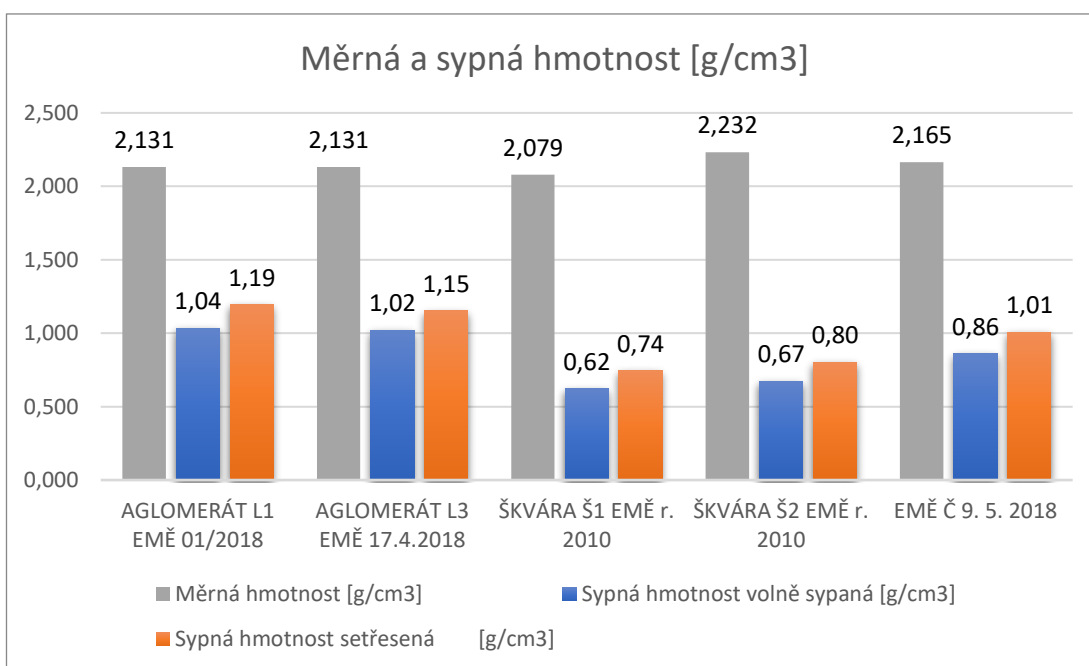
Hodnoty škváry jsou ve všech případech nižší než hodnoty aglomerátů a čerstvého popílku.

2.3.3 Stanovení měrné hmotnosti

Měrná hmotnost měřená pyknometrickou metodou. Každý vzorek byl měřen celkem 3×. V tabulce jsou uvedeny průměrné hodnoty. Standardní hodnoty se pohybují od 1,9 – 2,6 g/cm³. [28] Graf 6 ukazuje srovnání měrné a sypné hmotnosti.

Tab. 6: Měrná hmotnost

Označení vzorku	Měrná hmotnost [g/cm ³]	Směrodatná odchylka
AGLOMERÁT L1 EMĚ 01/2018	2,131	0,0071
AGLOMERÁT L3 EMĚ 17.4.2018	2,131	0,0036
ŠKVÁRA Š1 EMĚ r. 2010	2,079	0,0214
ŠKVÁRA Š2 EMĚ r. 2010	2,232	0,0242
EMĚ Č 9. 5. 2018	2,165	0,0071



Graf 6: Srovnání měrné a sypné hmotnosti

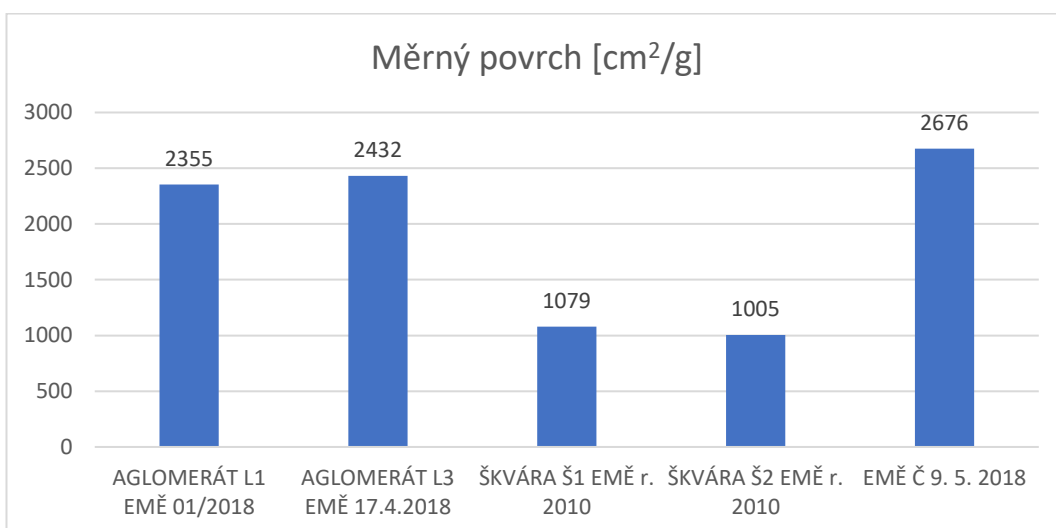
Oba aglomeráty mají stejnou měrnou hmotnost 2,13 g/cm³. U škvár je rozmezí 2,08 – 2,23 g/cm³. Čerstvý popílek má měrnou hmotnost 2,17 g/cm³, což je podobná hodnota jako u popílků z Počerad (2,12 – 2,19 g/cm³). Popílky z Tušimic mají hodnoty měrné hmotnosti vyšší (2,19 – 2,53 g/cm³). [6]

2.3.4 Stanovení měrného povrchu

Stanovení měrného povrchu bylo prováděno pomocí Blainova přístroje. Každé cementové lůžko bylo měřeno celkem 5×, výsledky se zprůměrovaly na 1 hodnotu a měření každého vzorku se opakovalo, dokud se měření neshodovalo.

Tab. 7: Měrný povrch

Označení vzorku	Měrný povrch [cm ² /g]
AGLOMERÁT L1 EMĚ 01/2018	2355
AGLOMERÁT L3 EMĚ 17.4.2018	2432
ŠKVÁRA Š1 EMĚ r. 2010	1079
ŠKVÁRA Š2 EMĚ r. 2010	1005
EMĚ Č 9. 5. 2018	2676



Graf 7: Měrný povrch

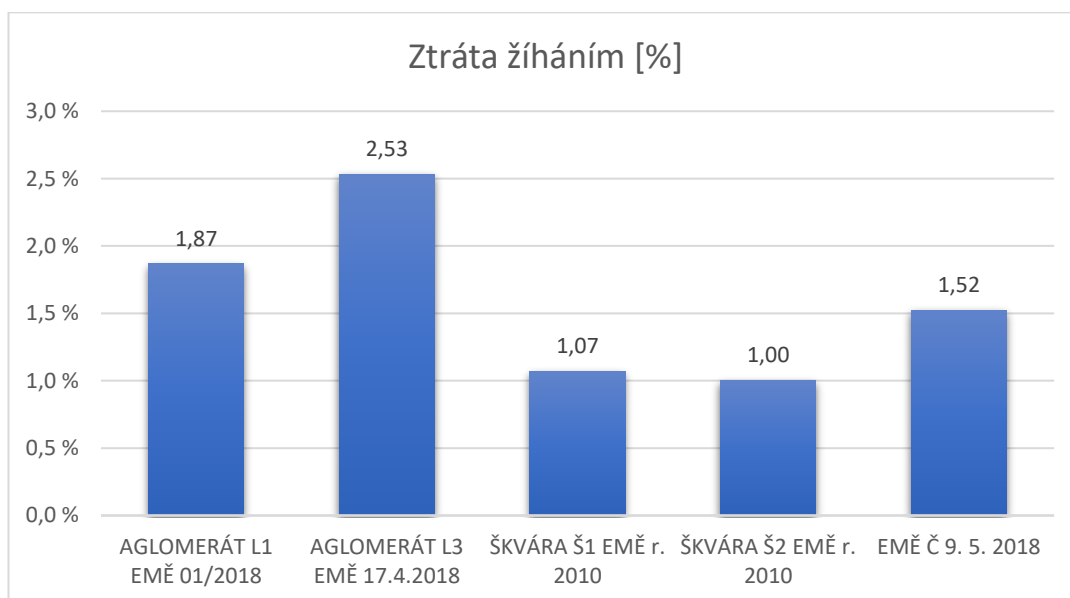
Měrný povrch je nejvyšší u čerstvého popílku 2 676 cm²/g, oproti aglomerátům je větší o 240 – 230 cm²/g. Oba aglomeráty mají mezi sebou rozdíl jen 77 cm²/g. Hodnoty škváry jsou více než 2x menší oproti popílkům.

2.3.5 Stanovení ztráty žiháním

Dle ČSN EN 450-1 je limit pro kategorii A: Ne více než 5,0 % hmotnosti. Žiháním se limitují neshořelé zbytky uhlí ve vzorku.

Tab. 8: Stanovení ztráty žiháním

Označení vzorku	Ztráta žiháním [%]
AGLOMERÁT L1 EMĚ 01/2018	1,87
AGLOMERÁT L3 EMĚ 17.4.2018	2,53
ŠKVÁRA Š1 EMĚ r. 2010	1,07
ŠKVÁRA Š2 EMĚ r. 2010	1,00
EMĚ Č 9. 5. 2018	1,52



Graf 8: Stanovení ztráty žiháním

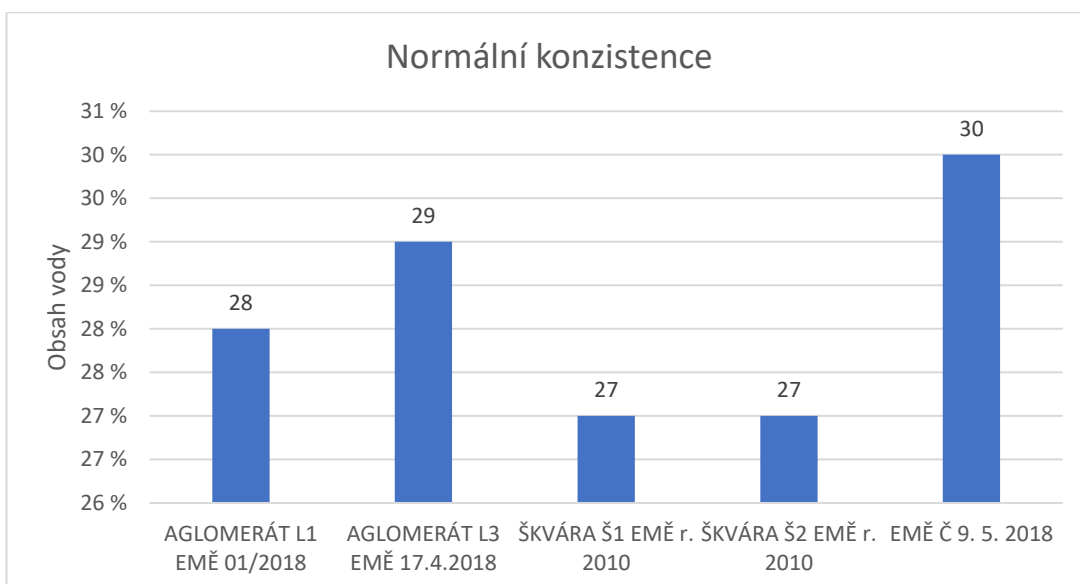
Jelikož ztráta žihání nepřekračuje ani u jednoho vzorku 2,6 %, můžeme aglomerát, škváru i popílek zařadit do kategorie A. Ze škvár se vyžihalo cca jen 1 % zbytků uhlí, u aglomerátu to bylo 1,8 – 2,5 % a u čerstvého popílku 1,52 %.

2.3.6 Normální konzistence

Pevná složka vzorku byla namíchána v poměru 25 % popílku (škváry) a 75 % referenčního cementu. Výsledky jsou procenta hmotnosti vody pevné složky.

Tab. 9: Normální konzistence

Označení vzorku	Obsah vody [%]
AGLOMERÁT L1 EMĚ 01/2018	28
AGLOMERÁT L3 EMĚ 17.4.2018	29
ŠKVÁRA Š1 EMĚ r. 2010	27
ŠKVÁRA Š2 EMĚ r. 2010	27
EMĚ Č 9. 5. 2018	30



Graf 9: Normální konzistence

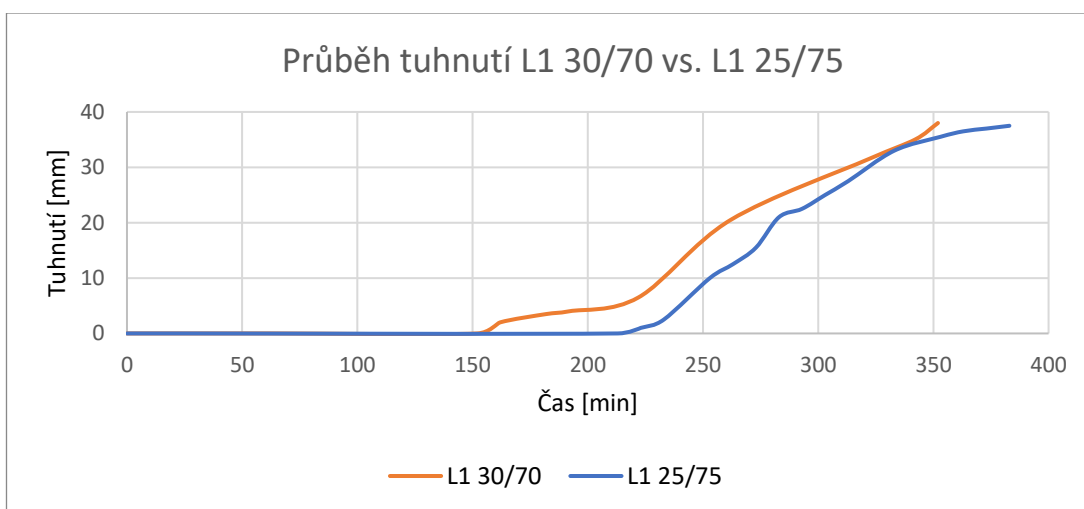
Na získání kaše normální konzistence je potřeba pro aglomeráty 28 – 29 % vody, pro škváry 27 % vody. Pro čerstvý popílek je potřeba 30 % vody, což je v porovnání s ETU (39 – 52 %) a EPO (34 – 35 %) [6] malé množství.

2.3.7 Počátek tuhnutí

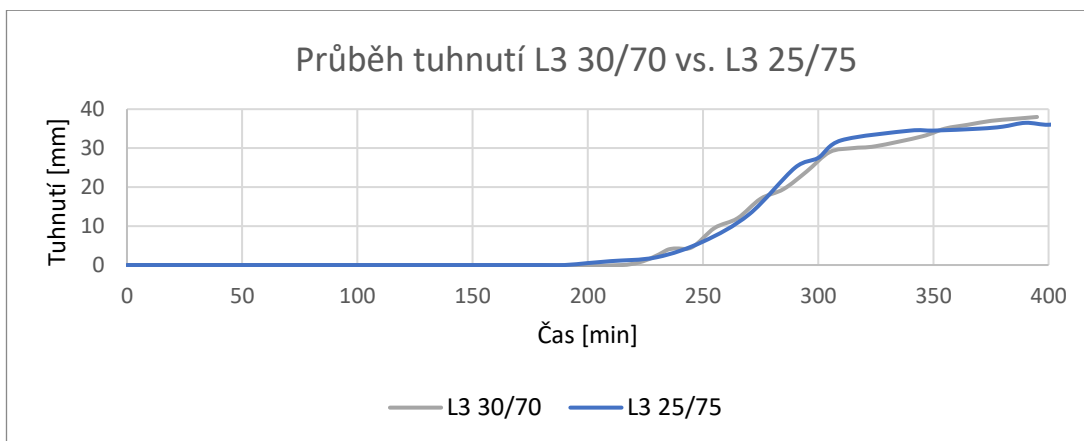
Stanovení počátku tuhnutí probíhalo na kaších normální konzistence 30/70 a 25/75 (popílek/cement). Škvára byla zkoušena jen v poměru 25 % škváry a 75 % cementu.

Tab. 10: Počátky tuhnutí

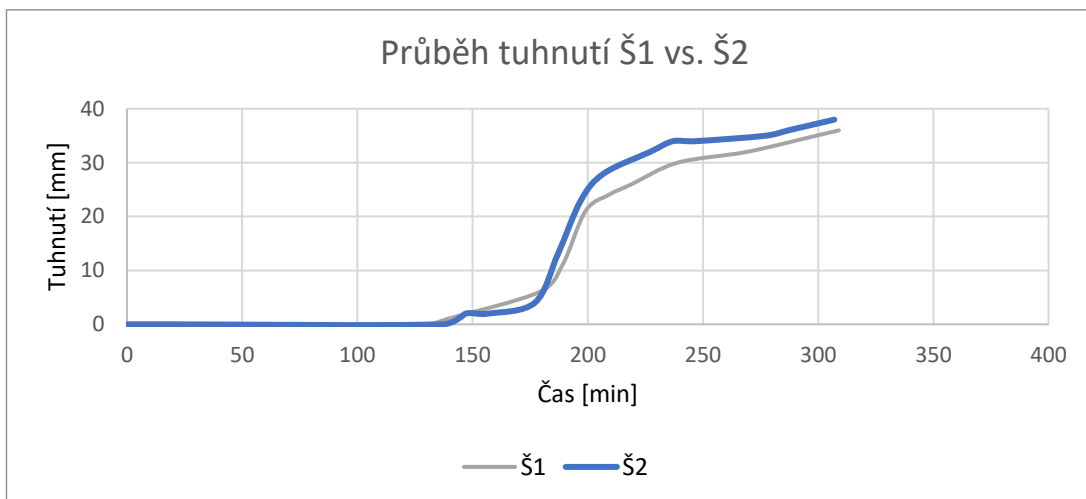
Označení vzorku	Počátek tuhnutí 25/75 [min]	Počátek tuhnutí 30/70 [min]
AGLOMERÁT L1 EMĚ 01/2018	223	162
AGLOMERÁT L3 EMĚ 17.4.2018	190	235
ŠKVÁRA Š1 EMĚ r. 2010	139	
ŠKVÁRA Š2 EMĚ r. 2010	147	
EMĚ Č 9. 5. 2018	218	253
CEM 42,5 R	170	



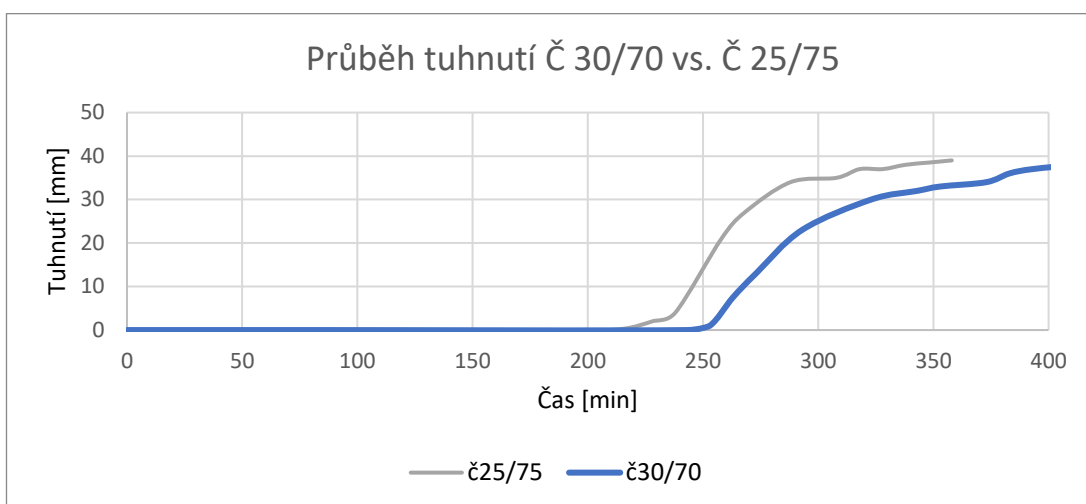
Graf 10: Průběh tuhnutí aglomerátu L1



Graf 11: Průběh tuhnutí aglomerátu L3



Graf 12: Průběh tuhnutí škváry Š1 a Š2



Graf 13: Průběh tuhnutí čerstvého popílku

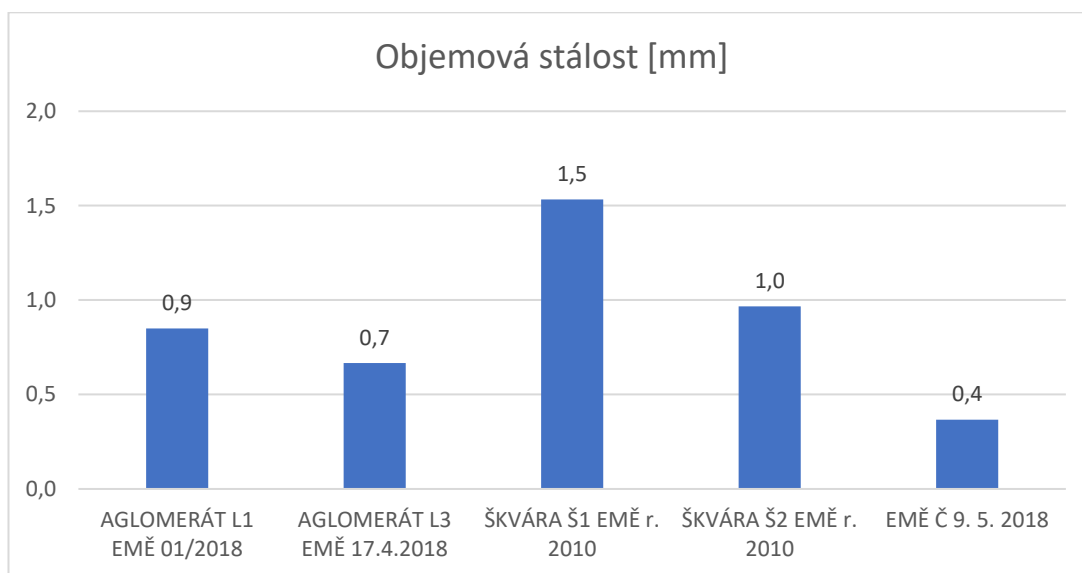
Dle ČSN EN 450-1 nesmí být doba počátku tuhnutí více než dvakrát delší než doba počátku tuhnutí kaše ze 100 % hmotnosti referenčního cementu. Dvojnásobná doba počátku tuhnutí je v tomto případě 340 min. V žádném vzorku nebyla tato doba překročena, a proto normě vyhovuje.

2.3.8 Stanovení objemové stálosti

Objemová stálost byla měřena pomocí Le Chatelierových objímek. V tabulce a grafu je zprůměrovaný výsledek ze 3 dílčích měření.

Tab. 11: Objemová stálost

Označení vzorku	Objemová stálost [mm]
AGLOMERÁT L1 EMĚ 01/2018	0,9
AGLOMERÁT L3 EMĚ 17.4.2018	0,7
ŠKVÁRA Š1 EMĚ r. 2010	1,5
ŠKVÁRA Š2 EMĚ r. 2010	1,0
EMĚ Č 9. 5. 2018	0,4



Graf 14: Objemová stálost

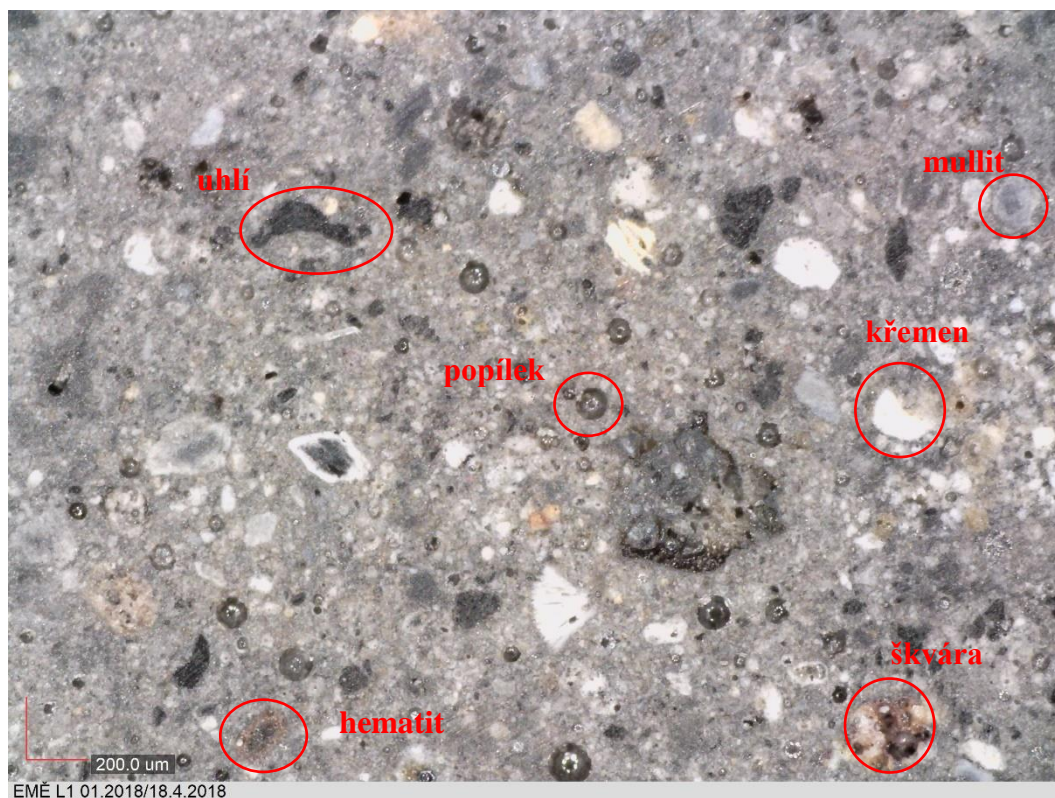
Ze všech vzorků je objemově nejstálejší čerstvý popílek s 0,4 mm objemové stálosti. V porovnání s popílkou z EPO (1,5 mm) a ETU (0,5 mm) [6] je nejbližší k popílkům z ETU. Aglomeráty se drží pod objemovou stálostí 1 mm, což se nedá říct o škváře, která v jednom případě dosáhla hodnoty 1,5 mm. Dle ČSN EN 450-1 nesmí být roztažnost větší než 10 mm, což je splněno ve všech případech.

2.3.9 Obrazová analýza

Obrazová analýza byla provedena na všech vzorcích. Na první fotografii je vždy zachycen obraz skutečný, nejsou použity žádné filtry. Na druhé fotografii je v každém případě použitý polarizační filtr, který lépe vystihuje tvar částic, ale zkresluje jejich barvu. Kulovité částice zobrazují popílek, ostře řezané černé větší částice jsou zbytky uhlí, černé a jinak zbarvené (např. žlutě a oranžově) „spečence“ jsou škvára. Dále je zde zastoupen bílé křemen, hnědo-červeně hematit a šedě mullit. (viz Obr.11)\

V aglomerátech je patrný obsah škváry, která se nachází i v čerstvém popílku. Obsah ostatních částí by měl být v poměru dle rentgenové difrakční analýzy. Ve všech vzorcích se tedy viditelně nalézá popílek, škvára, uhlí, křemen, hematit a mullit.

AGLOMERÁT L1 EMĚ 01/2018

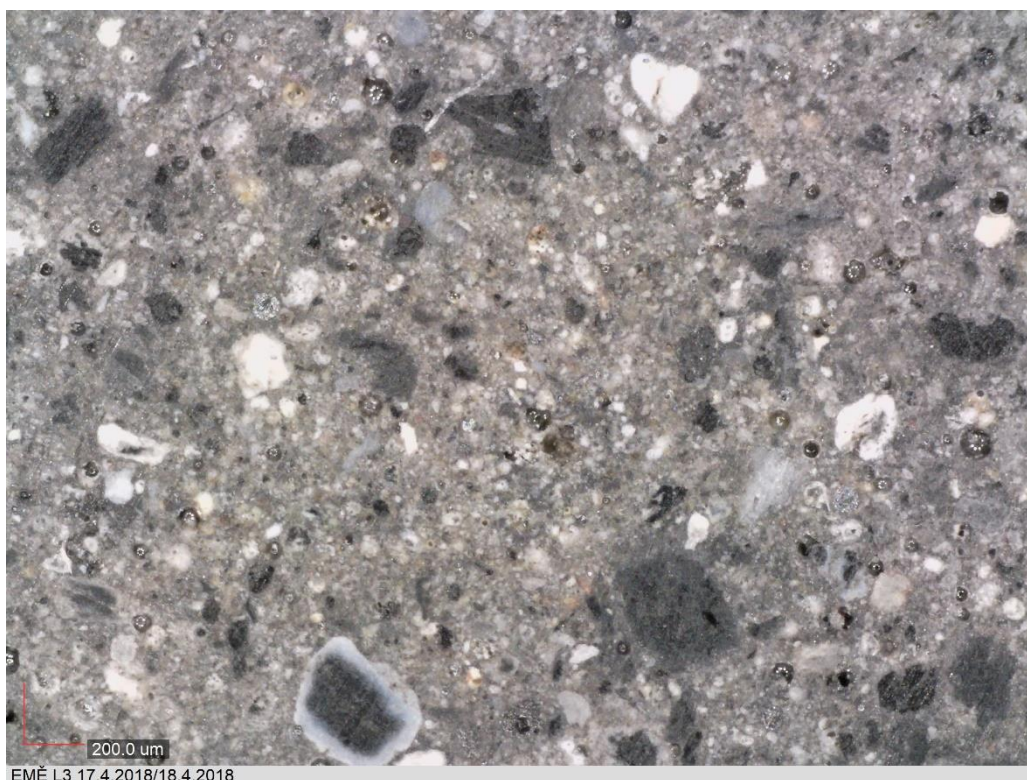


Obr. 11: OA - L1 skutečný

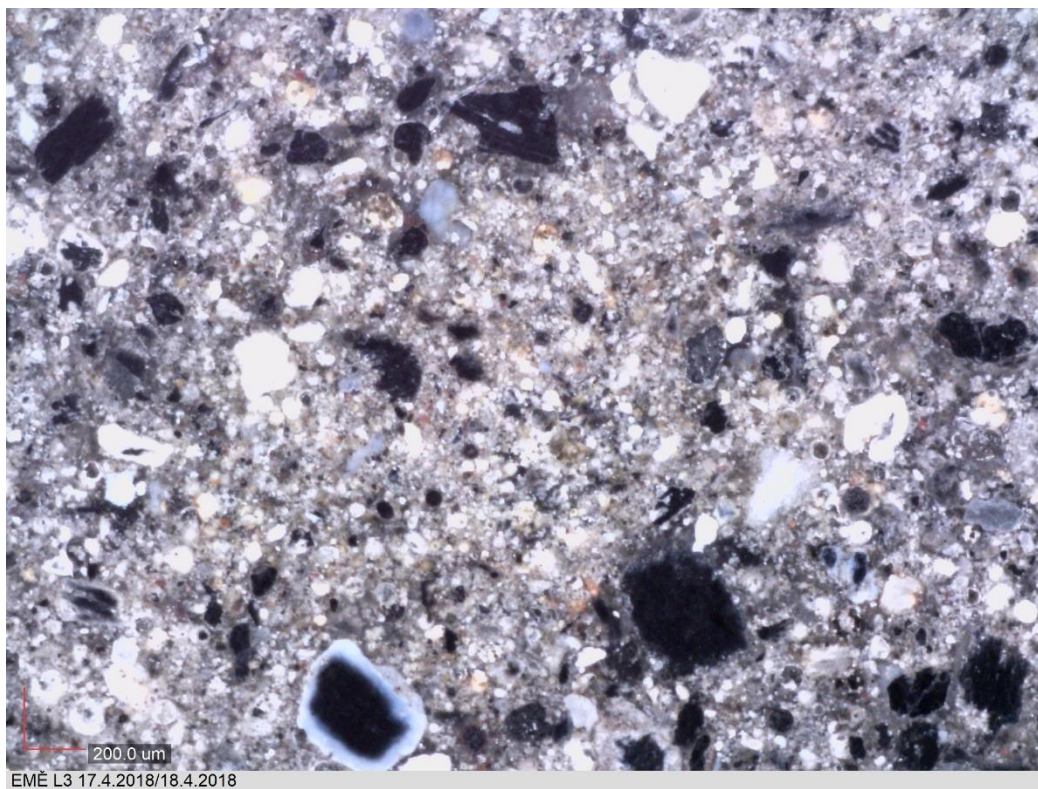


Obr. 12: OA - L1 polarizovaný

AGLOMERÁT L3 EMĚ 04/2018



Obr. 13: OA - L3 skutečný

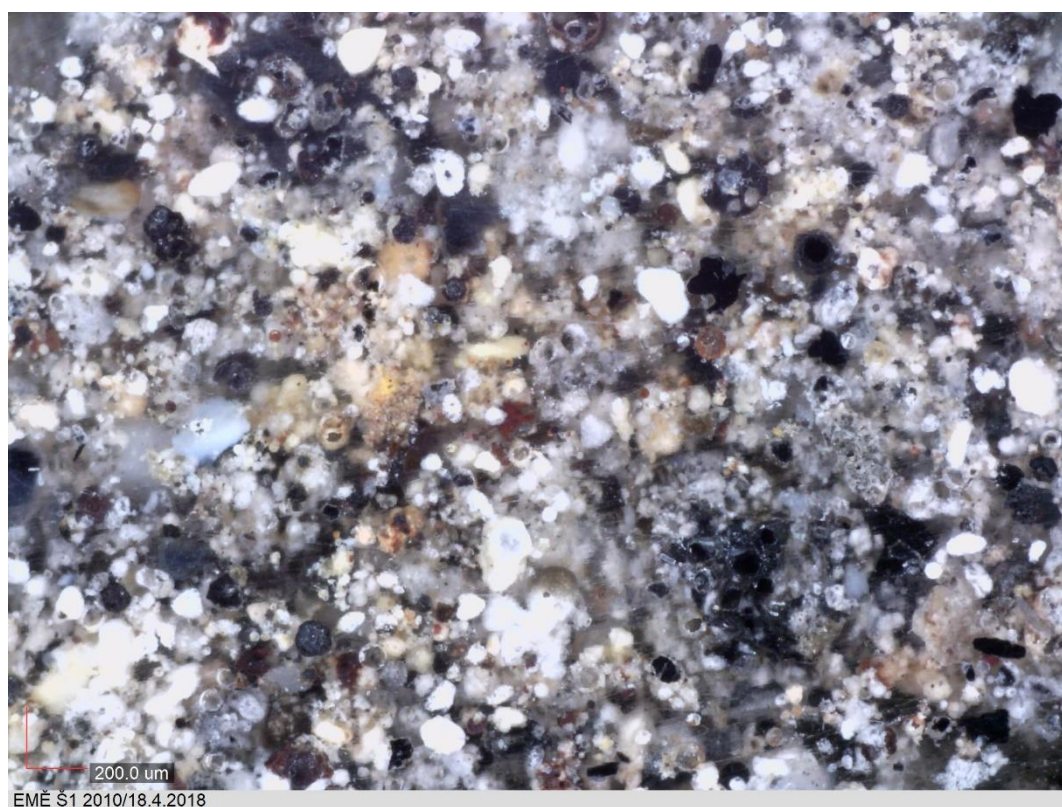


Obr. 14: OA - L3 polarizovaný

ŠKVÁRA Š1 EMĚ r. 2010



Obr. 15: OA - Š1 skutečný

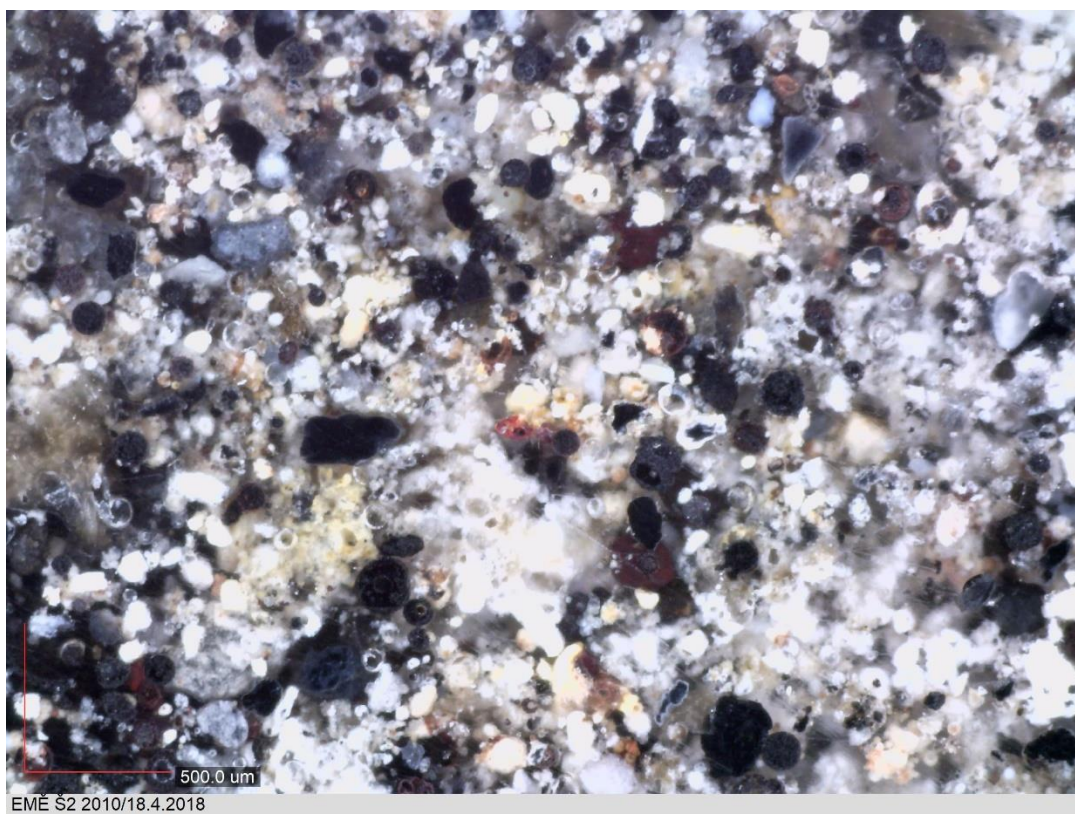


Obr. 16: OA - Š1 polarizovaný

ŠKVÁRA Š2 EMĚ r. 2010

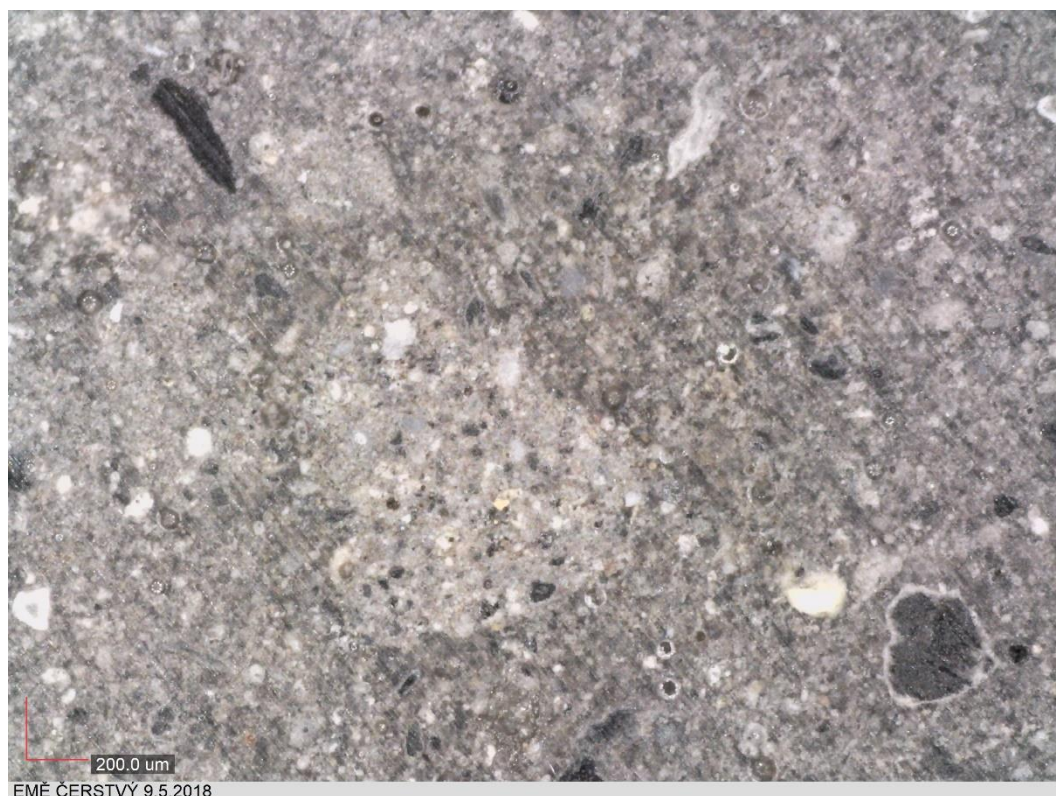


Obr. 17: OA - Š2 skutečný

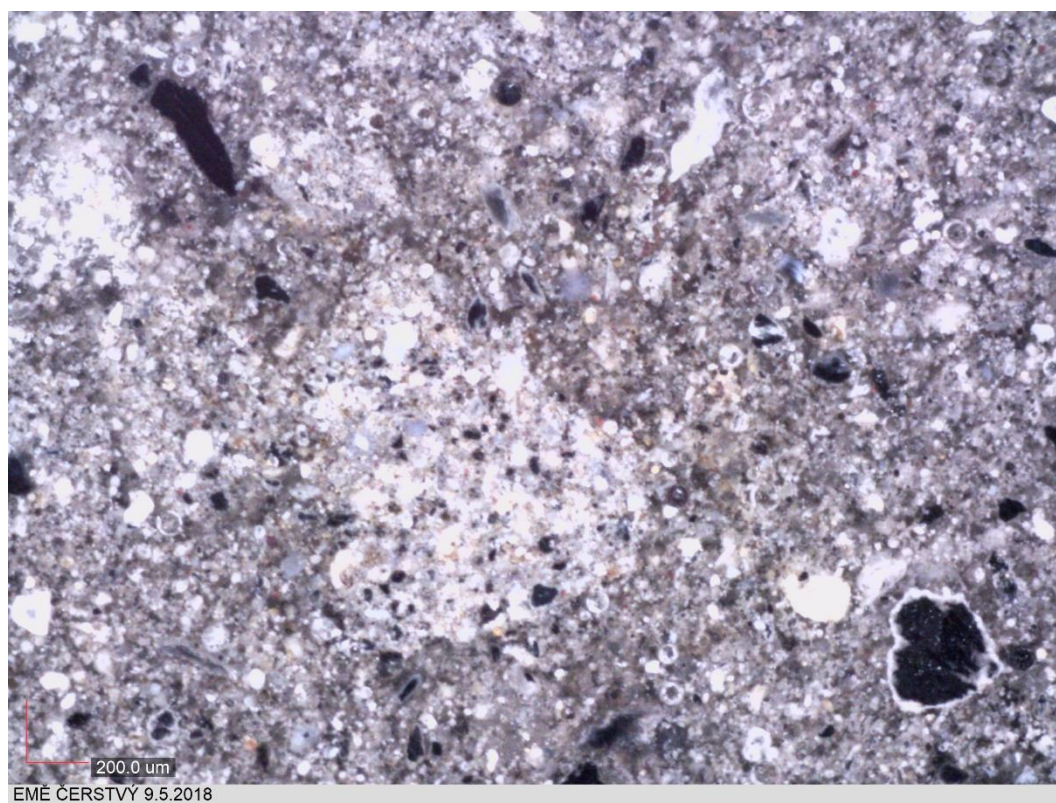


Obr. 18: OA - Š2 polarizovaný

ČERSTVÝ POPÍLEK Č 9. 5. 2018



Obr. 19: OA - Č skutečný



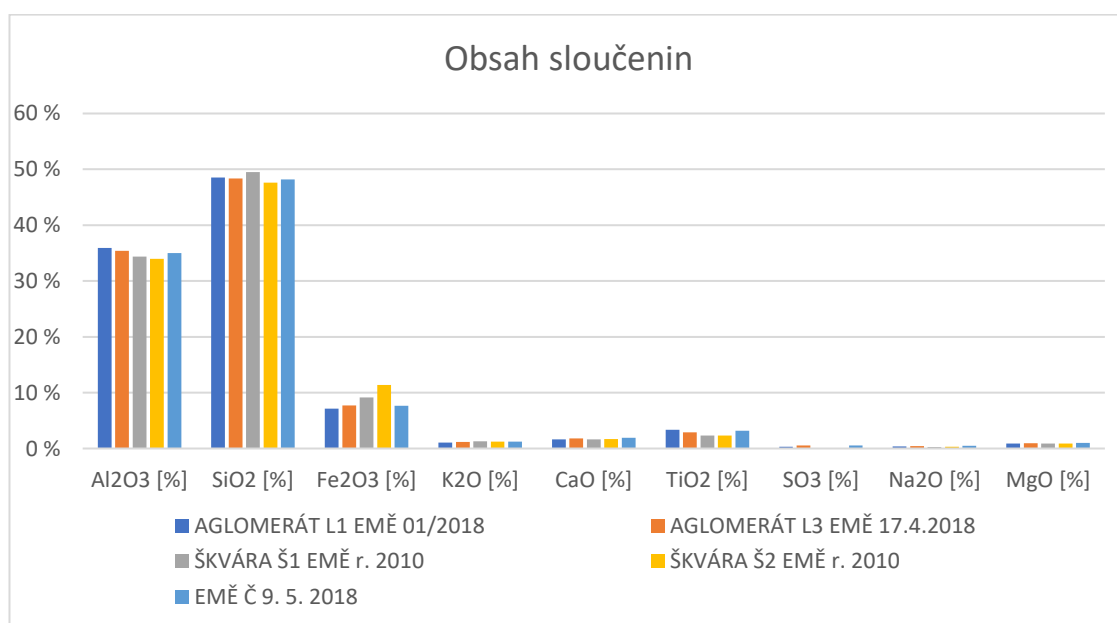
Obr. 20: OA - Č polarizovaný

2.3.10 Rentgenfluorescenční analýza – XRF

Analýza prvkového složení byla provedena pro všechny vzorky. Vybrány jsou pouze chemické složky, které se v daném vzorku vyskytují ve větším množství. Jedná se hlavně o sloučeniny oxid hlinitý Al_2O_3 , oxid křemičitý SiO_2 , a dále oxid draselný K_2O , oxid vápenatý CaO , oxid titaničitý TiO_2 , oxid sírový SO_3 a oxid železitý Fe_2O_3 . A prvky hliník Al, křemík Si, draslík K, vápník Ca, titan Ti a železo Fe. V Tab. 12 jsou uvedeny výsledky.

Tab. 12: Obsah sloučenin XRF

Označení vzorku	Al_2O_3 [%]	SiO_2 [%]	Fe_2O_3 [%]	K_2O [%]	CaO [%]	TiO_2 [%]	SO_3 [%]	Na_2O [%]	MgO [%]
AGLOMERÁT L1 EMĚ 01/2018	35,94	48,52	7,16	1,07	1,64	3,35	0,34	0,39	0,87
AGLOMERÁT L3 EMĚ 17.4.2018	35,38	48,35	7,73	1,18	1,81	2,90	0,57	0,43	0,95
ŠKVÁRA Š1 EMĚ r. 2010	34,37	49,51	9,15	1,27	1,66	2,31	0,00	0,25	0,90
ŠKVÁRA Š2 EMĚ r. 2010	33,95	47,63	11,37	1,21	1,71	2,34	0,00	0,30	0,90
EMĚ Č 9. 5. 2018	35,03	48,20	7,68	1,22	1,90	3,17	0,55	0,48	0,99



Graf 15: Obsah sloučenin

Dle ČSN EN 450-1 musí být obsah oxidu křemičitého, oxidu hlinitého a oxidu železitého větší než 70 % hmotnosti, obsah alkálií ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$) nesmí být větší než 5,0 %

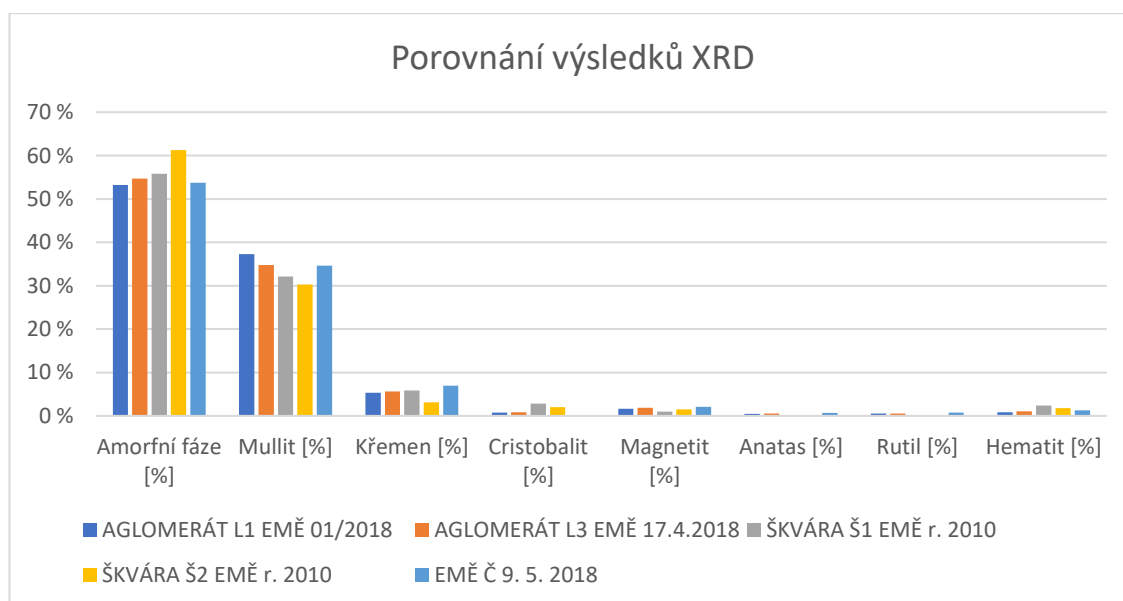
hmotnosti a oxidu hořečnatého nesmí být víc než 4,0 % hmotnosti, aktivní oxid křemičitý nesmí být menší než 25 % hmotnosti a aktivní oxid vápenatý nesmí být větší než 10 % hmotnosti, což je splněno ve všech 5 případech.

2.3.11 Rentgenová difrakční analýza – XRD

Rentgenová difrakční analýza byla provedena na všech vzorcích. Z výsledků v Tab.15 byl odečten přidaný zinek.

Tab. 13: Výsledky XRD

Označení vzorku	Amorfní fáze [%]	Mullit [%]	Křemen [%]	Cristobalit [%]	Magnetit [%]	Anatas [%]	Rutil [%]	Hematit [%]
AGLOMERÁT L1 EMĚ 01/2018	53,19	37,30	5,30	0,76	1,62	0,43	0,54	0,86
AGLOMERÁT L3 EMĚ 17.4.2018	54,70	34,81	5,62	0,86	1,84	0,54	0,54	1,08
ŠKVÁRA Š1 EMĚ r. 2010	55,78	32,11	5,84	2,81	0,97	0,00	0,11	2,38
ŠKVÁRA Š2 EMĚ r. 2010	61,30	30,25	3,12	2,03	1,49	0,00	0,00	1,81
EMĚ Č 9. 5. 2018	53,73	34,59	6,92	0,00	2,05	0,65	0,76	1,30



Graf 16: Porovnání výsledků XRD

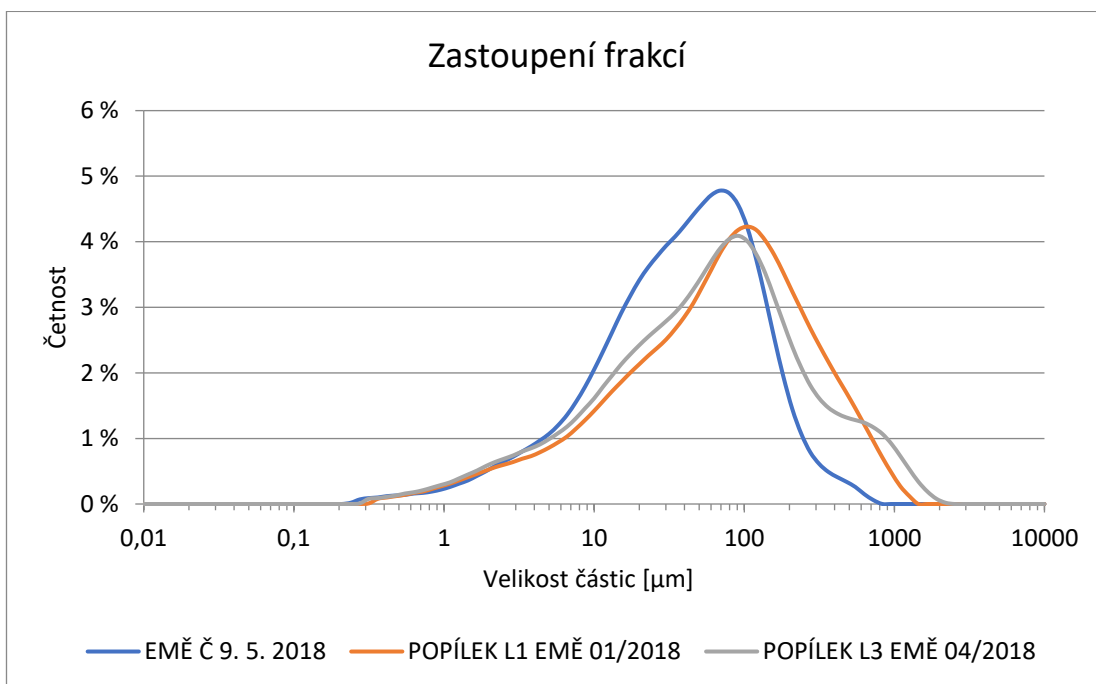
Z Grafu 16 můžeme vyčíst, že ve všech vzorcích je největší podíl amorfní fáze. Druhé největší zastoupení ve vzorcích má mullit. Většinu těchto krystalických fází vidíme v obrazové analýze.

2.3.12 Laserová analýza velikosti částic

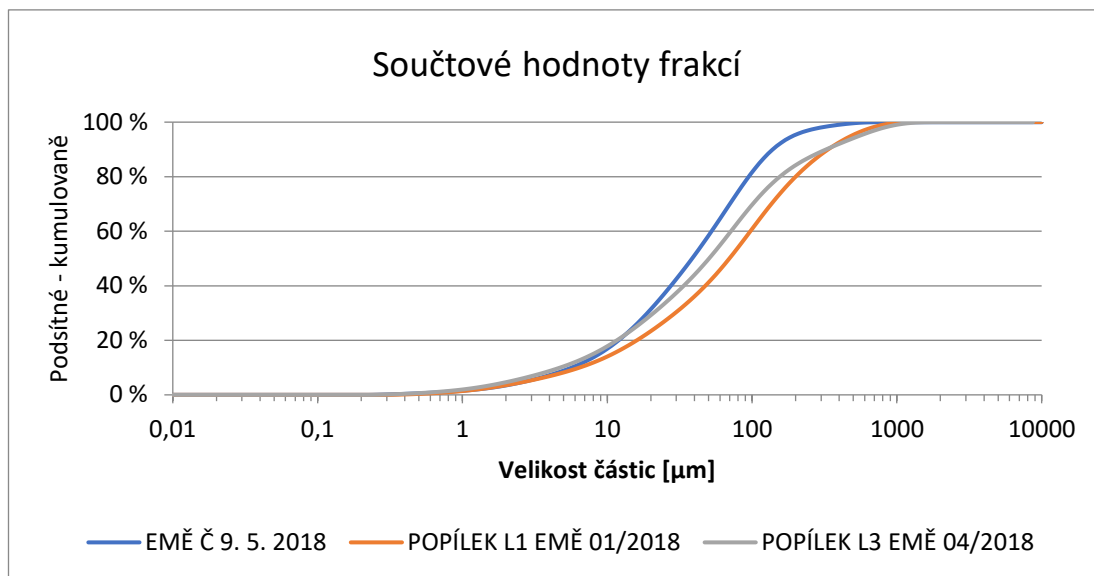
Laserová analýza byla provedena na nevysušeném čerstvém popílku a aglomerátu.

Tab. 14: Střední průměry a směrné parametry zrn

Označení vzorku	$d_{63,8}$ [μm]	d_{50} [μm]
AGLOMERÁT L1 EMĚ 01/2018	110,6	69,8
AGLOMERÁT L3 EMĚ 17.4.2018	93,6	58,0
EMĚ Č 9. 5. 2018	58,8	38,6



Graf 17: Diferenciální křivky frakcí velikosti částic



Graf 18: Integrální křivky zastoupení frakcí velikosti částic

Obecně lze říci, že velikost částic aglomerátu se pohybuje majoritně od 0,5 do 2000 μm .

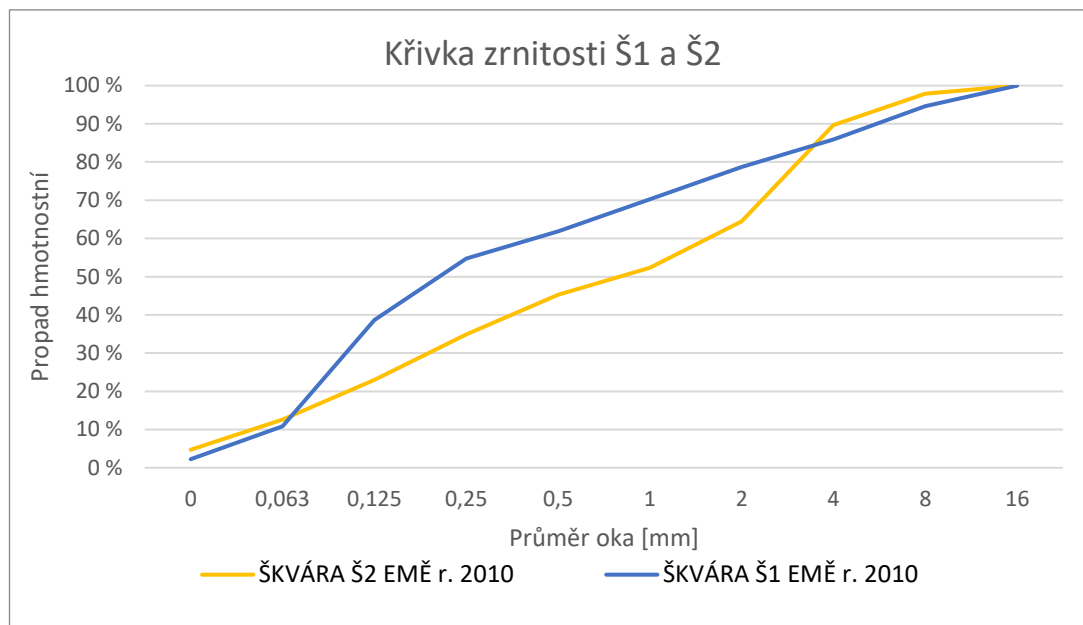
Čerstvý popílek se pohybuje v rozmezí 0,5 – 140 μm .

Aglomeráty mají velikost částic větší než čerstvý popílek. To může být způsobeno přímíchvaným obsahem škváry do aglomerátu nebo dobou uložení.

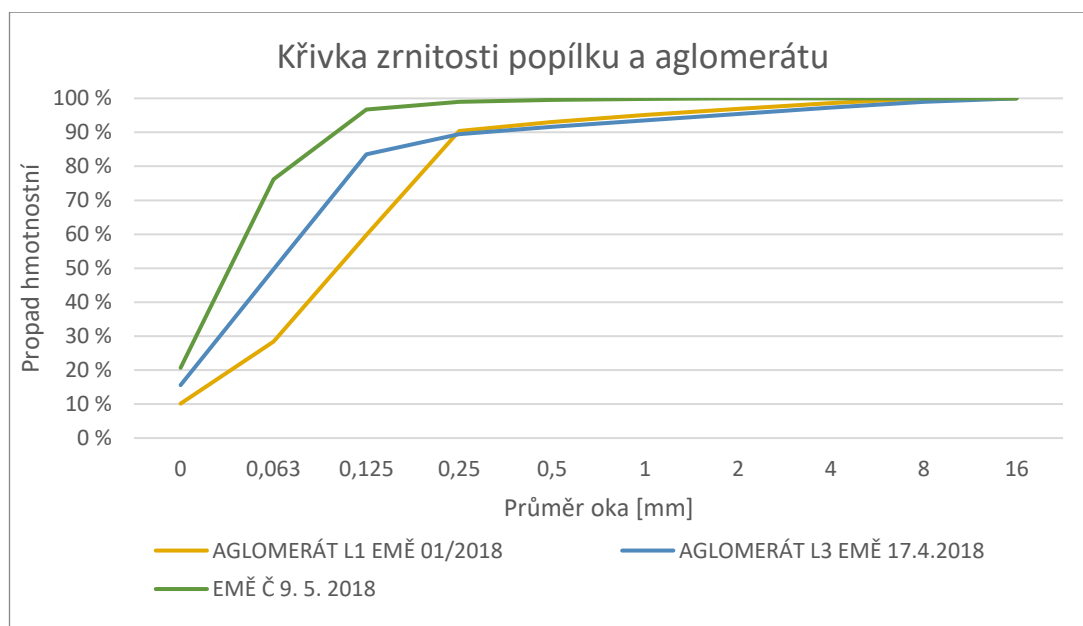
Pro srovnání v EPO se velikost částic pohybuje od 0,5 do 100 μm a v ETU od 0,5 do 130 μm . [6]

2.3.13 Sítový rozbor

Sítový rozbor byl proveden na obou vzorkách škváry.



Graf 19: Sítový rozbor škváry



Graf 20: Sítový rozbor popílku a aglomerátů

Graf č. 19 ukazuje, že škvára Š1 je hrubší než Š2. Škvára Š1 má největší obsah částí na síti s okem 0,063 mm. Škvára Š2 má největší zastoupení na síti s velikostí oka 2 mm. Čerstvý popílek má 100 % propadu sítím s velikostí oka 2 mm. Oba aglomeráty mají 5 % hmotnosti větší než 2 mm, proto je nutné pro jejich další použití ve stavebnictví přesítování.

2.4 Vyhodnocení

Sypná hmotnost zkoušeného čerstvého popílku z Mělníku je shodná se sypnou hmotností popílku z Tušimic. Pohybuje se mezi škvárou, která má sypnou hmotnost velmi nízkou a aglomerátem, který ji má naopak vysokou.

Měrná hmotnost aglomerátů je jen trochu menší než čerstvého popílku, který má podobnou měrnou hmotnost jako popílky z Počerad. Deponovanou škváru nelze jednoznačně zařadit.

Měrný povrch čerstvého popílku je díky obsahu jemných částic nejvyšší, což ukazuje laserová analýza velikosti částic. Vlivem obsahu škváry v aglomerátu je měrný povrch u deponovaných popílků nižší než u popílku čerstvého. Vzhledem k větším velikostem částic škváry je měrný povrch nízký.

Ztráta žiháním se u vysokoteplotních popílků díky spalování za vysokých teplot předpokládá nízká. U žádného vzorku toto tvrzení nebylo vyvráceno.

Rozdíl množství vody pro namíchání kaše normální konzistence se u všech vzorků pohybuje jen v rozmezí jednotek procent. Pro porovnávané vzorky z Počerad a Tušimic se množství potřebné vody zvětšuje až o desítky procent.

Doba počátku tuhnutí ve všech případech splňuje normu ČSN EN 450-1. Z výsledků zkoušky lze říci, že v porovnání s referenčním cementem se doba tuhnutí při použití škváry zkracuje, ale při použití popílku ať už deponovaného nebo čerstvého se prodlužuje.

Obrazová analýza ukázala u aglomerátů i čerstvého popílku obsah uhlí, popílku, škváry a výskyt ostatních krystalických fází dle rentgenové difrakční analýzy.

Rentgenová prvková analýza ukázala žádaný vysoký výskyt SiO_2 , Fe_2O_3 a Al_2O_3 u žádného vzorku se neukázaly velké rozdíly v procentuálním zastoupení.

Čerstvý popílek, aglomerát i škvára ukazují podobné objemové stálosti. Rozdíly jsou k požadovaným normovým limitům zanedbatelné. Stejně tak je tomu i u porovnávaných popílků z Počerad a Tušimic.

Celkově lze říci, že vlastnosti aglomerátů se příliš neliší od vlastností čerstvého popílku. Před jejich použitím je potřeba je vysušit a oddělit přesítováním větší kusy přimíchávané škváry.

ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá vlastnostmi vybraných deponovaných popílků a škváry. Porovnává jejich změny vzniklé skladováním na složišti s čerstvým popílkem produkovaným stejnou elektrárnou. Vyhodnocuje výsledky zkoušek vzhledem k normě ČSN EN 450-1.

V průběhu mojí bakalářské práce jsem popsala současnou situaci využití popílků v ČR a ve světě. Stav úložišť elektrárny Mělník (Panský les), elektrárny Tušimice (Stodola) a elektrárny Pruněrov (Severní lom). Přičemž zkoušené vzorky byly odebrány z lokality Panský les, protože aglomerát neobsahuje přimíchaný vápenec ani sádrovec.

Během zkoušek, které jsem prováděla v laboratoři VŠCHT v Praze, byly změřeny fyzikální, chemické a mechanické vlastnosti jednotlivých deponovaných popílků, škváry a čerstvého popílku z Mělníku. Následně jsem je porovnávala mezi sebou a zároveň i s výsledky zkoušek čerstvých popílků z Tušimic a Počerad, které jsem čerpala z bakalářské práce Ing. Petra Formáčka, studenta z Fakulty stavební ČVUT v Praze.

Tato práce může sloužit jako podklad pro další studium vlastností deponovaných popílků. Vzhledem k nízké hloubce odběru vzorků nelze říci, že se bude dosahovat podobných závěrů i z větších hloubek složišť. Navazující práce může přinést bližší poznání těchto materiálů. Všechny vytyčené cíle byly splněny.

Použitá literatura

- [1] ČSN EN 450-1, Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [2] *Rešerše současného stavu těžby deponovaných popílků*, FV30062 Možnosti využití deponovaných popílků z uhelných elektráren, 2017.
- [3] H. Kalousová, *VLIV PODMÍNEK SKLADOVÁNÍ NA KVALITU KLASICKÝCH POPÍLKŮ*, Diplomová práce, Brno: Bakalářská práce. Fakulta chemická. VUT v Brně., 2014.
- [4] „Struska,“ ZWA Company, spol. s.r.o., 2008. [Online]. Available: <http://www.strusky.cz>. [Přístup získán 1 Květen 2018].
- [5] a. ČEZ, „SKUPINA ČEZ,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.cez.cz>. [Přístup získán 3 Duben 2018].
- [6] P. Formáček, *Využití popílků ze spalování uhlí*, Praha: Bakalářská práce. Fakulta stavební. ČVUT v Praze, 2014.
- [7] S. Výzkumný ústav maltoivn, „VUMO, Popílek a jeho použití do betonu,“ [Online]. Available: http://www.vumo.cz/wp-content/uploads/2015/05/popilek_a_jeho_pouziti_do_betonu.pdf.
- [8] in PROJEKT LOUNY ENGINEERING s.r.o., *STUDIE - REKULTIVACE ODKALIŠTĚ PANSKÝ LES*, FV30062 Možnosti využití deponovaných popílků z uhelných elektráren, 2017, 2015.
- [9] P. Pištara, *KRAJINOTVORBA, REVITALIZACE A HUMANIZACE PROSTORU ODKALIŠTĚ PANSKÝ LES – III. ETAPA, Situace - terénní dorovnávký a povážky*, FV30062 Možnosti využití deponovaných popílků z uhelných elektráren, 2017, 2016.

- [10] P. Černoš a J. Janků, *ETU - STODOLA, Přepočet stability*, Praha: FV30062
Možnosti využití deponovaných popílků z uhelných elektráren, 2017, 2017.
- [11] H. Vondrák a V. Leitmann, *AKTUALIZACE POSTUPU UKLÁDÁNÍ VEP V
PROSTORU ÚLOŽIŠTĚ STODOLA PRO ROK 2017, Technická zpráva*,
FV30062 Možnosti využití deponovaných popílků z uhelných elektráren, 2017,
2017.
- [12] H. Vondrák, *PROJEKT KOMPLEXNÍHO ŘEŠENÍ REKULTIVACE ÚZEMÍ
SEVERNÍHO LOMU, B. Souhrnná technická zpráva*, FV30062 Možnosti
využití deponovaných popílků z uhelných elektráren, 2017, 2017.
- [13] P. Pišlara, *TVAR FINÁLNÍHO TĚLESA PTR SL - SITUACE*, FV30062
Možnosti využití deponovaných popílků z uhelných elektráren, 2017, 2016.
- [14] H. Vondrák, *AKTUALIZACE POSTUPU UKLÁDÁNÍ VEP V PROSTORU
ÚLOŽIŠTĚ SEVERNÍ LOM, Technická zpráva*, FV30062 Možnosti využití
deponovaných popílků z uhelných elektráren, 2017, 2016.
- [15] J. Červinková, „oEnergetice,“ OM Solutions s.r.o., [Online]. Available:
[http://oenergetice.cz/elektrina/vyroba-elektriny-uhli-ve-velke-britanii-klesa-
bezprecedentni-rychlosti/](http://oenergetice.cz/elektrina/vyroba-elektriny-uhli-ve-velke-britanii-klesa-bezprecedentni-rychlosti/). [Přístup získán 15 Duben 2018].
- [16] R. A. Carroll, „Coal Combustion Products in the United Kingdom and the
Potential of Stockpile Ash,“ Nashville, 2015.
- [17] M. R. Jones, M. J. McCarthy, L. Zheng, T. L. Robl a J. Groppo, „Experiences
of Processing Fly Ashes Recovered from United Kingdom Stockpiles and
Lagoons, their Characteristics and Potential End Uses,“ Lexington, 2009.
- [18] S. ČEZ, „VUMO,“ [Online]. Available: [http://www.vumo.cz/wp-
content/uploads/2015/06/04-soucasny-stav-vyuzitelnosti-energetickyh-
produktu-v-cr-kvalita-budoucnost-disponibilita.pdf](http://www.vumo.cz/wp-content/uploads/2015/06/04-soucasny-stav-vyuzitelnosti-energetickyh-produktu-v-cr-kvalita-budoucnost-disponibilita.pdf).
- [19] N. Benschaid a R. Hela, Příručka, Popílek v betonu, Základy výroby a použití,
Hostivice: ČEZ Energetické produkty vydává pro ASVEP, 2013.

- [20] *Marketingová studie / analýza trhu*, FV30062 Možnosti využití deponovaných popílků z uhelných elektráren, 2017, 2017.
- [21] ČSN 72 2071, Popílek pro stavební účely - Společná ustanovení, požadavky a metody zkoušení, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [22] ČSN 72 0103, Základní postup rozboru silikátů - Stanovení ztráty žháním, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [23] D. Stodola, *Fyzikální vlastnosti fluidních popílků pro využití ve stavebnictví*, Bakalářská práce, Praha: Bakalářská práce. Fakulta stavební. ČVUT v Praze., 2017.
- [24] ČSN EN 196-6 Metody zkoušení cementu - Část 6: Stanovení jemnosti mletí, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010.
- [25] ČSN EN 196-3 Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.
- [26] P. Bayer, Vliv popílku na vlastnosti cementových malt, Brno, 2012.
- [27] ČSN EN 933-1 Zkoušení geometrických vlastností kameniva - Část 1: Stanovení zrnitosti - Sítový rozbor, Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [28] P. Fečko, Fly Ash, Ostrava: VŠB, 2005.

Seznam tabulek

Tab. 1: Normy a technické podmínky [6]	12
Tab. 2: Normované požadavky na popílky do betonu [7].....	13
Tab. 3: Produkce VEP v ČR [18].....	27
Tab. 4: Stanovení vlhkosti	44
Tab. 5: Hodnoty sypné hmotnosti	45
Tab. 6: Měrná hmotnost	47
Tab. 7: Měrný povrch.....	48
Tab. 8: Stanovení ztráty žíháním	49
Tab. 9: Normální konzistence	50
Tab. 10: Počátky tuhnutí	51
Tab. 11: Objemová stálost	53
Tab. 12: Obsah sloučenin XRF	60
Tab. 13: Výsledky XRD.....	62
Tab. 14: Střední průměry a směrné parametry zrn.....	63

Seznam obrázků

Obr. 1: Elektrárny v ČR	14
Obr. 2: Doprava hydrosměsi na odkaliště	17
Obr. 3: Satelitní snímek elektrárny Mělník a složiště Panský les	18
Obr. 4: Zavodněná kazeta II.....	19
Obr. 5: Biologická rekultivace, etapa III	21
Obr. 6: Satelitní snímek elektrárny Tušimice a složiště Stodoly	22
Obr. 7: Situace výpočetních řezů	23
Obr. 8: Satelitní snímek elektrárny Pruněřov a složiště Severní lom	24
Obr. 9: Finální tvar tělesa PTR SL	24
Obr. 10: Návrh procesu úpravy popílku ze složišť na popílek podle normy EN 450 29	
Obr. 11: OA - L1 skutečný.....	55
Obr. 12: OA - L1 polarizovaný	55
Obr. 13: OA - L3 skutečný.....	56
Obr. 14: OA - L3 polarizovaný	56
Obr. 15: OA - Š1 skutečný.....	57
Obr. 16: OA - Š1 polarizovaný	57
Obr. 17: OA - Š2 skutečný.....	58
Obr. 18: OA - Š2 polarizovaný	58
Obr. 19: OA - Č skutečný	59
Obr. 20: OA - Č polarizovaný.....	59

Seznam grafů

Graf 1: Produkce vysokoteplotního popílku v různých státech	27
Graf 2: Oblasti využití energetických produktů v ČR [18].....	28
Graf 3: Použití popílku ve stavebním průmyslu v Evropě v roce 2009 v původních 15 státech EU [13].....	29
Graf 4: Stanovení vlhkosti vzorků	44
Graf 5: Sypná a setřesená hmotnost	45
Graf 6: Srovnání měrné a sypné hmotnosti.....	47
Graf 7: Měrný povrch.....	48
Graf 8: Stanovení ztráty žiháním	49
Graf 9: Normální konzistence	50
Graf 10: Průběh tuhnutí aglomerátu L1	51
Graf 11: Průběh tuhnutí aglomerátu L3	51
Graf 12: Průběh tuhnutí škváry Š1 a Š2.....	52
Graf 13: Průběh tuhnutí čerstvého popílku	52
Graf 14: Objemová stálost	53
Graf 15: Obsah sloučenin.....	60
Graf 16: Porovnání výsledků XRD	62
Graf 17: Diferenciální křivky frakcí velikosti částic.....	63
Graf 18: Integrální křivky zastoupení frakcí velikosti částic.....	64
Graf 19: Sítový rozbor škváry	65
Graf 20: Sítový rozbor popílku a aglomerátů	65